

**FEHÉR MÁRVÁNYOK SIKERES EREDETMEGHATÁROZÁSÁNAK
FELTÉTELEI
(AVAGY A SIKERTELEN EREDETMEGHATÁROZÁS OKAI)
CONDITIONS FOR SUCCESSFUL PROVENANCE STUDIES OF WHITE
MARBLES**

ZÖLDFÖLDI JUDIT

Tübingeni Egyetem, Földtudományi Intézet

Wilhelmstrasse 56, 72074 Tübingen, zoeldfoeldi@yahoo.de

Abstract

I wish to present a synthesis of experience from previous measurements regarding the provenance study of marbles; to explain different methods, techniques and their combination of successful provenancing; and to draw the attention to some avoidable, typical mistakes, which I discovered during my studies.

As a basic condition, it is important to examine the processes that can affect the samples during and after quarrying, and change the original characteristics. Therefore, it is necessary to reconstruct the "history" of the given sample, to know where and when it was changed; e.g., when the sample is displayed to high temperature, which can influence some parameters (e.g. isotope ratios). Conservation and/or restoration work can affect the correctness of results, i.e. originality of fingerprint parameters.

Sampling has also a basic role in provenancing studies. In ideal case, the samples are homogenous. In practice, this is never the case. Thus, we have to pay attention to inhomogeneities, i.e. the spatial changes of features. These parameters can dispose characters useful for provenance studies (e.g. color; texture/bandness; appearance of accessory minerals in aggregated or diffused form; and inhomogeneity of the grain size distribution). These determining features derive from the original protolith of the marble. However, surface weathering can also cause inhomogeneity. To avoid this problem it is useful to take samples from deeper layers. Artificial inhomogeneities can be the results of restoration and conservation, such as surface treatments, antic or recent replacements on the artwork. Another case of artificial modification is achieved during the creation of the artworks. Another important fact is the chemical and physical effect of the iron staples and pins on the marble, which helped to hold together the statues. Archeologists, head of excavations, museum curators decide about the method of sampling and their main goal is of course not to destruct the artwork, or just as little as possible. We reached an important point here, in that we have powder or a bulk sample for further studies.

The next question is selecting appropriate methods. In the followings, the possible results of combined analysis of powder (drilled) samples are discussed. The advantages, but also the obstacles of the most widely applied method, stable C and O isotope analyses will be explained. Furthermore, the advantages and disadvantages of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratios are discussed, also the subject to the used analytical method, like ICP-MS or TIMS. The results of the isotopic analysis can be verified and completed with chemical measurement; however, its disadvantage is that the different methods provide information about different elements with different sensitivity. The ideal case for investigation is when – instead of powder sample – a representative bulky part (or drilling core) of the object can be separated and analytical methods like quantitative textural analyses (QTA) and cathodoluminescence investigations can be carried out.

Összefoglalás

Ebben a tanulmányban a márványokon végzett eddigi vizsgálatok tapasztalatainak szintézisét szeretném nyújtani abban a tekintetben, hogy márványok eredetmeghatározása során más szerzők és a magam vizsgálatai alapján milyen módszereket, módszercsoportokat, illetve módszerkombinációkat érdemes alkalmazni a sikeres meghatározás érdekében. Fel kívánom hívni a figyelmet néhány elkerülhető típushibára is, amelyekbe magam ütköztem a vizsgálataim során.

Első és legfontosabb lépés a márványok eredetének meghatározásakor, hogy a természetben megtalálható márványokat olyan legkisebb egységekre/típusokra bontsuk fel, melyek egyedi „ujjlenyomattal” rendelkeznek. Minden eredetmeghatározás alapvető feltétele a minta reprezentatív volta. Vizsgálni kell, hogy az adott anyaggal a bányából való eltávolítása után milyen olyan folyamat történhetett, amely az egyedi ujjlenyomatot megváltoztathatta. Ilyen értelemben az adott minta „történetét” rekonstruálni kell, mely pontokon érthette az adott vizsgálati módszer szempontjából döntő vagy befolyásoló hatás. Az eredmények jóságát, azaz az ujjlenyomat eredetiségét a konzerválási és/vagy restaurálási beavatkozások is kisebb-nagyobb mértékben befolyásolhatják. A tanulmányban az eredetmeghatározáshoz felhasznált mintaanyag, illetve mintavétel szerepéről és fontosságáról, a minta természetes inhomogenitásának hátrányairól és előnyeiről nyújtok áttekintést.

Döntő tényező, hogy a vizsgálandó anyag por vagy szilánk formájában áll-e rendelkezésünkre. A bevetett módszerek, illetve ezek kombinálása a kérdésfeltevéstől és a rendelkezésünkre álló anyagtól függ. A stabil szén- és oxigénizotóp-összetételek vizsgálata a márványok eredetének meghatározásában manapság az egyik leggyakrabban bevetett módszer. A $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparányban rejlő potenciált is vitatom, amely egyre gyakrabban egészíti ki a stabil szén- és oxigénizotóp-összetételek vizsgálatát. A jelen cikkben a módszerek kritikus felülvizsgálatára is sor kerül. Fontos tényező az is, hogy a számos bevetett analitikai módszer által kapott eredmények összehasonlítására milyen adatbázisok és források állnak rendelkezésünkre, illetve melyeket alkalmazzuk.

Az eredmények „jósa” függ magától a mintától, a mintavételtől, a bevetett módszerektől és a bányákról elérhető összehasonlító adatok számától és minőségétől, illetve ezek egymáshoz való összehasonlításának lehetőségétől.

KEYWORDS: MARBLE, SAMPLING, RESTORATION, PROVENANCE, GRAIN SIZE ANALYSIS, ISOTOPE, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

KULCSSZAVAK: MÁRVÁNY, MINTAVÉTEL, RESTAURÁLÁS, EREDETMEGHATÁROZÁS, SZEMCSEMÉRET, IZOTÓP, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Bevezetés

Ebben a tanulmányban a márványokon végzett eddigi vizsgálatok tapasztalatainak szintézisét szeretném nyújtani abban a tekintetben, hogy márványok eredetmeghatározása során más szerzők és a magam vizsgálataim alapján milyen módszereket, módszercsoportokat, illetve módszerkombinációkat érdemes alkalmazni a sikeres meghatározás érdekében. Fel kívánom hívni a figyelmet néhány elkerülhető típushibára is, amelyekbe magam ütköztem a vizsgálataim során.

