

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

Mederesés-vizsgálat domborzatmodell alapján Komárom-Esztergom megye vízfolyásainál

SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK
TÉRKÉPÉSZ ÉS GEOINFORMATIKA SPECIALIZÁCIÓ

Készítette:
Gurály Attila

Témavezető:
Dr. Albert Gáspár
egyetemi docens
ELTE Térképtudományi és Geoinformatikai Tanszék



Budapest, 2020

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
A vizsgált terület: Komárom-Esztergom megye	4
Komárom-Esztergom megye általános jellemzése	4
A megye természetföldrajzi jellemzése.....	5
Felhasznált adatok és technológiák.....	7
A digitális domborzatmodellekről	7
A lézerszkennelésről	8
A MERIT Hydro DEM	9
Az OVF HydroDEM modellje.....	12
A vízfolyás-adatbázis	16
LiDAR pontfelhő az Által-érről.....	16
Alkalmazott módszerek.....	17
DEM létrehozása a LiDAR adatokból	17
Műveletek a vízfolyás-adatbázissal	19
Mederprofilok létrehozása.....	20
Az Excel-ben végrehajtott elemzések	21
A hibapontok megjelenítése	23
Eredmények.....	24
Az OVF HydroDEM és a MERIT Hydro eredményeinek összefoglalása	24
A három modell összehasonlítása az Által-ér példáján.....	25
A hibák lehetséges típusai	30
A hibák bemutatása térképeken	31
Összefoglalás	35
Irodalomjegyzék	37
Köszönetnyilvánítás	38

Bevezetés

Alkalmas az Országos Vízügyi Főigazgatóság hidrográfiai domborzatmodellje különböző modellezések elvégzésére, mint például a lefolyásvizsgálat? Illetve ezen kívül milyen lehetőségeink vannak, milyen modellen érdemes hidrográfiai elemzéseket végezni magyarországi területeken? Szakdolgozatom alapvetően ezekre a kérdésekre keresi a választ, a feltett kérdéseket pedig a Komárom-Esztergom megyei vízfolyásokon elvégzett lefolyásvizsgálatokkal igyekeztem megválaszolni.

A kiindulási pont az Országos Vízügyi Főigazgatóság (a továbbiakban: OVF) HydroDEM elnevezésű országos domborzatmodellje volt (OVF, 2014), melynek hidrográfiai modellezésre való alkalmazhatósága az OVF illetékesei szerint is kérdéses, ugyanis nem a legkorszerűbb eszközökkel lett létrehozva (főként szintvonalak digitalizálásával). Dolgozatomban ezt a modellt, valamint ennek lehetséges alternatíváit vizsgálom meg térinformatikai elemzőeszközök segítségével.

A domborzatmodell szó hallatán talán sokan a NASA (Amerikai Űrügynökség) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) modelljére asszociálunk (Farr és mtsai., 2004), mint a legszélesebb körben elterjedt ingyenesen hozzáférhető globális adatbázis, azonban ez a modell nem jöhetett szóba, mivel tartalmazza a felszín különböző tereptárgyait is, tehát hidrográfiai elemzésekhez alkalmatlan. Létezik azonban egy újonnan publikált globális hidrográfiai domborzatmodell, a MERIT Hydro (Yamazaki és mtsai., 2019), amely részben az SRTM javított változataként számon tartott MERIT DEM modellből lett létrehozva.

A témavezetőmmel, Dr. Albert Gáspárral az OVF-nél tett látogatásunkkor szereztünk tudomást arról, hogy 2013-14-ben készültek LiDAR (lézerszkenneléses) felmérések az ország jelentősebb vízfolyásairól. A mintaterületen belül egy vízfolyás volt érintett, így ez esetben egy LiDAR állományokból generált domborzatmodellen való elemzés volt a kitűzött cél. A legpontosabb eredményeket ebből a modellből várhatjuk, ugyanis a terepi felbontást tekintve ez a legprecízebb távérzékelési eljárás. Az elemzések alapjául szolgáló vízfolyásokat tartalmazó vektoros adatbázist szintén az OVF bocsátotta rendelkezésemre.

A vizsgálat tárgya azon az egyszerű fizikai törvényszerűségeen alapult, amely szerint a víz mindig lefelé folyik. Ez azt feltételezi, hogy egy adott raszteres domborzatmodell adatpontjai a vízfolyások vonala mentén lefolyási irányban egyre csökkenő, esetenként stagnáló magasságértékeket vesznek fel. A dolgozatom célja tehát a vízfolyások mederesedésének vizsgálata, és a kapott eredmények modellenkénti összehasonlítása, melyet az Által-ér

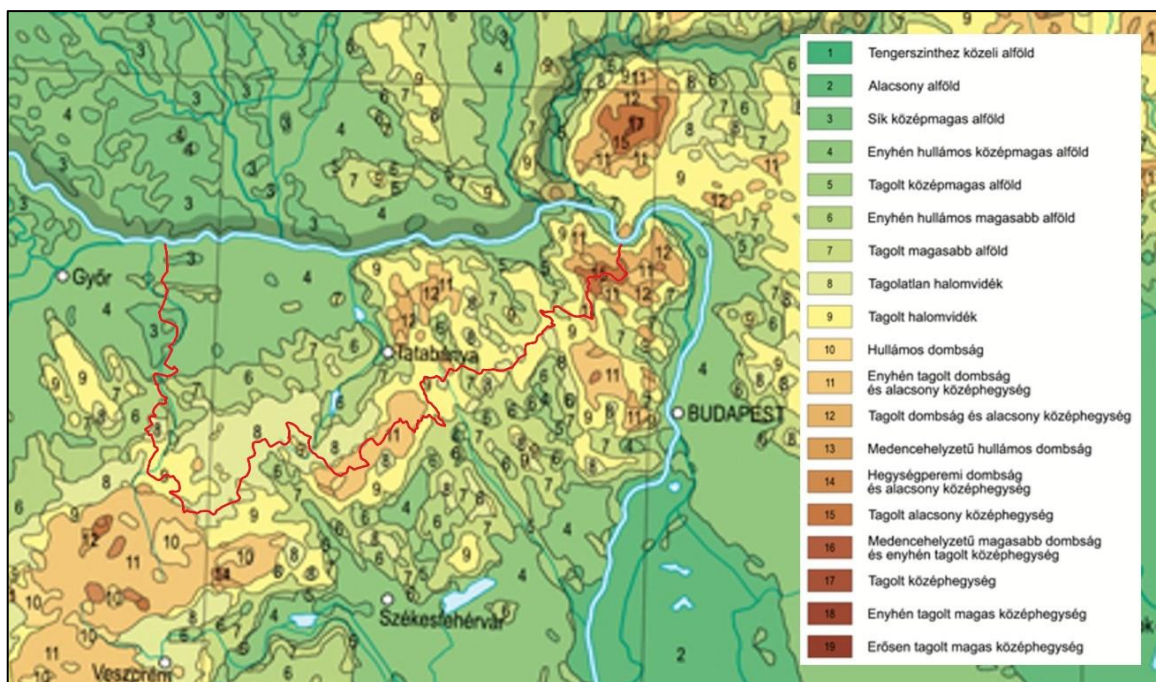
esetében három (OVF HydroDEM, MERIT Hydro, LiDAR DEM), míg az összes többi vízfolyás esetében kettő (OVF HydroDEM, MERIT Hydro) domborzatmodellen valósítottam meg.

A vizsgált terület: Komárom-Esztergom megye

A dolgozatban vizsgált terület Komárom-Esztergom megye. A területválasztásnál elsődleges szempont volt a domborzati változatosság, valamint a kisvízfolyások hálózatának megfelelő sűrűsége. Mindezeket figyelembe véve témavezetőmmel a patakokban közepesen gazdag Komárom-Esztergom megyében állapodtunk meg, mely egyaránt tartalmaz sík-, domb-, illetve hegyvidéki térszíneket, így eltérő jellegű területeken végezhetek elemzéseket az átfogóbb eredmények érdekében. Továbbá eme választás mellett szólt – természetesen kisebb súllyal – az is, hogy rendelkezem némi helyismerettel a megyében.

Komárom-Esztergom megye általános jellemzése

Komárom-Esztergom megye a maga 2264 km²-es kiterjedésével Magyarország legkisebb területű megyéje. A megye a Dunántúl északkeleti tájékán található, Budapesttől északnyugati irányban. Komárom-Esztergom megye a Közép-Dunántúl régió része, székhelye és egyben legnépesebb városa Tatabánya. A megye határa északon a Duna, mely a Magyarország és Szlovákia közötti államhatár is egyben, keleten a Visegrádi-hegység és a Pilis, délkeleten az Alacsony-Gerecse hullámzó térszíne és a Vértes vonulata. Délen az Északi-Bakonyalja lankás dombvidéke, nyugaton pedig a Győr-Esztergomi-síkvidék nyugati része jelenti a határt, illetve az azon keresztül kanyargó Cuhai-Bakony-ér, mely többször is keresztezi a Komárom-Esztergom és Győr-Moson-Sopron közti megyehatárt.



1. ábra: Komárom-Esztergom megye domborzattípusai (Forrás: Magyarország Nemzeti Atlasza, 2018).
Piros vonallal a megyehatár van jelölve.

A megye természetföldrajzi jellemzése

A megye területe három nagytípusra osztható, melyek név szerint a Kisalföld, a Dunántúli-középhegység és az Észak-Magyarországi-középhegység (Magyarország Nemzeti Atlasza, 2018). A Kisalföld részeként a megye északnyugati részén található a Győr–Tatai-sík, illetve a Bábolnai-halomvidék. A Dunához közelebb eső területeket a löszös hordalékkúp-síkságok, míg az attól távolabb eső térszíneket az édesvízi mészkővel vagy lösszel fedett teraszok, illetve szigethegyek jellemzik. A Duna lentebbi szakasza mentén húzódó Komárom–Esztergomi-sík Gerecséhez hasonló teraszait szintén az édesvízi mészkő, illetve a lösz jellemzi (Magyarország földtani atlasza országjáróknak, 2010).

A megye délkeleti sarkába belenyúló Északi-Bakonyalja már a Dunántúli-középhegység részét képezi, melynek tönkös sasbérceire hordalékkúpok épültek. A Bakonytól északkeletre, a Móri-árok túlsó oldalán található Vértes–Velencei-hegyvidék északnyugati tagjaként a Vértes hegység alacsonyhegységi és dombvidéki térszíneinek fő építőeleme a mészkő és a dolomit. A hegységet az északnyugat-délkeleti csapásirányú tönkös sasbércek, és az ezeken kialakult karsztos fennsíkok jellemzik, melyeket tektonikus medencék tagolnak. A hegység minden irányból törések által létrejött meredek hegyoldalakban végződik. Átlagmagassága 300–400 m körüli, legmagasabb pontja a terület északkeleti szegletében található 487 m magas Nagy-Csákány. A Vértest délnyugatról a tektonikus eredetű Móri-árok, míg északnyugatról a Bársonyos–Általér-vidék völgymedencéje és

hullámzó dombsága szegélyezi. A Vértes–Velencei-hegyvidék északkeleti szomszédja a Tatai-árok túloldalán elhelyezkedő Dunazug-hegyvidék. Legnyugatibb tagját, a Gerecsét a Vérteshez hasonlóan mészkő és dolomit jellemzi, melyekre több helyütt üledékek rakódtak (pl. homok, agyag, lösz). Észak-déli csapásirányú sasbércvonulatai jellemzően 400–600 m magasak, melyeket medencék választanak el egymástól. A Gerecse-vidék három kistájra osztható, mégpedig a Nyugati-, a Központi- és a Keleti-Gerecsére. A Nyugati-Gerecse legmagasabb pontja az 554 m magas Öreg-Kovács, a Központi-Gerecséé a 633 m magas Nagy-Gerecse, míg a Keleti-Gerecséé a Nagy-Gete 456 m-rel. A Vértes és a Gerecse vidékén több kőszéntelep is található (Pusztavám, Oroszlány, Tatabánya, Dorog), melyek intenzív kitermelése egészen a közelmúltig zajlott. Tovább haladva északnyugat felé a következő táj a Pilis, mely a Pilisvörösvári árok és a Pomáz–Esztergomi-árok közt húzódó keskeny rögvonulat. Legmagasabb pontja a 756 m magas Pilis-tető, ez azonban Komárom-Esztergom megyén kívül, a hegység Pest megyei oldalán magasodik.

A megye legkeletibb szegletében található a vulkanikus eredetű, andezites összetételű Visegrádi-hegység, valamint a Dunakanyart szegélyező Visegrádi-szoros kavicsos teraszai. Mindkét kistáj az Észak-Magyarországi-középhegyvidékhez tartozik. A Visegrádi-hegység legmagasabb pontja a 699 m magas Dobogó-kő, mely Komárom-Esztergom megye legmagasabb pontja is egyben. A csúcs a Pest megyei határon fekszik.

Az előbbieket összegezve, illetve a térképre tekintve elmondható, hogy a megye domborzati szempontból igencsak változatos, a terület hasonló arányban osztozik alföldi, halmokkal borított, valamint domb- és hegyvidéki tájakon. Komárom-Esztergom megye átlagos tengerszint feletti magassága 200 m.

