

KÍSÉRLET A NYUGAT-ANATÓLIAI FEHÉRMÁRVÁNYOK KVANTITATÍV TEXTÚRAELEMZÉSEN ALAPULÓ SZÉTVÁLASZTÁSÁRA

ZÖLDFÖLDI JUDIT^{1,2} & SZÉKELY BALÁZS^{2,3}

¹ Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Esslingen am Neckar, NSZK

² Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen, Tübingen, NSZK

³ Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai Tanszék, Űrkutató Csoport, Budapest balazs.szekely@elte.hu

Abstract

Plenty of analytical methods were introduced to clarify provenance problems of white marble artefacts and building materials. The goal of all these techniques is to determine individual features of different marble quarries or at least to cluster them into reasonable groups with localised geographic origin.

The study presented here is a part of a multi-method investigation technique, developed to clarify Western Anatolian white marble provenance questions. Beside of the instrumental analytical investigations the analysis of fabric became a key technique in the last years. The quantitative texture analysis (QTA), the combination of the quantitative fabric analysis and extraction of fractal properties of the calcite grain boundaries was applied on Western Anatolian white marbles. The advantage of the QTA is that it can be performed on the same thin section as used for cathodoluminescence microscopy and therefore requires no extra material.

Thin sections of marble samples from different Western Anatolian occurrences were prepared and digitally enhanced images of these thin sections were processed. Various parameters from the images themselves and from vectorised contours of grain boundaries were calculated. Based on the distribution of the derived parameters the rock samples were grouped into distinct categories. These clusters represent different tectonic and geological units. Having defined the grouping criteria for the rock samples, this categorisation was then applied to the thin sections of archaeological artefacts determining the supposed provenance. The results were compared to categorisations based on other methods like isotope geochemistry, trace element analysis, and cathodoluminescence investigation. These techniques mutually support each other resulting in clearly defined provenance groups and provide an opportunity to organise them into a decision tree scheme. The decision tree paves the way towards a logically set of analytical techniques avoiding unnecessary analytical steps: the digital imaging and feature extraction methods provide quantitative values, therefore parameter intervals can be defined for different provenance groups.

Bevezetés

A fehérmárványok eredetvizsgálata az utóbbi évtized egyik fontos archeometriai kutatási területévé vált. Számos elemzési módszert (pl. nyomelem-vizsgálat, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ és $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparány-elemzés, katódlumineszcenciás vizsgálat) vetettek be eredetvizsgálati célra. Mintegy évtizede pedig a kvantitatív szöveti elemzés (Quantitative Fabric Analysis, QFA, Schmid et al. 1995) is a kutatás fegyvertárába került.

