

Statisztikai lejtőprofil és a digitális magasságmodell-felbontás kapcsolatának vizsgálata

Demeter Gábor¹ – Szabó Szilárd² – Szalai Katalin³ – Püspöki Zoltán⁴

¹Debreceni Egyetem Természetföldrajzi és Geoinformatikai Tanszék, 4032 Debrecen, Egyetem tér 1. demetergg@freemail.hu

²Debreceni Egyetem Tájvédelmi és Környezetföldrajzi Tanszék, 4032 Debrecen, Egyetem tér 1. szszabo@delfin.unideb.hu

³Kodolányi János Főiskola, Turizmus Tanszék

⁴Debreceni Egyetem Ásvány- és Földtani Tanszék, 4032 Debrecen, Egyetem tér 1. puspokiz@puma.unideb.hu

1. Bevezetés, célkitűzés

A geológiai adottságok és a felszíni formakincs közötti összefüggés vizsgálata régóta áll a kutatások középpontjában (Gerasimov, 1946; Birot, 1958; Twidale, 1971, Scheidegger, 1980, 2001), Foglalkoztak a morfológiai paraméterek és a felszíni formakincs determinisztikus kapcsolatának meghatározásával és mérésével, mint például a vízhálózat-sűrűség, csapadék, relief és a kőzetkeménység összefüggéseinek számszerűsítésével (Gábris, 1987). E modell hátránya, hogy a kőzetkeménységet nem képes abszolút számokkal megadni, csupán relatív keménységüket skálázza, így az egyéb paraméterek és a kőzetkeménység közti korreláció rosszul kimutatható. Jelen tanulmány egy abszolút mérőszám és egy geoinformatikai adatbázis, egy digitális terepmodell és a belőle generált lejtőkategória-térkép segítségével vizsgálja a kőzetkeménység és a lejtőszög közötti statisztikai összefüggést.

Léteznek lejtőfejlődést szimuláló elméleti számítógépes modellek is (Telbisz, 1999), amelyek a kőzetek keménységének (eróziós ellenállásának), rétegvastagságának, rétegdőlésüknek figyelembe vételével inhomogén lejtőkön vizsgálják a felszín meredekségének időbeli alakulását és stabilitását. Ez utóbbi a lejtőfejlődés, felszínstabilitás szempontjából nagy jelentőségű, viszont pontszerű, lokális jellegű. Egy nagyobb terület adatbázison alapuló statisztikai elemzése szintén indokolt lehet, mind a lokálisan igazoltnak tekinthető eredmények kiterjesztése, mind a nagyobb térszínre általános érvényűnek elfogadott feltételezések igazolása miatt. A regionális léptékű elemzéshez ez esetben a mennyiségi vizsgálatok nélkülözhetetlen feltétele egy számítógépes adatbázis (Clayton, K.- Shamon, N., 1998).

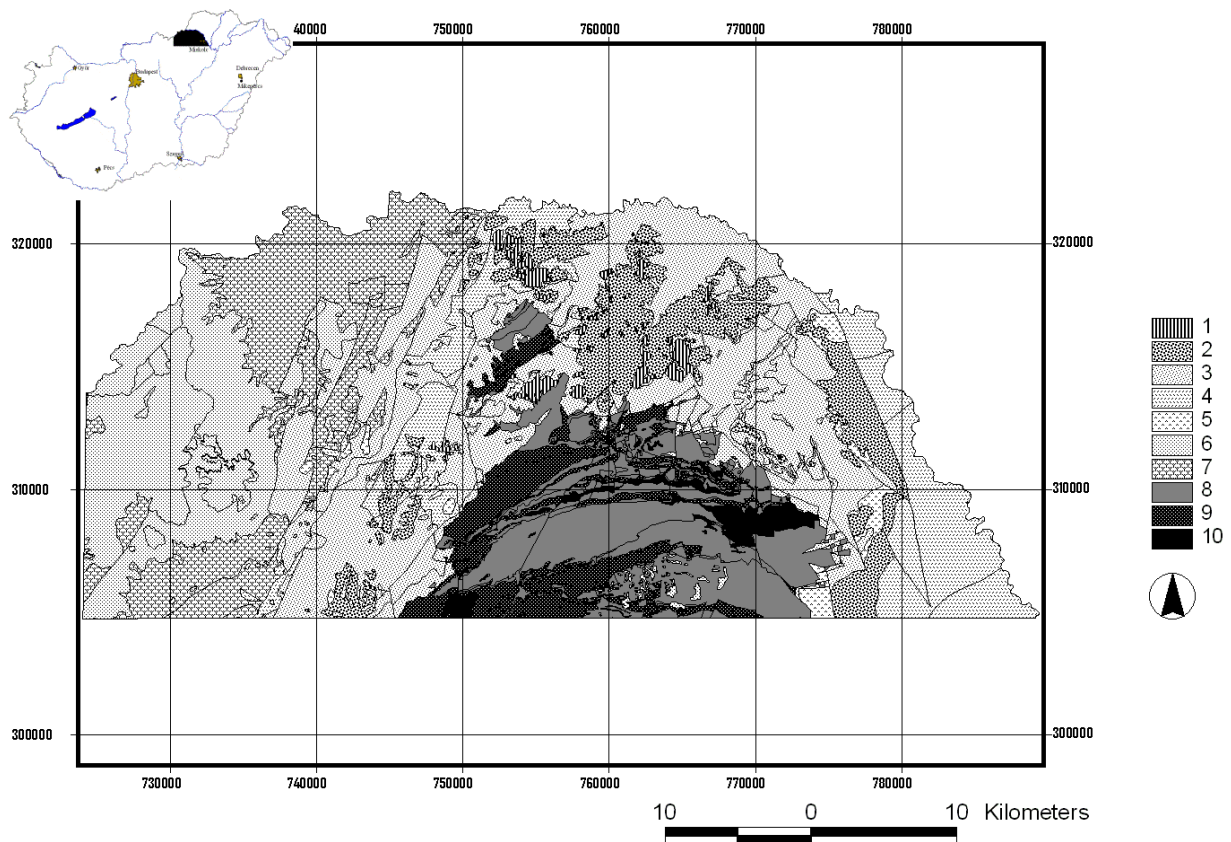
A legtöbb szerző (Selby, 1980; Centamore et al. 1996; Telbisz, 1999; Beavis, 2000; Scheidegger, 2002) egyetért abban, hogy a kőzetek ellenállóképessége döntő szerepet játszik a denudációs folyamatokban, és így a relief kialakításában. Litológiai paraméterként az egyirányú száraz nyomószilárdság (UCS) (pl. Yaşar-Erdogan, 2004), morfológiai paraméterként a lejtőmeredekség került kiválasztásra.

