

KARROK MODELLEZÉSE

TELBISZ TAMÁS⁸⁵

MODELLING OF KARREN FORMS

Abstract: In this paper a short review is given about the know-how of karren form modelling and some examples of these models are also presented. Karren can be modelled via two different approaches. First, by empirical methods such as the creation of high-resolution morphological maps or the measurement of form density and specific width along cross-sections. These methods combined with GIS-analysis led to the use of digital elevation models (DEMs) in karren form studies. Denudation scenarios of a rinnenkarren covered bare rock surface are discussed below as an example. Secondly, there is a logically reversed way of modelling karren forms. Theoretical models aim at explaining the karst denudation based on physical and chemical laws and geometrical considerations. Analytical solutions are useful mainly in estimating denudation rates. However, computer simulations are more flexible in modelling the shape or planform of different karren types. Simulated limestone pavement and grooves are presented below as an illustration.

A KARROK NÉPSZERŰSÉGE

Derek Ford szerint a karsztos tájak „diagnosztikus felszínformái” a dolinák (**Ford, D. – Williams, P.** 1989). Ez kétségkívül igaz, hiszen a karsztos lepusztulást is irányító víz más tájaktól eltérő, sajátos levezetési módját ragadja meg a fenti állítás, azonban a karsztvidékeken járva legalább ennyire szembeötlő az oldásos kisformák hihetetlen változatossága. Talán elsősorban ennek köszönhető, hogy számtalan alaki és genetikai osztályozás született már a karrok tudományos leírásával kapcsolatban (pl. **Cvijič, J.** 1924, **Bögli, A.** 1960, **Ford, D. – Williams, P.** 1989, **Balázs D.** 1990, **Zámbó L.** 1993, **Veress M.** 2003, **Zseni A.** 2004). A karrok kialakulásának és továbbfejlődésének vizsgálatában, a formák pontosabb jellemzésében fontos szerep jut(hat) a karrok modellezésére irányuló kutatásoknak is. Ezeket két nagy csoportba sorolhatjuk:

1. A valós karrfelszínek modellezésére irányuló kutatások. Ebbe a kétségkívül bővebb csoportba sorolhatjuk azokat a törekvéseket, amelyek a karrformák minél alaposabb felmérését, térképezését és az így nyert adatokból leszűrt statisztikai-matematikai modellek megalkotását tűzik ki célul. Viszonylag új megközelítés ezen a csoporton belül a térinformatikai módszerek alkalmazása.

2. A karrok lepusztulásának elméleti modellezése. Ennél a módszernél az az alapelv, hogy a karrosodás folyamatait fizikai és kémiai törvényszerűségekből kiindulva próbálják meg leírni. Ezen belül léteznek analitikus (tisztán matematikai

⁸⁵ Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természetföldrajzi Tanszék. 1114 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C. E-mail: telbisztom@ludens.elte.hu

levezetésekben alapuló) megközelítések és számítógépes szimulációkat is felhasználó kísérletek.

A továbbiakban a fenti tagolás szerint kívánok bemutatni néhányat a karrok modellezésében eddig elért eredményekből.

VALÓS KARRFELSZÍNEK MODELLEZÉSE

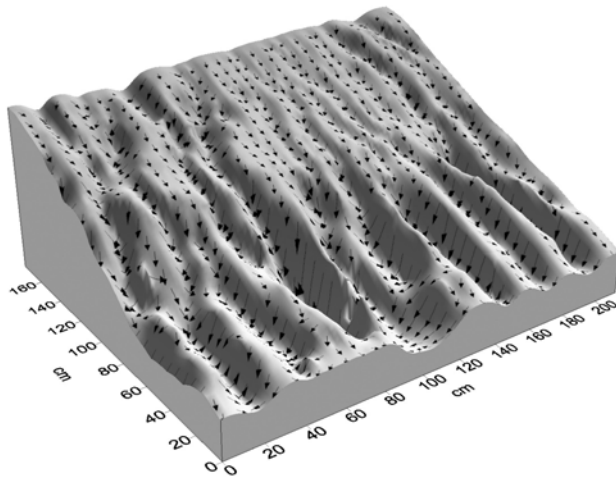
A térkép a valóság egyik régóta alkalmazott modellje, jóllehet a kisformákra vonatkozó használata általában kevésbé megszokott. Azonban a karrokról készültek már igen részletes felbontású térképek aprólékos terepi felvételezések alapján: *Szunyogh G. et al.* (1998) egy nagyobb kiterjedésű karrvályúrendszer térképét készítette el, *Veress M. – Barna J.* (1998) pedig meanderkarrokról szerkesztett morfológiai térképeket mutattak be.