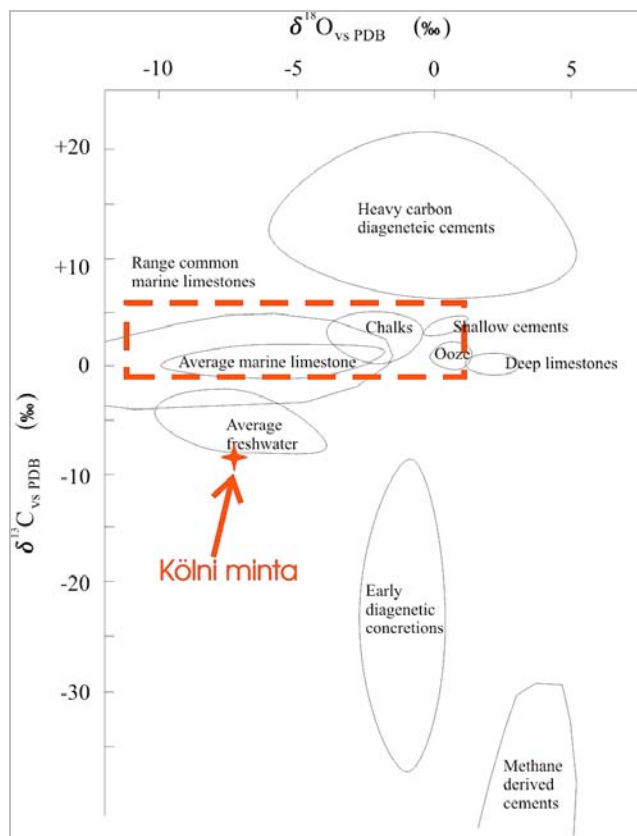
Úgy vélem, hogy az itt következő összefoglaló ebben a formában még nem volt leírva, noha bizonyos, hogy jónéhány megállapítása más kutatóknak már korábban is a munkamódszerük részét képezte. Véleményem szerint az itt közölt megfontolásra érdemes, stratégiai jellegű megállapítások, melyek egy jelentős része az általam – részben különféle együttműködések keretében – végrehajtott egyedi vizsgálatok szintéziséből származnak, éppen ez adja az erősségüket. A vizsgálataim sokrétűsége és a vizsgált minták, valamint lelőhelyek nagy száma a metodikát egyre kiforrottabbá tette, illetve teszi.

Alapfeltételek

Első és legfontosabb lépés a márványok eredetének meghatározásakor, hogy a természetben

megtalálható márványokat olyan legkisebb egységekre/típusokra bontsuk fel, legyen az földrajzi vagy geológiai szempontból, melyek a legkülönbözőbb anyagvizsgálati módszereket (ásványtani, közettani, szöveti, szerkezeti, fizikai, kémiai, geokémiai, izotópegeokémiai, etc.) felhasználva egyedi tulajdonságcsoportokat alkotnak, azaz az adott egységhez egy természetes, egyedi „ujjlenyomatot” rendel hozzá, mely ujjlenyomat arra és csak arra az egységre jellemző. Ezen ujjlenyomat kialakulásában szerepet játszik, hogy a kiinduló kőzet különböző földtörténeti és környezetben keletkezett és különböző genetikai folyamatokon ment át (pl. kontakt vagy regionális metamorfózis).

Márványból készült régészeti leletek, illetve műemlékvédelmi tárgyak eredetének meghatározása során számos kísérlet hiúsul meg, kizárólag petrológiai vagy stabil-izotópegeokémiai vizsgálatok alapján történő eredetmeghatározáskor. Sokkal ígéretesebbnek bizonyultak a kutatások, melyek információk, - mint mikroszkópi vizsgálatok, katódlumineszcens vizsgálatok, kvantitatív szöveti elemzés, nyomelemmeghatározás, stabil- és radiogén izotópmegoszlás, stb. - párhuzamos felhasználásával, egymással való kiegészítésével hajtunk végre.



1. ábra: Jellemző oxigén- és szénizotóp-összetételek különböző környezetben képződött mészkövek (oválisok) és ismert márványok (piros téglalap) esetében Anderson & Arthur (1983) nyomán. Csillaggal a kölni mintán mért izotóp-összetételt jelöltük. Első megközelítésben az eredmények azt sugallták, hogy a vizsgált anyag nem márvány volt ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -8,3 \text{ ‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} = -7,2 \text{ ‰}$).

Fig. 1.: Characteristic $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values for limestones that were arised in different environment (ellipses) and for all known marbles (red rectangle) after Anderson & Arthur (1983). Red star represent the stable isotopical composition of the investigated marble statue of Cologne, Germany. At first sight, the results of this investigation ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -8,3 \text{ ‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} = -7,2 \text{ ‰}$) suggest that it can not be a marble.

A márványtípusok sokasága miatt a laborvizsgálatokat gondosan kiválasztott mintasorozaton kell elvégezni. Minden eredetmeghatározás alapvető feltétele a minta reprezentatív volta, azaz tükrözze vissza a bánya vagy lelőhely tulajdonságait, ahonnan származik. Bár ez a kijelentés magától értetődőnek tűnik, a gyakorlatban sok olyan tényező van, pl. kellő gyakorlat hiánya vagy a helyszín ismeretének hiánya, ami a reprezentativitást végül érdemben befolyásolhatja. Vizsgálni kell tehát, hogy az adott anyaggal a bányából való eltávolítása után milyen olyan folyamat történhetett, amely a fent említett egyedi ujjlenyomatot megváltoztathatta. Ilyen értelemben az adott minta „történetét” rekonstruálni kell, mely pontokon érthette az adott vizsgálati módszer szempontjából döntő vagy befolyásoló hatás.

Ilyen lehet például a műtárgyak nagy hőnek történő kitétele, mely akár több tényezőt is befolyásolhat (pl. izotóparányok). Példaként a Kölni Dóm márványszobraiát említeném. A kapott izotópeokémiai eredmények első látásra azt sugallták (Zöldföldi 2008), hogy a vizsgált anyag nem márvány volt ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -8,3 \text{ ‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} = -7,2 \text{ ‰}$; **1. ábra**). Mint később kiderült, a leletek a második világháború során egy tűzvész alkalmával magas hőmérsékletnek voltak kitéve. Jelenleg a Tübingeni Egyetemen folynak ígéretes ellenőrző kísérletek az ilyen hőhatások befolyásának tisztázására: milyen magas hőmérsékleten

változnak meg a különböző fizikai, kémiai, de leginkább izotópeokémiai tulajdonságok, melyeket az eredetiség vizsgálatába bevonunk (Leno et al. nyomtatásban).

Az is megemlíteném, hogy a felületen (talán szabad szemmel nem is látható) koromrészecskék is befolyásolhatják az eredményeket, mind fázisanálízis, mind pedig geokémiai szempontból. Az eredmények helyességét, azaz az ujjlenyomat eredetiségét a konzerválási és/vagy restaurálási beavatkozások is kisebb-nagyobb mértékben befolyásolhatják. Itt pl. az acryl-műgyanta kezelést említeném meg elsősorban. A szerves anyag elbomlik az emelt hőmérsékletű foszforsavas reakcióban és az így keletkezett szerves fragmentumok befolyásolhatják a mérési folyamatot, „hamis” eredményekhez vezethet (Taubald 1996, Tütken et al. 2004), habár a vizsgált márvány nyersanyag eredeti izotóp összetétele nem változott meg a műgyantás kezelés során. Az acryl-műgyantás kezelés nemcsak az izotóp összetételt befolyásolhatja, hanem pl. a SANS módszerrel (Len 2006) meghatározott póruseloszlást is megváltoztathatja, de akár a kiindulási anyag kémiai összetételét is megváltoztathatja, illetve az ultrahangos vizsgálatok eredményeinek kiértékelésénél is fontos szerepet játszhat (Ettl et al. 2006, Möllenkamp et al. 2006, Snethlage et al. 1999).

Ugyanígy azt is felül kell (kellene) vizsgálni, hogy a bányában történhetett-e valamiféle esemény, amely a bányát jellemző tulajdonságokat megváltoztathatta-e. Ez utóbbira a gyakorlatban eddig még nem ismerünk példát.