A mintaterület lehatárolása során egy változatos relieffel és a felszíni geológiai adottságokkal rendelkező térszín kiválasztása volt a cél, így a mintavétel kellően reprezentatív lehetett ahhoz, hogy az egyes litológiai típusokat összehasonlíthassuk. Korábbi munkánkban

(Püspöki et al., 2005) megállapítottuk, hogy létezik-e összefüggés a kiválasztott morfológiai és litológiai faktorok között, feltártuk az összefüggés minőségi és mennyiségi jellemzőit és vizsgáltuk az összefüggés gyakorlati (mérnöki) célú felhasználhatóságát, s bemutattuk, hogy mely statisztikai paraméterek tekinthetők a felszínelemzés érzékeny paramétereinek. Mivel az eredmények részben már közlésre kerültek, e munka a statisztikus felszínelemzés optimális körülményeinek meghatározását (adatok szűrése, DTM) és a különböző léptékű adatok megbízhatóságának vizsgálatát célozta meg (felbontás, általánosíthatóság). Fő célunk, hogy megállapítsuk a 25, az 50 és a 100 méteres felbontású digitális terepmodellekből származtatott lejtőmeredekség térképek milyen alapjául szolgálhatnak a geomorfológiai vizsgálatoknak. Hasonló, felbontás-vizsgálaton alapuló vizsgálatok csak korlátozott számban készültek (Szabó, 2006; Tamás, 2002), geológiai célzatú pedig nem lelhető fel.

2. Anyag és módszer

A mintaterület körülbelül 1500 km² kiterjedésű, magába foglalva a Bükk-hegység északi részét és északi hegylábi előterét a Sajó-allúviumig (**1. ábra**). A terület egy részén (Bükk és Upponyi-hegység) a kiemelt, paleo-mezozóos alaphegység kőzetei alkotják a felszínt. A mintaterület keleti felén önálló blokkot alkot a konszolidált paleogén kőzetekből álló Heves-Borsodi-dombság. A Darnó-vonalhoz kapcsolódó előtéri dombsági régiókat zömmel kevésbé konszolidált neogén tengeri üledékek alkotják (Tardonai-dombság). A három fő geológiai egységet felépítő formációk részesedése sorrendben: 21%, 29% és 50 %.



1. ábra. A vizsgálati terület egyszerűsített földtani térképe a kőzetfizikai kategóriák bemutatásával

Jelmagyarázat: 1: neogén andezit; 2: neogén homokkő; 3: neogén slír; 4: neogén aleurolit; 5: neogén tufa; 6: paleogén homokkő; 7: paleogén slír; 8: paleo-meozoos mészkő; 9: paleo-meozoos sziliciklaszt; 10: paleo-meozoos vulkanit

A földtani adatbázis alapját az Észak-Magyarországi Régió (1:100 000) digitális fedetlen földtani térképe (Budinszky-Szentpétery et al., 1999) jelentette. Az alaphegységi paleozoós és mezozoós kőzetek, a paleogén és neogén üledékes kőzetek 67 geológiai formációját kor, anyag, cementáltság és mikrorepedés-sűrűség alapján 10 nagyobb egységbe, *kőzetfizikai kategóriába* soroltuk. Országos Földtani és Geofizikai adattárból gyűjtött 351 UCS adat jelentette a kőzetfizikai adatbázist (Fodor és Kleb, 1986; Kleb és Vásárhelyi, 2003; Raincsák, 1992; 1993;1996). Az egyes kőzetfizikai kategóriákat alkotó formációk UCS átlagát területi kiterjedésükkel arányosan súlyozottan vettük figyelembe az csoportátlag-képzés során. Azt így kapott egy-egy kőzetfizikai kategóriához tartozó saját értéket vettük e tanulmányban szereplő független változóknak. (1. táblázat).

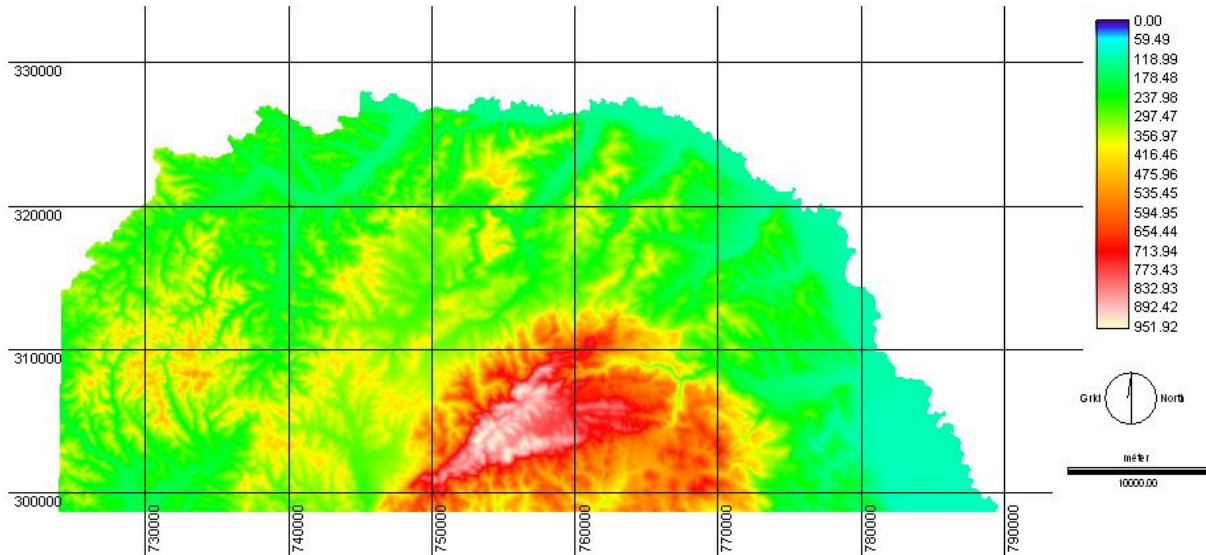
Közetfizikai kategória	MPa	lejtő meredekség (%)												
		4_6	6_8	8_10	10_12	12_14	14_16	16_18	18_20	20_22	22_24	24_26	26_28	
Neogén homokkő	4.8	6.28	8.2	9.99	10.99	10.5	10.02	8.76	6.93	5.45	4.24	3.39	2.65	
Paleogén slír	5	6.94	6.94	7.39	7.51	7.5	7.59	7.27	6.79	6.03	5.27	4.44	3.63	
Neogén aleurolit	6.5	8.43	9.35	10.58	10.54	9.51	8.3	7.36	5.79	4.56	3.55	2.68	1.98	
Neogén slír (homokos)	6.52	7.31	8.07	9.01	9.77	9.75	9.61	8.42	6.91	5.57	4.27	3.29	2.46	
Neogén tufa	7.29	9.93	10.15	10.71	10.49	9.89	9.15	7.35	6.3	4.82	3.91	3.03	2.35	
Neogén andezit	20	4.63	6.84	8.7	9.77	9.64	9.55	8.66	7.73	6.49	5.18	4.11	3.51	
Paleogén homokkő	35	3.57	3.94	4.52	4.86	5.14	5.43	5.65	5.9	6.08	6.14	6.04	6.05	
Paleo-mezozóos sziliciklaszt	86	2.34	2.82	3.34	3.92	4.32	4.69	5.12	5.57	5.64	5.95	5.91	5.93	
Paleo-mezozóos mészkő	98	4.17	4.66	5.04	5.33	5.72	5.94	6.18	6.21	6.17	5.91	5.44	5.04	
Paleo-mezozóos vulkanitok	150	2.22	2.96	3.81	4.97	5.86	6.37	6.91	6.29	6.35	6.83	6.67	6.33	