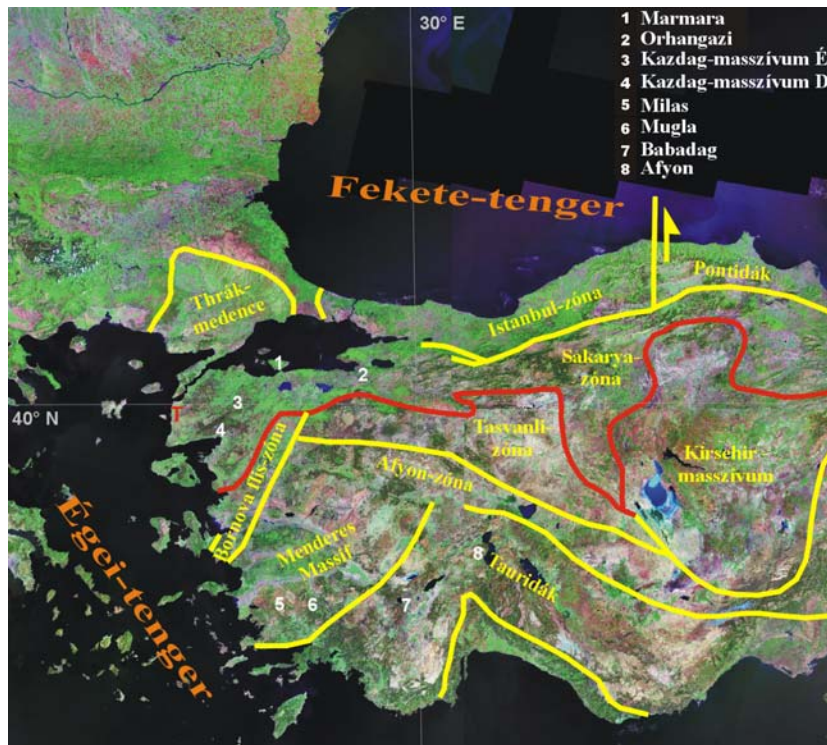
A textúra – csakúgy, mint a legtöbb más kőzet esetében – a márványok alapvető jellemzője, hiszen megfigyelhető jellegzetességei szorosan kapcsolódnak a kőzet fácieséhez, keletkezésének történetéhez. Igen sok esetben ezek a sajátosságok egyediek, azaz csak az adott természetbeli előfordulásra jellemzők. A régészeti objektumok alapanyagukban értelemszerűen hordozzák ezen sajátosságokat.

A kőzetszöveti sajátosságok általában háromdimenziós (3D) fraktáloszlást mutatnak (pl.

Turcotte 1997), ám számunkra legtöbbször nem áll rendelkezésre e 3D eloszlást akár csak megközelítő leírás. Hogy mégis jellemezhesük a kőzet szövetének ezen sajátosságait, a közelítő leírásra alkalmas jellemzőket igyekszünk találni, majd ezen jellemzők kinyerése a célunk. Esetünkben, vagyis régészeti objektumok alapanyagának származásvizsgálatánál az a cél, hogy az így kapható számszerű paraméterek értékeit végül össze tudjuk hasonlítani a geológiai minták és a régészeti objektumok esetén.

Jelen tanulmányunkban anatóliai fehérmárványokat vizsgáltunk azzal a szándékkal, hogy az ókor egyik legjelentősebb régészeti lelőhelyén, Trójában talált, márványból készült architektúrális elemek nyersanyagának eredetére vonatkozóan, egy átfogó projekt részeként adatokat nyerjünk.

Vizsgálati módszerünket az anatóliai fehérmárvány-előfordulásoknál (1. ábra) gyűjtött mintákra (geológiai minták), illetve a trójai objektumokból származó apró márványtöredékekre (régészeti minták) alkalmaztuk. (A minták leírását Zöldföldi és Satir (2003) közli.)



1. ábra:

A nyugat-anatóliai tektonikai egységek (Okay et al. 1996 nyomán) és a mintavételi helyek. (T: Trója)

A módszer eredményeként meghatározott, fent említett sajátosságok összehasonlíthatóak: az esetleges azonosságok a régészeti objektumok eredetére utalhatnak, szerencsés esetben meghatározható így az adott műtárgy alapanyagának származási helye. Más esetekben a származási hely szűkítésére használható az eljárás: jelentős különbségek megléte esetén legalábbis sok természeti előfordulás, illetve ismert márványbánya mindenképpen kizárható. Az eljárás relatív olcsósága és minimális műszerigénye miatt ajánlható olyan esetekben is, amikor a vizsgálat költségvetése igen kötött, illetve csak igen korlátozott számú műszeres elemzésre van mód. Ebben az esetben az eljárás más műszeres analitikai megoldásokkal együtt, megfelelő döntési fa formájában alkalmazva jelentős megtakarítást hozhat.

