

**Pécsi Tudományegyetem**  
Földtudományok Doktori Iskola

**Globális digitális magasságmodellek  
geomorfometriai alkalmazása  
részben automatizált geomorfológiai térképezésre**

*Doktori értekezés tézisei*

**JÓZSA Edina**

Témavezető:  
Dr. FÁBIÁN Szabolcs Ákos  
egyetemi docens

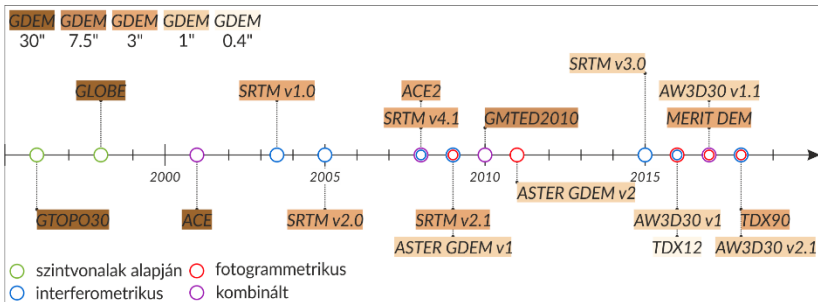
**Pécs, 2019**

<b>A doktori iskola neve és címe:</b>	Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar Földtudományok Doktori Iskola 7624 Pécs, Ifjúság útja 6.
<b>Vezetője:</b>	Dr. GERESDI István, DSc egyetemi tanár Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar Földrajzi és Földtudományi Intézet Földtani és Meteorológiai Tanszék
<b>A doktori témacsoport neve:</b>	Geomorfológia
<b>Vezetője:</b>	Dr. SCHWEITZER Ferenc, DSc nyugalmazott egyetemi tanár Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar Földrajzi és Földtudományi Intézet
<b>Az értekezés tudományága:</b>	Geomorfológia, Térinformatika
<b>Témavezető:</b>	Dr. FÁBIÁN Szabolcs Ákos, PhD egyetemi docens Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar Földrajzi és Földtudományi Intézet Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék

# 1. Bevezetés

## 1.1. Kutatási háttér

A térinformatikai alapú geomorfológiai térképezés a geomorfometria tárgykörébe tartozó eljárásokra alapoz. A geomorfometria a domborzat kvantitatív elemzését takarja, a földtudományok, a matematika, a műszaki tudományok és a számítástechnika határterületén fejlődött ki. Az eljárások fókuszában a topográfiát leíró paraméterek és domborzati elemek előállítása áll (Pike, 2000; Pike et al., 2009). A diszciplína aktívan formálódik, az elmúlt időszakban a felszínformák automatizált lehatárolására és osztályozására irányuló módszerek fejlesztése zajlott a leggyorsabb léptékben. Ezek közös célja, hogy univerzális eszközkészletet nyújtsanak a felhasználók számára, ezzel csökkentve a módszerek szubjektivitását és elősegítve a kutatások reprodukálhatóságát (Drăguț et al., 2011; Minár et al., 2016; Pike et al., 2009). A digitális magasságmodellek minőségének és térbeli lefedettségének javulása, és a térinformatikai szoftverek fejlődése gyorsuló ütemben vezetett a GIS-alapú domborzatelemzési eljárások széleskörű elterjedéséhez, a tradicionális módszerek fokozatos kiváltásához (Demek et al., 2012; Seijmonsbergen et al., 2011; Verstappen, 2011). A kutatók számára egyre több globális modell (pl. *GMTED2010*, *MERIT DEM*, *SRTM*, *ASTER GDEM*, *AW3D30*, *TanDEM-X*) érhető el, amelyek különböző horizontális és időbeli felbontást, valamint pontosságot biztosítanak (1. ábra).



1. ábra. A globális digitális domborzatmodellek kiadásának ideje (a legjobb felbontású, nem-kereskedelmi célú és nem USA területére limitált verziók).

Amellett, hogy ezek a modellek szabadon hozzáférhetőek, az előnyeik között említhetjük még az egységes adatstruktúrát, a nagy idő- és anyagi ráfordításokat igénylő adatgyűjtés elkerülését és az újabb és újabb modellek révén a domborzati információk folyamatos aktualizálását (Király, 2005; Szabó et al., 2013). A felhasználók azonban hajlamosak figyelmen kívül hagyni, hogy a GDEM-ek esetében a magassági adatok nem a domborzatra vonatkoznak, a felszínborításból és különböző előállítási problémákból adódó hibák pontatlan eredményterképekhez és akár téves következtetésekhez is vezethetnek (Minár et al., 2016; Reuter, Hengl, Gessler, & Soille, 2009; Szabó, 2007). Magyarországon a GDEM-ek alkalmazása még nem terjedt el széles körben (Józsa et al., 2014; Józsa & Kalmár, 2014; G. Szabó et al., 2015; G. Szabó & Szabó, 2010; Ungvári, 2015b), ezért is szükséges a modellek validálása és geomorfológiai alkalmazhatóságának feltárása a Kárpát-medence térségében is.

A dolgozat általános és specifikus geomorfometriai alkalmazások esetében is vizsgálja a modellek hibáinak hatásait, valamint feltárja a GDEM-ek regionális sajátosságait, a magassági adatok bizonytalanságainak lehetséges okait és következményeit. A szerző GDEM-ek iránti érdeklődése a geomorfológiai kutatásokhoz szükséges domborzatmodellek beszerzési nehézségében gyökerezik.

## ***1.2. Célkitűzés***

Általánosságban véve a geomorfometriai vizsgálatok az alábbi öt részfeladatból tevődnek össze: (1) kutatás céljainak megfelelő magassági adatok beszerzése vagy előállítása, (2) a magasságmodell minőségének ellenőrzése, (3) a modell hibáinak lehetőség szerinti kiszűrése, (4) a domborzati paraméterek és objektumok létrehozása, (5) az alkalmazás-specifikus elemzés elvégzése és az eredmények szintézise (Bishop, James, Shroder, & Walsh, 2012; Pike et al., 2009; Wilson, 2012). A dolgozat céljai is e logika mentén kerültek meghatározásra.