Közetfizikai kategória	MPa	lejtő meredekség (%)														
		28_30	30_32	32_34	34_36	36_38	38_40	40_42	42_44	44_46	46_48	48_50	50<			
Neogén homokkő	4.8	2.1	1.74	1.25	0.9	0.6	0.38	0.27	0.15	0.1	0.05	0.04	0			
Paleogén slír	5	2.9	2.19	1.53	1.06	0.7	0.44	0.3	0.19	0.11	0.06	0.03	0			
Neogén aleurolit	6.5	1.54	1.12	0.83	0.56	0.4	0.24	0.16	0.08	0.06	0.02	0.02	0			
Neogén slír (homokos)	6.52	1.81	1.29	0.89	0.58	0.36	0.2	0.11	0.06	0.02	0.01	0.01	0			
Neogén tufa	7.29	1.79	1.08	0.88	0.64	0.43	0.19	0.15	0.11	0.07	0	0	0			
Neogén andezit	20	3.14	2.26	1.65	1.17	0.84	0.54	0.38	0.23	0.09	0.06	0.08	0			
Paleogén homokkő	35	5.74	5.35	4.89	4.17	3.34	2.61	1.92	1.36	1	0.68	0.47	1			
Paleo-mezozóos sziliciklaszt	86	5.83	5.55	5.16	4.84	4.34	3.84	3.09	2.37	1.83	1.36	1.05	2.5			
Paleo-mezozóos mészkő	98	4.44	3.89	3.49	3	2.54	2.09	1.68	1.38	1.13	0.95	0.88	4			
Paleo-mezozóos vulkanitok	150	5.74	5	4.05	3.12	2.96	2.53	1.85	1.39	1.18	1	0.81	2.5			

1. táblázat. A lejtőkategória (%) értékek gyakorisága (%) közetfizikai kategóriák szerint (25x25m/pixel felbontás esetén)

A terület felső-miocéntől átmeneti megszakitásokkal, de eredőjében folyamatosan emelkedett, s az elmúlt 5 millió év során a harmadidőszak vége óta a denudáció határozta meg az egész terület arculatát. Mivel célunk az eróziós ellenállás és lepusztulási folyamatok (lejtőfejlődés) kapcsolatának vizsgálata volt, a *200 m tengerszint alatt fekvő, jelentős részben akkumulációs térszíneket kihagytuk a statisztikai vizsgálatból. A 4%-alatti meredekségű lejtőket szintén figyelmen kívül kellett hagynunk*, mivel részint akkumulációs (pl. terasz), részint elegyengetett maradvány felszínnek tekinthetők („trópusi tönk”, „pediment”).

A digitális topográfiai adatbázis alapját az 1:50000 léptékű térképek 10 m-es szintvonalai jelentették, a domborzatmodell (DTM) krigeléssel készült, a szintvonalak digitalizálása a GeoMedia 4.0, a krigelés a Surfer for Windows 8.0. segítségével (**2. ábra**).