Mintavétel szerepe és fontossága az eredetmeghatározásban

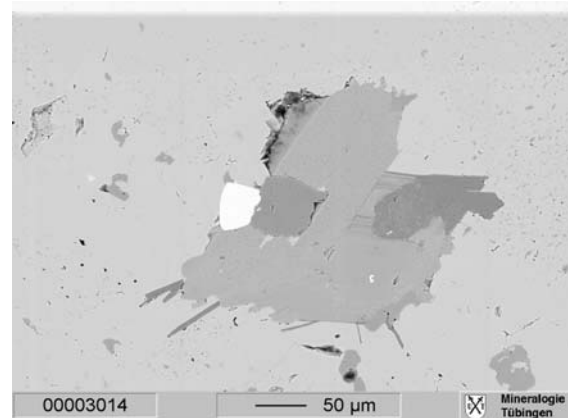
Ideális esetben a mintának homogénnek kellene lennie. A gyakorlatban ez szinte soha nem valósul meg. Ezért már a mintavételkor ügyelnünk kell a vizsgált anyag esetleges inhomogenitására, azaz egyes jellemzők esetleges térbeli változékonyságára az anyagban. Ezen jellemzők akár eredetmeghatározó karakterrel is rendelkezhetnek, mint például az anyag színe, mely különböző nyomelemtartalomra vezethető vissza, a közet sávossága (fehér-szürke sávok pl. a Marmara márványban, **2. ábra**), akcesszórius ásványok helyileg halmozott (**3. ábra**) vagy pedig szórt megjelenése (**4. ábra**), de különösen fontos a szemcseméret-eloszlásban jelentkező különbségek és raritások (pl. az elszórtan megjelenő nagy szemcsék) egy egyébként homogén mátrixban (pl. Mustafa Kemalpasa, **5. ábra**; Zöldföldi 2010). Ezen jellemzők a kiindulási márvány természeti adottságaiból adódnak, és kiszűrésük érdekében a vizsgált objektumból vagy nagyobb méretű minta vétele szükséges, vagy pedig kisebb minta több helyről. Inhomogenitást okozhat a vizsgálandó anyagban a felszíni mállás is. Ennek elkerülése érdekében javasolt a mintavétel mélyebb szintekből. Tapasztalat szerint a kb. 0,5 cm mélyről vett mintákkal a felületi mállás okozta változások kiküszöbölhetők.

Mesterséges úton okozott inhomogenitás alatt a restaurálás és konzerválás útján okozott hatásokat kell figyelembe venni.



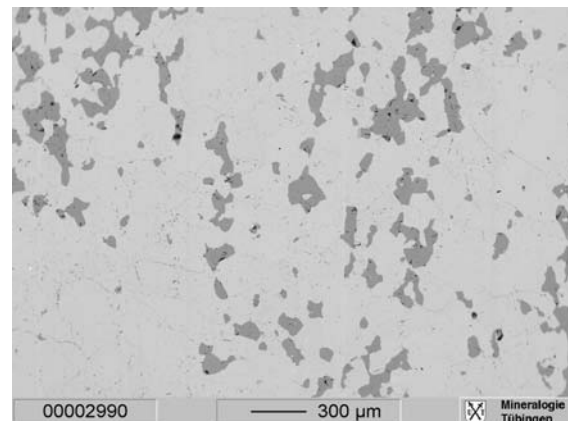
2. ábra: Jellemző fehér-szürke sávos megjelenésű márvány a törökországi Marmara szigetéről.

Fig. 2.: Characteristic white-grey banded marble from Marmara island, NW-Turkey.



3. ábra: Akcesszórius ásványok (apatit, diopszid és flogopit) halmozott megjelenése visszaszórt elektron képen (BSE) egy Ayazma lelőhelyről (ÉNy-Törökország) származó márvány esetében.

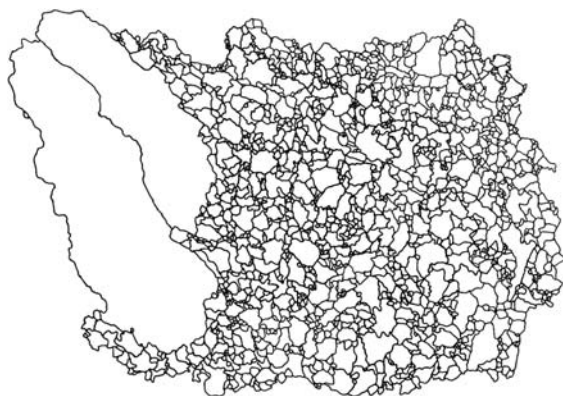
Fig. 3.: BSE image showing aggregation of accessory minerals (apatite, diopside, flogopite) in a calcitic marble from Ayazma, (NW-Turkey).



4. ábra: Akcesszórius ásványok (dolomit és apatit) szórt halmozott megjelenése visszaszórt elektron képen (BSE) egy Altinoluk lelőhelyről (ÉNy-Törökország) származó márvány esetében.

Fig. 4.: BSE image showing accessory minerals (dolomite, apatite) scattered through the marble sample from Altinoluk (NW-Turkey).

Ilyen pl. a már említett felületi kezelés, de ide tartoznak az antik, illetve recens kiegészítések/javítások is a műalkotáson. Ide tartozik az is, hogy egy-egy műalkotás akár több darabból is állhat. Ez egy mindennapos dolog volt - különösen a római korszakban. Egy jó példa erre a híres „márvány-műhely” Aphrodisiasban (Chaisemartin 1999, Erim 1967, Smith 2008), melynek szobrászai „futószalag”-szerűen készítették a torzókat és szállították Rómába vagy más római provinciába, ahol más lelőhelyről származó – jobb minőségű, értékesebb, aktuális divatnak megfelelő – márványból készítették hozzá portrét.



5. ábra: Mustafa Kemalpasa lelőhelyről származó márványból készült vékonycsiszolatról kézi körberajzolás útján keletkezett kontúrrajz. Ez az ábra jól mutatja, hogy a minta konkrét kivágata jelentősen befolyásolhatja a kiválasztott paramétereket (ebben az esetben a maximális szemcsenagyságot).

Fig. 5.: Scanned and enhanced image of thin section made of marble from Mustafa Kemalpasa (NW-Turkey). This figure shows clearly that the choice of the material to make thin sections can influence the detected parameter significantly (in this case the maximum grain size, MGS).

Ebben egy új császár hatalomra kerülése vagy más politikai esemény is szerepet játszhatott. Természetesen nem feledhetjük el a különböző alkotóegységek összeépítése során használt – leginkább vas – csapolások hatását a márvány szerkezetére és kémiai összetételének változására.

Következésképpen az egész vizsgálandó objektum makroszkópos és lehetőség szerint mikroszkópos vizsgálata és leírása alapvetően szükséges.

Fontos információt szolgáltat az is, hogy a márvány tisztán kalcitos vagy pedig dolomit jelenléte jellemző. Ritkább esetben dolomitos márványok is előfordulhatnak (pl. Thasos Vathy; ld. pl. Herrmann & Newman 1995, 1999, Bruno et al. 2002, Herrmann & Barbin 2002, Brilli et al. 2005). Ennek helyi vizsgálata hígított sósavval történhet, mintavétel esetén analitikai módszerek bevetése (pl. XRD, CL) ajánlott. A mintavételkor megállapított „vizuális” szemcseméret elengedhetetlen feltétele a vizsgált márvány eredetének meghatározásában, különösen, ha a mintavételi engedélyünk csak minimális mennyiségű – leginkább fűrt porminta – vételére szól (Cramer 2004, Attanasio et al. 2006, Zöldföldi in print).