1. A célkitűzésnek megfelelő DMM kiválasztása a kutatás egyik kardinális kérdése. Ebből kifolyólag a disszertáció egy hosszabb fejezetet szentel a Magyarország területére jelenleg szabadon hozzáférhető magasságmodellek bemutatására.

2. A GDEM-ek minőségének ellenőrzése hibastatisztikák kiszámításával (pl. ME, RMSE, LE90) és a hibák területi elhelyezkedésének, főbb összetevőinek feltárásával kerül elvégzésre. A négy kiválasztott GDEM (*TanDEM-X 0.4*”, *SRTM v3.0*, *AW3D30 v2.1*, *MERIT DEM*) értékelése szintvonalakból generált referenciamodellek alapján történik.
3. A geomorfológiai alkalmazásoknál a modellek relatív pontossága, hogy megbízhatóan ábrázolják-e a domborzat sajátosságait, nagyobb jelentőséggel bír (Reuter et al., 2009; Wecklich et al., 2015). Ez okból a kiválasztott *SRTM1* modell esetében sor kerül a különböző hibatípusok javítására.
4. A specifikus geomorfometriai elemzések három részre bonthatóak:
  - a. A felszínforma elemek lehatárolása a „*geomorphons*” eljárással történik (Jasiewicz & Stepinski, 2013), azonban a módszer hatékonyságának kiaknázása érdekében a keresési távolság paraméter optimalizálása szükséges. Kimondottan erre a célra nem állt rendelkezésre térinformatikai eszköz, így a „*topographic grain*” (gerinc-völgy távolság) elvének (Pike et al., 1989) felelevenítésével egy bővítményként elérhető GRASS GIS (r.tg.geom) eszköz fejlesztése volt szükséges.
  - b. A felszínformák sajátosságai alapján geomorfológiai típusterületek, régiók határolhatóak el egymástól. A leválogatott felszínforma elemek mintázatának automatikus osztályozása a „*GeoPAT*” eszközkészlet segítségével valósítható meg (Jasiewicz, Netzel, & Stepinski, 2014, 2015).
  - c. A terasz-szerű felszínnek leválogatása Demoulin et al. (2007) által bemutatott módszer alapján történik. Az algoritmus eredményessége végett érdemesnek bizonyult arra, hogy egy felhasználóbarát, „*push-the-button*” GRASS GIS eszköz (r.terrace.geom) formájában lefejlesztésre kerüljön.
5. Jelen kutatásban a geomorfometriai elemzések kettős célt szolgálnak: egyrészt a GDEM-ek minőségéről és pontosságáról nyújtanak képet, valamint geomorfológiai kutatások kapcsán is relevánsak. A modellek és a részben automatizált eljárások alkalmazhatóságának értékelésére szintén referencia állományok előállításra szükséges (szakirodalmi áttekintés, hagyományos geomorfológiai térképek digitalizálása).

### **1.3. Kutatási terület**

Igazodva a dolgozat célkitűzéseivel az egyes lépések végrehajtásához kiválasztott térségek négy területi szintbe sorolhatók.

1. szint: A geomorfológiai tájak lehatárolására hazánk teljes területén sor került. Ennek előfeltétele volt, hogy az SRTM1 modell is Magyarország egészén javításra kerüljön.
2. szint: A „geomorphon” eszköz és a gerinc-völgy távolság módszerének komplex térszínen való tesztelése érdekében egy kb. 20 500 km<sup>2</sup> kiterjedésű terület lett kiválasztva. Ez a térség nagyjából egybeesik a Dél-Dunántúllal, 36 kistájat foglal magában, amelyek a Dunántúli-dombság, az Alföld és a Nyugat-magyarországi peremvidék nagytájakhoz sorolódnak.
3. szint: A GDEM-ek összehasonlító vizsgálatára egy közel 960 km<sup>2</sup> kiterjedésű térség lett kijelölve a Tolnai-Sárköz déli részén (580 km<sup>2</sup>) és a kísérő dombvidéken (380 km<sup>2</sup>), valamint egy másik 350 km<sup>2</sup> nagyságú részlet a Keleti-Mecsek és a tőle délre húzódó hegyláb felszín esetében. A Duna-völgyi teraszfelszínének elemzésének kapcsán egy 320 km<sup>2</sup> összterületű térség került kiválasztásra, amely a Győr-Tatai-teraszvidék, az Almás-Táti-Duna-völgy és a Gerecse-hegység területét érinti.
4. szint: A GDEM-ek validálására használt szintvonal-alapú referencia DDM-ek kisebb térszíneket fednek az ártéri, dombsági és alacsony középhegységi mintaterületekből (*Decs DDM, Bátaszék DDM, Bába DDM, Váralja DDM, Vasas-Belvárd DDM*). Ezek a kivágatok példát nyújtanak egységes domborzati viszonyú (ártéri sík, vízfolyás felső szakasza) és heterogén területekre egyaránt. Az elszórtan elhelyezkedő referencia modellek lehetőséget adtak a lokális jellemzők és a regionális eltérések összevetésére.

## **2. Módszerek**

### **2.1. A GDEM-ek pontosságának összehasonlító vizsgálata**

A magassági modellek hibáinak feltárása kiemelkedően fontos azok alkalmazása előtt, a túlzó elvárások és a hibás következtetések elkerülése érdekében (Grohmann, 2018). A pontosságvizsgálat kulcslépései a vizuális hibakeresés (domborzatárnyékolásos térkép, túlmagasított 2,5D megjelenítés, különbségtérképek, domborzati

keresztshelvények), az abszolút és relatív, a vertikális és horizontális pontosságot leíró hibastatisztikák kiszámítása, a hibák területi eloszlásának és a hamis magassági értékek okainak összefüggésvizsgálatokkal és kiegészítő térképekkel történő feltárása.

