

Löszök és paleotalajok szemcseösszetételi és geokémiai paraméterek alapján történő osztályozásának interpretálása a fuzzy halmazelmélet segítségével

Classification of loesses and palaeosols on the basis of sedimentological and geochemical parameters interpreted with the help of fuzzy set theory

ÚJVÁRI Gábor¹

(6 ábra, 9 táblázat)

Tárgyszavak: fuzzy halmazelmélet, Mamdani típusú fuzzy következtetési rendszer, lösz, paleotalaj, üledékkategorizálás, szemcseösszetétel, geokémia

Keywords: fuzzy set theory, Mamdani type fuzzy inference system, loess, palaeosol, sediment categorisation, grain size analysis, geochemistry

Abstract

Loesses and palaeosols can be ranked into sediment categories and sediment types on the basis of certain sedimentological and geochemical parameters according to their weathering and pedogenetic conditions. These categories do not differ sharply from one other and in many cases overlap or more often occupy an intermediate position. The categorisation of loesses and palaeosols can be demonstrated through the fuzzy set theory using mathematical methods. The primary purpose of this paper is the presentation of this method.

Összefoglalás

A löszök és paleotalajok bizonyos üledéktani és geokémiai paramétereik alapján, mállás és pedogenezis általi érintettségüknek megfelelően üledékkategóriákba, üledéktípusokba sorolhatók. Ezen kategóriák egymástól nem válnak el élesen, azok sok esetben egymást átfedő, egymásba fokozatos átmenetet képező kategóriák. A fuzzy halmazok elméletének segítségével a besorolás, a löszök és paleotalajok egyes üledékkategóriákba tartozása matematikai módszerekkel adható meg, illetve számszerűsíthető. A jelen dolgozat elsődleges célja ezen módszer bemutatása.

Bevezetés

A pleisztocén során glaciális/interglaciális ciklusok, ezen belül stadiális/interstadiális fázisok váltakoztak egymással, mialatt az ősi klíma és az ősi környezet jelentős átalakuláson ment át. A belföldi jégtakaró elönyomulásával jellemezhető hűvösebb, sokszor hideg glaciális és stadiális ciklusok során a Föld bizonyos területein löszök és annak változatai jöttek létre. A jégtakaró visszahúzódásakor a melegebb, nedvesebb interglaciális, interstadiális ciklusok során a lösz alapkőzet felszíni rétegeiből az adott klímazónán jellemző talajok alakultak ki, ugyanis az éghajlat melegebbé, nedvesebbé válásával a mállás és pedogenezis fokozódott. Korábbi vizsgálatok kimutatták, hogy a mállás és a talajképződés előrehaladtával a főkomponensek közül a SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , K_2O , TiO_2 , MnO , P_2O_5 , a nyom-

elemek közül a Cr, Zn, Cu, Ni, Rb, Pb, Ba feldúsulnak, míg a Ca, Mg és Sr mennyisége, illetve a $\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ arány csökken (WEN et al. 1984, 1985; SCHNETZER 1992; HUM & FÉNYES 1995; HUM 1998; HUM 2002). A Na- és Rb-tartalom a mállás kezdeti szakaszában nő a fent említett üledékekben, aztán a legintenzívebb mállási szakaszban, illetve a pedogenezis során már a kioldódás miatt csökkenő mennyiségben van jelen (HUM 2002). A talajképződés és a mállás során a szemcseösszetétel is megváltozik. Növekszik az agyagfrakció, valamint némileg a nagyon finom és finom kőzetliszt frakció aránya, mialatt a durva kőzetliszt (löss-) frakció aránya csökken (PÉCSI 1993, p. 277; HUM & FÉNYES 1995, SÜMEGI 2001, p. 191). A jellemző szöveti paraméterek közül a közepes szemcseméret (Mz) is csökkenő tendenciát mutat a gyengén átalakult, mállott löszöktől az intenzíven mállott paleotalajokig (HUM 2002). A hidegebb, hűvösebb és általában szárazabb glaciális és stadiális ciklusokban keletkezett lösz ásványgyűtése a nedvesebb, melegebb interglaciális és interstadiális szakaszokban átalakul, melynek során az egyes ásványok mennyisége megváltozik, s tulajdonképpen ez vezet a kémiai összetétel, illetve a szemcseméret fent leírt változásaihoz.

Az ökoszisztémái, ősszajlati viszonyok tehát alapvetően meghatározzák a löszök és paleotalajok kémiai elemösszetételét és üledékföldtani viszonyait. Ezen információk, adatok alapján pedig az üledékek kategóriákba sorolhatók a mállás és pedogenezis általi érintettségüknek megfelelően. Az üledéktani és geokémiai adatok alapján történő lösz- és paleotalaj típusok elkülönítését hazánkban korábban HUM & FÉNYES (1995), illetve HUM (2002) a Délkelet-Dunántúlon történt lösz-paleotalaj vizsgálataik során már bemutatták. Munkáikban az egyes üledékkategóriák nyilvánvaló módon és természetesen nem élesen elkülönülő egységekként jelentek meg, hanem mind az azokat meghatározó üledékföldtani, mind a geokémiai paraméterekben – azok tartományértékeiben – kisebb-nagyobb átfedések voltak, tehát az úgynevezett határfeltételek bizonyos mértékig rugalmasnak voltak tekinthetők. A matematikai számhalmaz fogalom szerint tehát nem éles halmazokról – az adott esetben üledékkategóriákról – volt szó, amelyeknek a jellemző üledéktani és geokémiai paraméter értékek vagy elemei vagy nem.

Kutatásaim során, amelyek dél-baranyai lösz-paleotalaj sorozatok szedimentológiai, geokémiai és malakológiai vizsgálatára koncentráltam, magam is szembesültem azzal a problémával, hogy az üledékföldtani és geokémiai információk ismeretében miként lehetne egzakttá matematikai formában megadni a vizsgált löszök és paleotalajok egyes üledékkategóriákba tartozását, amelyek az ökoszisztémái rekonstrukcióban fontos információkat jelentenek. A problémára a fuzzy halmazok elmélete kínál megoldást.

Az üledékföldtani és geokémiai vizsgálatok módszerei

Szemcseösszetételi vizsgálatok:

A vizsgálatok három feltárás teljes rétegsorára (Majs-1, -2/a, -3) az USA-ban, a Washington State University Pedológiai és Negyedkori Tanulmányok Laboratóriumában készültek, egy további feltárás (Bácsfapuszta) esetén reprezentatív módon, 5 mintára a Pécsi Tudományegyetem Természetföldrajzi Laboratóriumában.

a) A Washington State University Pedológiai és Negyedkori Tanulmányok Laboratóriumában a vizsgálatok Malvern Mastersizer-S lézeraanalizátorral történtek, amelynek mérési tartománya 5 és 875 mikron közé esett. Az e feletti mérettartományok kimutatására nedves szitálással került sor.

b) A Pécsi Tudományegyetem Természetföldrajzi Laboratóriumában a szemcseeloszlási vizsgálatok a 0,25 mm feletti frakciókra vonatkozóan nedves szitálással, az ez alattiakra Malvern Mastersizer Micro és Fritsch Analisette 22 lézeres szemcseanalizátorral történtek.