Vízrajzi szempontból a területet a megye egyetlen folyója, az északi határt jelentő Duna uralja, amely az ország és a Kárpát-térség legmeghatározóbb vízfolyása. A megye túlnyomó része a Duna vízgyűjtőterületéhez tartozik, jellemzőek a hegy- és dombvidéki források vizét levezető, északi irányba tartó vízfolyások. Ezek közül megemlítendő az Északi-Bakonyból érkező Cuhai-Bakony-ér, az Északi-Bakonyalján eredő Concó, az Által-ér, melyet a Bársonyosból és a Vértesaljáról érkező erek, patakok táplálnak, valamint a Gerecsében fakadó rövidebb vízfolyások, mint a Bikol-patak, a Bajóti-patak, illetve az Únyi-patak. Csupán néhány vízfolyás hagyja el a megyét déli, illetve délkeleti irányban, melyek közül megemlítendő a Gerecsében eredő Szent László-patak, illetve a Móri-árokban haladó Mór–Bodajki-vízfolyás. Állóvizek tekintetében a megyét a kisebb mesterséges tavak jellemzik, több vízfolyás mentén találhatóak változatos méretű víztározók, halastavak. Ezek közül

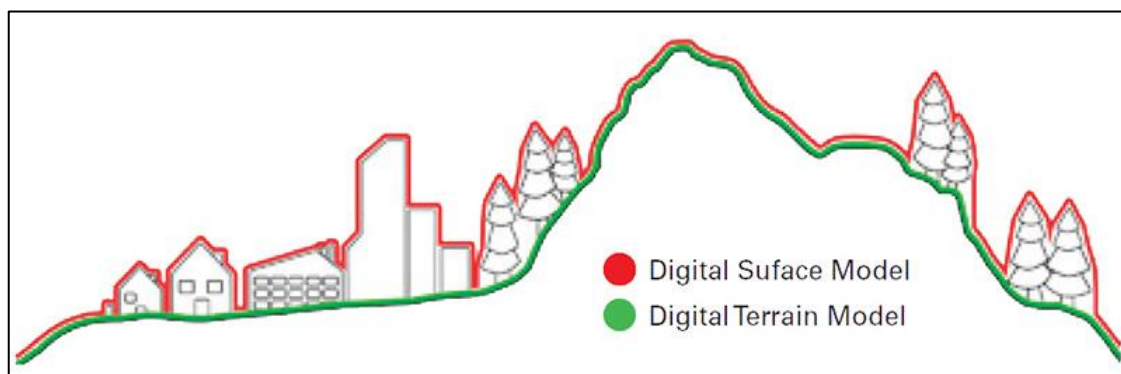
említésre méltó a Bokodi-tó, amely a jelenleg nem üzemelő Vértesi Erőmű hűtőtavaként funkcionált, valamint a népszerű turisztikai célpontként is számon tartott tatai Öreg-tó.

Felhasznált adatok és technológiák

Ebben a fejezetben bemutatásra kerülnek a dolgozatban felhasznált adatok, illetve azok előállítási módszerei és paraméterei. Mindezek előtt azonban szót ejtek a készen kapott modellek kapcsán a domborzatmodellek típusairól és sajátosságairól, valamint a LiDAR adatokhoz kapcsolódóan a lézerszkennelésről.

A digitális domborzatmodellekről

A digitális domborzatmodell a folytonos földfelszín egyszerű statisztikai reprezentációja, amelyben a felszín pontjainak X, Y és Z koordinátáit tároljuk tetszőleges koordinátarendszerben (Miller & Laflamme, 1958). Az elnevezés használata azonban korántsem ilyen egyértelmű, ugyanis felmerülhet a kérdés, hogy mit értünk földfelszín fogalma alatt. A digitális domborzatmodelleket a felszín definíciói alapján két kategóriába soroljuk. Az egyik értelmezés szerint a Föld szilárd közetburka alkotja a földfelszínt. Ez alól kivételnek számítanak a vízfelületek (folyók, tavak, tengerek), ilyen esetekben ugyanis a vízfelszín átlagos magasságával helyettesítjük a domborzatot. Ezt a fajta modellt digitális terepmodellnek vagy digitális domborzatmodellnek nevezzük (angolul Digital Terrain Model – melynek szakirodalomban használt rövidítése a DTM). A másik értelmezés szerint a földfelszín fogalma tartalmazza a felszínt borító különféle természetes és mesterséges tereptárgyakat is, mint például a fák, az épületek és az utak. Ez utóbbit digitális felszínmodellnek hívjuk (Digital Surface Model – DSM). A mindkét értelmezésre közösen használható legalkalmasabb kifejezés pedig a digitális magasságmodell (Digital Elevation Model – DEM). A dolgozatban felhasznált modellek a digitális felszínmodellek közé sorolhatók, ugyanis hidrográfiai elemzésekhez csak ezeket célszerű felhasználni.



2. ábra: A DTM és a DSM különbségei (Forrás: www.geoimage.com.au)

Adattárolási és -kezelési szempontból két csoportba sorolhatók a domborzatmodellek. A raszteres (GRID) modellek lényege, hogy a Z magasságértékeket egy adott ráctávolságú szabályos rácshálóban tároljuk cellánként. Az értékek vonatkozhatnak a cella középpontjára (cell-centered) vagy a rácspontokra (node-centered). A rácsháló elemi celláit pixelnek (az angol „picture element” kifejezésből származtatva, mely magyarul képpontot jelent) nevezzük. A modell előnye, hogy a rácshálónak köszönhetően nem kell cellánként eltárolnunk az X, Y koordinátákat. Hátránya viszont, hogy sík térszíneknél úgymond feleslegesen tároljuk el az egymás szomszédságában található hasonló vagy megegyező magasságértékeket, míg tagolt, például dombvidéki domborzat esetében a rácsháló szabályossága miatt néhol kimaradhatnak a legmagasabb, illetve a legmélyebb pontok.

A másik csoportba a vektoros modellek tartoznak, melyek legáltalánosabb változata a TIN (Triangulated Irregular Network) modell. Ezek alapja egy szabálytalan elrendezésű háromszögháló, melynek eltárolt adatpontjai a háromszögek csúcsai, a felszínt pedig az egymáshoz kapcsolódó háromszögek lapjai határozzák meg. A TIN modellek előnye, hogy a felszín tagoltságának függvényében tetszőleges számú mért adatponttal dolgozhatunk az egyes területeken, tehát lehetőség adódik a jellegzetes domborzati formák pontosabb megőrzéséhez, hátránya viszont, hogy az adattárolása bonyolultabb.

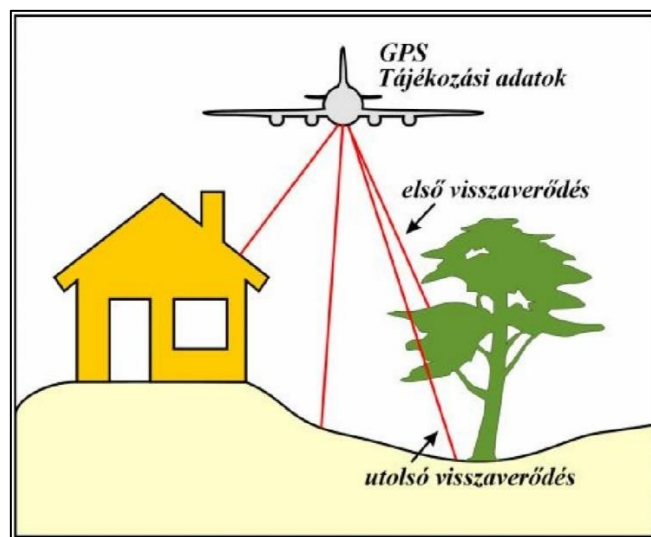
A lézerszkennelésről

Az egyik legpontosabb aktív (azaz saját jelkibocsátással működő) távérzékelési technológia a LiDAR-módszeren (Ligth Detection And Ranging) alapuló lézerszkennelés. Ezen eljárás során lézerfény kibocsátásáról (ultraibolya, látható vagy infravörös hullámhossztartományban) és a különféle objektumokról való visszaverődés detektálásáról beszélünk. A tárgyak műszertől való távolságát a fény terjedési sebességének ismeretében az adott objektumról visszaverődött jel (echo) beérkezésének ideje határozza meg. A lézerszkennelés történhet földi (Terrestrial Laser Scanning – TLS), illetve légi (Airborne Laser Scanning – ALS) módszerrel (Barsi, Detrekői, Lovas, & Tóvári, 2003).

Magassági adatok gyűjtéséhez az utóbbi használatos, mely során az apparátust repülőgépre (olykor helikopterre) vagy drónra – személyzet nélküli légi járműre (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) – helyezik. A berendezéshez a földrajzi hely műholdas meghatározása céljából tartozik egy GNSS vevő (Global Navigation Satellite Systems) illetve egy gyorsulásmérővel és elfordulásmérővel ellátott inerciális mérőegység (Inertial Measurement Unit – IMU), mely a jármű helyzetét hivatott meghatározni. Ezen műszerek

segítségével a visszaverődési pontok tetszőleges valós koordináta-rendszerbe helyezhetők, így eredményül egy háromdimenziós pontfelhőt kapunk. A módszer egyik előnye, hogy a lézerfény rövid hullámhosszának köszönhetően igen nagy felbontásra képes, így akár centiméteres abszolút pontosság is elérhető, míg a relatív (adatok egymáshoz viszonyított) pontosság még ennél is nagyobb lehet (akár milliméteres). Légi lézerszkennelés esetében a pontfelhő sűrűsége az eszköz repülési magasságától is függ.

A lézersugarak a sűrű leképezésnek köszönhetően több szintről is visszaverődhetnek. Erre leginkább erdős, illetve egyéb, növényzettel borított területeken van példa, ahol az első visszaverődés a felső lombkoronaszintről érkezik, míg az utolsó a legtöbb esetben a talajról. A visszaverő objektum típusa szerint osztályozott pontfelhő esetében leválogathatjuk a különböző osztályok adatpontjait egyes térinformatikai szoftverek segítségével. Mindezek ismeretében létrehozható terepmodell (DTM), illetve felszínmodell (DSM) is. Terepmodell létrehozásához nincs szükség a növényzetről, valamint a mesterséges objektumokról (pl. épületek) érkező visszaverődésekre. Előbbiek egyszerűen leválogathatóak, míg az utóbbiak eltávolításához már különböző interpolációs eljárások szükségesek a „hiányzó” felszín számításához. Felszínmodell létrehozásához pedig minden esetben az első visszaverődésekre van szükség.



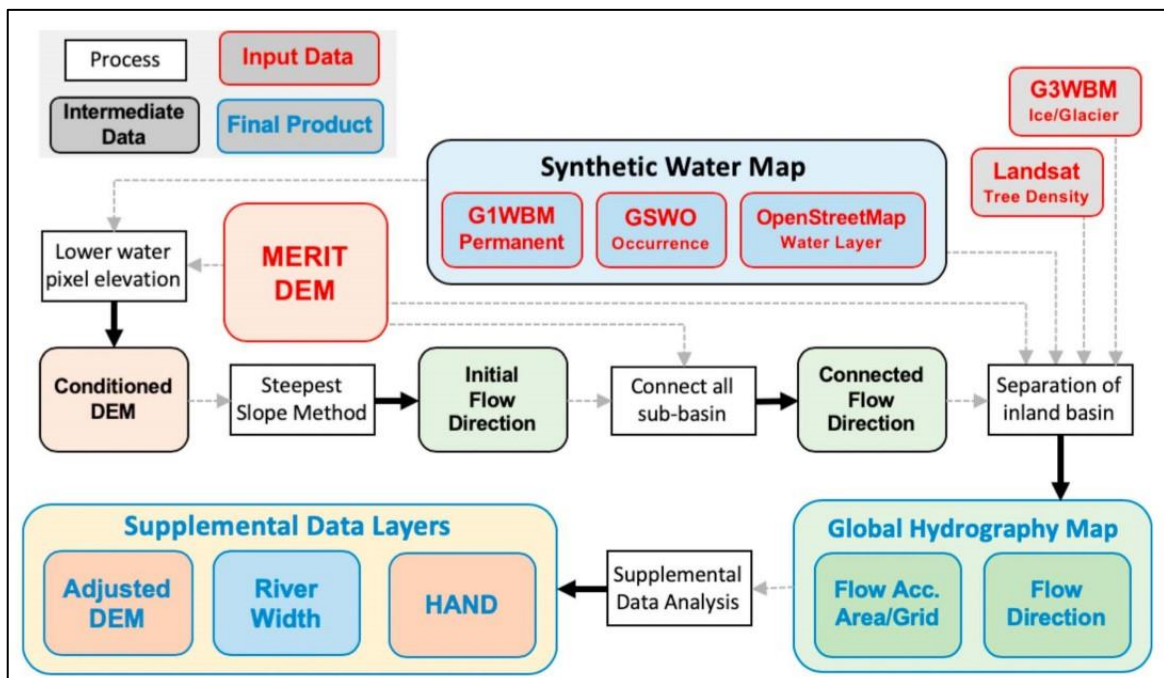
3. ábra: A légi lézerszkennelés működése (Forrás: Digitális Terepmodellek, 2013)

A MERIT Hydro DEM

A nagy felbontású raszteres hidrográfiai térképek a földtudományok több területén is alapvető forrásadatként szolgálnak. Ilyen célból jött létre a MERIT Hydro elnevezésű új globális (é. sz. 90° és d. sz. 60° között) lefedettségű lefolyási irányokhoz igazított térkép 3"-es (szögmásodperc) terepi felbontással (ez az egyenlítőn kb. 90 m-t jelent).

A modell elkészítéséhez felhasznált adatok köre a következő volt:

- a legújabb nagy pontosságú, többszörös hibajavításon átesett globális lefedettségű domborzatmodell, azaz a 3” felbontású MERIT (Multi-Error-Removed Improved-Terrain) DEM (Yamazaki és mtsai., 2017), melynek létrehozásához az alábbiakat használták fel:
 - a NASA (National Aeronautics and Space Administration, azaz az Amerikai Űrügynökség) SRTM DEM 3” felbontású adatbázisa,
 - a JAXA (Japán Űrügynökség) AW3D30 (ALOS World 3D - 30 m) DEM modellje,
 - és a fentiek által nem lefedett, illetve az adathiányos területek kiegészítésére a VFP (Viewfinder Panoramas) DEM, mely az összes szárazföldi területet lefedi, szintén 3”-es felbontásban.
- A felhasznált globális vízrajzi adatbázisok pedig a következők voltak:
 - a Tokiói Egyetem G1WBM, azaz Global 1” Water Body Map adatbázisa,
 - az Európai Bizottság Közös Kutatóközpontjának (European Commission Joint Research Centre) GSWO, azaz Global Surface Water Occurrence elnevezésű vízrajzi modellje,
 - valamint az OpenStreetMap nyilvános webtérkép adatbázisának vizeket tartalmazó rétegei.