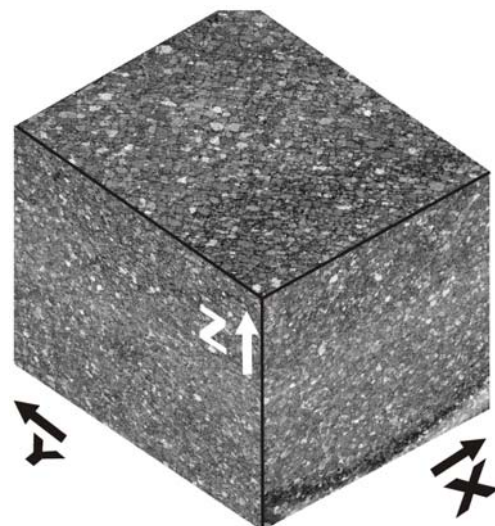
A kvantitatív textúraelemzés (QTA)

A kvantitatív textúraelemzés kifejezését (Quantitative Texture Analysis, QTA) Perugini et al. (2003) vezette be két, már korábban is alkalmazott módszer kombinációjára vonatkoztatva: a kvantitatív szöveti elemzés (QFA; Schmid et al. 1995), valamint a digitális képfeldolgozásban elterjedt képi fraktálemzés (Fractal Analysis, FA) együttes alkalmazásaként. (A két módszer kombinációját korábban magunk is alkalmaztuk, ld. Zöldföldi & Székely, in press.)

A módszer a – már a QFA-nál is használt – valamely irányban elvágott csiszolt felületű minták

vagy vékonycsiszolatok vizsgálatán alapul (2. ábra).

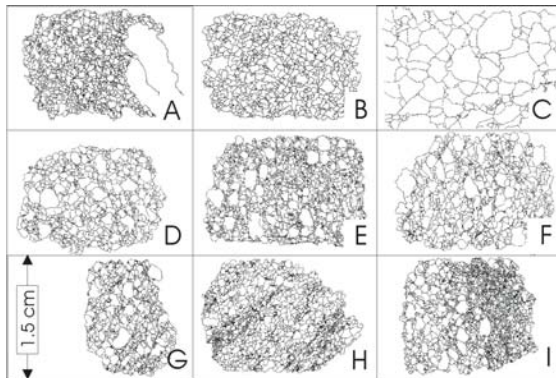
A minta felületéről valamely technikával (pl. fényképezés, szkennelés) képet készítünk, majd az így kapott képet alkalmas digitális feldolgozási lépések segítségével olyan formátumúra hozzuk, hogy az egyes szemcsék határai jól kivehetőek legyenek (3. ábra), és minden más vonalszerű elem (pl. ikresedés) eltűnjön.



2. ábra: Három, egymásra merőleges irányban vágott minta vékonycsiszolati képeinek mozaikja. (A valóságban az egyes metszetek természetesen nem pontosan egymás mellett helyezkedtek el.)

(Jelen pillanatban a legkisebb hibájú eljárás a szemcsék kézi körberajzolása, de ismeretesek relatíve kevés hibával dolgozó automatikus eljárások is.) Az elemzés közvetlen bemenete tulajdonképpen az így előálló szemcsekontúrokat ábrázoló fekete-fehér (bináris) kontúrrajz.

A QTA mindkét módszerkomponense ugyanezt az adatrendszert használja. A módszerkomponensek együttes alkalmazásának előnye, hogy kihasználja mind a raszteres, mind a vektoros megközelítés előnyeit. Az alábbiakban külön-külön röviden összefoglaljuk mindkét feldolgozási technikát.



3. ábra: Néhány minta kontúrja: A) Mustafa Kemalpaşa, B) Afyon, C) Mugla, D) Marmara, E) Orhangazi, F) Altinoluk, G) PBA6, H) PBA30, I) PBA21. Az A-F képek geológiai minták, az utóbbi három pedig trójai régészeti minta.