A karrosodó sziklafelszínek morfometriai alapú modellezéséhez használható módszer, hogy egy adott szelvény mentén felmérjük az egyes karrformák szélességét, melyből a fajlagos leoldódást úgy kaphatjuk meg, hogy az összegzett szélességet elosztjuk a szelvény teljes hosszával (*Veress M. et al.* 2001). Ennek területi megfelelője, ha egy jól lehatárolható karros térszínen a karrformák összterületét osztjuk a karrosodó egység teljes területével (*Szabó L.* 2001). Ez utóbbi elv a felszín lefényképezésével és a felvételek fotogrammetriai-térinformatikai kiértékelésével lényegesen gyorsítható, ill. pontosítható

(*Tóth G. – Schlöffner R.* 2004, *Tóth G. et al.* 2004).

A hagyományos térképek mellett a karrok modellezésében megjelentek a digitális domborzatmodellek (DDM) is (*Telbisz T.* 2004, *1. ábra*). Ezek segítségével nemcsak a karrok ábrázolási lehetőségei bővülnek, hanem újszerű számításokra is lehetőség nyílik.

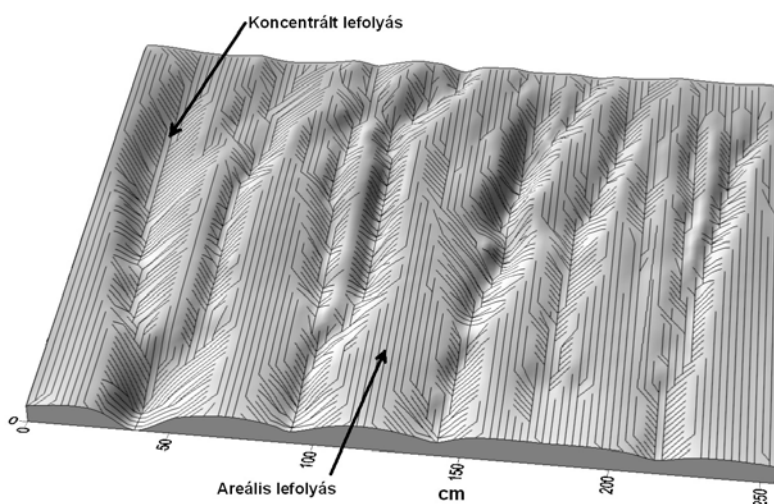
A digitális domborzatmodellek alapján kiszámítható például az egyes karrformák térfogata (*Telbisz T.* 2004), amelyből a felszín lepusz-



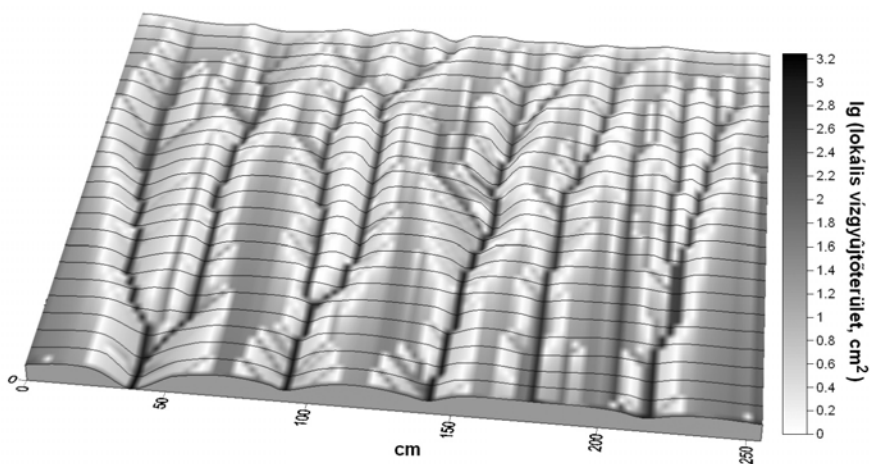
1. ábra Egy dachsteini rétegfejen kialakult karrvályús felszín 3D-s, árnyékolásos képe a lefolyási irányt jelző nyilakkal (a nyilak mérete a meredekséggel arányos)

