Digitális domborzatmodellek és alkalmazási lehetőségeik az árvízi kockázatkezelésben

Doktori (Ph.D.) értekezés

Bódis Katalin

Témavezető: Prof. Dr. Mezősi Gábor

Földtudományok Doktori Iskola Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék Szegedi Tudományegyetem, Természettudományi és Informatikai Kar

TARTALOMJEGYZÉK

| 1 Bevezetés | 5 |
|--|--------|
| 2 A digitális domborzatmodellek fogalma | 6 |
| 3 A digitális domborzatmodellek faitái | 8 |
| 3.2 Matematikai fürgivények | 0 0 |
| 2.2 Magaggági pontel rendszere | 9 |
| 2.4 Disitélie seinteur alale | 10 |
| 5.4 Digitalis szintvonalak | |
| 3.5 Vektoros feluletmodellek. | 12 |
| 3.6 Cella alapú domborzatmodell | 13 |
| | |
| 4 A digitalis domborzatmodellek forrasai | 14 |
| 4.1 A domborzat meghatározó pontjainak magassági adatai | 14 |
| 4.2 Magassági adatok térképi szintvonalak és völgyvonalak alapján | 14 |
| 4.3 Távérzékeléssel nyert magassági adatok | 15 |
| 4.3.1 Fotogrammetria | 15 |
| 4.3.2 Mikrohullámú távérzékelés | 15 |
| 4.3.3 Légi lézerletapogatás. | 17 |
| 4.3.4 Akusztikai mélységmérés | |
| | |
| 5 Nvilvános elérésű globális adatforrások az Interneten | 19 |
| 5 1 Global 30 Arc-Second Elevation Data Set (GTOPO30) | 19 |
| 5.2 Shuttle Dadar Tonography Mission (SPTM) | 21 |
| 5.2 Shutte Radai Topography Wission (SRTW) | 21 |
| 5.2.1 AZ SKTIM Addiok eloamidasa, verzioi | 21 |
| 5.2.2 AZ SKTM adatok elernetosege | 22 |
| 5.2.3 Az SRTM adatok alkalmazhatósága - példa | 22 |
| | |
| 6 A domborzatmodellezesben alkalmazott interpolaciok | 25 |
| 6.1 Háromszögelés | 25 |
| 6.2 Globális eljárások lokális alkalmazása | 26 |
| 6.3 Lokálisan adaptív közelítés | 26 |
| | • |
| 7 Digitális domborzatmodellek minőségének ellenőrzése | 28 |
| 7.1 Jellemző hibák | 28 |
| 7.2 Az egyes adatforrásokból származó modellek jellemző hibái | 28 |
| 7.2.1 Geodéziai felmérés pontadataiból generált domborzat jellemző hibái | 28 |
| 7.2.2 Digitalizált szintvonalak alapján interpolált domborzat jellemző hibái | 29 |
| 7.2.3 Távérzékeléssel nyert magassági adatok jellemző hibái | 29 |
| 7.3 A domborzatmodellek hibáinak észlelése | 29 |
| 7.3.1 Vizuális-grafikus technikák a hibafelderítésben | |
| 7 3 2 Egyszerű statisztikai módszerek a hibafelderítésben | 32 |
| 7 3 3 A hibákat jellemző mérőszámok | 32 |
| 7 4 Pontosság | 34 |
| 7.4.1 Tárbeli pontosság | 3/ |
| 7.1.2 Időbeli pontosság | 54 |
| 7.4.2 Tautolen pontosság | |
| 7.4.5 Tartanni pontossag | 30 |
| 8 Domborzatmodelleken végzett geometriai transzformációk | 37 |
| 8 1 Transzformációt követő változások a magassági ártákakhan | |
| 8 1 1 V oordináta randozarak ás tosztadatak | |
| 0.1.1 NUUUIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII | |
| 0.1.2 I ransziorman erlekek | 38 |
| 0 Domborzetmodellek előkészítése bidrológiai modellezésre | 40 |
| 7 Domoorzaumouchek ciokesznese mutorogiai mouchezeste | 40 |
| 9.1 A bemeryedesek tenonese a konnyezemek megteleloen | 40 |
| 9.2 KIVeses | 40 |
| 9.3 Adaptiv, osszetett modszer | 40 |

| 10 A digitális domborzatmodellek leggyakoribb derivátumai | 41 |
|--|---------|
| 10.1 Lejtőszög | 41 |
| 10.2 A lejtő kitettsége | 41 |
| 10.3 Görbület | |
| 10.4 Konvergencia Index | |
| 10.5 Cellánkénti vízgyűjtőterület | |
| 10.6 Topográfiai nedvesség index | |
| 10.7 Potenciális munkavégző képesség | |
| 10.8 LS faktor | |
| 10.9 Lefolyáshálózat | |
| 10.10 Részvízgyűjtők lehatárolása | |
| 10.11 Arnyékolás, besugárzás, 3D vizualizáció, beláthatóság | |
| 11 Cella-alanú gyülekezési modellek | 45 |
| 11 1 Egydimenziós lefolvás | |
| 11.1 D8 - Deterministic 8 | |
| 11.1.1 D8 - Deterministic 8 | |
| 11.1.2 Killo | |
| 11.2 1 Háromirányú lefolyás | |
| 11.2.1 Haronmanyu teroryas | |
| 11.2.2 Multiple Flow Direction (MFD-FD8). | |
| 11.2.5 $D \approx -$ Deterministic mining | |
| 11.3 Utkereso algoritmusok (Flow Tracing Algorithms) | |
| 11.3.1 Kinematikus utkereso algoritmus (Kinematic Kouting Algorithm, KKA) | |
| 11.3.2 DEMON - Digital Elevation Model Network | |
| 11.4 Stream burning technique | |
| 12 Domborzatmodellek a hidrológiai modellezés szolgálatában | 50 |
| 12 1 Bemeneti adatok feldolgozása módosított internoláció | 50 |
| 12.7 Demeneti dudiok relatigozda, modostou merpoliteto | |
| 12.2 Topograndoor szarmazatott adatok | |
| 12.2.1 Folias | |
| 12.2.2 Televinus | |
| 12.2.9 A kondok 12.3 Domborzatmodellek alkalmazásának további területei | |
| | |
| 13 Domborzatmodellből levezetett adatok felhasználása tározók árvízcsökkentő hatásának | |
| optimalizálásában | 55 |
| 13.1 Problémafelvetés | 55 |
| 13.2 Domborzatmodell alkalmazásához kapcsolódó feladatok | 56 |
| 13.3 Domborzatmodell alkalmazása a völgyzárógátak elhelyezkedésének meghatározásában | 56 |
| 13.4 Domborzatmodell alkalmazása a tározási görbék meghatározásában | 59 |
| 13.5 Domborzatmodellből levezetett adatok felhasználása optimalizálási eljárásban | 63 |
| 13.5.1 A tározó paraméterei | 65 |
| 13.5.2 Alkalmazott egyenletek | 66 |
| Folytonossági egyenlet (Bernoulli) | 66 |
| 13.5.3 Optimális tározó-leengedési stratégia | 67 |
| 13.6 Eredmények és további lehetőségek | 68 |
| | /1 (0 |
| 14 Nagyfelbontasu digitalis domborzatmodellek alkalmazasa sikvideki tarozok letesítésenek tervezes | eben 69 |
| 14.1 Bevezetés | |
| 14.2 Problémafelvetés | 70 |
| 14.3 Domborzatmodell alkalmazásához kapcsolódó feladatok | 71 |
| 14.4 Kıındulásı adatok és módszerek. | 72 |
| 14.5 A tározó digitális domborzatmodellje | 75 |
| 14.5.1 A domborzatmodell forrásai | |
| 14.5.2 A domborzatmodell előállítása | 75 |
| 14.5.3 A felszínmodell ellenőrzése | 76 |
| 14.6 A modell alkalmazási lehetőségei az árvízi védekezés tervezésévben | 78 |
| 14.6.1 Gyors területi és térfogati számítások | 78 |
| 14.7 Tározási görbe megadása a tervezéshez | 79 |
| 14.8 Lefolyásirányok meghatározása az elárasztás és kiürítés szimulálásához | 80 |
| 14.9 Eredmények és továbblépés | 81 |
| | |

| 15 Domborzatmodellek alkalmazása az árvízi kockázati térképezésben | | |
|--|-----|--|
| 15.1 Problémafelvetés, előkészítés | | |
| 15.2 Domborzatmodell alkalmazásához kapcsolódó feladatok és adatok | | |
| 15.3 A lokalizációs blokkok lehatárolása és geometriai paraméterei | | |
| 15.4 A lokalizációs blokkok elárasztásának szimulációja | | |
| 15.4.1 Vízmagasságok és térfogatok számítása | | |
| 13.4.2 Az egyes valószínűségekhez tartozó elöntések térképezése | | |
| 15.5 Kárbecslés a vízmélységek és területhasználati kategóriák alapján | | |
| 15.6 A becslések megbízhatósága | | |
| 15.7 Eredmények és további lehetőségek | 91 | |
| | | |
| 16 Domborzatmodellek alkalmazása kontinentális kiterjedésű hidrológiai modellekben | | |
| 16.1 A hidrológiai modell statikus bemeneti adatainak fejlesztése | | |
| 16.1.1 Domborzatmodell | | |
| 16.1.2 Gradiens térkép | 94 | |
| 16.1.3 A meder cellánkénti hosszának adatai | | |
| 16.1.4 A meder szélessége cellánként | | |
| 16.1.5 A meder mélysége cellánként | | |
| 16.1.6 A változtatások hatása a hidrológiai modell kimenetelére (vízhozam) | | |
| 16.2 Európai összegyülekezési hálózat | | |
| 16.3 Domborzatmodell-alkalmazás a kontinens léptékű árvízi térképezésekben | | |
| | | |
| 17 Összefoglalás | 107 | |
| | | |
| Summary | 110 | |
| | | |
| Köszönetnyilvánítás / Acknowledgements | | |
| | | |
| Irodalom | 114 | |

1 BEVEZETÉS

A digitális domborzatmodellek hidrológiai szempontú alkalmazásainak vizsgálata és bemutatása rendkívül aktualitás napjainkban, amikor számos nemzeti és nemzetközi projekt tűzi ki céljául az egyre gyakrabban és egyre szokatlanabb mértékben előforduló, hidrológiai folyamatokra visszavezethető jelenségek modellezését, előrejelzését, az általuk okozott károk csökkentését, helyes beavatkozással esetleg az okok megszüntetését vagy hatásuk mérséklését.

A domborzatnak, mint a táj egyik legmeghatározóbb elemének (Mezősi és Bódis 1999) modellezése alapvető fontosságúvá vált a környezeti kutatásokban (Moore et al. 1991; Goodchild et al. (szerk.) 1996; Burrough és McDonnell 1998; Longley et al. (szerk.) 1999, Wilson és Gallant (szerk.) 2000; Tóth et al. 2004; Hengl és Reuter (szerk.) 2007; Maune (szerk.) 2007; Peckham és Jordan (szerk.) 2007). A hidrológiai-jellegű problémák (szélsőségek, árvizek, aszályosodás, vízkészletek-vízgazdálkodás, talajerózió, éghajlatváltozás környezeti hatásai) felszaporodásával (pl. Rakonczai 2003; Samuels et al. (szerk.) 2008; EEA 2008) egyidejűleg a matematikai modellezés, az informatika – a digitális (tér-)adatfeldolgozás és elemzés, a geoinformatika, a távérzékelés, hardver és szoftver – fejlődése és elterjedése olyan új távlatokat nyitott a hidrológiai modellezés előtt is (Beven és Moore (szerk.) 1995; Bates és Lane (szerk.) 2000; Grayson és Blöschl (szerk.) 2000; Beven 2001), amely lehetővé tette a hidrológiai folyamatok részleteiben való vizsgálatát, és ezzel megteremtette az osztott paraméterű modellezés lehetőségét. Az osztott paraméterű modellezés alapelve, hogy a tér apró részleteiben (cellák, grid) írják le és elemzik a részfolyamatokat, amelyeknek egyik legfontosabb eleme a domborzat és annak deriváltjai. Ennek megfelelően a cella alapú digitális domborzatmodellek előállítása és elemzése, a digitális domborzati adatokból származó, modellszámításokon alapuló további adatok feldolgozása és a hidrológiai modellekben való alkalmazása számos külföldi és hazai kutatás célja, ugyanakkor a téma magyar nyelvű publicitása meglehetősen szűkös (Telbisz 2007).

Munkám célja kettős; a domborzatmodellek és domborzatmodellezési feladatok általános ismertetése, valamint a domborzatmodellek alkalmazhatóságának bemutatása különböző, az árvízi kockázati managementben nélkülözhetetlen, döntéstámogató hidrológiai modellezésben.

A dolgozat első részében a digitális domborzatmodellek fogalmát, különböző fajtáit, forrásait és előállítási módszereit, valamint a rajtuk leggyakrabban elvégzendő és elvégezhető geoinformatikai műveleteket foglalom össze, kiemelve a hidrológiai jellegű alkalmazási lehetőségeket. A dolgozat második részében három, a Tisza vízgyűjtőjén végzett esettanulmányt mutatok be hazai vonatkozásokkal, melyek során a domborzatmodellek felhasználását és így, az alkalmazott geoinformatika döntéselőkészítő szerepét ismertetem az árvízi védekezést célzó tervezési feladatokban (tározók feltöltése, elöntések), valamint az új védelmi létesítmények hatáselemzésére hidrológiai modellezésben és numerikus hidraulikai iránvuló vizsgálatok eredményeiben (tározók árvízcsökkentő hatásának optimalizálása, árvízi kockázati térképezés). A dolgozat utolsó előtti fejezetében a domborzatmodellekből származtatható információk, mint az osztott paraméterű hidrológiai modellekben alkalmazott statikus geoinformatikai rétegek, - egy kontinentális léptékű hidrológiai modell elvárásainak megfelelő szempontú – előállítási lépéseit ismertetem.

2 A DIGITÁLIS DOMBORZATMODELLEK FOGALMA

A digitális domborzatmodell fogalmát sokan és sokféleképpen definiálták; egyszerű megfogalmazásban a digitális domborzatmodell "a felszín térbeli változásait írja le digitális formában" (Burrough 1986; Moore et al. 1991), vagy még tömörebben "a felszín bármilyen digitális reprezentációja" (Goodchild és Kemp (szerk.) 1990).

Az egyik legáltalánosabban elterjedt fogalomhasználat alapján digitális domborzatmodellnek (Digital Elevation Model, DEM) nevezzük azokat a rendszereket, amelyek a földfelület magassági viszonyait modellezik, a természetes vagy mesterséges tereptárgyak nélkül (pl. Burrough 1986; Kertész 1991; Hutchinson és Gallant 1999; Jordán 2007). Ha ez a modell kiegészül a különböző felszíni objektumokkal (növényzet, építmények) és azok magassági jellemzőit is tartalmazza, akkor az előzőtől megkülönböztetően digitális terepmodellekről (Digital Terrain Model, DTM) szoktunk beszélni.

Több forrásmunka (pl. Burrough és McDonnell 1998; Hutchinson és Gallant 1999; Wilson és Gallant 2000; Longley et al. 2005) nem tesz kimondottan különbséget a magassági modellek között, valamint a gyakran összefüggő alkalmazások miatt is gyakori az általánosítás. Ha olyan modellünk van, amely a földfelszín magassági, vagy domborzati viszonyait ábrázolja, részben akár tartalmazva mesterséges, de a "terephez tartozó" objektumokat (pl. töltések, gátak), akkor összefoglalóan digitális magassági modellekről vagy digitális domborzatmodellekről (Digital Elevation Model, DEM) beszélhetünk, és annak pontos tartalmát az adott feladathoz igazítják.

Egyes szerzők alkalmazzák a Digital Elevation Matrix kifejezést is (pl. O'Sullivan és Unwin 2002; Konecny 2002), valamint néhány adatszolgáltató¹ a DEM és DTM fogalmát egymás szinonimájaként, a "puszta földfelszín" reprezentációjaként kezeli és a tereptárgyakat is tartalmazó modellre bevezették a digitális felületmodell (Digital Surface Model, DSM) megnevezést (Szatmári 2004a).

Az elterjedt általánosított fogalomhasználatnak megfelelően a nagyobb szoftverházak² is átvették a kevert elnevezéseket a termékeik által támogatott adatformátumok felsorolásában. Alkalmanként találkozhatunk a digitális reliefmodell (Digital Relief Model, DRM) megnevezéssel is (Dikau 1989).

Az eredeti, angol elnevezések részletes magyarázatát, magyar megfelelőit és ezek rövidítéseit (pl. digitális terepmodell - DTM, digitális domborzatmodell - DDM, digitális felületmodell - DFM) a hazai, geoinformatikai témájú összefoglaló források tisztázzák (Kertész 1991, 1997; Závoti 1994a).

¹ pl. Intermap, Digital Terrain Models (DTMs): http://www.intermap.com/right.php/pid/3/sid/15/tid/16 Intermap, Digital Surface Models (DSMs): http://www.intermap.com/right.php/pid/3/sid/15/tid/15 MapMart, Gigital Elevation Models, DSM and DTM: http://www.mapmart.com/dem/dem.htm ² ERDAS (ERDAS) ESBL (AraCIS)

² ERDAS (ERDAS), ESRI (ArcGIS)

Magyar felsőoktatási tananyagban (Mélykúti 2007) a következő fogalmakkal vezették be a topográfiai adatbázisok témakörét:

- DDM: Digitális Domborzat Modell, mely a terep (a talaj) fizikai felszínét meghatározott rendszer szerint elhelyezkedő diszkrét pontokban megadott magasságok segítségével írja le.
- DFM: Digitális Felszín (Felület) Modell, mely a terep és tereptárgyak felülről látható felszínét határozza meg, tehát figyelembe veszi a felszínborítottsági adatokat is.
- DSZM: Digitális Szintvonal Modell, mely a terep fizikai felszínét szintvonalak segítségével írja le.

A DDM a terep domborzati viszonyairól szerzett információk számszerű formában rögzített, célszerűen rendezet halmaza, a szükséges számítási eljárásokkal együtt, melyek segítségével további magassági adatok egyértelműen, megfelelő megbízhatósággal levezethetők.

Egy másik felsőoktatási tananyag (Sárközy 2003) meghatározásban "maga a domborzatmodellezés tulajdonképpen nem más, mint a terep ismert magasságainak felhasználásával olyan levezetetett termékek létrehozása, melyek bemenő adatként szerepelnek a domborzat hatásaira érzékeny valódi modellező eljárásokban".

A domborzatmodellezés célja tehát a megfelelő alkalmazás, amely érdekében az elméleti előkészítést és technikai lépéseket, körültekintően, a rendelkezésre álló lehetőségek ismeretében lehet csak megtenni. A következő fejezetek ezért a domborzatmodellek fajtáiról és forrásairól adnak rövid áttekintést, a rajtuk elvégzendő leggyakoribb műveleteket és a definícióban említett "levezetett termékek" jellemzőit foglalják össze.

Jelen dolgozatban a "valódi modellező eljárások" hidrológia jellegűek lesznek.

3 A DIGITÁLIS DOMBORZATMODELLEK FAJTÁI

A felszín digitális megjelenítésére, reprezentációjára több lehetőség van; a klasszikus csoportosítást követve megkülönböztetünk matematikai és képalapú módszereket (Mark 1978), amelyek tovább bonthatók a matematikai függvények, magassági pontok, digitális szintvonalak, szabálytalan háromszög hálózatok, valamint szabályos és szabálytalan tesszellációk rendszerére (Mark 1978, Peucker 1979; Peucker et al. 1979; Moore et al. 1991; Burrough 1986; Burrough és McDonnell 1998, Hutchinson és Gallant 1999; Mitas és Mitasova 1999; Boots 1999; Wilson és Gallant 2000; O'Sullivan és Unwin, 2002). Az adott alkalmazás jellege dönti el, hogy a felsoroltak közül melyik modell a legmegfelelőbb a felszín ábrázolására és elemzésére.

3.1 Funkcionális felületek

A modellkörnyezetként szolgáló geoinformatikai rendszerek egy alapvető jellemzője, hogy a földfelszínt funkcionális felületként kezelik, vagyis olyan folytonos felületként, ahol minden (x;y) koordinátához pontosan egy z értéket rendelünk hozzá.

A funkcionális felületek a szárazföld magassági viszonyainak ábrázolásán túl jól alkalmazhatók más felületek (pl. talajvíztükör mélysége, geológiai rétegek mélysége) modellezésére is. A funkcionális felületeket gyakran 2.5 dimenziós felületeknek is nevezzük (ESRI TIN 1994). Az elnevezés feltehetően arra utal, hogy a valós, három dimenziós térben minden fizikailag megjelenő objektumhoz tartozik valamilyen "vastagság" is, amit két z érték (z_{min} ; z_{max}) fog közre.

A földfelszínen is találkozunk a funkcionális felület folytonosságát megszakító jelenségekkel, például függőleges, vagy áthajló sziklafal esetén (3.1a ábra). Ezek a felszíni törések a felszín folytonosságának szakadásai. Ahhoz, hogy az ilyen szakadással terhelt felületeket is tudjuk ábrázolni funkcionális modellben, ezeket a szakadásokat egy olyan – közel függőleges – felszíndarabbal helyettesítjük, amely két párhuzamos törésvonalban metszi az eredeti felszínt, z értékként pedig az eltérő közelítési irányok szerinti z értékeket kapják (3.1b ábra).



3.1a ábra Nem funkcionális felület

3.1b ábra A z érték megadása funkcionális felület esetén

A bemutatott módszerrel a felszín ábrázolásakor feltételezzük, hogy az nem "csak" folytonos, hanem teljesíti a Lipschitz-tulajdonságot³ is, ezáltal feltételezve, hogy a felszín rendelkezik egyfajta simasággal, nem változik hirtelen, akármilyen nagyot.

³ Létezik olyan L nemnegatív valós szám, hogy minden, az f függvény értelmezési tartományában lévő x és y pontra fennáll az $|f(x) - f(y)| \le L |x - y|$ egyenlőtlenség.

3.2 Matematikai függvények

Több geoinformatikai rendszerben lehetőség van kétváltozós függvényekkel megadott matematikai felületek elemzésére, ahol a változókat az adott felszíni pont koordinátái adják. Előnye ezeknek a modelleknek, hogy az explicit egyenletek alapján tetszőleges felszíni ponthoz meghatározható a magassági érték (3.2 ábra), és a matematikai analízis módszereivel könnyen elvégezhetők a lejtési-görbületi viszonyokra vonatkozó elemzések a felület folytonosságának feltételével. Ugyanakkor meglehetősen nehéz találni olyan függvényt, vagy függvények sorozatát, amely jól közelíti a természetes domborzati viszonyokat (Peucker 1979). Valószínűleg ez az oka annak, hogy ezt a matematikai eljárást fizikai felületek esetében alkalmazzák gyakrabban (pl. az operatív meteorológiában a légnyomás mintázására), vagy statisztikai felületek (pl. demográfiai adatok) esetén. A leggyakoribb közelítési eljárásokat az interpolációkkal foglalkozó 6. fejezetben mutatom be.



3.2 ábra Két példa egyenlettel megadott felületekre (generátor: WinPlot).

A felületek matematikai függvényekkel való megadását gyakran alkalmazzák lokálisan érvényes analitikus felületek esetén, a nagyobb, egyetlen egyenlettel nem jellemezhető területeket kisebb egységekre bontva, és így több függvényt alkalmazva (Peucker 1979, Burrough 1986). Ez a gondolat az alapja a felületet szabálytalan síkháromszögek hálózatával megadó TIN modellnek (Peucker et al. 1979), valamint ezen alapszanak a grid-alapú domborzati modelleken simulósíkokkal elvégezhető lejtőszög, illetve görbületi számítások is (Burrough 1986; Zeverbergen et al. 1987; Moore et al. 1991; O'Sullivan és Unwin 2002). (ld. A digitális domborzatmodellek leggyakoribb derivátumai című 10. fejezet.)

A matematikai úton előállítható felületek között vannak a fraktál felületek is, amelyek a valós felszínhez hasonló tulajdonságaik alapján (Mandelbrot 1982; Goodchild és Mark 1987) vonhatók be különböző elméleti feladatokba (pl. egy adott domborzatmodell minőségének becslése, lépték- és felbontás függő elemzések) és gyakorlati alkalmazásokba (pl. érzékenységi vizsgálat domborzati paraméterekre vonatkozóan) (Mark és Aronson 1984; Bates et al. 1998; Hutchinson és Gallant 1999).

3.3 Magassági pontok rendszere

Az általános térbeli adatgyűjtési és mintavételezési eljárásoknak megfelelően (Mezősi 1994) a domborzatot is megadhatjuk – közelítően jellemezhetjük – véletlenszerűen, specifikusan vagy szabályosan elhelyezkedő, ismert magasságú pontok halmazával (Mark 1978).

A véletlenszerű magassági mintavételezés eredménye a domborzat jellegétől függetlenül, rendezetlenül szétszórt ponthalmaz, amelynek elemei a domborzat leírásában szerepet játszó fontosabb jellemzőket (völgy, csúcs, gerinc) vagy tartalmazzák, vagy nem. A statisztikai irodalom megkülönböztet egyszerű és rétegezett véletlen mintavételt (3.3a és 3.3b ábra).

A *domborzat-specifikus mintavételezés* a felszín lényeges változásait, fontos részleteit hivatott megragadni (lokális szélső értékek, törések, mint csúcsok, gödrök, nyeregpontok, völgytalpak, gerincvonal) és általuk leírni a felszín szerkezetét (Clarke 1990). A *progresszív mintavételezés* során, a domborzat-specifikus mintavételezéshez hasonlóan, a mintázás sűrűségét a felszín változásainak figyelembevételével, rekurzív eljárással végezzük (3.3c).

Ha a *mintavételezés szabályos rácsháló mentén* történik (3.3d ábra), a térben rendezett magassági adatok egy mátrixot alkotnak. Ebből a mintázási módszerből származtatott cella-alapú domborzatmodell az egyik legelterjedtebb, kiemelkedő jelentőségű. A szabályos mintavételezés történhet vonal mentén is, ilyenkor *keresztszelvények* modellezik az adott jelenséget (3.3e ábra)

A mintavételezés történhet *szintvonalak* mentén is, ilyenkor adott magassági értékek mentén történik a mintavétel (3.3f ábra).



3.3 ábra Mintavételi technikák a) egyszerű véletlen mintavétel, b) rétegezett véletlen mintavétel, c) progresszív mintavétel, d) szabályos mintavétel, e) keresztszelvény, profil, f) szintvonalak mentén történő mintavétel (Burrough és McDonnell nyomán)

A magassági pontok rendszere "ideális adatforrás" a legtöbb interpoláció számára (Hutchinson 1988; Hutchinson és Gallant 1999; Mitas és Mitasova 1999; Burrough és McDonnell 1998), vagy ad kiegészítő információt összetett domborzatmodell-alkotó eljárások elvégzéséhez (Hutchinson 1988).

3.4 Digitális szintvonalak

A Digital Line Graph (DLG) állományok topográfiai vagy síkrajzi térképi információk digitális vonalas megjelenési formái, amelyeket légifelvételek vagy térképek manuális vagy automatikus digitalizálásával nyerünk⁴. A domborzat tulajdonságait ábrázoló, térképi szintvonal (izohipsza) a tengerszinthez viszonyított azonos magasságú tereppontokat összekötő, önmagába visszatérő, képzeletbeli vonal (Klinghammer és Papp-Váry 1983). Szintvonalak alkalmazása a felszín ábrázolásának egyik legkifejezőbb – analóg – módja. A térképi szintvonalak megfelelő digitalizálásával (a kiegészítő jelek, pl. eséstüskék nélkül), illetve fotogrammetriai eljárás eredményeként hozhatunk létre digitális szintvonalakat (Digitális Szintvonal Modell - DSZM).

Annak ellenére, hogy a (digitalizált) szintvonalak jól leírják a felszínt, a geoinformatikai elemzések lehetősége több szempontból korlátozott. Először is az elérhető pontosság mind horizontálisan, mind vertikálisan az eredeti térkép méretarányától függ. A folytonosságot korlátozó tulajdonság, hogy nincs magassági információnk a szintvonalak közötti területekről, valamint, "túl sok" információt tartalmaz a modell a meredekebb lejtők esetén (párhuzamos szintvonalak), ugyanakkor a lankásabb felszínek alulmintázottak. További, technikai korlát, hogy a felszíni tulajdonságokra vonatkozó, egyszerű lekérdezések (pl. adott pontban a magasság, lejtőszög) is meglehetősen körülményesek (O'Sullivan és Unwin 2002).

A felsorolt korlátozások ellenére a digitális szintvonalak (3.4 ábra) gyakori forrásai a további domborzatmodellek előállításának (Clarke et al. 1982; Hutchinson 1988; Hoggan 1997; Hutchinson 1997; Carrara et al. 1997; Hutchinson és Gallant 1999; Wilson és Gallant 2000).



3.4 ábra A Velencei-hegység és környékének digitalizált szintvonalrajza⁵

⁴ USGS - Digital Line Graph - http://eros.usgs.gov/guides/dlg.html

⁵ Forrás: 1:10.000 méretarányú topográfiai térkép, szintvonalköz 1 m, szoftver: Arc/Info 9.1.3 (Bódis 1999)

3.5 Vektoros felületmodellek

A felület realisztikus ábrázolásához a szabályos rácsháló alapján mintázó modellek (ld. 3.6 Cella alapú domborzatmodell) felbontását úgy kell megválasztani, hogy a modell a legélénkebb reliefű területet is megfelelő részletességgel leírja, ugyanakkor ez a nagy felbontás a sík, vagy enyhén lejtő térszínek esetén jelentős redundáns adattárolással jár együtt. E redundanciát elkerülendőn, valamint a "valós világot", annak természetes egységeit, a terepviszonyok alaktani jellemzőit felhasználva Peuckert és munkatársai kidolgozták a szabálytalan háromszögelésen alapuló, vektoros felületmodellezési eljárást (Peucker et al. 1978, 1979).

A TIN (Triangulated Irregular Network) modellt egymással szomszédos, de át nem fedő háromszögek építik fel (Delaunay-háromszögelés⁶), amelyek csúcspontjait a térben szabálytalanul elhelyezkedő x, y és z koordinátáikkal (helyvektorukkal) adott pontok alkotják, ezáltal mintázva a felszínt. A modell által lefedett terület bármely (x;y) pontjához tartozó magassági értéket kiszámíthatjuk a koordinátageometriai összefüggéseket alkalmazva (McCullagh 1979; ESRI TIN 1994).

A modell adatszerkezete lehetővé teszi a topológiai jellemzők (közös pontok, élek, szomszédsági viszonyok) tárolását gyorsítva a felület jellegére vonatkozó elemzéseket, a modell felépítése, a csomópontok, élek, különböző erősségű törésvonalak a felszín alapvető tulajdonságainak; simaságának, folytonosságának modellezését segítik (Peucker et al. 1978, 1979).

A vektoros modelleket – a redundáns adattárolást nélkülöző szerkezetükből adódó kisebb méretük és így a "gyorsabb" megjeleníthetőség miatt – a realisztikus vizualizációt célzó technológiák alkalmazzák előszeretettel (Hutchinson és Gallant 1999; De Floriani és Magillo 1999). A megjelenítő alkalmazások között viszonylag ritkán, de találkozhatunk a szabályos háromszögháló (Triangulated Regular Network, TRN) fogalmával is (pl. Bitters 2001; Agüero et al. 2003), és tervezőszoftverek is alkalmazzák (pl. AutoCAD⁷) azzal a megjegyzéssel, hogy a szabályos háromszögháló simítja a TIN felületét és az eredmény ugyan nem hű reprezentánsa a modellezett térszínnek, de a 3D-s látványt nagyon hatásossá teheti.

A környezeti modellezésben és a természeti erőforrás-kutatásban a megjelenítésnek kisebb jelentősége van, továbbá ezeken a szakterületeken igen fontos adatforrást jelentenek a távérzékelt, képi adatok, valamint azok kombinációja a topográfiai adatokkal. A digitális képi információtároláshoz hasonló szemléletű adatszerkezetük és a különböző tematikájú információkon végzett komplex műveletek egyszerűsítése miatt a környezeti-földrajzi témájú kutatások alapvető domborzati modellje a szabályos mintavételezést követő, cella alapú domborzatmodell lett (Band 1999; Hutchinson és Gallant 1999).

Márkus Béla: Térinformatikai értelmező szótár, 1998,

⁶ Delaunay-háromszögelés: meghatározásonként három pont képez egy Delaunay-háromszöget, akkor és csak akkor, ha a rajtuk áthaladó kör nem tartalmaz más pontot.

http://fish.fomi.hu/termekekhonlap/adatbaziskezeles/szotar/szotarurlap.htm

⁷ EZYSURF, Surface Modelling Add-on for AutoCAD, http://www.ezysurf.com/Ezysurf/manual.htm

3.6 Cella alapú domborzatmodell

A földfelszín, mint matematikai függvénnyel meg nem adható funkcionális felület, végtelen számú ponttal jellemezhető. A háromdimenziós x,y,z koordináta rendszerben minden (x;y) koordinátával megadott ponthoz hozzárendelhető a magassági értékeke a harmadik, a z-tengely mentén.

A cella alapú domborzatmodell a vizsgált területet meghatározott sorrendben szabályos rácshálón (grid) elhelyezkedő cellákra osztja. Adatszerkezete megegyezik a geoinformatikában használt raszteres geometriai modellek szerkezetével (ESRI GRID 1994); a raszter elemei adott térbeli felbontás (a cella mérete) mellett mátrix-szerűen sorokba és oszlopokba rendezettek. Minden cella helyzete megadható a sor és oszlopszámával, vagy középpontjának (x;y) koordinátáival, és minden cella az általa reprezentált területre jellemzően egy értéket tartalmaz (Goodchild és Kemp (szerk.) 1990; ESRI GRID 1994; Végső 1994). A cella értéke a domborzatmodell-alkotó eljárás jellegétől függően jelenthet középponti értéket (pl. interpoláció során a cellaközéppontba eső magassági érték) és blokk-értéket (átskálázás során a területre vonatkozó statisztikai értékadás). A modell vertikális felbontását az adott számábrázolás mellett a felvehető értékek legkisebb előfordulható pozitív különbsége határozza meg.

4 A DIGITÁLIS DOMBORZATMODELLEK FORRÁSAI

A térbeli adatnyerés technikai eszközei, technológiai feltételei az elmúlt évtizedekben viszonylag könnyen hozzáférhetővé váltak. Abban az esetben, ha nem "saját mérések" alapján nyerünk térbeli információkat, különböző adatszolgáltatók által előállított nyilvános adatokhoz juthatunk, vagy azokat megvásárolhatjuk.

A digitális domborzatmodellek forrásainak három fő csoportját különíthetjük el, attól függően, hogy milyen domborzatmodell-előállító technikát alkalmazunk (Burrough 1986; Kertész 1997; Hutchinson és Gallant 1999; Nelson et al. 2007).

4.1 A domborzat meghatározó pontjainak magassági adatai

A magassági adatgyűjtés során különböző módszerekkel mérik fel a topográfiai értelemben jellemző, morfológiai alapon egyedi pontokat (csúcspontok, lefolyástalan mélyedések, gerincvonalak, völgytalpak, nyeregpontok, tereplépcsők), melyek meghatározzák a felszín szerkezetét (Clarke 1990). A felmérés történhet terepi mérések végzésével, hagyományos geodéziai módszerekkel (tachimetria), de a domborzat jellemző pontjai felmérhetők sztereo-felvételek fotogrammetriai úton való kiértékelése során is (ld. 4.3.1 alfejezet). A Globális Helymeghatározó Rendszerek (Global Positioning System, GPS) alkalmazása a hagyományos, távolságméréseken alapuló felméréseket váltja ki, vagy egészíti ki nagypontosságú adatokkal (Lange és Gilbert 1999), de általában elmondható, hogy a terepi felmérésekkel történő magassági adatgyűjtés csak viszonylag kis területek domborzati modellezését teszik lehetővé (Hutchinson és Gallant 1999). A felmért pontok rendszere azonban ideális adatforrás több interpoláció számára, beleértve a vektor-alapú felületmodellként említett szabálytalan háromszögmodellt (TIN).

4.2 Magassági adatok térképi szintvonalak és völgyvonalak alapján

A térképi szintvonalak és további, kiegészítő magassági információk (pl. földmérési háromszögelési pontok, csúcsok) alapvető fontosságúak a digitális domborzatmodellek előállításában (Clarke et al. 1982; Hutchinson 1988, 1997; Carrara et al. 1997; Hutchinson és Gallant 1999).

Az analóg topográfiai térképek, vagy azok szkennelt változatának szintvonalainak manuális digitalizálásával, vagy (fél)automatikus feldolgozásával a 3.3-as fejezetben bemutatott *magassági pontok* és a 3.4-es fejezetében összefoglalt *digitális szintvonalak* hozhatók létre, melyek megfelelő interpolációs módszerek mellett elsődleges forrásai lehetnek kis relieffel jellemezhető térszínek tereptárgyak nélküli modellezésének is (Hutchinson és Gallant 1999).

A domborzat jellegére utaló információkat és térképezett jelenségeket (pl. szintvonalak sűrűsége, eséstüskék, vízhálózat és/vagy völgyek nyomvonala és esésének iránya) is kiértékelve, kartometriai módszereket követve (Zentai 1991) összetett domborzatmodell-alkotó interpoláció elvégzésére van lehetőség (Hutchinson 1988, 1997).

4.3 Távérzékeléssel nyert magassági adatok

A távérzékeléssel nyert magassági adatok – hagyományosan is, valamint a legújabb technológiákat felhasználva is – fontos szerepet töltenek be a földfelszín ábrázolásában, a térképkészítésben és a domborzatmodellezésben.

4.3.1 Fotogrammetria

A fotogrammetria szoros kapcsolatban áll a raszter és vektor alapú geoinformatikával, a képfeldolgozási módszerekkel és a felületmodellezéssel. A fotogrammetriai kiértékelés a centrális projekcióval (perspektivikus leképezéssel) készített légi vagy űrfelvételek közötti sztereoszkópián alapul, melynek lényege, hogy az egyes földfelszíni objektumok a különböző forrásokból készített képeken másképp képeződnek le. A fotogrammetria feladata az eltérő leképeződések (parallaxisok) mérése és így térbeli koordináták számítása (Czimber 2001). A terepi méréshez hasonlóan a domborzat jellemző pontjai (csúcsok, mélyedések, gerincvonalak, völgytalpak, nyeregpontok, tereplépcsők) felmérhetők, valamint szintvonal kiértékelés is végezhető abszolút tájékozott modellen a mérőjel adott tengerszint feletti magasságban való végigvezetésével. Az így nyert magassági adatok – hasonlóan a 4.1 és 4.2 fejezetekben említett magassági pontokhoz és szintvonalakhoz – domborzatmodellt alkotó interpolációk forrásai (Detrekői és Szabó 1995; Hutchinson és Gallant 1999; Dowman 1999).

A részletesebb légifelvételek mellett az optikai sávú távérzékelési műholdak egymást átfedő felvételei is alkalmasak digitális fotogrammetriai kiértékelésre (pl. Landsat MSS a poláris zónában, SPOT Scene az 1B szintű feldolgozásnál, Landsat 7) (Mucsi 2004), vagy speciálisan a StereoSPOT⁸ és SPOT-Image Reference 3D képpárok (pl. Lodwick és Paine 1985; Konecny et al. 1987; Vincent et al. 1987; Gugan és Dowman 1988; Toutin 1998, 2002, Winkler et al. 2006). Az IKONOS rendszert is lehet úgy programozni, hogy sztereo képpárt kapjanak ⁹, melyeket akár automatikusan kiértékelve magassági modellt hoznak létre. A CORONA kémműholdak analóg felvételeit a digitális fotogrammetria módszereivel feldolgozva nagyfelbontású (2-5 m) felületmodell nyerhető (Galiatsatos, 2004; Mészáros et al. 2008).