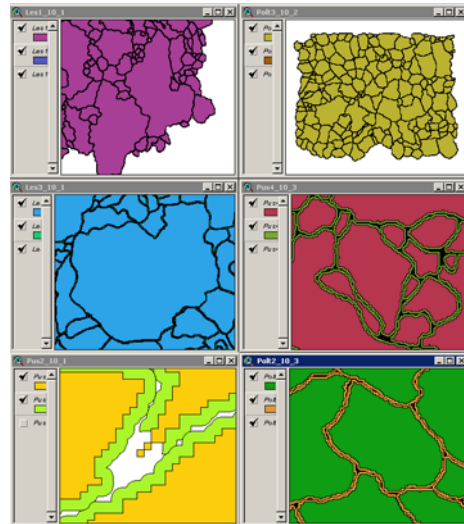
A kvantitatív szöveti elemzés (QFA)

Ez a technika a szemcsék geometriai elhelyezkedését nem, csak az egyes szemcsék geometriáját, illetve a szemcsék geometriai paramétereinek statisztikai eloszlását vizsgálja. A szemcséket a fenti kontúrjaiból automatikus vektorizálással származtatjuk, majd a továbbiakban az egyes szemcsék geometriai alakját elemezzük. (Sokszor ezt az adatrendszert tisztítani kell, ld. 4. ábra)

A leggyakrabban használt és származásvizsgálati szempontból is jelentős szemcsejellemző a szemcsék legnagyobb kiterjedése, másnéven hossz tengely.

Mintajellemzőként a szemcsék összességére tekintettel meghatározhatjuk az előforduló leghosszabb hossz tengelyt, amit angol rövidítéssel MGS-nek (Maximum Grain Size) szokás jelölni. Ezen mintajellemzőt számos szerző igen jó eredetindikátornak találta (pl. Schmid et al. 1995).

További csoportot képeznek a szemcsék területéből származtatott mennyiségek. Perugini et al. (2003) például az átlagos szemcseterületet is használja.



4. ábra: A szemcsék geometriai körvonalainak származtatása és a vonalvastagság torzító hatásának kiküszöbölése.

Az MGS-hez hasonlóan lehet a legnagyobb előforduló területet (MGA, Maximum Grain Area) is definiálni.

A különféle levezetett paraméterekkel kapcsolatban megjegyzendő, hogy mivel a szemcsekontúr-mintázat fraktál, az önhasonlóság miatt a szemcseméretetek logaritmikus skálán általában érdemben változnak. Ennek következtében az egyszerű átlagoláson alapuló eljárások sokszor félrevezető eredményt ad(hat)nak.

Amint azt a 3.A. ábra mutatja, néhány paraméter (pl. MGS) rendkívül érzékeny lehet a minta konkrét kivágatára, azaz, hogy a kőzetnek éppen mely darabját vizsgáljuk. Ezen érzékenység csökkentése érdekében korábban bevezettük az MGS paraméter módosított, statisztikai szempontból előnyösebb változatát, az $MGS_{99\%}$ -t, amely az a hosszúság, amelynél a mintában lévő szemcsék 99%-nak a hossz tengelye kisebb. (Másképpen a hossz tengely eloszlás 99%-os kvantilise.) Ez a mérőszám sokkal robusztusabb, mivel lényegesen kevésbé valószínű, hogy a minta kivágata érdemben befolyásolja az értékét. Ezzel analóg módon bevezethetjük a szemcseterületre pl. az $MGA_{99\%}$ -t is.

A fraktálemelés

Itt az előzőekkel ellentétben az egyes szemcséket külön nem vizsgáljuk, hanem épp az egész mintázat jellegét együttesen próbáljuk fraktáljellemzők segítségével megragadni. Az eljárás abban is különbözik a QFA-technikától, hogy míg a QFA esetén egy-egy mintából igen sok eloszlás, illetve paraméter származtatható, a fraktálanálízis esetén klasszikus esetben csak egy adatot, nevezetesen a fraktáldimenziót (D) nyerjük. Ennek meghatározására leggyakrabban a klasszikus dobozszámlálási eljárást alkalmazzák (5. ábra, ld.

pl. Turcotte 1997): a kapott pixelszámokat log-log skálán ábrázolva tiszta fraktálviselkedés esetén egyenest kell kapjunk. A pontokra így függvényt illesztve a függvény paramétereként (log-log skálán az egyenes negatív meredekségeként) kapjuk meg a fraktáldimenziót (gyakran használt jelölése D_{box}).