Figure 1 3D, shaded image of rillenkarren evolved on a rock basset (Dachstein Mts) with flow direction arrows (the size of the arrows is proportional to the slope)

telési ütemére következtethetünk olyan helyeken, ahol a karros forma kora megadható (pl. gleccser-visszahúzódsági területen). A DDM felhasználásával megszerkeszthetők a karros felszínen leáramló víz pályavonalai (2. ábra) és az egyes helyeken átáramló víz összmenyisége (3. ábra).



2. ábra Egy totes-gebirgei vályúkarros felszínrészlet a lefolyó víz pályavonalaival
Figure 2 Flow lines on a rillenkarren covered rock surface (Totes-Gebirge Mts)

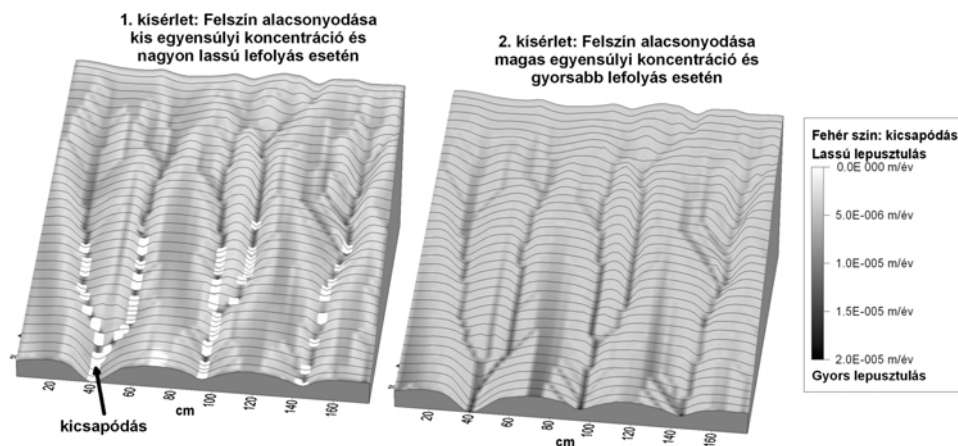


3. ábra Egy totes-gebirgei vályúkarros felszínrészlet „kumulált lefolyás” térképe
Figure 3 Flow accumulation map of a rillenkarren covered rock surface
(Totes-Gebirge Mts)

E két utóbbi „térképet” a hidrológiai modellezésben szokásos eljárások (ld. például *Burrough, P. A. – McDonnell, R. A. 1998*) segítségével állítottuk elő (ami