A vizsgált anyag: porminta vagy vékonycsiszolat készítésére alkalmas anyag

Ezzel eljutottunk egy döntő tényezőhöz, mégpedig ahhoz, hogy a vizsgálandó anyag por vagy vékonycsiszolat készítésére alkalmas anyag formájában áll-e rendelkezésünkre. Ezt a döntést

régészek, ásatásvezetők, múzeumi kurátorok, antik felügyelőségek hozzák, akiknek legfontosabb céljuk magától értetődően (sokszor alapvető döntési tényező) a roncsolásmentes vagy részben roncsolásmentes módszerek bevetésének lehetősége. Itt szeretném megemlíteni azt is, hogy egyes lelőhelyekről származó márványok esetében a mintavétel során érezhető „záptojás”-szag is fontos információt szolgálhat. Egyik leggyakrabban említett márvány ebből a szempontból a törökországi Marmara (antik Proconessos; Cramer 2004, Zöldföldi in print).

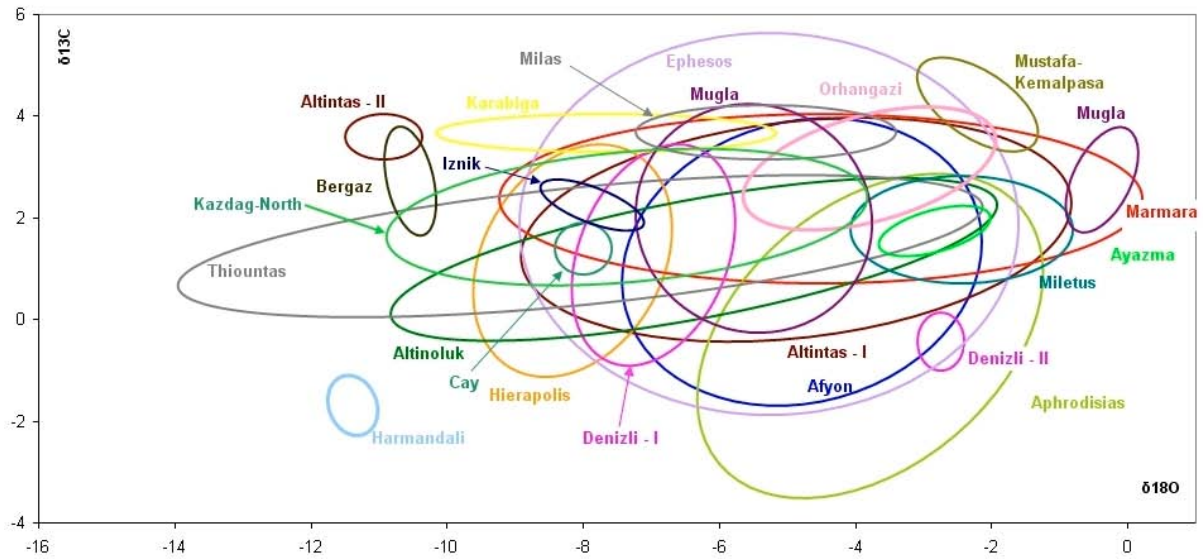
Bevetett módszerek, illetve ezek kombinálása a kérdésfeltevéstől és a rendelkezésünkre álló anyagtól függően

Lássuk, hogy milyen eredményre vezethetnek a pormintán végzett kombinált vizsgálatok.

A legszélesebb körben elterjedt és a márványkutatásban hagyománynak számító módszer a stabil izotópok vizsgálata, mely a márvány két fő komponensének, a szénnek és oxigénnek izotóparányát vizsgálja (ld. pl. Craig & Craig 1972, Herz 1985, Gorgoni et al. 2002, Cramer 2004, Unterwurzacher et al. 2005, Attanasio et al. 2006, Zöldföldi et al. 2008b). Az eredményeket szinte kivétel nélkül a (V-)PDB nemzetközi sztenderdhez viszonyítva a hagyományos $\delta^{13}\text{C}$ és $\delta^{18}\text{O}$ értékekkel adják meg [$\delta = (R_{\text{minta}}/R_{\text{szenderd}} - 1) \times 1000$, ahol R a vizsgált $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, illetve $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ arány] ‰ értékben kifejezve. A kísérlet viszonylag kis mennyiségű anyagon (néhány 100 µg - 10 mg) elvégezhető, és a laboratóriumok eredményei közötti összehasonlítás egyértelmű. Mindennek következtében a legtöbb összehasonlító adatbázis ezen adatokat tartalmazza (a MissMarble adatbázisban több mint 2000 geológiai és régészeti mintáról áll rendelkezésre stabilizotóp-összetételei adat (Zöldföldi et al. 2008a, b, 2009a). Viszont minél több adat kerül a rendszerbe, annál több az átfedés.

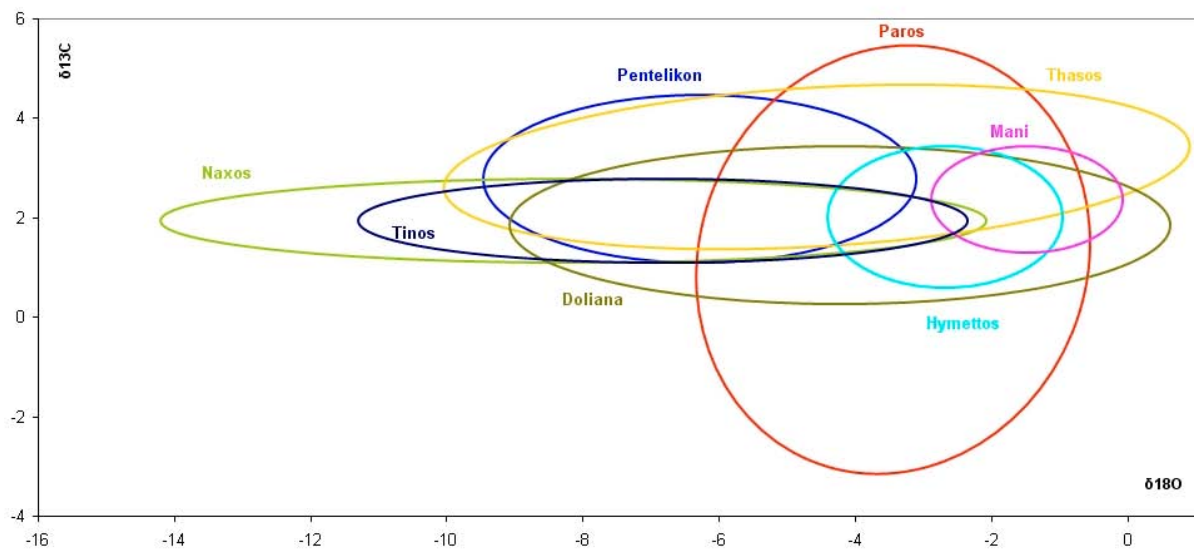
Példaként a török és a görög márványok stabilizotóp-összetételei diagramját mutatnám be (**6. és 7. ábra**). Ritkán fordul elő, hogy kizárólagosan stabilizotóp-arányok alapján az eredet meghatározható; ilyenek például Altintas-West és Harmandali bányák Törökországban (**6. ábra**) vagy pedig Satur Indiában (**8. ábra**; Zöldföldi et al. 2008b).