4.3.2 Mikrohullámú távérzékelés

A mikrohullámú energia (hullámhossztól függően) áthatol a ködön, a felhőkön, az esőn, a füstön, valamint a mikrohullámok visszaverődésekor a földfelszín máshogy viselkedik, mint a látható fény tartományban; az enyhébb egyenetlenségek is érzékelhetők. Ezek a tulajdonságok a radarok (radio detection and ranging) alkalmazását – a hadászati jelentőségű, akár éjszakai felderítésen és navigáción túl – a természeti erőforrások kutatásában és a földfelszín térképezésében is lehetővé teszi (Mucsi 2004). A felszíni térképezésben végzett első, nagy volumenű alkalmazásoknak volt közvetlen hidrogeográfiai jelentősége is, mivel folyók addig nem ismert felső folyásának környékét sikerült feltérképezni, vagy becslést lehetett adni a terület vízkészletére (1967 Panama, 1971 Venezuela, 1971 Brazília¹⁰). A radaros felmérések geomorfológiai, geológiai és vízrajzi térképezést tettek lehetővé.

⁸ SPOT Stereo Imagery: http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00/ceos1/satellit/spotsys/english/oi_stere.htm

⁹ Stereo IKONOS Satellite Image: http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/ikonos.html

¹⁰ Projeto RADAMBRASIL (Radar of the Amazon): http://www.projeto.radam.nom.br/

Az említett felmérések oldalra néző repülőgépes radarrendszerekkel (side-lookingairborne-radar, SLAR, Real Aperture Radar, RAR) készültek. Az űrbeli radaros távérzékelés az 1978-ban felbocsátott SEASAT műholddal kezdődött (Mucsi 2004); minden rajta lévő szenzor mikrohullámú volt. A Radar Magasságmérő (Radar Altimeter, RA) szenzor mellett az első SAR (Synthetic Aperture Radar) rendszer is ezen a műholdon volt először¹¹. A SAR rendszerek antennája a kibocsátott rádióhullám visszaverődéseit, szóródásait érzékeli, majd azok megfelelő kombinációja és feldolgozása (pl. Doppler-szűrés) után történik a képalkotás¹².

A műholdas radarmérések felületmodellezésben való alkalmazására a kezdetektől (SEASAT, Marsh és Martin 1982) folyamatosan láthatunk példákat. A későbbi, különböző SAR rendszereknek is számos alkalmazásával találkozhatunk nagyobb térségeket érintő digitális felületmodellek generálásával kapcsolatba (pl. Topographic SAR, TOPSAR¹³, 4.1 ábra). Az IFSAR (InterFerometric Synthetic Aperture Radar) rendszerek regionális, vagy akár kontinens-lefedettségben is rendelkezésre állnak a hidrológiai alkalmazások számára (pl. Sanders et al. 2005; Assmann 2008), de az egységes rendszerű, nagyfelbontású, közel globális lefedettséget eredményező felvételezés csak az SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) program indításával valósult meg 2000-ben.



4.1 ábra A Vezúv háromdimenziós felvétele a TOPSAR adatok alapján¹⁴

A globális és kontinentális léptékű környezeti kutatásokban kiemelt helyre került SRTM adatok szabadon elérhetők az Egyesült Államok Geológiai Szolgálatának (U.S. Geological Survey, USGS) EROS Data Center-én keresztül, vagy különböző szintű feldolgozottságban több adatszolgáltatótól. Bővebben az 5-ös, a 'Nyilvános elérésű globális adatforrások az Interneten' című fejezetben ismertetem.

¹¹ SEASAT http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/list_of_satellites/seas_general.html

¹² Forrás: Jet Propulsion Laboratory, Imaging Radar http://southport.jpl.nasa.gov/

¹³ TOPSAR http://southport.jpl.nasa.gov/airsar/topsar/

¹⁴ Forrás: Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati http://www.corista.unina.it/minisar.html

A műholdas távérzékeléssel nyert felületmodellek előnyei közé sorolható, hogy viszonylag nagy területi lefedettséggel rendelkeznek egyre jobb felbontásban, ugyanakkor a földfelszínre, csupán a domborzatra vonatkozó további alkalmazások esetén korlátozást jelent, hogy a növényborítottság és a különböző mesterséges tereptárgyak szintén a részét képezik a magassági modellnek, ráadásul "nem borotválhatók le" róla automatikusan.

Ez a művelet – a felületmodellből való domborzatmodellé alakítás – a légi felvételezésű radarrendszerek esetén (pl. IFSAR) további összetett feldolgozással, félig automatizált szerkesztéssel (Assmann et al. 2008) már megoldható¹⁵.

4.3.3 Légi lézerletapogatás

A lézeres felmérés (Airborne Laser Scanning - ALS, Light Detection and Ranging - LiDAR) alapelve, hogy a műszer lézersugarat bocsát ki a földfelszín felé, és a szenzor méri a visszaverődés idejét, amelyből a távolság meghatározható (lézertávmérő). A klasszikus fotogrammetriai módszerekkel csak akkor mérhető a felszín egy pontja, ha legalább két képen látható; a lézerszkenner ezzel szemben egy méréséből is koordinátát határoz meg, feltéve, hogy a szenzor helyét és helyzetét pontosan ismerjük, (Szatmári 2004b). A módszer nagyon kisméretű objektumok (pl. vezetékek, emberek) érzékelésére is képes. Ennél a témánál érdekességként bemutatnám a baltimore-i baseball-játékos lézerszkennelt felületmodelljét (4.2 ábra).



4.2 ábra LiDAR, Level V (1m) – Baltimore, MD, Camden Yards (Turner 2001)

¹⁵ IFSAR alkalmazás, DDM, DFM: http://www.intermap.com/right.php/pid/3/sid/15

A 4.3 ábra felülnézeti és perspektivikus modelljét az Elba egy szakaszának 2 méter horizontális felbontású és centiméter élességű felületmodellt eredményező, lézerrel felmért adatsorának feldolgozásával kaptam.



4.3 ábra Keresztszelvények szerkesztése és az Elba árterének perspektivikus képe a terület LiDAR-alapú, 2 méter felbontású felületmodelljét felhasználva

A lézerszkennelés a sűrű növényborítottsággal rendelkező felszínek esetén is adhat információt a felszín magassági viszonyairól, mivel az impulzusok egy része a lombkoronán áthaladva a talajról verődik vissza és a modernebb szenzorok egy kibocsátásnak akár több visszavert jelét képesek érzékelni (Barsi et al. 2003). A hidrológia a lézerszkennelés nagyfelbontású (1 m) eredményeit az árvízi kockázati térképezésben és árvízi elöntés-szimulációra használja fel elsősorban (Jones 2004, Asselman et al. 2008; Bouwer et al. 2008; Dewals et al. 2008; Sole és Giosa 2008).

4.3.4 Akusztikai mélységmérés

A hanglokátor (szonár, SOund NAvigation and Ranging, SONAR) a víz alatti természetes és mesterséges tárgyak, halrajok felderítése mellett a víz alatti távolságmérésekre is használható (echométer), így a víz alatti domborzati viszonyok, a folyó- vagy tómeder, továbbá a tengerfenék tulajdonságainak feltérképezésére is alkalmas (Prónay és Törös 2001). A térképezésre használt készülék ultrahangimpulzusokat bocsát ki a víz alatt, és azoknak a visszaverődését érzékeli (aktív szonár), majd az eltelt időből a hang terjedési sebessége ismeretében számítják ki a távolságot. A mederfelvétel a hajózásban a biztonságos navigáció miatt, a vízügyi alkalmazásoknál a pontosabb hidrológiai számítások és becslések miatt szükséges. Az árvízi védekezésre irányuló numerikus hidrológiai modellezés és hidraulikai vizsgálatok korszerű topográfiai eleme a lézeres letapogatással nyert ártéri (a hullámtér és a környezete) felületmodell kombinálva a hanglokátoros folyómedermérésekkel (Dewals et al. 2008; Merkel et al. 2008).

Rövid, kritikai megjegyzés, hogy a szonáros mederfelmérési módszert nem említi a Bíró Tibor - Tamás János szerzőpáros "Térinformatika alapú medermodellek" című, 2003-as munkája.

5 NYILVÁNOS ELÉRÉSŰ GLOBÁLIS ADATFORRÁSOK AZ INTERNETEN

Globális vagy közel globális lefedettségben két nyilvános topográfiai adatbázis létezik. A korábbit, kb. 1 kilométeres horizontális felbontásban különböző források alapján hozták létre, az újabb adatbázis kb. 90 méteres felbontásban egy egységes mérési kampány eredménye.

5.1 Global 30 Arc-Second Elevation Data Set (GTOPO30)

A GTOPO30 magassági adatai teljes globális lefedettségű (±90 fok szélességek között), 30 szögmásodperces (0.008333333333333 fok, kb. 1 km) horizontális, és méteres vertikális felbontású, egységes digitális domborzatmodell.

A GTOPO30 forrásául 8 különböző, vektor- és raszter-alapú magassági adatbázist lehet megnevezni (1. táblázat); ezek egységes feldolgozásával hozták létre a harmonizált GTOPO30 adatokat. A vektoros adatforrások interpolálásához a felszín hidrológiai tulajdonságait is figyelembe vevő interpolálási eljárást alkalmaztak (Hutchinson 1988, 1989, 1996).

1. Táblázat A GTOPO30 forrásai és azok területi százaléka a teljes lefedettségben GTOPO30 forrása százalék

| | SEaEarch |
|--|----------|
| Digital Terrain Elevation Data (DTED) - raszter | 50.0 |
| Digital Chart of the World - eredeti méretarány 1:1,000,000, vektor | 29.9 |
| USGS fokos felbontású domborzatmodell - raszter | 6.7 |
| Army Map Service, méretarány 1:1,000,000, szintvonalak, magassági adatok | 1.1 |
| International Map of the World, méretarány 1:1,000,000, papírtérképek | 3.7 |
| Peru, méretarány 1:1,000,000, digitalizált papírtérképek | 0.1 |
| New Zealand DEM, 500 méter felbontású raszter | 0.2 |
| Antarctic Digital Database, digitalizált szintvonalak | 8.3 |

A GTOPO30 adatok abszolút pontossága nem egységes, a forrástól függ. Általánosságban elmondható, hogy azokon a területeken, ahol a magassági értékeket a már meglévő, nagyobb felbontású domborzatmodellekből (DTED) származtatták, nagyobb a vertikális pontosság (± 30 méter), ami 18 méteres RMS hibának felel meg. A vektoros adatforrású területek abszolút pontosság ± 160 méter (RMSE 97 m). A gridcellák közötti lokális eltérések, a relatív pontosság a számított abszolút pontosságnál kedvezőbb lehet¹⁶.

A Kárpát-medencét lefedő GTOPO30 adatokat felületesen szemlélve is jól láthatók a forrásul felhasznált topográfiai térképszelvények szélei, melyeket nem kellő gondossággal dolgoztak fel (5.1 ábra). Ezek az adatbevitelből származó hibák a lokális hidrológiai folyamatok domborzatalapú modellezését nehezítik (pl. lefolyáshálózat megadása), nagyobb léptékű modellezési feladatokra viszont az adat elérhetősége és viszonylagos pontossága miatt, valamint kiegészítve más adatokkal, széles körben alkalmazták (pl. Digital Elevation model for Pan Europe 1:3 Million scale, DEEU3M¹⁷, USGS 1999, GISCO 2001, Hiederer és de Roo 2003).

¹⁶ GTOPO30 Documentation: http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/README.html

¹⁷ GISCO Database Manual - part 2 - http://eusoils.jrc.it/gisco_dbm/al/de/dbm/alde_qe.htm

A vizuális összehasonlítás céljával mellékelem az azonos területre vonatkozó SRTM adatok alapján készült felszínt (5.2 ábra), amely adatok persze a más forrás miatt más jellegű hibákkal terheltek (ld. következő fejezet).



5.1 ábra A Kárpát-medence középső és keleti területe a GTOPO30 magassági modellben (1 km-es horizontális felbontás, méteres vertikális felbontás)



5.2 ábra A Kárpát-medence középső és keleti területe az SRTM magassági modellben (100 m-es horizontális felbontás, méteres vertikális felbontás)

5.2 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

A Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) magassági adatai közel teljes globális lefedettségben (az északi 60 fok és déli 57 fok szélességi körök között) a legegységesebb, viszonylag nagyfelbontású topográfiai adatbázist jelentik¹⁸.

5.2.1 Az SRTM adatok előállítása, verziói

Az adatok forrása egy speciálisan erre a célra kialakított duál-antennás interferometrikus radarrendszer (IFSAR) volt (a két antenna között 60 méter), amelyet a C-sávban (kb. 5 cm hullámhossz) és az X-sávban (kb. 3 cm hullámhossz) működtetve hozták létre az SRTM nyers adatait. A radart a Space Shuttle Endeavour fedélzetén 11 napig alkalmazták 2000. februárjában (Hensley et al. 2000; Hennig et al. 2001; Farr et al. 2007).

A felvételezés egy nemzetközi projekt keretében valósult meg, amelyet az Amerikai Egyesült Államok két intézménye, a National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) és a National Aeronautics and Space Administration (NASA) irányított. A két intézmény – NASA és az NGA – megállapodása értelmében a digitális topográfiai adatokat 1 szögmásodperc (kb. 30 méter) felbontásban tették nyilvánossá az Egyesült Államok területére és 3 szögmásodperc (kb. 90 méter) felbontásban az azon kívüli területekre (Timár et al. 2003). Az SRTM adatok vertikális felbontása méteres.

Az SRTM adatok kalibrálását, verifikálását és részletes hibaelemzését (kalibrációból származó hiba, abszolút és relatív magassági hibák, földrajzi helyzetből adódó hibák, véletlen hibák, hibaeloszlások, stb.) a NASA Jet Propulsion Laboratory-ban végezték (Rodriguez et al. 2005, Rodriguez et al. 2006). A hosszadalmas feldolgozási fázisok után a digitális topográfiai adatok publikálására 2003. januárjában került sor. Az első verzió nyilvánossá tétele és elterjedése óta eltelt idő alatt további lépések történtek az adatok javításának érdekében, melynek eredményeként újabb verziókat publikáltak (Slater 2006).

SRTM V1 – Az SRTM topográfiai adatok azon verziója, amelyet a nyers adatok alapján, természetesen a kalibrációt és validációt követően, de szerkesztés és minden további feldolgozás nélkül adtak át az NGA-nak. Az adatok sok hibás pontot, illetve adathiányt tartalmaznak (pl. vízfelületek, hegyvidékek esetén radar-árnyék). Ebből a verzióból még hiányzott Afrika, Ausztrália és a csendes-óceáni szigetek egy része.

SRTM V2 – A korábban hiányzó területekkel kibővült, elsősorban a vízfelületek, a parti zónák területének szerkesztésével (maszkolásával), valamint a lokálisan, véletlenszerűen jelentkező szélsőséges értékek szűrésével létrehozott adatbázis. Az SRTM V2 még mindig sok adathiányos cellát (viod) tartalmaz.

SRTM V3 – Az adatok javítására, a hibaszűrésre, a hiányzó adatok interpolációval való becslésére, vagy más, kiegészítő adatforrások alapján való kitöltésére (void-filling) nagyon sok erőfeszítés történt (pl. Grohman et al. 2006; Luedeling et al. 2007; Reuter et al. 2007a; Vrščaj et al. 2007). A véglegesnek szánt SRTM 3 az interpolációs műveletek során egy fél cellával "eltolódott" az előző verzióhoz képest.

¹⁸ Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/

SRTM V4 – Az előzőekben említett fél cellás elcsúszást korrigálták, valamint az összefüggő, nagy területek hiányzó értékeit próbálták megadni más forrású domborzatmodellek felhasználásával.

5.2.2 Az SRTM adatok elérhetősége

Az SRTM, mint nyilvános topográfiai adatbázis elérhető az Interneten. A letölthető adatokon kívül azok előállításának ismertetését, feldolgozását, irodalmi vonatkozásokat is tartalmaznak a következő források:

NASA FTP-szervere, az SRTM V1 és V2 adatok tölthetők le:

ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/

Amerikai Egyesült Államok, Geológiai Szolgálat (USGS),

The National Map Seamless Server, többszintű adatok, nézegetés, letöltés:

- http://seamless.usgs.gov/
- USGS, Earth Resources Observation and Science (EROS) Center:
- http://edc.usgs.gov/products/elevation/
- USGS, Shuttle Radar Topography Mission
 - http://srtm.usgs.gov/

Consultative Group for International Agriculture Research (CGIAR) CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)

Teljes körű ismertetés, "az elérhető legjobb minőségű SRTM adatok", SRTM V4:

http://srtm.csi.cgiar.org/

5.2.3 Az SRTM adatok alkalmazhatósága - példa

Hiába a majdnem globális lefedettség és a nagy felbontás, a véletlenszerű hibák (zaj) és a vegetáció, valamint az épületek és egyéb tereptárgyak okozta, szisztematikusnak vehető magassági értékeltolódás miatt az SRTM adatok azonnali alkalmazási lehetőségei meglehetősen korlátozottak. A hibák javítására és a további alkalmazások érdekében, a már említett 'void-filling' műveleteken túl, Kálmán-szűrő alapú simítási algoritmust is kidolgoztak (Gallant és Hutchinson 2006). A számításokhoz felhasználtak további, távérzékelt adatokat a vegetáció kiterjedésére és becsült átlagos magasságára vonatkozóan, valamint lézeres magasságmérésből származó információkat.

Az SRTM adatok egészének megfelelő korrekciója természetesen nem végezhető el rövid idő alatt; és a nagy területeket egységesen lefedő felületmodelleket igénylő alkalmazások kipróbálására azonnal, a csak részben javított adatok alapján, találunk példákat a hidrográfia-hidrológia szűkebb-tágabb területéről is. Három olyan, Európára vonatkozó általános elemzést említenék, amelyekben részt vettem:

- Pán-európai folyó és vízgyűjtő-adatbázis (Vogt et al. 2007),
- Az európai árvizek kockázatában várható változások a klímaváltozás következtében, (Feyen et al. 2006, 2008),
- Feltételezett elöntések térképezése az európai folyók árvizeinek és a tengerpartot veszélyeztető viharhullámok (5.3 ábra) kárbecsléséhez (Barredo et al. 2008a, 2008b).

A tengerparti viharhullámok kockázatszámításánál a pusztító hullámverés mértékének megadására és előfordulásuk valószínűségének becslésére (Vafeidis et al. 2005), valamint az elöntésnek potenciálisan kitett térszíneken okozható károk együttes felmérésére és értékelésére van szükség (Barredo et al. 2008b).

Első, nagyon leegyszerűsített megközelítésben, elöntött területként a tengerrel közvetlen összeköttetésben lévő, alacsonyabban elhelyezkedő térszínek jöhetnek szóba (5.3 ábra) a feltételezett hullámok magasságának megfelelően.



5.3 ábra A tengerparti területeket veszélyeztető, viharhullámok által feltételezetten elönthető térszínek 2 méter magas hullámverést feltételezve, Amsterdam környékén. A piros foltok a CORINE felszínborítási adatok 'Mesterséges felszín' osztályába tartozó területeit (grid_code = 1..11) mutatják (EEA 2000)

Az SRTM adatok jellegzetességét, és így a célra való korlátozott alkalmazási lehetőségét ugyanakkor az 5.4 ábrán látni igazán; a kimagasodó mesterséges felületek (beépített területek, ipari zónák, gátak, utak, vasutak töltései, az 5.3 ábra piros foltjainak, a mesterséges területeknek egy része) nem kerültek a szimulált elöntés alá.

Az alkalmazott modell így félrevezető számításokhoz vezethet az okozott károkat illetően: a sűrűn beépített területeken alulbecslés történik, míg a tengerhez topográfiai értelemben 'valahogy' csatlakozó, de a nyílt tenger felől ténylegesen fenyegető, komoly viharhullámoknak kis valószínűséggel kitett zónák területileg csalókán nagyobb érintettséget mutatnak (5.5 ábra). Ilyen hatása lehet a természetesen vagy mesterségesen majdnem lezárt tengeröblöknek, vagy a szárazföld felé mélyebben benyúló folyótorkolatoknak (Barredo et al. 2008b)



5.4 ábra A tengerparti területeket veszélyeztető, viharhullámok által feltételezetten elönthető térszínek 2 méter magas hullámverést feltételezve, Amsterdam környékén. A modellen jól látható az SRTM adatok Digitális Felületmodell jellege; a radarfelmérés követően a felszínhez tartozó mesterséges magaslatok is a modell részei



5.5 ábra A feltételezett viharhullámok által elönthető térszínek csak az SRTM adatok alapján való lehatárolása félrevezető, mivel a 'topográfiailag alkalmas' területek a nyílt tenger felől majdnem elzártnak tűnnek

6 A DOMBORZATMODELLEZÉSBEN ALKALMAZOTT INTERPOLÁCIÓK

A forrásként alkalmazott magassági pontok, a topográfiai értelemben jellemző, egyedi tereppontok vagy szintvonalak alapján generált domborzatmodellek elkészítéséhez az ismert leíró adatok felhasználásával tudjuk becsülni az ismeretlen adatokat, amelyhez interpolációra van szükség. Az interpoláció célja az értékek meghatározása olyan pontokban, ahol mérést nem végeztünk (Detrekői 1991).

A térbeli interpoláció azon a feltevésen alapul, hogy a térben egymáshoz közel elhelyezkedő pontok értéke nagyobb valószínűséggel hasonló, mint az egymástól messze levő pontoké (Tobler 1970, "a földrajz első törvénye"), ezért a matematikai eljárásokban (pl. fizikai jelenségek idősorelemzése) ismert globális interpolátorok, mint pl. a spline-elemzések, amelyek azt feltételezik, hogy minden interpolált érték explicit függ minden forrásként felhasznált adatponttól, nem alkalmazhatók. Nem alkalmazhatók azért sem, mert a valós földfelszín változásaira a jelentős irányfüggőség (anizotrópia) jellemező, és nem írható le az egész földfelszín csupán egy globális felület illesztésével. A lokális interpolációs módszerek (pl. inverse distance weighting - IDW, Kriging) domborzatmodellekre való alkalmazásánál pedig arra kell tekintettel lenni, hogy ezek az eljárások bizonyos megszorítások mellett, de tetszőlegesen illeszkedő felületet eredményeznek (Steiner 1990; Hutchinson és Gallant 1999). Több geoinformatikai szoftverben az elsők között hozzáférhető IDW módszer például egyáltalán nem alkalmas a domborzat közelítésére, mivel az ismert adatponttól való távolsággal nem a becsült adat értéke lesz kisebb, hanem annak valószínűsége, hogy az hasonlít majd a megadott, ismert értékhez (ld. Tobler törvényét ismét), így ennek az interpolációnak az alkalmazása a domborzat becslésére kimondottan hibás.

Az interpolációs eljárásoknak általánosan többféle osztályozása is megadható; pl. pontokon vagy tartományokon végzett az eljárás, globális vagy lokális módszert alkalmaz, egzakt vagy közelítő a művelet eredménye, determinisztikus vagy sztochasztikus a megközelítés, fokozatos vagy hirtelen változású az interpolációs folyamat (Burrough 1986; Závoti 1994b). Speciálisan a domborzatmodellek előállítására alkalmazott interpolációs módszerek kiválasztásánál figyelembe kell venni a földfelszín változásának jellemző tulajdonságait. Ez alapján három csoportba sorolhatók a célnak megfelelő interpolációk (Hutchinson és Gallant 1999).

6.1 Háromszögelés

Az eljárás során az ismert adatpontok felhasználásával egyértelmű hozzárendeléssel (adott szabály szerint, pl. Delaunay-háromszögelés) háromszöghálózatot hozunk létre, majd a háromszögekre egyenként (lokálisan) illeszkedő polinom függvényeket adunk meg és ezek alapján határozzuk meg az ismeretlen magasságú pont értékét. A legegyszerűbb esetben lineáris interpolációt alkalmaznak (ami a 3.5 Vektoros felületmodellek fejezetben ismertetett TIN (Triangulated Irregular Network) modellt hozza létre. A módszer meglehetősen érzékeny a bemeneti adatpontok elhelyezkedésére, pl. szintvonalak esetén sok lapos háromszöglapot eredményezhet (Hutchinson és Gallant 1999).

6.2 Globális eljárások lokális alkalmazása

Kisebb kiterjedésű, egymást részben átfedő területek bemenő adatain való globális interpolációk lokális alkalmazásával, majd az eredmények egymáshoz való illesztésével és simításával (Thin Plate Splines, TPS, Regularized Spline with Tension, RST) eredményesen lehet ötvözni a két megközelítés előnyeit a domborzatmodellezésben (Mitas és Mitasova 1988; Mitasova és Mitas 1993; Mitas és Mitasova 1999). A további domborzatmodellezésre irányuló alkalmazások, elemzések (pl. lejtés, görbültség, lefolyásirányok meghatározása, vízgyűjtő-lehatárolás) szempontjából előny, hogy az így meghatározott felszín első és második deriváltjai folytonosak (Mitasova et al. 1996, Hutchinson és Gallant 1999).

6.3 Lokálisan adaptív közelítés

Viszonylag sok, ismert bemeneti pontot tartalmazó magassági adaton hatékonyan és jó eredménnyel végezhető interpoláció a véges differenciák módszerét alkalmazó eljárásokkal. A felszín statisztikai tulajdonságait kihasználva (Goodchild és Mark 1987) a domborzatmodellek interpolációjára kidolgozott 'splines in tension' (Hutchinson 1989) módszerrel kiküszöbölhetők azok a kilengések (túlmagasítások, túlmélyítések), amelyek összetettebb, változatos térszínek esetén általában jellemzik a spline eljárok eredményeit. A felszín anizotrop jellegére vonatkozó kiegészítő információkkal, különböző, lokálisan érvényes megszorításokkal az eredmény tovább javítható. A kifejezetten a felszíni hidrológiai folyamatoknak megfelelő domborzatmodell generálására kidolgozott eljárás a szintvonalak és jellemző magassági pontok mellett a térszín ismert lejtéseit, valamint azok irányait, a völgy- és gerincvonalak hordozta információt is képes felhasználni a "hidrológiailag helyes" domborzatmodell létrehozása során (drainage enforcement algorithm). A módszert kidolgozó, majd azt tovább finomító ausztráliai Prof. Hutchinson az algoritmust részletesen publikálta (Hutchinson 1988; 1989; 1996), saját fejlesztésű célszoftverében (ANUDEM) alkalmazta (Hutchinson 1997), és találkozhatunk vele néhány kereskedelmi geoinformatikai szoftvercsomag függvényei között, pl. TOPOGRID néven az Arc/Info, ArcGIS szoftvereket fejlesztő Environmental Systems Research Institute (ESRI) is átvette a felhasználás jogát. Az implementált iteratív eljárás biztosítja a felszín simaságát elkerülve a hirtelen ugrásokat. Az alkalmazott többlépcsős interpolálás egy durvább felbontású rácshálóval közelíti a felszínt, majd azt finomítja tovább a felhasználó által megadott felbontásig (ESRI GRID 1994).

Az ANUDEM algoritmus megbízhatósága többek által bizonyított, széles körben elfogadott és alkalmazott (Hutchinson és Dowling 1991; Bódis 1998; Hutchinson és Gallant 1999; Wilson és Gallant 2000; Hutchinson és Gallant 2000, Hengl és Evans 2007; Peckham 2007; Reuter et al. 2007b; Vrščaj et al. 2007).

Az említett, hidrológiai folyamatoknak megfelelő tulajdonságok miatt a dolgozat interpolációval előállított domborzatmodelljeihez a Hutchinson-féle módszert alkalmaztam. Hirtelen változó térszínek (pl. egy gát két oldalán a hullámtér és a mentett oldal felülete megtörve a gát kimagasodásával) vagy meredek letörések esetén még az ANUDEM módszerrel sem lehet megfelelő modellt létrehozni. Ilyen esetekre bevezettük Lego-GIS fogalmát, a Hutchinson-féle módszerre darabonként előállítva majd összeillesztve a hasonló felületeket (Bódis et al. 2003; Szakál 2003; Barton 2004a, 2004b; Bódis és Szatmári 2005; Bódis 2007).

A 6.1 ábra a geoinformatikai rendszerekben általában elérhető, különböző interpolálási technikák eredményét foglalja össze a Velencei-hegység példáján. Az első öt módszer (6.1 A-E ábrák) szabálytalan sűrűségben elhelyezkedő magassági pontok alapján interpolált felületeket szemléltetnek. Az ábrákat összehasonlítva láthatók a közelítési eljárások eredményeire jellemző főbb ismérvek, pl. a 6.1 A ábrán a legközelebbi szomszéd alapján létrehozott felület lépcsőzetessége, vagy a 6.1 C ábrán a krigelés eredményezte tompítás, a 6.1 D és E ábrán a spline-ok néha túlzó értékei.



A) Legközelebbi szomszéd



B) Inverse Distance Weighted



C) Krigelés (szférikus variogram)



D) Spline with tension



E) Reguláris spline



G) Lineáris interpoláció a TIN modellel



F) Topogrid

A 6.1 F és G ábra felületének előállításakor az elsődleges adatforrást a szintvonalak jelentették. A 6.1 G ábra a digitális szintvonal töréspontjai között lineáris interpolációt alkalmazó TIN modellel készült, míg a 6.1 F ábra felülete az ismertetett összetett, lokális adaptív közelítő eljárás eredménye, felhasználva az ismert völgyhálózatot is.

6.1 ábra Felületmodelleket előállító, leggyakrabban alkalmazott interpolációk, példa: Velencei-hegység. A magassági értékek 98 és 351 méter között változnak. (Mitas és Mitasova 1999 nyomán)

7 DIGITÁLIS DOMBORZATMODELLEK MINŐSÉGÉNEK ELLENŐRZÉSE

A digitális domborzatmodellek minősége az előállításuk módjától függ elsősorban. Mivel a legtöbb alkalmazás a felszín alakját, a modellértékek egymáshoz való viszonyát, a jellemző mintázatokat és struktúrákat elemzi, ezért a domborzatmodellek minőségi vizsgálata nem csak az abszolút mérési hibák feltárására irányul, hanem a modellen belüli, a domborzat jellegének ellentmondó, kiugró, 'furcsa' értékek kiszűrésével is történik. A domborzatmodellek minőségellenőrzésébe is több módszer vonható be a vizuális-grafikus szemléltetéstől az összehasonlító statisztikai elemzésig.

7.1 Jellemző hibák

A különböző forrású domborzatmodelleket vizsgálva maguknak a magassági értékeknek, illetve a belőlük származtatott termékeknek a tipikus hibajelenségei három csoportba sorolhatók (Detrekői 1991), de az egyes hibatípusok keverednek is (Hutchinson és Gallant 1999; Wise 2000; Reuter et al. 2007b):

- hamis jelenségek (artefacts), durva hibák,
 - hiányzó értékek,
 - kiugró értékek (lyukszerű bemélyedés, pontszerű kiemelkedés),
 - illesztési problémák, élek,
 - tartalmi hibák (pl. a vegetáció és mesterséges objektumok jelenléte),
- szisztematikus hibák,
 - mérési technikából származtatható állandó torzulás,
 - a modellen végzett művelet (pl. transzformáció) eredményezte hiba,
 - szintvonalakkal megadott értékek nagyobb számú előfordulása,
 - teraszjelenség,
 - alkalmazott algoritmus (pl. kitettség) korlátaiból származó hiba,
- véletlen hibák, lokális zajok,
 - mérési hibák,
 - hibás interpolációból adódó zaj.

7.2 Az egyes adatforrásokból származó modellek jellemző hibái

A digitális domborzatmodellek forrásai fejezet felosztásának megfelelően a már részben érintett jellemzőket egészíti ki a következő összefoglalás.

7.2.1 Geodéziai felmérés pontadataiból generált domborzat jellemző hibái

A felszínre jellemző, a változásokat, görbületeket, szélső értékeket megadó pontadatok interpolálásához megfelelő sűrűségű mintavételezésre van szükség (ld. korábbi fejezetek). A terepi felmérés során nem csak a nagyobb kiterjedésű mintaterületeken nem végezhető el mindig a mérés, hanem a terep bejárhatóságától, a terepviszonyoktól, a növényzettől is függ, hogy hova juthatunk el a mérőműszerrel. A módszer kiegészíthet más felmérésékből származó adatokat, de csak a felmért pontok alapján a jelentős alulreprezentáltság miatt hamis képet kapunk a felszínről bármilyen interpoláció alkalmazásánál. Ha a nem kellő sűrűségű pontokon hibásan értelmezett interpolációs technikát alkalmazunk (pl. ritka, pontszerű hóvastagság adatokon végzett inverse distance weighting), akkor elméletileg is hibás eredményre jutunk.

7.2.2 Digitalizált szintvonalak alapján interpolált domborzat jellemző hibái

A digitális szintvonalak – hasonlóan a forrás térképi szintvonalakhoz – a felszínt erősen generalizálják, és a domborzat főbb jellemzőit leírják ugyan, de mivel nincs magassági információ a szintvonalak közötti területekről, ezért a csak a szintvonalak alapján történő közelítés általában nem a megfelelő térbeli mintavételezéssel történik. Az interpolálás jellemzően teraszokat, furcsa törésvonalakat, a szélső értékeket mellőzve lapos felületeket hoz létre hamisan, nem adja vissza a térszín természetes érdességét. A sűrű, kanyargó szintvonalak is félrevezethetik az interpolációt, túlmagasításokat és túlmélyítéseket eredményezve (Carrara et al. 1997). Az eredmény jelentősen javítható más jellegű, kiegészítő forrásadatok (magassági pontok, völgyvonalak és esésük iránya, gerincvonalak) felhasználásával (Hutchinson 1988; 1989; 1996).

7.2.3 Távérzékeléssel nyert magassági adatok jellemző hibái

A távérzékeléssel nyert adatok felhasználását körültekintő előkészítéssel kell megalapozni, mivel igen jelentős statisztikus hibával terheltek, amely egyrészt tartalmazza a mérőrendszer saját hibáját, valamint a domborzat egyenetlenségéből, a lejtők különböző meredekségéből adódó véletlen térbeli eloszlású mérési hibát (Hutchinson és Gallant 1999). A lézerrel és radaros technikával felmért felületmodelleken – az előző fejezetekben ismertetettek szerint – nem önmagában a puszta földfelszín képeződik le, hanem a legváltozatosabb felszíni, természetes és mesterséges felszínborítás kiemelkedései is a modell elemei lesznek. Adathiány is gyakran jelentkezik, az alkalmazott szenzortól is függően a felhőzet, árnyékolás vagy vízfelület hatására. Az így előállított magassági adatok további alkalmazásai előtt több lépést kell tenni a javítás érdekében, kiszűrni a detektálható hibákat, a hiányzó adatok helyére értékeket interpolálni, megfelelő eljárással 'leborotválni' az alkalmazás szempontjából zavaró tereptárgyakat (Gallant és Hutchinson 2006).

7.3 A domborzatmodellek hibáinak észlelése

A domborzatmodelleket terhelő hibákra a modellt, vagy annak egyszerűbb derivátumait (árnyékolás, lejtőszögek eloszlása, lejtők kitettségi értékeinek eloszlása) megjelenítve következtethetünk, vagy más esetekben a hibák számszerűsíthetők és statisztikai módszerekkel elemezhetők.

7.3.1 Vizuális-grafikus technikák a hibafelderítésben

A domborzatmodellt a teljes értékkészletére vonatkozó, átfogó jelkulccsal szemléltetve a durva hibák azonnal láthatóvá válnak (5.1 ábra). Ugyanezt a területet a domborzatárnyékolás módszerével szemléltetve az előbb már észlelt hibák még erőteljesebben szembeötlők (7.1 ábra).

Egy adott modellt összehasonlítva egy másik, általában referenciaként elfogadható modellel, a különbségek ábrázolása egyszerű módszerként szintén segít felderíteni a vizsgált domborzatmodell jellemzőit. A 7.2 ábrán a GTOPO30 modellt hasonlítottam az SRTM adatokhoz, amelyet az 5.2 ábra alapján 'sokkal jobbnak' gondolhatnánk. Az összehasonlítás mindkét adatról, a várható hibákról informál szemléletesen. Ugyanezt az összehasonlítást nagyobb területen (pl. egész Európára) végezve a várható, szisztematikus hibák egy része is felismerhető (7.3 ábra).



7.1 ábra A Kárpát-medence középső és keleti területe a GTOPO30 magassági modellben - domborzatárnyékolt ábrázolással



7.2 ábra A GTOPO30 és az SRTM V2 adatok numerikus összehasonlításával szemléltethető hibák, amelyek utalnak mindkét forrást terhelő hibákra. A zajok mellett a radarfelmérésekre jellemzően, látható pl. a Balaton felszínének adathiánya is



7.3 ábra A GTOPO30 és az SRTM V2 adatok numerikus összehasonlításával szemléltethető eltérések mutatják, hogy a nagyrészt topográfiai térképek alapján interpolált domborzathoz képest a hegyvidéki területeken várhatjuk a legnagyobb eltéréseket a távérzékelt adatokkal összevetve (Rosen et al. 2001; Rodriguez et al. 2006). A felhasznált modellben a 60. északi szélességtől északra az SRTM-ból hiányzó adatokat a GTOPO adatokkal pótoltam, így nincs eltérés

A későbbi fejezetekben is alkalmazom a szemléltetős technikát, pl. a lejtőszögek (gradiens) térbeli eloszlását térképezve voltak észrevehetők további durva hibák az GTOPO30 modell alkalmazásával kapcsolatban (16 fejezet, 16.3 ábra, A GTOPO30 topográfiai adatbázis alapján generált felszíni gradiens térkép).

Szintvonalak alapján interpolált felületek esetén gyakran alkalmazott eljárás a modellből a kontúrvonalak visszagenerálása, és azoknak a forrásadatokkal való vizuális összehasonlítása után, a szükséges helyeken további adatot felhasználni a kívánt mértékű közelítés elérésére (Hutchinson és Gallant 1999; Bódis 2007).

7.3.2 Egyszerű statisztikai módszerek a hibafelderítésben

A domborzatmodell minőségének további hiányosságait tárhatja fel a modelladatokon végzett gyakorisági eloszlás vizsgálata. A szintvonalak alapján generált modellekben gyakran megfigyelhető, hogy a szintvonalak által reprezentált értékek kiemelkedően nagyobb számban fordulnak elő, mint az azok közötti, egyéb értékek. A modellezett magassági adatok ily módon való torzulásának erőssége az alkalmazott interpolációs algoritmus következménye (Hutchinson és Gallant 1999).

A domborzatmodellekből származtatott lejtőkitettségek értékkészlete is általában nagyobb gyakoriságot mutat a 45 fok és többszöröseinek irányába, mivel az egyszerűbb keresőalgoritmusok (ld. 10. fejezet) általában ezeket az irányokat tüntetik ki. A felszíni hidrológiai elemzésekhez nélkülözhetetlen gyülekezési modellek (ld. 11. fejezet) is generalizáltan és esetenként erősen torzítottan jellemzik a lefolyási irányokat (7.4 ábra).



7.4 A Duna és az Elba vízgyűjtőjének az GTOPO30 adatok alapján generált lefolyási irányainak (Local Drainage Direction, LDD), valamint egész Európa SRTM adatok alapján generált lefolyási irányainak gyakorisági hisztogramja azonos mintát mutat. Az alkalmazott, legelterjedtebb algoritmus (D8) a főégtájak irányait erősen kitünteti, szemben a mellékégtájak irányával

7.3.3 A hibákat jellemző mérőszámok

Definíció szerint egy mérési eredmény hibája a mérési eredmény és a hibátlan érték különbsége. És mivel a "hibátlan érték" általában nem ismert, így a hiba értékét sem ismerjük (Detrekői 1991). A hibaelmélet a nem ismert mérési hibák jellemzésére különböző, valószínűségelméleti megfontolásokon alapuló mérőszámokat vezet be. Domborzatmodellek esetén a "mérés eredménye" a domborzatmodellben feltüntetett magassági érték, míg a "hibátlan érték" a valós tengerszint feletti magassága az adott pontnak vagy területnek. A domborzatmodellek kvantitatív hibaelemzésénél a "hibátlan érték" helyettesítésére egy másik, referencia-felületnek elfogadott domborzatmodellt vesznek alapul, amely ugyan szintén ismeretlen hibával terhelt, de a megállapodás értelmében (referencia-felület) a mérés várható értékét helyettesíti a négyzetes középhiba (Root Mean Square Error, RMSE) kiszámításában.

Négyzetes középhiba (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (z(p_i) - z_{ref}(p_i))^2}{n}}$$
 ahol
$$n - a vizsgálatba bevont pontok száma, z(p_i) - magassági érték a p_i pontban a vizsgát modellben, z_{ref}(p_i) - magassági érték a p_i pontban referenciamodellben.$$

A négyzetes középhiba dimenziója megegyezik a mért mennyiség (a vizsgált magassági adatok) dimenziójával és általában a gyökvonás pozitív gyökét veszik figyelembe (Detrekői 1991).