ez esetben konkrétan az ArcView GIS 3.2. hidrológiai eljárásainak – *Fill Sink, Flow Direction, Flow Accumulation, Stream Network* – alkalmazását jelentette). A 2. ábra alapján jól elkülöníthetők a karros felszín különböző részletei, ahol a lefolyás eltérő jellege miatt a lepusztulás is különböző módokon mehet végbe. A 3. ábráról pedig leolvasható, hogy nagyságrendi különbségek vannak a vályútalpakon, az areális lefolyású térszíneken valamint a vályúoldalakon keresztülfolyó víz mennyiségében, ami – lévén, hogy a vízmennyiség a karsztos oldás egyik legfontosabb meghatározója – az egyenes lefutású karrvályúk bevágódását és a köztes térszínek lassabb alacsonyodását sugallja. Azonban a karsztkorrózió tényleges mértékében a víz oldóképessége is szerepet játszik, márpedig ez a tényező az oldási folyamat során egyre inkább csökken, az oldat telítődésével arányosan (kivéve, ha közben az oldott CO₂-tartalom valamilyen oknál fogva – pl. zuzmó-, növényfolt – növekszik). Így a lepusztulás irányainak megállapításához ezt a tényezőt is célszerű figyelembe venni. Ezt egy szimulációs modell (Telbisz T. 2003) kialakítása révén sikerült megoldani, melyhez a totes-gebirgei DDM bal oldalát vágtam ki mintaterületnek (mert a szimulációs modell programjához négyzet alakú részre volt szükség). A szimulációs kísérletekben az egyensúlyi koncentrációt valamint a lefolyási sebességet befolyásoló paramétert változtattam. E kísérletek során a karros felszín továbbfejlődésében két eltérő jellegű forogatókönyvet lehet megfigyelni a paraméterek megválasztásának függvényében.

A 4. ábráról megállapítható, hogy alacsony egyensúlyi koncentráció és lassú lefolyás esetén az oldás a sík lejtők, illetve a vályúk felső részén jelentős, míg az alsóbb részeken alárendelt a pusztulás, és kicsapódás is előfordulhat (a vályútalpak „lépcsőződése”). Magas egyensúlyi koncentráció és gyorsabb lefolyás esetén a vályútalpak oldódása illetve a sík felületek alsó részeinek mélyülése a gyorsabb, és ennél fogva a vályúk közti felszínrészletek felszabdaldódása valószínűsíthető.



4. ábra Karros felszín lepusztulásának modellezése valós DDM alapján
Figure 4 Denudation modelling of a karren surface based on a real DEM

Az általunk eddig kísérleti jelleggel vizsgált karr DDM-ek az eredeti felszínen 10 cm-enként felvett keresztmetszvények mentén kézzel mért magassági adatok alapján készültek. Ez a módszer sajnos meglehetősen időigényes, így felvethetők hatékonyabb adatszerzési eljárások is. Omlásveszélyes sziklafelszínnek domborzatának pontos érzékelésére és letapogatására *Abellán, A. et al.* (2004) és *Brilly, M. et al.* (2004) például 3D-s lézer-szkennert alkalmaztak annak érdekében, hogy a tömegmozgásos folyamatokat jobban tudják modellezni. Ez a műszer elvileg kitűnő megoldást jelentene, azonban – jelentős költségigénye miatt – nem valószínű, hogy a karrok modellezésében egyhamar alkalmazható lesz. Perspektívikusabbnak ígérkezik viszont a karrfelszínnek sztereo-fotózása, amelynek alapján a digitális domborzatmodell levezethető lenne.

További nehézségként említhető, hogy kisformák – így például a karrok – tekintetében fokozottabban jelentkezik az a probléma, hogy az általánosan elterjedt digitális domborzatmodellező szoftverek a függőleges, aláhajló vagy nagyon meredek felszíneket nem tudják teljesen valósághűen ábrázolni, hiszen egy (X,Y) horizontális koordinátapárhoz csak egy magasságérték adható meg.