4. ábra: A MERIT Hydro előállításához felhasznált alapadatok köre (Forrás: Yamazaki és mtsai., 2019)

A készítőik kifejlesztettek egy új algoritmust a folyóhálózatok közel automatikus kinyerésére, melyben a valódi szárazföldi medencéket elválasztották a hibás beviteli magassági adatokon alapuló hamis mélyedésektől. Minimális kézi szerkesztést követően a létrehozott hidrográfiai térkép jó egyezést mutat a már meglévő, minőségileg ellenőrzött vízfolyáshálózati térképekkel a vízgyűjtő területek és a vízfolyások helyeinek tekintetében. A folyóvonalak elhelyezkedése reálisan igazodott a műholdas alapú globális adatbázisokban látottakhoz. Eltérések leginkább az időszakos vízfolyások száraz medreinek mélyedéseinél fordultak elő, melyek bizonytalan vízgyűjtőhatárokat eredményeztek. Ezeken a helyeken ugyanis tovább tud folyni a víz villámáradás vagy magas vízállás esetében.

A MERIT Hydro a meglévő globális hidrográfiai adatbázisok továbbfejlesztéseként is felfogható a térbeli lefedettség (csak az Antarktika „hiányzik”) és a kisebb vízfolyások ábrázolása szempontjából, melyet leginkább a manapság elérhető jó minőségű téradatoknak köszönhet. Az újonnan megalkotott adatbázisok egyéb, hidrológiailag korrigált kiegészítő rétegek segítségével (mint pl. folyómeder-szélesség) a jövőben elősegíthetik majd a különböző hidrológiai kutatásokat (Yamazaki és mtsai., 2019).

A MERIT Hydro különböző modelljei egy regisztráció után ingyenesen letölthetőek a webről (http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_Hydro/). A linken az alábbi típusú állományok érhetőek el (a nem egységes magyar nyelvű kifejezések miatt elsősorban az eredeti angol kifejezések az irányadók):

- Flow Direction (Local Drainage Direction), azaz lefolyásirány-térképek,
- Hydrologically Adjusted Elevations, azaz hidrológiailag korrigált magasságmodellek,
- Upstream Drainage Area (Flow Accumulation Area), azaz folyásmenti vízgyűjtőterület mérete,
- Upstream Drainage Pixel (Flow Accumulation Grid), azaz folyásmenti vízgyűjtőmodell mérete,
- River Channel Width, azaz folyómeder-szélesség,
- valamint HAND: Height Above Nearest Drainage, azaz a legközelebbi vízfolyástól mért magasság.

A fent felsorolt változatok tömörített TAR formátumú fájlként tölthetőek le, melyek mindegyike 30°*30°-os területet fed le. Ezeken belül 5°*5°-os raszteres GeoTIFF fájlokat találunk (6000*6000 pixel felbontásban). Mindkét típusú állomány neve a bal alsó (délnyugati) pixel középpontjára vonatkozik. Így a dolgozatban felhasznált – Magyarország

területét is lefedő – domborzatmodell az „Adjusted Elevation” típusú modellek elv_n30e000.tar állományán belül az n45e15_elv.tif fájlnevet viselte. A modellben tárolt magasságértékek 1 tizedesjegy (deciméteres) precizitással szerepelnek.

A projekt vetületének egységessége miatt átvetítést végeztem a raszteren (Raster → Projection → Warp (Reproject)), ahol a beállított forrásvetület (Source CRS) a WGS 84, a célvetület (Target CRS) HD72/EOV, míg az újramintavételezési eljárás (Resampling method to use) a bilineáris interpoláció volt. A kimeneti raszter vízszintes felbontása 80 m-es, míg függőleges precizitása az újramintavételezés során alkalmazott interpoláció miatt 1/100 000 méteresre módosult.

Az OVF HydroDEM modellje

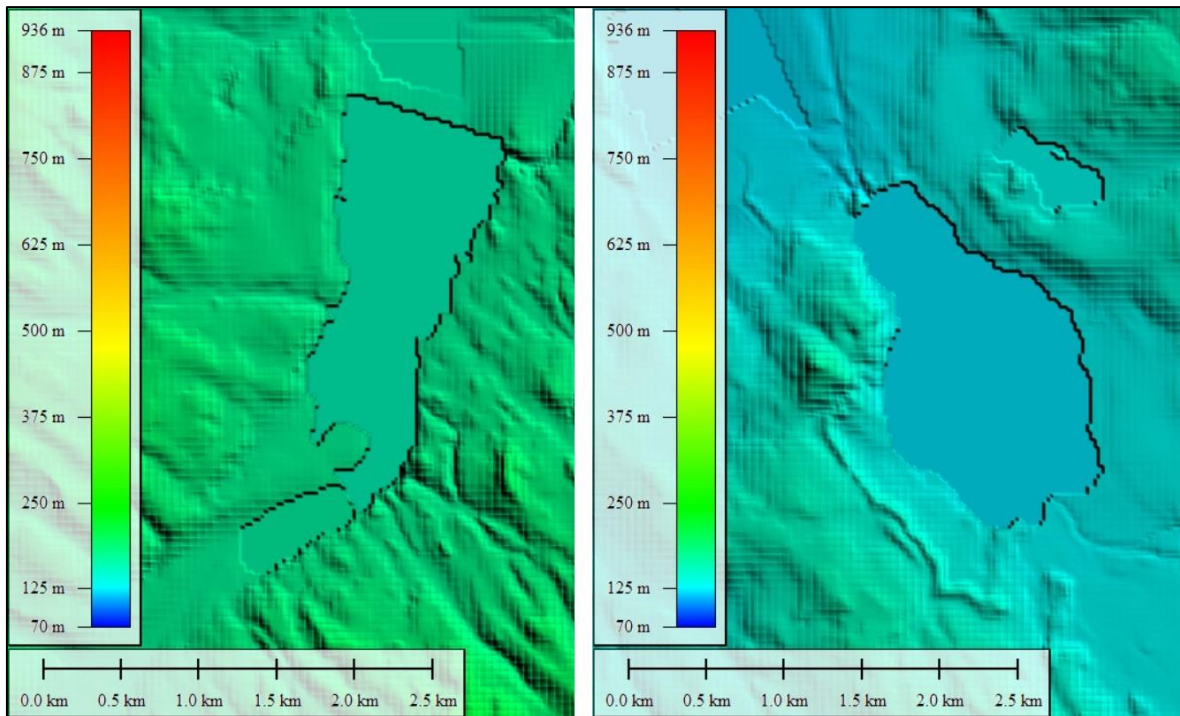
A HydroDEM elnevezésű országos hidrológiai domborzatmodellt az OVF készítette el az úgynevezett Árvízi Kockázatkezelés (a továbbiakban: ÁKK) projekt kapcsán 2013–14-ben. A cél egy nagy felbontású, hidrológiai modellezésekre alkalmas modell létrehozása volt.

A HydroDEM elkészítéséhez felhasznált adatok a következők voltak (az OVF-től kapott dokumentáció alapján):

- 1:10 000 méretarányú állami topográfiai térképek (az EOTR szelvények 5 m-es alapszintközű szintvonalainak digitalizálásával) – beszerzésből (+/- 70 cm-es magassági megbízhatósággal),
- magassági pontok – beszerzésből (+/- 70 cm-es magassági megbízhatósággal),
- folyók és kisvízfolyások középvízi felmérései: keresztshelvények a vízfolyások medermorfológiájáról (100-1000 m szélességben) – ÁKK felmérésből, illetve korábban felmért keresztshelvényekből (+/- 10 cm-es magassági megbízhatósággal),
- folyók és kisvízfolyások nagyvízi felmérései: LiDAR pontfelhőből (átlagosan 4-6 pont/m²-es adatsűrűséggel), illetve sztereofotogrammetriai eljárásból származó magassági adatok – ÁKK felmérésből (+/- 15-20 cm-es magassági megbízhatósággal),
- vízterelő objektumok (lokalizációs vonalak 3D vonalláncai) – ÁKK felmérésből,
- valamint a vízfolyások 2D, illetve 3D nyomvonalai – vízügyi nyilvántartásból, illetve az ÁKK-n belüli felmérésekből pontosítva.

A vízügyi modellezések fő alapadataként a földfelszín topográfiai jellemzői használandók fel, ugyanis alapvetően ezek határozzák meg a felszín vízterelési tulajdonságait, így a HydroDEM előállításának kritériumai az alábbiak voltak:

- a modellt úgy kellett előállítani, hogy a vízvezetés jól modellezhető legyen, tehát a távolabb eső pontokat is figyelembe kellett venni a felületszámításkor,
- a vízterelő és vízvezető objektumok esetében „breakline”-okat (törésvonal) kellett alkalmazni, melyek alapelve a következő:
 - felületszámításkor a „breakline”-oknak köszönhetően az interpolációs algoritmus nem veszi figyelembe a törésvonal túlsó oldalán lévő pontok magasságértékeit, melyek alkalmazásához az alábbi esetekben lehet szükség:
 - domborzati idomvonalaknál (pl. gerincvonalak, völgyvonalak) vagy vízfolyásoknál,
 - illetve két eltérő viselkedésű felület határának esetében (pl. vízfelületek határa),
- a domb-és hegyvidéki területeken a vízfolyások vektoros állományait a DTM-be kellett integrálni,
- illetve a domborzatmodell létrehozásához olyan interpolációs algoritmusra volt szükség, ami:
 - figyelembe veszi a helyi domborzat sajátosságait,
 - hidrológiailag korrekt modellt hoz létre, tehát képes a lefolyási irány hálózatát beépíteni a DTM-be,
 - valamint támogatja a szintvonalak digitalizálásából származó magassági adatokat, mint elsődleges adatforrás.



5. ábra: A Bokodi-tó (balra) és az Öreg-tó (jobbra) simított felszíne a HydroDEM modellben a Global Mapperben megjelenítve

A HydroDEM készítése során mindenképpen kerülendő volt a TIN modell használata, ugyanis így azonos magassági értékű, illetve visszatérő szintvonalak között – hibásan – sík felületek jöttek volna létre. Ügyelni kellett továbbá az interpolációs eljárás megválasztásánál arra is, hogy a szintvonalak digitalizálása miatt ne jöjjenek létre lépcsőzetes domborzati formák.

Mindezek ismeretében a HydroDEM előállításához használt algoritmus az ESRI által fejlesztett ArcMap nevű térinformatikai szoftver „Topo to Raster” nevű eljárása volt, amely a bevitt adatokból egy hidrológiailag korrekt modellt szolgáltat eredményül. Az eszköz a „Spatial Analyst” licenccel következő úton érhető el a szoftverben: ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Interpolation → Topo to Raster.

Az algoritmus használatához 9-féle beviteli kategóriában adhatunk meg adatokat, melyek a következők (zárójelben a réteg geometria-típusa):

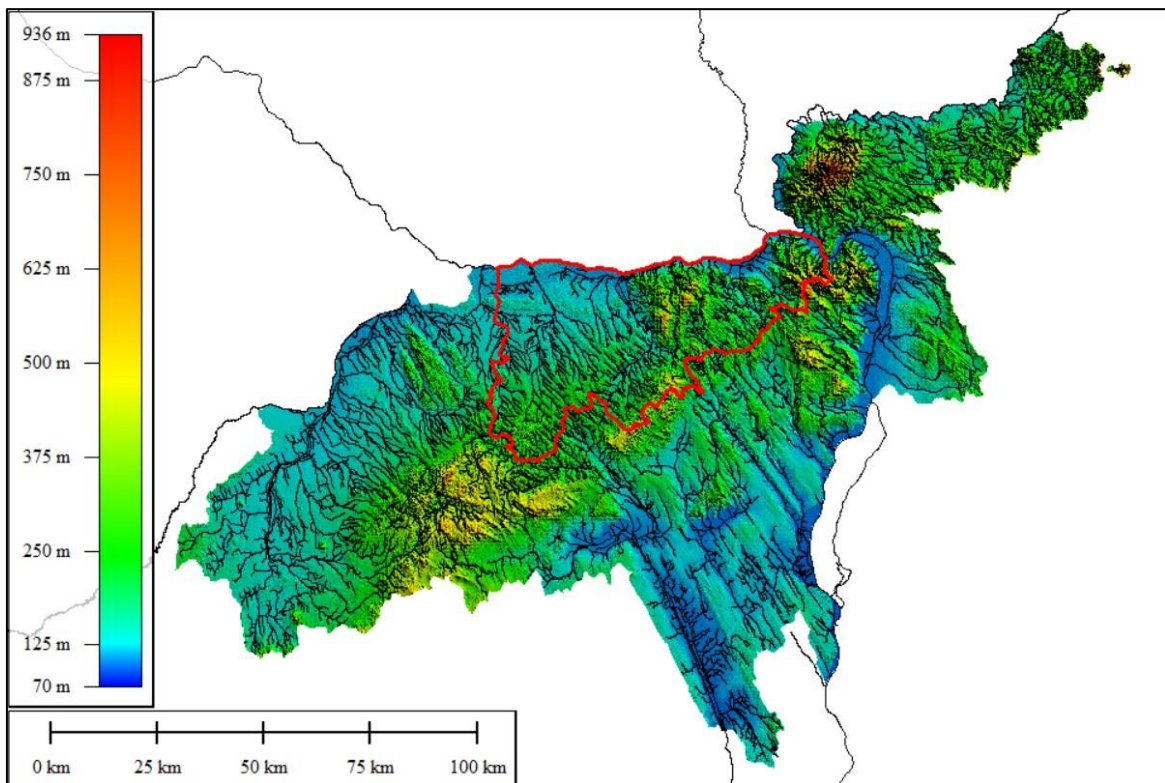
- magassági pont (pont),
- szintvonal (vonal),
- vízfolyás (vonal),
- mélyedés (pont),
- kimeneti raszter terjedeleme (felület),
- tó (felület),

- sziklafal (vonal),
- kivétel – az interpolálás során figyelmen kívül hagyandó terület (felület),
- valamint partvonal (vonal).

Az eljárás kimeneti terméke egy raszter, melynek Z értékei a magassági pontok, szintvonalak és mélyedések magasságértékeiből generálódnak.

A „Topo to Raster” eljárásban alkalmazott interpoláció célja, hogy a bevitt adatokból kiolvasható felszín jellegét a lehető legjobban megőrizze. Az algoritmus által használt módszer az iteratív (ismétlődő) módon végrehajtott véges különbségek módszere. Az eljárás kihasználja a lokális interpolációs módszerek előnyeit, mint például a távolsággal fordítottan arányos súlyozás (IDW), emellett megtartja a felszín folytonosságát, mely a globális interpolációkra jellemző (mint például a krigelés vagy a spline interpoláció). Az algoritmus lényegében egy görbület-minimalizáló, avagy vékonylemez spline (Minimum curvature / Thin plate spline) interpolációt alkalmaz, amely a mért adatpontokat megőrizve (azaz egzakt módon) egy sima futású függvényt illeszt azokra, általában harmadfokú polinomok segítségével.