Mivel azonban a meredekségben a különbség viszonylag kicsiny (azaz a görbe csak kissé tér el az egyenestől), a multifraktál-elemzés általában nem vezet robusztus eredményre. Mivel azonban az eltérés nemcsak, hogy szignifikáns, de származásvizsgálati szempontból jelentősnek is bizonyult, igyekeztünk parametrizálni azt. Ennek megoldásaként az illesztett fraktál dimenziójának a szórását (SD, illetve SD_{box}) találtuk megfelelőnek.

Eredmények

Az anatóliai márványokon és trójai régészeti mintákon alkalmazva a módszert ígéretes eredményekre jutottunk. Több különféle csoportosítási lehetőséget sikerült találnunk (ld. pl. Zöldföldi és Székely, in press), ebből egy példát mutatunk itt be (6. ábra). A felső ábrán a fraktálemelési paramétereket fektettük a tengelyekre, míg az alsó ábrán az MGS/MGS_{99%} arány és a fraktáldimenzió összefüggését láthatjuk.

Tapasztalatunk azt mutatja, hogy számos esetben a minták nem tiszta fraktálviselkedést mutatnak, hanem ún. multifraktálról van szó (ld. pl. Turcotte 1997), amely esetben a log-log skálán a várt egyenes helyett a pontok általában felülről konvex görbe mentén helyezkednek el.

Utóbbi esetben mindkét jellemző jó korrelációt mutat, ami nem meglepő, hiszen az MGS/MGS_{99%} arány magas értéke heteroblasztos szövetre (azaz széles szemcseméret-eloszlásra) enged

következtetni, ami egyúttal magasabb fraktáldimenziót is jelent.

Az ábra ugyanakkor azt is mutatja, hogy az eljárás önmagában általában nem alkalmas a pontos származás megállapítására, viszont tektonikai egységekbe való sorolásra gyakran igen. Ezért a származásvizsgálati kérdések megnyugtató megválaszolásához a QTA-eredményeket más módszerek eredményeivel ötvözni lehet és érdemes.

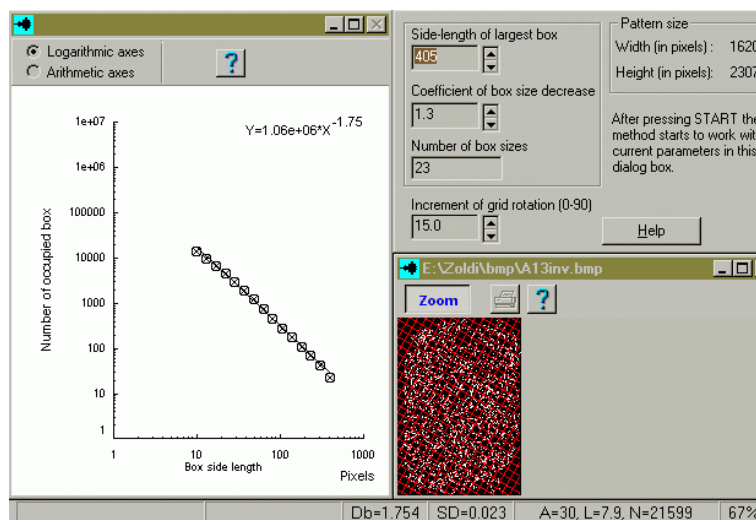
A módszerek alkalmazásnak megfelelő sorrendbe rakásával döntési fa (7. ábra) készíthető, amelynek segítségével adott esetben költséges műszeres vizsgálatok takaríthatók meg, hiszen bizonyos csoportosítási lépések már eleve kiejtenek egyes származási helyeket.