A KARROK LEPUSZTULÁSÁNAK ELMÉLETI MODELLEZÉSE

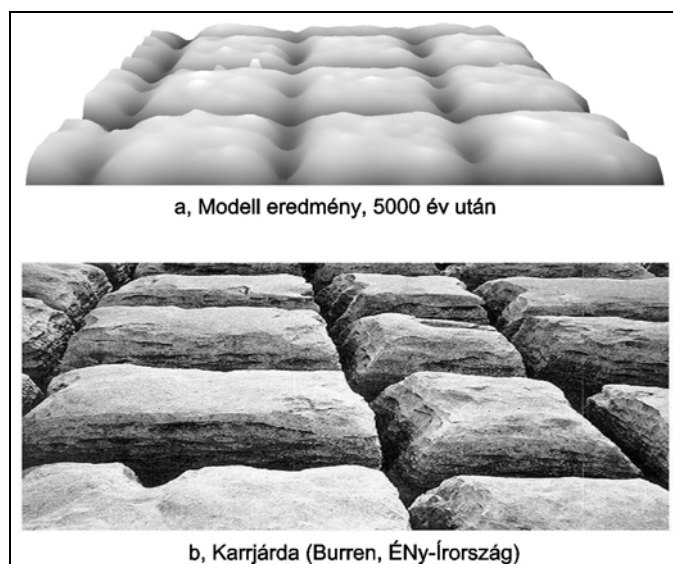
Az elméleti modellek célja az, hogy a karrosodás módjára, sebességére vonatkozó, megfigyeléseken alapuló kvalitatív elgondolásokat alapvető fizikai, kémiai törvényszerűségekre visszavezetve hitelesítse, alátámassza. Az analitikus megoldásokat vizsgáló matematikai modellek elsősorban a különböző jellegű karsztos lepusztulás nagyságrendjére vonatkozó becsléseket tehetik megalapozottabbakká. *Veress M. – Péntek K.* (1995) a vertikális karsztosodás formáinak, a hasadékoknak és a kürtöknek a fejlődési sebességét vizsgálta, tanulmányukban megadták, hogy egy adott átmérőjű kürtő kialakulásához mennyi időre van szükség az oldódást befolyásoló tényezők (csapadék, hőmérséklet, egyensúlyi koncentráció, telítődés sebessége) függvényében. *Szunyogh G.* (1995) a karrvályúkban lefolyó víz hidraulikai tulajdonságait elemezte matematikai eszközökkel. *Szunyogh G.* (2004) a csupasz mészkőfelszínnek lepusztulási ütemét vizsgálta analitikus módszerekkel. Külön érdekesség, hogy ebben a tanulmányban szerepel először a szél karrosodásban játszott – nemrég felismert (*Veress M. et al.* 2003) – szerepének matematikai értékelése. Ebből az derül ki, hogy a szélnek kitett, lejtős sziklaoldalakon a szél sebességével nő a leoldódás sebessége, de egy bizonyos értéket nem haladhat meg, bármekkora is legyen a szél. Ugyanakkor fontos hangsúlyozni, hogy a leoldódás sebessége nagyon érzékeny a kitétségre és a szélirány által bezárt szögére, amely minél nagyobb, annál kisebb az oldódásos lepusztulás.

Az analitikus megoldások hátrányaként említhető ugyanakkor, hogy a felszín apró szabálytalanságait nehéz ezekben a modellekben figyelembe venni, és így valószínűleg kevésbé alkalmasak a fejlődésének értékelésére. A matematikai modellek számítógépes megvalósításai, a szimulációk viszont éppen ezt a célt ki-

vánják elérni: jól rögzített „szabályokból” és határfeltételekből kiindulva minél valóságosabb felszínt előállítani. A karsztos felszínfejlődés számítógépes szimulációjával kapcsolatban **Ahnert, F. – Williams, P.** (1997) tették meg az első lépést, de ők tanulmányukban a nagyformák evolúciós sorát vizsgálták.

A **Telbisz T.** 2003-ban bemutatott karsztos felszínfejlődési modellt oldásos kisformák kialakulásának szimulációjára is felhasználtam. Ennek során néhány jellegzetes karrtípus „előállítására” törekedtem a karrosodást befolyásoló, jól ismert tényezők (kőzetszerkezet, lejtőszög) modellbeli figyelembevételével.

Az első példa a szerkezeti karrok, azon belül a karrjárdák kialakulását mutatja be. (A természetben előforduló karrjárdák kialakulását, az oldásukban szerepet játszó tényezőket többek között **Gunn, J. – Keveiné Bárány I.** (1998) és **Zseni A. – Keveiné Bárány I.** (2000) vizsgálták). A szimuláció főbb paraméterei a következők voltak: évi 2000 mm csapadék, 100 mg/l egyensúlyi koncentráció, 50x50-es négyzettrács, 20 cm-es ráctávolsággal.