A vertikális magassági pontosság vizsgálatához szolgáltatnak alapot a GDEM-ek és a referencia DTM-ek kivonásával előállított különbségfelszínek ( $h_{GDEM} - h_{ref}$ ). A statisztikai jellemzők a teljes területre, az elhanyagolható magasságú növényzettel és az erdővel borított térszínre lettek meghatározva. Az alábbi hibastatisztikák kerültek kiszámításra: átlagos hiba (ME, 1. egyenlet), négyzetes középhiba (RMSE, 2. egyenlet), hibaszórás (ESD, 3. egyenlet), abszolút hiba 90%-os konfidencia-szinten (LE90, 4. egyenlet).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_1^n [h_{GDEM} - h_{ref}] \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n [h_{GDEM} - h_{ref}]^2} \quad (2)$$

$$ESD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n [h_{GDEM} - h_{ref} - ME]^2} \quad (3)$$

$$LE90 = \hat{Q}_{|h_{GDEM} - h_{ref}|}(0.9) \quad (4)$$

A hibák okainak részletesebb kivizsgálása érdekében a statisztikai jellemzők magassági szintek, mezőgazdasági lejtőkategóriák (Pécsi, 1985) és a nyolc égtáj szerint osztályozott kitétségtérkép alapján is megállapításra kerültek. Végezetül a cellákra eső erdőborítás és a magasságmodellen megjelenő hibák mértékének kapcsolatába a különböző relieftípusok esetében lineáris regresszióanalízis nyújtott betekintést (Gallant & Read, 2016; Sadeghi et al., 2018).

Az abszolút magassági pontosság azonban nem a legfontosabb tényező a GDEM-ek geomorfometriai alkalmazhatósága szempontjából. Annak megállapítására, hogy mennyire megbízhatóan ábrázolják a globális modellek a felszínformákat különböző első- és másodrendű derivátumok alkalmazhatóak (Hengl & Reuter, 2011; Mukherjee et al., 2013; Reuter et al., 2009). A magassági adatok bizonytalanságainak domborzati paraméterekre és felszínforma elemekre gyakorolt hatása bizonyított, mértékének feltárását a GDEM-ekről és a referencia DDM-ekről levezetett lejtőszög és kitétségtérképek, automatikusan generáltatott vízhálózatok és topográfiai nedvesség indexek (TWI) összevetése tette lehetővé.

Az SRTM1 modellt terhelő hibák csökkentése érdekében GRASS GIS-ben egy könnyen kivitelezhető lépésekből és szabadon hozzáférhető kiegészítő adatokból álló folyamatsor került kialakításra. Az öt fő feladatrészt a végrehajtás sorrendjében a következő: (1) vízfelszínegységes környezeti magasságra hozása, (2) erdővel borított térszín magassági adatainak pontosítása, (3) beépített területek értékeinek közelítése a valós magasságokhoz, (4) zajszerű hibák simítása, (5) kiugró hibák kiszűrése. A famagasságok becsléséhez az erdők peremén lévő cellák simítása kerülendő, de ezt a lépést követően a zajsűrő eljárás a kisebb fennmaradó hibákat is csökkenteni tudja, végül a kiugró cellák módosításakor célszerű a már zajsűrősen átesett modellből venni az új értékeket.

## **2.2. Felszínformák domborzatmodell alapú térképezése**

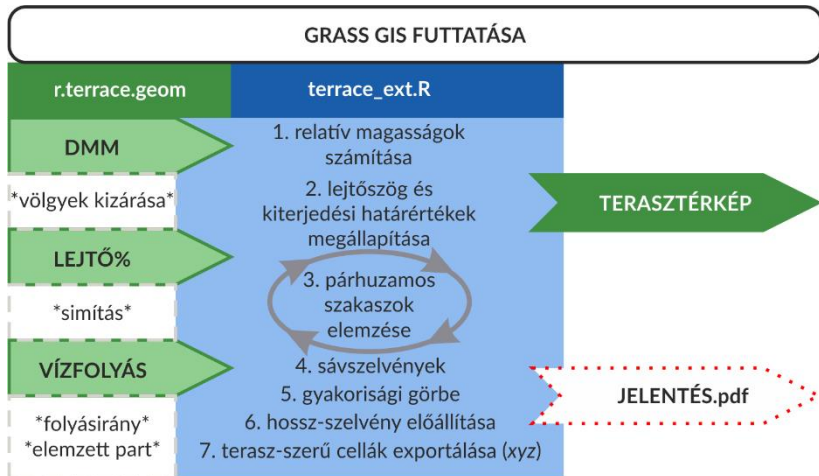
A felszínformák több-léptékű („*multi-scale*”) térképezéséhez a „*geomorphons*” eljárás (Jasiewicz & Stepinski, 2013) ígérkezett megfelelőnek. A módszer rugalmasságának és hatékonyságának kiaknázása érdekében objektív alapon megállapított, a felszín tagoltságát visszatükröző keresési paraméter meghatározása volt szükséges. Az erre a célra fejlesztett *r.tg.geom* (Józsa, 2017) eszköz a Pike et al. (1989) által bemutatott módszer GRASS GIS-ben való implementálása; egy Python script eszköz, amely R funkcionalitást is használ. A megközelítés alapja annak az elméleti szomszédsági mátrix méretnek a meghatározása, ahol a relatív relief eléri az adott domborzatra jellemző értéket. A módszer folyamatosan növekvő „keresési ablakra” határozza meg a magassági értékek kiterjedését, majd megállapítja azt a távolságot, amelynél a nagyobb környezetből eredő relief-energia növekmény mértéke tartósan visszaesik.