Következtetések

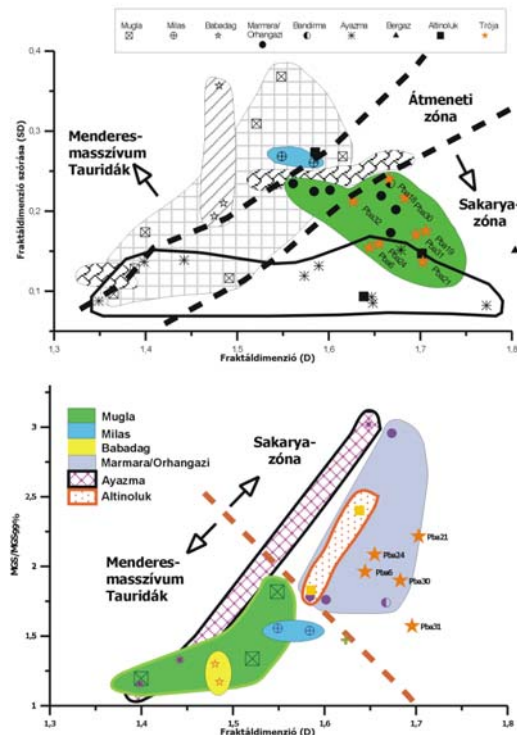
1. A fehérmárványokra alkalmazott QTA-technika a fentiekben részletezett kiegészítésekkel és módszertani továbbfejlesztésekkel hatékony kiegészítő eszköznek bizonyult származásvizsgálati szempontból. Az ígéretes eredményekből kiindulva megkezdődött egy európai márvány QTA-adatbázis kialakítása.

2. Az anatóliai márványokkal kapcsolatban megfogalmazott kérdésre, miszerint a trójai architektúrális elemek vajon származhatnak-e kisázsiai anyagból, a QTA-technológia – csakúgy mint más műszeres technikák egy része – pozitív indikációt adott.

3. A QTA-technológiát sikerült többféle döntési fa döntési szintjeibe építeni, csökkentve ezáltal a szükséges műszeres vizsgálatok számát.



5. ábra: A fraktáldimenzió számításának kivitelezése. A jobb alsó panelben láthatjuk, ahogy az aktuális mintára (itt fekete alapon fehér kontúrokkal) az éppen számítás alatt levő rácshálózat (piros) ráfekszik. A numerikus hatások csökkentése érdekében a rácshálót forgatjuk és a különböző azimutok eredményeit átlagoljuk. A bal oldali panelen (log-log skála) látható a már eddig kiszámított nagyságrendekre kapott eredmény az illesztett függvény képletével. Az eddig meghatározott, de még módosuló fraktáldimenzió ebben az esetben 1,75.



6. ábra: Két példa a QTA-eredmények kiértékelésére. A felső ábrán a fraktáldimenzió (D) és a fraktáldimenzió szórása (SD) összefüggését láthatjuk, míg alul egy QFA-hányadost vetjük össze a fraktáldimenzióval (magyarázat a szövegben).

Köszönetnyilvánítás

A módszer alkalmazásának komoly kezdeti lökést adott a *Magyarországi római és középkori márvány- és mészkőleletek archeometriai vizsgálata (Archäometrische Untersuchungen an römischen und mittelalterlichen Marmorobjekten bzw. Baudenkmäler aus Ungarn, 2001-2002)* című DAAD-MÖB pályázati forrás rendelkezésre állása. Köszönet illeti a projekt két témavezetőjét Prof. Dr. Muharrem Satirt, és T. Biró Katalint, valamint a projekt többi résztvevőjét folyamatos támogatásukért és az inspiráló kutatói légkör megteremtéséért.