5. ábra Szerkezetiileg meghatározott karrok fejlődése.

a) szimuláció alapján, b) karrjárda (Burren, ÉNy-Írország)

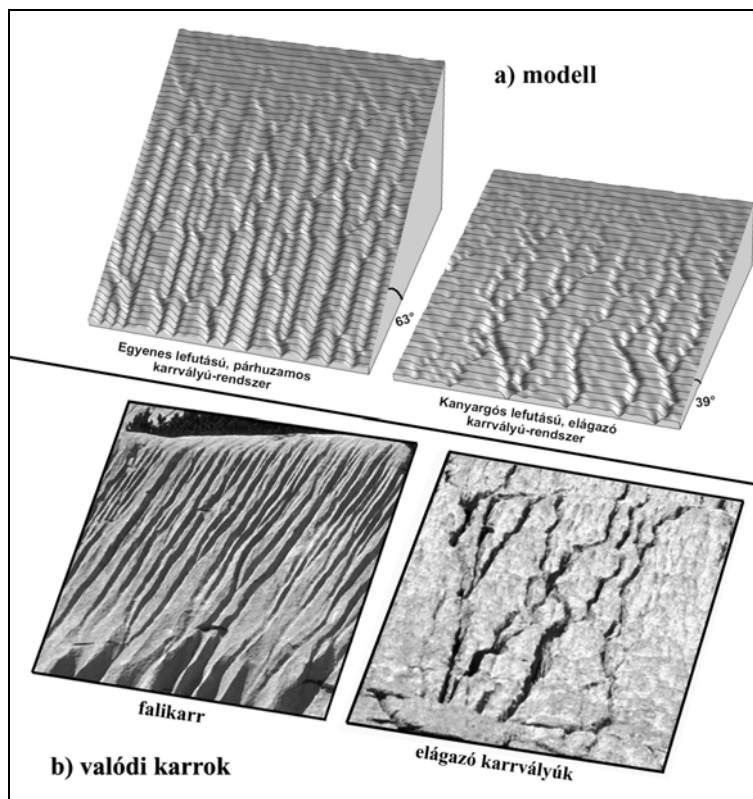
Figure 5 Structurally controlled grike evolution.

a) simulation results, b) limestone pavement (Burren, NW-Ireland)

A szimuláció (5. ábra) egy sík, talaj nélküli felszínből indult ki, melyet egymásra merőleges törésvonal-rendszer tagolt. A törésvonalakat a kezdeti feltételek megadásánál a környezetükhöz képest ötszörös beszivárgási képességgel adtam meg. Ennek köszönhető, hogy a törésvonalak mentén zajló gyorsabb oldásos lepusztulás az eredeti felszínt kőzettömbökre (*clint*) és elválasztó hasadékokra (*grike*) tagolta. Az 5000 éves felszínfejlődés eredményeként létrejövő hasadékok mélysége kb. 10-20 cm volt. Az 5b. ábrán látható karrjárda hasadékrendszere ennél

mélyebb, kialakulásának időtartama viszont hasonló nagyságrendű, hiszen nagy valószínűséggel a jégkorszak után keletkezett. A gyorsabb mélyülés a fejlődés egyes időszakaiban meglévő talajborítással magyarázható.

A csupasz, magashegységi mészkőfelszínek legjellemzőbb formái a különféle vályúkarrok. A következő szimuláció a vályúkarrok lefutása és a lejtőszög között keresett kapcsolatot (6. ábra). Mivel a lefolyó víz oldó hatására kifejlődő karokat kívántam vizsgálni, ezért a terület beszivárgás-mentesnek tételeztem fel. A két szimuláció között az egyetlen különbség a kiindulási felszín lejtőszöge volt (közös paraméterek: 2000 mm évi csapadék, 50 mg/l egyensúlyi koncentráció, 50x50-es rács, 10 cm-es rácestávolsággal).