A szemcseösszetételi adatokból az alábbi szemcseméret tartományokat képeztem (FRIEDMAN & SANDERS 1978):

- 0,125 mm feletti (finom, közép és durva homok),
- 0,125–0,0625 mm feletti (nagyon finom homok),
- 0,0625–0,0312 mm között (nagyon durva kőzetliszt),
- 0,0312–0,0156 mm közötti (durva kőzetliszt),
- 0,0156–0,0039 mm közötti (finom és közepes kőzetliszt),
- 0,0039–0,002 mm közötti (nagyon finom kőzetliszt),
- 0,002 mm alatti (agyag-) frakciók.

Ezekből csupán az agyag, valamint a durva és nagyon durva kőzetliszt frakciókat adtam meg a táblázatokban. Az adatokból az alább megadott egyenlet (1) segítségével közepes szemcseméretet (M_z) számoltam (FOLK & WARD 1957).

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad (1)$$

ahol: $\phi = -\log_2 d$,
 d = szemcseátmérő (mm).

A táblázatokban már mikrométerben (μm) adtam meg a közepes szemcseméret (M_z) értékeit, amelyet ennek ϕ -értékeiből a fentiekből következően logikusan számolhatunk:

$$M_z(\mu\text{m}) = 2^{-\phi_{M_z}} \times 1000 \quad (2)$$

Geokémiai vizsgálatok

Az üledékek kémiai összetételére vonatkozó vizsgálatok elvégzésére az USA-ban, a Washington State University Geológia Tanszékének Geoanalitikai Laboratóriumában került sor. A többlépéses analízis röntgenfluoreszcens (X-Ray Fluorescens – XRF) módszerrel történt (JOHNSON et al. 1999).

A fuzzy halmazok elmélete és az üledékek kategorizálásának gondolata

A fuzzy halmazok, illetve a fuzzy logika ötlete 1965-ből, a kaliforniai Berkeley-n tanító Lotfi A. ZADEH matematikustól származik (ZADEH 1965). Szerinte az emberi gondolkodásmód sokkal jobban modellezhető olyan fogalmakkal, amelyeknek nincsenek éles határaik, ahol az átmenet egy tulajdonság megléte és nemléte között folytonos vagy homályos (angolul: fuzzy). A fuzzy halmazokkal tehát a pontatlan

vagy bizonytalan információkat, adatokat vagy rugalmasan kezelhető határfeltételeket is matematikai formába lehet önteni, azokat kvantitatíve kezelni. A fuzzy logikát egyébként a földtudományok különböző területein, így például a hidrológiában, talajtanban, geomorfológiában, szeizmológiában (DEMICO & KLIR 2004) és a geodéziában (HEINE 1999, HABERLER 2005) már sikerrel alkalmazták. Hazánkban a bizonytalan halmazok elméletének alkalmazását a geológiában, ásvány- és kőzetben, nyersanyagkutatásban az elmúlt néhány évben mutatták be (BÁRDOSSY et al. 2000, 2001; FÖLDVÁRI et al. 2002; BÁRDOSSY 2005).

A fuzzy logika tehát, mint látható igen széles körű alkalmazást nyert és jó megoldást kínálhat az üledékek osztályozására is. Jelen esetben a fuzzy halmazok elmélete révén egyfajta szakértői rendszer alakítható ki, amelynek segítségével az üledékkategóriákba sorolás matematikai módszerekkel történik, melynek alapjai az alábbiak szerint választhatók.

Legyen $X \neq \emptyset$ egy tetszőleges halmaz. Az X alaphalmazon értelmezett A fuzzy halmaz, mint rendezett párok halmaza

$$A = \{ x, \mu A(x) \mid x \in X \}, \quad (3)$$

amelyet „ X feletti fuzzy halmaznak” nevezünk. Az adott halmazhoz való hozzátartozás fokát, a bele nem tartozás (0) és a teljes körű tagság (1) közötti fokozatok megadására szolgáló, bármely 0 és 1 közötti értékkel rendelkező ún. tagsági függvény ($\mu A(x)$) adja meg.

A tagsági függvény formális definíciója:

$\mu A(x) : X \rightarrow [0,1]$ úgy, hogy ha

$\mu A(x) = 1$: az x definit módon A -ba tartozik,

$\mu A(x) = 0$: az x definit módon nem tartozik A -ba,

$\mu A(x_1) > \mu A(x_2)$: az x_1 jobban beletartozik A -ba, mint az x_2 .

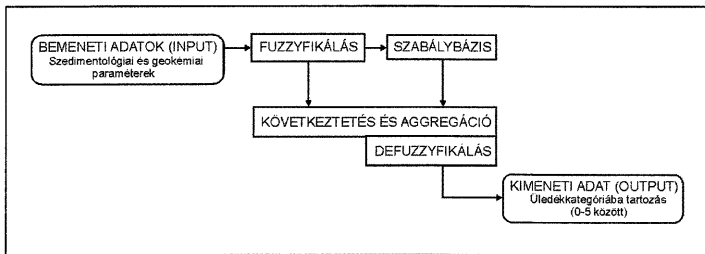
Úgy is lehet mondani, hogy a $\mu A(x)$ azt mutatja meg, hogy az adott $x \in X$ elem mennyire rendelkezik az A halmaz által leírt tulajdonsággal (FULLÉR 1997). A fuzzy halmazok tehát olyan tulajdonságok leírására szolgálnak, amelyeket nem lehet karakterizálni a klasszikus eleme (ϵ) relációval, azaz a kétértékű logika (igen/nem) segítségével. Ilyen módon tehát kiválóan alkalmazhatók a tulajdonképpen halmazoknak tekinthető üledékkategóriák (gyengén átalakult, átalakult, erősen átalakult lösz, paleotalaj és erősen fejlett paleotalaj) leírására, amely halmazok között nyilvánvalóan nincs éles határ. Ez azt jelenti, hogy egy adott lösz-, vagy paleotalajminta szedimentológiai és geokémiai paraméterei alapján tagsági függvények adják meg, hogy az üledék (0 és 1 között) milyen mértékben tartozik az egyik vagy másik üledékkategóriához.

A mállás és pedogenezis egy időben lejátszódó folyamat, amelyet az ökoszisztémái viszonyok befolyásolnak és amelynek során eltérő időben eltérő mértékben mállott, valamint eltérő pedogenetikus hatás által érintett üledékek jönnek létre. Minél inkább mállott egy üledék, amit az üledékföldtani és geokémiai paraméterek jeleznek, annál nagyobb az intenzívebb mállottsággal (átalakultsággal) jellemezhető üledékkategóriákba való tartozásának mértéke és fordítva. Az egyes üledékkategóriák tehát – mint említettem – önálló fuzzy halmazokként értelmezhetők, ahol az egyes kategóriák közti határok nem élesek, hanem egyfajta

átmenetet képeznek egymásba. Elképzelhető, hogy egy adott üledék a geokémiai és üledéktani paramétereinek értékei alapján egyszerre két kategóriába is tartozik, csakhogy az egyik kategória esetén nagyobb a tagságának vagy hozzátartozásának foka, mint a másíknál. Tehát az üledékkategóriákat reprezentáló fuzzy halmazok közül kiválasztható egy olyan, amely által képviselt tulajdonsághoz vagy attribútumhoz leginkább közeláll az adott minta tulajdonsága. Ez alapján tehát az üledék besorolható a rá legjellemzőbb kategóriába/halmazba.