Magyarország területére a *corrSRTM1* modellből levezetett geomorfológiai régiók térképe a „*GeoPAT*” eszközkészlettel, irányított osztályozás révén készült (Dmowska, 2015; Netzel et al., 2018). Az egyes régiók elkülönítésének alapja a fentebb említett felszínforma elemek térképe, amelyből kiindulva a hasonlósági elemzés során a módszer a geomorfológiai tájtípusok tanulóterületeit előre meghatározott méretű, a kutatási területet teljesen lefedő rácsháló elemeivel veti össze. A domborzatmodell alapú osztályozás során a normalizált „*Wave Hedges*” távolság alkalmazása javasolt



(Jasiewicz et al., 2014; Stepinski et al., 2015). A tanulóterületeket a módszer külön-külön vizsgálja meg, míg az egyes típusokat jellemző hasonlósági értékeket az adott pontban a cellák átlagolásával állítja elő. Végül a geomorfológiai tájegységek térképén az aggregált cellák a „*maximum likelihood*” elv alapján kerülnek osztályozásra (Jasiewicz et al., 2014).

A legösszetettebb feladat a folyóvízi teraszok, mint komplex felszínformák automatikus leválogatása volt. Az `r.terrace.geom` eszköz Demoulin et al. (2007) módszerére és Miller (2012) csak R alapú implementációjára épül, azonban módszertanilag tovább is fejleszti azokat (2. ábra). Az R funkciókat, köztes adatelemzési és vizualizációs célokra alkalmazza (`data.table` és `ggplot2` csomag), míg a GRASS GIS nyújtja az eszköz grafikus felhasználói felületét és kezeli a raszteres magassági állományokat és derivátumokat.



2. ábra. A teraszfelszínnek leválogatását végző eszköz működési elve. (A zölddel jelölt részeket a GRASS GIS, a kék lépéseket az R hajtja végre, pirossal jelölt a diagramokat tartalmazó pdf dokumentum.)

Az eljárás eredményeként egy a potenciális teraszfelszínnek celláit bemutató raszter térkép, valamint egy összefoglaló pdf dokumentum kerül előállításra, amely grafikonokat és sávszelvényeket (minimum, átlag, maximum) tartalmaz minden elemzett szakaszra, valamint a folyószakasz hossz-szelvénye mentén ábrázolja az adott magasságokban megállapított lehetséges terasz-szinteket.

### 3. Eredmények

#### 3.1. A GDEM-ek horizontális és vertikális pontossága, a hibás magassági értékek hatása a geomorfometriai alkalmazhatóságra

Az összehasonlító vizsgálat kimutatta, hogy a GDEM-ek hibáihoz a kiterjedt erdők, a bányák és vízfelszínnek területén visszamaradó kiugró hibák, a topográfival nem összeegyeztethető bemélyedések és kiemelkedések, valamint egy zajszerű hibakomponens (kivétel a simított MERIT DEM) járulnak hozzá a leginkább. A statisztikai elemzés során a szintvonal-alapú referencia DDM-ek alapján meghatározott horizontális és vertikális pontossági jellemzők jól egyeznek a korábban publikált hibastatisztikákkal (1. táblázat).

1. táblázat. A referencia DDM-ek alapján megállapított hibastatisztikák.

		ME (m)	RMSE (m)	ESD (m)	LE90 (m)
TDX12	teljes terület	3,11	6,94	6,21	13,18
	nyílt térszín	0,22	1,61	1,60	2,50
	erdők	11,60	15,16	9,76	25,55
AW3D30	teljes terület	3,41	7,43	6,61	14,46
	nyílt térszín	0,42	2,73	2,70	4,16
	erdők	12,09	15,03	8,93	24,32
SRTM1	teljes terület	0,64	4,57	4,52	7,60
	nyílt térszín	-1,10	2,31	2,03	3,73
	erdők	6,05	9,24	6,99	16,16
MERIT DEM	teljes terület	1,51	3,33	2,96	5,37
	nyílt térszín	1,17	2,09	1,74	3,27
	erdők	2,91	6,10	5,37	10,33

A geomorfometriai alkalmazás szempontjából a relatív pontosság meghatározása nagyobb relevanciával bír. Ahogyan az várható volt a természetes és mesterséges felszíni objektumok torzították a

lejtőszögtérképen előforduló kategóriákat, a zajos felszín a TDX12, AW3D30 és SRTM1 modellek esetében a TWI index felaprózott mintázatához vezetett, míg a zajszűrés során alkalmazott simítás a MERIT DEM esetében félrevezető vízhálózatot eredményezett.