6. ábra Lejtőszög hatása a beszivárgás-mentes sziklafelszínen kifejlődő karrvályúk lefutására

a) modell alapján, b) valóságban: falikarrok ill. elágazó karrvályú-rendszer (Totes-Gebirge)

Figure 6 Slope control on the evolution of groove network on a rock surface without infiltration

a) simulation results, b) real examples: parallel wall karren and dendritic pattern (Totes-Gebirge Mts)

A kísérleti eredményeket értékelve az alábbi, a valósággal egybecsengő állításokat lehetett megfogalmazni. Kisebb lejtőszög esetén a vályúk kanyarognak, és

elágazó vályúrendszer alakul ki. Nagyobb meredekség esetén a karrok pályája kiegyenesedik, elágazások inkább csak a lejtő felső szakaszán figyelhetők meg. A szimulációs próbálkozásokból azonban úgy tűnt, hogy nem is közvetlenül a lejtő-szög, hanem a kezdeti egyenetlenségek viszonylagos nagysága a meghatározó. A vízfolyás akkor térül ki a terep általános lejtési irányához képest, ha valamilyen akadály, egyenetlenség erre kényszeríti. A sziklafelszín kezdeti nagyobb hepehupái esetén gyakoribbak az efféle akadályok. Meredekebb térszín esetén csupán egy-egy magasabb cella téríti ki a karrirányt. Ezen akadályok alatti területre kevesebb víz érkezik, így oldódásuk lefékeződik és maradékgerinc-szerűen kezdenek kimagasodni a környező felszínhez képest. A karrformák további vizsgálatában a jelenlegi modell keretein belül lehetséges még az egyensúlyi koncentráció térbeli eloszlásának differenciált figyelembe vétele a kisebb zuzmó-, illetve talajfoltok karrosodásra gyakorolt hatásának elemzésére. A modell továbbfejlesztése azonban több szempontból is indokolt lenne: a lefolyó víz magasságát, dinamikai tulajdonságait is érdemes tekintetbe venni a karrfejlődés jobb utánzása céljából. Ezen kívül a modell elvi felépítéséből adódik egy hasonló korlát, mint a DDM-ek esetében: a függőleges illetve aláhajló felületek kezelésére nem alkalmas.

KÖVETKEZTETÉSEK

Hosszabb múltra tekinthet vissza a karros formák terepi felmérésén alapuló modellezés, amelynek fő módszere a térképezés illetve a karros formák szelvény menti sűrűségének és szélességeinek a meghatározása. Ezen irányzat modern térinformatikai keretek közötti folytatásának tekinthető a karr DDM-ek készítése valamint a terepi fénykép-felvételek digitális elemzése. Az elméleti modellek az oldással kapcsolatos kémiai valamint a folyadékok mozgását leíró fizikai törvényekből és geometriai megfontolásokból építkeznek. A matematikai analízis eszköztárával levezetett összefüggések segítségével azt vizsgálják, hogy a karrosodó sziklafelszínnek lepusztulása hogyan függ a fizikai-kémiai paraméterek értékétől, továbbá a karros formák kialakulásához szükséges idő nagyságrendjének megállapításához nyújtanak megalapozott becslést. A számítógépes szimulációk célja elsősorban az, hogy a természetben megfigyelhető karros formakincs minél több elemét sikerüljön „utánozni” ugyanezen természeti törvényekből kiindulva. Ennek megvalósítását a rácskarrok és a vályúkarrok példáján kívántam bemutatni.

IRODALOM

- Abellán, A. – Vilaplana, J. M. – Martínez, J.* 2004. Use of scan laser 3D: Improvements about hazard rockfall study. Geophysical Research Abstracts 6. 00761. EGU General Assembly, CD.
- Ahnert, F. – Williams, P. W.* 1997. Karst landform development in a three-dimensional theoretical model. Z. Geomorph., Suppl. 108. pp. 63-80.
- Balázs D.* 1990. Karrformák – karregyüttesek. Karszt és Barlang 1990/2. pp. 117-122.