A szén és oxigénizotóp-összetételei adatok használatánál a következő tényezőket nem szabad figyelmen kívül hagyni: (1) A márványok akár egy bányán belül is kisebb-nagyobb inhomogenitást mutatnak, mint pl. Yenice és Altinoluk Törökországban (**9. ábra**). (2)



6. ábra: Az anatóliai bányákból származó márványok stabilizotóp-összetétele (‰-ban kifejezve, a PDB sztenderdhez viszonyítva; Cramer 2004, Attanasio 2006 és Zöldföldi 2008b alapján)

Fig. 6.: Cross plot of $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ isotopic ratios (in ‰; relative to PDB) of the marble quarries in West Anatolia after Cramer 2004, Attanasio 2006 és Zöldföldi 2008b.

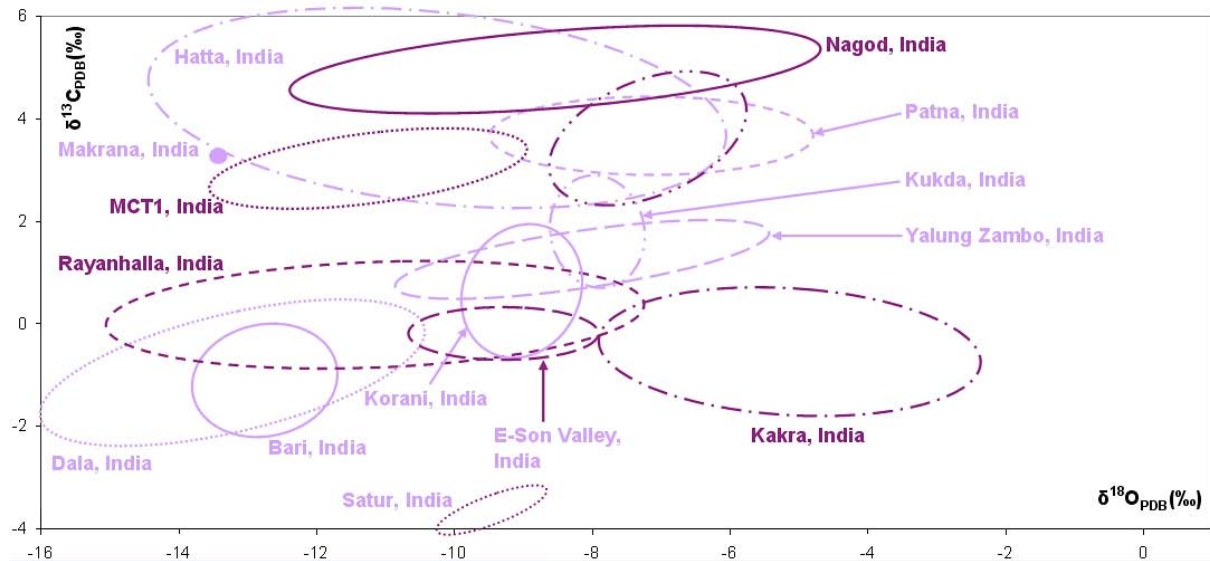


7. ábra: A görög bányákból származó márványok stabilizotóp-összetétele (‰-ban kifejezve, a PDB sztenderdhez viszonyítva; Cramer 2004, Attanasio 2006 és Zöldföldi 2008b alapján).

Fig. 7.: Cross plot of $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ isotopic ratios (in ‰; relative to PDB) of the marble quarries in Greece after Cramer 2004, Attanasio 2006 and Zöldföldi 2008b).

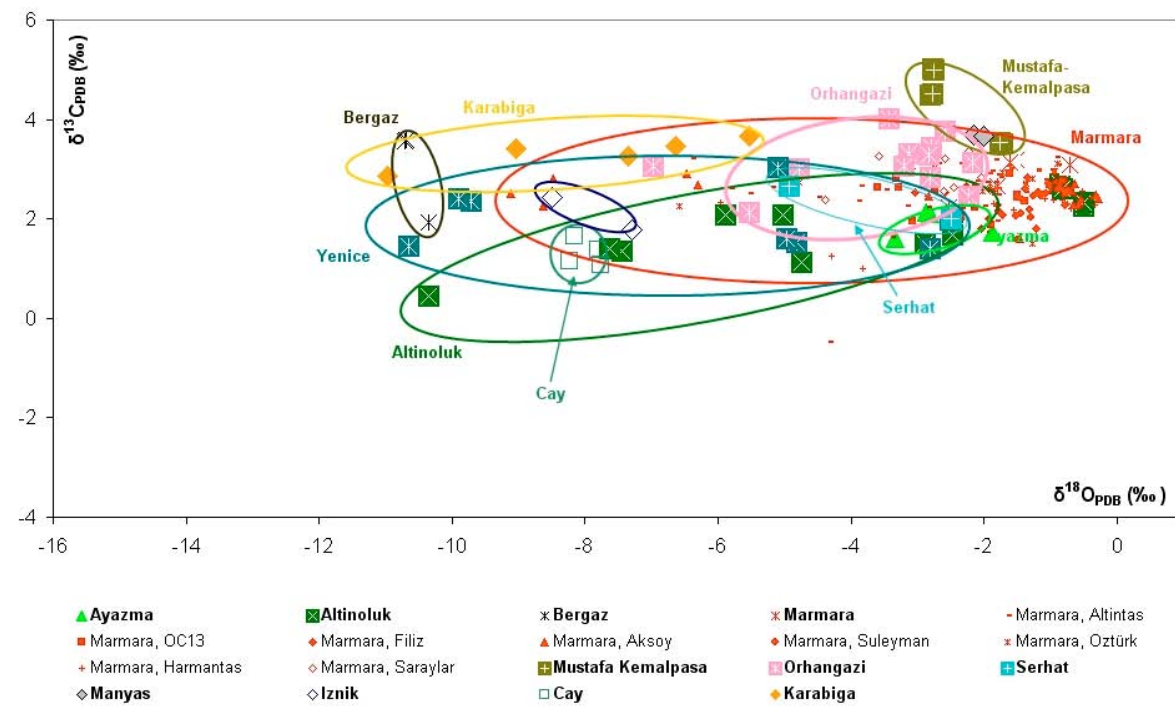
Egy bányán belüli különböző rétegek vagy formációk mutathatnak önmagukban homogén stabil izotóp eloszlást, de egymáshoz képest

jelentős különbségeket, mint pl. Marmara, Aphrodisias és Afyon bányák Törökországban (**10a-f. ábra**).



8. ábra: Az indiai szubkontinensről és környékéről származó márványok stabilizotóp-összetétele (‰-ban kifejezve, a PDB sztenderdhez viszonyítva, Zöldföldi 2009; Zöldföldi & Neunteufel 2009).

Fig. 8.: Cross plot of $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ isotopic ratios (in ‰; relative to PDB) of the marble quarries from the Indian Subkontinent and surrounding area (Zöldföldi 2009; Zöldföldi & Neunteufel 2009).