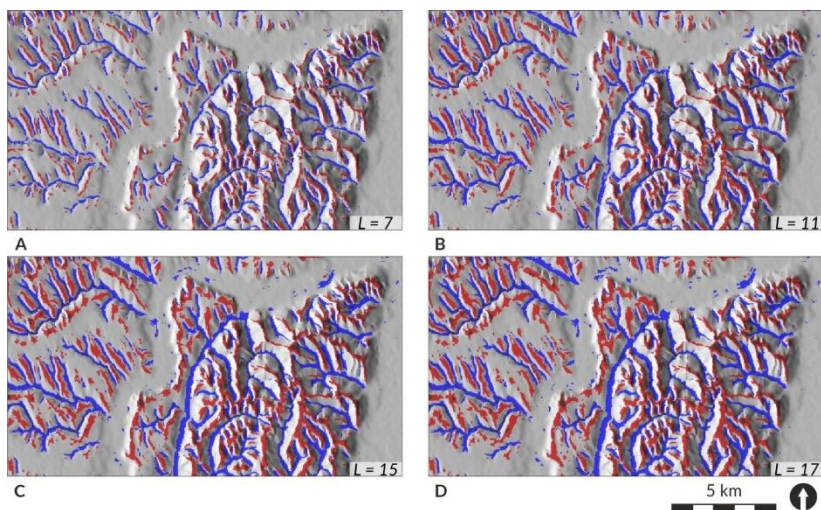
A becsült „valós” térbeli felbontás, a feltárt GDEM hibák, a feldolgozott szakirodalom és a szerző korábbi tapasztalatai alapján a további specifikus geomorfometriai elemzésekhez az SRTM1 modell került kiválasztásra, a megelőző hibajavítást követően. A tavak a partvonalra eső cellák magasságai alapján kerültek korrigálásra. Az erdővel fedett és beépített területek esetében szabadon hozzáférhető kiegészítő adatok voltak szükségesek (erdőborítás térkép 2000-re vonatkozóan, OpenStreetMap adatok). A vegetáció hatásának csökkentésére az erdőfoltok szegélye mentén meghatározott famagasságok alapján interpolált (IDW) és topográfia alapján módosított (TPI) erdő-magasság felszín nyújtott lehetőséget. Végül a zajszerű hibák az *r.denoise* adaptív simító algoritmussal kerültek javításra, a fennmaradó kiugró hibák pedig mozgóablakos szűrő eljárással lettek valósabb értékre cserélve.

A javított *corrSRTM1* esetében az átlagos hiba 0,28 m, ami az erdőterületeken előforduló pozitív hibákkal és általánosságban a zaj csökkentésével függ össze. A  $\pm 1$  m közé eső eltérések aránya minimálisan csökkent (26,16%), szintén a sík térszínnek simításához köthetően. A hibaértékek hisztogramján a módusz lényegesen kifejezettebb. A hibaszórás (4,47 m), az RMSE (4,48 m) és a LE90 (7,34 m) hibastatisztikák alacsonyabbak ugyan, de nem jeleznek drasztikus változást a modell minőségében. A javított modelltől készített domborzati paraméterek és az ismételt vizuális interpretáció azonban rávilágít az SRTM1 javulására (pl. a Keleti-Mecsek hegylábfelszínén a völgylefejezések esetében is pontosabb lett a derivált vízhálózat).

### ***3.2. Specifikus geomorfometriai alkalmazások***

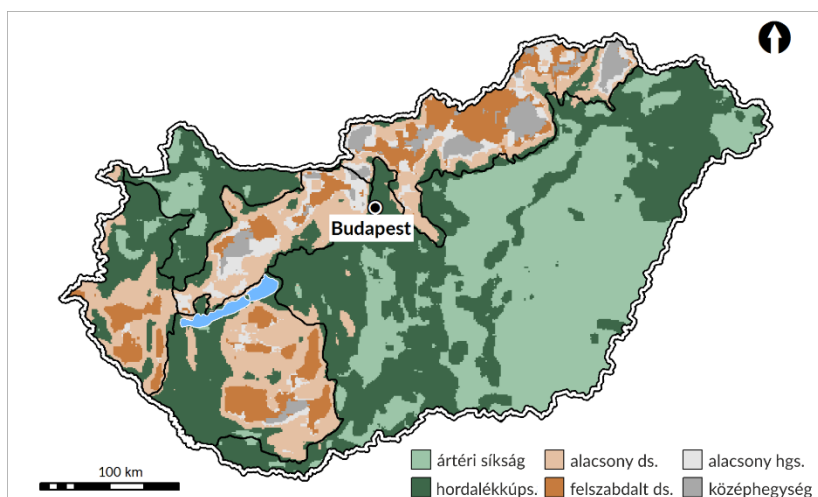
A felszínforma elemek lehatárolása előfeltétele volt a magyarországi geomorfológiai körzetek automatikus osztályozásának. Erre a célra a közös kutatócsoport által fejlesztett, „*geomorphons*” és „*GeoPAT*” (egymást kiegészítő) domborzatelemző eszközök bizonyultak megfelelőnek. (Jasiewicz et al., 2014). A szerző korábbi kutatásai

során egyértelművé vált, hogy az r.geomorphon eszköz eredménytérképét leginkább a keresési paraméter befolyásolja. A 3. ábrán bemutatott kivágatok a Szekszárdi-dombság és a Völgység egy részletén szemléltetik ezt a hatást. Bár a térképezett formák részletességét limitálja a corrSRTM1 modell horizontális és vertikális felbontása, így is jól kivehető a geomorfometriai térképek különbsége. A túl kicsi keresési távolsággal (7 cella) előállított kimeneten feldarabolódnak a szűkebb völgyek is, míg a szükségtelenül nagy keresési paraméter (17 cella) a lejtők rovására növeli a völgytalpak és völgyközi háta kiterjedését. A Dél-Dunántúlon kijelölt heterogén térszín esetében a jellemző gerinc-völgy távolság 330 m-nek adódott. Magyarország teljes területén vizsgálódva ez az érték 450 m-re nőtt. Tradicionális geomorfológiai megközelítésben ez a lokális gerinc-völgy távolság túl kicsinek tűnhet felszínformák térképezésére, azonban figyelembe kell venni, hogy az r.tg.geom eszköz elsősorban az r.geomorphon eljárás parametrizálására készült. A „geomorphons” eljárás térképezési elvének megfelelően a megadott távolság egy keresési sugár, így a Nyquist-Shannon tételre hivatkozva már kielégítő ez a keresési paraméter.



3.ábra. A különböző keresési paraméterrel (L) generált geomorfometriai térképekről készített kivágatok szemléltetik a csúcsok és gerincek (piros árnyalat), valamint a völgyek és üstök (kék árnyalat) arányának változását.