Mamdani típusú fuzzy következtetési rendszer, mint az üledékek kategorizálásának matematikai alapú megoldása

A fuzzy következtetés egy olyan folyamat, amelyben adott bemeneti (input) értékekből a fuzzy logika mentén kimeneti (output) értékeket képezünk. Alapvetően két fuzzy következtetési rendszert ismerünk, a Mamdani típusú és a Takagi-Sugeno típusú rendszereket (DEMICO & KLIR 2004). Az előző típus széles körben használatos és az üledékkategorizálásra is kiválóan alkalmas, tehát a következőkben a Mamdani típusú fuzzy következtetési rendszert mutatom be (1. ábra). Ennek két verzióját a MATLAB® nevű magasszintű programnyelv és interaktív környezet Fuzzy Logic Toolbox-a (MATLAB 2004) segítségével fejlesztettem ki.



1. ábra. Mamdani típusú fuzzy következtetési rendszer modellje

Fig. 1. Model of Mamdani type fuzzy inference system

A fuzzy következtetési folyamat öt alapvető lépésre bontható:

- I. Az inputváltozók fuzzyfikálása.
- II. Fuzzy operátorok alkalmazása.
- III. Következtetés vagy implikáció (HA-AKKOR szabályok) alkalmazása.
- IV. A konklúziók egyesítése, aggregációja.
- V. Defuzzyfikálás.

Az inputváltozók fuzzyfikálása

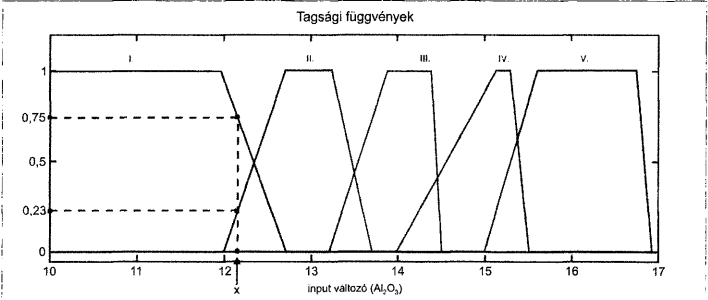
Az adott lépésben az egyes bemeneti értékek (x_1, x_2, \dots, x_n) fuzzy halmazokhoz való tartozásának (0 és 1 közötti tagsági értékének) meghatározása történik, tagsági

1. táblázat. A vizsgált löszök és paleotalajok fuzzy halmazok segítségével történő üledékkategóriákba sorolásához felhasznált szedimentológiai és geokémiai paraméterek tartományértékei, mint input adatok

Table 1. Range values of sedimentological and geochemical parameters (input data) which were applied to the categorisation of the examined loesses and palaeosols with the help of fuzzy sets

Szedimentológiai és geokémiai paraméterek	ÜLEDÉKKATEGÓRIÁK				
	Gyengén átalakult lösz	Átalakult lösz	Erősen átalakult lösz	Paleotalaj	Erősen fejlett paleotalaj
0,0156–0,0625 mm közötti löszfrakció (%)	49,0–63,0	45,5–53,0	42,0–47,0	40,0–43,0	35,0–40,5
M _z (közepes szemcseméret, μm)	20,0–37,0	18,0–23,0	16,5–19,0	15,0–17,0	11,0–15,5
0,002 mm alatti agyag frakció (%)	4,0–7,0	6,0–8,0	7,0–10,0	6,0–10,0	9,0–10,0
SiO ₂ (súly%)	51,0–59,0	57,0–63,0	62,0–66,0	64,0–70,0	66,0–72,5
Al ₂ O ₃ (súly%)	10,0–12,7	12,0–13,7	13,2–14,5	14,0–15,3	15,0–16,9
CaO (súly%)	14,0–25,1	7,9–16,0	5,6–9,4	2,7–7,5	0,7–4,5
Rb (ppm)	76–95	90–108	104–120	115–130	120–140
Ba (ppm)	329–397	365–450	419–470	460–490	485–526
CaO+K ₂ O+Na ₂ O/Al ₂ O ₃	1,30–2,75	0,87–1,49	0,65–0,97	0,35–0,75	0,25–0,55

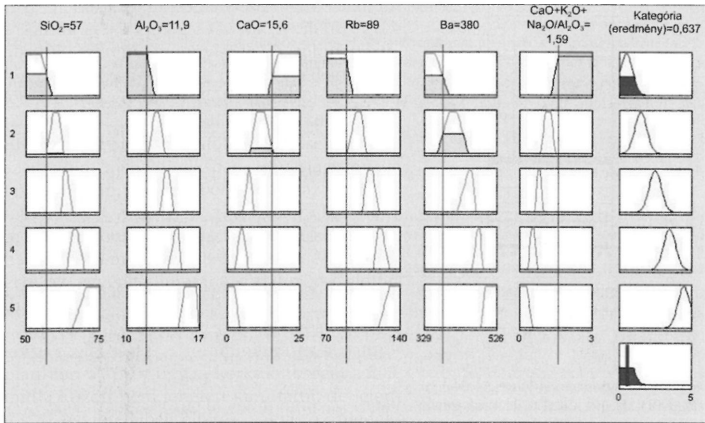
függvények alkalmazásával. A konkrét esetben ez azt jelenti, hogy az egyes mállottsági tartományok egy-egy fuzzy halmaznak felelnek meg. Bizonyos kiválasztott üledékföldtani és geokémiai paraméter értékek jellemeznek egy adott üledékkategóriát, illetve annak mállottságát. Például az Al₂O₃ aránya az egyes üledékkategóriákban különböző, de egymást átfedő tartományokba esik (1. táblázat). Tehát



2. ábra. Egy geokémiai paraméter (Al₂O₃), mint input érték fuzzyifikálása aszimmetrikus trapéz alakú tagsági függvényekkel. A vízszintes tengelyen az Al₂O₃ vizsgálatok során észlelt értékek jelennek meg, míg a függőlegesen a hozzátartozás vagy beletartozás foka 0 és 1 között. Hozzátartozás foka: $\mu I(x)=0,75$; $\mu II(x)=0,23$; $\mu III(x)=0$; $\mu IV(x)=0$; $\mu V(x)=0$. Jelmagyarázat: I–V – az üledékek mállottságának mértéke a legkisebb fokú mállottságtól (I.) a legnagyobb fokúig (V.), amelyek hozzávetőlegesen megfelelnek az öt üledékkategóriának

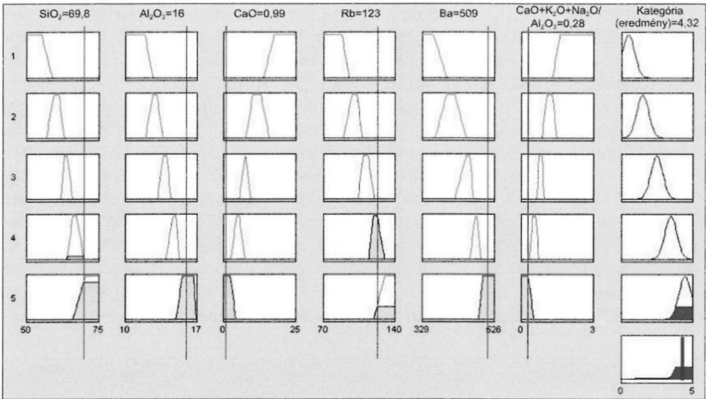
Fig. 2. Fuzzyfication of a geochemical parameter (Al₂O₃) as an input value through unsymmetrical (skewed), trapezoidal-shaped membership functions. The values of Al₂O₃ which were detected in the course of the examinations appear on the absciss, while the degree of membership (between 0 and 1) on the ordinate. Degree of membership: $\mu I(x)=0,75$; $\mu II(x)=0,23$; $\mu III(x)=0$; $\mu IV(x)=0$; $\mu V(x)=0$. Legend: I–V – weathering degree/rate of the sediments from the smallest (I) to the largest (V) which correspond approximately to the five sediment categories