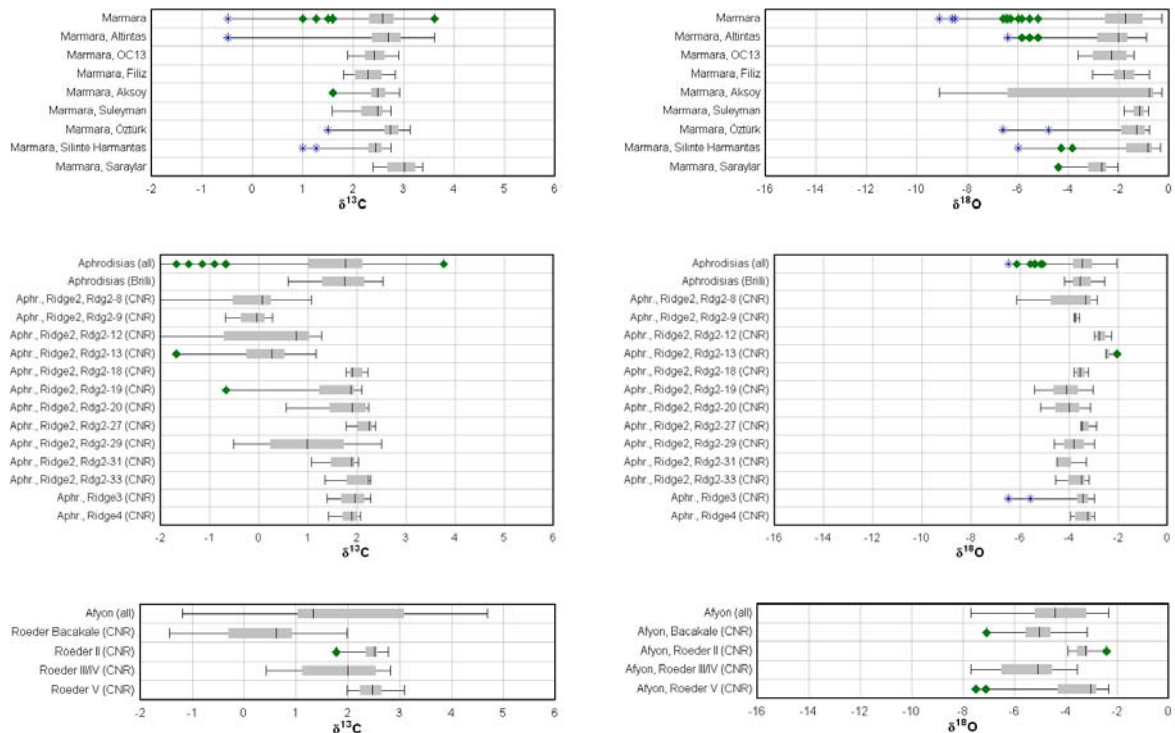


9. ábra: A Biga-félszigetről (Ény Törökország) származó márványok stabilizotóp-összetétele (‰-ban kifejezve, a PDB sztenderdhez viszonyítva). Részletes irodalomjegyzék található Zöldföldi et al. 2008b munkájában.” helyett „viszonyítva, Zöldföldi in print).

Fig. 9.: Cross plot of $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ isotopic ratios (in ‰; relative to PDB) of the marble quarries from the Biga Peninsula, NW-Turkey (Zöldföldi in print).

(3) Az stabilizotóp-összetételi adatok egymástól teljesen független geológiai egységekből származó márványok esetében azonosak lehetnek, még akkor

is, ha a márványok különböző leülepedési feltételek között kialakult mészkövekből képződtek és különböző fokú metamorfózist szenvedtek el.



10. ábra: Egy bányán belüli különböző rétegek vagy formációk önmagukban homogén stabil izotóp-összetételt mutatnak, de egymáshoz képest jelentős különbségeket, mint pl. törökországi Marmara (a-b), Aphrodisias (c-d) és Afyon (e-f) bányák esetében (‰-ban kifejezve, a PDB sztenderdhez viszonyítva), Zöldföldi et al. 2008b és Attanasio et al. 2006 alapján.” helyett viszonyítva; Attanasio et al. 2006, Zöldföldi nyomtatásban).

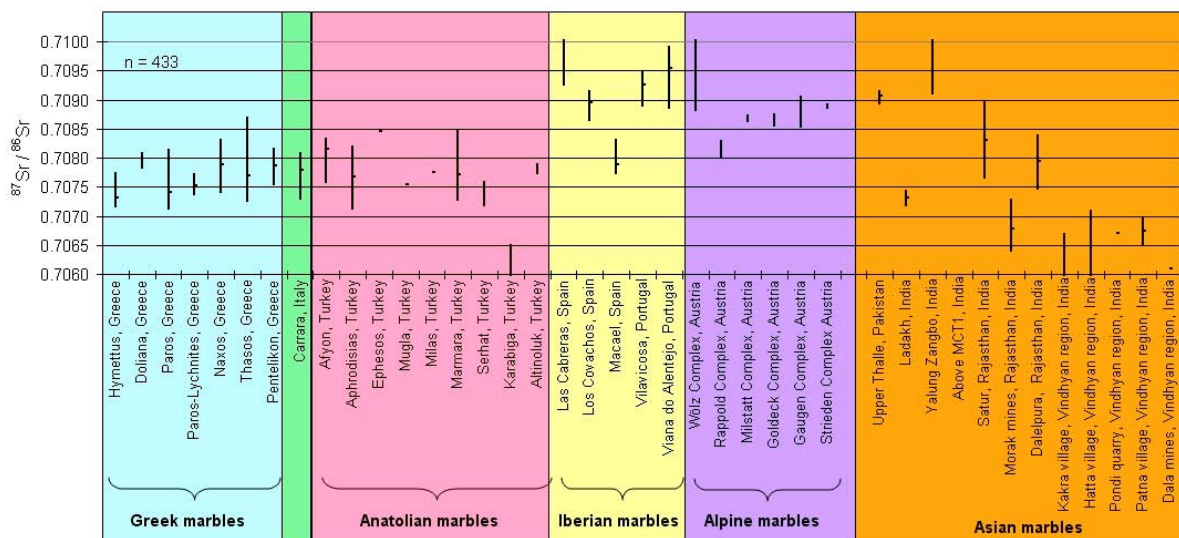
Fig. 10.: Different marble types from the same quarry are showing different stable isotopic ratios, e.g., the marble quarries of Marmara (a-b), Aphrodisias (c-d) and Afyon (e-f). $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopic values are in ‰; relative to PDB. (Attanasio et al. 2006, Zöldföldi in print).

(4) Nem ritka a véletlenszerű egybeesés földrajzilag egymástól távol eső bányák esetében. (5) $1\text{‰} < \delta^{13}\text{C} < 4\text{‰}$ illetve $-6\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < 0\text{‰}$ közé eső minták esetében az eredetmeghatározást mindenképpen más módszerek alkalmazásával kell kiegészíteni, stabilizotóp-arányok alapján legfeljebb a lehetséges bányák száma csökkenthető.

Az inhomogenitások okozta hátrány azonban néhány esetben előnynek bizonyult: ha lehetőségünk van arra, hogy a műemléket több helyen megmintázhassuk, mégpedig egymáshoz makroszkóposan és mikroszkóposan akár hasonló, de legfőképpen eltérő felületen (feltéve ha a műemlék tényleg egy tömbből készült). Így a minták egyedi kiértékelése után az így kapott lehetséges bányák halmazának közös metszetét képező lelőhelyek jöhetnek csak számításba.