Az adatokat GeoTIFF (azaz georeferált) raszteres állományban kaptam meg. A kapott modell által lefedett terület a vízfolyás-adatbázist alkotó patakok vízgyűjtő területeivel egyenlő. A kapott terepmodell vízszintes felbontása 10 m-es, míg a függőleges precizitása 1/100 000 m-es (ez 5 tizedesjegyet jelent); ez utóbbi adattárolási szempontból feleslegesen nagy.



6. ábra: Az alapadatként kapott HydroDEM és a vízfolyások a Global Mapperben megjelenítve (saját ábra)

A vízfolyás-adatbázis

Szintén az OVF adatszolgáltatása által jutottam hozzá a vízfolyások vektoros adatbázisához. A már említett HydroDEM-mel összhangban az országos szintű adatbázis egy kivonatát kaptam meg Komárom-Esztergom megyét érintő vízfolyások rendszeréről. A kapott állományok File Geodatabase (GDB) formátumban, illetve ennek kiegészítő fájljaiban voltak. A fájl összesen 2214 objektumot és 2226 objektumrészt tartalmaz, melynek oka, hogy az adatbázisban többrészes vonalak (vízfolyások) is találhatók.

LiDAR pontfelhő az Által-érről

A hazai vízfolyások LiDAR felmérései a HydroDEM-hez hasonlóan szintén az OVF által készültek el az ÁKK (Árvízi Kockázatkezelés) projekt kapcsán 2013–14-ben. A felmérések légi lézerszkennelési (ALS) módszerrel történtek repülőgépre szerelt lézerszkennér rendszer segítségével. A felmért LiDAR adatok végtermékei osztályozott és szűrt pontfelhők, valamint az ezekből generált digitális terepmodellek (DTM-ek) és digitális felszínmodellek (DSM-ek). A dolgozatban vizsgált területen csak az Által-ér került felmérésre, így ennek az adatait igényeltem, illetve kaptam meg az OVF-től.

Az adatokat a lézerszkennelt pontfelhő bináris módon történő eltárolására kifejlesztett formátumban, azaz LAS formátumban kaptam meg, összesen 94 fájlban. A pontfelhő

osztályozott, tehát a visszaverődések típusai ismertek. Minden kapott LAS fájlhoz kapcsolódóan tartozik egy hasonló névvel ellátott LASX fájl is, mely a LAS fájlok egyik kiegészítő formátuma (auxiliary file). A LASX fájlok a LAS állományok statisztikai számításakor jönnek létre automatikusan. Feldolgozásnál fontos, hogy az összetartozó fájlpárok azonos mappában legyenek a számítógépen.

A kapott állományok az 1:2 000 méretarányú EOTR (Egységes Országos Térképrendszer) szelvények által fedett területekkel azonos kiterjedésűek, azaz 1000*1500 (x*y) métert fednek le egyenként, és vetületük is ennek megfelelő. A fájlok elnevezése is ezzel megegyező módon történt, például: 64-122-11.las. A pontfelhő adatsűrűsége átlagosan 6–7 pont/m².

A pontfelhő az Által-ér árterének kb. 40 km hosszú szakaszát fedi le Pusztavám és Dunaalmás között, ahol a vízfolyás beleömlik a Dunába. A kapott pontfelhő összesen kb. 67 km²-t fed le. A pontfelhő szélessége változó, a lefedett sáv 400–3200 m közötti, de átlagosan 1000 m körüli. Az Által-ér forrása és Pusztavám közötti szakasról nem kaptam LiDAR adatokat.

Alkalmazott módszerek

Ebben a fejezetben kerülnek bemutatásra az elemzési módszerek, illetve elsőként az azt előkészítő fontosabb lépések.

DEM létrehozása a LiDAR adatokból

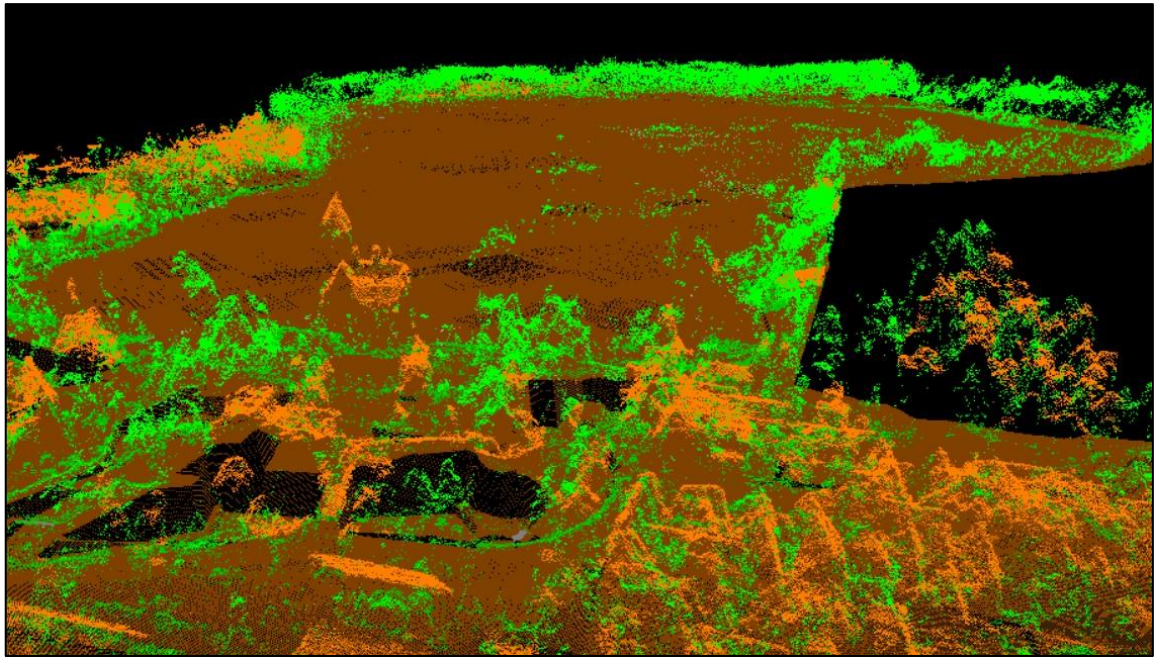
A LiDAR adatok megtekintéséhez a Global Mapper 18 szoftvert használtam. A szoftver jól kezelte az egyébként hatalmas méretű állományokat (összesen közel 470 millió adatpont; itt jegyzendő meg, hogy ekkora adatmennyiség egyidejű megjelenítése lehetőség szerint kerülendő). Elsőként behívásra került a klasszifikált pontfelhőből minden osztály adatpontja, melyhez az osztályok szerinti színezést, azaz a „Color by Classification” jelrendszert választottam a vizuális ellenőrzés céljából. Ezek statisztikai összegzése az összes LAS fájl kijelölése utáni jobb kattintással a „Metadata” lehetőséget választva a „Lidar Dataset Properties” ablakban tekinthető meg. Ezt vizsgálva azonnal szembetűnő volt a „Model Key-point (mass point)”, azaz tömegpont típusú pontok igen nagy aránya (közel 89%). Ez azzal magyarázható, hogy a talajról és a vízfelületekről érkező visszaverődések is – tisztázatlan okokból – ebbe az osztályba kerültek.

Classification Codes							
Classification	Point Count	%	Z Min	Z Max	Min Intensity	Max Intensity	Synt
1 - Unclassified	1,180,528	0.25	98.64	238.12	0	0	
3 - Low Vegetation	1,196,061	0.25	105.79	214.47	0	0	
4 - Medium Vegetation	14,813,920	3.15	99.23	237.27	0	0	
5 - High Vegetation	30,078,575	6.40	107.78	239.05	0	0	
6 - Building	6,350,406	1.35	108.72	223.06	0	0	
8 - Model Key-point (mass point)	416,173,942	88.56	105.48	214.55	0	0	
10 - Railroad	144,691	0.03	108.75	195.75	0	0	

7. ábra: A LiDAR pontfelhő statisztikája a Global Mapper-ben (saját ábra)

A lefolyáselemzések elvégzése előtt szükséges volt egy terepmodell (DTM) létrehozása a LiDAR pontfelhőből. Ennek generálása a következő módon tehető meg: Analysis → Create Elevation Grid from 3D Vector/Lidar Data. Mivel felszínmodellre van szükségem, ezért a pontfelhőből csak a minimum értékek tartandók meg, így a megjelenő párbeszédablakban a „Grid Method” kiválasztásánál a „Binning (Minimum Value - DTM)” opciót választottam. Ezt követően a „Filter Lidar Points...” lehetőségénél a „Classification Filtering” mezőben kiválasztásra került a „Model Key-point (mass point)” osztály, mivel terepmodell létrehozásához csak erre az osztályra van szükség, valamint a felbontás megadásához a „Grid Spacing”-nél a „Manually Specify...” lehetőséget választva az optimális felbontást és a kezelhető fájlméretet figyelembe véve beállítottam 1 m-t. Az algoritmus lefutása után a frissen generált GRID bekerül a térképrétegek közé, mely az alábbi úton exportálható: jobb kattintás a rétegen → layer → export → GeoTIFF.

A kiválasztott „binning” eljárás működése a következő: szabályos rácsháló (jelen esetben 1 m-es ráczállandóval) kerül az adatpontokra, majd a háló minden cellájában kiválasztásra kerül a cellába eső (jelen esetben) minimum magasságérték (felszínmodell, azaz DSM létrehozásához a „Maximum Value” opció választandó). Amennyiben egy adott cellába nem esik mért adatpont, úgy a felszín meghatározásához („to fill in the gaps”) az algoritmus a távolsággal fordítottan arányos súlyozás (Inverse Distance Weighting – IDW) módszerével interpolál. A „binning” eljárás célja tehát az adatpontok ritkítása és rácshálóba rendezése, ezáltal előfordulhat, hogy csökken a kapott modell pontossága, mivel egy adott cella magasságértékét adó legkisebb magasságú pont cellán belüli elhelyezkedése cellánként eltérő.



8. ábra: 8. ábra: A LiDAR pontfelhő hibái Tata környékén a Global Mapper-ben megjelenítve: tömegpontok (barnával) a földfelszín pontjaiként (az előtérben), illetve az Öreg-tó vízfelszínéként (a háttérben); valamint a háztetőnek (narancssárgával) detektált magas növényzet (jobbra). A háromdimenziós megjelenítés miatt adathiányosnak látszó függőleges felszínek (balra lent), illetve a felmért területen kívül eső részek feketével láthatók. A képernyőkép a 64-122-11, -12, -13, -14, valamint a 74-344-33, -34 LAS fájlok megjelenítésével készült. (saját ábra)

Műveletek a vízfolyás-adatbázissal

Az elemzésekhez és a térképek létrehozásához a QGIS 3.10 szoftvert használtam, így kézenfekvő volt a vízfolyásokat tartalmazó GDB (File Geodatabase) fájlt az univerzálisnak mondható shape (SHP) fájlként exportálni. Ezt a Global Mapperben tettem meg a következő módon: jobb kattintás a réteg nevén → layer → export → shapefile.

Az OVF-tól a vektoros vízfolyás-adatbázist Komárom-Esztergom megye tágabb környezetére kaptam meg, ezért a „Select by Location” eszköz segítségével leválogattam azokat a vízfolyásokat, amelyek teljes egészében a megyében vannak, illetve metszik vagy érintik a megyehatárt. A dolgozatban elsősorban az 5 km-nél hosszabb vízfolyások elemzését céloztam meg, ezért a megyére leválogatott vízfolyásokon a „Select by Expression” (kiválasztás kifejezéssel) eszköz segítségével hossz szerinti szűrést is végeztem 5 km-es minimum érték megadásával. Az ennél rövidebb vízfolyások később nem kerültek sem megjelenítésre, sem elemzésre. Ezután ellenőriztem, hogy az eredményül kapott vízfolyások mindegyike akadálytalanul le tud-e folyni, azaz nincs-e olyan eset, ahol egy 5 km-es vagy annál hosszabb vízfolyás egy 5 km-nél rövidebb vízfolyásba folyik bele. Csupán egy ilyen helyzettel találkoztam az Ácsteszeri-árok esetében, ami az 5 km-nél

rövidebb Saliházi-árokba torkollik bele, így ebben az esetben kivételt tettem, tehát megjelenítésre került a Saliházi-árok is.

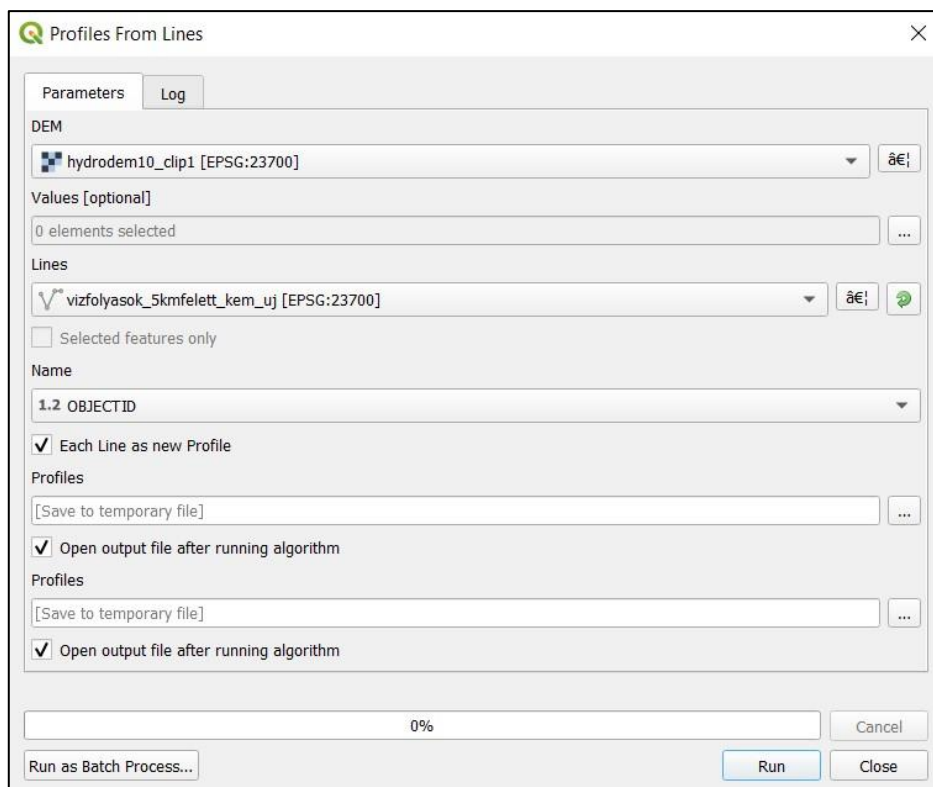
A vízfolyások attribútum táblájában jelentős számú hibát találtam a földrajzi nevek helyesírási szabályait figyelembe véve (A magyar helyesírás szabályai, 12. kiadás, 2020). Ezek a hibák leginkább a „tól-ig” típusú nevek esetében, illetve a földrajzi köznév előtti hiányzó kötőjelek formájában voltak jelen. Ezen hibák javítása a későbbi térképi megjelenítés miatt is elengedhetetlen volt. Alább ezekből néhány példa látható (balra a javítás előtti, jobbra a javítás utáni név).