egy adott üledékminta Al_2O_3 tartalma az input érték. A mintáról ezen úgynevezett éles érték alapján a fuzzyfikálás során állapítjuk meg, hogy 0 és 1 között milyen mértékben tartozik az egyes mállottsági fokokhoz/tartományokhoz, azaz egy fuzzy vagy fuzzyfikált értéket ($\mu(x_1), \mu(x_2), \dots, \mu(x_n)$) nyerünk (2. ábra). Természetesen a jelen rendszernél nem egy inputérték van, hanem több, tehát nem csupán az Al_2O_3 mennyiségével jellemezzük az egyes mállottsági fokokat/tartományokat, hanem több főkomponens, nyomelem, geokémiai arány és üledékföldtani paraméter értékével. A geokémiai paramétereiből hatot ($SiO_2, Al_2O_3, CaO, Rb, Ba, CaO+K_2O+Na_2O/Al_2O_3$ arány), míg az üledékföldtaniak közül három paramétert (agyagfrakció, löszfrakció és közepes szemcseméret – Mz) építettem egy-egy önálló, de azonos módon működő rendszerbe. Tehát egy rendszer a geokémiai (3. és 4. ábra), egy rendszer pedig az üledékföldtani paramétereket értékel (5. ábra). A választás azért esett a fent említett paraméterekre, mert egyszerűen jól jellemzik az egyes üledékkategóriákat, másrészt pedig a tartomány értékeik alapján viszonylag



3. ábra. Fuzzy következtetés és aggregáció egy löszminta (Majs-1. számú feltárás, 4,00–4,40 m) geokémiai alapon történő kategorizálása során. Jelmagyarázat: Az 5 vízszintes sor az öt elkülönülő szabálysornak felel meg, az első 6 függőleges oszlop a bemeneti geokémiai paramétereket jeleníti meg. Az utolsó oszlopban a szabálysorok végén egy-egy önálló fuzzy halmaz, az adott oszlop alján pedig az ezekből számított egyetlen aggregált fuzzy halmaz látható. Az aggregált fuzzy halmazból a centroid kalkuláció (Center of Gravity, CoG) módszerével nyerhető a kimeneti, ún. éles érték (jelen esetben: 0,637, ami azt jelenti, hogy az adott minta a gyengén mállott löszök kategóriájába tartozik)

Fig. 3 Fuzzy inference and aggregation in the course of categorization of a loess sample (Majs-1 outcrop, 4.00–4.40 m) on the basis of geochemical data. Legend: The 5 horizontal lines correspond to the five separate rules and the 6 vertical column represent the input geochemical parameters. Each separate fuzzy set can be seen in the last column at the end of the rule lines and one aggregated fuzzy set is visible at the bottom of the last column which is computed from the above-mentioned, previous sets. The output, crisp value can be computed from the aggregated fuzzy set with the help of centroid calculation (Center of Gravity, CoG) method. The crisp value is 0.637 in this case. This means that the given sample belong to the category of weakly weathered loesses

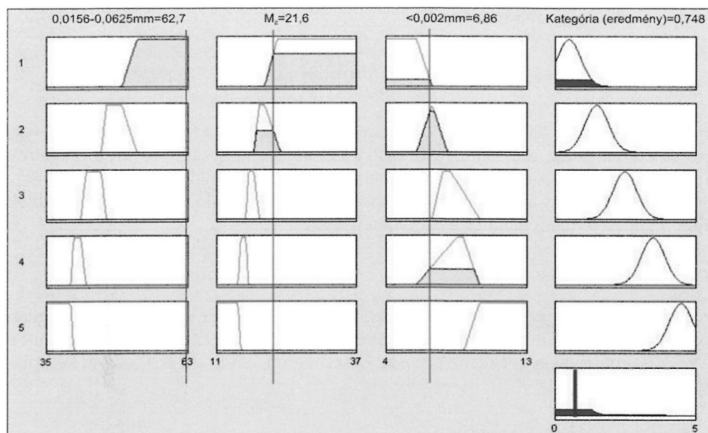


4. ábra. Fuzzy következtetés és aggregáció egy paleotalaj minta (Bp-2, Bácsfapuszta, 3,80–4,20 m) geokémiai alapon történő kategorizálása során. Jelmagyarázat: A kimeneti, ún. éles érték jelen esetben: 4,32, ami azt jelenti, hogy az adott minta az erősen fejlett paleotalajok kategóriájába tartozik

Fig. 4 Fuzzy inference and aggregation in the course of categorisation of a palaeosol sample (Bp-2, Bácsfapuszta section, 3.80–4.20 m) on the basis of geochemical data. Legend: The crisp value is 4.32 in this case. This means that the given sample belong to the category of strongly developed palaeosols

jól elkülöníthetők az egyes üledéktípusok. Az agyagfrakció arányával kisebb probléma volt, mert egyes esetekben az erősen mállott löszöknél magasabb értékek szerepelnek, mint némely paleotalajnál.

Geokémiai munkákban a mállási állapotok összehasonlítására általában a NESBITT & YOUNG (1982) által publikált mérőszámot, a CIA indexet (Chemical Index of Alteration), sokszor pedig a CIW indexet (Chemical Index of Weathering; HARNOIS 1988) használják. A jelen munkában ezen indexek helyett az egyszerűsített mutatószám, a $\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ geokémiai arány azért szerepel, mert az egyes üledékkategóriákat jellemző geokémiai és szedimentológiai tartományértékek, s így az ezek révén meghatározott és felvett tagsági függvények is részben HUM és FÉNYES (1995), illetve HUM (2002) munkájának adatain alapulnak, ahol ezt az indexet használták a szerzők. Az üledékkategóriák tartományértékeiben és a tagsági függvények kialakításában a fenti munkák mellett más, a szerző által vizsgált dél-baranyai szelvények vizsgálati eredményei is megjelennek. Így az Al_2O_3 példájánál maradv a vizsgálatokból kiderült, hogy mennyisége a 10–16,9% közötti tartományban mozog az üledékekben és az is, hogy az egyes üledékkategóriák milyen Al-tartalommal jellemezhetők (2. ábra, 1. táblázat). Egy adott mintáról természetesen a teljes adathalmazt, azaz jónéhány üledéktani és még több geokémiai adatot áttekintve és azokra együttesen, komplex módon tekintve lehetett eldönteni, hogy az adott minta mely üledékkategóriához tartozik. Ez egy nehezen körülírható, bonyolult rendszer, amelyben azonban törvényszerűségek és belső szerkezet figyelhető meg. Tehát korábbi adatok szolgálták alapul az egyes kate-



5. ábra. Fuzzy következtetés és aggregáció egy löszminta (Majs-1. számú feltárás, 3,20-3,60 m) szedimentológiai alapon történő kategorizálása során. Jelmagyarázat: az első 3 oszlop rendre a durva és nagyon durva kőzetliszt frakció (0,0156-0,0625 mm) arányát, a közepes szemcseméretet (Mz), valamint az agyagfrakció (<0,002 mm) arányát jelzik. A kategória, eredmény és értéke (jelen esetben: 0,748, ami azt jelenti, hogy az adott minta a gyengén mállott löszök kategóriájába tartozik)

Fig. 5. Fuzzy inference and aggregation in the course of categorization of a loess sample (Majs 1. outcrop, 3.20-3.60 m) on the basis of sedimentological data. Legend: The first 3 column represent one after another the rate of coarse and very coarse silt fraction (0.0156-0.0625 mm), the mean size (Mz) and the rate of clay fraction (<0.002 mm). The output, crisp value is 0.748 in this case. This means that the given sample belongs to the category of weakly weathered loesses

góriák tartományértékeinek és tagsági függvényeinek felvételéhez. Mindemellett a korábbi – bemeneti és ismert kimeneti adatokká alakított – adathalmaz egy Takagi-Sugeno típusú adaptív neuro-fuzzy rendszeren (ANFIS) került tesztelésre, amelyben maga a rendszer hozza létre a szabályhalmazt és a tagsági függvényeket, illetve optimalizálja a már meglévőket. Ez a megközelítés azonban túl bonyolult szabályrendszert eredményezett, így azt el kellett vetni.