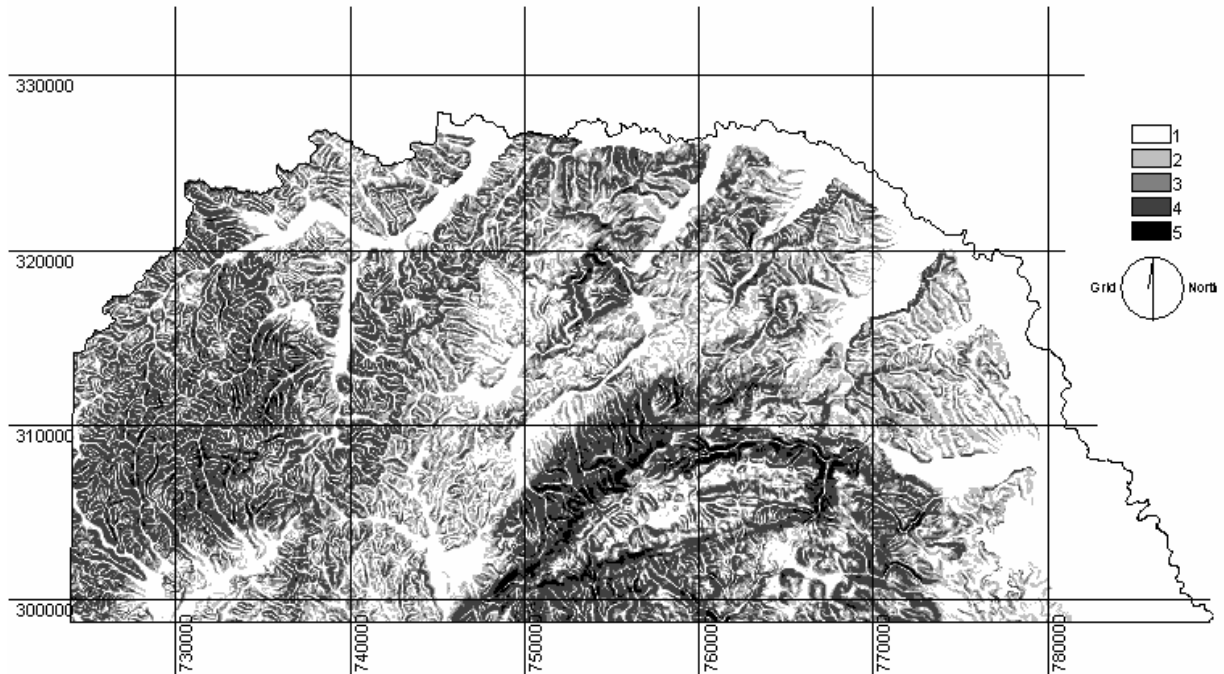


2. ábra. A vizsgálati terület digitális terepmodellje

Három topografikus modell készült el 25x25, 50x50 és 100x100 m/pixel felbontásban. A pixelek száma rendre 2.373.000, 593.000 és 148.000 volt. A lejtőkategória térképek a DTM-ből készültek IDRISI 32R2 szoftver segítségével mind a három felbontásban. A statisztikai analízist SPSS 11.0 és MS-Excel szoftverekkel végeztük. A leolvasás 1%-onként történt. A 4% alatti lejtők és 200 m alatti térszínek kihagyása mintegy 10%-os adatvesztést jelentett, a paleogén slírek, neogén aleuritok és neogén slírek esetében a 10%-ot meg is haladta (13%, 12%), részben kisebb eróziós ellenálló képességüknek köszönhetően, részben mert a 200 m alatti térszínek szálkőzeteit is ezek a formációk alkották. A területi eloszlás elemzésekor a következő tényezőket vizsgáltuk meg, melyek később az analízis független és függő változóit adták.

A. A közetfizikai kategóriák területi kiterjedése (**1. ábra**)

B. A különböző meredekségű területek (lejtőszögek) elhelyezkedése (2%-onként csoportosítva) (**3. ábra**).



3. ábra. A vizsgálati terület lejtőkategória térképe (magyarázatot lásd a szövegben)
Jelmagyarázat/Legend: 1: 4-10 %; 2: 10-16 %; 3: 16-22 %; 4: 22-44 %; 5: 44 % fölött

Az adatbázisban így minden egyes pixelhez rekordként tartozott egy közt fizikai paraméter érték (név és UCS értéke számmal kifejezve) és egy magasság, illetve lejtőmeredekség-érték. A két fedvény alapján lehetőség nyílt az egyes közt fizikai kategóriákon belüli lejtőgyakoriságok meghatározására. 4 petrofizikai kategóriában 300 000 pixel felett volt a rekordok száma, míg háromban 30000 és 100000 között (**2. táblázat**). 50x50 m/pixel és 100x100-as felbontás esetén a rekordok száma értelem szerűen az eredeti 1/4-ére illetve 1/16-ára csökkent.

Kőzetfizikai kategória	MPa	lejtő meredekség (%)					teljes terület km pixelszám
		4_10	10_16	16_22	22_44	44<	
Neogén homokkő	4.8	24.47	31.51	21.15	17.72	0.2	125.65 201040
Paleogén slír	5	21.28	22.6	20.09	22.67	0.2	188.68 301888
Neogén aleurolit	6.5	28.36	28.35	17.71	13.14	0.1	71.27 114032
Neogén slír (homokos)	6.52	24.4	29.14	20.91	15.31	0.04	335.47 536752
Neogén tufa	7.29	30.79	29.53	18.47	14.56	0.07	20.94 33504
Neogén andezit	20	20.17	28.95	22.88	23.01	0.25	19.66 31456
Paleogén homokkő	35	11.13	15.43	17.63	47.61	2.86	222.68 356288
Paleo-mezozóos sziliciklaszt	86	8.5	12.93	16.33	52.83	7.05	99.34 158944
Paleo-mezozóos mészkő	98	13.88	16.99	18.55	38.91	7.02	191.43 306288
Paleo-mezozóos vulkanitok	150	9	17.2	19.55	46.46	5.31	23.32 37312
Total							1299 2078400

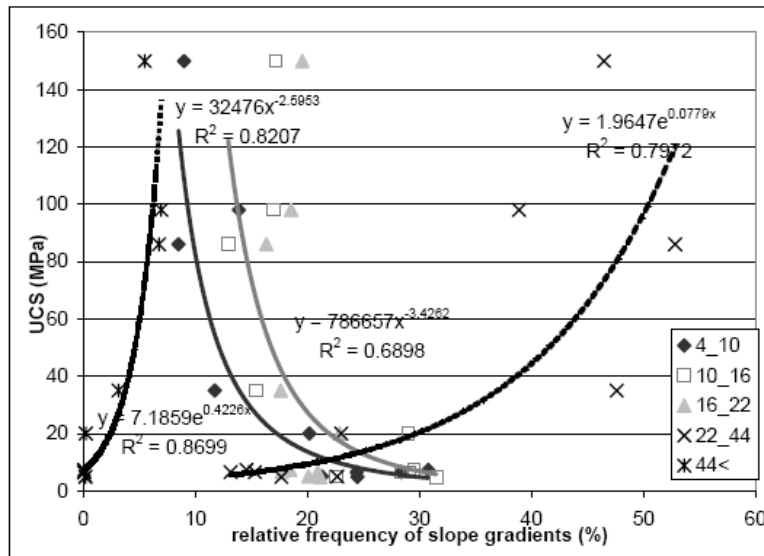
2. táblázat. A kőzetfizika-érzékeny lejtőkategória (%) értékek relatív gyakorisága (%) kőzetfizikai kategóriák szerint (25x25 m/pixel felbontás esetén)

A lejtőmeredekség %-ban kifejezett gyakorisági értékeit a **1. táblázat** egyes sorai tartalmazzák. A továbbiakban ezeket a normált, 100%-ra számított adatokat használtuk. (Az oszlopokon esetében az adatok nem normáltak, így például összehasonlítani a neogén tufák és neogén aleuritok részesedését a 4-6%-os lejtőkategória oszlopban természetesen értelmetlen).