Bajna-Epöli-vízfolyás	→	Bajna–Epöli-vízfolyás
Cuhai Bakony-ér	→	Cuhai-Bakony-ér
Galla patak	→	Galla-patak
Szőny-Füzitői-csatorna	→	Szőny–Füzitői-csatorna
Szent-László patak	→	Szent László-patak

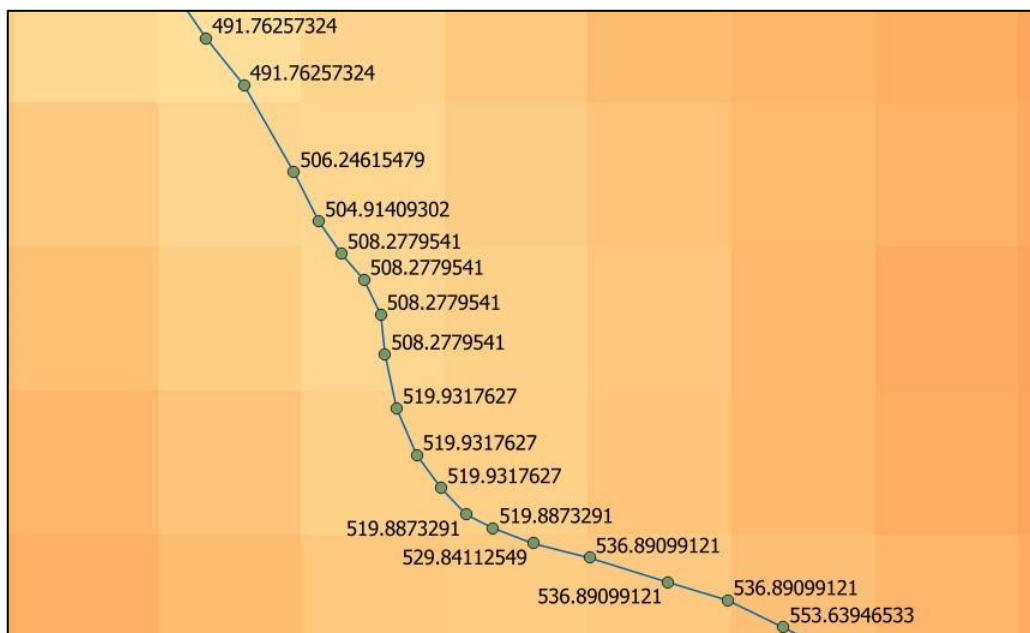
Mederprofilok létrehozása

Az elemzések alapjául szolgáló mederprofilokat minden minimum 5 km hosszúságú vízfolyásnál (összesen 104 db) létrehoztam a HydroDEM, illetve a MERIT Hydro modellen egyaránt. Az Által-ér esetében, a LiDAR adatokból generált terepmodellel kiegészítve pedig 3 modell állt a rendelkezésemre.

A vízfolyások mederprofiljainak létrehozásához a „Profiles from lines” elnevezésű SAGA modult használtam a QGIS 3.10 szoftverben. A modul használatához egy raszteres magasságmodellre (DEM) és egy vonalas típusú vektoros rétegre van szükség. A modul a következő úton érhető el a szoftverben: Processing Toolbox → SAGA → Terrain Analysis – Profiles → Profiles from lines. Az algoritmus működése a következő: a kiválasztott vonalas objektum mentén meghatározott közönként, de minimum töréspontonként hozzárendeli a kiválasztott raszteres DEM réteg adott X, Y pontjaiban lévő Z értékeit a vonalas réteg X, Y koordinátaíhoz. Lehetőség van a vonalas rétegen belül csak a kijelölt elemeken lefuttatni az algoritmust, ehhez kipipálandó a „Selected features only” jelölőnégyzet. Több elemre történő futtatás esetén pedig megadhatjuk, hogy minden elemre külön profilt kapjunk. Eredményül egy pontszerű elemekből álló ideiglenes réteget kapunk.



9. ábra: A „Profiles from lines” modul a QGIS-ben (saját ábra)



10. ábra: A „Profiles from lines” kimeneti eredménye QGIS-ben (saját ábra)

Az Excel-ben végrehajtott elemzések

A hibapontok meghatározásához különböző táblázatkezelő eszközökre és függvényekre volt szükségem, így a Microsoft Excel használata mellett döntöttem.

Elsőként elengedhetetlen volt a létrehozott mederprofilok XLSX formátumban történő exportálása az Excellel való kompatibilitás érdekében, mely a QGIS-ben a következő módon

tehető meg: jobb kattintás a megfelelő rétegen → Export → Save Features As → majd a „Format” legördülő listájából az „MS Office Open XML spreadsheet” (XLSX) kiválasztása.

Az így kapott Excel-tábla örökölte az ideiglenes mederprofil-réteg attribútum tábláját, melyet a következő mezők alkottak:

- **LINE_ID**: amennyiben több vízfolyásra futtattuk le az algoritmust, ebben az oszlopban találjuk annak sorszámát; egy vízfolyás esetében az érték 0,
- **ID**: a mederprofil pontjának sorszáma; a számozás a forrástól indul,
- **DIST**: a mederprofil pontjának a vízfolyás mentén a forrástól mért vetületi távolsága,
- **DIST_SURF**: a mederprofil pontjának a vízfolyás mentén a forrástól mért felszíni (valós) távolsága,
- **X**: a mederprofil pontjának X koordinátája (EOV, méterben, 4 tizedesjegy pontossággal),
- **Y**: a mederprofil pontjának Y koordinátája (EOV, méterben, szintén 4 tizedesjegy pontossággal),
- valamint **Z**: a mederprofil pontjának Z koordinátája (méterben).

Ezeket a már meglévő oszlopokat az alábbiakkal egészítettem ki:

- **Z_kerekített**: a Z koordináta oszlopában lévő számok kerekítése 2 tizedesjegy pontosságra a „kerekítés” függvény segítségével, melynek szintaxisa: KEREKÍTÉS(szám; hány_számjegy). Az alkalmazott függvény tehát a következő volt: =KERÉKÍTÉS(F3;2).
- **visz_elozohoz_kerekítettbol**: ebben az oszlopban történt a hibapontok detektálása az alábbi függvénnyel: =HA(G3>G2;”hiba”;”ok”), azaz amennyiben:
 - teljesül a $G3 > G2$ feltétel, azaz a folyásirányban lentebb található pont kerekített magasságértéke nagyobb, mint a fölötte lévő, akkor hibával állunk szemben, tehát a cella értéke: „hiba”,
 - nem teljesül a $G3 > G2$ feltétel, azaz a lefolyásirányban lentebb lévő pont kerekített magasságértéke nem nagyobb (tehát kisebb vagy egyenlő), mint a fölötte lévő, akkor a víz akadálytalan továbbfolyása biztosított, tehát hidrográfiailag korrekt helyzetről van szó, így a cella értéke: „ok”,
- **kulonbseg**: egy adott pont és a lefolyásirányban fölötte lévő pont kerekített értékének (**Z_kerekített**) különbsége: =G3-G2, amely érték:
 - hibapont esetében pozitív szám, tehát ez lesz a hiba nagysága,

- míg korrekt pont esetében negatív szám,
- valamint **angle**, azaz szög: ez az oszlop csupán a későbbi térképi megjelenítés miatt lett létrehozva, ugyanis ezen értékek segítségével történt a jelek elforgatása. A kapott szögeértékek egyenlőek a mederprofilok szomszédos pontjai által meghatározott egyenesek X tengellyel bezárt szögeivel. Az oszlop értékei a következő függvénnyel kerültek kiszámításra: =FOK(ARCTAN2(E3-E2;D3-D2)), melynek visszatérési értéke az adott két pont egyenesének X tengellyel bezárt szöge fokban, ahol:
 - D2 és E2 „P1” pont X és Y koordinátája, míg
 - D3 és E3 „P2” pont X és Y koordinátája.

D	E	F	G	H	I	J
X	Y	Z	Z_kerekített	visz_elozohoz_kerekítettbol	kulonbseg	angle
571492.5447	231338.7138	265.8855591	265.89			
571498.7888	231341.8359	265.8855591	265.89 ok		0	63.43458178
571506.9909	231345.5401	265.6889648	265.69 ok		-0.2	65.695301
571516.9909	231343.8734	265.6889648	265.69 ok		0	99.46234079
571518.1035	231343.688	265.6889648	265.69 ok		0	99.46215519
571528.1035	231338.5055	265.3909607	265.39 ok		-0.3	117.3953588
571538.1035	231333.323	265.3909607	265.39 ok		0	117.3953588
571548.1035	231328.1406	265.5111084	265.51 hiba		0.12	117.3953588
571554.3514	231324.9026	264.8669739	264.87 ok		-0.64	117.3953466
571564.3514	231317.6558	264.8669739	264.87 ok		0	125.9302049

11. ábra: részlet az egyik Excel-táblából (saját ábra)

A fent említett módszerekkel tehát meghatározásra kerültek a hibapontok. A nagy számú centiméteres, illetve deciméteres nagyságrendű hibák miatt a továbbiakban csak a minimum 1 m-es hibákkal dolgoztam. Ehhez az Excelben a „Nagyobb vagy egyenlő...” számszűrőt alkalmaztam a „kulonbseg” oszlopon, melyhez 1-et adtam meg feltételnek. Az így kapott 1 m-nél nagyobb hibapontok adatsorai a későbbi térképi megjelenítés céljából CSV (Comma Separated Values, azaz vesszővel tagolt értékek) formátumban kerültek exportálásra.

A hibapontok megjelenítése

A következő lépés az elemzések során feltárt domborzatmodell-hibapontok térképi adatbázisba importálása és megjelenítése volt. Ehhez, valamint a projekt egyéb műveleteihez továbbra is a QGIS 3.10 szoftvert használtam. CSV réteg importálásához a Layer menüben kiválasztandó a „Data Source Manager”, a megjelenő párbeszédablak bal oldalán pedig a „Delimited Text” opció. A „File Format” almenüpontban adható meg a fájlban alkalmazott elválasztási típus (mint pl. vessző, pontosvessző vagy kettőspont). A „Geometry Definition” almenüben pedig megadható a létrehozni kívánt pontszerű réteg X és Y koordinátáját tartalmazó mező (melyek jelen esetben az „X” és az „Y” voltak), valamint a koordinátarendszer (pl. jelen esetben EPSG:23700 – HD72 / EOVI). Itt jegyzendő meg, hogy

amennyiben az importálandó fájlban az X és Y koordináták értékei tizedes tört számok, úgy tizedes elválasztóként csak a tizedespont használható, más esetben a CSV fájl nem importálható.

Eredmények

Ebben a fejezetben bemutatásra kerülnek a mederesés-vizsgálat eredményei, azok statisztikai elemzése, valamint a hibák lehetséges típusai. A fejezet végén a hibapontok térképi megjelenítése található.

A fejezetben a „hiba” szó alatt a minimum 1 métert elérő hibapontok értendők, minden statisztikai adat ezek alapján került számításra.

Az OVF HydroDEM és a MERIT Hydro eredményeinek összefoglalása

A felhasznált domborzatmodellek felbontásbeli különbségeiből arra következtethetünk, hogy a nagyobb felbontású modell (a HydroDEM) több, de átlagosan kisebb mértékű hibát tartalmaz. Ezt a feltételezést a statisztika alátámasztja, ugyanis a hibák számát tekintve a HydroDEM több hibás pontot tartalmaz (1032 db), mint a MERIT Hydro (847 db), míg a modellben található legnagyobb hibaérték az előbbi esetében 13,27 m (az Által-érnél), az utóbbinál 16,27 m (a Tarján-pataknál). A hibák átlagát nézve a HydroDEM (1,97 m) jobb eredményeket adott, mint a MERIT Hydro (2,47 m). A tíz legnagyobb hiba átlaga a HydroDEM modellen 9,58 m, a MERIT Hydro esetében pedig 12,51 m. Szórás (az átlagtól való átlagos eltérés) tekintetében az előbbi modell átlagértéke 1,34, míg az utóbbié 1,94 m. A hibák számából következően a hibasűrűség értéke a HydroDEM-nél 1,20, a MERIT Hydro-nál pedig 0,98 hiba/km. Ez utóbbi három adatpár (tehát az átlag, a szórás és a hibasűrűség) nem a vízfolyásonként számított értékekből, hanem az összes hibaértékből közvetlenül került számításra.

A legtöbb hibával rendelkező vízfolyás a HydroDEM-nél a Bajóti-patak (69 hiba), a Bikol-patak (56), illetve a Pilismaróti-patak (51), míg a MERIT Hydro esetében a három legtöbb hiba-előfordulást mutató vízfolyás sorrendje a következő: Bikol-patak (54), Bajóti-patak (44), Bajna–Epöli-vízfolyás (43). A Pilismaróti-patak a Visegrádi hegységben, míg a többi vízfolyás a Gerecsében található. A megye átlagos tengerszint feletti magasságához viszonyítva (200 m) a hibák eloszlása mindkét modellen átlagosnak mondható (az átlagérték a HydroDEM-nél 192,17 m, a MERIT Hydro-nál 193,43 m). A 10 legnagyobb hibapont átlagos tengerszint feletti magassága az előbbinél 199,04 m, míg az utóbbinál 216,48 m.