Már Herz (1985) is megállapította a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóp arányban rejlő potenciált márványok eredetének vizsgálatára. Előnye, hogy minden márvány tartalmaz stronciumot (eddiggi tapasztalataink alapján általában 20 és 400 ppm

között) és a vizsgálat kis mennyiségű mintán elvégezhető (kb. 200 μg – 10 mg). Itt szeretném felhívni a figyelmet arra, hogy az egy bányához tartozó $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értékek szűk intervallumba esése miatt tapasztalataim szerint az ICP-MS (induktívan csatolt tömegspektrometria) módszerrel elért eredmények felhasználása csak fokozott óvatossággal használható. A TIMS (termikus ionizációs tömegspektrometria) módszer alkalmazása ajánlott, ebben az esetben a különböző laboratóriumok eredményei közötti összehasonlítás is problémamentes. A módszer kiválóan alkalmas arra, hogy nagy geológiai egységeket egymástól elkülöníthessünk, mely jellemzően a különböző képződési korra vezethető vissza. Így már ezen módszer egyedi alkalmazása az esetek többségében elegendő arra, hogy a vizsgált anyag származási helyét a Mediterrán térségben vagy pedig más európai márványbányában (esetleg az Indiai-félszigeten és környékén) keressük. A $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értékek változatosságát nagy geológiai egységen belül, illetve ezek közötti különbséget mutatja a **11. ábra**.



11. ábra: Összefoglaló diagram az archeometriai és geológiai irodalomból származó $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotóparányokról (Kumar et al. 2002, Morbidelli et al. 2002, Pentia et al. 2003, Zöldföldi & Satir 2003, Brilli et al. 2005, Schuster et al. 2005, Liu et al. 2006, Zöldföldi et al. 2008b és publikálatlan adatok alapján).

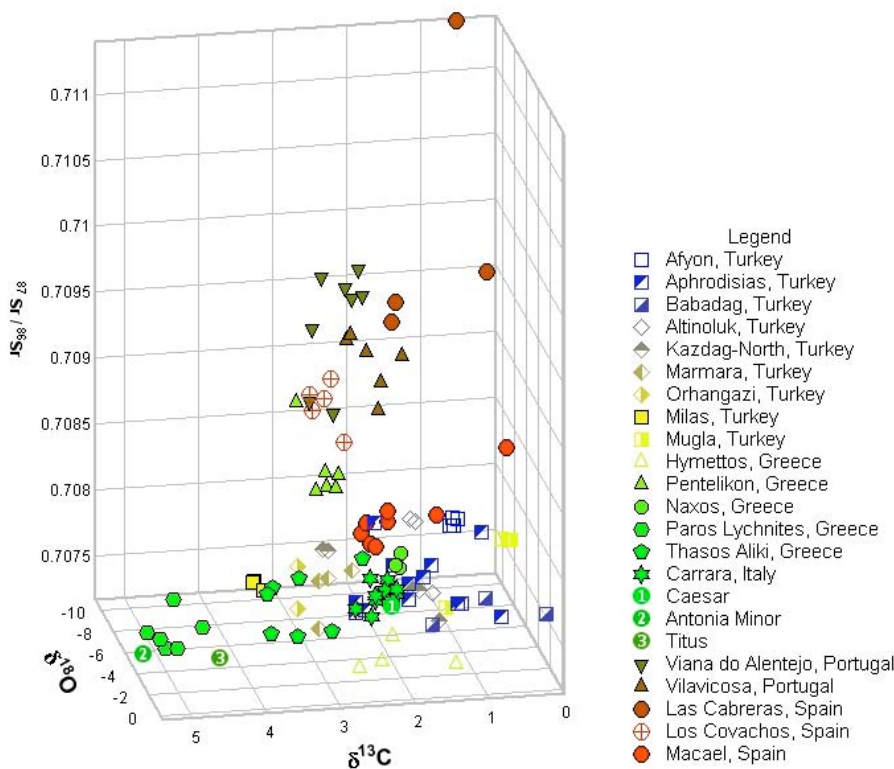
Fig. 11.: The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios worldwide resulting from the data published by Kumar et al. 2002, Morbidelli et al. 2002, Pentia et al. 2003, Zöldföldi & Satir 2003, Brilli et al. 2005, Schuster et al. 2005, Liu et al. 2006, Zöldföldi et al. 2008b and unpublished data.

Itt szeretném még arra a tényezőre felhívni a figyelmet, hogy a képződési kor egyenes korrelációja nem minden esetben biztosított. Összefoglalva elmondhatjuk, hogy a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ értékek földtörténeti információval bírnak, ha (1) a kőzet tengeri környezetben képződött, mégpedig a globális tengervízzel egyensúlyban; (2) nem kontaminálódott Rb-tartalmú közettörmelékekkel; és (3) későbbi metasztatikus vagy metamorf folyamatok nem zavarták a Sr-izotóp rendszert.

Nagyon jó tapasztalatokkal rendelkezünk a három izotóparány együttes alkalmazásával elért eredmények kapcsán (pl. **12. ábra**) illetve ezen eredmények és a szabad szemmel meghatározott szemcseméret (és szövet) együttes bevetésekor, mint ez több esetben is bebizonyosult a különböző projektek során (Zöldföldi et al. 2009b, Zöldföldi & Neunteufel 2009, Zöldföldi et al. 2009c, Zöldföldi & Székely 2009, Zöldföldi in print). Ezen folyamatnak óriási előnye az, hogy mindezen vizsgálatok kis mennyiségű pormintán elvégezhetők, mely régészeti és művészettörténeti szempontból nagyon fontos tényező.

Az így kapott eredmények alátámasztása és esetlegesen fennmaradó nyitott kérdések megválaszolása érdekében kémiai vizsgálatokat végezhetünk. Ezzel a módszerrel a következő problémák vetődnek fel. A kémiai elemek koncentrációjának meghatározása az egyik legalapvetőbb módszer a geológiában és más tudományágakban is. Ennek megfelelően számos

alkalmazható analitikai módszer létezik, melyeket alkalmazunk. Ezek közül pl. a röntgenfluoreszcens spektrometria (XRF) a fő- és nyomelemeket vizsgálja, az atomabszorpciós spektrometria (AAS) elemenként határozza meg fő- és mellékelemek koncentrációját, az induktívan csatolt tömegspektrometria (ICP-MS) és a neutronaktivációs analízis (INAA) a mellék- de leginkább a nyomelemek koncentrációjának meghatározására összpontosít. Ezen módszerek egymás közötti összehasonlítása problémát okozhat. Egyes esetekben a különböző laborok egymás közötti összehasonlításakor is különbségek mutatkoznak (és tulajdonképpen nem is létezik egy egységes adatbank ilyen típusú eredményekből). Mindezen bizonytalanságok a márvány monomineralikus voltából adódhat (több mint 90 % -ban karbonát). Éppen ennek tudatában javasolnám, hogy lehetőleg olyan elemek koncentrációját használjuk fel az eredetvizsgálat meghatározásakor, mely elemek nem „szennyezésként”, hanem a márványt alkotó kalcit (és/vagy dolomit) kristályrácsában is megtalálhatók mint pl. Sr, Mn, Fe. Ezzel kiküszöbölhetjük azt, hogy a kőzetben belüli lokális nyomelem-eloszlásokat használjuk fel eredetmeghatározásra. Ugyanakkor ez a véletlenszerűen megjelenő, lokális nyomelemeloszlás is lehet ujjlenyomat-jellegű, csak a kiértékelésnél nem szabad figyelmen kívül hagynunk a lokális hatást, főként a nagyon kicsi minták esetében.