A domborzatmodellezésben legelterjedtebb négyzetes középhiba mellett az abszolút hibák megadására alkalmazzák az átlagos hiba (Mean Error, ME) és a hibaszórás (Error Standard Deviation, ESD) fogalmát is¹⁹:

Átlagos hiba (ME)

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n} |z(p_i) - z_{ref}(p_i)|}{n}$$
ahol

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n} |z(p_i) - z_{ref}(p_i)|}{n}$$
ahol

$$n - a vizsgálatba bevont pontok száma,
$$z(p_i) - magassági érték a p_i pontban a vizsgát modellben,
$$z_{ref}(p_i) - magassági érték a p_i pontban referenciamodellben.$$$$$$

Hibaszórás (ESD)

$$ESD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (z(p_i) - z_{ref}(p_i) - ME)^2}{n}}$$
 ahol
$$n - a vizsgálatba bevont pontok száma, z(p_i) - magassági érték a p_i pontban a vizsgát modellben, z_{ref}(p_i) - magassági érték a p_i pontban referenciamodellben, ME - átlagos hiba.$$

Hasonlóképpen a vizsgált domborzatmodell szisztematikus, rendszeres hibáját, torzítását (bias) az adott modell és a referenciamodell átlagos eltérésével jellemzik:

| Torzítás (BIAS) | |
|-------------------------------|---|
| | ahol |
| $BIAS = avg(DDM - DDM_{ref})$ | <i>avg</i> - átlagolást végző operátor, |
| | DDM - a vizsgát modell lokális értékei, |
| | DDM_{ref}) - a referenciamodell lokális értékei. |

A felsorolt mérőszámok a domborzatmodell vertikális pontosságát jellemzik, de nem tartalmaznak információt a horizontális pontosságról és a hibák térbeli eloszlásáról (Veregin 1999). A domborzatmodellek bizonytalanságára és a hibaterjedés elemzésére további geostatisztikai módszerek is rendelkezésre állnak (Burrough és McDonnell 1998; Huevelink 1999; Temme et al. 2007; Amii et al. 2008).

¹⁹ A mérőszámok jelölésére a geoinformatikai szakirodalomban elterjedt – angol – rövidítéseket alkalmazom.

7.4 Pontosság

Általában a geoinformatikai hibaelemzésből levonható pontosság megadását a domborzatmodellek esetében is – ráadásul azok hidrológiai alkalmazásait szem előtt tartva is – három pontban lehet megadni; térbeli pontosság, időbeli pontosság és tematikus pontosság (Veregin 1999). Az egyes domborzatmodellekkel szemben támasztott pontosság-kritériumok az alkalmazás függvényében is változhatnak.

7.4.1 Térbeli pontosság

A domborzatmodellek térbeli pontosságát az előző pontban ismertetett mérőszámokkal lehet jellemezni. Domborzatmodellek vertikális pontossága általában jellemző a forrásra.

A felszínt reprezentáló szintvonalakból előállított domborzatmodellek esetenként méter alatti pontossággal rendelkeznek. Pl. az 1:10000 méretarányú topográfiai térképek szintvonalainak digitalizálásával előállított 5 m × 5 m rácssűrűségű, nagypontosságú magyar digitális domborzat modell magassági középhibáját az ország területét lefedő 55000 db negyedrendű háromszögelési pont pontleírás szerinti magassági értéke és a szintvonalak alapján levezetett DDM-ből interpolált magassági értéke közötti eltérések alapján \pm 70 cm értékkel jellemezhetjük (Winkler 2004; Winkler et al. 2006).

Ez az érték egy nagyságrenddel jobb az űrfelvételekből származtatott adatok pontosságánál, amelyek felhasználásával generált domborzatmodellek általános magassági hibája 1-10 métertől 100 méterig terjed (Harding et al. 1994). A SPOT-R3D termékspecifikáció szerint az adatbázis magassági megbízhatóságát (m_z) az EGM-96 elnevezésű geoid felett, 90%-os konfidencia szinten, a következő értékek jellemzik:

- ha a lejtőérték < 20%, akkor $m_z = \pm 10$ m;
- ha a lejtőérték 20%–40% közé esik, akkor $m_z = \pm 18$ m;
- ha a lejtőérték > 40%, akkor $m_z = \pm 30$ m.

A távérzékeléssel nyert domborzatmodellek pontossága a felszínborítástól is függ; a magyarországi mezőgazdasági területekre vonatkozóan lejtőkategóriák szerint vizsgálatokat Winkler és munkatársai végeztek (Winkler et al. 2006).

A légi SAR (Synthetic Aperture Radar) adatokból származtatott felületmodellek magassági hibája 1-3 méter körül lehet (Dixon 1995) az IFSAR (InterFerometric Synthetic Aperture Radar) alapú felületmodellek 0,3-2 méter, domborzati modellek 0,5-2,5 méter (Shepherd et al. 2002), míg általánosságban elmondható, hogy a lézerszkenneres felmérés pontossága magassági értelemben kb. 5-10 cm (Barsi et al. 2003).

Az GTOPO30 domborzati adatbázis vertikális pontossága a forrástól függően ± 30 méter és ± 160 méter között változik²⁰. Az SRTM adatok globális, kontinensenkénti kiértékelésénél meghatároztak abszolút helyzeti hibát (7-13 m), abszolút magassági hibát (6-9 m) és relatív magassági hibát (5-10 m) (Rodriguez et al. 2006).

²⁰ GTOPO30 Documentation: http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/README.html

A domborzatmodellek horizontális pontossága a domborzatmodellek származtatásától (pontértékre vagy blokkértékre vonatkozó adatokat tartalmaz-e) és felbontásától függ. Szemléltetésként az ismertetett radartechnológiák (SRTM, IFSAR) és a lézeres felmérés eredményeként kapott modelleket mutatom be (7.5 ábra).



7.5 ábra Különböző szintű radar- és lézerszenzoros mérések eredménye (Turner 2001)

A feszíni hidrológiai modellezésére irányuló DDM alkalmazások szempontjából, de általában a legtöbb morfometriai, vagy környezeti-geomorfológiai vizsgálat szempontjából is a magassági értékek relatív pontosság jelentősebb (Wise 2000). Az abszolút magasságok a légköri hidrológiai jelenségek becslésében, pl. a magassági korrekció a hőmérséklet és csapadék/hó interpolációban jelentősek (Hofierka et al. 2002, Szabó 2005).

7.4.2 Időbeli pontosság

A geoinformatikai adatbázisoknál az időbeli pontosságot a modell által tartalmazott értékek és a vizsgálat időpontjára vonatkozó értékek különbözőségével szokták jellemezni (Veregin 1999). A földfelszín magassági értékeit egy bizonyos felbontáson túl a változásokra érzékeny vizsgálatoknál már nem tekinthetjük statikusnak (pl. változó medermorfológia, hullámtér feltöltődés, új védelmi létesítmények módosító hatása). A digitális alapú hullámtér/ártér adatbázisok, keresztszelvényadatok valamint az árvízi kockázati térképek a terület vízügyi-igazgatási céljain túl a gazdasági-biztosítási szféra szempontjából is naprakész kell legyenek (Koncsos 2006; Maune (szerk.) 2007; NRC 2007; Tóth 2007).

7.4.3 Tartalmi pontosság

A hidrológiai folyamatok elemzéséhez, geomorfometriai vizsgálatokhoz a puszta földfelszín magassági adatainak ismereteire van szükség, bármilyen más felszíni objektum a modellezett folyamatot megtévesztő, hamis következtetésekre okot adó hibának számít (pl. az 5.4 ábrán bemutatott elöntés-szimuláció a modell alaptulajdonságai miatt nem jelölheti a sűrűn beépített övezeteket veszélyeztetett területként). A nagy pontosságú, szintvonalakból előállított domborzatmodellek rendelkeznek azzal az előnyös tulajdonsággal, hogy csak a 'puszta földfelszínt' tartalmazzák (Winkler 2004), míg a távérzékeléssel – képalkotó eljárásokkal – készített modellekből a felszínborítás (épületek, növényzet) hatásait is ki kell szűrni, és a digitális felületmodellekből utólagos eljárással domborzatmodellt szerkeszteni (Shepherd et al. 2002; Maune (szerk.) 2007; Reuter et al. 2007b).

A hibák – esetenként felerősödve – a domborzatmodellen végzett műveletekkel továbbadódnak a belőlük származtatott modellekre (Burrough és McDonnell 1998) és hatásuk az arra érzékeny hidrológiai modellek eredményeiben is (pl. felszíni lefolyás) erőteljesen jelentkezik (Wise 2007).

A tereptárgyakat is tartalmazó domborzatmodellek a nagy felbontásuk és realisztikus felületábrázolásuk miatt természetesen más célokra megfelelőek és egyre szélesebb körben alkalmazottak; pl. perspektív leképezésű légifelvételek ortorektifikációja, 3D navigációs rendszerek fejlesztése, 3D vizualizáció (akár árvízi elöntéseké), 3D szimulációs alkalmazások fejlesztésére, pl. repülő szimulációk, légi irányítás²¹.

²¹ Intermap, "Safer flights and happy landings" http://www.intermap.com/uploads/1216077472.pdf
8 Domborzatmodelleken végzett geometriai transzformációk

A földrajzi jellegű adatok, a térbeliség – a feladat, hogy adatainkat elhelyezhessük a fizikai földrajzi térben, méréseink alkalmával adott mértékegységet használhassunk, egységes koordináta-rendszerben, közös méretarányban jeleníthessük meg azokat, majd a különböző geoinformatikai és távérzékeléses műveletek során a vizsgált területről teljesen új információk birtokába juthassunk – szükségessé teszi az adatok térbeli harmonizációját, melyhez geometriai transzformációkra van szükség.

Adott adatforrások mellett a domborzatmodellek pontosságát befolyásoló két legfontosabb matematikai műveletcsoport az interpolációk és a transzformációk. A domborzatmodellezésben gyakori interpolációk tulajdonságait a 6. fejezetben, a geometriai és geoinformatikai transzformációkat és általános alkalmazásukat a 'Geometriai transzformációk, transzformációs egyenletek és alkalmazásuk a geoinformatikában' című dolgozatomban foglaltam össze (Bódis 1999). Geometriai transzformációt (koordináta-transzformációt, projekciót) a már tartalmilag teljes domborzatmodellen is végezhetünk.

8.1 Transzformációt követő változások a magassági értékekben

Földrajzilag azonos területre vonatkozó, de különböző koordináta-rendszerekben lévő domborzatmodellek eltérőek lehetnek (helyzetileg, értékkészletben és az értékek gyakorisági eloszlásában is), mivel a koordináta-transzformáció során az értékek torzulnak. A torzulás oka a koordináta-transzformációval általában együttesen történő térbeli felbontás megváltoztatása és az új értékadást eredményező interpolációs eljárás (újramintázás problematikája).

8.1.1 Koordináta-rendszerek és tesztadatok

A koordináta-transzformációval együtt járó torzulások bemutatásához több tesztet végeztem el Európa középső részét lefedő, cella-alapú modelleken (8.1 ábra). A kiindulási adatok a WGS84 (World Geodetic System 1984, nagytengely: 6378137 m, kistengely: 6356752.31424518 m) ellipszoidként ismert alapfelületen, földrajzi koordinátákkal megadott referencia rendszerben voltak. A raszter horizontális felbontása 30 szögmásodperc (0.0083 fok, kb. É-D-i 1 km) volt, ami megfelel a GTOPO30 felbontásának. A tesztelt raszterek egyike 0 és 1000 között egyenletes eloszlásban, de térben random módon kiosztott értékekkel rendelkezett (8.2 ábra), míg a másik bemeneti raszter sakktábla-szerűen, cellánként bináris értékeket tartalmazott.

A cél koordináta-rendszer a méter alapú ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) Lambert Azimuthal Equal Area koordináta rendszer (GRS80 ellipszoid), az északi szélesség 52 fok, keleti hosszúság 10 fok kezdőkoordinátákkal, 3210 km-es északi és 4321 kmes keleti eltolással (Annoni et al. (szerk.) 2001), a területre vonatkozó, ajánlott európai vetületi paramétereknek megfelelően. A kimeneti raszter felbontása 1 km.



8.1 ábra Mintaterület (kék)

8.1.2 Transzformált értékek

A transzformáció során a szükséges újramintázás (pl. a fokhálózatból a metrikus rendszerbe való áttérés, rektifikáció, léptékváltás) miatt a reprezentált cellaértékek újbóli meghatározására van szükség. Az alkalmazott technikák a forrás cellaértékeken alapuló interpolációs eljárások, legelterjedtebben a képfeldolgozásban is alkalmazott legközelebbi szomszéd alapján történő értékadással, bilineáris közelítéssel vagy köbös konvolúcióval (ESRI GRID 1994).

A három közelítő eljárás a forrás eredeti értékkészletét különböző módon változtatja meg. A *legközelebbi szomszéd* kiválasztásával történő értékadás során az új értékkészlet megegyezik, vagy legfeljebb a felvett értékekben szűkebb, mint az eredeti halmaz, mivel lehet, hogy van olyan érték, ami az újramintázás során kimarad, nem veszi fel a kimeneti raszter. A *bilineáris interpoláció* a négy legközelebbi szomszéd azok távolságaival súlyozott átlagát adják a vonatkozó új cellaértéknek, következésképpen az eredeti értékkészletnél szűkebb tartományban kapunk interpolált, az eredeti értékektől numerikusan is eltérő értékeket. A *köbös konvolúció* a 16 legközelebbi szomszéd értékéhez illeszkedő, simuló görbe szerkesztésével határoz meg egy matematikai felületet, amelynek az adott cellaközéppontban felvett értéke lesz az új cellaérték. A módszerrel az eredeti értékkészlet tartományán kívüli értékeket is felvehet a transzformáció eredménye.

A tesztadatokon végzett transzformációk eredményei is mutatják a közelítő eljárások tulajdonságait (8.1 táblázat, 8.2 ábra).

| 8.1 | Táblázat | Cellaértékek | változása | а | WGS84 | rendszerből | az | ETRS89 | rendszerbe |
|------|--------------|--------------|-----------|---|-------|-------------|----|--------|------------|
| valć | ó áttérés so | orán | | | | | | | |

| Koordináta rendszer - módszer | felbontás | cellaszám | min | max | átlag | szórás | értékek |
|-------------------------------|------------|-----------|-----|------|-------|--------|---------|
| WGS84 - forrás | 0,0083 fok | 8640000 | 0 | 999 | 500 | 289 | forrás |
| ETRS - bilineáris | 1 km | 4763045 | 1 | 998 | 500 | 288 | szűkebb |
| ETRS - legközelebbi szomszéd | 1 km | 4763045 | 0 | 999 | 500 | 289 | azonos |
| ETRS - köbös konvolúció | 1 km | 4759694 | 0 | 1145 | 563 | 326 | bővebb |



8.2 ábra Az eredeti és transzformált cellaértékek gyakorisági megoszlása

A másik tesztet a sakktábla-szerűen kiosztott bináris értékeket tartalmazó raszteren végeztem az előzővel azonos, a 8.1 ábrán bemutatott területen. A kiindulási cellaértékek így fele-fele arányban (egyenként 4320000 cella) oszlottak meg. Az adaton elvégzett transzformáció során a nominális értékek esetén kizárólag alkalmazható 'legközelebbi szomszéd alapján' történő új értékadást alkalmazva az eredmény raszterben a cellák száma az előző mértékben csökkent, a különböző értékkel rendelkező cellák aránya változott ugyan, de csak kis mértékben (1 % alatti az eltérés), az értékek térbeli eloszlásában pedig a képfeldolgozásból és digitális grafikából ismert moiré-hatás jelentkezik (8.3 ábra, 8.4 ábra).



8.3 ábra Moiré-mintázat a bináris értékeken végzett transzformáció eredményeképp



8.4 ábra Az eredeti sakktábla-szerű mintázat eltolódásai a transzformációt követően

A geometriai transzformációt érdemes a forrásadatokon, még a domborzatmodell létrehozása előtt elvégezni, ha ez lehetséges. Ha már kész domborzatmodellt kell más referencia-rendszerbe helyezni, akkor az ismertetett átmintázások tulajdonságaira tekintettel kell lenni az alkalmazásnál. A globális GTOPO30 és SRTM adatokon az egész értékek megőrzése miatt a legközelebbi szomszéd módszer ajánlott.

9 Domborzatmodellek előkészítése hidrológiai modellezésre

A domborzatmodellek elsődleges alkalmazása a hidrológiai modellezésben a felszíni összegyülekezési és lefolyási irányok vizsgálatára szolgál. A lefolyási irányok lehető legjobban közelítő meghatározására több algoritmust is kifejlesztettek (ld. következő fejezet), de mind azon a feltevésen alapul, hogy a domborzatmodell mentes az algoritmikus hibák okozta, valószerűtlen, pontszerű túlmélyítésektől és nagyobb kiterjedésű, 'lefolyástalan' területektől. A domborzatmodellek minőségével szemben támasztott általános minőségi követelmények teljesítése mellett e 'gödrök' megfelelő kiszűrésével és elhárításával zavartalanná kell tenni a lefolyási 'útvonalakat' (Tarboton et al. 1991). A feladat elvégzésére rendelkezésre álló technikák különböző szintű előkészületeket igényelnek és eredményeikben is eltérők lehetnek.

9.1 A bemélyedések feltöltése a környezetnek megfelelően

Minden környezeténél mélyebb, lefolyástalan gödör feltölthető a szomszédos cellák legalacsonyabbjának szintjére, ezzel biztosítva legalább egy irányba az adott cellából való kifolyás lehetőségét. A módszer széles körben alkalmazott, ugyanakkor nagy kiterjedésű, teljesen lapos területek generálásához vezethet, elveszítve a felszín természetes hullámosságát, érdességét és lehetetlenné téve a lefolyás irányának meghatározását a legközelebbi 8 szomszédos cella alapján (Tarboton et al. 1991; ESRI GRID 1994; Soille et al. 2003; Soille 2004a).

9.2 Kivésés

Az elzárt cellák lefolyási irányának meghatározására dolgoztak ki olyan módszert, amely domborzatmodellt változatlanul hagyva és a feltöltéses módszert elkerülve határozza meg a lefolyási irányt, beleirányítva az adott cellát a legközelebbi, lefolyással rendelkező cellába, amellyel azonos részvízgyűjtőn feltételezik (O'Callaghan és Mark 1984). Hasonló, hidrológiai szemléletű megközelítéssel a lokálisan legalacsonyabb érték felől elárasztást szimulálva a szimulált árhullám terjedési irányának megfelelően az útba eső, kiugró értékeket lenyesve, fizikailag is módosítható a domborzatmodell (Soille et al. 2003). Más eljárások a környezetből feltételezhető lefolyási irányoknak megfelelően kivésik, áttörik az útba eső cellákat és így, a lefolyásirányba ereszkedő értékekkel módosítják a magassági cellaértékeket (Soille et al. 2003).

Míg a feltöltéses technika növeli egyes cellák értékeket és ezáltal a teljes domborzatmodell egészének értékeit, a kivéséses módszerrel csökkennek a domborzatmodellben ábrázolt magasságok.

9.3 Adaptív, összetett módszer

A 'feltöltés' és a 'kivésés' módszereket a minimális anyagmozgatás céljával ötvözve, a végrehajtott magassági módosítások összegének minimalizálásával, optimálisan gödörmentesített magassági modell állítható elő. Az így előállított modell eltérése az eredeti domborzatmodelltől minimális és alkalmas a további hidrológiai modellezési műveletek elvégzésére is (Soille 2004b).

10 A digitális domborzatmodellek leggyakoribb derivátumai

A megfelelően előkészített domborzatmodellen elvégezhető első vizsgálatok a felület geometriai és topológiai leírására szolgálnak. A felszín Lipschitz-folytonosságát feltételezve beszélhetünk elsőrendű és másodrendű parciális deriváltakról. Elsőrendű derivált a lejtőszög és kitettség, másodrendű deriváltak a lejtő- és síkdomborúság (Burrough és McDonnell 1998). A digitális domborzatmodellekből elsődlegesen – egyéb, a vizsgált felszínre vonatkozó kiegészítő ismeret igénybevétele nélkül – kinyerhető felületi paraméterek két csoportba osztva lokális vagy regionális geometriai/topológiai jellemzők (Moore et al. 1991; Wilson és Gallant 2000; Olaya 2007). Az alábbiakban a Velencei-hegység szintvonal alapú domborzatmodelljét felhasználva (Bódis 1999) mutatom be a leggyakoribb alkalmazásokat²². Az elemzéseket és ábrákat a SAGA nyílt forráskódú szoftverrel (Conrad 2006) készítettem.

10.1 Lejtőszög

A lejtőszög, mint lokális geometriai paraméter az adott cella közvetlen környezetében a legnagyobb magasságkülönbség irányába eső lejtő lejtőszögét feiezi (10.1)ábra). Megadható ki koordináta-geometriai módszerekkel, vagy a felület első parciális deriváltjaként, kifejezhető radiánban. fokban. vagy százalékban (lejtő(%) = $tan(lejtő) \times 100$).



10.1 ábra A Velencei hegység lejtőszög térképe

A közvetlen alkalmazások között említhetők a felszín meredekségére, felszíni és felszín alatti lefolyásra, erózióra, anyagáramlásra, geoökológiai funkciókra, mezőgazdasági művelhetőségre, beépíthetőségre vonatkozó tanulmányok.

10.2 A lejtő kitettsége

A legmeredekebb lejtő égtáji irányultságát lokális geometriai paraméterként a kitettség cellánkénti értéke jellemzi (10.2 ábra). Megadása általában az északi irányt kiindulási pontnak (0 fok) véve, az óra járásának megfelelően 360 fokig terjed.

A kitettségi értékek határozzák meg a gravitációt követő anyagáramlási irányokat, felhasználják domborzatárnyékolt térképek készítésére, a potenciális besugárzás és potenciális evapotranspiráció számítására. Forrása a következő fejezetben bemutatott különböző gyülekezési modelleknek.



10.2 ábra A Velencei hegység kitettségi térképe

²² Bódis, K. (2002): Cell-Based Surface Modelling - Velence Mountains http://www.geo.u-szeged.hu/~bodis/gis/velence/dem/

10.3 Görbület

A felszín másodfokú deriváltjaiként is értelmezhető vertikális és horizontális görbület a felszín konvex-konkáv jellegét megadva a lejtő-, illetve az arra merőleges irányú változások mértékét írja le. Az érték negatív, ha a felszín alakja konkáv, pozitív, ha konvex és lapos (nulla lejtőszög) felszín esetén nulla. A két irányú (lejtő- és az arra merőleges, gyakorlatilag a szintvonal menti) változás alapján a felvehető értékek megfelelő kombinálásával a felszín jellege osztályokba sorolható (10.3 ábra).

A görbültség/horpadtság a felszíni lefolyás gyorsulásával és sebességével foglalkozó tanulmányokban, jellemző felszínformáló folyamatoknak (erózió, lerakódás) kitett térszínek lehatárolásában, konvergens és divergens zónák elkülönítésében van jelentősége (10.4 ábra).

10.4 Konvergencia Index

A konvergencia index cellánként jellemzi a felszíni lefolyás szétáramlási (divergens, a konvergencia index pozitív) és gyülekezési (konvergens, a konvergencia index negatív) jellegét (10.4 ábra). Az értékek a 10.3 pontban említett görbületi értékekből származtathatók. A vízgyűjtők határát is kijelölő gerincrégiók így a szétáramlási zónákban, míg a völgytalpak a gyülekezési zóna legalján helyezkednek el.

10.5 Cellánkénti vízgyűjtőterület

A cellánkénti lefolyásviszonyok vizsgálata után minden cellához meghatározható a "felette" lévő, az adott cellába "belefolyó" cellák száma és így a modell felbontásának ismeretében a vízgyűjtőterület nagysága (10.5 ábra).

Az érték fontos paramétere a gyülekezési hálózat mentén mozgást végző bármilyen anyag (víz, szennyezés, üledék) mennyiségi modellezését végző vizsgálatnak.



10.3 ábra Lejtőtípusok a görbület alapján

| Osztály | Lejtő irányú görbület | Horizontális görbület |
|---------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | konkáv | konkáv |
| 1 | sík | konkáv |
| 2 | konvex | konkáv |
| 3 | konkáv | sík |
| 4 | sík | sík |
| 5 | konvex | sík |
| 6 | konkáv | konvex |
| 7 | sík | konvex |
| 8 | konvex | konvex |



10.4 ábra Cellánkénti konvergencia-indexek



10.5 ábra Cellánkénti vízgyűjtőterület

A cellánkénti lejtés és a vízgyűjtőterületek nagysága alapján további hidrológiai jellemzőként különböző indexek számíthatók; a topográfiai nedvesség index, a potenciális munkavégző képesség és az LS-faktor.

10.6 Topográfiai nedvesség index

A topográfiai nedvesség index a hidrológiai modellezésben a talajnedvességgel függ össze és az ln (A/tan β) adható meg, ahol Aa cella feletti vízgyűjtőterület nagyságát a β a helyi lejtőszöget jelenti. Az érték az adott cella vízlevezető képességét jelöli; a nagyobb nedvességgel jellemezhető cella hajlamosabb a telítettségre és így a felszíni lefolyásban nagyobb szerepe lehet (10.6 ábra). A cellák magasabb értéke nagyobb nedvességtartalomra utal (Moore et al. 1991).

10.7 Potenciális munkavégző képesség

Az index a potenciális lefolyási eróziót és az ahhoz kapcsolódó felszínformáló folyamatok leírására szolgál (Moore et al. 1991). Kifejezni az $A \times \tan\beta$ összefüggéssel lehet, ahol A a cella feletti vízgyűjtőterület nagyságát a β a helyi lejtőszöget jelenti. A cella feletti vízgyűjtő nagyságával és a lejtő meredekségével arányosan növekszik a vízmennyiség és annak sebessége, így a víz folyásának ereje és a potenciális eróziós munkája is növekszik (10.7 ábra).



10.6 ábra Topográfiai nedvesség index



10.7 ábra Potenciális munkavégző képessége

10.8 LS faktor

Az eróziós folyamatok modellezéséhez kapcsolódóan a domborzati modellből számítható a Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) LS-faktora (10.8 ábra), amely eredetileg a lejtőhossz és lejtőszög függvényében járul hozzá az éves talajveszteség becsléséhez. A 10.8 ábra a következő összefüggés felhasználásával készült (Wilson és Gallant 2000):

$$LS = (m+1) \left(\frac{A}{22.13}\right)^m \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)$$

ahol m=0,4 és n=1.3, A a cella feletti vízgyűjtőterület és β a helyi lejtőszög.



10.8 ábra LS faktor értékei

10.9 Lefolyáshálózat

A hidrológiai folyamatok modellezésében való kiemelt szerepe miatt a gyülekezési hálózatok különböző finomságú közelítő eljárásait a következő fejezetben foglalom össze. A lefolyáshálózat (völgyhálózat) (10.9 ábra) a cellánkénti modellie vízgyűjtőterületek értékein küszöbértéket megadva, általánosítva határolható le és egyszerű vizsgálatokat további tesz lehetővé; pl. a hálózat feletti magassági értékek meghatározása, vagy a hálózat adott pontja és a vízgyűjtő alapjának magasságkülönbsége, völgyhossz számítás.

10.10 Részvízgyűjtők lehatárolása

A lefolyáshálózatból meghatározható az egyes vízfolyásokhoz tartozó vízgyűjtő medencék területe (10.10 ábra), valamint a lefolyáshálózatból és a lejtőszögekből kiindulva modellezhető a vízfolyás hossza, a vízgyűjtő hossza, amit a legmagasabb pont és a kifolyási pont távolságaként értelmeznek.

A lefolyáshálózat az alapja a vízfolyás rendűségének (Strahler, Shreve), valamint a völgyhálózat mintázatát jellemző völgysűrűség kiszámításának is.



10.1 ábra A Velencei hegység domborzata és a lefolyási hálózat alapján számított völgyhálózat



10.6 ábra Cellánkénti vízgyűjtőterület

10.11 Árnyékolás, besugárzás, 3D vizualizáció, beláthatóság

A domborzatmodell-alkalmazások között rendkívül gyakoriak az árnyékolás, a besugárzási számítások, a 3D vizualizáció, és a láthatósági-beláthatósági vizsgálatok.

A topo-klimatológiai elemzések a felszín potenciális energia-felvételével (10.11 ábra) foglalkozó, továbbá ökológiai, hidrológiai, meteorológiai tanulmányokat szolgának, de alkalmazzák a megújuló energiaforrások kutatásában is (Moore et al. 1991; Böhner és Antonić 2007; Šuri et al. 2007).



10.11 ábra Potenciális napenergia besugárzás a Velencei-hegységben a tavaszi napéjegyenlőség idején (Paraméterek: Wilson és Gallant (szerk.) 2000 alapján)

11 CELLA-ALAPÚ GYÜLEKEZÉSI MODELLEK

A lefolyásirányt meghatározó algoritmusok a hidrológiai modellezés szempontjából kulcsfontosságúak, éppen ezért igen jelentős fejlesztések történtek ezen a területen és több, egymástól eltérő, előnyős és hátrányos tulajdonságokat egyaránt tartalmazó modell áll rendelkezésünkre. A lefolyásirányok és a kapcsolódó akkumuláció megadásának módszerei három fő csoportra oszthatók; egy- és többirányú lefolyásmodellekre, valamint útkereső algoritmusokra. Mindhárom csoporthoz több megközelítés tartozik.

11.1 Egydimenziós lefolyás

A lefolyás és a szállított anyag terjedési irányának megadásakor a szomszédos cellák középpontjai közötti mozgás irányát és a szóródás arányát határozzuk meg. A legegyszerűbb modellekben egy adott cella lehetséges nyolc szomszédja közül csak egy, a legnagyobb meredekség irányba történik mozgás.

11.1.1 D8 - Deterministic 8

A lefolyás egy adott cella középpontjából a szomszédos cellák valamelyikének – a legnagyobb esésirányba lévőnek – a középpontja felé irányul. (O'Callaghan és Mark 1984). A módszert domborzatmodellen alkalmazva az eredményül kapott raszter cellái általában kilenc értéket vehetnek fel és az értékek két különböző, az adott alkalmazástól függő jelentéssel bírhatnak.

- a) A cellaérték a cellába befolyó, szomszédos cellák számát jelenti; ha a cellaérték 0, az lefolyástalan, sík terület, ahol nincs összefolyás, vagy kiemelt helyzetben lévő hegycsúcs vagy hegygerinc a vízgyűjtő határán, a lefolyási hálózat felső, kiindulási pontja. Ha a cellába befolyó, szomszédos cellák száma 1,2,...7, az jelentheti, hogy a cella a gyülekezési hálózat egy köztes pontja, de nem biztos, hogy van kifolyása. A 8-as érték lefolyástalan, a környezeténél alacsonyabb helyzetben lévő cellát jelöl.
- b) A másik, gyakoribb értelmezésben a cellaérték a cellából való kifolyási irány megállapodás szerinti kódértékét tartalmazza. A kódolás lehet szoftverfüggő, pl. a PCRaster²³, LDD (Local Drain Direction) térképeinek értékei a számítógép numerikus billentyűinek elrendezését követi az ESRI (Environmental Systems Research Institute) geoinformatikai elemző szoftverei (Arc/Info, ArcView, ArcGIS) a kettes számrendszer helyi értékei alapján osztja ki a lehetséges nyolc irányt (Jenson és Domingue 1988). A helyi értékes ötlet a gyülekezési gráf ellentmondásmentességének vizsgálatában is praktikus, ugyanis nem egyértelműen eldönthető lefolyási irány esetén a szóba jöhető értékek automatikus összeadása után az eredményből egyértelműen megmondható, hogy mely irányokról van szó és akár manuálisan javítható a cella értéke. Pl. ha az érték 25, akkor ez egyértelműen az 1, 8 és 16-os kódú irányok eredményezték: 25 = 1+8+16. Van modell (pl. SAGA²⁴, CCM²⁵), amely értékadásában egyéni logikát követ (11.1 ábra, 11.2 ábra).

²³ PCRaster, http://pcraster.geo.uu.nl/documentation/pcrman/r7536.htm

²⁴ SAGA - System for Automated Geoscientific Analyses, http://www.saga-gis.org/en/index.html



11.1 ábra A lefolyásirányok cellánkénti értékei néhány modellben

A D8 modell egyszerű, de legnagyobb hátránya éppen a kötött, a 45° többszöröseire, csak a fő- és mellékégtájak irányaira korlátozódó lefolyásirányokban van (7.4 ábra).



11.2 Cellánkénti lefolyásirányok a Velencei-hegységben

11.1.2 Rho8

Az algoritmus hasonlít a D8 modellhez, de kibővül egy sztochasztikus komponenssel. A lefolyásirány meghatározása a cellák kitettségének és két szomszédos cella irányának különbségétől függő, véletlen változón alapul (Fairfield & Leymarie 1991), a cél ezzel csökkenteni a D8 modell irányonkénti torzítását. A Rho8 módszer hátránya, hogy a véletlen változó különböző eredményekre vezet az algoritmust ugyanazon a domborzatmodellen többször alkalmazva.

²⁵ CCM -Catchment Characterisation and Modelling,

http://desert.jrc.ec.europa.eu/action/php/index.php?action=view&id=23

11.2 Több irányú lefolyás

Az esetek többségében a hidrológiai modellezéshez a D8 algoritmus eredményezte egyszerű gyülekezési modell elegendő, azonban pl. anyagtranszporthoz, szennyeződésterjedés modellezéséhez már nem; a mozgó anyag teljes mennyisége egy cellából nem egy másik, szomszédos cellába kerül át, hanem a környező cellák között megoszlik, sőt, egy része helyben is maradhat.

11.2.1 Háromirányú lefolyás

A lefolyás három szomszédos cella iránya – a központi cella kitettségéhez legközelebbi irányba eső cella és az azzal szomszédos két cella – között oszlik meg. Az eloszlás módját numerikus közelítési sémával adja meg a modell, amely módszert a kidolgozó Természeti Földrajzi és Tájökológiai Tanszék egyetemi székhelye nyomán Braunschweig-i Digitális Domborzatmodellnek (Braunschweiger Digitales Reliefmodell) is neveznek (Bauer et al. 1985).

11.2.2 Multiple Flow Direction (MFD-FD8):

A szakirodalomban MFD rövidítéssel elterjedt, mind a nyolc szomszédos lefolyási irányt alkalmazó algoritmus a D8 modellből származtatható, kétdimenziós lefolyási modell. Egy cellából minden környező alacsonyabb cella irányába történik lefolyás, a mennyiségi eloszlás a lejtőszögek nagyságától és a lejtő hosszától függ (Freeman 1991, Quinn et al. 1991). Az adott *i* cellát vizsgálva a lefolyás d_i megoszlása a következő egyenlettel adható meg

$$d_i = \frac{\tan(\beta_i)^{\mathsf{v}} \cdot L_i}{\sum_{j=1}^{8} \left(\tan(\beta_j)^{\mathsf{v}} \cdot L_j \right)},$$

ahol β a lejtőszögeket jelöli, *L* pedig a lejtők hosszát a környező nyolc (*j*) szomszédos cella felé. A legnagyobb lejtés irányába koncentrálódó lefolyást a *v* kitevő magasabb értéke biztosítja, míg erősebb a mennyiségi szóródás az alacsonyabb (mindig pozitív) értékek esetén. A kitevő optimális értékéről megoszlanak a vélemények (pl. *v* = 1 és különböző lejtőhosszak a fő- és mellékirányokba, *v* = 4-6 és azonos lejtőhossz a nyolc irányba), de a modell alkalmazását kétségtelenül rugalmassá teszi (Gruber és Peckham 2007). A modell előnye, hogy bizonyos helyzetekben hatékonyan kezeli a szétáramlást (pl. hegygerinc esetén mindkét oldalra meghatározható anyagáramlás ellentétben a D8 modellel, amely kiválasztja a legmeredekebb irányt), ugyanakkor a szóródás túlságosan erőteljes is lehet és pl. "szintvonal menti" anyagmozgáshoz is vezethet.

11.2.3 $D \infty$ - Deterministic Infinity

Az előző modellek hátrányait (D8 - kötött irányok, Rho8 - véletlenszerűség, MFD - túlzott szóródás) célozta kiküszöbölni a Tarboton (1997) által javasolt determinisztikus végtelen (D ∞) modell, amely egy adott cella lefolyási irányát – hasonlóan a lejtők kitettségének irányaihoz – a teljes 0-360 fok közötti végtelen skálán határozza meg. Az anyagmozgás a szomszédos, irányba eső két cella között, a befolyás szögével arányosan oszlik meg (11.3 ábra).



11.3 ábra A Tarboton-féle D∞ lefolyási algoritmus sémája

A nyíl jelöli a legnagyobb lejtőszög irányát.

A 2-es jelű szomszédos cellába a leáramoló anyagból való részesedés (p_2) :

$$p_2 = \frac{\alpha_2}{(\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{4 \cdot \alpha_2}{\pi}$$

A 3-as jelű szomszédos cellába a leáramoló anyagból való részesedés (p_3) :

$$p_3 = \frac{\alpha_1}{(\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{4 \cdot \alpha_1}{\pi}, \qquad (\alpha_1 + \alpha_2 = \frac{\pi}{4})$$

A modell bizonytalan esetekben egyetlen irányt jelöl ki önkényesen, illetve a vízgyűjtő határán lévő cellákhoz az ismertetett szomszédossági kitétel miatt a kétoldali szétáramlás nem megoldható.

A hidrológiai modellezés szempontjából úgy tűnik a legjobb eredmények a Tarbotonféle $D\infty$ vagy "eredővektor módszer" (Tarboton 1997; Beven 2001) és a Quinn és társai által leírt "összetett lefolyási algoritmus" alapján születnek (Beven 2001).

11.3 Útkereső algoritmusok (Flow Tracing Algorithms)

A lefolyási irányokat és a potenciális anyagmozgást modellező eljárások között az útkereső algoritmusoknak elsősorban elméleti jelentősége van, kevés szoftver alkalmazza a gyakorlatban (pl. DiGeM).

11.3.1 Kinematikus útkereső algoritmus (Kinematic Routing Algorithm, KRA)

A KRA a domborzatmodell minden cellájának felületét egy, a cella négy sarokpontjára legjobban illeszkedő síkkal közelíti és ennek irányultságát (kitettségét) határozza meg. Az így kapott felszínről leguruló labda útvonalának követéséhez hasonlóan, egyenes szakaszonként rögzíti a különböző irányokat, és modellezi a cellába való belépés és a cellákból való kilépés közötti irányt (Lea 1992). Az eredmény így a lejtő kitettséghez hasonlóan végtelen sok értéket felvehet, de a D8 modellhez hasonlóan megmarad az egydimenziós jelleg. A modell hátránya továbbá, hogy viszonylag nagy számítási kapacitást igényel (Costa-Cabral és Burgess 1994).

11.3.2 DEMON - Digital Elevation Model Network

A DEMON algoritmus a KRA-hoz hasonlóan a lejtők kitettségének irányai alapján keresi a lefolyási útvonalat, de a lefolyás nem egyszerűen egy vonalban történik, hanem egy kétdimenziós, csőszerű, több cellát átfogó meder megalkotásával, amelyből az anyagáramlás és szétoszlás modellezéséhez egy hatás mátrixot szerkesztenek (Costa-Cabral és Burgess 1994). A modell az anyagmozgatással járó konvergens és a divergens gyülekezési tulajdonságokat általában jól ábrázolja, de lefolyási hálózat geometriája sokszor következetlen, nem realisztikus (Gruber és Peckham 2007).

11.4 Stream burning technique

Az említett összetett algoritmusok realisztikusabban adják vissza a lefolyási hálózat és összegyülekezés mintázatát, mint a D8 modell, de természetesen az eredmény mindig erősen függ az eredeti domborzatmodell minőségétől. A legkifinomultabb felszínelemző algoritmusoktól sem várhatunk nagyszerű eredményeket, ha gyenge minőségű domborzatmodellen alkalmazzuk őket. А durvább felbontású domborzatmodelleket alkalmazó hidrológiai modelleknek is megfelel a D8 nyolcirányú gyülekezési modell; mivel nem minden modell alkalmas a nagyon részletes domborzatból levezethető értékek megfelelő kiértékelésre, és a "finomabb" felbontás sem vezet mindig "jobb" eredményhez, a hidrológiai prognózis nagyobb pontosságához (Watson et al. 1998).