3. Eredmények, diszkusszió

A kőzetfizikai paraméterek és a lejtőmeredekség közti összefüggés

A lejtőmeredekséget a kőzetkeménység függvényében ábrázolva, majd az egyes lejtőkategóriák eloszlását, trendjét vizsgálva a következő eredményre jutottunk (**4. ábra**). A regresszió-analízis a gyakorisági értékek és az UCS között szignifikáns korrelációt mutatott ($R^2 > 0,8$) az igen kicsi és a nagy lejtőmeredekség esetében, kevéssé szoros összefüggést a köztes értékek esetén. A 16%-nál kisebb meredekségű lejtők esetében a regressziós görbe hiperbolikus (hatvány), míg a 22% feletti meredekség esetében logaritmikus volt. A 16-22% közötti meredekség esetén a trendvonal alacsony R^2 értéket mutatva nem mutatta a fenti két görbe egyikének jellegzetességeit sem. *Azaz morfológiai szempontból a 16-22% közötti meredekségű lejtők gyakorisága nem függ a kőzet típusától, ezen intervallum szinte mindegyik kőzetfizikai kategóriából 20%-kal részesedik. A 16-22% közötti lejtők így nem adnak tájékoztatást a kőzet eróziós ellenállásáról.*



4. ábra. Az alapkőzet UCS értéke a kőzetfizika-érzékeny lejtőkategória intervallumok gyakoriságának függvényében (invertált diagram)

A fenti eredmények alapján megkíséreltünk definiálni olyan lejtőkategória intervallumokat, melyek elsősorban a kőzet eróziós ellenállásától (pontosabban az ezt tükröző UCS értéktől) függenek. Az osztályzáshoz az R^2 értékek nagyságát és szimmetrikus eloszlását használtuk. Az így kialakított kőzetfizika-érzékeny lejtőkategória-intervallumok jó egyezést mutatnak a mezőgazdaságban használatos felosztással (0-5%, 5-12%, 12-17%, 17-25%, 25%<), jóllehet utóbbi a területhasználat és a talajvédelem gyakorlati szempontú megközelítésén alapszik. A korreláció az utóbbi beosztás alkalmazása esetén is erősnek bizonyult, így a korábban készült adatbázisok és lekérdezések is használhatók a következőkben leírt vizsgálatok és számítások elvégzésére.

Ezt követően állítottuk elő a fenti diagram mérnöki alkalmazásnak jobban megfelelő inverzét, a lejtőkategóriát tekintve független változónak (Williams, 1983). Megállapítható, hogy a két szélső kategória (4-10% és 44%<) gyakorisági értékei önmagukban is jól szétbóják a kis és nagy keménységű kőzetek a lejtőkategóriák gyakoriságát illetően. A két érték hányadosa jó morfológiai indexe lehet az egyes kőzeteknek. A két görbe egyenletébe behelyettesítve az ismeretlen UCS-sel bíró kőzet 4-10% illetve 44%< lejtőinek relatív gyakoriságát, majd a kapott eredmény átlagát véve az UCS értékekhez közelítő értékeket kapunk. 6 MPa alatt és 86 MPa felett a képlet nem tükrözi a valóságot. Az összefüggés segítségével, az adott kőzeten megjelenő lejtőkategória értékek gyakorisági eloszlásának ismeretében megbecsülhető egy kőzetfizikai kategória ill. kőzettípus várható UCS értéke, már a mechanikai vizsgálatok elvégzése előtt. A fordított eset is igaz, vagyis az UCS érték alapján becsülhető az adott kőzet várható állékonysága, azaz lejtőkategória-értékeinek várható gyakorisági megoszlása.

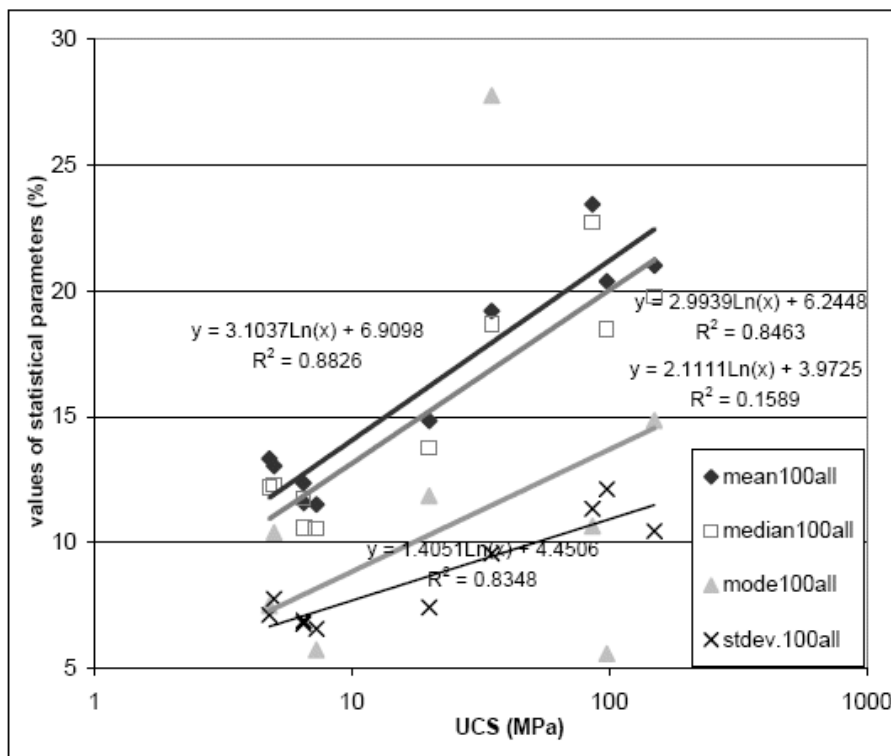
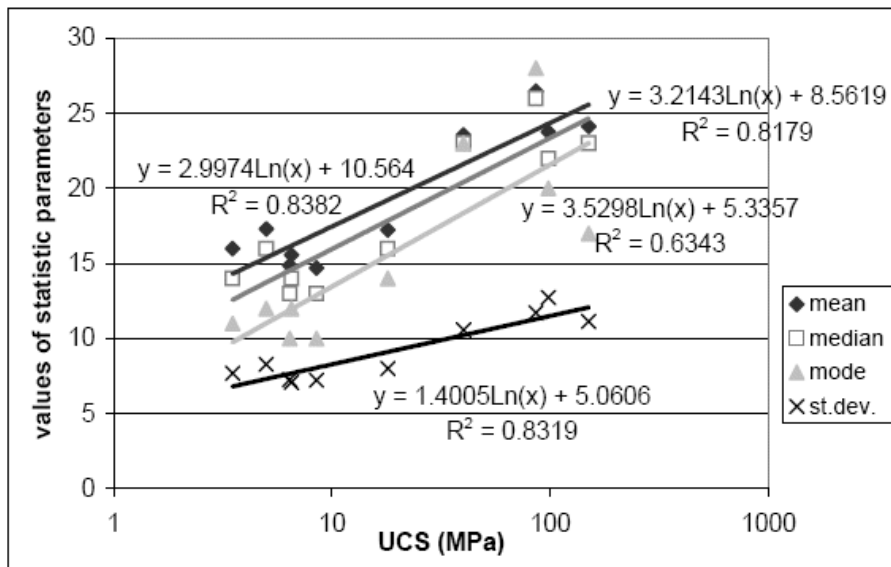
A felbontás és a statisztikai paraméterek szerepe a felszínelemzésben. Az alapadatok relevanciája