Ezek az átlagok a mederprofilok pontjainak átlagmagasságához képest (168,07 m) már jelentős különbséget mutatnak, és a magasabb fekvésre utalnak.

A megyében több hiba nélküli vízfolyás található mindkét modellen, ezek legtöbbje azonban nem teljes egészében a megyében halad, tehát 5 km-nél rövidebb Komárom-Esztergom megyei szakasszal rendelkezik. A leghosszabb hibátlan lefolyású vízfolyások az Ürgemajori-árok (8,806 km), a Kocsi-főárok (8,647) és a Nyéki-ér (7,637) a HydroDEM-en, illetve az Ürgemajori-árok (8,806), a Nagytarcsi-árok (7,634), valamint a Szend-Dadi-ér (6,7) a MERIT Hydro-n. Az említett vízfolyások a megye laposabb, alacsonyabb nyugati területein futnak.

Mindezek áttekintésével kijelenthető, hogy a hibák térbeli eloszlása a hibasűrűség és a hibaértékek tekintetében egyaránt a domborzati viszonyokhoz köthető, ugyanis markánsabb domborzatú területeken a nagyobb relief (azaz magasságkülönbség) miatt több és nagyobb értékű hiba található.

A hibasűrűség értékeinek összehasonlíthatósága érdekében az összesítő táblázatban található „Hossz (km)” oszlop értékei a nem teljes egészében a megyében futó vízfolyások esetében csak a megyén belüli hosszt jelentik.

A három modell összehasonlítása az Által-ér példáján

Az Által-ér esetében három modellen történt az elemzés, amelyek közül egyértelműen a LiDAR DEM adta a legpontosabb eredményeket, melyet a hibák kis száma is mutat.

A **LiDAR DEM** 6 hibája közül 5 a vízfolyás mesterségesen felduzzasztott víztározóinak gátjainál vagy zsilipeinél található, ahol a víz a felszín alatti átereszekon keresztül hagyja el a tavat, míg egy esetben a 10-es főút és a mellette haladó vasút alatti átereszen történő átvezetés a hiba oka. Ezeken a helyeken a domborzatmodell a valós felszíni magasságot veszi fel, tehát nem a modell hibájáról van szó. Ezen hibák megoldása lehet a gátakat érintő pixelek értékeinek csökkentése, vagy egy – a kivételként kezelendő pontokat tartalmazó – vektoros réteg létrehozása. Ettől a néhány esettől eltekintve elmondható, hogy a LiDAR adatokból generált domborzatmodell hibátlan eredményekkel szolgált. A modell hibáinak átlaga 2,56 m, a legnagyobb hiba pedig 5,11 m-es (ez utóbbi Dunaalmás mellett a 10-es főút alatti áteresznél található). A hibasűrűség értéke a LiDAR DEM modellen 0,12 hiba/km.

A **HydroDEM**-nél egy – a modell elavultságára utaló – számottevő modellhiba található a Bokodi-tó szomszédságában, ahol a vízfolyás medrét elterelték. A Vértesi Erőmű egykori hűtőtava melletti kb. 25 m-es kiemelkedésű meddőhányó megléte nem észlelhető a

modellben, a mellette kialakított mesterséges medret érintő pixelek pedig rendre magasabb értékeket vesznek fel, mint a tó simított vízfelszínének képpontjai, ezáltal fizikailag nem valós helyzeteket előidézve a vízfolyás mentén. A HydroDEM modellen 29 hiba található, melyek átlaga 1,80 m, míg a legnagyobb érték 13,27 m (ahol a Bokodi-tó az elterelt mederben folytatódik). A hibasűrűség értéke ezen a modellen 0,57 hiba/km.

A **MERIT Hydro** említésre méltó hibája figyelhető meg a Tatabánya délnyugati részén fekvő bányai Erőmű-tó esetében. Ennek vízfelszíne nem került simításra, mely betudható a modell globális méretéhez és kis felbontásához viszonyítva a tó csekély kiterjedésének (a tó felszíne kb. 0,36 km²), de ezektől függetlenül is hibának tekintendő. Az előbb említett eset azt okozta, hogy a hibapontok a tó felületén jelentkeztek. A LiDAR modellnél említett gátak okozta hibák a MERIT Hydro-n is jelen vannak. A modellen 42 hiba jelentkezik az Által-ér mentén, melyek átlaga 1,49 m, a legnagyobb hiba pedig 3,33 méteres (a bányai Erőmű-tó zsilipjénél). A modell hibasűrűsége az Által-éren 0,83 hiba/km.

Az alábbi táblázatban az Által-ér teljes hosszán végzett elemzések összegzése látható. A későbbi összefoglaló táblázatban pedig a vízfolyás Komárom-Esztergom megyén belüli statisztikái olvashatók.

1. táblázat: Az Által-ér hibáinak statisztikái három modell alapján

	Vízfolyás hossza (km)	Hibák száma (db)	Legnagyobb hiba (m)	Hibák átlaga (m)	Hibák szórása (m)	Hibasűrűség (db/km)
Által-ér (HydroDEM)	50,906	29	13,27	1,80	2,26	0,57
Által-ér (MERIT Hydro)		42	3,33	1,49	0,58	0,83
Által-ér (LiDAR DEM)		6	5,11	2,56	1,70	0,12



12. ábra: A LiDAR DEM hibái (sárgával) Környe, Tatabánya, Tata, illetve Dunaalmás közelében. A nyilak a folyásirányt mutatják, a háttérben a Google Maps műholdfelvételei láthatók.



13. ábra: A HydroDEM hibái Bokod mellett (balra), illetve a MERIT Hydro hibái Tatabányánál (jobbra)

2. táblázat: Statisztikai táblázat a hibákról vízfolyásonként

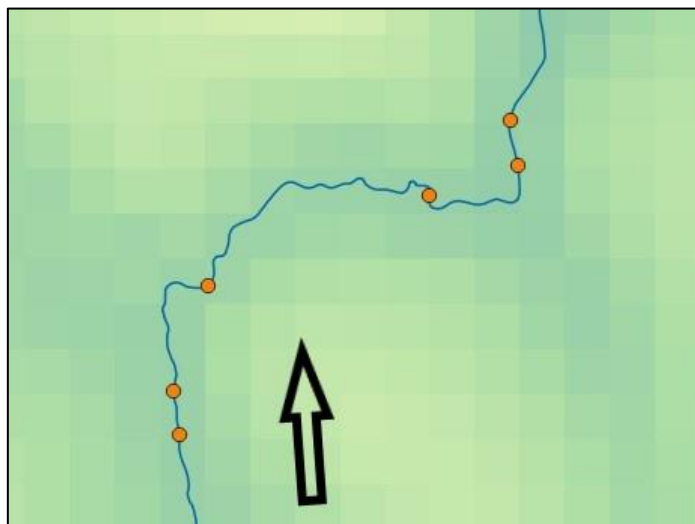
Vízfolyás neve	Hossz (km)	Hibák száma (db)		Legnagyobb hiba (m)		Hibák átlaga (m)		Hibák szórása (m)		Hibasűrűség (db/km)	
H: OVF HydroDEM; M: MERIT Hydro		H	M	H	M	H	M	H	M	H	M
Ácsteszeri-árok	5,680	7	3	2,21	5,05	1,52	2,94	0,44	1,85	1,23	0,53
Aka–Nagyvelegi-vízfolyás	5,485	5	2	2,11	2,64	1,64	2,08	0,35	0,79	0,91	0,36
Alsóhidegkúti-árok	5,576	2	-	1,39	-	1,23	-	0,23	-	0,36	-
Által-ér	41,283	26	32	13,27	3,33	1,86	1,51	2,39	0,59	0,63	0,78
Által-ér (Nánai-ág)	3,808	6	6	1,94	3,15	1,44	2,19	0,38	0,86	1,58	1,58
Árendás-patak	11,671	27	15	4,23	8,19	1,85	3,16	0,76	1,73	2,31	1,29
Bajna–Epöli vízfolyás	20,706	29	43	3,72	5,55	1,57	2,01	0,62	1,07	1,40	2,08
Bajna–Epöli vízfolyás (Gyermelyi-ág)	6,501	4	11	3,14	2,98	1,92	1,50	0,93	0,61	0,62	1,69
Bajóti-patak	16,753	69	44	8,72	8,62	2,61	3,01	1,62	1,96	4,12	2,63
Bana–Bábolnai-csatorna	6,117	1	3	1,03	1,37	1,03	1,15	-	0,19	0,16	0,49
Battyányi-ér	12,655	14	14	2,95	3,27	1,48	1,86	0,51	0,67	1,11	1,11
Bikol-patak	19,107	56	54	8,23	9,16	2,13	2,61	1,48	1,61	2,93	2,83
Concó	36,421	12	33	2,39	5,28	1,52	1,70	0,45	0,89	0,33	0,91
Cöndő-ér	5,482	12	1	1,68	1,11	1,28	1,11	0,20	-	2,19	0,18
Cuhai-Bakony-ér	19,909	7	8	1,56	2,04	1,34	1,41	0,19	0,34	0,35	0,40
Csákány-patak	10,701	34	24	8,10	6,32	2,59	2,33	1,69	1,19	3,18	2,24
Császári-ér	15,066	8	16	2,12	4,19	1,57	1,88	0,44	0,94	0,53	1,06
Csenke-patak	5,900	2	10	3,33	5,06	2,51	2,79	1,16	1,59	0,34	1,69
Csépi-ér	10,863	1	6	1,10	2,13	1,10	1,39	-	0,44	0,09	0,55
Dadi-vízfolyás	6,112	2	5	1,12	2,98	1,06	1,94	0,08	0,76	0,33	0,82
Darányi-árok	5,031	1	4	1,58	1,54	1,58	1,22	-	0,25	0,20	0,80
Dolosdi-ér	4,324	3	5	1,66	2,61	1,36	1,37	0,26	0,69	0,69	1,16
Döbönkúti-ér	5,100	6	-	10,48	-	4,28	-	3,40	-	1,18	-
Dömösi-malompatak	6,376	19	15	7,13	13,92	2,77	5,00	2,02	4,35	2,98	2,35
Dunaszentmiklósi-vízmosás	5,083	17	9	3,02	8,21	1,96	3,34	0,55	2,28	3,34	1,77
Erzsébet-ér	5,028	4	6	2,72	6,12	1,82	2,87	0,61	1,82	0,80	1,19
Farkastorki-árok	4,803	4	4	2,43	3,62	1,54	2,80	0,60	0,81	0,83	0,83
Feketeberki-vízfolyás	6,361	7	4	1,78	3,82	1,30	2,27	0,30	1,09	1,10	0,63
Feketevíz-ér	9,570	19	18	11,27	5,83	2,65	2,22	2,63	1,22	1,99	1,88
Fényes-patak	10,983	26	20	3,11	8,55	1,56	3,34	0,51	1,89	2,37	1,82
Főárok	5,089	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fuchs-patak	5,629	10	6	7,23	6,59	3,12	3,03	1,87	2,32	1,78	1,07
Galla-patak	10,165	14	4	7,33	2,59	2,56	1,80	2,11	0,75	1,38	0,39
Gerencsér-ér	6,014	6	20	1,65	2,84	1,31	1,82	0,27	0,53	1,00	3,33
Gesztesi-patak	5,289	23	2	3,75	2,19	1,83	1,85	0,71	0,48	4,35	0,38
Hajmás-patak	8,499	5	13	3,43	7,93	2,00	2,50	0,82	1,79	0,59	1,53
Halomsori-árok	5,147	1	-	1,10	-	1,10	-	-	-	0,19	-
Hancsákosi-vízfolyás	2,137	2	2	1,11	2,93	1,09	2,22	0,03	1,00	0,94	0,94
Hidegkúti-árok	6,530	1	-	1,08	-	1,08	-	-	-	0,15	-
Hidegkúti-ér	0,545	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Janza-patak	7,712	14	11	8,23	4,66	2,40	2,88	1,95	1,36	1,82	1,43
Jeges-árok	5,657	6	-	1,19	-	1,09	-	0,08	-	1,06	-
Kenyérmezei-patak	13,263	5	5	3,68	2,74	1,69	1,86	1,13	0,62	0,38	0,38
Kérékteleki-árok	3,426	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kettőskúti-árok	3,798	5	4	2,19	3,32	1,58	2,12	0,40	0,93	1,32	1,05
Kisbéri-árok	11,696	3	8	1,43	1,83	1,19	1,34	0,22	0,29	0,26	0,68
Kisnémetegyházi-patak	0,851	4	2	1,97	3,56	1,66	3,29	0,35	0,39	4,70	2,35
Kocsi-főárok	8,647	-	4	-	1,69	-	1,36	-	0,24	-	0,46
Kocs–Kisigmándi-ér	16,544	29	1	2,86	1,03	1,55	1,03	0,50	-	1,75	0,06
Kocs–Mocsai-vízfolyás	17,993	6	7	2,88	2,04	1,80	1,55	0,67	0,30	0,33	0,39
Komáromi-ér	6,491	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kömlődi-vízfolyás	5,965	1	4	1,24	2,24	1,24	1,52	-	0,51	0,17	0,67
Középcsiri-árok	2,137	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Magyarkúti-árok	0,779	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Majki-patak	6,302	10	9	2,87	4,43	1,78	2,10	0,57	0,99	1,59	1,43
Miklós-patak	5,678	34	19	8,68	14,16	2,86	4,55	1,58	3,75	5,99	3,35
Mikovinyi-árok	6,171	2	4	4,96	1,69	2,98	1,32	2,80	0,30	0,32	0,65
Mór–Bodajki-vízfolyás	1,574	1	-	1,13	-	1,13	-	-	-	0,64	-
Nagybéri-árok	6,826	21	9	4,54	3,20	1,59	2,40	0,78	0,66	3,08	1,32
Nagyherkályi-csatorna	6,263	5	-	1,57	-	1,47	-	0,08	-	0,80	-
Nagytarcsi-árok	7,634	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Naszály–Grébicsi-vízfolyás	18,750	2	7	1,74	2,01	1,63	1,64	0,16	0,33	0,11	0,37
Naszály–Grébicsi-vízfolyás (mellékág)	6,392	-	1	-	1,06	-	1,06	-	-	-	0,16
Névtelen-1763	0,009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nyéki-ér	7,637	-	1	-	1,06	-	1,06	-	-	-	0,13
Ölbő–Bársonyos-vízfolyás	4,232	-	1	-	1,00	-	1,00	-	-	-	0,24
Pénzes-patak	14,976	12	13	2,75	6,51	1,50	2,48	0,49	1,77	0,80	0,87
Pilismaróti-patak	11,726	51	22	6,55	14,43	2,23	4,80	1,16	3,41	4,35	1,88
Pulai-árok	9,417	4	4	1,77	1,74	1,33	1,55	0,31	0,15	0,42	0,42
Saliházi-árok	4,049	5	6	1,86	1,82	1,35	1,39	0,31	0,32	1,23	1,48
Sósi-ér	1,553	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sóstói-árok	5,431	-	1	-	1,33	-	1,33	-	-	-	0,18
Sövénykerti-árok	5,193	9	6	2,54	2,54	1,64	1,80	0,51	0,71	1,73	1,16
Sövénykúti-vízfolyás	0,985	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Súri-víz	6,852	16	11	3,02	2,66	1,85	1,89	0,67	0,46	2,34	1,61
Szápári-ér	0,085	1	-	1,12	-	1,12	-	-	-	11,76	-
Szárazhegyi-vízfolyás	3,258	4	5	1,91	2,40	1,38	1,54	0,40	0,54	1,23	1,53
Szárazréti-árok	2,549	2	-	1,05	-	1,04	-	0,01	-	0,78	-
Székes-patak	9,382	2	2	1,65	1,04	1,62	1,04	0,05	0,01	0,21	0,21
Szend–Dadi-ér	6,700	3	-	1,47	-	1,29	-	0,25	-	0,45	-
Szendi-ér	22,553	18	15	2,42	3,10	1,44	1,71	0,38	0,72	0,80	0,67
Szent László-patak	17,442	39	30	2,87	4,92	1,53	2,32	0,51	0,86	2,24	1,72
Szent László-patak (mellékág)	8,153	5	20	1,48	4,39	1,21	2,02	0,17	0,80	0,61	2,45
Szentlélek-patak	14,869	26	22	7,64	10,92	2,57	4,52	1,68	3,28	1,75	1,48
Szilas-patak	5,168	5	11	1,64	3,53	1,29	1,93	0,25	0,85	0,97	2,13
Szilavölgyi-vízfolyás	6,503	1	-	1,01	-	1,01	-	-	-	0,15	-
Szolgagyőri-vízfolyás	7,297	1	1	1,30	1,00	1,30	1,00	-	-	0,14	0,14
Szomódi-vízfolyás	6,339	4	6	3,14	2,71	2,21	1,53	0,71	0,59	0,63	0,95
Szőny–Füzitői-csatorna	12,969	11	5	6,53	2,21	1,88	1,49	1,66	0,54	0,85	0,39
Szőny–Mocsai-vízfolyás	5,775	2	1	1,47	1,13	1,31	1,13	0,23	-	0,35	0,17
Tarcsi-ér	10,706	10	6	2,18	1,58	1,51	1,29	0,38	0,24	0,93	0,56
Tarján-patak	5,988	27	22	9,42	16,27	2,50	4,90	2,41	4,01	4,51	3,67
Tárkányi-árok	4,847	-	4	-	2,07	-	1,62	-	0,42	-	0,83
Tárkányi-határárok	5,621	14	-	2,21	-	1,49	-	0,32	-	2,49	-
Tatárúti-árok	5,268	2	-	1,46	-	1,44	-	0,04	-	0,38	-
Török Bálint-ér	5,920	5	3	1,49	1,61	1,30	1,37	0,17	0,21	0,84	0,51
Únyi-patak	21,188	31	22	5,89	9,90	1,93	2,50	1,02	1,82	1,46	1,04
Ürgemajori-árok	8,806	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vasztélypusztai-árok	3,936	8	5	2,55	4,90	1,50	2,84	0,62	1,43	2,03	1,27
Vékony-ér	9,485	5	4	1,41	1,32	1,29	1,27	0,10	0,05	0,53	0,42
Vértestolnai-vízfolyás	9,922	41	20	5,35	6,31	1,84	2,52	0,95	1,33	4,13	2,02
Vezseny-ér	3,404	-	1	-	1,12	-	1,12	-	-	-	0,29
Vöröshegyi-patak	7,727	8	11	4,08	4,76	1,82	2,65	1,11	1,17	1,04	1,42
Vöröshegyi-patak (mellékág)	5,418	20	9	4,83	3,15	1,96	1,77	1,06	0,73	3,69	1,66
ÖSSZESEN	863,386	1032	847	13,27	16,27	1,97*	2,47*	1,34*	1,94*	1,20*	0,98*