A domborzatmodellekből automatikusan kinyerhető lefolyási hálózatok – a gyenge minőségű domborzatmodellek vagy a durvább felbontásból adódó generalizált jelleg miatt – gyakran nagyon nem realisztikusak. Előfordul, hogy jelentős vízfolyások nem reprezentáltak vagy a hálózat minden további vizsgálat számára hamis és félrevezető geometriát mutat.

A probléma áthidalására kidolgozott módszer "stream burning" név alatt szerepel az irodalomba. Lényege, hogy amennyiben kiegészítő információként rendelkezésre áll jó minőségű és általánosan elfogadott vektoros adatbázis a valós folyóhálózatról, akkor a vízfolyások nyomvonala és lefolyásának iránya a domborzatba "beégetve" felhasználható az egész terület egységes lefolyási hálózatának létrehozásában (Hutchinson 1988; Maidment 1996).

Ezzel a módszerrel elkészült egy globális, fél fokos felbontású lefolyási hálózat (River Routing Network) (Renssen és Knoop 2000) és egy egységes, 1 km felbontású európai folyóhálózati modell a GTOPO30 domborzatmodellt és különböző forrású, vektoros folyóadatbázist alkalmazva (Hiederer és de Roo 2003).

Az SRTM alapú, 100 méter alapfelbontású, pán-európai folyó- és vízgyűjtő adatbázis létrehozásához egy, a domborzatmodell elemzésén alapuló adaptív eljárást alkalmaztunk (Vogt et al. 2007). Az élénkebb relieffel rendelkező területeken, a felső vízfolyások nyomvonalát elfogadható pontossággal, automatikusan ki lehetett nyerni a domborzatmodellből, míg az alsó szakaszokon a beégetés technikáját kellett alkalmazni. A valós vízfolyással nem rendelkező, kiterjedt, lapos térszíneken (azonos értékű cellablokkok esetén) a zóna határán lévő legalacsonyabb cella felé a legrövidebb útvonalon irányítva a lefolyásokat (Soille et al. 2003; Soille 2004a) elhárítható a topográfiából adódó lefolyástalan területek blokkoló hatása is.

A módszer hátránya, hogy elvégzéséhez megbízható és általában sok munkával előkészített vektoros adatbázisra van szükség, továbbá, hogy a domborzatmodell és a beégetéssel kapott lefolyási hálózat így nem lesz mindig összhangban egymással (pl. domboldalon és nem a völgyben folyó patak) és ez több további elemzést akadályozhat. Ugyanakkor a domborzatból nyerhető információkra kevésbé érzékeny hidrológiai modellek a nagyon részletes felületelemzések eredményeit nem kamatoztatják (Grayson és Blöschl 2000), ezért bizonyos feladatokra a nagyvonalúbb megoldások is kielégítő eredményt szolgáltatnak.

12 DOMBORZATMODELLEK A HIDROLÓGIAI MODELLEZÉS SZOLGÁLATÁBAN

A tájat vízgyűjtőként, mint egységként vizsgálva a domborzati viszonyoknak meghatározó szerepe van a hidrológiai, geomorfológiai és ökológiai folyamatokra, így a domborzatmodellek alkalmazásának az említett tudományterületeken nagy gyakorlata van (Moore et al. 1991; Burrough és McDonnell 1998; Longley et al. 1999). geoinformatikai irodalom átfogó szakkönyvei (szerk.) А és а domborzatmodellezést kiemelten tárgyaló publikációk (pl. Wilson és Gallant (szerk.) 2000; Peckham és Jordan (szerk.) 2007; Hengl és Reuter (szerk.) 2007) a domborzatmodellek felhasználásának számtalan lehetőségét ismertetik.

A domborzatmodellezés és a hidrológiai modellezés kapcsolatára koncentráló összefoglaló munkák a domborzat és az osztott hidrológiai modellezés témakörét (Beven és Moore (szerk.) 1995), a nagyfelbontású lefolyás modellezés szerepét a hidrológiában és a geomorfológiában (Bates és Lane (szerk.) 2000), valamint a vízgyűjtőt egységként vizsgálva a különböző természeti-környezeti jelenségek és folyamatok jellemzőit, mintázatát elemzik (Grayson és Blöschl (szerk.) 2000).

A hidrológiai modellezésben alkalmazott topográfiai paramétereket és levezethető gyakori indexeket a 10. fejezetben ismertettem. Az alábbiakban a csapadék-lefolyás modellek általános bemeneti adatai között szerepelő csapadék, vízhozam, további, méréseken alapuló meteorológiai és felszíni elemek alapján becsült intercepció és párolgás, a hóolvadás, ezek vízgyűjtőn belüli (térbeli) eloszlása, valamint egyéb hidrológiai változók közül a domborzat módosító hatására érzékeny elemeket foglalom össze, kiegészítve az alkalmazott domborzatmodellel szembeni elvárásokkal.

12.1 Bemeneti adatok feldolgozása, módosított interpoláció

A hidrológiai modellezés eredményessége nagyban függ a felhasználható adatok elérhetőségétől. A csapadék-lefolyás modellek szempontjából lényeges bemeneti adatok gyűjtésének technikája-technológiája az utóbbi évek során jelentősen fejlődött. A hagyományos mérőállomások pontadatainak időbeli és térbeli interpolációját kiegészítve a csapadék-radarok fejlődésének eredményeként realisztikusabb képünk van az esőzónák térbeli és időbeli eloszlásáról (12.1 ábra), valamit a lehullott csapadék mennyiségéről. Mivel a csapadékradarok nem közvetlenül a felszínen, hanem akár néhány száz méterrel a felszín felett mérik a csapadék intenzitását, a felszínre érkező csapadék térbeli eloszlásának mintázatát a szélsebesség és a szélirány, valamint a domborzat ismert módosító hatása alapján is korrigálják.

A mérési technikák és a mérések folyamatos rögzítését támogató alkalmazások fejlesztésének hatására megbízhatóbb adatok állnak rendelkezésre a vízhozam, a talajvíztükör és a talajnedvesség jellemzőire is. Új módszerek vannak a párolgási ráta közvetlen becslésére, valamint különböző geoinformatikai eljárások (domborzat-modellezés, távérzékelés) alapvető térbeli adatok (pl. vízgyűjtő-karakterisztika, gyülekezési útvonal, felszíni lefolyási gradiens, raszter alapú rendszerben egy-egy cellához tartozó vízgyűjtő-terület, a növényborítottság, LAI, intercepció) modell-alkalmazását teszik lehetővé (Beven, K. J. 2001).



12.1 ábra: Földi csapadék-radarok 5 percenkénti csapadékintenzitás mérésének eredménye (Nimrod-rendszer, Golding, B. 2004) először órás, majd 24 órás összegzésben (Bódis et al. 2004), 2007. május 19-én

A domborzat módosító hatását a többi, pontszerű mérésen alapuló adat esetében is lehet becsülni és az interpolációk során felhasználni, pl. a hagyományos meteorológiai állomások csapadék és hőmérséklet adatinak térbeli kiterjesztésére (Hofierka et al. 2002; Szabó, J.A. 2005), vagy áttételesen, a domborzat módosító hatását figyelembe vevő hőmérséklet-interpoláció alapján becsült hó mennyiségének, majd a hóolvadásból származó vízmennyiségnek a becslésére (Szabó, J.A. 2007; van der Knijff és de Roo, 2008). Kisfelbontású modellek esetén, ha a valós domborzatban a magasságkülönbség jelentős egy-egy modell-cellán belül (pl. völgyet és hegyoldalt is lefed a modell-cella), a finomabb léptékű közelítést magassági- és ezáltal hőmérsékleti zónák alkalmazásával kaphatunk (van der Knijff és de Roo, 2008).

12.2 Topográfiából származtatott adatok

A domborzatmodellek alapján nyert elsődleges (abszolút és relatív magassági értékek), valamint a 10-11. fejezetben röviden ismertetett, származtatott információkat (pl. lefolyásirány, gradiens, gyülekezési hálózat, vízgyűjtőterület) a különböző hidrológiai modellek széles körben használják fel. A forrásul használt domborzatmodellekkel kapcsolatban a hidrológiai elemzések szempontjából néhány szempontot ismétlő, összefoglaló jelleggel kiemelnék.

12.2.1 Forrás

A csapadék-lefolyás modellek szempontjából a felületmodellekkel szemben megkívánt fontos követelmény, hogy azok ne tartalmazzanak a domborzaton kívül egyéb tereptárgyakat, mint pl. épületek, vagy a növényzet. Így azok az egyébként remek, nagyfelbontású (horizontálisan akár méteres, vertikálisan deciméteres felbontású) távérzékeléssel – mindent látó szenzorokkal – előállított termékek általában kevésbé alkalmasak hidrológiai modellezési célra, mint a digitalizált szintvonalak alapján, interpolációval készített domborzatmodellek (Beven 2001). Természetesen a legújabb technológiák termékei (pl. LiDAR, IFSAR) is felhasználhatók, de alkalmazásuk éppen a részletességük miatt többlépéses előkészítést igényel (Assmann et al. 2008).

12.2.2 Felbontás

A hidrológiai modellezési célra alkalmazott domborzatmodellek felbontása is kényes kérdés. A hidrológiai modellek a domborzatmodellekből származtatott elsődleges információkat (pl. lefolyásirány, gradiens) eredményesen alkalmazzák, ugyanakkor a túl durva felbontású domborzat nem írja le megfelelő részletességgel a lejtési a nagyfelbontású domborzatmodellek részletes információinak viszonyokat, feldolgozása pedig számítási kapacitásban jelenthet problémát egy-egy nagyobb vízgyűjtő esetén az osztott hidrológiai modellekben (Beven 2001, Szabó 2007; van der Knijff és de Roo, 2008). Az adatforrásként felhasznált domborzatmodellek felbontása így jelentősen befolyásolhatja a kalibrált paraméterértékeket és a modelleredményeket is (Zhang és Montgomery 1994; Quinn et al. 1995; Wu et al. 2007), esetenként eltérő, teljesen külön paraméter-együttesek szükségesek a különböző domborzati felbontások mellett futtatott hidrológiai modell számára (Beven 2001). Az említett források a TOPMODEL (TOPography rainfall-runoff MODEL) nevű csapadék-lefolyás modellen keresztül vizsgálták a különböző hidrológiai jellemzők érzékenységét a domborzatmodell felbontására (Beven 1997).

A gyakorlatban alkalmazott felbontás végső soron a hidrológiai modell léptékétől és a modellező céljaitól függ. A legtöbb, kisméretű (0,3-1,5 km²) vízgyűjtő vizsgálata esetén pl. a 10 méteres domborzati felbontás kielégítőnek bizonyul a geomorfológiai és hidrológiai szimulációk futtatásához (Zhang és Montgomery 1994). Nagyobb vízgyűjtők esetén (20-65 km²) a különböző indexek számításához más-más felbontás tűnt alkalmasabbnak, de a cella területét és a teljes vizsgált vízgyűjtő méretének összehasonlításával kapott arányszám bevezetésével, általánosan a maximum 5 % tűnik elfogadhatónak (Wu et al. 2007).

A különböző célú hidrológiai modellezésre irányuló domborzatmodellek is már-más felbontásúak, pl. a keresztszelvény-geometriát a folyásirányú 100 méteres vagy sűrűbb mintavételezés mellett a metszeten belül a méter alatti mintázás is előfordul, egy víztározó mederdomborzatát 5-20 méter felbontású modellel közelítve jó becslést kaphatunk a befogadható víztömegre²⁶ (Gorokhovich és Sharlow 2000). Az előzőekben említett, kisebb vízgyűjtők esetén gyakori a 20-100 méteres felbontású domborzatmodellek alkalmazása, és van, aki a 100 méternél durvább felbontású modelleket ezekben a vizsgálatokban már nem is javasolja (Beven 2001). Nagyobb régiók, vagy kontinentális méretű hidrológiai modellezés esetén a generalizált 1 km-es domborzatmodellt és legfontosabb derivátumait 27 (gradiens, lefolyáshálózat, vízgvűjtőmedencék. nedvességindex, etc.) alkalmazzák még nagyléptékű modellezésben (Croley 2002; Döll és Lehner 2002; Hiederer és de Roo 2003; Szabó 2007; van der Knijff és de Roo 2008).

12.2.3 A korlátok

А domborzatmodellek hidrológiai modellezésben használt legfontosabb derivátumairól (lefolvásirányok, gyülekezési hálózat. cellához tartozó vízgyűjtőterület, vízválasztók) és a meghatározható terepi-indexekről, melyeket a domborzatmodellek alapján számítva általában a terepet leíró különböző változókkal (pl. lejtés, kitettség) kombinálva adnak meg (Blöschl és Grayson 2000), az előző fejezetben olvasható rövid összefoglaló. A domborzatmodellek ilven jellegű kiegészítő információjának alkalmazhatósága függhet ugyanakkor az időbeliségtől is, pl. magasság vagy a kitettség/lejtés jól megfeleltethető az átlagos éves csapadékmennyiséggel, ezzel szemben hasonló összefüggés semmiképp sem található a napi, vagy órás csapadékadatok esetén (Obled 1990).

A modellezett hidrológiai folyamatok szempontjából megjegyzendő továbbá, hogy a bemutatott összes lefolyási modell azon a feltételezésen alapul, hogy a lefolyás szempontjából az elsődlegesen meghatározó, azt befolyásoló tényező a domborzat, amely feltétel viszont csak olyan területeken teljesül, ahol a vízzáró vagy majdnem vízzáró alapkőzetet csak igen vékony talajréteg borítja. Más esetekben a valós lefolyás jelentősen eltérhet a domborzatmodellekből származtatott jellemzőktől és akkor a modell további komponensei (pl. az alapkőzet topográfiája, felszín alatti vizek, beszivárgási tényezők, stb.) lesznek meghatározók a lefolyási jellemzők meghatározásában. A lefolyás (runoff) becsléséhez gyakran alkalmazott terepi-index a Beven és Kirkby (1979) által kidolgozott és a 11. fejezetben ismertetett topográfiai nedvesség index, amely viszont csak olyan terepen alkalmazható, ahol a felszíni lefolyásban elsődlegesen meghatározó szerepe van a túltelítettségnek (saturation excess). Olyan környezetben, ahol a beszivárgásnak vagy direkt felszíni lefolyásnak van hangsúlyosabb szerepe a lefolyásban, más terepi-indexek bevezetése szükséges (Blöschl és Grayson 2000).

²⁶ Reservoir assessment: http://www.gras.ku.dk/Solutions/WaterResources/ReservoirAssessment.aspx

²⁷ HYDRO1k Elevation Derivative Database: http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/hydro/

12.3 Domborzatmodellek alkalmazásának további területei

A domborzat jellegéből adódó és annak módosító hatását figyelembe vevő adatelőállításon kívül a domborzatmodellek alkalmazására számtalan példát találhatunk az elméleti hidrológia kutatások és operatív hidrológia majd minden területéről, pl. hidrológiai előrejelzés, transzportfolyamatok (hordalék, szennyeződés) modellezés, talajtani vizsgálatok, különböző hullámtér-ökológiai elemzések (Beven és Moore (szerk.) 1995; Bates és Lane (szerk.) 2000; Grayson és Blöschl (szerk.) 2000). A domborzatmodelleket alkalmazzák a hidrológiai modellek érzékenység-vizsgálatában, illetve parametrizálásában is (Bates et al. 1998; Lacroix et al. 2002).

A következő fejezetekben a domborzatmodellek különböző forrásait felhasználva általam végzett tanulmányokat foglalok össze, amelyek során az adott feladatra kidolgozott domborzatmodellezési és elemzési módszereket, az elvégzett lépéseket és a modellezett eredményeket, valamint azok alkalmazását ismertetem.

A "Domborzatmodellből levezetett adatok felhasználása tározók árvízcsökkentő hatásának optimalizálásában" fejezetben a Tisza kárpát-ukrajnai vízgyűjtőjén tervezett árvízcsökkentő tározók példáján hatáselemzést végeztünk és üzemeltetési-optimalizálási feladatot oldottunk meg a domborzatmodell segítségével megadott tározási görbék felhasználásával.

A "Nagyfelbontású digitális domborzatmodellek alkalmazása síkvidéki tározók létesítésének tervezésében" fejezetben bemutatott domborzatmodell-alkalmazás a tervezési-számítási munkálatokhoz járul hozzá. A kijelölt térszínek vízbefogadó-kapacitásának gyors, további adatokkal kiegészíthető, módosító körülményekkel megismételhető felmérése, a további modellezéshez felhasználható domborzatmodell megalkotása és elemzése nélkülözhetetlen szakmai hátteret jelent a beruházások előkészítésében. A feladatok megoldása során az Új Vásárhelyi-terv keretében tervezett Szegedi tározó domborzatmodelljét készítettük el és a számítási eredményeket összevetettük a nyilvános tervekben ismertetett adatokkal.

A "Domborzatmodellek alkalmazása az árvízi kockázati térképezésben" fejezetben szimulált árvízi valószínűségekhez tartozó kiömlő vízmennyiségek egy lehetséges, domborzatmodellezéssel segített lokalizálási tervét mutatjuk be, kiegészítve az elöntés vízmélységeivel, amely alapján az elárasztott területeken a földhasználatot figyelembe vevő kárbecslés végezhető.

А "Domborzatmodellek alkalmazása kontinentális kiterjedésű hidrológiai modellekben" fejezetben nagy kiterjedésű térséget figyelembe vevő, vízgyűjtő alapú osztott hidrológiai modellek statikus bemeneti adatainak előkészítését, módosítását foglalom össze, a modellkimenetelre való hatásukat megemlítve. Az elkészített adatbázisok felhasználhatók a térséget lefedő árvízi kockázati térképezésben, illetve a klímamodellekkel szimulált klímaváltozás árvízi kockázatra való hatásának vizsgálatában. A hidrológiai előrejelzés és modellezési munkálatok európai vízgyűjtőkön folytak, de megkezdődött az azonos szemléletű hidrológiai modellezéshez való adatelőkészítés afrikai vízgyűjtőkön is.

13 Domborzatmodellből levezetett adatok felhasználása tározók árvízcsökkentő hatásának optimalizálásában

A Tisza kárpát-ukrajnai vízgyűjtőjén tervezett árvízcsökkentő tározók

13.1 Problémafelvetés

A több mint 100 éve folyó árvízvédelmi munkálatok tapasztalatai alapján csupán töltésekkel nem lehet a Tiszát kordában tartani, a nagysebességű áramlás ellen a gátak által biztosított passzív védelem nem elegendő, az árvízi csúcsok csökkentését már közvetlenül a vízhálózatba történő belépéskor célszerű megkezdeni (VITUKI 2001). A vízgyűjtő felső részén tíz jelentősebb (9 romániai és egy ukrajnai) árvízvédelmi, vízerő hasznosítási és vízellátási feladatokat ellátó tározót üzemeltetnek, összesen 576 millió m³ térfogattal (Fazekas et al. (szerk.) 2001).

Magyarország medence jellegéből következően (a felszíni vízkészletek mindössze 4%-a keletkezik az ország határain belül) a külföldi víztározók a Felső-Tisza és mellékfolyói vízjárására jelentős hatást gyakorolhatnak (Fazekas et al. (szerk.) 2001), ezért az ukrán állami vízügyi vezetés kezdeményezésére kidolgozott átfogó árvízvédelmi terveket érdemes a tározók szempontjából is figyelembe venni. Az árvízvédelmi koncepció lényege, hogy komplex intézkedésekkel lassítani kell az árhullámok összegyülekezését, úgy hogy a kialakuló árhullámok csúcsvízhozamát már a mellékfolyókon is, és magában a Tiszában is jelentősen csökkentsék. Ennek eszközéül nagyszámú, kizárólag árvízcsökkentési rendeltetésű tározó építését is kitűzték célul. Ezek a tározók árvízmentes időszakokban szárazak. A tervezett műszaki kialakítás mellett a tározó az árhullám csúcsvízhozamának csökkentése a 10%-os valószínűségű szintre) úgy, hogy közben az árhullám tömege lényegében változatlan marad, csak az árhullám csúcs lesz alacsonyabb és időben később jelentkezik (VITUKI 2001).

A tervek szerint a Tisza vízgyűjtő ukrajnai részén 42 új árvízvédelmi tározó létesül, kb. 300 millió m³ össztérfogattal (Vágás 2001; VITUKI 2001). Ez a kapacitás kb. egynapi nagyobb tiszai árhullám vízmennyiségének felel meg (Vágás 2001), és mivel a cél a kb. ötnapi vízvisszatartás lenne (1200-1500 millió m³), ezért a tározók megfelelő üzemeltetése is fontos feladat, melynek hatása a magyarországi felső szakaszok vízjárására árhullámonként és vízfolyásonként igen eltérő lehet (Fazekas et al. (szerk.) 2001). Áradások idején az árhullámok levonulásának dinamikája változhat meg a felső vízgyűjtők mellékfolyóin elhelyezkedő árvízcsökkentő víztározók üzemeltetése mellett. A változás kettős hatással érintheti az árhullámok levonulását. Megfelelő tározó-üzemeltetés mellett magas árhullámok alacsonyabban vonulhatnak le (előnyös hatás), de az áradás időtartama jelentősen hosszabb lehet. Ez utóbbi előnytelen mellékhatás, mert a tartósan magas vízállás miatt a töltések átázásával újabb árvízi veszélynek lehet kitéve a mentett oldal.

A tározók leengedésének optimális stratégiája (ütemezés, fenékleeresztő zsilip mérete adott maximális vízhozam esetén) a különböző hidrológiai kiindulási feltételek, adott műszaki paraméterek és topográfiai adottságok ismeretében összetett térbeli és hidrológiai modellezéssel megadható.

13.2 Domborzatmodell alkalmazásához kapcsolódó feladatok

A domborzatmodelleket több, kapcsolódó hidrológiai és földrajzi probléma megoldásában lehet alkalmazni:

- Völgyzárógátak elhelyezkedésének meghatározása, térképezése,
- Tározási kapacitás, tározási görbék számítása,
- Vízgyűjtők morfometriai jellemzése,
- Domborzati paraméterek statisztikai elemzése, térképezése,
- Tározók keresztmetszet-rajzainak elkészítése,
- Területhasználati jellemzők vízgyűjtőnkénti statisztikája,
- Főbb jellemzők térbeli és időbeli változásainak kiértékelése,
- Távérzékelt adatok felhasználása,
- Térképezés, 3D megjelenítés.

Mivel az esettanulmány célja a tározók árvízcsökkentő hatásának a kiürítés időzítésével és a fenékleeresztő zsilip átmérőjének módosításával történő optimalizálása adott, előre meghatározott, maximális vízhozam esetén, ezért a felsorolásban szereplő első két, a számításokhoz szükséges részfeladat megoldásának eredményeit mutatom be.

13.3 Domborzatmodell alkalmazása a völgyzárógátak elhelyezkedésének meghatározásában

A tervekben szereplő tározók helyének kiválasztása eredetileg a hidrológiai, morfológiai, geológiai és szeizmikus viszonyok ismeretében történt, de mivel a pontos koordináták nem álltak rendelkezésemre, ezért a részletes földrajzi-geometriai adatok hiányában a tervezett völgyzárógátak terepi elhelyezkedését közvetett módon kellett meghatároznom a további modellezés érdekében. A rendelkezésre álló dokumentáció (VITUKI 2001) viszont táblázatos formában tartalmazta a tervezett létesítmények főbb műszaki és gazdasági jellemzőit, így ezeket felhasználhattam földrajzi azonosításhoz is.

A geoinformatikai feladat az alábbi lépésekben valósítható meg:

- Nagyfelbontású domborzatmodell (100x100 méter) alapján generált, a valós folyóhálózatot reprezentáló vektoros lefolyáshálózattal összhangban lévő, cella-alapú lefolyáshálózat létrehozása a modellezés számára (modellvízhálózat).
- 2) A tervezési paramétereknek (vízgyűjtőterület nagysága, tervezett elöntési magasság, hasznos térfogat) geometriailag megfelelő, a modell-vízhálózatra illeszkedő völgyzárógátak helyzetének megkeresése és kijelölése a modellezés számára. A modell alapján az összegyülekezési hálózatban cellánként vizsgálva a cellák fölötti vízgyűjtőterületek nagyságát, kijelölhető az a pont, amely megfelel a mérnöki leírásokban szereplő, tervezett méretnek.
- 3) A leíró adatokat tartalmazó információk beillesztése GIS környezetbe.

Az elvégzett műveletek után a völgyzárógátak és a hozzájuk tartozó vízgyűjtőterületek térbeli elhelyezkedése térképezhető (13.1 ábra).



13.1 ábra A vizsgált terület és a tervezett tározók elhelyezkedése a Tisza vízgyűjtőjén

A geoinformatikai környezetben kihasználva annak előnyeit, hogy a geometriai objektumokhoz relációs adattáblákon keresztül további jellemzőket rendelhetünk, elkészítettem a tározókhoz tartozó leíró adatok csatolt tábláját, amely a következő adatokat tartalmazza:

- A tározó sorszáma
- Vízgyűjtőterület megnevezése
- A tározót tartalmazó vízfolyás
- A vízgyűjtőterület tervezett nagysága [km²]
- Mértékadó 1%-os árhullám csúcsvízhozama [m³/sec]
- Mértékadó 1%-os árhullám térfogata
- Tározó tervezett hasznos térfogata [Mm³]
- Tározó tervezett felülete [ha]
- Gát magassága [m]
- Gát hossza [m]
- A gáton vezetett út hossza [m]
- Zárt árapasztó a galéria átmérője [m]
- Legnagyobb leeresztett 1%-os vízhozam [m³/sec]
- Leeresztett vízhozam az 1%-os árhullám tetőzésekor [m³/sec]
- A felszíni árapasztó a bukóél hosszúsága [m]
- A felszíni árapasztó legnagyobb leeresztett 0,5 %-os vízhozam [m³/sec]
- Hordalékfogó tározó térfogata [Mm³]
- Völgyzárógátak koordinátái
- A vízgyűjtőterület modellben számítható nagysága [m²]

A tervezett tározók a jellemzőik alapján csoportosíthatók és témák szerint térképezhetők, pl.: vízgyűjtőterületek nagysága (13.2. ábra), létesítésének ütemezése (13.3. ábra).



13.2. ábra A tervezett tározók feletti vízgyűjtőterületek nagysága



13.3. ábra A tervezett tározók létesítésének ütemezése

13.4 Domborzatmodell alkalmazása a tározási görbék meghatározásában

A további hidrológiai modellezés szempontjából nélkülözhetetlen a tározókra jellemző tározási táblázatok és tározási görbék (befogadó kapacitás az elárasztási szintek függvényében) ismerete. Mivel a felszíni domborzatmodell túl durva (100 m) felbontású a tározó feltöltődésének modellezéséhez és a tározási görbe megadásához, ezért az adott magassági információk sűrítésével finomítani kell a felbontást. A szükséges adatok közelítő értéke az így nyert szintvonalak alapján történő interpolációval meghatározható.

A mintaterületen a következő lépések során készültek el a későbbiekben felhasznált tározási görbék:

- 1) A felszíni domborzatmodell finomítása a tározók modellezése céljából.
 - a) Szintvonalak és magassági pontok alapján a tározók környékének 10 m felbontású domborzatmodelljének elkészítése.
 - b) TOPOGRID (hidrológiai folyamatoknak megfelelő (Hutchinson 1988; 1996) interpolációs modell) alkalmazása (13.4. ábra).
- 2) Az egyes elöntési szintekhez tartozó területi (2D), felületi (2.5D) és térfogati (3D) számítások.
 - a) A tározó elhelyezkedésének megadása poligonnal, figyelembe véve a tervezett gát magasságát, hosszát és a tározó tervekben szereplő alapterületét (13.4. ábra, piros vonal).
 - b) A tározók területi lehatárolása után a tározó domborzatmodelljén meghatározni az elöntött területek nagyságát és az elöntés térfogatát.
- 3) A számítások alapján a tározási táblázatok és görbék megadása (13.4. ábra).



13.4. ábra A felszíni, durvább felbontású domborzatmodell alapján lineárisan sűrített szintvonalvonalak (szintvonalköz: 5 m), majd a TOPOGRID interpolációval előállított finomabb felbontású (10 m) tározómodell alkalmazása a 46-os számú tározó esetén

Az első ütemben megépítendő tározók közül három eltérő helyzetű (magasság, rendűség) és eltérő formájú (főág, mellékágak) tározó (13.5. ábra) számítási fázisai és tározási görbéje látható a következő ábrákon (13.6. ábra, 13.7. ábra).



13.5. ábra A bemutatott három, eltérő jellegű tározó elhelyezkedése



13.6. ábra A 26-os számú tározó feltöltési fázisai



13.7. ábra A 32-es számú tározó feltöltési fázisai

A domborzatmodell alapján a feltöltés-elárasztás függvényében számítható a tározók kapacitása, melyek megadhatók tározási táblázatokba rendezve (13.1 táblázat). A számított értékek alapján a feltöltés folyamatát szemléltethetjük (nedvesített felület, térfogat) és megszerkeszthetők a jellemző tározási görbék (13.8 és 13.9. ábra).

13.1 táblázat A kiválasztott három tározó számított tározási értékei adott elárasztási szint esetén (a vízoszlop magassága a kifolyási pontnál 5 méterenként jelölve, pirossal a tervezett tározási kapacitás)

| vízmagasság [m] | V _{T26} Mm ³ | V _{T32} Mm ³ | V _{T46} Mm ³ |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 5 | 0.0 | 1.1 | 0.1 |
| 10 | 0.0 | 2.7 | 0.8 |
| 15 | 0.1 | 4.7 | 2.0 |
| 20 | 0.3 | 7.1 | 3.6 |
| 25 | 1.4 | 9.9 | 5.5 |
| 29 | 2.8 | 12.5 | 7.4 |
| 30 | 3.2 | 13.2 | 7.9 |
| 35 | 5.9 | 17.1 | 9.2 |
| 40 | 9.3 | 21.3 | - |
| 45 | 13.3 | 25.8 | - |
| 50 | 17.6 | - | - |
| 51 | 18.4 | - | - |
| 55 | 19.3 | - | - |

V - térfogat, T26,T32,T46 - tározók, Mm³ - millió köbméter



13.8. ábra A 46-os számú tározó négy feltöltési fázisához tartozó geometriai jellemzők (nedvesített felület [ha], befogadó kapacitás [Mm³]) domborzatmodellen alapuló számítási eredményei



13.9. ábra A három tározó tározási görbéje

A domborzatmodellből ily módon levezetett adatok a hidrológiai modellezés bemeneti értékeiként hasznosulnak a későbbiekben.

13.5 Domborzatmodellből levezetett adatok felhasználása optimalizálási eljárásban

A hegyvidéki völgyzárógátas, szabályozott tározók üzemeltetése kapcsán két fontos kritériumot együttesen kell figyelembe venni:

1) A tározókat a talaj megóvása érdekében minél előbb le kell engedni, egyébként a völgy oldaláról a víz az ürítés folyamán az átázott talajt teljesen lemossa.

2) A tározók vizét annak figyelembe vételével kell leengedni, hogy a leeresztéskor előidézett un. eredő, "mesterséges" árhullám ne okozzon nagyobb kárt, mint amit a természetes okozott volna, ha nem lennének közbeiktatva a tározók. Ez azt jelenti, hogy a tározókból leeresztett víz által keletkezett árhullám szintjének valamely alsóbb vízmércén alatta kell maradni egy előre rögzített értéknek.

A vázolt feladat egy bonyolult struktúrájú, nemlineáris, többkritériumú szabályozási probléma megoldásához vezet. A bonyolultságot az egyszerre szabályozandó tározók esetlegesen nagyobb számán túl az is fokozza, hogy mivel az egyik szabályozási kritérium az alsó peremfeltételre van megadva, ezért annak garantálására a releváns hidraulikai egyenleteket "visszafelé", a folyamatokkal (vízfolyással) ellenkező irányba kellene megoldani. Vagyis nem az a kérdés, hogy ha kiválasztunk egy konkrét tározó-leeresztési stratégiát, akkor ennek következtében egy alsóbb vízmérceszelvényre vajon milyen hidrográf alakul majd ki, hanem megfordítva: keresendő az a tározóleeresztési stratégia (tározónként: időzítésre és a leeresztő-nyílás méretére) amely következtében a vízszint az adott alsóbb vízmércén egy előre rögzített értéket biztosan nem halad majd meg.

Ezt a feladat-osztályt a szakirodalom a matematikai modellezés úgynevezett inverz problémájaként tárgyalja. Bonyolultságuknál fogva az ilyen – és konkrétan a fent vázolt – feladat explicite, analitikus módon általában nem is oldható meg, ezért a szabályozási célkritériumok teljesítése érdekében annak algoritmikus megoldása válik szükségessé.

Az algoritmikus megközelítés egyik leghatékonyabb eszköze, ha a rendszernek a szabályozás célkritériumaitól (pl.: a leeresztett víz a mederben adott vízszinttartományban tartása, stb.) való eltérését megadó célfüggvényt az úgynevezett "szabályozás-próbálgatás" módszer (trial-and-error adjustment) elvei szerint próbáljuk minimalizálni (Szabó és Bódis 2006). Lényegét tekintve ez azt jelenti, hogy a megoldandó inverz probléma helyett nagy számú "próbálgatással" véges sok különböző leeresztési paraméterezés (szabályozás) közül azt kell kiválasztani, amely esetén a mederben kialakult hidrográf a legkisebb hibával közelíti meg az elvárt (tervezett) idősort, miközben minimalizáljuk a víz tartózkodási idejét a tározókban.

Az így megfogalmazott szabályozási feladatok globális szélsőérték-problémák megoldásához vezetnek, amelyek általában szintén csak algoritmikusan, a fokozatos közelítés elvei mentén oldhatók meg, amint az tettük a felső-tiszai mintapélda kapcsán is, ahol a felső-tiszai három tározóból álló rendszer (13.11. ábra) szabályozási modelljét az alábbi modellrendszer összehangolásával oldottuk meg (Szabó és Bódis 2006).

Megoldott részfeladatok:

- Az egyes tározókhoz tartozó vízgyűjtők területén lezajló csapadékösszegyülekezési folyamatokat a DIWA osztott paraméterű csapadéklefolyás modell (Szabó 2007; Szabó et al. 2008) segítségével írtuk le.
- 2) A tározók dinamikáját Poleni és Bernoulli hidraulikai egyenleteinek megfelelő almodellel számoltuk (ld. következő alfejezet).
- A tározókból a folyómederbe leeresztett víz mederbeli transzformációját a lineáris diffúziós hullámmodell egy alkalmas megoldásával modelleztük (Szabó 1988).
- 4) A leeresztés szabályozását megvalósító inverz feladat minimalizálási problémáját egy hatékonyan "társított" (hibrid) globálisan is konvergens globális-lokális algoritmuskombinációs eljárással (Pintér és Szabó 1985; Szabó 2008) oldottuk meg.

A tározók árvízcsökkentő hatásának optimalizálását bemutató számításokhoz a tervekben szereplő 25, 26 és 27-es számú tározók elhelyezkedését (13.10. ábra) választottuk ki (továbbiakban 1, 2, 3) a 13.2. táblázatban összefoglalt geometriai jellemzőkkel felhasználva a domborzatmodellből levezetett adatokat.

13.2. táblázat A Tarac (Tereszva) vízgyűjtőjén lévő tározórendszer geometriai jellemzői

| | Tározó 1. | Tározó 2. | Tározó 3. |
|--|-----------|-----------|-----------|
| Kapacitás [Mm³] | 19,27 | 32,57 | 9,2 |
| Maximális gátmagasság [m] | 52 | 53 | 33 |
| Vízgyűjtőterület nagysága [km²] | 205 | 205 | 93 |
| A galéria maximális átmérője [m ²] | 5 | 5 | 5 |



13.10. ábra A kiválasztott tározók és a hozzájuk tartozó részvízgyűjtők elhelyezkedése a Tisza egy jobb oldali mellékfolyójának (Tarac) vízgyűjtőjén

13.5.1 A tározó paraméterei

A cél a tározók árvízcsökkentő hatásának a kiürítés megfelelő ütemezésével és a fenékleeresztő zsilip átmérőjének módosításával történő optimalizálása előre megadott, maximális vízhozam esetén.

A számításokhoz a völgyzáró gát és a mögötte lévő tározó fizikai paramétereinek ismeretére van szükség (13.11. ábra).



13.11. ábra Hegyvidéki árvízcsökkentő tározó sematikus keresztmetszete

Jelölések:

μ

| Q_i | (m^3/s) | - befolyó vízmennyiség, |
|----------------|---------------------|--|
| V | (m ³) | - a tározó térfogata, |
| h_1 | (m) | - vízmélység a fix bukó koronaszintjétől mérve, |
| h ₂ | (m) | vízmélység a galéria szintjétől mérve, |
| А | (m ²) | - a galéria felülete, |
| Q_1 | (m ³ /s) | - elfolyó vízhozam a bukóélen keresztül, |
| Q2 | (m ³ /s) | - elfolyó vízhozam a galérián keresztül. |
| További, a | felhasznált | egyenletekben használt jelölések: |
| t | (s) | - idő, |
| b | (m) | - a bukóél hosszúsága, |

- vízhozam tényező.

A műszaki paramétereket a tározók leírásából, a különböző vízmagasságokhoz tartozó térfogatokat a domborzatmodellből levezetett adatok alapján határoztam meg.

13.5.2 Alkalmazott egyenletek

Az optimalizálási feladat megoldása során a tározók paraméterei között fennálló következő összefüggéseket használtuk fel (Szabó és Bódis 2006; Szabó et al. 2008).

Folytonossági egyenlet (Bernoulli)

térfogatváltozás = befolyt vízmennyiség – kifolyt vízmennyiség (egységnyi idő alatt)

Matematikai alakban:

$$\frac{dV}{dt} = Q_i - Q_1 - Q_2$$
ahol az előző, 13.10 ábrának megfelelően:
 Q_i - befolyt vízmennyiség,
 Q_1 - a bukóélen keresztül elfolyó vízhozam,
 Q_2 - a galérián keresztül elfolyó vízhozam.

Poleni-féle bukóképlet

Szabad átbukást feltételezve a fix küszöbű bukón átfolyó vízmennyiség a következő módon határozható meg:

$$Q_1 = \frac{2}{3}\mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_1^{3/2}$$

Az egyenletekben szereplő tagok:

| b | (m) | - a bukó koronaszélessége, |
|-------|-----------|---|
| g | (m/s^2) | - gravitációs gyorsulás (Zürich-ben, 45°-on 9,80665 m/s ²), |
| μ | | - vízhozam tényező, |
| h_1 | (m) | a vízmélység a fix bukó koronaszintjétől mérve. |

Torricelli-féle kiömlési törvény

$$Q_2 = A \cdot \sqrt{2g \cdot h_2}$$

Ahol

| А | (m^2) | - a galéria felülete, |
|-------|-----------|---|
| g | (m/s^2) | - gravitációs gyorsulás (Zürich-ben, 45°-on 9,80665 m/s ²), |
| h_2 | (m) | a vízmélység a galéria szintjétől mérve. |

13.5.3 Optimális tározó-leengedési stratégia

Az optimalizálási feladat megoldásához kiindulásként választott hidrológiai kezdeti feltételek alapján mindhárom tározó fel van töltve. A cél, az optimális tározóleengedési stratégia az eltelt idő minimalizálása és a leeresztett víz a mederben adott vízszint/vízhozam-tartományban tartása a kiválasztott tározók esetében a 13.12 ábrán látható eredményre vezetett (Szabó és Bódis 2006).



13.12. ábra Optimális tározó-leengedési stratégia (megengedett vízhozamok, javasolt ütemezés és fenékleeresztő-átmérők a három vizsgált tározó esetén)

Amennyiben mindhárom tározó leengedését egy időben, maximális fenékleeresztő nyílással kezdjük meg (13.12. ábra, sötétkék grafikon), abban az esetben a leengedett vízmennyiség az első 10-12 órában egy magas, mesterséges árhullámot hoz létre, amely esetünkben a kontrol-vízmércénél több, mint 550 m³/s-os vízhozamot jelent. Ha ennél a vízmércénél a biztonságos levezetést jelentő maximális megengedett vízhozamot 300 m³/s-ban határozzuk meg, úgy a tározók optimális leengedése (13.12. ábra, piros grafikon) nem egy időben kezdődik és nem a maximális galéria-átmérők mellett történik (13.12. ábra, piros számok). A 2-es számmal jelzett tározó megnyitását követően 13 óra múlva célszerű megnyitni az 1-es számú tározót és majd három nap múlva (69 óra) a 3-as számú tározót. Még alacsonyabb, 200 m³/s-os maximális vízhozam megengedésével (13.12. ábra, világoskék grafikon) a leengedés ütemezése és a zsilipnyílás javasolt átmérője ismét változik (13.12. ábra, világoskék számok).