*Az UCS és a kőzetfizika-érzékeny lejtőkategória intervallumok közötti korreláció egyformán erősnek bizonyult 25x25m/pixel és 50x50 m/pixel felbontás esetében, de 100x100-as felbontásnál a koefficiens értékei lecsökkentek. Ez annak köszönhető, hogy a kevésbé részletes 100 m felbontás esetében a meredekebb lejtők részaránya 5-7%-kal csökken, míg a kevésbé meredek lejtőké növekszik. Neogén tufák esetében például a legkevésbé meredek lejtők részaránya 30,8%-ról 36,6%-ra nőtt (**3. táblázat**). Ez utóbbi felbontás tehát nem ajánlott geomorfológiai és felszínelemzési célokra.*

Kőzetfizikai kategória	MPa	pixelméret		
		25*25m	50*50m	100*100m
Neogén homokkő	4.8	24.47	25.44	29.15
Paleogén slír	5	21.28	22.15	25.83
Neogén aleurolit	6.5	28.36	29.55	34.43
Neogén slír (homokos)	6.52	24.40	25.35	29.05
Neogén tufa	7.29	30.79	32.30	36.61
Neogén andezit	20	20.17	20.63	24.40
Paleogén homokkő	35	11.13	12.40	14.74
Paleo-mezozóos sziliciklaszt	86	8.50	8.79	10.16
Paleo-mezozóos mészkő	98	13.88	14.32	16.34
Paleo-mezozóos vulkanitok	150	9.00	9.20	11.80

3. táblázat. A 4-10%-os lejtőkategória relatív gyakorisága különböző felbontások esetén

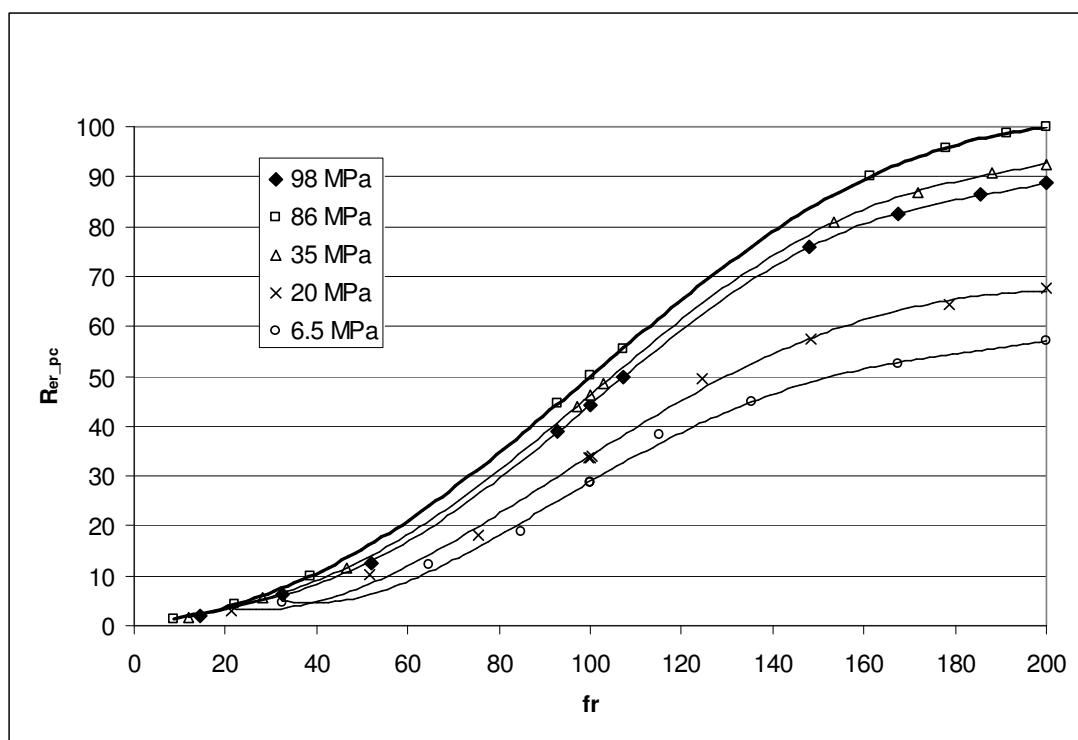
Az önellenőrzés igen fontos, hiszen hiába van hatalmas adatbázisunk, s gyártunk DTM-et, ha az adatok eloszlása nem megfelelő. A rossz adatszerkezet, vagy eloszlás, a rosszul kiválasztott változók miatt következtetéseink relevanciája is megkérdőjeleződhet. Az UCS és a lejtőgyakorisági értékek eloszlására jellemző szórás, módusz, medián és átlag között szorosnak bizonyult a korreláció. Az utóbbi három paraméter esetében a szemilogaritmus skálán ábrázolt regressziós görbék hasonlóak, alátámasztva feltételezésünket, hogy az eloszlások normálisak, és hogy a kőzet ellenálló képességének növekedésével a meredekebb lejtők válnak dominánssá (azaz adathalmazunk és a mintaterület-választás nem cáfolja e munkahipotézist). Az adatok normalitását Kolmogorov-Smirnov-próbával is ellenőriztük, mely igazolta a korrelációs számítás nyugvó eredményeket. A szórás szintén növekszik a keményebb kőzetek irányában, ami ellentmond a várt trendnek, egybeesik viszont azzal a megfigyeléssel, hogy 86 MPa nyomószilárdság fölött az UCS és a lejtőkategória eloszlások között nem mutatható ki egyértelmű összefüggés (a tektonizáltság és a mikrorepedés-sűrűség lesz az, ami befolyásolhatja, leronthatja a kemény kőzetek esetében az ellenállóképességet). *A felbontás növelésével a fenti korrelációk gyöngülnek*, ami különösen a 100 m felbontás esetén jelzi, hogy nem alkalmazható nagy területek geológiai-morfológiai elemzésére (**5. ábra**).