- Bögli, A.** 1960. Kalklösungs- und Karrenbildung. Zeitschrift für Geomorph. Suppl. 2. pp. 4-21.
- Brilly, M. – Mikož, M. – Vidmar, A.** 2004. Morphological measurements of a landslide area by the new laser equipment. Geophysical Research Abstracts 6. 06000. EGU General Assembly, CD.
- Burrough, P. A. – McDonnell, R. A.** 1998. Principles of Geographical Information Systems. University Press, Oxford. p. 306.
- Cvijič, J.** 1924. The evolution of lapiés, a study in karst physiography. Geogr. Rev. 14. pp. 26-49.
- Ford, D. – Williams, P.** 1989. Karst Geomorphology and Hydrology. Unwin Hyman, London. p. 601.
- Gunn, J. – Keveiné Bárány I.** 1998. Nagy-Britannia karsztvidékei. Földrajzi Közlemények 122/46/1-2. pp. 43-58.
- Szabó L.** 2001. Karlejtők összehasonlító morfológiai vizsgálata a Dachstein-fennsíkon. Karsztfejlődés VI. Szombathely. pp. 171-184.
- Szunyogh G.** 1995. Karsztvíz vízzárló-képességének elméleti meghatározása. IV. Karsztológiai Szeminárium, Szombathely.
- Szunyogh G.** 1998. Sziklakarrok karsztosodásának matematikai modellezése. Karsztfejlődés II. (Totes Gebirge karrjai), Szombathely. pp. 7-34.
- Szunyogh G.** 2004. Talajnélküli lejtős mészkőfelszínnek leoldódási idejének elméleti vizsgálata. Karsztfejlődés IX. Szombathely. pp. 35-52.
- Szunyogh G. – Lakotár K. – Sziget I.** 1998. Nagy területet lefedő karsztvízrendszer struktúrájának elemzése. Karsztfejlődés II. Szombathely. pp. 125-148.
- Telbisz T.** 2003. Töbörfejlődési szimuláció elemzése lepusztulási idősorok és morfológiai mutatók alapján. Karsztfejlődés VIII. Szombathely. pp. 51-80.
- Telbisz T.** 2004. Karsztmorfológiai elemzések különböző léptékű digitális domborzatmodellek alapján. II. Magyar Földrajzi Konferencia, Szeged. ISBN 963 482 687 3.
- Tóth G. – Schläffer R.** 2004. Karos felszín elemzése digitális módszerrel. Karsztfejlődés IX. Szombathely. pp. 133-140.
- Tóth G. – Schläffer R. – Guex, D.** 2004. A karrosodási egységek típusai a Tsanfleuron-gleccser (Berni-Alpok) előterében. Karsztfejlődés X. Szombathely. pp. 197-206.
- Veress M.** 2003. A karrok. Akadémiai doktori értekezés, BDF Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely. p. 365.
- Veress M.** 2004. Különböző kőzetek karrformái és pusztulása karrosodással. Karsztfejlődés IX. Szombathely. pp. 141-156.
- Veress M. – Barna J.** 1998. Karsztmeanderek morfológiai térképezésének tapasztalatai. Karsztfejlődés II. Szombathely. pp. 125-148.
- Veress, M. – Péntek, K.** 1995. Kísérlet a felszíni vertikális karsztosodás kvantitatív leírására. Földrajzi Értesítő 44/3-4. pp. 157-177.
- Veress M. – Tóth G. – Zentai Z. – Kovács Gy.** 2001. Study of a new method for characterising karren surfaces based on alpine researches. Revue de Géographie Alpine 89. pp. 49-62.
- Veress M. – Zentai T. – Tóth G. – Czöpek I.** 2003. Karsztos felszínfejlődési típusok Diego de Almagro szigetén (Chile). Karsztfejlődés VIII. Szombathely. pp. 213-231.
- Zámbó L.** 1993. A karsztosodó kőzetek alaktana. In: **Borsy Z.** (szerk.). Általános Természetföldrajz. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest. pp. 544-592.
- Zseni A.** 2004. Talaj alatti karrformák. Karsztfejlődés IX. Szombathely. pp. 157-175.
- Zseni A. – Keveiné Bárány I.** 2000. Nagy-Britannia mészkőjárdái és a talaj hatása azok fejlődésében. Karsztfejlődés V. Szombathely. pp. 181-194.