13.6 Eredmények és további lehetőségek

Digitális domborzatmodell és a folyóhálózat – mint irányított lefolyáshálózat – alapján történő számítások (helykiválasztás), valamint leíró adatok (műszaki jellemzők) felhasználásával elkészült a Tisza kárpát-ukrajnai vízgyűjtőjén tervezett árvízcsökkentő tározóinak egy olyan, geoinformatikai rendszerben tárolt katasztere, amely alkalmas további hidrológiai modellezési-, tervezési- és döntéshozatali feladatok megoldásához szükséges adatokat szolgáltatni.

A példa a tározók egy kiválasztott alrendszerének optimális leeresztési stratégiáját mutatja be. A tározási táblázatok és tározási görbék számításához az eredeti, durvább felbontású domborzatmodell interpolációs finomításával (Hutchinson 1988) kapott felületmodellt használtam. A tározók elkészített és ismertetett geoinformatikai rendszere kiindulási alapul szolgál további, összetett, numerikus hidrológiai modellekkel való elemzésekhez is. A geoinformatikai rendszerből nyert adatok beágyazhatók osztott paraméterű numerikus hidrológiai modellbe az egyéb, környezeti adatok (domborzat, lefolyáshálózat, talaj-adatok, vegetáció, stb.) összehangolásával (Szabó 2007; Szabó et al. 2008).

A kidolgozott módszert és modellt a döntéstámogatásban nem csak a dolgozatban leírt, a tározók optimális leeresztésével kapcsolatos feladatokban alkalmaztuk eredményesen, hanem – további, az egész vízgyűjtőt érintő, idősorok statisztikai kiértékelésével kapott, feltételezett csapadékmennyiség és annak térbeli eloszlásának figyelembe vételével – elsőként végeztük el a tervezett felső-tiszai tározórendszer hatáselemzését (Szabó et al. 2008).

A vizsgálatok során a modellt lefuttattuk a 2001-es, pusztító árvizet okozó meteorológiai körülményeket szimulálva is, amely esetben a rendkívüli árhullámot a hirtelen, erős felmelegedést követő gyors hóolvadás (13.13 ábra) valamint az azzal együttesen bekövetkező, a vízgyűjtő felső folyását érintő heves esőzések okozták.



13.13 ábra A hóban tárolt vízkészlet térbeli eloszlása a Tisza Tiszabecs feletti vízgyűjtőjén, 2001. március 1-én és 6 nap múlva, március 7-én

Az elvégzett szimulációk nem mutatják a felső-tiszai tározórendszer létesítésétől várt hatékonyságot az árhullámok mértékének csökkentésében (mindössze 8 % csökkenést tapasztaltunk a csúcs-vízhozamban), ugyanakkor azokra a vizsgálatokra, amelyek a felső-tiszai völgyzárógátas rendszer és a tervezett ukrán síkvidéki tározók együttes árvízcsökkentő és vízvisszatartó hatását elemzik, még szükség van.

14 Nagyfelbontású digitális domborzatmodellek alkalmazása síkvidéki tározók létesítésének tervezésében

Az Új Vásárhelyi-terv keretében tervezett Szegedi tározó domborzatmodellje

14.1 Bevezetés

Az Európai Unió Víz Keretirányelve (VKI) – az európai vízgyűjtők integrált kezelésének és tervezésének koncepciója – nagy hangsúly helyez a természetvédelmi szempontokra, a vízi ökoszisztémák, a víztől közvetlenül függő szárazföldi ökoszisztémák, valamint vizes területek állapotának megtartására és javítására, különös tekintettel a fenntartható vízgazdálkodásra és egyenrangú célként tartalmazza az ökológiai rehabilitációs feladatok és a társadalmi részvétel kötelező integrálásának feladatát a vízügyi programokba²⁸. A Víz Keretirányelvvel összhangban a magyarországi Várhelyi-terv indításáról, az elmúlt évtizedek legnagyobb hazai vidékfejlesztési programjáról, 2003-ban született kormánydöntés [a 2003/2002 (I.11.) számú kormányhatározat].

A terv keretén belül a hazai területen építendő síkvidéki árapasztó tározókkal és az előirányzott mederrendezésekkel – az ártéren élő több mint másfélmillió lakos és a felhalmozott vagyon árvízi veszélyeztetett-ségének jelentős csökkentését célozták²⁹.

A Vásárhelyi-terv I. ütemében, 2007-ig hat árapasztó tározó megépítését tervezték a Felső- és Közép-Tisza mentén³⁰.

Dolgozatomnak nem célja ismertetni a Vásárhelyi-terv kivitelezése körül kialakult szakmai és társadalmi vitát, valamint a megvalósításhoz szükséges gazdasági tényezőket feltárni, de az megjegyzendő, hogy 2008 év végéig csak két tározót³¹, a tiszaroffit, valamint a cigánd-tiszakarádi tározót adták át (14.1 ábra), amelyektől egyenként a csúcs-árhullám magasságának 20-25 centiméteres csökkentését várják.



14.1 ábra Lesz hol levezetni. A cigándi tározó átadása előtti országos hirdetmény (Figyelő, 2008. szeptember 11-17. nyomán)

Dolgozatomnak célja ugyanakkor egy viszonylag gyors és megbízható, továbbá költségkímélő, az előzetes tervezést így hatékonyan segítő, geoinformatikai módszer bemutatása, amely további beruházások szakmai megalapozásához is hozzájárulhat.

²⁹ Vásárhelyi terv továbbfejlesztése (Koncepció-terv), 2002 március,

²⁸ The EU Water Framework Directive - integrated river basin management for Europe, http://europa.eu.int/comm/environment/water/water-framework/index en.html

http://www.vizugy.hu/vasarhelyi/koncepcio_1.htm

³⁰ A Vásárhelyi-terv Tárcaközi Bizottság Hírlevele, 2004/2, http://www.vizugy.hu/vtt/altalanos.pdf

³¹ Cigándi árapasztó tározó, http://www.operativprogram.hu/cigandi_arapaszto_tarozo/

14.2 Problémafelvetés

A Tiszán az év bármely szakában kialakulhatnak igen magas árvizek, de az árvizek levonulásának természete és kialakulásuk körülményei változatos (pl. a vízgyűjtő vízvisszatartó képességének kezdeti állapota, csúcs-árhullámok időbeli egyezése a mellékfolyókon, hidraulikai viszonyok, az áradás miatti visszaduzzasztás, a csapadék térbeli és időbeli eloszlása a vízgyűjtőn, stb.), ezzel meglehetősen kiszámíthatatlanná téve az áradást. 1998 novemberében 17 éves száraz időszakot követően hazánkban árvízveszély, határainkon túl pedig katasztrófahelyzet alakult ki a Felső-Tiszán, majd 2001-ig bezárólag négy, az addigi legnagyobb vízállásokat (LNV) meghaladó árhullám vonult le a Tiszán (Vágás 2001; 14.2 ábra). A 2006. áprilisi áradás újraírta a legmagasabb vízállási rekordokat a Közép- és az Alsó-Tisza, valamint a Körösök vízmércéin. Az új, legnagyobb vízállások 32-62 cm-rel haladták meg az addigi rekordokat³².



14.2 ábra Az addigi legnagyobb vízállások (LNV) bekövetkezésének éve a Tisza és mellékfolyóinak magyarországi szakaszán 2002-ig, Forrás: Rakonczai (2002)

Árvizeinket elsősorban a határokon túlról érkező vízmennyiség okozza és a kiszolgáltatott helyzet csökkentése érdekében szakértők szerint "a Tisza rendkívüli árvizeinek károkozás nélküli levezetésére a legalkalmasabb megoldás a hazai ártéren megvalósítható tározásos árapasztó-rendszer"^{33,34}.

³² Ár- és belvízhelyzet Magyarországon, 2006-04-26

http://www.ktm.hu/index.php?pid=4&sid=26&hid=1235

³³ Vásárhelyi terv továbbfejlesztése (Koncepció-terv), 2002 március, http://www.vizugy.hu/vasarhelyi/koncepcio 1.htm

³⁴ Szlávik Lajos: Magyarország árvízvédelmének fejlesztési politikája: http://www.tiszaklub.hu/program4a.php

14.3 Domborzatmodell alkalmazásához kapcsolódó feladatok

A síkvidéki árapasztó tározók tervezésének több fázisában alkalmazhatjuk a geoinformatika eszköztárát:

- Több szempontú minősítés eredményeként, a lehetőségek közül a legalkalmasabb területek kijelölése és értékelése,
- A tervezett tározók határainak jellege, szükséges földmunkák, építendő töltések, mérnöki munkálatok felmérése, költségek tervezése,
- A kijelölt területek hasznosításának és tulajdonviszonyainak felmérése,
- A tározók befogadó kapacitásának számítása, alkalmasság-vizsgálat a rendkívüli esetben 1500 millió m³ árvíz időleges visszatartására, amely a nagyobb árhullámok naponta lefolyó 300-360 millió m³ vízmennyisége mellett kb. négy-ötnapi vízvisszatartási igényt jelent (Vágás 2001).

Mivel a tározásra leginkább alkalmasnak vélt területek kijelölése már megtörtént, az adott területek elfoglalása és elárasztása, valamint a töltések építése "csupán" finanszírozás kérdése, ezért vizsgálatunk elsősorban a koncepciótervekben felsorolt síkvidéki tározók befogadó kapacitásának meghatározásával, annak technikai kérdéseivel foglalkozik.

Számításainkat a tervezett Szegedi síkvidéki tározó példáján mutatjuk be. A szegedi példa területi kiválasztását az összefoglaló leírásokban található, figyelemfelkeltő kalkulációk indukálták, ezekben ugyanis azt olvashattuk, hogy a tervbe vett tározók közül a harmadik legnagyobb területtel, ugyanakkor a legnagyobb kapacitással üzemeltetendő, és így igen nagy jelentőséggel bíró tározó a szegedi lenne (14.3. ábra). A létesítmény megvalósításának becsült költsége azonban – valószínűleg a feltételezett felszíni tulajdonságok miatt – lényegesen elmaradt a jóval kisebb teljesítményű tározók költségterveitől (14.1 táblázat). Ez az ellentmondásosnak tűnő aránybeli eltérés a várható tározási kapacitás és a becsült költségek között felhívta a figyelmet az értékeket eredményező számítási módszerek vizsgálatára.

| п | Látosítmány mognovozáso | Terület | Térfogat | Becsült költség (2001) |
|-----|--------------------------------|---------|--------------------|------------------------|
| | Letesitieny megnevezese | (km²) | (Mm ³) | (MFt) |
| 1. | Felső-túri vésztározó | 5,7 | 9,5 | 900 |
| 2. | Szamosközi vésztározó | 54,5 | 102 | 3308 |
| 3. | Inérháti vésztározó | 42 | 100 | 1420 |
| 4. | Hortobágy középső vésztározó | 61,8 | 135,5 | 5423 |
| 5. | Nagykunsági vésztározó | 44 | 100 | 2995 |
| 6. | Hanyi-Jászsági vésztározó | 60 | 113 | 3666 |
| 7. | Szegedi vésztározó | 60,6 | 187 | 1700 |
| 8. | Szamos-Kraszna-közi vésztározó | 58,4 | 100 | 2099 |
| 9. | Dél-Borsodi vésztározó | 131 | 170 | 6990 |
| 10. | Tiszacsegei vésztározó | 52 | 105 | 5923 |
| 11. | Cserőközi vésztározó | 19,7 | 40 | 3196 |
| 12. | Tiszanánai vésztározó | 37,5 | 72 | 5469 |
| 13. | Hanyi-Tiszasülyi vésztározó | 57 | 132 | 6492 |
| 14. | Köröszugi vésztározó | 68 | 160 | 3252 |
| | Vésztározók mindösszesen: | 752,2 | 1526 | 52833 |

14.1 táblázat A nyilvános koncepciótervben felsorolt árapasztó tározók becsült költségei, a nagy kapacitású szegedi tározó arányaiban kis beruházási költséggel

Forrás: 20. táblázat A fejlesztési program részfeladatai és becsült költségei http://www.vizugy.hu/vasarhelyi/abrak/20t.htm



14.3 ábra A javasolt síkvidéki árvíztározók elhelyezkedése és legfontosabb jellemzőik a Tisza-völgyben (a rendszerben számításba vett tározók - 14 tározós változat), (vízfelület [km²], tervezett tározó kapacitás [Mm³]), Forrás: Vásárhelyi terv továbbfejlesztése (Koncepció-terv)³⁵

14.4 Kiindulási adatok és módszerek

A tározó elhelyezkedését bemutató részletesebb térkép alapján (14.4 ábra) mindössze az északi parton terveznek új töltésépítést, a keleti oldalt a Tisza jelenlegi védvonala adja, a déli elvégződésen a meglévő töltésének magasításával érnék el a tározó területének lehatárolását. A térképet szemlélve az is látható, hogy a tározó nyugati oldalát a természetes magaslatot jelentő 80 méteres szintvonal jelöli ki. Ezek alapján meghatározhatjuk, hogy a tervezett 61 km²-es tározóban átlagosan több, mint 3 méteres vízszintnek kellene lennie, ha az előirányzott 187 millió m³ kapacitást kívánjuk elérni. Ebben az esetben azonban a tározó nyugati partja egy feszített víztükrű medencére hasonlít és a számításoknál nem vesszük figyelembe, hogy a tározó határvonalain belül – a magassági viszonyokat tekintve – több sziget is kiemelkedik. Felmerül tehát a kérdés, hogy helyesek-e a tervben szereplő számítások, illetve milyen hatékony módszert tudunk bemutatni a számítások igazolására.

³⁵ Vásárhelyi terv továbbfejlesztése (Koncepció-terv), (2002. március) http://www.vizugy.hu/vasarhelyi/abrak/23.htm


14.4 ábra A tervekben szereplő szegedi tározó és paraméterei, valamint a megvalósításához feltüntetett szükséges földmunkálatok a tározó északi (piros vonal) és déli (sárga vonal) határain.14.3 ábrán piros keret jelöli a részletes térkép helyét

A tervekben szereplő értékek és a kapott információk alapján a vízgyűjtő befogadó kapacitását a keresztmetszetek területének becslése útján határozták meg, amely általában alkalmas pl. adott keresztmetszettel rendelkező folyó vízhozamának meghatározásához (a sebesség ismeretében), de kevésbé alkalmazható feltöltendő medence (tározó) térfogatának pontosabb megadásában. Az előzetes számításokban alkalmazott módszer szerint néhány (*i*), véletlenszerűen, vagy szisztematikusan kiválasztott, párhuzamos keresztmetszetét véve a területnek (A_{wpi}) és ezt megszorozva a párhuzamosok közötti távolsággal (d_i), majd a szorzatokat összegezve megkapjuk a terület térfogatát (V):

$$V = \sum_{i=1}^{n} A_{wpi} d_i$$

Az eredmény realisztikus közelítésének mértéke természetesen függ az alkalmazott mintavételezés sűrűségétől (n) és a felszín változatosságától is. Az magassági adatforrásként felhasznált analóg topográfiai térképek (szintvonalak) alapján a befogadó kapacitás számításakor az adott elöntési szintek fölé magasodó területek "szigetként" való kezelése újabb forrása a számítási eredmények bizonytalanságának. A vázolt közelítő módszer (14.5 ábra) ugyanakkor nem teljesen helytelen, csak túlzottan elnagyolt, a megfelelő mintavételezési sűrűséget nem tudja biztosítani.

Az alábbiakban azonos magassági adatforrást, a topográfiai térképek szintvonalait felhasználva, de a digitális domborzatmodellezés eszköztárának bevetésével kidolgozott, hatékony és rugalmas térfogat számítási módszert mutatok be.



14.5 ábra Példa a térfogat közelítésére a keresztmetszetek területének becslésével

Első lépésként a területet lefedő 1:10.000 méretarányú topográfiai térképek magassági adatait (szintvonalak, magassági pontok) digitalizáltuk, majd a későbbi modellalkotás céljából a természetes vízfolyásokat, mesterséges csatornákat, azok lefolyási irányát, valamint a területet érintő védelmi vonalakat (utak töltései, gátak) is bevittük a rendszerbe. Az adatbeviteli műveleteket a szkennelt (600 dpi), geo-referált és az Egységes Országos Vetület koordináta-rendszerébe transzformált topográfiai térképek képernyőn való digitalizálásával végeztük el (Szakál 2003). A gátak magasságának a folyó mentén történő változásait sztereo-légifelvétek kiértékelésével rögzítettük (Bódis et al. 2003; Bódis és Szatmári 2005), valamint a felvételeket felhasználtuk a létrehozott geoinformatikai adatbázis vizuális korrekciójában is.

Az így létrehozott digitális állományt felhasználva igen gyorsan elvégezhető az előzetesen alkalmazott profilszámítási módszer: a területen keresztül fektetett egyenesek mentén a metszett szintvonalak értékei alapján kiszámíthatjuk a profil területét. Az elvégzett tesztek azt mutatták, hogy a keresztmetszetek területének számításával sem kapjuk vissza a tervekben megcélzott tározási kapacitást, ha a szintén tervezett elöntési vízmagasságokat vesszük figyelembe. Az alacsonyabb, 80 méteres elöntési szinthez kb. 89 Mm³ tározási kapacitást számítottunk, míg a magasabb, 83,4 méteres elöntés esetén kb. 296 Mm³ lenne a befogadható térfogat (Bódis 2007). Az értékek egyike sem egyezik a tervekben feltüntetett 187 Mm³ kapacitással.

Számításaink alapján a következőket állapíthattuk meg az analóg módszer eredményeiről:

- Egyik, a tervekben szereplő átlagos vízmagasság sem adja vissza a 187 Mm³-t,
- Nem ismert az egyes vízmagasságoknál elöntött terület nagysága, nehezen számítható,
- Az elöntési szint felett lévő tér "kiesik" a tározó alapterületéből,
- A módszer a szintvonalak közötti, nem lineáris változásokat nem kezeli.

A nagyfelbontású digitális domborzatmodell felhasználásával pontosabb képet kaphatunk a kijelölt terület felszíni viszonyairól.

14.5 A tározó digitális domborzatmodellje

A különböző elöntési szintekhez tartozó térfogati számítások elvégzéséhez, a tározó feltöltésének és leeresztésének szimulációjához, keresztmetszetek szerkesztéséhez, valamint a területet lefedő légifelvételek ortokorrekciójához elkészítettük a tározó nagyfelbontású digitális domborzatmodelljét.

14.5.1 A domborzatmodell forrásai

A domborzatmodell elsődleges forrását a hazai EOTR térképsorozat 1:10.000 méretarányú topográfiai térképeinek magassági adatai szolgáltatták. A domborzati viszonyok mellett a fontosabb mesterséges tereptárgyakat fotogrammetriai adatnyerési eljárással digitalizáltuk, melyek során a következő rétegek kerültek be a rendszerbe:

- Szintvonalak, 0,5-1 m-es szintvonalköz, M=1:10.000,
- Magassági pontok, csúcsok, háromszögelési pontok,
- Lefolyástalan területek és kiemelkedések,
- Természetes lefolyásirányok,
- Tereptárgyak kiemelkedései (forrás: topográfiai térkép, fotogrammetria).

14.5.2 A domborzatmodell előállítása

A digitális domborzatmodell az ESRI Arc/Info Workstation Topogrid moduljában készült. Az alkalmazott determinisztikus interpolációs eljárást kifejezetten vízrajzilag helyes domborzati modellek előállítására fejlesztették ki, a hidrológiai felszínformáló folyamatokat figyelembe véve (Hutchinson 1988). A kidolgozott komplex, iteratív eljárás (ANUDEM modell) során a szabályos rácsháló értékeinek meghatározása nagyszámú, szabálytalanul elhelyezkedő magassági pont, szintvonalak és völgyek-vízfolyások nyomvonala, illetve azok irányultsága alapján történik (Hutchinson 1997). A szintvonalak és a magassági pontok értékeit az alattuk levő cellák megkapják, a köztes értékek kiszámításának finomságát a modellparaméterként megadott iterációs szám és toleranciák biztosítják. A modellezés során a hidrológiai alapú megközelítés és az iteratív módszer biztosítja, hogy a kimeneti modellben ne legyenek durva hibák, törések, lépcsők és alkalmas a kis területű változások kezelésére is.

A területen végighúzódó töltésrendszer, valamint a hullámtér és a mentett oldalak eltérő felszíni viszonyai miatt a domborzatmodell elkészítése során további geoinformatikai műveleteket is alkalmazni kellett annak érdekében, hogy valóban hidrológiailag helyes képet kapjunk. A leírt algoritmus ugyanis a természetes folyamatokból indul ki, így a mesterséges létesítmények megtéveszthetik (14.6 ábra). A töltések két oldalának hirtelen változását ebben az esetben az interpoláció nem tudja helyesen követni, túlmélyítések, illetve túlmagasítások alakulhatnak ki, a két térszín "átfolyik" egymásba.



14.6 A mesterséges terepmagasítás miatt hirtelen változó felszín (hullámtér, töltés, mentett oldal) és a magassági interpolálás során jelentkező problémák: a felület magassági értékeinek alul- és felülbecslése

E zavaró jelenség elkerülése érdekében három részre osztottuk fel a területet a töltések mentén és a gátakat is külön kezeltük (Lego-GIS). Az domborzatmodellt előállító algoritmust lefuttattuk mindegyik területre, és ezeket a határvonalak mentén egymáshoz illesztve hoztunk létre egy egységes modellt, kiegészítve természetesen a határoló tereptárgyak magassági értékeivel (14.7. ábra).



14.7 Az azonos jellegű területek interpolációja és az összeillesztett végeredmény, A - lineáris felszíni objektumok (töltések), B - jobb oldali mentett oldal, C - hullámtér, D - bal oldali mentett oldal, E - az összeillesztett terepmodell

Összefoglalva: a tervezett tározó területének és közvetlen környezetének nagyfelbontású (2 méter) digitális terepmodelljét olyan komplex, iteratív közelítő eljárással készítettük el, amely a felszín hidrológiai jellemzőire tekintettel van (Bódis et al. 2003; Szakál 2003, Bódis és Szatmári 2005).

14.5.3 A felszínmodell ellenőrzése

Feltételezve, hogy a topográfiai térképek magassági adatai a felszín változásait elfogadható közelítéssel ábrázolja (Winkler 2004), és így a domborzati modell számára referenciaként alkalmazhatjuk, a létrehozó algoritmust néhány egyszerű eljárással ellenőriztük (Bódis et al. 2003; Szakál 2003; Bódis 2007):

- A bemeneti és referencia adatként alkalmazott szintvonalas térképet és az eredményül kapott domborzatmodellt egymásra fedetve az interpolált cellaértékek és az eredeti, diszkrét magassági adatok összehasonlíthatók. Az alkalmazott determinisztikus interpoláció a megfelelően beállított kiegészítő paraméterek mellett megtartotta a szintvonalak által megadott értékeket.
- A felhasznált magassági pontok rendszere hatékonyan segítette a térképi mélyedések és kiemelkedések modellezését. Az eredményt lokális és fokális raszter-műveletekkel ellenőriztük, amely során az interpoláció eredményezte, esetleges kiugró értékek kiszűrésére is alkalmas (Bódis 2007).

• Felületről generált izovonalak és az eredeti szintvonalak összehasonlítása során láthattuk (14.8 ábra), hogy a szintvonalak nem elegendő sűrűsége esetén az interpoláció alternatív felületeket generált. A jelenséget a köztes szintvonalak, illetve távérzékelt adatok felhasználásával próbáltuk meg kiküszöbölni (Bódis et al. 2003; Szakál 2003).



14.8 ábra Az eredeti szintvonalak és a domborzatmodell alapján generált izovonalak összehasonlítása. A - topográfiai térkép az eredeti szintvonalakkal, B - digitalizált szintvonalak, C - magassági modell, D - a modell alapján generált izovonalak, E - összehasonlítás (B és D), F - összehasonlítás (A és D)

Az eredményül kapott 2 méter felbontású felületmodell egy 5500x6500 méretű raszter, amely a magassági adatokat milliméter élességgel tartalmazza. Ez az érték természetesen nem jellemzi a domborzatmodell valódi pontosságát, de a hazai topográfiai térképek általánosan jó ($\pm 0.5 - \pm 1.5$ m) abszolút magassági pontossága (Winkler 2004) és a generált domborzatmodell minőségi ellenőrzése a további elemzésekhez megfelelő relatív pontosságot feltételez. A kapott modellen belüli relatív magasságkülönbségek természetesen (Alföld) igen kicsik. Az egész terület legalacsonyabb értéke 75,288 m, míg a legnagyobb érték 90,650 m, amely a természetes környezetből kimagasló árvízvédelmi töltést is magában foglalja (14.9 ábra).



14.9 ábra A tervezett szegedi tározó és környékének magassági modellje

14.6 A modell alkalmazási lehetőségei az árvízi védekezés tervezésévben

Eredetileg a gyors, megbízható és bármikor megismételhető területi és térfogati számítások elvégzése volt a kiindulási feladat a felületmodell létrehozásakor. A modellen elvégzett egyszerű geoinformatikai műveletek (átfedetés, térképi algebra, osztályozás) érdekes és hasznos eredményekre vezettek a terület feltételezett elöntéseit szimulálva. A modell alapján további felszínelemzések végezhetők; megadható a tározási görbe, modellezhető a feltöltés és leeresztés folyamata.

14.6.1 Gyors területi és térfogati számítások

Az adott elöntési szintekhez és elárasztott területekhez a modell alapján a tárolható vízmennyiség is becsülhető. Összehasonlíthatjuk az előzetes tervekben bemutatott elöntendő területeket (14.10A ábra) a modellezett lehetőségekkel (14.10B ábra). Látható, hogy a tervekben térképezett esetben azokat a területeket is elöntés alá vették, amelyek topográfiailag az előirányzott vízszint felé emelkednek, és így szigeteket alkotnak. Talán ez az oka a tervekben szereplő térfogati becslés túlzásának. Azt persze lehet mondani, hogy a "hegyeket" el lehet hordani, de ennek a földmunkálatnak sem a terveiről, sem a költségeiről nem olvashattunk a koncepciókban. Az ismertetett adatok alapján ez 3 Mm³-t (- föld, + befogadható víz) jelent.



14.10 ábra A tervezett és a modellezett elárasztható területek összehasonlítása

A - Publikus térkép az elárasztásról és a befogadható vízmennyiségről

B - Nedvesített terület 80 méteres (maximális nyugati magasság) elárasztáskor

Függetlenül az alkalmazott szoftvertől a számítási módszer a következő:

Újraosztályozás: TERULET_VIZ_h = $\begin{cases} 1, \text{ abol DEM_TAROZO} < h \\ 0, \text{ abol DEM_TAROZO} \ge h \end{cases}$,

A tározási kapacitás számítása:

 $TERFOGAT_{h} = cellameret* TERULET_VIZ_{h}*\sum_{i=1}^{n} (DEM_{TAROZO_{i}} - h),$

ahol a TERULET_VIZ_h az a raszteres adatállomány, amely az adott h elöntési szintnél alacsonyabban fekszik, és a DEM_TAROZO a tározó felületmodellje, továbbá ahol TERFOGAT_h az adott h elöntési szinthez tartozó, a modell alapján becsült tározási kapacitás. A futóindex i az elöntés alatt lévő vízfelületi-maszk celláinak sorszáma, amely minden elöntés alatt lévő cellát (n darab) sorba vesz.

14.7 Tározási görbe megadása a tervezéshez

Amint azt az előzőekben bemutattam, a felületmodellt gyors eszközként alkalmazhatjuk adott elárasztási szinthez tartozó térfogat-számítási feladatokban. Egy adott térfogatú vízmennyiség befogadásához szükséges elárasztási szint hasonlóan egyszerűen határozható meg a felületmodell alkalmazásával. A tározó modellje alapján megadott tározási görbe (14.11 ábra) a lehetséges árasztási szintekhez rendeli hozzá a befogadó-kapacitást.



14.11 ábra A tározó felületmodellje alapján számított tározási görbe

A grafikon mögötti számok alapján láthatjuk, hogy a publikált 187 Mm³ víztömeg befogadásához 81,4 méteres elöntési szint szükséges (14.12 ábra). Ennek a szintnek az eléréséhez – az előzetes tervekben olvasható értékelésnek ellentmondóan – jelentős mérnöki-, illetve földmunkálatokra van szükség, elsősorban a tározó nyugati, 18 km hosszú oldalán, amelyet a bemutatott tervek nem tartalmaztak (14.4 ábra).



14.12 ábra A különböző tározási térfogatokhoz tartozó becsült tározási kapacitások. A tervezett 187 Mm³ eléréséhez kb. 81,4 m magas elöntési szintre van szükség. A jobb alsó sarokban látható átnézeti térképen a fehér vonal jelöli az ábrázolt keresztmetszet helyzetét

14.8 Lefolyásirányok meghatározása az elárasztás és kiürítés szimulálásához

Egy árvízi szükségtározó esetén a legfőbb operatív feladat a tározó elárasztása és kiürítése. A felszíni hidrológiai tulajdonságokat jól közelítő domborzatmodell felhasználható a gyakorlati műveleti szükségszerűen megelőzendő matematikai modellezésben és tervezésben. A korábbi fejezetekben is bemutatott morfológiai és gyülekezési modellek (Bauer et al. 1985; Costa-Cabral et al. 1994; Fairfield és Leymarie 1991; Freeman 1991; Greenlee 1987; O'Callaghan és Mark 1984; Quinn et al. 1991; Tarboton et al. 1991; Tarboton 1997; Zevenbergen et al. 1987) alapján a tározással kapcsolatos műveletekhez szükséges idő 2-dimenziós hidrodinamikai modellel számítható.

A kiürítési tervek előzetes elkészítése – amennyiben a víz természetes mozgására számítunk – még szükségesebbek a tervezés folyamán, hiszen a kiürítés folyamatát a gyakorlatilag sík térszínen nem segíti kellő hatékonysággal a gravitáció kinetikus energiája, valamint az árhullám okozta nyomás is hiányzik a feltöltéssel ellentétes irányú művelet alatt. A digitális felületmodell alapján előzetes áttekinthetést nyerhetünk azokról a lefolyástalan területekről, ahonnan a visszamaradt vizeket csak mesterséges úton lehet elvezetni. Ezeket az elvezető rendszereket a védelmi vonalakkal együttesen és azonos prioritás mellett kell tervezni.

A felületmodell alapján elkészítettem a tározó relatív relief-térképét (14.13 A ábra), amely a legmagasabb és legalacsonyabb pont különbségét mutatja, egy-egy hektáros környezetben. Az alacsony értékek alacsony relief-energiára utalnak, maga után vonva a természetes áramlás várható kis sebességét. A 14.13 B ábra a "legnagyobb lejtés" irányába mutató "lejtő" irányultságát mutatja (Jenson és Domingue 1988). Ennek mozaikossága síkvidéki környezetben nyilvánvaló, ugyanakkor jelzi a természetes, felszíni gyülekezési hálózat teljes hiányát. A 14.13 C ábra piros foltjai a lefolyástalan területeket jelölik. A terv publikált térképe (14.4 ábra) 70 m³/s vízhozamos kieresztést irányoz elő, amely folyamatos üzemelés mellett is majd 31 nap alatt tudná csak kiüríteni a medencét, de ehhez mindenképpen szükség lenne az egész területet behálózó, mesterségesen működtetett elvezető rendszerre is. A tározó terveiben publikált egyéb számadatok további értékelése szinte már szükségtelen.



14.13 ábra A domborzatmodellezésből származtatott térképek,
A - relatív relief, az egy hektáron belüli maximális magasságkülönbséget mutatva,
B - lefolyási irányok a Rho8 modell alapján (Jenson és Domingue 1988),
C - lefolyástalan területek

14.9 Eredmények és továbblépés

Az Új Vásárhelyi-terv koncepciótervében publikált számszerű és térképi információk valószerűségének kérdésével domborzatmodellezési tanulmányba kezdtünk, amely során a – tervekben szegedi tározó néven kijelölt alföldi – mintaterületet lefedő, topográfiai térképek alapján elkészítettük a térség nagyfelbontású digitális domborzatés felületmodelljét (Bódis et al. 2003; Szakál 2003). A modell forrásának pontossága (Winkler 2004) és a létrehozott domborzatmodell minőségének vizsgálata alapján feltételezhető, hogy a modell alapján való további számítások alkalmasak a tervezésidöntéshozatali feladatok támogatásában. A pontosság, a nagy felbontás, valamint az interpoláció során alkalmazott eljárás (természetes és mesterséges terep ötvözése, Bódis és Szatmári 2005) a felület részleteinek vizsgálatát is lehetővé teszi (14.14 ábra).



14.14 ábra A tervezett tározó határait (töltés, magaspart) is átmetsző topográfiai keresztszelvények. A nagy felbontásnak és az alkalmazott, összetett interpolációs eljárásnak köszönhetően a hullámtér, a töltések és a mentett oldal felülete is reális

A modellszámítások alapján megállapítottuk, hogy a nyilvános tervekben szereplő számértékeket nem ismertetett és feltételezhetően elnagyolt módszerekkel határozták meg, így az árvízi védekezést célzó tervezési és kivitelezési műveletekhez a geoinformatika nyújtotta lehetőségek felsorolásával próbáltunk meg hozzájárulni (Bódis 2007). A domborzatmodellezés eredményeként ellentmondást találtunk a tervezett és a számítható értékekben (14.12 ábra), valamint a szükségtározó kiürítésével kapcsolatos publikált térképi értékek is ellentmondásosnak tűntek a terület természetes lefolyásviszonyait vizsgálva (14.13 ábra).

Az Országos Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Főigazgatóság 2004. márciusában munkamegbeszélést hívott össze az Új Vásárhelyi-terv előkészítő munkálataiban felhasznált domborzatmodellekkel és azok eltéréseivel kapcsolatban. A dolgozatban bemutatott vizsgálatok és javasolt interpolációs eljárás a megbeszélés egyik részanyagát képezte. A szakmai ülés eredményeként az Új Vásárhelyi-tervvel kapcsolatban említett tározók geometriai jellemzőit újraszámolták³⁶ és ezzel – az adott keretek között – az ismertetett módszer, a domborzatmodellezés és az elemzések kitűzött célja, az Új Vásárhelyi-terv szakmai előkészítésének támogatása megvalósult.

A szegedi tározó létrehozása egyelőre lekerült a napirendről, de azért bízunk benne, hogy "lesz hol levezetni".

³⁶ A nyilvánosságra hozott korábbi értékek a dolgozat írásának idején, 2008. decemberében a referenciaként megadott forrásokban továbbra is elérhető.

15 Domborzatmodellek alkalmazása az árvízi kockázati térképezésben

Árvízi valószínűségek, elöntések és kárfüggvény - példa a Tisza algyői szakaszán

15.1 Problémafelvetés, előkészítés

A kvantitatív kockázatelemzésben alkalmazott összefüggést figyelembe véve, mely szerint 'kockázat' = 'bekövetkezési valószínűség' × 'a bekövetkezés következményei', az árvízi kockázati térképezéshez szükséges komponenseket a valószínűség esetében megadhatjuk az árhullámok gyakorisági eloszlásának becslésével. A következmények felmérésének egyik lehetséges módja az elöntési vízmélységek és területhasználati kategóriák alapján történő kárszámítási eljárás.

Az áradások gyakorisági eloszlásának becslését nagy vízgyűjtők, mint pl. a mintaterületet tartalmazó Tisza vízgyűjtője esetén, általában az alábbi módszerekkel végzik:

- Az áradások vízhozamának idősor-elemzéseken alapuló gyakorisági vizsgálata. Előnye: a becslés viszonylag egyszerű, Hátrány: nem homogén adatok és körülmények.
- 2) Csapadék-alapú technikák:
- A) Sztochasztikus csapadék-generátor modul és csapadék-lefolyás szimuláció, Előnye: homogén vízhozam adatok,
 - Hátránya: bonyolult algoritmusok alkalmazása, nagy számítási igény.
- B) Mértékadónak tartható csapadékadatok és csapadék-lefolyás szimuláció, Előnye: homogén vízhozam adatok, Hátránya: nagyon sok meteorológiai adat feldolgozására van szükség.

A mintaterületen (a Tisza alsó, Csongrád és Szeged közötti, 75 km hosszú, 35 keresztszelvénnyel leírt szakasza) végzett, a valószínűségeket figyelembe vevő árvízi elöntések térképezése során az első módszert követtük; a vízmércék vízállásadatainak idősoros elemzését végeztük el. A hidraulikai modellt a mindszenti vízmérce vízállásadatai és a belőlük származtatható vízhozamok alapján az APS-DSA algoritmus (adaptive partition-based search, APS; downhill simplex algorithm, DSA, Szabó 2007) alkalmazásával kalibráltuk, a felső és alsó peremfeltételeket a csongrádi, illetve a szegedi vízállásadatok adták (Szabó és Bódis 2006).

A hidraulikai modellezés különböző valószínűségekkel bekövetkező statisztikai árhullámok levonulásának vizsgálatát tette lehetővé. A módszerrel elemezhetők azok az esetleg szükséges beavatkozások is, pl. a védelmi vonalak megnyitása, melyek árvízi helyzetben csökkenteni hivatottak az árhullám magasságát az alsóbb folyószakaszokon. Az alábbiakban bemutatott térképezés azon feltételezésen alapul, hogy a folyó "természetes" módon lép ki medréből, a modell alapján számítható 185-ös folyókilométernél áthágja a jobb oldali árvízvédelmi töltést (Szabó és Bódis 2006).

A következmények becslésében felhasznált területhasználati adatokat a későbbiekben részletezett CORINE Land Cover 2000 adatbázis szolgáltatta.

15.2 Domborzatmodell alkalmazásához kapcsolódó feladatok és adatok

A hidraulikai modellezés és idősor-elemzések feltételezése alapján, egyéb védelmi intézkedések hiányában, a 185-ös folyókilométernél várható, hogy a folyó áthágja a jobb oldali gátat (15.1 ábra). A modellezés eredményeként megkaptuk az áradás különböző valószínűségeihez tartozó időtartamokat és az adott valószínűségekhez tartozó kiömlő vízmennyiségeket (15.1 táblázat). A feladat tehát adott a geoinformatika számára: védelmi vonalak alkalmazásával és adott domborzati feltételek mellett hogyan lehet lokalizálni a kiömlő vízmennyiséget és milyen vízmélységekre, ezáltal milyen direkt károkra számíthatunk az elárasztott földeken.



15.1 ábra A hidrológiai modellezés a 185-ös folyókilométernél valószínűsíti, hogy az áradó folyó áthágja a jobboldali gátat. A Tisza algyői szakaszán ezt a pontot piros négyzet jelöli. A téglalapok a 3x4 km-es területet lefedő 1:10 000 méretarányú EOTR szelvényeit és azok azonosítószámait jelöli. A légifelvételek forrása: Image2000³⁷

| | P5 | P4 | P3 | P2 | P1 | P1 |
|----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ldő (óra) | Algyő-185 | Algyő-185 | Algyő-185 | Algyő-185 | Algyő-185 | Tározó |
| | | | | | | |
| kezdet | 339 | 330 | 327 | 317 | 308 | 302 |
| vége | 417 | 428 | 429 | 432 | 439 | 441 |
| időtartam | 78 | 98 | 102 | 115 | 131 | 139 |
| térfogat [m ³] | 21,756,514 | 57,156,679 | 77,904,163 | 119,252,489 | 173,306,269 | 193,766,023 |
| térfogat | 22 Mm ³ | 58 Mm ³ | 78 Mm ³ | 120 Mm ³ | 174 Mm ³ | 194 Mm ³ |

15.1 táblázat Az áradás valószínűségeihez (P) tartozó időbeli és mennyiségi értékek

A kiömlő vízmennyiség felszínen való "elhelyezéséhez" és értékeléséhez a következő adatokat álltak rendelkezésre. Felszíni adatok: nagyfelbontású (5 m) domborzati modell, topográfiai térképek (M = 1:10.000), SRTM100, a domborzatmodellből származtatott lefolyásirány-térkép. A védelmi vonalak magassági adatait a topográfiai térképek és digitális fotogrammetriai kiértékelés útján kaptuk. A felszínborítással kapcsolatos adatokat a CORINE Land Cover 2000 szolgáltatta, valamint rendelkezésre álltak közigazgatási térképek és egyéb leíró adatok is a területről.