A geomorfometriai térkép és további domborzati paraméterek (pl. TPI, magasság) alapján lehetséges volt az ártéri síkságok, hordalékkúpsíkságok, alacsony dombságok, felszabdalt dombságok, alacsony hegységek és középhegységek geomorfológiai régiók elkülönítése. A „GeoPAT” eljárás 27 darab 7,5×7,5 km kiterjedésű reprezentatív tanulóterület alapján készített hasonlósági térképeket. Az eredményül kapott geomorfológiai körzetek (4. ábra) tükrözik, hogy az adott cellák a hat összevont hasonlósági térkép közül mely alaptérképpel mutatták a legerősebb összefüggést. A módszer működési elve miatt a 30 m felbontású felszínforma térképből ~1 km cellaméretű osztályozott térkép állítható elő. A corrSRTM1 alapján térképezett körzetek validálása érdekében előállításra került egy referencia állomány is. A geomorfológiai és relief-típus körzetek nem minden esetben voltak egyértelműek, ellentmondások fordultak elő a szakirodalomban (Mészáros & Schweitzer, 2002; Pécsi, 1977; Pécsi & Somogyi, 1967), ezért a kistájak elsődleges és másodlagos geomorfológiai régióba sorolása tűnt a legmegfelelőbb megoldásnak. A referencia térkép szerint hazánk területének 69,7%-a tartozik síkságokhoz, 24,0%-a dombsági és 6,3% hegységi térszínhez. A raszteres eredménytérképen a cellák 70,9%-a síksági, 22,2%-a dombsági és 6,9% alacsony középhegységi osztályba sorolódott.

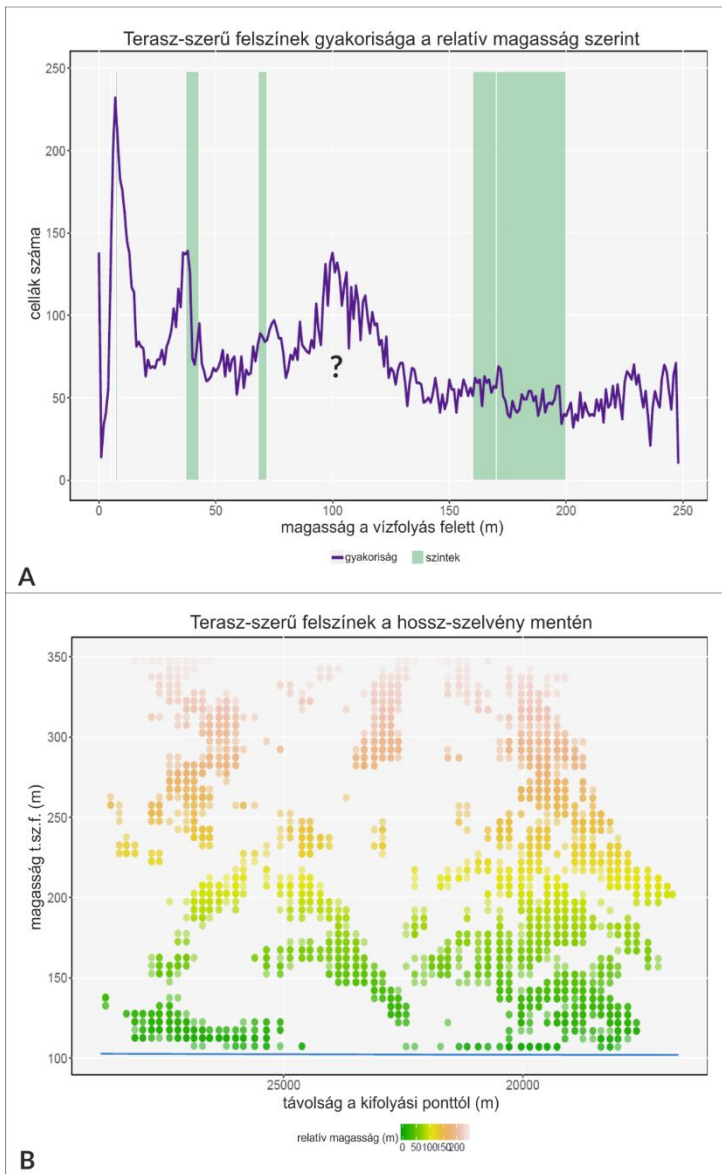


4 ábra. Az automatikus eljárással lehatárolt geomorfológiai tájak.

A hazai fluviális geomorfológiai kutatások sorában mindig kiemelkedő szerepű volt a Duna-völgy fejlődésének és teraszrendszerének vizsgálata. A hagyományos geomorfológiai elemzések (Pécsi, 1959) mellett, a DDM-et és térinformatikát alkalmazó vizsgálatokra is található hazai szakirodalmi példa (Bugya, 2008). Jelen kutatás az *r.terrace.geom* eszköz alkalmazásával kísérte meg a Gerecse-hegység északi előterében 6–8 magassági szintben valószínűsíthető teraszmaradványok feltérképezését. Az automatikus eljárással az elemzett térségről több mint 600 magyarázó ábra készült, amelyek segítségével pontosan visszakereshető, hogy egy adott térszín hogyan került leválogatásra.

Az *5. ábra* a Központi-Gerecse példáján szemlélteti a GIS-alapú módszer eredményeit. A gyakorisági görbe és a háttérben megjelenített terasz-szintek (Pécsi, 1959) alapján az alábbi megállapítások tehetőek (*5B. ábra*). 8 m relatív magasságban jól kivehető a csúcs, míg a 20 m körül várt szint nem jelenik meg egyértelműen. A következő domináns csúcs 40 m magasságban látszik, majd szintén észrevehető a IV. terasz szintjében megugró cellaszám. 100 m relatív magasságban egy olyan csúcs rajzolódik ki, amelyhez nem tartozott terasz-szint a szakirodalomban. Az V. terasz magasságában húzódó felszínekről Bugya (2008) is említést tesz, azokat a Nyergesújfalú-Tokod között vastag löszréteggel megemelt magaspart maradványfelszíneivel azonosítja (Pécsi, 1959, p. 100). A magasabb régiókban már nem különíthetők el egyértelműen az egyes szintek a görbéről, Pécsi (1959) is széles kategória határokat közölt.