Az inputváltozók fuzzyfikálásához visszatérve hangsúlyozni kell, hogy az adott folyamat trapéz alakú tagsági függvényekkel történik, amelyeket az alábbi paraméterek (4)

$$f_{reg.}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (4)$$

vagy még kompaktabb módon (5)

$$f_{\text{trapéz}}(x; a, b, c, d) = \max \left[\min \left[\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right], 0 \right] \quad (5)$$

írnak le (MATLAB 2004). Az a és d paraméterek adják meg a trapéz „lábait”, b és c paraméterek pedig a „vállait”. Ábrázolva azt látjuk, hogy az a és d paraméterek mindig a 0 tagsági értéknek megfelelő helyen vagy vonalon lesznek, a b és c paraméterek pedig az 1 tagsági értéknek megfelelő vonalon. A trapéz az esetek többségében nyilvánvalóan nem szimmetrikus alakú.

Fuzzy operátorok alkalmazása

A fuzzy logikai következtetési séma felépítéséhez, definiálnunk kell a logikai operátorokat. A klasszikus halmazelmélet és a logika közti kapcsolat analogiájára a VAGY operátor megegyezik az unió, az ÉS a metszet, a NEGÁCIÓ pedig a komplementer operátorral.

$$\begin{aligned} \mu_{A \cup B}(x) &= \text{MAX}(\mu_A(x), \mu_B(x)), \\ \mu_{A \cap B}(x) &= \text{MIN}(\mu_A(x), \mu_B(x)), \\ \mu_{\neg A}(x) &= 1 - \mu_A(x). \end{aligned}$$

A fuzzyfikálás során több tagsági érték jön létre. A fuzzy operátorok alkalmazásával ezekből egyetlen igaz értéket állít elő a rendszer. Jelen esetben csupán az ÉS operátor alkalmazására volt szükség, amint az a következő pontban leírt szabályoknál bemutatásra kerül.

Következtetés vagy implikáció (HA-AKKOR szabályok) alkalmazása

Az implikáció ($A \Rightarrow B$) input értéke az előtagból a logikai operátorok alkalmazásával nyert igaz érték, az output pedig egy (vagy több) fuzzy halmaz.

Egy logikus szabályból egy logikus következtetés származik.

Implikáció: HA $x=A$ AKKOR $y=B$

$$\begin{array}{l} \text{Tény:} \quad \quad \quad x=A_1 \\ \hline \text{Következtetés:} \quad y=B_1 \end{array}$$

A szabálybázis tehát a következő.

$$R_1: HA \ x_1=A_1 \ \text{ÉS} \ x_2=A_1 \ \text{ÉS} \ \dots \ \text{ÉS} \ x_n=A_1 \ \text{AKKOR} \ y=B_1$$

$$R_2: HA \ x_1=A_2 \ \text{ÉS} \ x_2=A_2 \ \text{ÉS} \ \dots \ \text{ÉS} \ x_n=A_2 \ \text{AKKOR} \ y=B_2$$

$$R_5: HA \ x_1=A_5 \ \text{ÉS} \ x_2=A_5 \ \text{ÉS} \ \dots \ \text{ÉS} \ x_n=A_5 \ \text{AKKOR} \ y=B_5$$

ahol R_1, \dots, R_5 a szabályokat, x_1, \dots, x_n az egyik rendszer esetén a geokémiai, a másiknál az üledéktani (bemeneti) paramétereket, A_1, \dots, A_5 a mállottsági fokozat

nyelvi fogalmát, y a kimeneti értéket, a B_1, \dots, B_5 pedig az üledékkategória nyelvi fogalmát jelenti.

Az implikáció során tehát a jelen esetben tulajdonképpen az öt szabálysornak megfelelően konklúzióként öt fuzzy halmazt kapunk eredményül. Az ES alkalmazásával tehát a legszigorúbb szabálysort alkottuk meg és eszerint osztályoz a rendszer. Csak akkor kapunk a szabálysorok végén egyértelmű eredményt, ha minden input paraméter azonos kategóriába esik. Bizonyos esetekben, amikor egy paraméter nem esik az adott kategóriába, előfordulhat tehát, hogy a következtetési rendszer nem ad kimeneti értéket.

A konklúziók egyesítése, aggregációja

Az egyesítés során az egyes szabályok által létrehozott fuzzy halmazok egyetlen aggregált fuzzy halmazzá ($\mu(y)$) kombinálása történik. Ez utóbbi aggregált vagy egyesített fuzzy halmaz tagsági értéke a szabályok, illetve az implikáció által létrehozott fuzzy halmazok súlyozásából adódik.

Defuzzifikálás

A defuzzifikálással az előző lépésben nyert aggregált vagy egyesített fuzzy halmazból egyetlen reprezentatív, úgynevezett éles értéket (y) kapunk. Több metódus ismert ennek megoldására, azonban a jelen esetben a centroid kalkulációt (Center of Gravity, CoG) alkalmaztam, amely a legelterjedtebb operátor és a kétdimenziós függvény súlypontját adja értékül. A defuzzifikált érték (y) az alábbi formulával (6) számolható (DEMICO & KLIR 2004):

$$y = \frac{\int_R xA(x)dx}{\int_R A(x)dx} \tag{6}$$

ahol:

$X=R$ (X az alaphalmaz, melyet a valós számok halmazán értelmezünk),

A : egy az X alaphalmazon értelmezett fuzzy halmaz,

$A(x)=\mu_A(x)$: x hozzátartozási értéke az A fuzzy halmazhoz.

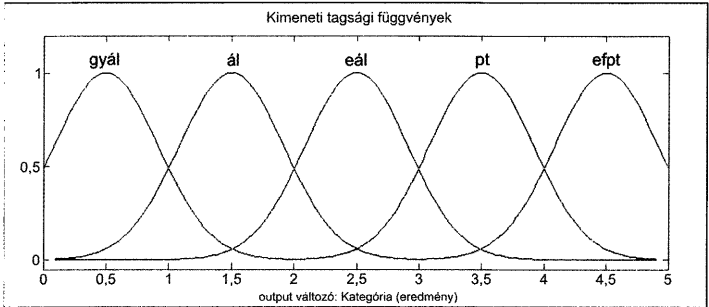
A defuzzifikált érték (y) vagy eredmény jelen esetben egy 0 és 5 közé eső szám, amely szélső értékeket az öt üledékkategóriának (gyengén átalakult, átalakult, erősen átalakult lösz, paleotalaj, erősen fejlett paleotalaj) megfelelően választottam (6. ábra). Az egyes kategóriákat leképező tagsági függvények úgynevezett Gauss-görbék vagy másként, a normális eloszlás sűrűségfüggvényei melyeket az alábbi formula (7) ír le (MATLAB 2004):

$$f_{\text{Gauss}}(x; \sigma, c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \tag{7}$$

ahol:

σ = szórás/átlagos eltérés

e = az eloszlás átlaga/várható értéke



6. ábra. A kimeneti érték létrehozásához használt, az egyes üledékkategóriákat reprezentáló fuzzy halmazok és tagsági függvényeik (Gauss-görbék). Jelmagyarázat: gyál – gyengén átalakult lösz; ál – átalakult lösz; eál – erősen átalakult lösz; pt – paleotalaj; efpt – erősen fejlett paleotalaj

Fig. 6. The fuzzy sets and their membership functions (Gaussian curves) which represent the each sediment categories and were applied to the obtaining of output value. Legend: gyál – weakly altered loess; ál – altered loess; eál – strongly altered loess; pt – palaeosol; efpt – strongly developed palaeosol

Négy feltárás adatkiértékelésének eredményei

A geokémiai és szedimentológiai paraméterek alapján működő két rendszert négy feltárás (Majs–1, Majs–2/a, Majs–3, Bácsfapuszta) adatain teszteltem (2–9. táblázat). Két különálló rendszer kialakítására azért volt szükség, mert így több esetben jutunk eredményhez, ugyanis a szabálybázis úgy került magalkotásra, hogy ha egy bemeneti paraméternél nincs érték a legjellemzőbb kategóriában, akkor nincs eredmény. Tehát ez a „legszigorúbb” szabályhalmaz. Néhány esetben így is előfordul, hogy az egyik vagy másik rendszer nem ad eredményt vagy éppen nem ugyanazt az eredményt hozzák, azaz különböző üledékkategóriát jeleznek. (A bácsfapusztai feltárásnál csupán néhány szedimentológiai adat állt rendelkezésre, ezért itt több minta esetén a programot eleve nem lehetett lefuttatni.)

A vizsgálatokból jól látható, hogy a szedimentológiai adatokkal szemben a geokémiai adatok az üledékkategorizálás szempontjából konzisztensebb adathalmazt alkotnak, azaz a geokémiai adatok alapján az üledékkategóriák jobban elkülöníthetőek és kevesebb esetben fordul elő, hogy egy-egy adat nem igazolja a többi által jelzett üledékkategóriát, ami a végeredmény hiányához vezet. Ilyen esetekben egyébiránt a MATLAB Fuzzy Logic Toolbox grafikus adatai segíthetnek vagy további információk, adatok szükségesek a döntéshez. A rendszerek kimeneti, éles (crisp) értékei tájékoztatást adnak arról is, hogy a mintára legjellemzőbb kategórián belül az adatok alapján az üledék mely másik kategória felé mozdult el. Például a Majs–1 számú feltárás 4,00–4,40 és 4,40–4,80 m közötti mélységből származó mintáinál a gyengén mállott löszök kategóriájának magjától a mállott löszök felé mozdultak el az adatok mindkét rendszer esetén (6. táblázat). Tehát amellet, hogy a legjellemzőbb üledékkategóriába sorolás megtörténik, egy járulékos információt is nyerünk az értékeléshez.

2. táblázat. A Majs-1. számú feltárás geokémiai és szemcseösszetéti adatai

Table 2. Geochemical and grain size analysis data of the Majs-1 outcrop

Mélység (m)/input paraméterek (% , ppm)	0,40–0,80	0,80–1,20	1,20–1,60	1,60–2,00	2,00–2,40	2,40–2,80	2,80–3,20	3,20–3,60	3,60–4,00	4,00–4,40	4,40–4,80	4,80–5,20	5,20–5,60	5,60–6,00	6,00–6,40	6,40–6,80	6,80–7,20	7,20–7,60	7,60–8,00
SiO ₂	69,34	61,08	58,52	59,16	60,75	63,57	65,48	65,92	53,58	57,04	56,87	58,63	59,08	54,05	58,88	60,04	60,31	62,08	57,81
Al ₂ O ₃	14,18	13,08	12,41	12,56	13,24	13,98	13,92	13,78	11,40	11,93	11,50	11,79	12,24	11,26	12,38	12,68	13,04	13,90	13,24
CaO	2,74	11,29	14,79	12,35	10,40	8,10	6,96	7,25	20,09	15,61	15,54	13,10	12,37	16,22	12,01	12,06	10,75	9,17	15,48
Rb	117	103	93	95	99	109	108	109	83	89	87	92	98	89	100	100	104	107	102
Ba	464	421	407	416	425	452	460	451	357	380	396	397	399	405	377	417	416	446	421
CaO+K ₂ O+Na ₂ O/Al ₂ O ₃	0,48	1,14	1,47	1,27	1,07	0,85	0,76	0,76	2,03	1,59	1,64	1,41	1,30	1,74	1,27	1,25	1,12	0,93	1,41
<0,002 mm	12,70	7,88	6,65	6,52	5,79	7,16	7,17	6,86	5,73	5,60	5,26	6,11	6,02	6,77	6,47	5,71	5,58	8,76	8,43
0,0156–0,0625 mm	35,79	47,18	50,28	48,64	46,51	55,05	53,99	62,69	59,15	54,00	55,66	51,72	51,43	50,39	49,57	45,97	53,25	44,24	45,80
Mz(mikron)	11,08	17,61	19,19	19,27	24,87	16,85	18,09	21,64	21,03	22,35	21,71	20,15	20,79	19,05	18,37	22,82	21,18	15,48	19,00

3. táblázat: A Majs-2/a. számú feltárás geokémiai és szemcseösszetéti adatai

Table 3 Geochemical and grain size analysis data of the Majs-2/a outcrop

Mélység (m)/input paraméterek (% , ppm)	0,00–0,40	0,40–0,80	0,80–1,20	1,20–1,60	1,60–2,00	2,00–2,40	2,40–2,80	2,80–3,20	3,20–3,60	3,60–4,00	4,00–4,40	4,40–4,80	4,80–5,20	5,20–5,60	5,60–6,00	6,00–6,40
SiO ₂	61,11	52,34	56,79	58,02	60,67	63,86	63,18	62,35	62,46	60,28	60,88	59,27	62,21	60,56	61,50	60,25
Al ₂ O ₃	12,05	10,31	11,05	11,74	13,43	14,41	13,74	13,23	13,05	12,23	12,37	12,31	12,86	12,46	12,44	12,18
CaO	12,21	22,94	16,54	13,54	9,51	5,94	8,29	9,85	10,35	12,20	11,82	12,54	9,31	11,12	10,27	11,38
Rb	98	79	83	91	102	112	111	105	99	93	90	93	98	95	93	88
Ba	402	340	346	365	436	456	437	417	416	387	401	402	411	423	388	397
CaO+K ₂ O+Na ₂ O/Al ₂ O ₃	1,30	2,51	1,80	1,45	1,00	0,70	0,88	1,03	1,08	1,28	1,27	1,32	1,02	1,20	1,14	1,25
<0,002 mm	6,22	6,88	7,33	7,86	6,89	6,80	8,39	7,46	7,10	7,16	6,59	5,76	7,01	5,87	7,98	5,85
0,0156–0,0625 mm	53,08	46,24	46,79	51,20	51,62	51,45	50,18	49,50	45,72	48,20	46,85	49,82	45,98	56,46	47,14	55,14
Mz (mikron)	23,50	21,36	15,59	17,00	17,41	17,47	16,29	17,24	20,26	17,57	18,32	20,69	16,86	22,77	16,52	21,73