³⁷ Image 2000 & Corine Land Cover 2000 Project, http://image2000.jrc.ec.europa.eu/

15.3 A lokalizációs blokkok lehatárolása és geometriai paraméterei

A domborzat- és felületmodell, valamint a kiegészítő információk alapján a folyó jobb oldalán négy, kapcsolódó, de önálló egységként is kezelhető blokkot lehetett elkülöníteni. Az ezeket elválasztó lokalizációs vonalak: árvízvédelmi gátak (84-86 méter magas töltésekkel), közúti és vasúti töltések, Szeged városát védő körgát és a területet nyugatról lehatároló magaspart 80 méter magasságú természetes kiemelkedése (15.2 ábra). Az ábrázolt blokkok és lokalizációs vonalak a módszer bemutatását segítő objektumok; a tervezett szegedi tározó lehatárolt területén kívül nem tartalmazzák a valós védelmi intézkedésekben szereplő elgondolásokat.



15.2 ábra A térség felületmodellje (A) és a felületen lehatárolható blokkok (B). A B ábrán a kis piros jel jelöli a 185-ös folyókilométer helyét

Az előző fejezetekben ismertetett és alkalmazott térfogat-számítási módszerrel meghatározható az adott körülmények (meglévő töltések, további magasítások nélkül) mellett az egyes blokkok maximális befogadó kapacitása (15.2 táblázat).

15.2 táblázat A lehatárolható blokkok geometriai paraméterei

| Terület | Térfogat |
|--------------------|---|
| 50 km ² | 58 Mm ³ |
| 46 km ² | 64 Mm ³ |
| 76 km ² | 86 Mm ³ |
| 61 km ² | 105 Mm ³ (306 Mm ³) |
| | Terület 50 km² 46 km² 76 km² 61 km² |

15.4 A lokalizációs blokkok elárasztásának szimulációja

A terület elárasztásának szimulációját a 185-ös folyókilométertől kiindulva a blokkok sorszámának megfelelően végeztem, tekintettel a lefolyási viszonyokra és a hidraulikai modellezés eredményéül kapott elhelyezendő vízmennyiségre. A gát átlépésétől számítva mindig az alacsonyabban fekvő, de a megáradt folyóval fizikai összeköttetésben lévő cellákba irányítva a vizet biztosítható, hogy nem alakulnak ki különálló víztestek az elárasztás szimulációja során. A blokkok elárasztásának sorrendjét az határozta meg, hogy minél nagyobb mennyiségű vizet a nagyvárostól minél messzebb lehessen elhelyezni, lehetőleg megkímélve az egyéb településeket is (forrás: CORINE Land Cover).

15.4.1 Vízmagasságok és térfogatok számítása

Az domborzatmodell alapján számolható tározási görbék alapján (ld. előző fejezetek) megadható a maximális elárasztási szintekhez tartozó befogadható térfogat az egyes blokkok sorrendjében (15.3 táblázat). A maximális elárasztási szinteket a blokkokat lehatároló objektumoknak a rendelkezésre álló geoinformatikai adatbázisban találgató legalacsonyabb pontja jelölte ki. Ez az érték esetünkben hipotetikus értékként alkalmazott és a kidolgozott módszer bemutatását szolgálja.

15.3 táblázat Az egyes valószínűségekhez (P) tartozó vízmennyiségek blokkonkénti befogadása és az elárasztás maximális magassága.

| | Elárasztási szint | | | Befogadható térfogat | | | |
|----|-------------------|---------------|---------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------|
| Р | blokk1 [m] | blokk2 [m] | blokk3 [m] | blokk1 [Mm ³] | blokk2 [Mm ³] | blokk3 [Mm ³] | Σ [Mm³] |
| 5% | 79 | | | 22 | | | 22 |
| 4% | 80 | | | 58 | | | 58 |
| 3% | 80 | 78 | | 58 | 20 | | 78 |
| 2% | 80 | 80 | | 58 | 64 | | 122 |
| 1% | 80 | 80 | 79.3 | 58 | 64 | 53 | 175 |

A blokkok elhelyezkedését a 15.2 B ábra szemlélteti

13.4.2 Az egyes valószínűségekhez tartozó elöntések térképezése

A 15.1 és 15.3 táblázatokban látható adatok, és a domborzatmodell, valamint a lefolyási viszonyok alapján az egyes blokkok feltöltési folyamata tetszőleges időbeli felbontással térképezhető. Az egyes időpillanatokhoz tartozó, elhelyezendő vízmennyiséget a hidraulikai modell alapján számoltuk, a térbeli eloszlás pedig a felszíni viszonyoknak és a kijelölt blokkoknak megfelelően alakul. A 15.3 ábra résztérképei az egyes valószínűségekhez tartozó vízmennyiségek elhelyezését szemlélteti a lokalizációs blokkok maximális kihasználtsága esetén. A térképek bemutatása előtt szeretném ismét kiemelni, hogy az alkalmazás egy elméleti módszer kivitelezhetőségének demonstrálása, és a hasonló modellektől általában is elvárható eredmények ismertetése, amely további, az árvízvédelmi gyakorlatban járatos szakértők által javasolt bármely módosító információval kiegészíthető.

A térképezés során az első lépésben a gát áthágási pontjával határos 1-es számú blokk feltöltését kezdtük meg, amely az 5 %-os valószínűségű átfolyó vízmennyiség (22 Mm³) teljes befogadására alkalmas a 15.3 A ábrán térképezett térbeli eloszlásban. Az ábra a gátáthágás megkezdésétől számított 78-dik óra végét mutatja, amely idő a hidraulikai számítások szerint minimálisan szükséges a nyugalmi vízszint beálltához.

A szimuláció szerint húsz órával több idő, 98 óra kell a 4 %-os valószínűséggel bekövetkező áradás víztömegének megállapodásához és maximális befogadással az 1- es számú blokkot öntöttük el (15.3 B ábra). A 3 %-os valószínűséggel érkező víztömeg befogadásához a 2-es számú blokkot is felhasználtuk (15.3 C ábra); az 1-es számú blokk becsült maximális elöntési szintje 80 méter, míg a 2-es számú blokké 78 méter. A nyugalmi vízszint beálltára a szimuláció alapján 102 órát kell várni. A 2-es számú blokkot is maximálisan kihasználva a 2 %-os valószínűséggel érkező vízhozam még elhelyezhető 115 órás feltöltési idő után (15.3 D ábra). A mértékadó árvíz mennyiségének megfelelő 1 % valószínűséggel kiömlő vízmennyiséget csak a 3-as számú blokk megnyitásával lehet tervezetten elhelyezni (15.3 E ábra), amikor az előző két tároló maximális, 80 méteres vízszintje mellett a 3-as tárolóban 79,3 méteren állapodik meg a víz ez elöntés kezdetétől számított legalább 139-dik óra után.



15.3 ábra Különböző valószínűségekkel bekövetkező áradásokhoz tartozó lokalizációs térképek a domborzat és a modellben alkalmazott védelmi vonalak alkalmazásával. A részábrák részletesebb magyarázata az ábra feletti szövegben olvasható

Az elöntések összesített térképe a 15.3 F ábrán látható. Az elhelyezett víztömegek térbeli eloszlása és vízszintje, valamint a domborzatmodell magassági értékei alapján a vízmélységek cellánként kiszámíthatók (15.4 ábra). Az 1-es blokk esetén a domborzatmodellt az 1:10.000 méretarányú topográfiai térkép digitalizáláséval, majd az Arc/Info GIS topogrid algoritmusának alkalmazásával (Hutchinson 1988) állítottuk elő 5 méteres felbontásban, így ezen a területen az elöntés is finomabb "mintázatot" mutat, mint a kisebb felbontású, SRTM adatok esetén azonos módszert alkalmazva.

15.5 Kárbecslés a vízmélységek és területhasználati kategóriák alapján

Az elöntött területek geoinformatikai rétegét átfedve a területhasználat rétegével az egyes területhasználati kategóriáknak (EEA 2000) és az azokat elöntő víztömegnek a mélységéből (15.4, 15.5 ábra és a területhasználati jelmagyarázat 15.6 ábra) egyszerű és általánosító kárfüggvény alapján kárbecslés végezhető.



15.4 ábra Vízmélységek

15.5 ábra Területhasználat (A) és elöntések (B)

A kárfüggvények általában a veszélynek kitett vagyontárgyak sérülékenységét fejezik ki, árvizek esetében bizonyos elárasztási jellemzők mellett általában a vízmélységgel összefüggésben (Messner et al. 2007). Megkülönböztetünk relatív kárfüggvényt, és abszolút kárfüggvényt.

| Összefüggő település szerkezet | | | | |
|---|--|--|--|--|
| Nem-összefüggő település szerkezet | | | | |
| lpari, kereskedelmi területek | | | | |
| Közlekedési hálózat | | | | |
| Bányák, lerakóhelyek, építés munkahelyek | | | | |
| Mesterséges, nem-mezőgazdasági zöld-területek | | | | |
| Szántóföldek | | | | |
| Állandó növényi kultúrák | | | | |
| Erdők | | | | |
| Cserjés és/vagy lágyszárú növényzet | | | | |
| Vizek | | | | |
| 1 = (1) = 1 (38) | | | | |

15.6 ábra Jelmagyarázat³⁸

A relatív kárfüggvény a teljes értékkel összehasonlítva, annak arányában jellemzi a bekövetkező kárt (kártényező, 0-100%), míg az abszolút kárfüggvény az elöntés mélységének függvényében a kár abszolút értékét jelzi. A kárfüggvények származtathatók valós, bekövetkezett káresetek felméréséből, vagy előállíthatók szintetikusan, pl. szakértői becsléssel általánosan, tulajdoni típusokra vonatkozóan vagy egy adott, jól definiált típusra jellemzően (Messner et al. 2007).

³⁸ A CORINE Land Cover nomenklatúra magyar megfelelőinek forrása: http://www.fomi.hu/corine/clc100_nom.html

A legáltalánosabban elterjedt és alkalmazott kárszámító módszer a Multi Coloured Manual (MCM), amelyet a Middlesex Egyetemen a Flood Hazard Research Centre kutatócsoportja készített a Defra számára (Defra, UK - Department for Environment, Food and Rural Affairs) az Egyesült Királyságban (Messner et al. 2007). A módszer elsősorban lakóingatlanokban bekövetkező károkról ad részletes, átfogó értékelést a vízmélység függvényében. Az MCM a kereskedelmi ingatlanokra kisebb részletességgel tér ki. Az MCM útmutatást ad a szükséghelyzetből adódó többlet költségek felméréséhez, az utak és vasutak megrongálódásának anyagi felméréséhez, valamint a mezőgazdasági termékek értékcsökkenésének becsléséhez is (15.7 ábra).

A kárfüggvény egyik alapkritériuma, hogy azonos területhasználati kategórián belül a mélyebb vízhez nagyobb becsült kár tartozik (Genovese 2006). A területhasználatot alapul vevő becslések kiegészülhetnek az elöntés időtartalmával, a károk mértékét nem-lineárisan növelve, ugyanakkor a számszerűsíthető értékek országonként, vagy akár országrészenként is változnak, és ha léteznek is, az adatok nem hozzáférhetők a nyilvánosság számára (de Roo et al. 2006). Példaként a 15.7 ábrán a holland árvízi kárfüggvény alkalmazása látható. A példa alapján az 1 méteres elöntés alatt lévő szántóterülethez 0,63-ös kártényező tartozik, így a várható becsült kár 0,63 x 12 = 7,66 [Eur/m²]. Ha ugyanez az 1 méteres elöntés beépített területet érint, a várható kár megegyezik a maximális kárral.

Maximális lehetséges kár

| Területhasználat | Érték |
|-------------------|----------|
| (Hollandia) | [€ / m²] |
| beépített terület | 1500,00 |
| üvegházak | 250,00 |
| rét, kaszáló | 12,00 |
| szántó | 12,00 |



15.7 ábra A maximálisan bekövetkező kár és a kártényező alakulása területhasználati típusonként, a Hollandiában alkalmazott Multi Coloured Manual alapján, Forrás: Technische Universität Hamburg-Harburg, e-Learning System³⁹

A példában bemutatott, az árvízi védelemben és költségalapú kockázatkezelésben történelmi tapasztalatokkal rendelkező Hollandiára kidolgozott, azt némileg módosított számítások alapján 2006. tavaszán a magyarországi árvízkárokat 541 millió Euróra becsülték (de Roo et al. 2006). A számítások során, pl. a mezőgazdasági művelés kategóriája alá eső területeket 1 méteres elöntési szintig 0,50 EUR/m² kárértékkel közelítették (a fentiek alapján ugyanez 7,66 EUR/m² Hollandiában...). A lakott területek, épületek értékére magyarországi viszonylatban is rendelkezésre álló nyilvános adatok alapján történtek a számítások (Ekenberg et al. 2004).

Az MCM módszer alkalmazása – a feltételezett elöntések területi eloszlása és vízmélysége alapján – tehát ad egy becslést a bekövetkező (vagy már bekövetkezett) károkra, a bekövetkezési valószínűségek pedig a hidraulikai modellszámítások eredménye. A két komponens együttes felhasználásával számíthatjuk az adott valószínűséggel bekövetkező károkat, vagyis az esemény kockázatát.

³⁹ Living with Flood Risk in a Changing Climate, http://flows.wb.tu-harburg.de/index.php?id=694

15.6 A becslések megbízhatósága

A komplex termék (kockázati térkép) megbízhatósága összetevőinek pontosságától függ. A hidrológiai modellezés bizonytalansága és az abból adódó időbeli és volumetrikus eltérések elsődlegesen befolyásolják a térképezés eredményességét és az eredmények további alkalmazhatóságát. A kiömlő vízmennyiség mélységének számítási pontosságát az alkalmazott domborzatmodell térbeli felbontása és relatív magassági pontossága befolyásolja. A felbontás finomsága mellett ki kell emelni, hogy a domborzatmodell előállítási módjának, illetve a modell tartalmi vonatkozásainak ismerete nélkülözhetetlen; – amint azt a korábbi fejezetekben részletesen elemeztem – a földfelszín jellemzőire van szükség, a növényzet, vagy egyéb tereptárgyak jelenléte a modellben zavaró tényezők a kockázati térképezés során. A kárfelmérésben felhasznált felszínborítási adatok térbeli pontossága és naprakészsége együttesen befolyásolják a felmérés pontosságát.

Az esettanulmányban a hasonló célú térképezési munkákban is széles körben alkalmazott, CORINE 2000 adatbázist használtam. A CORINE adatbázis legkisebb térképezett egysége 25 hektár, majd a raszterizálási folyamat felbontástól függő általánosítása is vezethet félrevezető klasszifikációhoz és a károk alul- vagy túlbecsléséhez. A 15.6 A és B ábrán látható mintaterület esetén az 1%-os valószínűséggel bekövetkező (mértékadó árvíz) szimulált elöntések mellett az érintett földhasználati kategóriák a következők(15.4 táblázat):

| Területhasználati kategóriák (CLC 2000) | Terület [hektár] | Területi arány [%] |
|---|------------------|--------------------|
| Nem-öntözött szántóföldek | 6733 | 59.90 |
| Mesterséges tó | 1828 | 16.26 |
| Rét / legelő | 839 | 7.46 |
| Szárazföldi vizenyős területek | 526 | 4.68 |
| Lomblevelű erdők | 316 | 2.81 |
| Átmeneti erdős-cserjés területek | 195 | 1.73 |
| Összefüggő település szerkezet (sűrű) | 193 | 1.72 |
| lpari vagy kereskedelmi területek | 118 | 1.05 |
| Természetes állóvizek | 94 | 0.84 |
| Összefüggő település szerkezet (ritkás) | 87 | 0.77 |
| Vegyes mezőgazdasági területek | 53 | 0.47 |
| Nem-összefüggő település szerkezet | 52 | 0.46 |
| Komplex művelési szerkezet, tanyákkal | 43 | 0.38 |
| Komplex művelési szerkezet | 36 | 0.32 |
| Árvízvédelmi létesítmények, védelmi vonalak | 24 | 0.21 |
| Vasút és vasúti kezelésben lévő területek | 21 | 0.19 |
| Közutak és kapcsolódó földterületek | 20 | 0.18 |
| Sport-, szabadidő-és üdülő területek | 16 | 0.14 |
| Csatornák | 13 | 0.12 |
| Ipari vagy kereskedelmi területek | 17 | 0.17 |
| Temetők | 9 | 0.08 |
| Városi zöldfelületek | 5 | 0.04 |
| Építési munkahelyek | 2 | 0.02 |
| Összesen | 11240 | 100,00 |

15.4 táblázat A szimulált 1%-os valószínűségű elöntés által érintett területek (ld. 15.6 B ábra) felszínborítottsága és területi megoszlásuk (CORINE Land Cover 2000)

Az esettanulmány kapcsán egy érdekességet vehetünk észre a felszínborítási adatokban, amely az egész térképezett területen (15.5 A ábra) kb. 500 km² kiterjedésben mezőgazdasági területeket jelez. A 15.8 ábra piros téglalappal lehatárolt területén hasonlóan: összehasonlítva a 15.5 ábra Területhasználat (A) térképével, a CORINE földhasználati adatbázis alapján szántóföldi művelési kategóriát találunk. Az azonos területet ábrázoló digitális ortofotó térképet (15.9 ábra) szemlélve látható ugyan, hogy a terület valóban mezőgazdasági alkalmazásban áll, ugyanakkor az ország eddigi legnagyobb szénhidrogén lelőhelyének, az algyői kőolaj- és földgázmezőnek a része, amelynek jelenlétét a CORINE adatbázisra hagyatkozva nem lehet felismerni, így a kárbecslésben felhasználni sem lehet. A hiányos információk alapján történő földhasználati kiértékeléssel és az MCM-módszerrel jelentősen alábecsülnénk a várható károkat. A hiányosság javításához a források részletesebb feldolgozása szükséges. A területhasználati adatok pontosítását a bemutatott térképezés módszertani jellege miatt nem tartottam szükségesnek.



15.8 ábra Elöntés (1 %). A piros téglalap a 15.9 ábra területét jelöli





15.9 ábra Algyői kőolaj- és földgázmező digitális ortofotó térképe

15.7 Eredmények és további lehetőségek

A hidraulikai modellezés eredményeit (árvízi vízhozamok valószínűségei, a csúcs vízhozamok várható ideje, a levonulás ideje, a gátáthágás várható helyszíne) a domborzati-környezeti viszonyok ismeretében geoinformatikai módszerekkel feldolgozva az árvízi elöntések térképezhetők, a vízmennyiségek elhelyezésére lokalizációs tervek készíthetők (15.3 ábra). A különböző valószínűségekkel bekövetkező elöntéseknek nem csak térbeli kiterjedése, hanem várható mélysége is megadható kellően nagy felbontású domborzatmodelleket alkalmazva (15.4 ábra). A hidraulikai modellezés és a domborzatmodellezés közös eredményeit az érintett terület földhasználati viszonyaival összevetve (15.5 ábra A és B ábra) földhasználati típusonként a várható károk becsülhetők (15.7 ábra, Messner et al. 2007). A kárfüggvények alkalmazásához megfelelő részletességű, naprakész földhasználati adatbázisra van szükség, vagy olyan helyettesítő adatbázisra, amely a leginkább értékes, védendő objektum értékét jelöli (pl. a 15.8 ábra piros téglalapja kiterjedt területen folytatott mezőgazdasági művelése mellett 15.9 ábrán az algyői olajmező létesítményei láthatók, így a várható károkat nyilván nem lehet a szántóföldeken általában várható szinten kezelni).

Az anyagi károk, a mentés és a helyreállítás költségeinek anyagi vonatkozásain túl az érintett lakosság száma (15.5 táblázat, 15.10 ábra) és összetétele (gyermek, idős, beteg, stb.) is felmérhető a népességre vonatkozó és kapcsolható adatbázisban tárolt adatokkal.

| Település | Közigazgatási | Lakosok | | |
|-------------|------------------|---------|------------|--|
| | terület (hektár) | Száma | népsűrűség | |
| | | (2001) | (fő / km²) | |
| Algyő | 7577 | 5 862 | 77,4 | |
| Baks | 6192 | 2 366 | 38,2 | |
| Dóc | 4943 | 823 | 16,6 | |
| Ópusztaszer | 5950 | 2 290 | 38,5 | |
| Sándorfalva | 5577 | 7 803 | 139,9 | |
| Szeged | 28084 | 168 273 | 599,2 | |

15.5 Táblázat A környező települések lakossági adatai

Forrás: OTAB, KSH

A kidolgozott és a dolgozatban bemutatott módszer és számítási eredmények azon a feltevésen alapulnak, hogy az árvíz további emberi beavatkozás nélkül folyik le.

Abban az esetben, ha elkészülnek és üzembe helyezhetők az Új Vásárhelyi-tervben tervezett tározók, árapasztó létesítmények, úgy az elárasztások irányíthatóvá válnak.



15.10 ábra Települések

Az árvízi tározók hatása még a bonyolult árvízi hidraulikai viszonyok között is jó megbízhatósággal becsülhető. A szabályozható vízbeeresztő és leeresztő műtárgyak biztosítják az árhullámkép alakjához igazodó vízkivételt és a megfelelő időben történő vízvisszavezetést. A szabályozhatóságot árapasztó jellegű nyitás töltésbontással (Felső-Tisza), illetve egyszerű kettős elzárású csőzsilipek (Közép és Alsó-Tisza) garantálnák (Szlávik 2001).

A szükségtározók feltöltésével és leeresztésével kapcsolatos, domborzatmodellezési műveleteket igénylő feladatokat és a tervezést segítő javaslataimat az előző, 14. fejezetben foglaltam össze. Az üzemeltetéssel és a csőzsilipekkel kapcsolatban a tervekben publikált áteresztőképességek hatását a feltöltési-leeresztési folyamatokra szintén be lehetne vonni a tervezési fázisba.

A tervekben a vésztározók területének a kisajátítását nem tartották szükségesnek (Szlávik 2001), ugyanakkor az elárasztott földek tulajdonosainak kártalanítása és a várható károk előzetes felmérése része kell legyen a projektnek. A kárbecslésre a dolgozatban ismertetett módszer (elöntés, vízmélység, földhasználat, kárfüggvény) alkalmas. A példaterülethez legközelebbi, a 14. fejezetben ismertetett szükségtározó esetében a CORINE földhasználati adatbázis alapján és a légifelvételek vizuális kiértékelése alapján is elsősorban mezőgazdasági művelésű területek (nem-öntözött szántóföldek) kerülnének víz alá, a teljes elárasztás idején több, mint 3 méteres mélységben (15.11 ábra). Ez az elárasztás, az MCM-módszer kárfaktorának alkalmazásával is, az időtartamtól függetlenül a maximálisan bekövetkezhető kár értékével egyenlő.



15.11 ábra A szegedi tározó és környéke. A bordóval kiemelt terület a CORINE földhasználati adatbázis alapján a 'nem-öntözött szántóföldek' művelési típusba tartozik. Forrás: Image © DigitalGlobe, Google TM

16 Domborzatmodellek alkalmazása kontinentális kiterjedésű hidrológiai modellekben

Domborzatmodellek alkalmazása az árvízi előrejelzésben

16.1 A hidrológiai modell statikus bemeneti adatainak fejlesztése

Az Európa egész területét lefedő, cella-alapú vízgyűjtő modellt (LISFLOOD) a nagy vízgyűjtők árvizeinek szimulálására fejlesztették ki. A modell térben osztott bemeneti adatokkal dolgozik, ezért pl. a területhasználatban vagy az éghajlati elemekben bekövetkező változások megadásával alkalmas a megváltozott körülmények közötti árvizek becslésére is (van der Knijff és de Roo 2008). A modell tesztelését operatív körülmények között az Európai Árvíz Előrejelző Rendszer (European Flood Alert System, EFAS) végzi meteorológiai előrejelzések adatait felhasználva dinamikus bemenetként. Hasonló modellezési feladatok elvégzésére is alkalmas, csapadék-lefolyás modell több is ismert (pl. TOPMODEL, Beven és Kirkby 1979; Beven 1997; TOPographic Kinematic APproximation and Integration, TOPKAPI, Ciarapica és Todini 2002; Distributed Watershed, DIWA, Szabó 2007; Hidrológiai és Árvíz-szabályozási modell, HIDRA, Lucza 2008). A modellek statikus bemenetei geoinformatikai adatbázisok, amelyeknek egy része kizárólag a domborzatmodellből származtatható.

Az új felmérések (pl. SRTM, Image2000, Global Land Cover) az egyébként statikusan kezelt topográfiai információk átvizsgálását és újraértékelését tették lehetővé.

16.1.1 Domborzatmodell

Az európai léptékű hidrológiai modellezés korábbi szakaszaiban az 5. fejezetben ismertetett GTOPO30 topográfiai adatbázis szolgáltatta a magassági információkat a csapadék-lefolyás modellnek. Az eredeti, földrajzi koordináta rendszerből az európai léptékű térképezéshez javasolt Lambert vetületi és koordináta-rendszerbe (Annoni et al. 2001) transzformálva, majd modellezés felbontásának megfelelően 1 km-es és 5 km-es rácshálóba újramintázva álltak elő az adatok. Ez az adatbázis a 7.1 és 7.2 ábrán is látható, durva hibákat tartalmazott, ezért néhány területén Európának az adatokat megpróbálták helyettesíteni egyéb, hozzáférhető adatforrásokkal. Megjegyzendő, hogy a hibák ellenére az egységes lefedettség és a tartalmazott értékeknek a célra való elfogadható minősítése a modellezés korábbi fázisaiban megfelelővé tették a GTOPO30 alkalmazását, de nagy várakozás előzte meg az egy nagyságrenddel jobb felbontású SRTM adatok tesztelését. Az SRTM domborzatmodell feldolgozása az Európai Bizottság Egyesült Kutatóintézetében történt, ahol a további, a domborzatmodellből származtatható adatok előállítását is végeztem. Az új domborzati adatbázis a kb. 100 méteres forrás átmintázásával, a hidrológiai modell elvárásának megfelelő 1 km-es és 5 km-es rácshálóban állt elő. A különböző célokra (pl. lejtőszög, hóolvadás-becslés) különböző mintavételezési stratégiákkal (átlagolás, központi érték) állítottam elő a domborzati modellt. Az új domborzati modellre azért is szükség volt, mert a hibák továbböröklődtek, pl. a belőlük származtatott, lejtőviszonyokat jellemző és így a lefolyási számításokat befolyásoló adatokra (16.3 ábra).

16.1.2 Gradiens térkép

Az új, SRTM-alapú gradiens-térképet két fő fázisban készítettem el, amelyek több kisebb feladat megoldásából álltak.

a) Meder-gradiens térkép a modell folyóhálózat és a lefolyási irányok alapján

Egységes és megfelelő pontosságú, alternatív adatforrás híján, valamint feltételezve, hogy a természetes meder többé-kevésbé követi a környező földfelszín változásait, az 1 és 5 kilométeres felbontású modell-folyó-, és lefolyáshálózatnak megfelelő, új meder-gradiens térkép elsődleges forrása is a 100 méter felbontású SRTM adat volt. A 100 méteres forrásról a durvább felbontásra való átskálázásnál abból a feltételezésből indultam ki, hogy a folyómeder a völgy aljában helyezkedik el és a legnagyobb meredekséget követve a környezetében lévő legalacsonyabb pont felé folytatódik. A lokális minimumokat egy adott területi egységen belül a megfelelő függvény alkalmazásával meg lehet keresni és hozzárendelve a kívánt átskálázásnak megfelelő 1x1 és 5x5 kilométeres felbontás új celláihoz, azokat cellaértékként felhasználni. A folyók felső folyásánál lévő kiindulási pontok magasságát és az alsóbb szakaszok, illetve a legalacsonyabban elhelyezkedő szakaszok magassági értékét figyelembe véve a 100 méteres felbontású "modell-folyó" a 1x1, illetve 5x5 km-es cellánkénti esése ezzel a módszerrel megadható.

Egy-egy folyószakasz esésének vizsgálatánál annak biztosítása érdekében, hogy a folyómeder valóban lejtsen (az alkalmazott hidrológiai modell nem tudja kezelni azt a helyzetet, ha a mederdomborzat nem folyamatos lejtésű) a folyószakaszok kezdő- és végpontjainak (források és összefolyások) magassága között lineáris interpolációval előállítottam egy olyan egy kilométer felbontású mesterséges "folyómeder-domborzatot", amely megfelel a hidrológiai modellel elvárásainak (16.1 ábra).



16.1 ábra Az 1 km-es felbontású folyóhálózat szakaszainak végpontjai a 100 méteres felbontású magassági modell alapján hozzájuk rendelt lokális minimum-értékekkel (bal oldali ábra), és a végpontok magassági étékei közé lineáris interpolációval számított "medermagasság" (jobb oldali ábra)

Mivel a folyóhálózat szerkezete (hurokmentes szakaszok, csomópontokkal) leginkább az irányított gráfokhoz hasonlít, a szakaszok kiindulási pontja (cellája) azonosítható a szakaszokon belüli cellákhoz tartozó, felettük lévő vízgyűjtőterületek (upstream area, UPS) legalacsonyabb értékű cellájával. Hasonlóképpen, a folyószakaszok végpontjai, a részvízgyűjtők kifolyási pontjai azonosíthatók a szakaszokon belüli cellákhoz tartozó legnagyobb UPS értékeket tartalmazó cellákkal. A megállapítás nyilvánvaló, említésére azért van szükség, mert a végpontok kijelölését, lehatárolását, a lokálisan minimális magassági adatoknak az új cellákhoz való hozzárendelését, valamint a magassági adatokon végzett, szakaszokon belüli lineáris interpoláció elvégzéséhez algoritmikus megoldásra volt szükség, amelyben a különböző folyószakaszok lehatárolása, valamint a végpontok kijelölése kulcsfontosságú.

A folyószakaszokon belüli magassági szélsőértékek közötti lineáris interpolációnak a célja tehát az volt, hogy folyó egyenletes lejtését biztosítani lehessen. Az idealizált folyómederben így a magasabb UPS értékű cellához alacsonyabb, vagy legfeljebb azonos értékű magassági érték tartozhat, a folyószakasz folyamatos lejtésű. Ez a modellezett helyzet a természetben nem mindig teljesül (Morisawa 1985), különösen nem alacsonyabb esésű térszínek folyómedrei esetén, amikor a folyó víztömegének mozgási energiája és lendülete is segít a folyót mozgásban tartani, függetlenül a mederfenék egyenetlenségeitől.

A meder-gradiens meghatározásához a felületek lejtésviszonyainak számításában általában alkalmazott függvények nem alkalmazhatók, mivel azok kihasználva a környező 3x3-as cellakörnyezetet közelítik az adott cella lejtését, a folyómeder esetében pedig egy adott cella esetén csak a folyószakaszon feljebb és lejjebb lévő szomszéd magassága a meghatározó. A meder-gradiens cellánkénti meghatározása érdekében ezért a lefolyásirányok mentén az egész rendszert eltoltam egy cellával, tehát a meder minden pontja esetén nem csak a meder magassága állt rendelkezésre, hanem az a magassági érték is, ahova az adott cella befolyik. A két magassági modell (interpolált magasságok, eltolt magasságok) alapján képzett különbség megadja a folyómeder cellánkénti esését.

A következő lépésben a lefolyásirányok szerinti folyóhosszak meghatározása történt. A folyóhossz az ortogonális irányok esetén megegyezhet a cella méretével (1000, illetve 5000 méter) diagonális irányok esetén azok átlóinak hosszával (sqrt2*cellamért, 1414.2135 és 7071.0678 méter). A folyóhosszak geometriai közelítése módosítható a 16.1.3 pontban említett, a meder cellánkénti hosszának további, kiegészítő adatok felhasználásával közelíthető adataival.

A meder-gradiens értéke ezek után a derékszögű háromszögek oldalainak és szögeinek összefüggéseit felhasználva számítható:

meder-gradiens = a lejtőszög tangense = magasságkülönbségek / folyóhossz

Az SRTM magassági adatok alapján a fentiekben ismertetett módon előállított raszter adatokon (magasságkülönbségek, folyóhossz) alkalmazva a gradiens-számítás összefüggését, az európai folyóhálózat minden cellájára előállítható a meder lejtésének közelítő értéke (16.2 ábra). A Duna teljes szakasza esetén az ismertetett eljárással számítható értékeket tovább tudtam finomítani a rendelkezésre álló részletesebb, a mederfenék magasságára vonatkozó leíró adatok alapján.



16.2 ábra Magassági adatokból számított meder-gradiens értékek

Az Elba németországi szakaszára vonatkozó meder-gradiens értékeket a részletes, a folyásirányban kb. 100 méterenként, esetenként centiméteres pontsűrűséggel felvett keresztszelvény adatok felhasználásával módosítottam. Mivel a keresztszelvényekből kinyerhető információ nagyságrendekkel részletesebb, mint a modell-folyóhálózatok 1, illetve 5 kilométeres felbontása, ezért az egyes cellák értékét a keresztszelvényen belüli minimumértékek cellán belüli átlagolásával adtam meg. A keresztszelvények önálló vizsgálata esetén előfordult ugyan az a természetes jelenség (Morisawa 1985), hogy az abszolút minimális magassági pontja egy, a folyón felsőbb helyzetben lévő szakasznak alacsonyabb volt, mint az alsóbb, egy-egy szelvényben található minimális magasság, de a cellánkénti, hosszabb szakaszokon való átlagszámítással "elsimultak" az egyenetlenségek és a hosszabb szakaszokon belül (az 1x1 és 5x5 km-es cellán belül is) a folyó folyamatos lejtést mutatott.

Az eltérő adatforrások és az adatok különböző pontossága okán, a felbontások különbségéből származó generalizálás miatt a folyómedrek abszolút magassági értékeiben lényeges eltérés mutatkozik, ugyanakkor a relatív eltérések, és az arányosan származtatott gradiens-értékekben a különböző források alkalmazásának hatásai kevésbé érzékelhetők. A Duna és az Elba esetén a mederfelméréseken alapuló lejtés és az általános módszerrel, az SRTM adatokból a leírtak alapján számított gradiens értékeket összehasonlítva megállapítható, hogy azok jól közelítik az adott léptékű hidrológiai modellezésben alkalmazható értékeket (Wachter 2006; Gierk et al. 2007). Általánosságban elmondható, hogy a kidolgozott módszerrel előállított medergradiens értékek egy nagyságrenddel kisebbek, mint az európai árvízi modellezésben és előrejelzésben a korrekciós munkát megelőzően alkalmazott, bizonytalan forrású és szélsőséges adatoktól sem mentes mederlejtési értékeket.

b) Felszíni gradiens térkép az SRTM adatok alapján

A korábbi felszíni gradiens térkép forrása az 5.1 fejezetben ismertetett GTOPO30 adatok voltak, kiegészítve néhány területen a rendelkezésre álló nemzeti domborzatmodellekből származtatott adatokkal.

Sem a GTOPO30 adatokból közvetlenül nyerhető, sem a vegyített kiegészítésekkel módosított alapadatok nem szolgáltattak a felszíni lefolyás modellezéshez és a hidrológiai modell kalibrációjához megfelelő információkat (16.3 ábra), így a felszíni lejtőértékek újraszámolása is szükségessé vált (Wachter 2006).



16.3 ábra A GTOPO30 topográfiai adatbázis alapján generált felszíni gradiens térkép, kiegészítve néhány egyéb forrású domborzatmodellből származtatott információval. A térképen jól láthatók a nem természetes egyenetlenségek, "tereplépcsők", térkép-élek, stb.

A 100 méteres felbontású SRTM magassági adatokból származtatható, cellánként a 3x3-as környezetet figyelembe vevő lejtőszögek (ld. még 10. fejezet) térképének átskálázásakor a hidrológiai modell igénye szerinti, a felszínre jellemző átlagos lejtést számítottam ki az 1, illetve az 5 kilométeres cellákra. A folyóhálózatot reprezentáló cellák esetén az előző lépésben meghatározott meder-gradiens értékekkel helyettesítettem be a lejtő-gradiens értékeket is, megtartva a két geoinformatikai adatbázis konzisztenciáját (16.4 ábra).



16.4 ábra Az SRTM adatok feldolgozásával létrehozott felszíni gradiens térkép

16.1.3 A meder cellánkénti hosszának adatai

Hasonlóan a felszín és a folyómeder lejtési tulajdonságaihoz, a hidrológiai modellben alkalmazott további, néhány statikus geoinformatikai réteg módosítására is szükség volt, különösen, hogy azok a meder geometriájára és így a befogadható, levezethető vízmennyiségre is hatással vannak. A cellánkénti folyóhosszak módosított értéke ráadásul felhasználható a cellánkénti átlagos meder-gradiens értékének a reálisat jobban közelítő meghatározásában.

Az eredeti adatbázis a folyómeder hosszának cellánkénti értékét függetlenül a folyóhálózat sűrűségétől és jellegétől, egységes értékként tartalmazta: az 1 km-es felbontású adatok esetén 1500 méterrel, az 5 km-es felbontású adatok esetében a 7095 méterrel modellezve a mederhosszat. Geometriailag ezek az értékek nem rossz közelítések, de ez a leegyszerűsítő sablon nem adja vissza a folyóhálózat térbeli eloszlását, realisztikus mintázat. A valóságos vízhálózatot térképileg jobban közelítő vektor-alapú folyóhálózat, valamint az európai nemzeti hidrológiai intézetek jóvoltából elérhető vízmércék koordinátái és leíró adatai (pl. folyamkilométer) alapján a mederhosszak cellánkénti értékeit tartalmazó új adatréteget hoztam létre.

A számításokhoz a Dunára és az Elbára rendelkezésre álló folyamkilométer adatokat, és az európai folyók vektoros adatbázisát (Catchment-based Information System, CIS, Hiederer és de Roo, 2003) használtam fel.



16.5 ábra A felhasznált cseh vízmércék és az egyes folyószakaszok (eltérő színekkel), amelyeken belül az egyes hosszértékek cellánként megegyeznek

Az új adatok előállítását az 1 km-es felbontásban végeztem el először. A teljes Duna-medence főbb folyóira, valamint az Elba-medence felső, cseh részére a vízmércéket (és így a folyó adott pontjait) a földrajzi azonosítás mellett folyókilométerek is jellemezték (16.5 ábra).

A vízmércék közötti távolságokat (folyószakaszok hosszát) az adott folyókilométerek alapján megadtam, majd az értéket leíró (attribútum) adatként hozzárendeltem az egyes szakaszok reprezentánsaihoz. Az így kapott hosszértékeket elosztva a szakaszokhoz tartozó folyócellák számával megkaptam a cellák által reprezentált szakaszok átlagos hosszát minden különálló. а vízmércékkel elválasztott szakasz esetén.

Az Elba és főbb mellékfolyóinak alsóbb, német szakaszaira a meder-gradiens számításoknál is felhasznált, nagysűrűségű keresztszelvény-adatok folyókilométerben megadott elhelyezkedését használtam fel, a cseh vízmércékhez hasonlóan, csak nagyobb sűrűségben kinyerve a szakaszhosszakra vonatkozó információkat.

A geodéziai felmérések (vízmércék és keresztszelvények helyzetének meghatározása) eredményeinek, valamint az azonos folyószakaszokat reprezentáló, szükségszerűen generalizált, vektor-alapú folyószakaszok geometriai hosszának egyszerű statisztikai összevetése azt mutatta, hogy a vonalgeometriával rendelkező folyók számítható hossza átlagosan 8 %-kal rövidebb, mint a helyi méréseken alapuló, feltételezhetően pontosabb hosszértékek. A dunai és az elbai folyókon ezt az összefüggést feltárva a többi folyó esetében a cellánkénti folyóhosszakat már csak a rendelkezésre álló, azonos forrású és részletességű vektoros folyóadatok geometriai hosszának megfelelő cellánkénti hozzárendelésével, valamint a 8 %-os korrekcióval (cvektor/raszter) végeztem el.

A vektoros folyóhálózat által le nem fedett cellák esetében az összes, a vektoros módszerrel számított cellánkénti hosszérték átlagát képezve határoztam meg az új cellaértéket (1188 méter). Az utóbbi eljárás helyessége teljességgel hipotetikus, de bármi egyéb, vonatkozó információ hiányában jobb megoldásnak tűnt – és a teszteredmények ezt igazolni látszanak – mint az addig alkalmazott, amely vízrajzi vagy statisztikai meggondolás nélkül minden egyes cellához hozzárendelt 1500 métert. Az új, cellánkénti folyóhossz adatok 667 métertől 1585 méterig terjednek (16.6 ábra).