*az összes hibapontból számított átlag, szórás, illetve hibasűrűség

A hibák lehetséges típusai

Felbontásból adódó hiba: ez a hibatípus mondható a leggyakoribbnak. Leginkább a meredek falú völgyekben tapasztalható a jelenség, ahol a szűk átjárók sokszor „nem engedik át” a vizet. Gyakori eset továbbá, amikor a vízfolyás „felfut” a hegyoldalra, illetve nagyobb magasságértékű pixel oldalán vagy sarkán megy keresztül. Ez azzal magyarázható, hogy a hibát okozó pixelérték az adott pixel középpontjára vonatkozik, nem pedig a sarkára vagy a szélső részeire.



14. ábra: Felbontásból adódó hibák a MERIT Hydro modellen a Bikol-patakon. A nyíl a folyásirányt mutatja.

Adathiba: méréseink minden esetben hibával terheltek, így nincs ez másképp a távérzékelte adatoknál sem. Statisztikus hibák a fejlett zaj-kiküszöbölési módszerek ellenére is maradhatnak az előállított domborzatmodellekben.

Interpoláció okozta hiba: a modelleknél alkalmazott legoptimálisabb interpolációs eljárások alkalmazása ellenére is a generált felszín esetenként nagy mértékben eltérhet a valós földfelszíntől (a HydroDEM alapadatainak magassági megbízhatósága +/-70 cm alatti).

A modell létrehozási módszereiből fakadó hiba: ide sorolhatóak például a simított felszínek határain fellépő magasságkülönbségek okozta hibák.

A vonalgeometria hibája: bár az OVF vektoros vízfolyás-adatbázisa feltehetőleg kellően precíz és naprakész, ennek ellenére előfordulhatnak a digitalizálásból adódó hibák is, ahol a vektoros objektum vonala eltér a vízfolyás valódi helyétől. A Google Maps műholdképeivel szűrőpróba-szerűen összevetve ezen hibák száma és jelentősége igen csekélynek mondható.

A dolgozatban részletezett problémakör kikerülésére a legtöbb térinformatikai szoftverben ugyan van lehetőségünk egy túltöltési érték megadásával (a megadott értéknél kisebb mélyedéseket, azaz hibákat a szoftver nem kezeli hibaként, és továbbengedi a vizet), ám ennek túlzott használata kerülendő, ugyanis így a víz olyan irányokba is elfolya, amire a valóságban nem kerülne sor. Megoldást jelenthet a vízfolyások beégetése (burn stream into DEM), illetve az azok mentén található mélyedések feltöltése (fill sinks).

A hibák bemutatása térképeken

A hibák térképi megjelenítése az importált hibapontok „kulonbseg” mezője alapján a fokozatos („Graduated”) jelmódszerrel történt, melyet a Jenks-féle természetes törések („Natural breaks”) módszerével osztályoztam. A kapott kategória-határokat egész számra kerekítettem, így az osztályok a következők lettek:

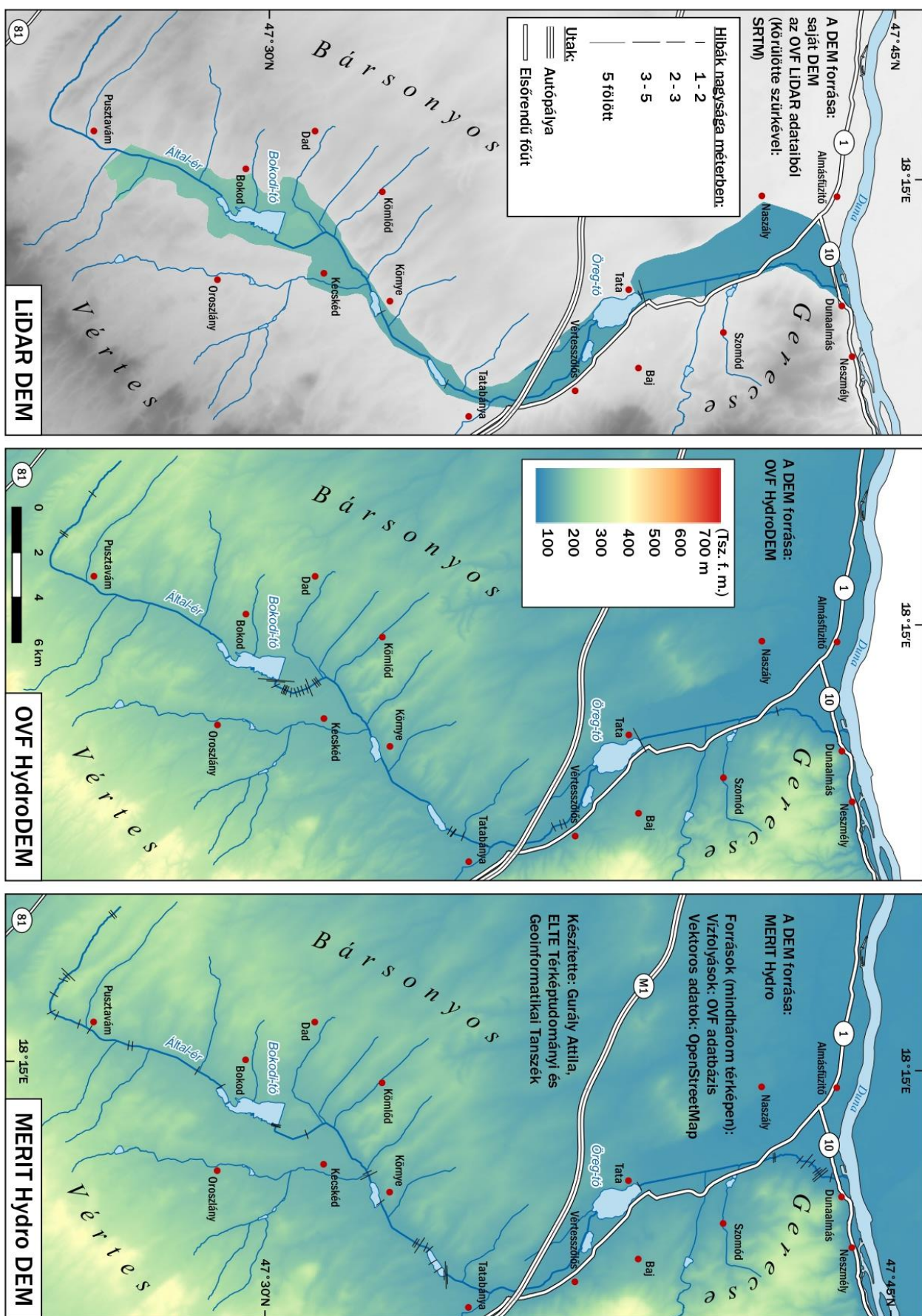
- az Átal-ér hibáit modellenként bemutató mindhárom térképen: 1-2, 2-3, 3-5 és „5 fölött” (méterben).
- a HydroDEM áttekintő térképén: 1-2, 2-3, 3-6, valamint „6 fölött”,
- míg a MERIT Hydro áttekintő térképén: 1-2, 2-4, 4-8, illetve „8 fölött”,

Az említett kategóriák jelmérete minden térképen 2, 4, 6, illetve 8 mm.

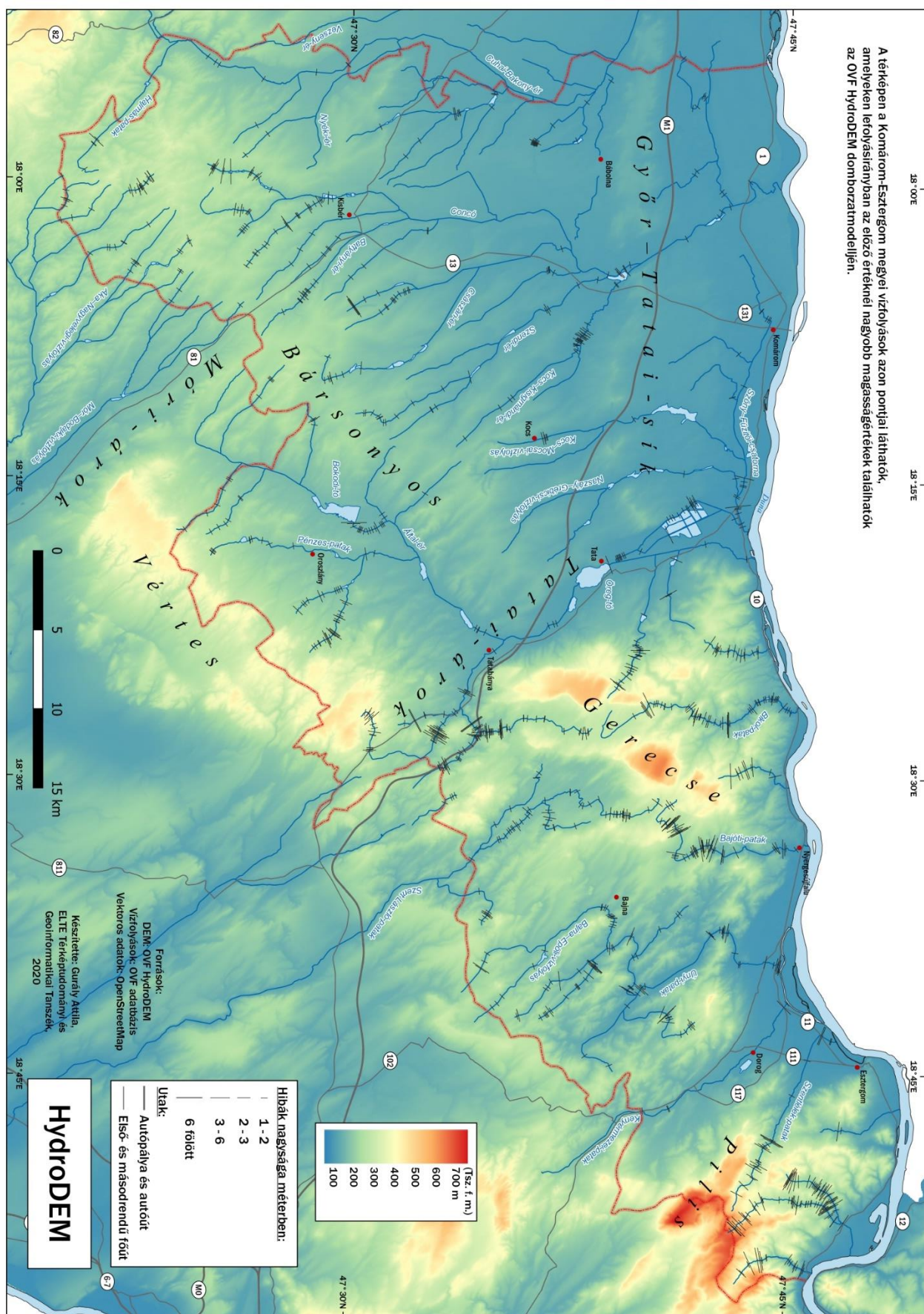
A legalább 1 m-es hibák helyei egyszerű, a vízfolyásokra merőleges vonásokként kerültek a térképre. A jelek elforgatása adatvezérelt módon, a már korábban említett „angle” mező felhasználásával történt, melyet alapul véve az adattáblát egy „angle_korr” elnevezésű mezővel egészítettem ki, ugyanis az elforgatás szögének a vízfolyás irányszögére merőlegesnek kellett lennie. Az új mezőt a mező kalkulátor segítségével hoztam létre ($\text{angle_korr} = \text{angle} + 90$). Az áttekintő térkép kis méretaránya miatt a hibapontok jelei több helyen kézi korrekcióra szorultak az elforgatás tekintetében.