4. táblázat. A Majs-3 számú feltárás geokémiai és szemcseösszetéti adatai
 Table 4 Geochemical and grain size analysis data of the Majs-3 outcrop

Mélység (m)/input paraméterek	0,00-0,40	0,40-0,80	0,80-1,20	1,20-1,60	1,60-2,00	2,00-2,40	2,40-2,80	2,80-3,20	3,20-3,60
SiO ₂	55,40	56,40	61,46	62,56	64,03	63,82	64,02	63,80	62,07
Al ₂ O ₃	10,74	11,13	13,42	13,23	13,38	13,33	13,90	13,98	13,40
CaO	17,38	16,37	7,91	7,55	6,52	7,10	5,61	7,06	9,40
Rb	84	86	103	100	106	105	111	114	107
Ba	355	357	423	420	425	426	420	444	427
CaO+K ₂ O+Na ₂ O/Al ₂ O ₃	1,93	1,77	0,89	0,88	0,79	0,82	0,69	0,78	0,97
<0,002 mm	5,60	4,34	7,35	4,70	5,04	6,10	6,79	7,33	6,60
0,0156-0,0625 mm	52,87	66,33	47,09	49,97	51,45	48,55	49,31	48,44	49,02
Mz (mikron)	23,29	28,07	17,01	25,38	23,69	21,46	17,70	17,74	21,58

5. táblázat. A bácsfapusztai feltárás geokémiai és szemcseösszetéti adatai
 Table 5. Geochemical and grain size analysis data of the Bácsfapuszta outcrop

Mélység (m)/input paraméterek	0,00-0,20	0,20-0,60	0,60-1,00	1,00-1,40	1,40-1,80	1,80-2,20	2,20-2,60	2,60-3,00	3,00-3,40	3,40-3,80	3,80-4,20	4,20-4,60	4,60-5,00
SiO ₂	56,01	57,12	60,24	60,39	60,32	66,86	55,12	60,38	67,71	69,01	69,83	61,29	64,36
Al ₂ O ₃	11,64	11,80	12,87	13,19	12,96	15,67	12,47	13,58	15,55	16,46	16,02	14,11	14,20
CaO	20,43	18,39	13,24	12,64	14,15	4,24	20,31	13,69	3,85	1,25	0,99	12,15	8,74
Rb	85	87	99	102	100	131	93	105	129	140	123	105	106
Ba	367	371	425	421	408	516	420	448	507	526	509	435	477
CaO+K ₂ O+Na ₂ O/Al ₂ O ₃	2,01	1,82	1,30	1,23	1,35	0,52	1,88	1,25	0,49	0,29	0,28	1,10	0,87
<0,002 mm	5,19	6,01				4,26	5,07		4,64				
0,0156-0,0625 mm	56,38	54,02				60,67	51,09		56,21				
Mz (mikron)	15,92	14,28				20,29	11,52		20,71				

Mélység (m)	Geokémia		Szemcseösszetétel	
	Eredmény	Kategória	Eredmény	Kategória
0,40-0,80	3,5	pt	4,41	efpt
0,80-1,20	1,5	ál	-	n.e.
1,20-1,60	1,5	ál	1,5	ál
1,60-2,00	1,5	ál	1,5	ál
2,00-2,40	1,5	ál	-	n.e.
2,40-2,80	2,5	eál	-	n.e.
2,80-3,20	2,5	eál	-	n.e.
3,20-3,60	2,5	eál	0,748	gyál
3,60-4,00	0,585	gyál	0,642	gyál
4,00-4,40	0,637	gyál	0,586	gyál
4,40-4,80	0,873	gyál	0,599	gyál
4,80-5,20	-	n.e.	1,38	ál
5,20-5,60	1,5	ál	0,739	gyál
5,60-6,00	-	n.e.	1,5	ál
6,00-6,40	1,5	ál	1,5	ál
6,40-6,80	1,5	ál	-	n.e.
6,80-7,20	1,5	ál	0,627	gyál
7,20-7,60	2,5	eál	-	n.e.
7,60-8,00	1,5	ál	-	n.e.

6. táblázat. A Majs-1 számú feltárás üledékkategorizálásának eredményei. Jelmagyarázat: gyál – gyengén átalakult lösz, ál – átalakult lösz, eál – erősen átalakult lösz, pt – paleotalaj, efpt – erősen fejlett paleotalaj, n.e. – nincs eredmény

Table 6 Results of the sediment categorisation of the Majs-1 outcrop. Legend: gyál – weakly altered loess, ál – altered loess, eál – strongly altered loess, pt – palaeosol, efpt – strongly developed palaeosol, n.e. – there is no result

7. táblázat. A Majs-2/a számú feltárás üledékkategorizálásának eredményei. Jelmagyarázat: gyál – gyengén átalakult lösz, ál – átalakult lösz, eál – erősen átalakult lösz, pt – paleotalaj, efpt – erősen fejlett paleotalaj, n.e. – nincs eredmény

Table 7. Results of the sediment categorisation of the Majs-2/a outcrop. Legend: gyál – weakly altered loess, ál – altered loess, eál – strongly altered loess, pt – palaeosol, efpt – strongly developed palaeosol, n.e. – there is no result

Mélység (m)	Geokémia		Szemcseösszetétel	
	Eredmény	Kategória	Eredmény	Kategória
0,00–0,40	1,5	ál	0,594	gyál
0,40–0,80	0,585	gyál	1,5	ál
0,80–1,20	0,611	gyál	–	n.e.
1,20–1,60	–	n.e.	–	n.e.
1,60–2,00	1,5	ál	–	n.e.
2,00–2,40	2,5	eál	–	n.e.
2,40–2,80	2,5	eál	–	n.e.
2,80–3,20	1,5	ál	–	n.e.
3,20–3,60	1,5	ál	1,5	ál
3,60–4,00	1,5	ál	–	n.e.
4,00–4,40	–	n.e.	1,5	ál
4,40–4,80	1,5	ál	0,715	gyál
4,80–5,20	1,5	ál	2,5	eál
5,20–5,60	1,5	ál	0,585	gyál
5,60–6,00	1,5	ál	–	n.e.
6,00–6,40	–	n.e.	0,598	gyál

Mint a fentiekből látható a rendszer korántsem tökéletes és több pontján (bemeneti adatok száma, tartományértékei, tagsági függvények stb.) továbbfejleszhető. Mindenesetre jó lehetőséget kínál arra, hogy a bizonytalansággal terhelt, az öskörnyezeti értékelésben szerepet játszó üledékkategorizálás egyszerűbb, matematikai alapokon nyugvó folyamat legyen.