16.6 ábra A vízmércék és keresztszelvényadatok, valamint a vektor-alapú vízhálózat alapján számított folyószakaszok cellánkénti hosszúsága az 1 km-es felbontásban. A jelmagyarázat értékei méterben adottak

Az azonos tartalmú (cellánkénti folyóhossz) 5 km-es felbontású adatok generálását az elkészített és tesztelt 1 km-es adatok alapján végeztem. Forrásként felhasználtam még a cellánkénti lefolyásirányokat tartalmazó 5 km-es adatbázist. Mivel a folyóhálózat mintázata ebben a meglehetősen durva (5 km) felbontásban nagyon generalizált, a természetes vízfolyások jellemzői, részletei, a folyók lefutása meghatároz(hat)atlan, ezért ez előző módszertől eltérő eljárás kidolgozására volt szükség. A módszer kidolgozásakor az eredmény "végfelhasználójának" számító LISFLOOD modell egy további jellemzőjét figyelembe kellett venni (egyszer már volt, hogy a folyómeder csak lejthet), nevezetesen a "vízgyűjtőterület minden pontja folyó" és így minden cellához hozzá kell rendelni egy hosszértéket. A lefolyási különbségek ezen a szinten nem, csak később, a cellák feletti vízgyűjtőterületek nagyságával, valamint a mederszélesség, mélység, stb. értékével összekapcsolva határozzák meg a nagyobb folyásokat, ami természetesen nagyobb vízhozamot jelent a modellszámítások során.

A feladat megoldását a következő lépésekben tettem meg:

a) Ha rendelkezésre álltak referenciafolyók, akkor azok alapján számítottam,

b) Ahol nincs referencia, ott az előző lépésben megadott értékek lefolyásirány szerinti átlagát rendeltem hozzá a megfelelő irányokhoz.

Azokban az esetekben, amelyekben az 5 km-es hálózat celláihoz csak egy referenciafolyó tartozik, az új 5 km-es cellaérték megegyezik a tartalmazott 1 km-es cellaértékek (cellánkénti folyóhosszak) összesített értékével (16.7 ábra).



A) Egy referenciafolyó egy cellában 16.7 ábra Az 5 km-es folyóhálózatból azok cellák kiválasztása, amelyekbe csak referencia-folyó tartozik (A ábra, sárga cellák), és az 1 km-es folyóhosszak összegzésével kapott 5 km-es értékek (B ábra, kékes cellák). A fekete cellákban nincs folyó, vagy több 1 km-es folyó is van

Az 5 km-es irányok szerinti átlagos folyóhosszak értékét a vektoros geometriai hosszértékek és az 1 km-es folyóhálózat irány szerinti megoszlásainak (local drainage direction, LDD) figyelembe vételével vezettem le (16.8 ábra).

Diagonális_{1km} * 5[km] * $c_{vektor/raszter} = 1112.83 * 5 * 1.08 \approx 6010 \text{ m} (16.8.\text{A ábra})$ Ortogonális_{1km} * 5[km] * $c_{vektor/raszter} = 1098.2 * 5 * 1.08 \approx 5881 \text{ m} (16.8.\text{B ábra})$



A) Ha LDD5 diagonális ==> 6010 m B) Ha LDD5 ortogonális ==> 5851 m 16.8 ábra Referenciafolyót nem tartozó 5 km-es cellák folyóhosszainak megadása

Az összesített, 5x5 km-es felbontású eredménytérkép a cellánkénti mederhosszak értékét 768 és 7637 méter között tartalmazza (16.9 ábra). A teljes hálózatot nézve az átlagos folyóhossz cellánként 5372 méter (szórás: 1524 m).



16.9 ábra Cellánkénti folyóhosszak 5 km-es felbontásban. A piros vonalak mutatják a referenciafolyók vektoros adatait, a sárgával kiemelt cellák 5 km-nél rövidebb folyókat tartalmaznak

Az 1 és 5 km felbontású modellfolyókon elvégzett folyóhossz számítások eredményei azt mutatják, hogy a hidrológiai modellezésben korábban alkalmazott, csak geometriai szemléletű, egységes 1500 méter, illetve 7095 méter túlbecslés volt.

A modell tesztelésének céljából egy másik módszerrel is létrehoztam 'folyóhossz' adatokat. Az eljárás során csupán a cellák méretét és a lefolyási irányok jellegét vettem figyelembe; a cella méretét (5000 m) rendeltem hozzá az ortogonális irányokban lefolyó cellákhoz, és az átlók hosszát (7071,07 m) a sarokirányokba folyó cellákhoz. A könnyen elvégezhető módszer legfőbb hátránya – a folyóhosszak túlbecslésén túl – hogy a valódi folyóhálózat változatosságát, mintázatát teljesen elfedi.

16.1.4 A meder szélessége cellánként

A folyómeder geometriájának meghatározásában a cellánkénti szélesség (a telt meder szélessége) az egyik komponens. Azon kívül, hogy a korábbi mederszélesség értékek általában túl nagyok voltak, a rendelkezésre álló új adatbázisok (keresztszelvények, légifelvételek) lehetővé tették ezen adatok frissítését is (16.1 táblázat, 16.10 ábra). A részletesebb változtatásokat a hidrológiai modellezésbe leginkább bevont Duna és az Elba vízgyűjtőjén végeztem.

| Folyó | Adatforrás | Módszer | A régi szélességek összege | Az új szélességek összege | Arány |
|-------------------------|-----------------|---|----------------------------------|---------------------------------|-------|
| Duna és mellékfolyói | keresztszelvény | értékek közötti interpoláció | 2692 km | 1383 km | 51 % |
| Tisza | keresztszelvény | értékek közötti interpoláció | 219 km | 85 km | 38 % |
| Német Elba | keresztszelvény | értékek közötti interpoláció | 201 km | 142 km | 70 % |
| Saale | Image2000 | pontszerű mérés, majd a mért értékek közötti interpoláció | 11 km | 6 km | 54 % |

16.1 táblázat Felhasznált adatforrások a mederszélesség cellánkénti megadásában



16.10 ábra A meder szélességének meghatározása keresztszelvények alapján (jobb oldali ábra, Tisza, szegedi példa) és az Image2000 felvételek felhasználásával (bal oldali ábra, Saale)

A Duna és főbb mellékfolyóin, valamint az Elba német szakaszán és a Saale folyó esetében mind az 1 és az 5 km-es telt meder-szélességi adatokat meghatároztam, a többi folyó esetében a korábbi adatbázisból örökítettem át az értékeket.

16.1.5 A meder mélysége cellánként

A folyómeder geometriájának további meghatározó paramétere a telt meder mélységének jellemző értéke. Az új adatok előállítását csak a Duna és főbb mellékfolyóinak a vízmércék szelvényében rendelkezésre álló adatai alapján, a köztük elvégzett lineáris interpolációval végeztem el mindkét felbontásban (16.11 ábra). A többi folyó esetében a korábbi adatbázis értékeit alkalmaztam.



16.11 ábra A Duna és főbb mellékfolyóinak vízmércéi, amelyek adatai alapján a mederre vonatkozó geometriai értékeket az egész szakaszra interpoláltam

16.1.6 A változtatások hatása a hidrológiai modell kimenetelére (vízhozam)

A meder geometriai paraméterei a régi adatbázisban általában túl nagyok voltak. A modell-folyó hosszabb, szélesebb és mélyebb volt, ráadásul meredekebb esésű, mint a valóságost közelítő értékek. A változtatások után a hidrológiai modellfuttatások eredményeiben (pl. Wachter 2006; Gierk et al. 2007) a szintén túlzó kimeneti vízhozam-eredmények csökkenése figyelhető meg (16.12 ábra).



16.12 ábra A hidrológiai modellel becsült vízhozamok változása a meder geometriai paramétereinek változtatását követően. A cél az észlelések (sötétkékkel) közelítése

16.2 Európai összegyülekezési hálózat

A hidrológiai modell felszíni vízelvezetését szolgálja a gyülekezési hálózat (Local Drain Direction, LDD). Köszönhetően a 11.4. fejezetben ismertetett "beégetéses" technikának az 1 km felbontású lefolyáshálózat megfelelő részletességgel ábrázolta a vektoros adatbázisban rendelkezésre álló európai vízfolyásokat (Hiederer és de Roo 2003). Ugyanez nem mondható el az 5 km felbontású lefolyáshálózatról. A 16.13 ábra azt a tipikus hibát mutatja, amikor a felső vízgyűjtőn egy-egy mellékág a vízgyűjtőn kívülre folyik, így a modellezett vízgyűjtő területe kisebb lesz, illetve az alsóbb vízmércéken vízhiány jelentkezik, félrevezetve ezzel a modell kalibrációs munkáját és a modelleredményeket. A 16.13 ábrán a piros vonal ábrázolja a valós folyóhálózatot, a kékes négyzetek pedig az 5 km-es felbontású raszteres hálózatban a folyóhoz tartozó cellák. A cellákba írt kódszámok az alkalmazott D8 modell (ld. 11. fejezet) irány szerinti kódszámai.



16.13 ábra Hibás folyószakasz a változtatások előtt (bal oldali ábra) és a változtatás után (jobb oldali ábra). A kék körrel jelölt szakaszon hiányzik az összeköttetés a folyó felső és alsó szakasza között

A következő ábrák (16.14-16.18 ábrák) hasonló, lényeges hibákat és azok módosítását ábrázolják, érintve ezzel a főbb vízgyűjtők hidrológiai modellezésének eredményeit (Duna-Rajna, Tisza-Visztula, Rajna-Rhone).





B) A Duna felső folyásának javított verziója

16.14 A Duna és a Neckar felső folyása (Németország, Baden-Württemberg) az 5 km lefolyási hálózat javítása előtt (zöld kör jelöli a hiba helyét) és után



 A) A Hernád visszafelé folyik, bele a Poprád folyóba, majd a Visztulába



B) A felső folyás javítva, de még mindig hibás az alsóbb szakaszon a Bódva folyó

16.15 ábra A Duna-Visztula vízgyűjtő határa a javítások előtt és után



A) Félrevezető lefolyás - Körösök vidéke



B) A folyók (nem a csatornák) javítva

16.16 ábra A gyakran áradó Körösök vidéke a javítások előtt és után



A) A Rajna mellékfolyóinak hibás képe

B) A főfolyó lefutása javítva

16.17 ábra A Rajna-Rhone vízgyűjtőhatár lefolyási hálózatának javítása



16.18 ábra Duna-Száva-Temes összefolyásának vidéke a javítások előtt és után

A hidrológiai modellben közvetlenül alkalmazott 5 km-es felbontású lefolyáshálózat javításával egyidejűleg az SRTM adatok és Európa egészét lefedő vektor-alapú folyóadatbázis felhasználásával, elkészült a Pán-Európai Folyó és Vízgyűjtő Adatbázis⁴⁰ (Catchment Characterization and Modelling, CCM) (Vogt et al. 2007).

16.3 Domborzatmodell-alkalmazás a kontinens léptékű árvízi térképezésekben

A hidrológiai modellezésben nagyfelbontásúnak számító CCM-eredményeket közvetlenül sajnos nem tudjuk alkalmazni a hidrológiai előrejelzésben (számítási korlátozások miatt), de a kontinensre kiterjedő árvízi kockázati térképezési munkáknak (de Roo et al. 2007; Barredo et al. 2008a, 2008b) és a klímaváltozás árvizekre történő hatásait vizsgáló tanulmányoknak (Feyen et al. 2006; Dankers és Feyen 2008; Feyen et al. 2008) nélkülözhetetlen alapadatát képezi.

A csapadék-lefolyás modell statikus bemeneti alapadatainak a fejezetben ismertetett újragenerálásának, illetve módosításának (javításának) eredményeit a már korábban is idézett dolgozatok (Wachter 2006; Feyen et al. 2006; de Roo et al. 2007; Gierk et al. 2007; Barredo et al. 2008a, 2008b; Dankers és Feyen 2008; Feyen et al. 2008; van der Knijff és de Roo 2008) eredményeikben felhasználják.

Az Európai Unió "Új Árvízi Direktívája" előírja a tagországonkénti árvízi kockázati térképek⁴¹ elkészítését és napra készen tartását, az elöntések kiterjedését és az érintett lakosok, valamint vagyontárgyak teljes felmérését. Az előírt térképezési munkának szintén kulcseleme a domborzat.

⁴⁰ Catchment Characterization and Modelling (CCM) http://ccm.jrc.ec.europa.eu/php/index.php

⁴¹ A new EU Floods Directive http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/

17 Összefoglalás

A dolgozat a digitális domborzatmodellek és domborzatmodellezési feladatok általános ismertetését követően a domborzatmodellek és a belőlük geoinformatikai műveletekkel származtatható további, térbeli információknak – az árvízi védekezésre irányuló, a tervezést segítő, az operatív munkát előkészítő – hidrológiai modellezésben való alkalmazhatóságának bemutatását tartalmazza.

A digitális domborzatmodell fogalmának és a szakirodalomban elterjedt, különböző elnevezéseinek, továbbá gyakran az alkalmazásoktól függő, eltérő tartalmi jellegének összefoglalását követően szükségszerűnek éreztem a domborzatmodellekről, azok előállításáról, valamint a rajtuk leggyakrabban elvégzendő és elvégezhető geoinformatikai műveletekről általános, de a hazai szakirodalomban fellelhetőnél átfogóbb leírást adni. A különböző forrású és típusú domborzatmodellek ismertetése során a technikai részleteken túl az egyes tulajdonságok előnyeit, hátrányait is igyekeztem bemutatni, figyelembe véve a lehetséges, későbbi környezeti-hidrológiai alkalmazásoknak, modellezési feladatoknak a domborzatmodell jellemzőivel szemben támasztott igényeit. A gyűjtőmunka során próbáltam összegezni és rendszerezni a vonatkozó referencia-irodalom ismereteit, kiegészítve őket az adat-előállítástól a teljes feldolgozási folyamat minden fázisára kiterjedő, saját gyakorlati tapasztalataimmal.

A dolgozat első fejezetei így a felmerülő fogalmak áttekintését követően a domborzati modellek fajtáiról, előállításuk vagy elérhetőségük módozatairól – beleértve a nyilvános elérésű, globális forrásokat is –, minőségi jellemzőikről adnak tájékoztatást. A következő fejezetek a domborzatmodelleken elvégzendő olyan geoinformatikai műveletekről szólnak, amelyeket gyakorlatilag bármely további, földrajzi probléma vizsgálatának során el kell végeznie a kutatónak. Ilyen előkészítés a modellt a földrajzi térbe (koordináta-rendszerbe) helyező és megfelelően kiválasztott geometriai transzformáció, de a legtöbb alkalmazás a domborzatmodellből kinyerhető, a felszínre vonatkozó geometriai paraméterek (lejtőszög, lejtő kitettsége, gyülekezési hálózat, stb.) kiszámítását is igényli. Az egyes műveleteket a Velencei-hegység topográfiai térképeinek magassági adatai alapján előállított (digitalizálás, transzformáció, interpoláció) digitális domborzatmodellen végeztem és a példákban ezek eredményét mutatom be szemléltetésként (Bódis 1999; Bódis és Csuták 2001).

A domborzatmodellezés általános feladataiból a hidrológiai modellezés felé átvezető fejezet a csapadék-lefolyás modellek általános bemeneti adatai (pl. csapadék, vízhozam, további, méréseken alapuló meteorológiai és felszíni elemek alapján becsült intercepció és párolgás, a hóolvadás, ezek vízgyűjtőn belüli (térbeli) eloszlása, stb.) közül a domborzat módosító hatására érzékeny elemeket foglalja össze.

A következő fejezetek olyan esettanulmányokat mutatnak be, amelyekhez a domborzatmodelleket egy-egy adott feladathoz kellett előkészíteni, vagy a második tanulmány esetén elő is állítani, továbbá a domborzatmodellből származó információk egy-egy hidrológiai modellezési feladat alapjául szolgáló adatokat nyújtottak.

Az első két tanulmány – az egyik külföldi (Ukrajna), a másik hazai (Új Vásárhelyiterv keretén belül) beruházásként – a Tisza vízgyűjtőjén tervezett árvízcsökkentő tározók tervezésével és hatástanulmányával kapcsolatos. A kárpát-ukrajnai árvízcsökkentő tározók esetén domborzatmodell és az abból származtatott lefolyáshálózat segítségével elkészítettem a tervezett tározóknak egy olyan geoinformatikai rendszerét, amely alkalmas további hidrológiai modellezési-, tervezési- és döntéshozatali feladatok megoldásához szükséges adatokat szolgáltatni. A tanulmány során ismertetett domborzatmodellezési műveletekkel meghatároztam a leendő tározók olyan paramétereit (pl. tározási görbék), amelyek a tervezési dokumentumokban nem szerepeltek, a tározók létesítésének árvízcsökkentő hatását elemző hidrológiai modellezés számára viszont nélkülözhetetlen. A kidolgozott módszert és modellt a tározók optimális leeresztésével kapcsolatos feladatokban eredményesen alkalmaztuk (Szabó és Bódis 2006), továbbá az egész vízgyűjtőt érintő, idősorok statisztikai kiértékelésével kapott, feltételezett csapadékmennyiség és annak térbeli eloszlásának figyelembe vételével el tudtuk végezni a tervezett felső-tiszai tározórendszer első hatáselemzéseit is (Szabó, Bódis, Tóth és Jakus 2008).

A második esettanulmány témáját – nagyfelbontású digitális domborzatmodellek alkalmazása síkvidéki tározók létesítésének tervezésében – az Új Vásárhelyi-terv többlépcsős és több verziót is napvilágot látott, nyilvános tervezési dokumentációjában észrevett, a tervezett tározók befogadó kapacitására vonatkozó, valószínűtlennek tűnő számértékek adták. A fejezet a tervek háttereként szolgáló hidrológiai és adminisztratív körülményeket csupán megemlíti és a szegedi tározó példáján elsősorban a domborzatmodell alkalmazásához kapcsolódóan elvégzett feladatok és eredmények ismertetésére koncentrál, kiemelye azoknak a hasonló beruházások során a tervezésben és a döntés-előkészítésben betölthető szerepét (Bódis 2007). A vizsgálathoz elkészített domborzatmodell (Bódis, Szatmári, Szakál és Vízhányó 2003; Szakál 2003; Bódis és Szatmári 2005) és az elemzések eredménye (Bódis 2007) hozzájárultak a tervezési adatok és dokumentációk frissítéséhez.

A Csongrád-Szeged közötti, illetve az Algyőhöz közeli, a 185-ös folyókilométerrel jellemezhető Tisza-szakasz és az árvízvédelmi töltéseken túli, jobb parti terület a színtere a harmadik esettanulmánynak. Az árvízi kockázati térképezéshez szükséges komponensek közül az elvégzett hidraulikai modellezés (Szabó 2007) különböző valószínűségekkel bekövetkező statisztikai árhullámok levonulásának vizsgálatát tette lehetővé (Szabó és Bódis 2006), a következmények becslésében a tanulmányban bemutatott módszer szerint a domborzatmodell alapján számítottam ki és térképeztem az egyes árvízi valószínűségekhez rendelhető elöntési vízmélységeket.

A vízmélységek adatait összevetve területhasználati adatokkal, illetve az egyes földhasználati típusokra az adott régióban jellemző, becsült értékekkel az általánosan elterjedt kárszámító módszer (Multi Coloured Manual, MCM) alapján a kockázati térkép elkészíthető. A mintaterület esetén a lehetséges maximális károkat tartalmazó táblázat nem állt rendelkezésre, továbbá a módszer kivitelezésében alkalmazott CORINE földhasználati adatbázisban is tartalmi pontatlanságokat vettem észre (olajmező helyén csak szántóföldi művelés, így annak megfelelő kárfüggvény), így annak tematikus alkalmatlansága miatt a komponensek együttes produktumát jelentő "kockázati térképet" nem tartalmazza a fejezet. A domborzatmodell-alapú, a kockázati térképezéshez szükséges és a hidraulikai modellel számított bekövetkezési valószínűségekhez tartozó elöntési vízmélységeket viszont igen, amelyek alapján megfelelő földhasználati adatbázis és az adott területre jellemző kárérték-adatok (akár biztosítási értékek) ismeretében, a leírt módszertant követve nem csak topográfiailag, hanem hidrológiailag is megalapozott, árvízi kockázati térkép szerkeszthető.
A különböző, nagyobb felbontású (5, 20, 100 méter) domborzatmodellek lokális (Velencei-hegység és a Tisza vízgyűjtője) alkalmazásai után léptékváltást jelent az utolsó előtti fejezetben részletezett geoinformatikai műveletek sorozata, amelyben kontinentális hatókörű hidrológiai (csapadék-lefolyás) modell számára a statikus, topográfiai tartalmú bemeneti rétegek előállítását végeztem el. A fejezet a kb. 100 méteres felbontásban globális lefedettségben rendelkezésre álló magassági adatoknak és a belőlük származtatható felületi adatoknak a feldolgozását és a hidrológiai modell futtatási kritériumainak megfelelő 1, illetve 5 kilométeres átskálázási lépéseit ismerteti. A vizsgálatok során lehetőség adódott a dolgozat korábbi fejezetében részletezett, nyilvános elérésű magassági adatokból (GTOPO30 és SRTM) származó, azonos tartalmú topográfiai adatok összehasonlítására. A hidrológiai modellezés szempontjából a két különböző forrású és léptékű domborzatmodellből származó értékek eltérése azonban nem elsősorban a numerikus különbségekben érdekes (abban is jelentős), hanem a hidrológiai modell futtatásával kapott kimeneti értékekben figyelemreméltó. A létrehozott domborzati- és mederparaméterekre vonatkozó geoinformatikai rétegek az európai hidrológiai modell kalibrációs munkáját segítették (Wachter 2006; Gierk, Szabó, Bódis és Gentilini 2007).

A dolgozatban szereplő esettanulmányok mindegyike hidrológiai jellegű feladatból indult ki, de vissza is ad feladatokat a hidrológiai-hidraulikai modellezés számára. A felső-tiszai tározók hatáselemzésében az eddig elvégzett szimulációk nem mutatják a tározórendszer létesítésétől várt hatékonyságot az árhullámok mértékének csökkentésében (mindössze 8 % csökkenést tapasztaltunk a csúcs-vízhozamban), ugyanakkor azokra a vizsgálatokra, amelyek a felső-tiszai völgyzárógátas rendszer és a tervezett ukrán síkvidéki tározók együttes árvízcsökkentő és vízvisszatartó hatását elemzik, még szükség van (Szabó, Bódis, Tóth és Jakus 2008). Hasonlóan, a Tisza mentén létesítendő, síkvidéki árapasztó tározók hatáselemzése is elvégezhető numerikus hidrológiai modellekkel.

Az Európai Bizottság COM(2004)472 számú, az árvízkockázatok kezelésről készített előterjesztése az 'Összehangolt EU-s cselekvési program az árvizek elleni védekezésben' bekezdésben a tagországok számára előírja a területfejlesztésiterülethasználati tervezés és a kommunikáció eszközeként szolgáló árvízi kockázati térképek kidolgozását (Tóth 2007).

A dolgozatban ismertetett módszertan – összekapcsolva a hidrológiai-hidraulikai modellezés eredményeit, a földrajzi-topográfiai adottságokat és gazdasági-társadalmi jellemzőket – hasznos eszközként szolgálhat akár a nemzeti, akár regionális, vízgyűjtőalapú vagy a kontinentális léptékű előzetes árvízi kockázatbecslésben, az árvízi veszélytérképek és árvízi kockázati térképek, és így az árvízi kockázatkezelési tervek elkészítésében és nyilvánosságra hozásában (EU COM 2004). A domborzatmodellek hidrológiai alkalmazhatósága azonban nem korlátozódik az árvizekkel kapcsolatos kutatásokra, hanem pl. a belvizekkel sújtott, vagy aszályos területek komplex elemzésében (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer model, SVAT) is fontos szerepe van, így az integrált vízkészlet-gazdálkodás többcélú térbeli döntéstámogató rendszereinek nélkülözhetetlen eleme.

SUMMARY

The dissertation first generally describes digital elevation models (DEM) and surface modelling possibilities and technologies. It then demonstrates the applicability of elevation models and spatial information derived from them using GIS operations in hydrological modelling in order to support decision-making in flood control and operative flood protection.

After the definition of digital elevation models including their various, usually application- and content-dependent namings in the literature, the aim was to give a synoptic description of digital elevation models but making this more comprehensive than is available in Hungarian literature, including a review of DEM-generation procedures and the most frequently needed and applied GIS operations. Summarizing the different sources and types of digital elevation models beyond the technical details, I have endeavoured to reveal the advantageous and disadvantageous characteristics of the different models focusing on the requirements set by possible further environmental-hydrological applications. I attempted to collect, summarize and systemize the relevant reference publications integrating with my own practical experience concerning the full range of data preparation, processing and analysis.

Thus the first chapters give an overview about the definitions of different types of elevation models, the methodologies of their generation or sources - including the publicly available, global data-sources – and describe the properties of DEM quality assessment. The following chapters present the geoinformatic operations that must be performed on practically every DEM dataset before the investigation of any geographic phenomena. Among these preparatory steps are the definition of a proper projection and coordinate system or appropriately executed coordinate transformations ensuring the correct geographic extent of the model. Most applications also require the calculation of DEM-based terrain parameters (gradient, slope exposure, flow network, etc.). The geoinformatic operations were accomplished and the spatial distributions of derived surface parameters were demonstrated using the digital elevation model of the Velence Mountains (Hungary). The model was created (digitised, transformed, interpolated) using all the analogue elevation information contained in topographic maps of the area (Bódis 1999; Bódis and Csuták 2001).

A transitional chapter between the description of general functionalities of digital elevation modelling and case studies of hydrological applications summarizes the input parameters of rainfall-runoff models which are particularly sensitive to the terrain characteristics.

The following chapters present case studies where digital elevation models had to be prepared in accordance with specific hydrological modelling tasks. In the case of the second study a complex terrain and surface model was also created. The demonstrated elevation models provided essential data input to hydrological models.

The first two studies – presenting some elements of a foreign (Ukraine) and a domestic (New Vásárhelyi Plan) project – are in connection with impact assessment of the planned flood retention reservoirs in the Upper- and Lower-Tisza Basin.

In the case of the flood retention reservoirs in the Carpathian Mountains, Ukraine, a geoinformatic system including a geo-database of reservoirs was developed based on elevation models and the derived flow network. This sophisticated geo-database is suitable for providing essential spatial data input for further hydrological modelling, planning and decision making. Based on the methodology I developed and presented in the study, the parameters of the planned reservoirs were defined. These were not detailed in the available documentation (e.g. capacity curves) but are still fundamental in simulation-based hydrological analyses and impact assessment of the reservoir-system. The established and presented methodology and model was successfully applied in solving optimisation problems of reservoir-management (Szabó and Bódis 2006). The first impact assessment study was carried out using results from statistical evaluation of time series, the catchment-responses to spatially distributed probable maximum precipitation have been simulated based on the condition if the reservoirs were implemented already in the basin (Szabó, Bódis, Tóth and Jakus 2008).

The topic of the second case study – high-resolution digital elevation models for designing flood emergency reservoirs – was given by volumetric numbers that were published in the multistage and multi-versioned public documentations of the New Vásárhelyi Plan, the values of which seemed to be unrealistic. The chapter only briefly mentions the background hydrological and administrative circumstances of the plans. Instead the study rather focuses on the functions and results of digital elevation modelling and applications emphasizing their proposed role in the design and decision support of similar projects (Bódis 2007). The developed methodology is presented in the case of the Szeged reservoir. The digital elevation model created for the study (Bódis, Szatmári, Szakál and Vízhányó 2003; Szakál 2003; Bódis and Szatmári 2005) and the results of the geoinformatic analyses (Bódis 2007) contributed to the revision and modification of design parameters in the published documentation.

The scene for the third study is the right side floodplain of the Tisza River between Csongrád and Szeged (river km 185, close to Algyő). Among the components of flood risk mapping, hydraulic modelling results (Szabó 2007) enabled the evaluation of statistical flood waves characterized by different probabilities (Szabó and Bódis 2006). Estimating the consequences of flooding I presented a DEM-based methodology in order to calculate and map the spatial distribution of water-depths caused by inundations with given probabilities.

Flood risk maps could be generated based on a joint evaluation of probability- and terrain dependent water-depth data and land use maps using the widely applied risk assessment technique (Multi Coloured Manual, MCM) to estimate the potential damages to each land use type in the region. In the case of the study area the damage function representing the relation between the maximum damage and the damage factor was not available; furthermore thematic inaccuracy was detected in the applied CORINE land cover database (corresponding damage function for arable land instead of industrial area, oil field) upon implementing the presented methodology. The chapter shows the components of flood risk mapping; the maps of DEM-based water-depth calculations belonging to peak flood discharges with different probabilities and obtained by hydraulic modelling. Applying the described methodology, the mapping procedure of flood risk assessment is established both topographically and also hydrologically.

The next chapter details the geoinformatic operations performed on digital elevation models to produce static topographic input layers for a hydrological (rainfall-runoff) model developed to simulate floods in large, continental scale river basins. Since the target hydrological model runs at a coarser spatial resolution (1 km and 5 km) a rescaling technique was developed to define the required surface-parameter dataset from the higher resolution (ca. 100 m), global source of elevation data. The study gave the opportunity for the comparison of elevation data and derived parameters based on two public data sources (GTOPO30 and SRTM) which were described in previous chapters of the dissertation. The diversities between the two datasets from different sources and different resolutions are significant from the point of view of hydrological modelling not only because of their numerical dissimilarity but they are also quite remarkable in their differences when comparing the outputs of model runs and the model responses using the variant topographic inputs. The new geoinformatic layers containing parameters of the surface and the riverbed geometry advanced the calibration procedure of a hydrological model at European scale (Wachter 2006; Gierk, Szabó, Bódis and Gentilini 2007).

Initially, hydrological problems provided tasks for digital elevation modelling in the presented case studies, but the obtained results of geoinformatic analyses also mean further modelling tasks for hydrologic-hydraulic researches. According to the first impact assessment studies of the planned flood retention reservoirs in the Upper-Tisza Basin, the simulations did not confirm the expected efficiency of the reservoir-system in flood peak mitigation (only about 8 %). Having said that, the evaluation of the complex efficiency of the system of barrage dam reservoirs and lowland reservoirs is still to be done (Szabó, Bódis, Tóth and Jakus 2008). Similarly the impact assessment of the planned flood emergency reservoirs along the Tisza River must also be completed by numerical hydrological models.

A memorandum of the Commission of the European Communities [COM(2004)472] proposes an integrated flood risk management and harmonized flood prevention, protection and mitigation plans for the Member States. The essential features of this action program include developing and implementing flood risk maps as a tool for planning and communication at Member States level (Tóth 2007).

The flood risk mapping methodology presented in the dissertation – combining results of hydraulic-hydrologic modelling with geographic-topographic conditions and actual social-economic characteristics – could provide significant contribution to potential flood damage estimation, flood hazard and risk mapping as well as being able to assist flood risk management and public relations, either on national or regional level, in river basin or continental scale (EU COM 2004). The hydrological applicability of digital elevation models however is not limited only to flood-related research. Digital elevation modelling and the presented methodology also have important roles in complex analyses of areas with frequently occurring inland water or drought (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer model, SVAT), making digital elevation models the essential component of spatial decision support systems related to integrated water resources development and management.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS / ACKNOWLEDGEMENTS

Dolgozatom végén szeretném köszönetemet kifejezni mindazoknak, akiktől tanulhattam és akiket taníthattam; az iskolai tanulmányokon túlmutató, az ismereteket rendszerező, gondolatébresztő és szemléletmódot formáló – szakmai és szerencsére sokszor kevésbé szakmai tartalmú – beszélgetéseink és a közös munkálkodások során együtt eltöltött idő mindig rendkívüli jelentőségű volt és lesz számomra.

Külön szeretném megköszönni Mezősi Gábor professzornak, hogy a hivatásommá váló geoinformatika fogalmát, annak módszertanát megismertette, valamint az eredményes, gyakorlati megoldásokhoz elengedhetetlen szakmai-szellemi hátteret, a szükséges anyagi és infrastrukturális eszközöket számomra és a környezetem számára elérhetővé tette, majd később, a már közös elképzelések alapján a folyamatos fejlesztés-fejlődés lehetőségét támogatta. Úgy gondolom, hogy egy nagyon jól felkészült és jó hangulatú szakmai légkörben tanulhattam.

Köszönettel tartozom a Szegedi Tudományegyetem Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszékének munkatársainak, akikkel számos, rendkívül változatos témájú kutatási feladaton együtt dolgozva, a geoinformatikai részfeladatok feltárásamegoldása során a szakma olyan részleteit sikerült megismernem, amelyre irodalmi vonatkozások böngészésével, csupán elméletben képtelenség lett volna felkészülni; csak a gyakorlati kivitelezés, rengeteg próbálkozás, kudarcok és sikerek sorozatának tapasztalatával lehetett felfedezni őket. A dolgozatom témájának kidolgozásában a témavezető Mezősi Gábor professzor, valamint Barta Károly, Barton Gábor, Géczi Róbert, Kiss Richárd, Mucsi László, Rakonczai János, Szakál Szabolcs Ede és Szatmári József barátaim és kollégáim tanácsaira számíthattam.

Szabó János Adolf hívta fel a figyelmemet a geoinformatika, valamint azon belül a domborzatmodellezés eszköztárának és eredményeinek a hidrológiai modellezésben való jelentőségére, az alkalmazások kiemelt fontosságára és szerepére az integrált vízkészlet-gazdálkodás térbeli döntéstámogató rendszereiben. Beszélgetéseink és közös munkáink eredménye a dolgozat témájának alapjait adják. Köszönöm a támogatást az Európai Bizottság isprai kutatóintézetében megismert barátaimnak, akiktől a tudományos világban való tájékozódás kezdeti lépéseitől kiindulva hasznos életvezetési tanácsokig mindenben számíthattam, beleértve a dolgozat összeállításának fizikai monotonitását megtörő teniszjátszmákat is.

Furthermore, I would like to thank Borut Vrščcaj for the useful and constructive discussions about solving the difficulties of SRTM elevation data processing and of life in general. Also I would like to thank Roland Hiederer for the introduction to the European coverage of geographic datasets, and for the detailed overview of existing and non-existing river networks of Europe. Győző Jordán and Robert J. Peckham, thank you for all your efforts editing our common book on digital elevation modelling. I would also like to thank Karl Wachter for his explanations concerning operative hydrology, Simone Gentilini for showing me the Pomodoro Technique, hydrologist Giovanni Laguardia and geographer Reine Maria Basse for the discussions and their very valuable comments. Also many thanks to Tracy Houston Durrant and Gábor Barton for proofreading my papers published in English.

Köszönöm, Thank you, Grazie, Katalin

IRODALOM

Agüero, J. C., Feuer, A., Goodwin, G. C. (2003): Terrain modelling via triangulated regular networks, In: MODSIM 2003, volume XXXIII, Townsville, Australia

Amii, R.D, Tate, N.J., Brunsdon, C. (2008): Improving user assessment of error implications in digital elevation models, Computers, Environment and Urban Systems 32, pp. 268-277.

Annoni, A., Luzet, C., Gubler E., Ihde, J. (Eds.) (2001): Map Projections for Europe, European Commission, Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy, p. 131. EUR 20120 EN

Asselman, N., ter Maat, J., de Wit, A., Verhoeven, G., Soares Frazão, S., Velickovic, M., Goutiere, L., Zech, Y., Fewtrell, T., Bates, P. (2008): Flood inundation modelling: Model choice and application, Flood Risk Management: Research and Practice – Samuels et al. (Eds.), © 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48507-4, pp. 211-219.

Assmann, A., Krischke, M., Höppner, E. (2008): Risk maps of torrential rainstorms, Flood Risk Management: Research and Practice – Samuels et al. (Eds.), © 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48507-4, pp. 221-226.

Band, L. E. (1999): Spatial hydrography and landforms, In: Longley, P. A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J, Rhind, D.W. (Eds.), 1999, Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues. Wiley, New York, pp. 527-542.

Barredo, J.I., Salamon, P., Feyen, L., Dankers, R., Bódis, K., De Roo, A. (2008a): Flood damage potential in Europe. Catalogue number: LB-30-08-670-EN-C, JRC - European Commission, Institute for Environment and Sustainability, Map, Ispra, pp. 2.

Barredo, J.I., Salamon, P., Bódis, K. (2008b): Towards an assessment of coastal flood damage potential in Europe, European Commission, Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy, p. 16. EUR 23698 EN

Barsi Á., Detrekői Á., Lovas T., Tóvári D. (2003): Adatgyűjtés légi lézerletapogatással, Geodézia és Kartográfia 55(7), pp. 10–17.

Barton G. (2004a): Lego-GIS - Raszteres terepmodellek építése, HUNDEM Konferencia, 2004. november 11-12, Miskolc

Barton, G. (2004b): 20-metre-resolution Digital Elevation Model of Lake Balaton and its Surroundings - Creation, Improvement, Applications, Acta Geographica Szegediensis, Tomus XXXVIII (2004) pp. 11-22, University of Szeged, Department of Physical Geography and Geoinformatics Bates, P. D., Horritt, M., Hervouet, J.-M. (1998): Investigating two-dimensional, finite element predictions of floodplain inundation using fractal generated topography, Hydrological Processes, Hydrological Processes (1998)12, pp. 1257-1277, or In: Bates, P.D., Lane, S.N. (Eds.) High Resolution Flow Modelling in Hydrology and Geomorphology, John Wiley & Sons, 2000. pp: 181-201.

Bates, P.D., Lane, S.N. (Eds.) (2000): High Resolution Flow Modelling in Hydrology and Geomorphology, John Wiley & Sons, 2000.p. 374.

Bauer, J., Rohdenburg, H., Bork, H.-R. (1985): Ein Digitales Reliefmodell als Vorraussetzung für ein deterministisches Modell der Wasser- und Stoff-Flüsse, Landschaftsgenese und Landschaftsökologie, H.10, Parameteraufbereitung für Deterministische Gebiets-Wassermodelle, Grundlagenarbeiten zu Analyse von, Agrar-Ökosystemen, (Eds.: Bork, H.-R.; Rohdenburg, H.), p.1–15.

Belhadj, F. (2007): Terrain modeling: a constrained fractal model, In: AFRIGRAPH '07: Proceedings of the 5th international conference on computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa, pp. 197-212.

Beven, K.J, Kirkby, M.J. (1979): A physically based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques, 24, pp. 43-69.

Beven, K. (1997): TOPMODEL: A critique, Hydrological Processes, Volume 11., pp.1069-1085.

Beven, K.J. (2001): Rainfall-Runoff Modelling: The Primer, John Wiley & Sons Inc p. 372 ISBN: 0-471-98533-8, Chapter 3 Data for Rainfall-Runoff Modelling

Beven, K. J., Moore, I. D. (Eds.) (1995): Terrain analysis and distributed modelling in hydrology (Advances in Hydrological Processes), John Wiley & Sons, p. 249.

Bitters, B. (2001): GIS, Virtual Reality, and Real-Time Simulation. Proceedings ESRI User's Conference, San Diego, CA, July, 2001.

Blöschl, G., Grayson, R. (2000): Spatial observations and interpolation, In: Grayson, R., Blöschl (Eds.): Spatial patterns in Catchment Hydrology: Observations and modelling, Cambridge University Press, 2000, pp. 17-50. ISBN 0-521-63316-8

Bódis K. (1998): Geoinformatikai elemzések a Majsai-homokháton (Geoinformatics analysis on Majsa sandridge), Diplomamunka, Szeged, p. 31. http://www.geo.u-szeged.hu/~bodis/gis/kompoc/

Bódis K. (1999): Geometriai transzformációk, transzformációs egyenletek és alkalmazásuk a geoinformatikában (Applications of geometrical transformations in GIScience), Diplomamunka, Szeged, p. 52.

http://www.geo.u-szeged.hu/~bodis/gis/trafo/bodiskatalin_geotranszformaciok.pdf

Bódis, K., Csuták, M. (2001): Using digital elevation model in geomorphology in the case of the Velence Mountains, Acta Geographica, Tomus XXXVII, Szeged (Hungaria), pp. 1-10.