5. ábra. A lejtőkategória eloszlások statisztikai paramétereit és az alapkőzet UCS értéke közötti összefüggés 25x25 és 100x100 m/pixel felbontás esetén

A statisztikus lejtőprofil és relatív eróziós ellenállás meghatározása

A fent definiált kőzetfizika-érzékeny lejtőkategória intervallumok (4-10 %, 10-16 %, 16-22 %, 22-44 %, 44 %<) meredeksége és relatív gyakoriságuk egyfajta kumulatív görbéként is értelmezhetők. Ideális lejtőt feltételezve, mely rendelkezik egy domború és egy homorú szakasszal és egy inflexiós ponttal, mely egyben szimmetria középpont is előállíthatunk egy ideális lejtőprofil (6. ábra). Megismételve ezt az eljárást minden egyes kőzetfizikai formáció esetében, majd a legkevésbé erodálható, legmeredekebbnek adódó ideális lejtőforma eróziós ellenállását 100%-nak tekintve, meghatározható a többi kőzet relatív eróziós ellenállása.



6. ábra. A relatív eróziós ellenállás meghatározása statisztikai lejtőprofil készítésével

Egy adott petrofizikai kategória (pc) eróziós ellenállásának (r_{er}) egyenlete a következő:

$$r_{er_pc} = \sum_{i=1}^5 (fr_i \times tg \alpha_i)$$

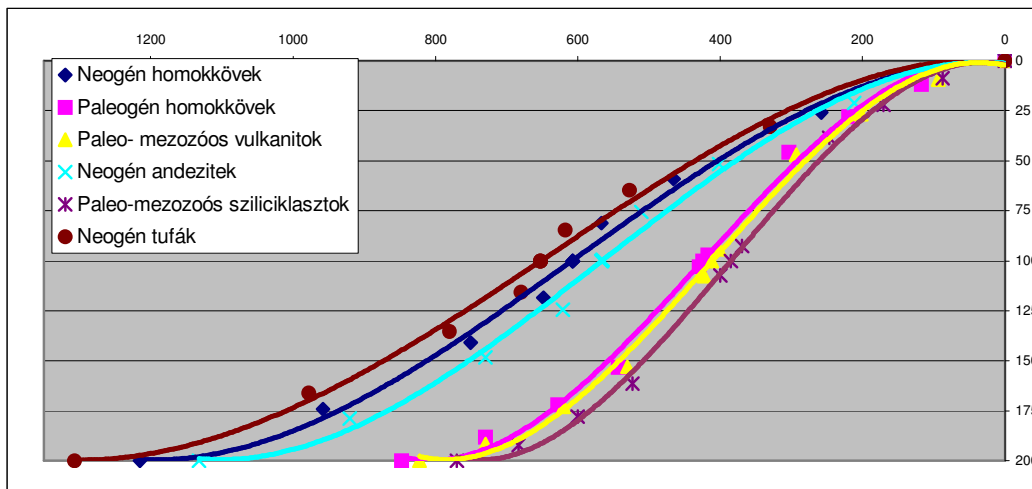
Ahol:

fr_i : egy adott lejtőkategória intervallum %-ban kifejezett, dimenzió nélküli relatív gyakorisága
 α_i : minden egyes lejtőkategória intervallum felső értéke (fokban megadva).

A r_{er_pc} egy dimenzió nélküli szám. Egy adott kőzetfizikai kategória relatív eróziós ellenállásának (r_{er_pc}) meghatározásakor a legnagyobb ellenállású kőzet r_{er_pc} értékét 100 %-nak tekintjük ($r_{er_max}=100$).

Fontos megjegyezni, hogy eddigi statisztikai vizsgálataink során – mivel egy eredetileg háromdimenziós felszín síkvetületét képeztük a lejtőmeredekségek kartogramon való megjelenítésével – a meredek lejtőkre, éppen meredekségük miatt kevesebb pixelszám esett (5%), ami azt jelenti, hogy ezek tényleges hosszukhoz képest a kis lejtésű területekkel szemben alulreprezentáltak a statisztikai sokaságban. Ennek részleges kompenzációját jelenti a statisztikus lejtőprofil megrajzolása, mely kiegyenlíti a fentebbi aránytalanságot azzal, hogy a relatív gyakoriságok tangensével számol, így tényleges hosszt rendel a százaléktértekhez.

Az összefüggés szintén alkalmazható egy terület lepusztulási viszonyainak vizsgálatára (7. ábra.). Ez esetben az eredetileg statisztikus-matematikai profilt megint valós helyzetre alkalmazzuk: *azonos kezdőmagasságú egykori lepusztulási szintet*, homogén, ideális lejtőt feltételezve a völgytalp puha kőzetek esetében jóval szélesebb, a lejtőoldal ellaposodó lesz. (Az első esetben az *erózióbázist tételeztük fel közösnek*).