Összefoglalás

A löszök és paleotalajok bizonyos üledéktani és geokémiai paramétereik alapján, mállás és pedogenezis általi érintettségüknek megfelelően üledékkategóriákba, üledéktípusokba sorolhatók. Ezen kategóriák egymástól nem

8. táblázat. A Majs-3 számú feltárás üledékkategorizálásának eredményei. Jelmagyarázat: gyál – gyengén átalakult lösz, ál – átalakult lösz, eál – erősen átalakult lösz, pt – paleotalaj, efpt – erősen fejlett paleotalaj, n.e. – nincs eredmény

Table 8. Results of the sediment categorisation of the Majs-3 outcrop. Legend: gyál – weakly altered loess, ál – altered loess, eál – strongly altered loess, pt – palaeosol, efpt – strongly developed palaeosol, n.e. – there is no result

Mélység (m)	Geokémia		Szemcseösszetétel	
	Eredmény	Kategória	Eredmény	Kategória
0,00–0,40	0,586	gyál	0,586	gyál
0,40–0,80	0,603	gyál	0,585	gyál
0,80–1,20	1,52	ál	–	n.e.
1,20–1,60	–	n.e.	0,7	gyál
1,60–2,00	2,5	eál	0,608	gyál
2,00–2,40	2,5	eál	1,5	ál
2,40–2,80	2,5	eál	–	n.e.
2,80–3,20	2,5	eál	–	n.e.
3,20–3,60	1,56	ál	1,5	ál

9. táblázat. A bácsfapusztai feltárás üledékkategorizálásának eredményei. Jelmagyarázat: gyál – gyengén átalakult lösz, ál – átalakult lösz, eál – erősen átalakult lösz, pt – paleotalaj, efpt – erősen fejlett paleotalaj, n.e. – nincs eredmény, n.a. – nincs adat

Table 9. Results of the sediment categorisation of the Bácsfapuszta outcrop. Legend: gyál – weakly altered loess, ál – altered loess, eál – strongly altered loess, pt – palaeosol, efpt – strongly developed palaeosol, n.e. – there is no result, n.a. – there is no data

Mélység (m)	Geokémia		Szemcseösszetétel	
	Eredmény	Kategória	Eredmény	Kategória
0,00–0,20	0,592	gyál	–	n.e.
0,20–0,60	0,625	gyál	–	n.e.
0,60–1,00	1,5	ál	n.a.	n.a.
1,00–1,40	1,5	ál	n.a.	n.a.
1,40–1,80	1,5	ál	0,761	gyál
1,80–2,20	4,24	efpt	–	n.e.
2,20–2,60	–	n.e.	n.a.	n.a.
2,60–3,00	1,5	ál	0,68	gyál
3,00–3,40	4,3	efpt	n.a.	n.a.
3,40–3,80	4,4	efpt	n.a.	n.a.
3,80–4,20	4,32	efpt	n.a.	n.a.
4,20–4,60	–	n.e.	n.a.	n.a.
4,60–5,00	–	n.e.	n.a.	n.a.

válnak el élesen, azok sok esetben egymást átfedő, egymásba fokozatos átmenetet képező kategóriák. A fuzzy halmazok elméletének segítségével a besorolás, a löszök és paleotalajok egyes üledékkategóriákba tartozása matematikai módszerekkel adható meg. A két különálló, geokémiai és szemcseösszetételi adatokon, mint bementi paramétereken nyugvó rendszer segítséget nyújt az őskörnyezeti rekonstrukció során történő üledékkategorizálásban.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti MENTES Gyulát, aki felhívta figyelmemet a fuzzy halmazok elméletére és KALMÁR Jánost a dolgozat matematikai szempontú felülvizsgálatáért. őszinte hálával tartozom BALOGH Zsuzsannának a geokémiai, továbbá CZIGANY Szabolcsnak és DEZSŐ Józsefnek a szemcseösszetételi vizsgálatokban nyújtott segítségükért.

Köszönöm FÖLDVÁRI Máriának és GEIGER Jánosnak a kézirat gondos lektorálását és igen hasznos észrevételeiket.

Irodalom – References

- BÁRDOSSY Gy. 2005: Szilárd ásványi nyersanyagtelepek megkutatottságának értékelése Bayes-féle valószínűségek és a bizonytalan halmazok elméletének segítségével. – *Földtani Közlöny* 135/1, 57–77.
- BÁRDOSSY Gy., ÁRKAI P. & FODOR J. 2001: A bizonytalan halmazok elméletének alkalmazása röntgenifraktométeres ásványtani fázisanalízis eredményeinek értékelésére. – *Földtani Közlöny* 131/3–4, 331–341.
- BÁRDOSSY Gy., FODOR J., MOLNÁR P. & TUNGLI Gy. 2000: A bizonytalanság értékelése a földtudományokban. – *Földtani Közlöny* 130/2, 291–322.
- DEMICO, R.V. & KLIR, G. J. 2004: *Fuzzy Logic in Geology*. – Elsevier Academic Press, 347 p.
- FÖLDVÁRI M., BÁRDOSSY Gy. & FODOR J. 2002: A bizonytalan halmazok elméletének alkalmazása közetminták termoanalitikai vizsgálatának értékeléséhez a Bodai Aleurit Formáció példáján. – *Földtani Közlöny* 132/1, 1–15.
- FOLK, R. L. & WARD, W. C. 1957: Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters. – *Journal of Sedimentary Petrology* 27/1, 3–26.
- FRIEDMAN, G. M. & SANDERS, J. E. 1978: *Principles of Sedimentology*. – John Wiley & Sons Inc., 58–81.
- FULLER R. 1997: FULLER Róbert kutatási eredményei 1989–1997. <http://www.abo.fi/~rfuller/hab.pdf>
- HABERLER, M. 2005: Einsatz von Fuzzy Methoden zur Detektion konsistenter Punktbewegungen. – *Geowissenschaftliche Mitteilungen*, Heft 73, 115 p.
- HARNOIS, L. 1988: The CIW index: A new chemical index of weathering. – *Sedimentary Geology* 55, 319–322.
- HEINE, K. 1999: Beschreibung von Deformationsprozessen durch Volterra- und Fuzzy-Modelle sowie Neuronale Netze. – *Deutsche Geodätische Kommission, Dissertationen*, Heft 516, 110 p.
- HUM, L. 1998: Geochemical investigations of the Dunaszekcső loess-paleosol sequence. – *Acta Mineralogica-Petrographica* 39, 139–150.
- HUM L. 2002: Délkelet-dunántúli löszösszletek ásványos és geokémiai jellegei és ezek eredete. – *Földtani Közlöny* 132 (különszám), 117–132.
- HUM L. & FÉNYES, J. 1995: The geochemical characteristics of loesses and paleosols in the South-Eastern Transdanube (Hungary). – *Acta Mineralogica-Petrographica* 36, 89–100.
- JOHNSON, D. M., HOOPER, P. R. & CONREY, R. M. 1999: XRF Analysis of Rocks and Minerals for Major and Trace Elements on a Single Low Dilution Li-tetraborate Fused Bead. – *Advances in X-ray Analysis* 41, 843–867.
- MATLAB 2004: *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. – MATLAB 7.0, The MathLab Inc.
- NESBITT, H. W. & YOUNG, G. M. 1982: Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. – *Nature* 299, 715–717.

- PÉCSI M. 1993: Negyedkor és löszkutatás. – Akadémiai Kiadó, Bp., 375 p.
- SCHNETGER, B. 1992: Chemical composition of loess from a local and worldwide view. – *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte/Abhandlungen* **1**, 29–47.
- SÜMEGI P 2001: A negyedidőszak földtani és ökoszisztémái alapjai. – JATEPress, Szeged, 262 p.
- WEN, Q., YANG, W., DIAO, G., SUN, E, YU, S. & LIU, Y. 1984: The evolution of chemical elements in loess of China and paleoclimatic conditions during loess deposition. – In: PÉCSI M. (ed.): *Lithology and stratigraphy of loess and paleosols*. Geographical Research Institute Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 161–169.
- WEN, Q., DIAO, G. & SUN, F. 1985: Geochemical characteristics of loess in Luochuan section, Shaanxi province. – In: PÉCSI M. (ed.): *Loess and the Quaternary. Chinese and Hungarian case studies, Studies in Geography in Hungary* **18**, 65–77.
- ZADEH, L. A. 1965: Fuzzy sets. – *Information and Control* **8/3**, 338–353.
- Kézirat beérkezett: 2006. 03. 31.