Bódis K., Szatmári J., Szakál Sz. E., Vízhányó J. (2003): Geoinformatikai döntéstámogatás síkvidéki tározók tervezéséhez, (Decision support for planning of lowland reservoirs using GIS), VIII. Geomatematikai Ankét (8th Congress of Hungarian Geomathematics), 2003. május 5-6. (5-6 May, 2003), Szeged, Hungary

Bódis, K., Franchello, G., Thielen, J., Golding, B. (2004): Feasibility of the UK Met Office NIMROD System for use in EFAS, Visual comparison between Nimrod and JRC MARS data, 2nd European Flood Alert System (EFAS) Workshop, 10-12 November, 2004, Ispra, Italy, CDROM

Bódis K., Szatmári J. (2005): Geoinformatikai döntéstámogatás síkvidéki tározók tervezéséhez (*Decision support for design of lowland reservoirs using GIS*). Geospatial Information & Technology Association (GITA) Conference, 12-13 May 2005, Szeged, Hungary, Proceedings pp. 103-108., Szeged

Bódis, K. (2007): High-Resolution DEM for Design of Flood Emergency Reservoirs, In: Peckham, R., Jordan, Gy. (Eds.), 2007, Digital elevation modelling. Development and applications in a policy support environment. pp. 203-226. Springer Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-540-36730

Boots, B. (1999): Spatial tessellations. In: Longley, P. A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J, Rhind, D.W. (Eds.), 1999, Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues. Wiley, New York, pp. 481-492.

Bouwer, L.M., Bubeck, P., Wagtendonk, A.J., Aerts, J.C.J.H. (2008): Inundation scenario development for damage evaluation in polder areas, Flood Risk Management: Research and Practice – Samuels et al. (Eds.), © 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48507-4, pp. 317-323.

Burrough, P. A. (1986): Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment (Monographs on Soil Resources Survey), Oxford University Press, New York, p. 193.

Burrough, P. A., McDonnell, R. A. (1998): Principles of Geographical Information Systems (Spatial Information Systems), Oxford University Press, New York, p. 333.

Böhner, J., Antonić, O. (2007): Land-Surface Parameters Specific to Topo-Climatology, Chapter 8 (pp. 195-226), In: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.), 2007, Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Elsevier, p. 765. ISBN: 9780123743459

Carrara, A., Bitelli, G., Carla, R. (1997): Comparison of Techniques for Generating Digital Terrain Models from Contour Lines. International Journal of Geographical Information Science 11(5). pp. 451-473 (1997)

Ciarapica, L., Todini, E. (2002): TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales, Hydrological Processes, Volume 16, pp. 207 - 229.

Clarke, A.L., Grün, A., Loon, J. C. (1982): The Application of Contour Data for Generating High Fidelity Grid Digital Elevation Models, Auto-Carto V, Proceedings of the International Symposium on Computer-Assisted Cartography, August 22 - 28, 1982, Crystal City, Virginia pp. 213-222.

Clarke, K. C. (1990): Analytical and Computer Cartography, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, p. 334.

Conrad, O. (2006): SAGA – program structure and current state of implementation, In: Böhner, J., McCloy, K.R., Strobl, J. (Eds.), 2006, SAGA – Analysis and Modelling Applications. Göttinger Geographische Abhandlungen, Vol.115, pp. 39-52.

Costa-Cabral, M. C., Burges, S. J. (1994): Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas, Water Resources Research 30(6), pp. 1681-1992

Croley, T.E., II (2002): Large basin runoff model, In: Singh, V, Frevert, D., Meyer, S. (Eds.), 2002, Mathematical Models of Large Watershed Hydrology, pp. 717-770, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, p. 914., ISBN 1-887201-34-3

Czimber K. (2001): Geoinformatika, III.8. Digitális fotogrammetria, Elektronikus jegyzet, http://www.geo.u-szeged.hu/~joe/fotogrammetria/GeoInfo/index.htm

Dankers R., Feyen, L. (2008): Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations, Journal of Geophysical Research, 113, D19105, doi:10.1029/2007JD009719.

De Floriani, L., Magillo, P. (1999): Intervisibility on Terrains, In: Longley, P. A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J, Rhind, D.W. (Eds.), 1999, Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues. Wiley, New York, pp. 543-556.

de Roo, A., Kucera, J., Bonk, R., Barredo, J., Bodis, K., Szabo, J., Thielen, J. (2006): Flood Extent and Damage Estimation in Hungary During the Floods in Spring 2006, European Commission, Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy, p.28.EUR 22712 EN

de Roo, A., Barredo, J., Lavalle, C., Bódis, K., Bonk, R. (2007): Potential flood hazard and risk mapping at pan-European scale, In: Peckham, R., Jordan, Gy. (Eds.), 2007, Digital elevation modelling. Development and applications in a policy support environment. pp. 183-202. Springer Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-540-36730

Detrekői Á. (1991): Kiegyenlítő számítások, Tankönyvkiadó, Budapest, p. 684. ISBN 9631833291

Detrekői Á., Szabó Gy. (1995): Bevezetés a térinformatikába, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest Detrekői Á., Szabó Gy. (2002): Térinformatika, Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., Budapest

Dewals, B.J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Erpicum, S., Pirotton, M. (2008): Detailed 2D flow simulations as an onset for evaluating socio-economic impacts of floods, Flood Risk Management: Research and Practice – Samuels et al. (Eds.), © 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48507-4, pp. 125-135.

Dikau, R. (1989): The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology, In: Raper, J. (Editor), 1989, Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems, Taylor and Francis: London; 51–77.

Dixon, T. H. (1995): SAR Interferometry and Surface Change Detection, Topography, Techtonics, and Erosion, In: Report of a Workshop Held in Boulder, Colorado: February 3-4, 1994, http://southport.jpl.nasa.gov/scienceapps/dixon/report6.html

Dowman, I. J. (1999): Encoding and validating data from maps and images. In: Longley, P. A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J, Rhind, D.W. (Eds.), 1999, Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues. Wiley, New York, pp. 437-450.

Döll, P., Lehner, B. (2002): Validation of a new global 30-min drainage direction map, Journal of Hydrology 258 (2002), pp. 214-231.

EEA (2000): CORINE land cover technical guide – Addendum 2000. Technical report No 40, European Environment Agency, Copenhagen, pp. 105. http://reports.eea.europa.eu/tech40add/en

EEA (2008): Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment, Joint EEA-JRC-WHO report, EEA Report No 4/2008, JRC Reference Report No JRC47756, ISSN 1725-9177, p. 246.

Ekenberg L., Brouwers L., Danielson M., Hansson K., Johannson J., Vári, A. (2004): Flood Risk Management Policy in the Upper Tisza Basin: A System Analytical Approach. Simulation and Analysis of Three Flood Management Strategies. Interim Report IR-03-003. International Institute for Applied Systems Analysis, Austria., http://www.iiasa.ac.at/Admin/PUB/Documents/IR-03-003.pdf

Endrizzi, S., Bertoldi, G., Neteler, M., Rigon, R. (2006): Snow cover patterns and evolution at basin scale: GEOtop model simulations and remote sensing observations. Proceedings 63rd Eastern Snow Conference, Newark (DE), USA, 7-9 June 2006 http://www.easternsnow.org/proceedings/2006/endrizzi_et_al.pdf

ESRI GRID (1994): Cell-based Modeling with GRID, Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, CA

ESRI TIN (1994): Surface Modeling with TIN, Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, CA

EU COM (2004): Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Flood Risk Management, Flood prevention, protection and mitigation, EU COM(2004)472, Commission of the European Communities, Brussels, p. 11., http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2004:0472:FIN:EN:PDF A Bizottság közleménye a Tanácsnak, az Európai Parlamentnek, az Európai Gazdasági és Szociális Bizottságnak és a Régiók Bizottságának, Árvízkockázatok kezelése, Árvízmegelőzés, árvíz elleni védekezés és árvízkárok mérséklése, EU COM(2004)472, Az Európai Közösségek Bizottsága, Brüsszel, p. 13. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2004:0472:FIN:HU:PDF

Fairfield, J., Leymarie P. (1987): Drainage networks from grid digital elevation models, Water Resources Research 27(5), pp. 709–717.

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D. (2007): The Shuttle Radar Topography Mission, Reviews of Geophysics, Volume 45. RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.

Fazekas L., Bodnár G., Illés L., Kertai I., Pesel A. (szerk.) (2001): Az 1998. novemberi felső-tiszai árvíz, Nyíregyháza, p. 278.

Feyen, L., Dankers, R., Barredo, J.I., Kalas, M., Bódis, K., de Roo, A., Lavelle, C. (2006): PESETA, Projections of economic impacts of climate change in sectors of Europe based on bottom-up analysis, Flood risk in Europe in a changing climate, European Commission, Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy, p. 20. EUR 22313 EN

Feyen, L., Dankers, R., Bódis, K., Barredo, J.I., Salamon, P. (2008): Climate warming and future flood risk in Europe, Special Issue in Climatic Change (in print)

Freeman, T.G. (1991): Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid, Computers and Geosciences, 17(3), pp. 413–422.

Galiatsatos, N. (2004): Assessment of the CORONA series of satellite imagery for landscape archaeology, A case study from the Orontes valley, Syria, PhD thesis, University of Durham, Department of Geography, p. 390.

Gallant, J. C., Hutchinson, M. F. (2006): Producing digital elevation models with uncertainty estimates using a multi-scale Kalman filter, 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. Edited by M. Caetano and M. Painho. pp. 150-159.

Genovese, E. (2006): A methodological approach to land use-based flood damage assessment in urban areas: Prague case study, European Commission, Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Land Management and Natural Hazard Unit, Floods and other weather driven natural hazards, Ispra, Italy, p. 39. EUR 22497 EN

Gierk, M., Szabó, J., Bódis, K. and Gentilini, S. (2007): Model calibration and validation of German Elbe River Basin based on 1 km x 1 km grid using LISFLOOD, Final report, JRC internal report, Ispra, p. 96.

GISCO (2001): The GISCO Database Manual. Eurostat, GISCO (Geographic Information System of the European Commission) Project, Rue Alcide Gasperi, Batiment Bech D3/704, L-2920 Luxembourg, edition November, 2001.

Golding, B. (2004): The UK Met Office Nimrod system, 2nd European Flood Alert System (EFAS) Workshop, 10-12 November, 2004, Ispra, Italy, Book of abstracts, pp. 64-66. S.P.I. 04.187 EN

Goodchild, M.F., Mark, D.M. (1987): The Fractal nature of geographic phenomena, Annals of the Association of American Geographers, Volume 77, Issue 2, pp 265-278.

Goodchild, M. F., Kemp, K. K. (Eds.) (1990): NCGIA Core Curriculum in GIS. National Center for Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara CA.

Goodchild, M.F., Steyaert, L.T., Parks, B.O., Johnston, C., Maidment, D.R., Crane, M., Glendinning, S. (Eds.) (1996): GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues, GIS World Books, ISBN 1-882610-11-3, p. 486.

Gorokhovich, Y., Sharlow, S. (2000): Modeling and mapping reservoir level increase due to dam modification using GIS, Conference Proceedings, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 22-26 May 2000, http://www.gis.usu.edu/docs/protected/procs/asprs/asprs/2000/pdffiles/papers/086.pdf

Grayson, R., Blöschl (Eds.) (2000): Spatial patterns in Catchment Hydrology: Observations and modelling, Cambridge University Press, 2000 ISBN 0-521-63316-8

Grayson, R., Blöschl, G. (2000): Spatial modelling of catchment dynamics, pp. 51-81. In: Grayson, R., Blöschl (Eds.): Spatial patterns in Catchment Hydrology: Observations and modelling, Cambridge University Press, 2000 ISBN 0-521-63316-8

Greenlee, D. D. (1987): Raster and Vector Processing for Scanned Linework, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 53, No. 10, October 1987, pp. 1383-1387.

Grohman, G., Kroenung, G., Strebeck, J. (2006): Filling SRTM Viods: The Delta Surface Fill Method, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 72, No. 3, pp. 213-216.

Gruber, S., Peckham, S. (2007): Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology, Chapter 7 (pp 171-194), In: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.), 2007, Geomorphometry -Concepts, Software, Applications, Elsevier, p. 765. ISBN: 9780123743459

Gugan, G. J., Dowman, I. J. (1988): Accuracy and Completeness of Topographic Mapping from SPOT Imagery, Photogrammetric Record, 12 (72), pp. 787-796.

Hengl, T., Evans, I.S. (2007): Mathematical and Digital Models of the Land Surface, Chapter 2 (pp. 31-63), In: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.), 2007, Geomorphometry -Concepts, Software, Applications, Elsevier, p. 765. ISBN: 9780123743459

Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.) (2007): Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, ISBN: 9780123743459, p. 765.

Hennig, T. A., Kretsch, J. L., Pessagno, C. J., Salamonowicz, P. H., Stein, W. L. (2001): The Shuttle Radar Topography Mission, Lecture Notes In Computer Science; Vol. 2181, Proceedings of the First International Symposium on Digital Earth Moving, ISBN:3-540-42586-1, pp, 65 - 77.

Hensley, S., Rosen, P., Gurrola, E. (2000): The SRTM topographic mapping processor, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International, Volume 3, Issue , 2000 Page(s):1168 - 1170 vol. 3

Heuvelink, G.B.M. (1999): Propagation of error in spatial modelling with GIS, In: Longley, P. A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J, Rhind, D.W. (Eds.), 1999, Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues. Wiley, New York, pp. 207-217.

Hiederer, R., de Roo, A. (2003): A European flow network and catchment data set. Report of the European Commission, Joint Research Centre, p. 41. EUR 20703 EN.

Hofierka, J., Parajka, J., Mitasova, H., Mitas, L. (2002): Multivariate interpolation of precipitation using regularized spline with tension. Transactions in GIS 6: 135-150.

Hoggan, D.H. (1997). Computer Assisted Floodplain Hydrology and Hydraulics, 2nd Ed. McGraw-Hill, New York, NY.

Hutchinson, M. F. (1988): Calculation of hydrologically sound digital elevation models. Proceedings of Third International Symposium on Spatial Data Handling, August 17-19, Sydney. Columbus, Ohio: International Geographical Union: 117-133.

Hutchinson, M. F. (1989): A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology: 106. pp. 211-232.

Hutchinson, M. F., Dowling, T. I. (1991): A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia, Hydrological Processes, Volume 5, Issue 1, pp. 45 - 58. és In: Beven, K. J., Moore, I. D. (Eds.), 1995, Terrain analysis and distributed modelling in hydrology (Advances in Hydrological Processes), John Wiley & Sons, pp. 49-62.

Hutchinson, M. F. (1996): A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, NM, January 21-26, 1996. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis.

Hutchinson, M. F. (1997): ANUDEM Version 4.6, User Guide, (Revision: 26 August 1997), The Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies, Canberra

Hutchinson, M. F., Gallant, J. C. (1999): Representation of terrain. In: Longley, P. A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J, Rhind, D.W. (Eds.), 1999, Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues. Wiley, New York, pp. 105-124.

Hutchinson, M. F., Gallant, J. C. (2000): Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape, In: Terrain Analysis: Principles and Applications, Edited by John P. Wilson and John C. Gallant, Wiley, New York, pp. 29-50.

Jenson S. K., Domingue, J. O. (1988): Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 54, No. 11, November 1988, pp. 1593-1600.

Jenson, S. K. (1997): Applications of hydrologic information automatically extracted from digital elevation models, In: Beven, K. J., Moore, I. D. (Eds.), 1995, Terrain analysis and distributed modelling in hydrology (Advances in Hydrological Processes), John Wiley & Sons, p.249

Jones, J. L. (2004): Mapping a Flood... Before It Happens, USGS Fact Sheet 2004-3060, June 2004, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3060/

Jordán, Gy. (2007): Digital Terrain Analysis in a GIS environment, In: Peckham, R., Jordan, Gy. (Eds.), 2007, Digital elevation modelling. Development and applications in a policy support environment. pp. 1-43. Springer Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-540-36730

Kertész Á. (1991): Természetföldrajzi modellezés, A digitális domborzatmodellezés, In: Mezősi Gábor (szerk.), 1991, A mikroszámítógépes módszerek használata a természetföldrajzban. JATE jegyzet, Szeged, p. 392.

Kertész Á. (1997): A térinformatika és alkalmazásai, Holnap Kiadó, Budapest, p. 240.

Klingebiel, A.A., Horvath, E.H., Reybold, W.U., Moore, D.G., Fosnight, E.A., Loveland, T.R. (1988): A guide for the use of digital elevation data for making soil surveys. U.S. Geological Survey Open File Report vol. 88-102, USGS, Sioux Falls, SD 18 pp.

Klinghammer I., Papp-Váry Á. (1983): Földünk tükre a térkép, Gondolat, p. 385. ISBN 9632811615

Konecny, G., Lohmann, P., Engel, H., Kruck, E. (1987): Evaluation of SPOT Imagery on Analytical Photogrammetric Instruments, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 53 (9), pp. 1223-1230.

Konecny, G. (2002) Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry and Geographical Information Systems, CRC Press, p. 248, ISBN 0415237955, 9780415237956

Koncsos L. (2006): A Tisza árvízi szabályozása a Kárpát-medencében, (NKFP-3/A 0039/2002 kutatás rövid összefoglalása), Magyar Természetvédők Szövetsége, p. 31. ISBN 978-963-86870-9-8

Lacroix, M.P., Martz, L.W., Kite, G.W., Garbrecht, J. (2002): Using digital terrain analysis modeling techniques for the parameterization of a hydrologic model, Environmental Modelling & Software 17, pp. 127–136.

Lange, A. F., Gilbert, C. (1999): Using GPS for GIS data capture. In: Longley, P. A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J, Rhind, D.W. (Eds.), 1999, Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues. Wiley, New York, pp. 467-476.

Fairfield, J.; Leymarie P. (1987): Drainage networks from grid digital elevation models. Water Resources Research 27(5): 709–717, 1991

Lea, N.L. (1992): An aspect driven kinematic routing algorithm. In: Parsons, A.J., Abrahams, A.D. (Eds.), 1992, Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics, Chapman & Hall, New York, pp. 147-175.

Lodwick, G.H., S.H. Paine, (1985): A Digital Elevation Model of the Barnes Ice-Cap Derived from Landsat-MSS Data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 51 (12), 1937-1944.

Longley, P.A., Goodchild, M. F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. (Eds.) (1999): Geographical Information Systems, Volume I. Principles and Technical Issues, Volume II. Management Issues and Applications, 2nd edition, Wiley, New York

Longley, P., Goodchild, M. F., Maguire, D., Rhind, D. (2005): Geographic Information Systems and Science, 2nd edition, Wiley, p. 517.

Luedeling, E., Siebert, S., Buerkert, A. (2007): Filling the voids in the SRTM elevation model - A TIN-based delta surface approach, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 62 (2007) 283–294.

Lucza, Z. (2008): Korszerű módszerek a hidrológiai előrejelzésben, a felső-tiszai árvízi előrejelző és riasztóközpont bemutatása, Magyar Hidrológiai Társaság XXVI. Vándorgyűlése

http://www.hidrologia.hu/vandorgyules/26/2szekcio/Lucza_ZoltanOK.htm

Maidment, D.R. (1996) GIS and hydrological modeling: An assessment of progress. Paper presented at The Third International Conference on GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico, U.S.A., January 22-26, 1996 http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHYdro/meetings/santafe/santafe.htm

Mandelbrot, B. B. (1982): The fractal geometry of nature, W.H. Freeman and Co., New York., ISBN 0716711869

Mark, D. M. (1978): Concepts of "data structure" for digital elevation models. Proceedings, American Society of Photogrammetry, Digital Terrain Models Symposium, St.Louis, Missouri, May 9-11, 1978, pp. 24-31. Mark, D.M., Aronson, P. B. (1984): Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: an empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping, Mathematical Geology, Volume 16, Number 7. pp. 671-683.

Marsh, J. G., Martin, T. V. (1982): The SEASAT altimeter mean sea surface model, Journal of Geophysical Research, Volume 87, Issue C5, p. 3269-3280.

Maune, D.F. (Editor) (2007): Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, (2nd Edition), Asprs Pubns, p. 620, ISBN 1-57083-082-7

McCullagh, M. J. (1979): Triangular Systems in Surface Representation, In: Auto-Carto IV, Volume 2, Proceedings of the International Symposium on Cartography and Computing: Applications in Health and Environment, November 4 - 8, 1979, Reston, Virginia, pp. 146-153.

Mélykúti G (2007): Topográfiai adatbázisok - BSc - 2007, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, BMEEOFTASJ3 segédlet a BME Építőmérnöki Kar hallgatói részére

Merkel, U., Westrich, B., Moellmann, A. (2008): PCRIVER – software for probability based flood protection, Flood Risk Management: Research and Practice – Samuels et al. (Eds.), © 2009 Taylor & Francis Group, London, pp. 613-620, ISBN 978-0-415-48507-4

Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S., van der Veen, A. (2007): Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods. T9-06-01, FLOODsite Project - Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies.

Mészáros, M., Szatmári, J., Tobak, Z., Mucsi, L. (2008): Extraction of digital surface models from corona satellite stereo images. Journal of Environmental Geography, Szeged, Volume I, No. 1-2, pp. 5-10.

Mezősi G. (szerk.) (1991): A mikroszámítógépes módszerek használata a természetföldrajzban. JATE jegyzet, Szeged, 1991, p. 392.

Mezősi G. (1994): Adatgyűjtés, Mintavétel, In: Márkus B (szerk.), 1994, NCGIA Core Curriculum, I. Bevezetés a térinformatikába, Technológia Transzfer Centrum, Budapest, http://www.mimi.hu/ncgia/ncgia_6.html

Mezősi, G., Bódis, K. (1999): Statistical Evaluation of Landscape Units, In: Kovar, P. (Editor), 1999, Nature and culture in landscape ecology. Karolium, Prague, pp. 170-183.

Mitasova, H., Mitas, L. (1993): Interpolation by Regularized Spline with tension: I. Theory and implementation. Mathematical Geology 25, pp. 641-655.

Mitas, L., Mitasova, H. (1988): General Variational Approach to the Interpolation Problem. Computers & mathematics with applications. Volume 16, No. 12. pp. 983-992.

Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L.R. (1996): Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. International Journal of Geographical Information Science, 10(5), pp. 629-641.

Mitas, L., Mitasova, H. (1999): Spatial interpolation. In: Longley, P. A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J, Rhind, D.W. (Eds.), 1999, Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues. Wiley, New York, pp. 481-492.

Moore, I. D., Grayson, R. B. and Ladson, A. R. (1991): Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications, Hydrological Processes, Volume 5 Issue 1, pp. 3 - 30. és In: Beven, K. J., Moore, I. D. (Eds.),1995, Terrain analysis and distributed modelling in hydrology (Advances in Hydrological Processes), John Wiley & Sons, pp. 7-34.

Morisawa, M. (1985): Rivers, Form and processes, Longman, p. 222.

Mucsi, L. (2004): Műholdas távérzékelés. Libellius, Szeged, p. 237. ISBN 963 214 903 3

Nelson, A., Reuter, H.I., Gesser, P. (2007): DEM Production Methods and Sources, Chapter 3 (pp. 65-85), In: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.), 2007, Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Elsevier, p. 765. ISBN: 9780123743459

NRC (2007): Elevation Data for Floodplain Mapping, Committee on Floodplain Mapping Technologies, National Research Council, p. 168. ISBN: 978-0-309-10409-8

Obled, Ch. (1990): Hydrological modeling in regions of rugged relief, In: Lang, H., Musy, A. (Eds.), 1990, Hydrology in Mountainous Regions. 1-Hydrological Measurements; the Water Cycle (Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990). IAHS Publ. no. 193, pp. 599-613.

O'Callaghan, J.F., Mark, D.M. (1984): The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data, CVGIP(28), No. 3, December 1984, pp. 323-344. Computer Graphics and Image Processing

Olaya, V. (2007): Basic Land-Surface Parameters, Chapter 6 (pp. 141-169), In: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.), 2007, Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Elsevier, p. 765. ISBN: 9780123743459

O'Sullivan, D., Unwin, D. J. (2002): Geographic Information Analysis. Wiley and Sons, p. 436.

Peckham, R., Jordan, Gy. (Eds.) (2007): Digital elevation modelling. Development and applications in a policy support environment. Springer Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-540-36730, p. 313.

Peckham, S.D. (2007): Geomorphometry and Spatial Hydrologic Modelling, Chapter 25 (pp. 579-602), In: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.), 2007, Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Elsevier, p. 765. ISBN: 9780123743459

Peucker, T. K., Fowler, R. J., Little, J. J., Mark, D. M. (1978): The Triangulated Irregular Network, In: Proceedings of the Digital Terrain Models (DTM) Symposium, American Society of Photogrammetry. St Louis Region, American Society of Photogrammetry. Committee of Computational Photogrammetry, American Congress on Surveying and Mapping, St Louis, Missouri, May 9-11, 1978, pp. 24-31.

Peucker, T. K. (1979): Digital Terrain Models: An overview, In: Auto-Carto IV, Volume 1, Proceedings of the International Symposium on Cartography and Computing: Applications in Health and Environment, November 4 - 8, 1979, Reston, Virginia, pp. 97-107.

Peucker, T. K., Fowler, R. J., Little, J. J., Mark, D. M. (1979): The Triangulated Irregular Network, In: Auto-Carto IV, Volume 2, Proceedings of the International Symposium on Cartography and Computing: Applications in Health and Environment, November 4 - 8, 1979, Reston, Virginia, pp. 96-103.

Pintér, J., Szabó, J.A. (1985): Global optimization algorithms: Theory and some applications. In: Prékopa, A., Straziczky, B., Szelezsán, J. (Eds.), 1985, Proceedings of the "12th IFIP Conference on Systems Modelling and Optimization" (Budapest, 1985), pp.: 704–713. (Lecture Notes in Control and Information Sciences 84, Springer-Verlag, 1986)

Prónaz Zs., Törös E. (2001): Szonár mérések hidrogeológiai alkalmazásai, Magyar Hidrológiai Társaság XIX. vándorgyűlése, 8/8.

Quinn, P.F., Beven, K.J., Chevallier, P., Planchon, O. (1991): The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models, Hydrological Processes, 5, pp. 59–79.

Quinn, P.F., Beven, K. J., Lamb, R. (1995): The $\ln(a/\tan\beta)$ index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. Hydrological Processes. 9. pp. 161-182.

Rakonczai, J. (2002): A Tisza-vízgyűjtő árvízi problémáinak aktuális kérdései egy földrajzos szemével. (Actual problems of floods in the Tisza Basin with a geographer's eye). In: A Tisza vízgyűjtője, mint complex vizsgálati és fejlesztési régió konferencia (Ed.: Rakonczai, J.) (Conference on Tisza Basin as complex region for analysis and development), Szeged, pp 107-114.

Rakonczai, J. (2003): Globális környezeti problémák, 9. fejezet: Globális vízproblémák (pp. 112-151.) és 13. fejezet: A globális környezeti problémák fontosabb hazai vonatkozásai (pp. 168-178.), Szeged, p. 192.

Reuter H.I, Nelson, A., Jarvis, A. (2007a): An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data, International Journal of Geographic Information Science, 21:9, pp. 983-1008.

Renssen, H., Knoop, J.M. (2000): A global river routing network for use in hydrological modeling, Journal of Hydrology, 230(2000), pp. 230-243.

Reuter, H.I., Hengl, T., Gessler, P., Soille, P. (2007b): Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis, Chapter 4 (pp. 87-120), In: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.), 2007, Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Elsevier, p. 765. ISBN: 9780123743459

Rodriguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., Chapin, E.C., Martin, J.M., Daffer, W., Hensley, S. (2005): An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, pp. 143.

Rodriguez, E., Morris, C. S., Belz, J.E. (2006): A Global Assessment of the SRTM Performance, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 72, No. 3, pp. 249-260.

Rosen, P. A., Hensley, S., Gurrola, E., Rogez, F., Chan, S., Martin, J., Rodriguez, E. (2001): SRTM C-Band Topographic Data: Quality Assessments and Calibration Activities, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS apos;01. IEEE 2001 International, Volume 2, Issue 2001, pp. 739 - 741.

Samuels, P., Huntington, S., Allsop, W., Harrop, J. (Eds.) (2008): Flood Risk Management: Research and Practice, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48507-4, Extended Abstracts Volume (p 332) and full paper CD-ROM (p. 1772)

Sanders, R., Shaw, F., MacKay, H., Galy, H., Foote, M. (2005): National flood modelling for insurance purposes: using IFSAR for flood risk estimation in Europe, Hydrology and Earth System Sciences, 9(4), 449-456, EGU

Sárközy F (2003): Térinformatika, GIS műveletek IV. Domborzatmodellezés http://www.agt.bme.hu/tutor_h/terinfor/t42d.htm (2003. október 30-i utolsó módosítás)

Shepherd, A., Rath, K., Lawrence, G. (2002): IFSAR for High-Resolution Elevation Mapping, Geospatial Solutions, Februar 21, 2002, http://www.geospatial-solutions.com/geospatialsolutions/article/articleDetail.jsp?id=10242

Slater, J. A., Garvey, G., Johnston, C., Haase, J., Heady, B., Kroenung, G., Little, J. (2006): The SRTM Data Finishing Process and Products, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 72, No. 3, pp. 237-248.

Soille, P., Vogt, J., Colombo, R. (2003): Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models. Water Resources Research, Volume 39, No. 12, 1366, pp. 1366-1375.

Soille, P. (2004a): Morphological carving, Pattern Recognition Letters 25, pp. 543–550

Soille, P. (2004b): Optimal removal of spurious pits in grid digital elevation models, Water Resources Research, Volume 40, W12509, doi:10.1029/2004WR003060.

Soille, P. (2007): From Mathematical Morphology to Morphological Terrain Features, In: Peckham, R., Jordan, Gy. (Eds.), 2007, Digital elevation modelling. Development and applications in a policy support environment. pp. 45-66. Springer Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-540-36730 Sole, A., Giosa, L. (2008):Laser scanning and flood risk models, EGU General Assembly 2008, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-02635, 2008, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-02635

Šuri, M., Huld, T., Dunlop, E.D., Hofierka, J. (2007): Solar resource modelling for energy applications, In: R. Peckham and G. Jordan (Eds.), 2007, Digital elevation modelling. Development and applications in a policy support environment. pp. 259-273. Springer Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-540-36730

Steiner F. (1990): A geostatisztika alapjai, Tankönyvkiadó, Budapest, p. 363. ISBN 9631828190

Szabó, J.A. (1988): Continuous solution of the one dimensional diffusion wave model and its application for hydrological forecasting. In: Proceedings of the "XIVth Conference of the Danube Countries on Hydrological Forecasts" (Kijev, Soviet Union, 1988).

Szabó, J.A. (2005): Estimation of high resolution meteorological fields based on geostatistical approaches; Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 10037, 2005 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-10037 © European Geosciences Union 2005

Szabó, J.A., Bódis, K. (2006): Drastic environmental interventions to mitigate floods in the Tisza Basin: Methodological study of flood risk mapping, (Seminar, JRC IES LMNH 25/10/2006), Scientific presentation at the European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Weather-Driven Natural Hazards Action). Ispra, Italy.

Szabó, J.A. (2007): Decision supporting hydrological model for river basin flood control, In: Peckham, R., Jordan, Gy. (Eds.), 2007, Digital elevation modelling. Development and applications in a policy support environment. pp. 145-182. Springer Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-540-36730

Szabó, J.A. (2008): An Efficient Hybrid Optimization Procedure of Adaptive Partition-based Search and Downhill Simplex Methods for Calibrating Water Resources Models. In: Proceedings of European Geosciences Union (EGU) General Assembly, 13-18 April 2008, Vienna, Austria.

Szabó, J.A., Bódis, K., Tóth, S., Jakus, Gy. (2008): Impact assessment study of planned flood retention reservoirs in the Upper Tisza Basin. In: Proceedings of FLOOD2008, 4th International Symposium on Flood Defence, Managing Flood Risk, Reliability & Vulnerability, pp.97-1-8, 6-8 May 2008, Toronto, Canada

Szakál, Sz. E. (2003): Síkvidéki szükségtározó modellezése, Diplomamunka, Szeged, 2003, (Modelling a lowland reservoir, Diploma thesis, University of Szeged, Hungary, Department of Physical Geography and Geoinformatics), p. 44.

Szatmári J. (2004a): Digitális domborzatmodellezés II., Fotogrammetriai felületmodellek, In: Bódis K. (szerk.), 2004, Térinformatika döntés előkészítőknek és döntéshozóknak. Phare HU00008-02-01-0023 képzési program, CD kiadvány.

Szatmári J. (2004b): Fotogrammetria, In: Bódis K. (szerk.), 2004, Térinformatika döntés előkészítőknek és döntéshozóknak. Phare HU00008-02-01-0023 képzési program, CD kiadvány.

Szlávik L. (2001): A Tisza-völgy árvízvédelmi fejlesztése, Földrajzi Konferencia, Szeged 2001. http://geography.hu/mfk2001/cikkek/Szlavik.pdf

Tamás L. (1970): A terepmodell, valamint a digitális terepmodell előállítása és alkalmazása a geodéziai gyakorlatban. Kandidátusi értekezés. Erdészeti és Faipari Egyetem Sopron, 1970.

Tarboton D.G., Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I. (1991): On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data, Hydrological Processes. Volume 5 Issue 1, pp. 81 - 100.

Tarboton, D. G. (1997): A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resources Research 33(2), pp. 309–319.

Telbisz T. (2007): Digitális domborzatmodellekre épülő csapadék-lefolyás modellezés, Hidrológiai Közlöny, 87. évfolyam, 3. szám, pp. 53-59.

Temme, A.J.A.M., Heuvelink, G.B.M., Schoorl, J.M., L. Claessens (2007): Geostatistical Simulation and Error Propagation in Geomorphometry, Chapter 5 (pp. 121-140), In: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.), 2007, Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Elsevier, p. 765. ISBN: 9780123743459

Timár G., Telbisz T., Székely B. (2003): Űrtechnológia a digitális domborzati modellezésben: az SRTM adatbázis, Geodézia és Kartográfia 55(12), pp. 11-15.

Tobler, W.R. (1970): A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. Economic Geography, 46(2): 234-240.

Tóth, G., Debreczeni, K., Gaál, Z., Hermann, T., Makó, A., Máté, F., Vass, J., Várallyay, Gy. (2004): Land use planning decision support based on land evaluation and Web-GIS modeling: an integrated approach in Hungary. In: Kertész et al. (Eds.) 4th International Congress of the European society for Soil Conservation (ESSC) 25-29 May 2004, Budapest, Hungary. Proceedings Volume, Hungarian Academy of Sciences, pp. 21-24.

Tóth S. (2007): Az EU árvízi kockázatkezelési cselekvési programja, feladatok és kihívások, Magyar Hidrológiai Társaság XXV. Országos Vándorgyűlés, Tata, 2007. július 4-5. Első szekció: Árvízvédelem, ISBN 978-963-8172-20-4

Toutin, Th. (1998): SPOT and Landsat Stereo Fusion for Data Extraction Over Mountainous Area, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 64 (2), 109-113.

Toutin, Th. (2002): DEM from stereo Landsat 7 ETM⁺ data over high relief areas, International Journal of Remote Sensing, Volume 23, Number 10, pp. 2133-2139(7)

Turner, J. (2001): Rapid Terrain Visualization, Virtual Reality and 3D Modelling of Urban and Rural Areas, PhD course and workshop, Aalborg University

USGS (1999): HYDRO1k Documentation. Customer Services, U.S. Geological Survey - Center for Earth Resources Observation and Science (EROS), 47914 252nd Street, Sioux Falls, SD 57198-0001, U.S.A. http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/hydro/index.html.

Vafeidis, A.T., Boot, G., Cox, J., Maatens, R., McFadden, L., Nicholls, R.J., Spencer, T., Tol, R.S.J. (2005): The diva database documentation. Available online at: http://www.civil.soton.ac.uk/diva

Vágás, I. (2001): Az ezredforduló árhullámai a Tiszán, Magyar Tudomány (46), 2001/8. Budapest, pp. 958-966.

van der Knijff, J., de Roo, A. (2008): LISFLOOD Distributed Water Balance and Flood Simulation Model, Revised User Manual, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, p. 109. EUR 22166 EN/2

Végső F. (1994): A raszter GIS In: Márkus B (szerk.), 1994, NCGIA Core Curriculum, I. Bevezetés a térinformatikába, Technológia Transzfer Centrum, Budapest, http://www.mimi.hu/ncgia/ncgia_4.html

Veregin, H. (1999): Data quality parameters, In: Longley, P. A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J, Rhind, D.W. (Eds.), 1999, Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues. Wiley, New York, pp. 177-189.

Vincent, K. V., True, M. A., Pleitner, P.K. (1987): Automatic Extraction of High Resolution Elevation Data from SPOT Stereo Images, Proceedings of the SPOT-1 Image Utilization, Assessment, Results, Paris, France, France, November, 1339-1345.

VITUKI (2001): A Tisza kárpát-ukrajnai vízgyűjtőjének árvízvédelmi vázlatterve, A Közlekedési és Vízügyi Minisztérium megbízásából összeállította a VITUKI Rt.

Vogt, J. V., Soille, P., de Jager, A., Rimavičiūtė, E., Mehl, W., Foisneau, S., Bódis, K., Dusart, J., Paracchini, M.L., Haastrup, P., Bamps, C. (2007): A Pan-European River and Catchment Database, European Commission, Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy, p.119., JRC Reference Reports, EUR 22920 EN

Vrščaj, B., Daroussin, J., Montanarella, L. (2007): SRTM as a possible source of elevation information for soil-landscape modelling, In: Peckham, R., Jordan, Gy. (Eds.), 2007, Digital elevation modelling. Development and applications in a policy support environment. pp. 99-120. Springer Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-540-36730

Wachter, K. (2006): Scientific support towards development a European Flood Alert System, Pilot project: Danube River Basin using LISFLOOD Model, Final Technical Report, JRC internal report, Ispra, p. 90. Watson, F. G. R., Grayson, R. B., Vertessy, R. A., McMahon, T. A. (1998): Largescale distribution modelling and the utility of detailed ground data, Hydrological Processes, 12(6) pp. 873-888.

Wilson, J. P., Gallant, J. C. (Eds.) (2000): Terrain Analysis: Principles and Applications, Wiley, New York, p. 479.

Wilson, J. P., Gallant, J. C. (2000): Digital Terrain Analysis. In: Terrain Analysis: Principles and Applications, Edited by John P. Wilson and John C. Gallant, Wiley, New York, pp. 1-27.

Winkler, P. (2004): The national orthophoto program of Hungary completed under strict quality control, In proceedings of the XXth congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, (ISPRS 2004), Istanbul, Turkey, 12-23 July 2004., http://www.isprs.org/congresses/istanbul2004/comm4/papers/375.pdf

Winkler P., Iván Gy., Kay, S., Spruyt, P., Zielinski, R. (2006): Űrfelvételekből származtatott digitális felületmodell minőségének ellenőrzése a magyarországi nagyfelbontású digitális domborzatmodell alapján, Geodézia és kartográfia, 58(2), pp. 10-17.

Wise, S.M. (2000): Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours, Hydrological Processes, Volume 14, Issue 11-12, pp. 1909-1929.

Wise, S.M. (2007): Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model, Computers & Geosciences, Volume 33, Issue 10 (October 2007), pp. 1351-1365.

Wu, S., Li, J. and Huang G. H. (2007): Modeling the effects of elevation data resolution on the performance of topography-based watershed runoff simulation, Environmental Modelling & Software 22 (2007) pp. 1250-1260.

Závoti J. (1994a): A felszín- és időadatok adatszerkezetei és algoritmusai, Digitális terepmodellek, In: Márton M., Paksi J., Márkus B (szerk.), 1994, NCGIA Core Curriculum, II. Térinformatikai alapismeretek, Technológia Transzfer Centrum, Budapest, http://www.mimi.hu/ncgia/ncgia_38.html

Závoti J. (1994b): Térbeli interpoláció I., In: Márton M., Paksi J., Márkus B (szerk.), 1994, NCGIA Core Curriculum, II. Térinformatikai alapismeretek, Technológia Transzfer Centrum, Budapest, http://www.mimi.hu/ncgia/ncgia_40.html

Zentai L. (1991): Kartometria, Térképértékelés-térképinterpretáció, doktori értekezés http://lazarus.elte.hu/hun/dolgozo/zentail/kartomet/tart.htm

Zevenbergen, L. W., Thorne, C. R. (1987): Quantitative Analysis of Land Surface Topography, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 12, pp 47 - 56.

Zhang, W., Montgomery, D.R. (1994): Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations, Water Resources Research, Vol. 30, No. 4., pp. 1019-1028.