7. ábra. A völgszélesség és a völgyhálózat regressziójának összefüggése a kőzetek keménységével

4. Konklúziók

1. Korreláció mutatható ki az egyirányú nyomószilárdság (UCS) és a lejtőmeredekség relatív gyakorisága (rf) között. A 16-22 % közötti átmeneti értékek esetében szoros kapcsolat nem mutatható ki, ezek kőzet-, méretarány- és felbontásfüggetlenek.
2. A kőzetfizika-érzékeny lejtőkategóriái a következőképpen határozhatók meg: 4-10 ($R^2 > 0,8$), 10-16 ($0,8 > R^2 > 0,6$), 16-22, 22-44 ($0,8 > R^2 > 0,6$) és 44 % fölött ($R^2 > 0,8$).
3. Az alapkőzet egyirányú nyomószilárdsága meghatározható az UCS/rf összefüggés 4-10 és 44% fölötti lejtőkategória-intervallumokra vonatkozó egyenleteinek alapján számított UCS értékek átlagaként. Az összefüggés 6 és 86 MPa értékek között tűnik alkalmazhatónak ($R^2 = 0,97$),

4. Az elemzés rávilágított, hogy szoros összefüggés mutatható ki a lejtőkategória értékek eloszlásának módusza, átlaga és mediánja ill. az alapkőzet UCS értéke között.
5. A statisztikus lejtőprofil tanulmányban megadott szerkesztési módjával meghatározható egy terület közetfizikai kategóriának relatív eróziós ellenállása.
6. A különböző felbontások esetén történt összehasonlító vizsgálatok eredménye szerint a statisztikus vizsgálatok eredményei 25 ill. 50 m felbontások esetén nem függenek a felbontás mértékétől, a 100x100 m/pixel felbontás azonban nem tűnik megfelelőnek a statisztikus felszínelemzéshez.

Irodalom

- BEAVIS, S.G. 2000. Structural controls on the orientation of erosion gullies in mid-western New South Wales, Australia. *Geomorphology* 33, 59-72.
- BIROT, P. 1958. *Morphologie Structurale*. Presses univers, Paris, 464 pp.
- BUDINSZKY-SZENTPÉTERY, I., KOZÁK, M., LESS, GY., MÜLLER, P., PELIKÁN, P., PENTELÉNYI, L., PEREGI, ZS., PRAKFAI, P., PÜSPÖKI, Z., RADÓCZ, GY., TÓTH-MAKK, Á., FÖLDESSY, J., ZELENKA, T. 1999. Geological map of the North Hungarian Mountain Range (without Quaternary formations) scale: 1:100000. digital database of the Geological Institute of Hungary
- Centamore, E., CICCACCI, S., DEL MONTE, M., FREDI, P., LUPA PALMIERI, E. 1996. Morphological and morphometric approach to the study of the structural arrangement of northeastern Abruzzo (central Italy). *Geomorphology* 16, 127-137.
- CLAYTON, K., SHAMON, N. 1998. A new approach to the relief of Great Britain I. The machine-readable database. *Geomorphology* 25, 31-42.
- FODOR, T., KLEB, B. 1986. Magyarország mérnökgeológiai áttekintése. Műszaki Könyvkiadó Budapest, 199 pp.
- GÁBRIS, GY. 1987. Néhány gondolat a vízhálózatsűrűséget meghatározó tényezők vizsgálatáról. *Földrajzi Közlemények* 35, 26-34.
- GERASIMOV, I.P. 1946. Experience with geomorphological interpretation of the general scheme of geological structure of URSS. *Probl. Fizich. Geogr.* 12, 89-115.
- KLEB, B., VÁSÁRHELYI, B. 2003. Test results and empirical formulas of rock mechanical parameters of rhyolitic tuff samples from Eger's cellars. *Acta Geologica Hungarica* 46/3, 301-312.
- PÜSPÖKI, Z., SZABÓ, SZ., DEMETER, G., SZALAI, K., MCINTOSH, R. W., VINCZE, L., NÉMETH, G., KOVÁCS, I. 2005. The Statistical Relationship between Unconfined Compressive Strength and the frequency distributions of slope gradients. – A Case Study in Northern Hungary. *Geomorphology*, 71, 424-436.
- RAINCSÁK, GY. 1992. Földtani formációk műszaki földtani jellemzése: harmadidőszakoligocén II. kézirat, Országos Földtani és Geofizikai Adattár
- RAINCSÁK, GY. 1993. Földtani formációk műszaki földtani jellemzése: kainozoikum: miocén. kézirat, Országos Földtani és Geofizikai Adattár
- RAINCSÁK, GY. 1996. Földtani formációk műszaki földtani jellemzése: miocén korú kis és közepes szilárdságú képződmények I-IV. kézirat, Országos Földtani és Geofizikai Adattár

- SCHEIDEGGER, A.E. 1980. The orientation of valley trends in Ontario. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 24(1), 19-30.
- SCHEIDEGGER, A.E. 2001. Surface joint systems, tectonic stresses and geomorphology: a reconciliation of conflicting observations. *Geomorphology* 38, 213-219.
- SCHEIDEGGER, A.E. 2002. Morphometric analysis and its relation to tectonics in Macronesia. *Geomorphology* 46, 95-115.
- SELBY, M.J. 1980. A rock mass strength classification for geomorphic purposes with tests from Antarctica and New Zealand. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 24, 31-51.
- SZABÓ G. 2006. Kartográfiai és térinformatikai módszerek pontosságának földrajzi szempontú vizsgálata. PhD értekezés, Debrecen, 143.
- TAMÁS J. 2002. A talajkörnyezet digitális térbeli becslésének módszerei. *Talaj és Környezet, DE ATC – MTA Talajtani és Agrokémiai Bizottsága*, 152-160.
- TELBISZ, T. 1999. Számítógépes szimuláció a felszínalakokban. *Földrajzi Közlemények* 151-162.
- TWIDALE, C.R. 1971. *Structural Landforms*. The M.I.T. Press, London, 247 pp.
- WILLIAMS, G.P. 1983. Improper use of regression equations in earth sciences. *Geology* 11, 195-197.
- YAŞAR, E., ERDOĐAN, Y. 2004. Estimation of rock physicomchanical properties using hardness methods. *Engineering Geology* 71, 281-288.