Az *5B. ábra* kompakt formában ad áttekintést a leválogatott felszínnek térbeli helyzetéről a folyó mentén, magasságáról (színskála) és gyakoriságáról (tónus). A beszűkülő ártér és a középső szakaszon hiányzó alacsonyabb terasz-szintek jól kivehetőek. Emellett leolvasható, hogy a magasabb régiókban fokozatosan kevesebb terasz-szerű felszín található, az elválasztó lejtők azonban hosszabbodtak. Ezen az ábrán is felfedezhetőek a potenciálisan az V. terasz-szinthez sorolható 200–220 m között elhelyezkedő maradványfelszínek. A terepi felmérés továbbra is a terasztérképezés kulcsfontosságú eleme, amelyet a GIS-alapú eljárás nem helyettesíthet. További kiegészítő térképekkel (földtan, hidro-geomorfológiai elemek) együtt alkalmazva azonban segítséget nyújt a terepbejárások tervezésében és a szakirodalmi adatok felülvizsgálatában.



5. ábra. A Központi-Gerecse területére vonatkozó terasz-szerű cellák magassági eloszlása összevetve az irodalomban közölt szintekkel (A), és a leválogatott cellák elhelyezkedése a folyó hossz-szelvénye mentén (B).

#### 4. Az eredmények összefoglalása és a kutatás további irányjai

A bemutatott kutatás feltárta a kvázi-globális digitális domborzatmodellek és rugalmas felszínelemző térinformatikai eljárások alkalmazhatóságának lehetőségeit és nehézségeit magyarországi geomorfológiai vizsgálatok során. Az elérhető GDEM-ek részletes áttekintése időszerű volt, és várhatóan támpontot nyújt a DMM felhasználók számára a megfelelő modell kiválasztásában. A szintvonalakból generált referencia DDM-ek használatával levezetett statisztikák alapján a modellek horizontális és vertikális pontossága jó egyezést mutat a szakirodalomban a nyílt térszínekre publikált mutatókkal, míg a vegetáció magasságtorzító hatásának mértéke is jól tükrözi az adatfelvételezési eljárások sajátosságait.

Geomorfológiai vizsgálatokban a 30 m cellaméretű SRTM1 modell egy jó kompromisszumnak bizonyult, mivel a nagyobb relief esetében a felszíni objektumok hatása már kevésbé zavaró, a domborzat részletei kellően jól reprezentáltak, a felszínformák nem torzultak. A modell relatív pontosságának javítása és a derivátumokra átvitt hibák mértékének csökkentése érdekében egy többlépcsős javítási folyamat összeállítása volt szükséges. Ennek az eljárásnak a legegyszerűbben kivitelezhető, mégis általánosságban minden GDEM javítására alkalmazható elemei a vízfelszínnek egységes magasságra hozása, a kiugró hibák és a zaj kiszűrése, valamint a kisebb erdőfoltok eltávolítása. Az ismertetett hibajavítási lépések leggyengébb pontja egyértelműen az összefüggő erdők magasságainak kezelése.

Annak ellenére, hogy maradtak még hibák az SRTM1 modellen, a szerző arra a következtetésre jutott, hogy a lehatárolt felszínforma elemek, az elkülönített geomorfológiai régiók és a leválogatott teraszmaradványok kielégítőek és hasznos információval szolgálnak a tradicionális térképek felülvizsgálatára és egységes kutatási eredmények előállítására. Továbbá az ingyenesen elérhető, egységes adatstruktúrát biztosító magasságmodell révén a geomorfológiai vizsgálatok kiterjeszhetőek a Kárpát-medence teljes területére.

Habár a „*geomorphon*” és „*GeoPAT*” eszköztár nem a hagyományos értelemben vett geomorfológiai térképeket (komplex szín- és jelrendszerrel rendelkező, a domborzatról, a formák kialakulásáról, földtani viszonyairól tájékoztató térkép) szolgáltat, ezek a módszerek egy lépéssel közelebb visznek a felbontástól



független, több-léptékű, automatizált geomorfológiai térképezéshez. A „*geomorphons*” eljárás tűnik a felszínforma térképezés új szabványának, objektív és összehasonlítható eredményeket szolgáltatva, de meghagyva a lehetőséget az alkalmazás-specifikus parametrizálásra is. Domsági és hegységi területeinkről választott példák részletesebb vizsgálata (pl. Keleti-Mecsek, Cserhát, Zalai-dombság) megerősíti, hogy a GeoPAT eljárással levezetett geomorfológiai régiók térképe jól reprezentálja a domborzati viszonyok változatosságát, mindemellett azonban előfordulnak hibásan besorolt egységek és a határok sem teljesen pontosak az 1 km-es cellaméret következtében.

A specifikus geomorfometriai elemzés a Gerecse északi előterében húzódó teraszfelszíneket is célozta, ahol az algoritmus jól teljesített az ártér és az alacsonyabb terasz-szintek lehatárolásában (II/a, II/b, III., IV.). A térinformatikai eljárás alátámasztani látszik az édesvízi mészkő borítás szerepét a teraszfelszínek megőrzésében, az eljárás legtöbb esetben kiválasztotta ezeket a cellacsoportokat. Emellett a lehetséges teraszfelszínek átfedést mutatnak az Almás-Táti-Duna-völgy településeinek beépített részével is. További potenciális teraszmaradványok a magasabb térszíneken is meghatározásra kerültek, azonban itt az eróziós folyamatok, a patakteraszok és hegyláb felszínek előfordulása, a csuszamlással átformált lejtők megnehezítik a szintek értelmezését és párhuzamosítását. A generált grafikonok és teraszmaradvány térkép megbízhatónak bizonyult, az eredmények jó egyezést mutatnak a létező geomorfológiai térképekkel, szakirodalmi adatokkal és más térinformatikai elemzések megállapításaival.