A megye területén eredő, de a megyéből kifolyó vízfolyások továbbfolyása nem minden esetben volt biztosított, így egy kiegészítő réteget adtam a térképhez, amely két vízfolyásból állt, melyek név szerint a Gaja-patak és Váli-víz. Előbbi a Bakonyalja délkeletre tartó vizeit egyesíti a Szápári-ér és a Mór–Bodajki-vízfolyás közti területen, míg utóbbi a Gerecse és a Vértes határvidékein eredő Sósi-ér és a Kisnémetegyházi-patak vizét vezeti tovább. A HydroDEM és a MERIT Hydro áttekintő térképére az áttekinthetőség érdekében csak a minimum 12 km hosszúságú vízfolyások nevei kerültek fel.

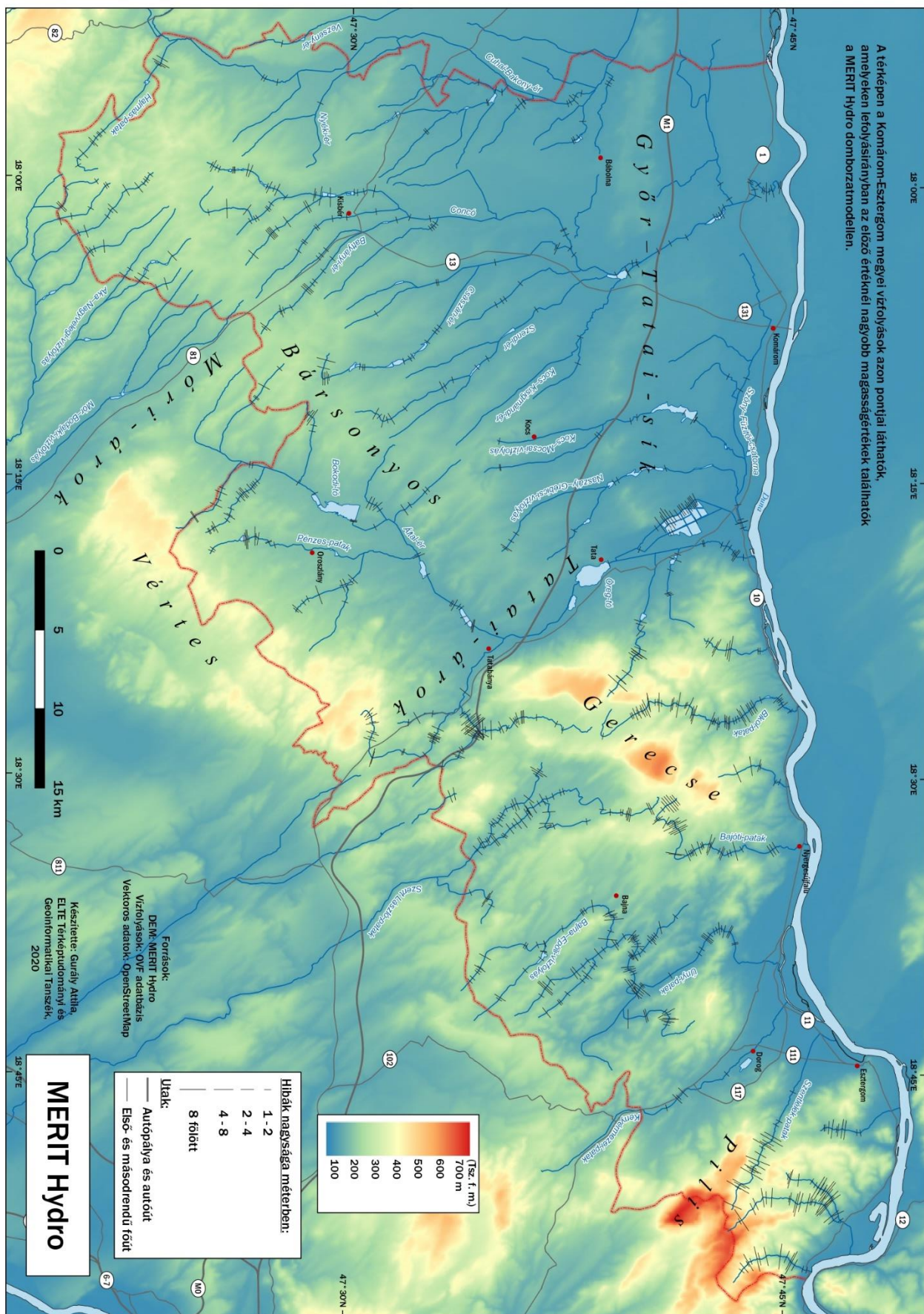
A domborzatmodellek ábrázolása hipszometrikus módszerrel, azaz magassági színezéssel történt, melyhez a „Spectral” elnevezésű színskálát használtam.



15. ábra: Hibák az Által-ér mentén három modell alapján



16. ábra: Hibák az OVF HydroDEM modelljén



17. ábra: Hibák a MERIT Hydro modellen

Összefoglalás

Három, a létrehozás módjában, valamint felbontásban is eltérő domborzatmodellen végeztem mederesés-vizsgálatot. A dolgozatban Komárom-Esztergom megye minimum 5 km-es hosszúságú vízfolyásai kerültek elemzésre térinformatikai eszközök segítségével. Célom a különböző modellek hidrográfiai elemzésekre való alkalmasságának vizsgálata volt.

A dolgozat kiindulópontja az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) nem korszerű módszerekkel (elsősorban topográfiai térképek szintvonalainak digitalizálásából) létrehozott 10 méteres terepi felbontású hidrológiai domborzatmodellje volt. Ennek pontosságát vizsgáltam a MERIT Hydro modellel, illetve az Által-ér esetében egy LiDAR alapú modellel összehasonlítva. A MERIT Hydro a legújabb globális hidrográfiai modell, melyet főként radaros távérzékelte adatokból és globális vízrajzi modellekből alkottak meg 3"-es felbontással. A LiDAR-ból generált modellt pedig az Által-ér lézerszkenneléses felmérésének adataiból hoztam létre 1 méteres felbontással.

A munkamenet első lépéseként az OVF-től kapott vízfolyás-adatbázis vektoros geometriája alapján a modellek pixelértékeiből mederprofilokat hoztam létre a vízfolyások mentén, majd ezek pontjaiból táblázatkezelőben automatizált függvények segítségével kinyertem a vízfolyások továbbhaladását gátló hibapontokat a lefolyásmenti szomszédos pixelek magasságértékeinek összehasonlításával. A minimum 1 méteres hibával rendelkező pontokat megjelenítettem térképeken, illetve vízfolyásonként statisztikai összegzést végeztem a hibapontokról, az eredményeket pedig táblázatba foglaltam. A térinformatikai elemzések elvégzéséhez, illetve a térképi megjelenítéshez a QGIS 3.10 szoftvert használtam.

A HydroDEM és a MERIT Hydro modelleken egyaránt nagy számú (1032, illetve 847 db) és változatos nagyságú hibát találtam (a legnagyobb hiba 13,27, illetve 16,27 méteres), melyek okai lehetnek például a felbontásból adódó problémák, illetve a modellek jellegzetes hibái. A hibapontok elhelyezkedése leginkább a domborzati viszonyokhoz köthető, a nagyobb hibák a hegy- és dombvidéki területekre jellemzőek.

A hibák számát tekintve a kisebb felbontás okán a MERIT Hydro (847 db, a HydroDEM-en 1032), míg az átlagértékeket tekintve a HydroDEM teljesített jobban (1,97 m, a MERIT Hydro esetében pedig 2,47). Az Által-ér mintáján a várakozásoknak megfelelően a legjobb eredményekkel egyértelműen a LiDAR adatokból generált modell szolgált (csupán 6 db hibás ponttal, míg a HydroDEM-en 29, a MERIT Hydro-n pedig 42 hiba tárult fel). A

statisztika alapján kijelenthető, hogy az OVF fizetősz adatbázisa, azaz a HydroDEM, illetve az ingyenesen letölthető MERIT Hydro modell hasonlóképp alkalmas kisvízfolyások hidrográfiai célú elemzésére Magyarországi területeken.

Az OVF HydroDEM modelljének problémáira megoldást jelenthet a vízfolyások helyének beégetése, illetve a meder menti mélyedések feltöltése. A legjobb megoldással egy nagyobb felbontású, korszerűbb módszerekkel létrehozott (pl. LiDAR alapú) modell szolgálhat.

Irodalomjegyzék

- A magyar helyesírás szabályai*, 12. kiadás. (2020. 05. 14.). Forrás: MTA helyesírási tanácsadó portál: <https://helyesiras.mta.hu/helyesiras/default/akh12>
- Barsi, Á., Detrekői, Á., Lovas, T., & Tóvári, D. (2003). Adatgyűjtés légi lézerlelapogatással. *Geodézia és Kartográfia*, 55, 10-17.
- Breaklines in surface modeling*. (2020. 05. 04.). Forrás: ArcGIS Desktop: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/breaklines-in-surface-modeling.htm>
- Budai, T., & Gyalog, L. (2010). *Magyarország földtani atlasza országjáróknak*. Budapest: Magyar Állami Földtani Intézet.
- Cartographia Kft. (2008). *Gerecse, Vértes, Velencei-hegység: turistakalauz térképpel*. Budapest: Cartographia Kft.
- Create Elevation Grid from 3D Vector Data*. (2020. 05. 04.). Forrás: Global Mapper - Blue Marble Geographics: https://www.bluemarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-19/Create_Elevation_Grid_from_3D_Vector_Data.htm
- Elek, I. (2006). *Bevezetés a geoinformatikába*. Budapest: ELTE Eötvös Kiadó.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., & Hensley, S. (2004). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45.
- High Demand for Digital Elevation Models from Satellite*. (2020. 05. 04.). Forrás: GEOIMAGE: https://www.geoimage.com.au/_blog/News/post/high-demand-for-digital-elevation-models-from-satellite/
- How Topo to Raster works*. (2020. 05. 04.). Forrás: ArcGIS Desktop: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-topo-to-raster-works.htm>
- Kocsis, K. (2018). *Magyarország Nemzeti Atlasza*. Budapest: MTA CSFK Földrajztudományi Intézet.
- Lovas, T., Berényi, A., & Barsi, Á. (2012). *Lézerszkennelés*. Budapest: TERC.
- MERIT DEM: Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM*. (2020. 05. 04.). Forrás: Dai Yamazaki's website: http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM/
- MERIT Hydro: global hydrography datasets*. (2020. 05. 04.). Forrás: Dai Yamazaki's website: http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_Hydro/
- Miller, C. L., & Laflamme, R. A. (1958). The Digital Terrain Model – Theory & Application. *Photogrammetric Engineering*, 24, 433-442.
- Székely, B., Molnár, G., & Roncat, A. (2007). Domborzat- és felületmodellek teljes jelalakos légi lézerszkenneléssel. *Geodézia és Kartográfia*, 59, 8-13.
- Telbisz, T., Székely, B., & Timár, G. (2013). *Digitális Terepmodellek*. Budapest: ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet.
- Topo to Raster*. (2020. 05. 04.). Forrás: ArcGIS Desktop: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/topo-to-raster.htm>
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Sosa, J., Bates, P., Allen, G., & Pavelsky, T. (2019). MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. *Water Resources Research*, 55, 5053-5073.
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J. C., . . . Bates, P. D. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 44, 5844-5853.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek és tanáromnak, Dr. Albert Gáspárnak a szakdolgozati téma konkrét kiválasztásában nyújtott segítségéért, illetve a dolgozat alkotása közben adott szakmai tanácsaiért és folyamatos útmutatásáért.

Köszönettel tartozom továbbá az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) Műszaki Téradat Szolgáltató Főosztályának az adatszolgáltatásért.

Nyilatkozat

Alulírott, **Gurály Attila** nyilatkozom, hogy jelen szakdolgozatom teljes egészében saját, önálló szellemi termékem. A szakdolgozatot sem részben, sem egészében semmilyen más felsőfokú oktatási vagy egyéb intézménybe nem nyújtottam be. A szakdolgozatomban felhasznált, szerzői joggal védett anyagokra vonatkozó engedély a mellékletben megtalálható.

A témavezető által benyújtásra elfogadott szakdolgozat PDF formátumban való elektronikus publikálásához a tanszéki honlapon

HOZZÁJÁRULOK

NEM JÁRULOK HOZZÁ

Budapest, 2020. május 15.

.....

a hallgató aláírása