7. ábra: A QTA kapcsolata más analitikai módszerekkel egy döntési fa formájában. A szögletes zárójelben lévő mintarövidítések geológiai mintákat jeleznek, (TROY) pedig trójai régészeti mintákat. (A minták leírását ld. Zöldföldi és Satir 2003). A nyilak azt mutatják, hogy a régészeti mintákról hogyan születik meg a végső, származást érintő döntés.

A D>1.5 and SD<0.24						B D>1.5 and SD<0.24					
[MRM]	[ORH]	[BDR]	[SRH]	[ALT]	[BRG]	(TROY)	[AFN]	[MGL]	[BBD]	[MLS]	[AYM]
						[AYM]					
						B1 MGS99% < 2 mm [MLS]			B2 MGS99% > 2 mm [MGL] [BBD]		
						[AYM]					
A1 d180 < -10.5	A2 -10.5 < d180 < -5.5	A3 d180 > -5.5				B1a CL red	B1b CL non-red		B2a SD < 0.15	B2b SD > 0.15	
[BRG]	[SRH] [ALT]	[MRM] [ORH] [BDR] [ALT] [AYM] [SRH] (TROY)	[MRM] [ORH] [SRH] (TROY)			[MLS]	[AFN]	[AYM]	[AYM]	[BBD]	[MGL]
		d13C < 2.0	2.0 < d13C < 3.1		3.1 < d13C	d13C < 1.0	d13C > 1.0	13C < 2.0	13C > 2.0	13C > 1.0	13C > 1.0
		[SRH] [ALT]	[AYM][ALT][SRH][MRM][ORH][TROY]			[MRM] [ORH] (TROY)	[AFN]	[AFN] [AYM]	[AYM]	[MGL]	[MGL] [BBD]
	87/86SI < 0.7076	87/86SI > 0.7077	87/86SI < 0.7076	87/86SI > 0.7077	87/86SI < 0.7076	87/86SI < 0.7076	87/86SI < 0.7077	87/86SI < 0.7077	87/86 < 0.7076	87/86 > 0.7077	
	[SRH]	[ALT]	[SRH]	[ALT]	[AYM] [MRM] [SRH]	[MRM] [ORH] [ORH] (TROY)			[AYM]	[AFN]	

Irodalom

PERUGINI, D., MORONI, B. & POLI, G. (2003): Characterization of marble textures by image and fractal analysis. In: Lazzarini, L. (ed.): *ASMOSIA VI Sixth International Conference. Venice, June 15-18, 2000*, Padova, 241-246.

OKAY, A.I., M. SATIR, H. MALUSKI, M. SIYAKO, P. MONIE, R. METZGER & S. AKYÜZ (1996): *Paleo- and Neo-Tethyan events in northwestern Turkey*. In: A. Yin & T.M. Harrison (eds.): *The tectonic evolution of Asia*. Cambridge, 420-441.

SCHMID, J., RAMSEYER, K. & DÉCROUEZ, D. (1995): A new element for the provenance determination of the white marble: Quantitative Fabric Analysis. In: SCHVOERER, M. (ed.):

ASMOSIA IV, Actes de la IV^{ème} Conférence Internationale, Bordeaux, 171-175.

TURCOTTE, D.L. (1997): *Fractals and chaos in geology and geophysics*. (2. kiadás) Cambridge University Press, Cambridge. 1-398.

ZÖLDFÖLDI, J. & SATIR, M. (2003): Provenance of white marble building stones in the monuments of the ancient Troy, Part II. In: G.A. Wagner, E. Pernicka & H.P. Uerpmann: *Troia and the Troad*, Springer, Berlin. 203-222.

ZÖLDFÖLDI, J. & SZÉKELY B. (in press): Quantitative Fabric Analysis (QFA) and Fractal Analysis (FA) on Marble from West-Anatolia and Troy. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Archaeometry, 22-26 April 2002, Amsterdam, in press.*