Az elvégzett elemzések átláthatóságának és megismételhetőségének érdekében a teljes munkafolyamat (a GDMEk összehasonlító elemzésétől az eredmények vizualizációjáig) a szabadon hozzáférhető GRASS GIS és R szoftverek felhasználásával történt. Emellett a saját fejlesztésű bővítmények forráskódja publikálásra került *GitHub*-on. Térinformatikai szempontból a gerinc-völgy távolság módszer és a terasz-elemző algoritmus implementálása jelen kutatás számottevő hozzájárulása a GRASS GIS domborzatelemző eszközkészletéhez.

## Publikációs lista

### *Az értekezés témájához kapcsolódó közlemények, publikációk*

1. Sărășan, A., **Józsa, E.**, Ardelean, A. C., & Drăguț, L. D. (2018). Sensitivity of geomorphons to mapping specific landforms from a digital elevation model: A case study of drumlins. *Area*, 51(2), pp. 257–267.
2. **Józsa, E.**, Fábíán, Sz. Á. (2017). Folyóvízi teraszok térképezése és elemzése térinformatikai módszerekkel a Gerecse északi peremén. In Szigyártó, I. L., Szikszai, A. (Szerk.), *XIII. Kárpát-Medencei Környezettudományi Konferencia*, Kolozsvár: Ábel Kiadó. pp. 90–95.
3. **Józsa, E.**, & Fábíán, Sz. Á. (2016). Az SRTM-1 felszínmodell korrigálása Magyarországra. *Természetföldrajzi Közlemények a Pécsi Tudományegyetem Földrajzi Intézetéből*, 5(1), pp. 13–22.
4. **Józsa, E.**, Fábíán, Sz. Á. (2016). Mapping landforms and geomorphological landscapes of Hungary using GIS techniques. *Studia Geomorphologica Carpatho Balcanica*, 50(1), pp. 19–31.
5. **Józsa, E.** (2016). Detailed hydrogeomorphic analysis in the Gerecse Mountains, Hungary. *Acta Universitatis Sapientiae Agriculture and Environment*, 8(1), pp. 63–74.
6. **Józsa, E.** (2015). An evaluation of EU-DEM and SRTM1 in comparison with ASTER GDEM, SRTM3 and reference DEMs – geomorphometric approaches. In Boda, J. (Szerk.), *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában: Térinformatikai Konferencia és Szakkiallítás VI. = Theory meets practice in GIS*. Debrecen: Debreceni Egyetemi Kiadó, pp. 117–125.
7. **Józsa, E.**, Kalmár, P. (2014). Assessing the applicability of EU-DEM dataset to landform classification using the geomorphons approach: the case study of the Eastern Mecsek Mountains region. *Cartographic Letters (Kartográfické listy)*, 22(2), pp. 90–101.
8. **Józsa E.**, Kovács, M. (2014). Az EU-DEM értékelése kelet-mecseki mintaterületen, különös tekintettel a geomorfológiai vizsgálatokban való alkalmazhatóságra. In Csiszár, I., Kómíves, P. M. (Szerk.), *Tavaszi Szél Konferenciakötet VII*. Debrecen: Doktoranduszok Országos Szövetsége; pp. 189–201.

9. **Józsa, E.**, Fábíán, Sz. Á., Kovács, M. (2014). An evaluation of EU-DEM in comparison with ASTER GDEM, SRTM and contour-based DEMs over the Eastern Mecsek Mountains. *Hungarian Geographical Bulletin*, 63(4), pp. 401–423.
10. **Józsa, E.**, Fábíán, Sz. Á., Varga, G., & Varga, T. (2014). Meredek lejtőkkel elválasztott sík felszínek domborzatmodellezésének sajátosságai dunai magaspartok példáján. *Modern Geográfia*, 9(2), pp. 1–20.
11. **Józsa, E.** (2013). A település és a domborzat viszonyának geoinformatikai alapú vizsgálata Bátán. *Természetföldrajzi Közlemények a Pécsi Tudományegyetem Földrajzi Intézetéből*, 2(1), pp. 21–36.

### *Az értekezés témájához nem kötődő publikációk*

12. Fábíán, Sz. Á., Kalmár, P., **Józsa, E.**, Sobucki, M. (2016). Hydrogeomorphic exploration of a local headwater stream in low mountainous environment following detailed field survey protocol (Mecsek Mountains, Hungary). *Revista de Geomorfologie* 18, pp. 70–82.
13. **Józsa, E.**, Szeberényi, J. (2016) Geomorfometriai vizsgálatok a tektonika domborzatra gyakorolt hatásainak feltárására börzsönyi mintaterületen. In Balázs, B. (Szerk.), *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában VII. = Theory meets practice in GIS*. Debrecen: Debreceni Egyetemi Kiadó, pp. 193–200.
14. Szeberényi, J., **Józsa, E.**, Fábíán, Sz. Á. (2016). A Visegrádi-szoros geomorfológiai szintrendszerének geoinformatikai vizsgálata. In: Pajtókné Tari, I., Tóth, A. (Szerk.): *Magyar Földrajzi Napok 2016: Konferenciakötet: VIII. Magyar Földrajzi Konferencia*. Eger: Magyar Földrajzi Társaság, pp. 220–228.
15. Kovács, I. P., Czígány, Sz., **Józsa, E.**, Varga, T., Varga, G., Pirkhoffer, E., Fábíán, Sz. Á. (2015). Geohazards of the natural protected areas in Southern Transdanubia (Hungary). *Dynamiques Environnementales – Journal international des géosciences et de l’environnement*, 35(1), pp. 96–110.