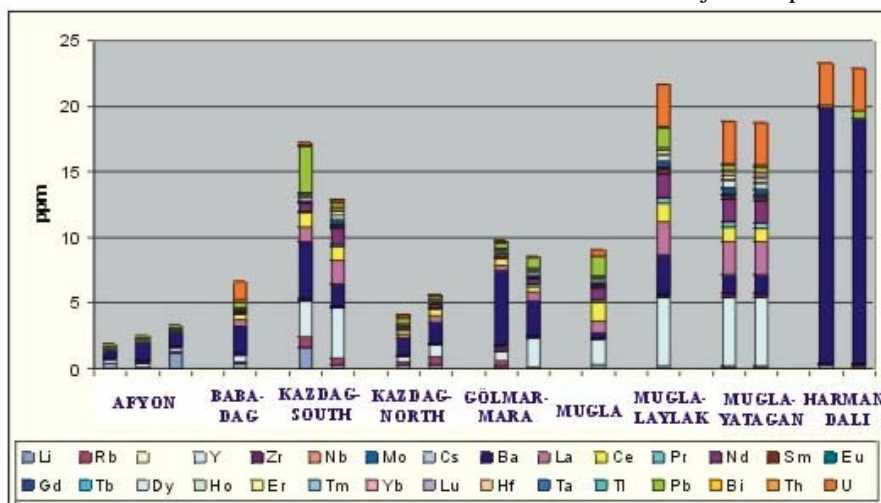
12. ábra: Három izotóparány $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ és $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ együttes alkalmazásával készült három dimenziós diagram a Mediterrán Régió márványairól (Morbidelli et al. 2002, Pentia et al. 2003, Zöldföldi & Satir 2003, Zöldföldi et al. 2008b és publikálatlan adatok alapján).

Fig. 12.: 3D diagram using $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ és $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of the Mediterranean Region (Morbidelli et al. 2002, Pentia et al. 2003, Zöldföldi & Satir 2003, Zöldföldi et al. 2008b unpublished data)..

Egyes esetekben azonban a márványban előforduló összes nyomelem együttes koncentrációja is lehet eredet-specifikus, mint pl. Afyon márványai, melyekben ez az érték feltűnően alacsony (2 és 4 ppm között, **13. ábra**).

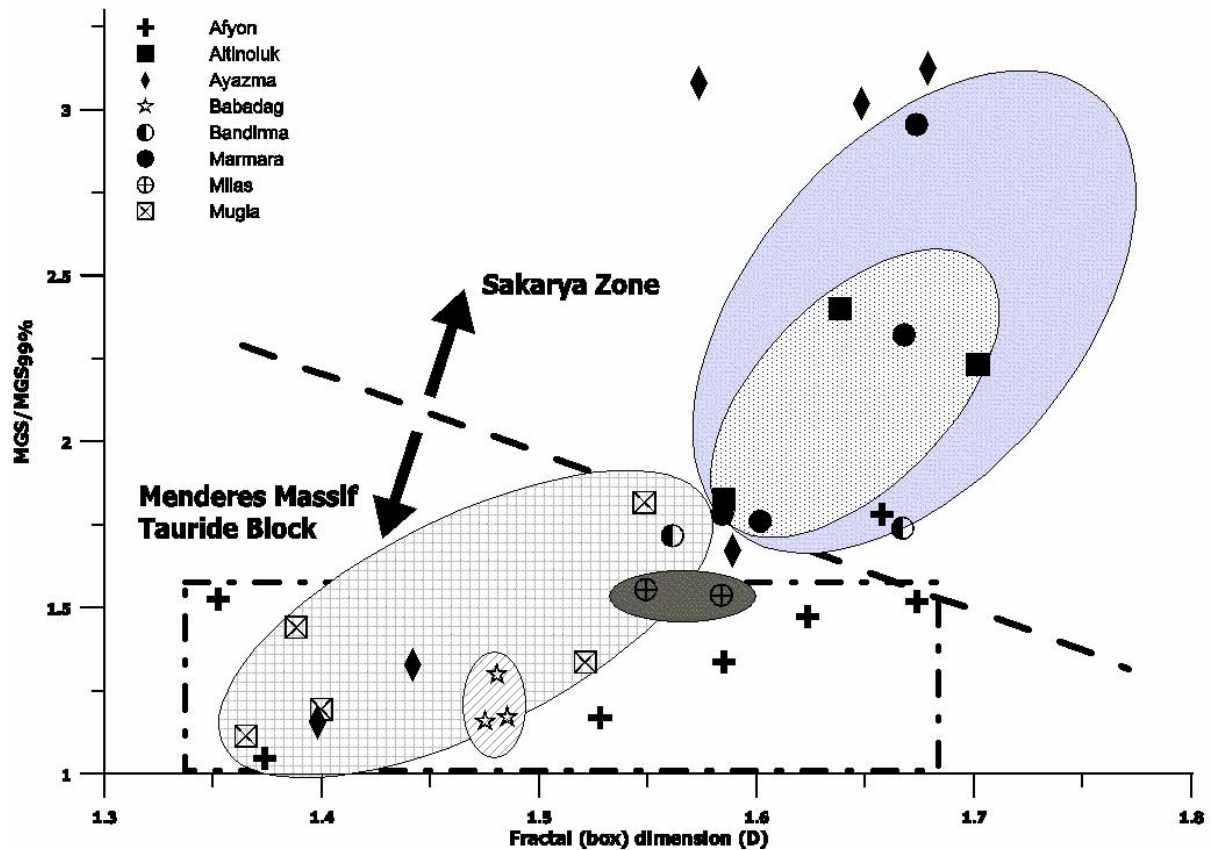
Természetesen sokkal több információhoz jutunk, ha a vizsgált műtárgyból egy reprezentatív (mint már azt feljebb leírtam) szilánk, esetleg fúrómag vételére van lehetőségünk, melyből vékonycsiszolatot készítünk. Érdemes polírozott csiszolattal dolgozni, mert ez további módszerek bevetését teszi lehetővé. Itt elsősorban a kvantitatív szöveti elemzést (Quantitative Texture Analyses, QTA) említeném (Schmid et al. 1999, Perugini et

al. 2002, Zöldföldi & Székely 2003, Zöldföldi & Székely 2004, Zöldföldi et al. 2004, Zöldföldi & Székely 2005a, b, Zöldföldi & Székely 2008, Bajnóczi et al. 2009, Székely & Zöldföldi 2009), mely a márvány változatos szövetének számszerű leírásával foglalkozik. Ezzel egy „évszázados” probléma oldódott meg, hiszen már Lepsius is leíró petrográfiai vizsgálatait folyamán nagyon hasznos információnak vélte a szöveti elemzést. Sok publikációban olvasunk homeoblasztos, heteroblasztos szövetről, izomorf, cakkozott, egyenletes szemcsehatáru szemcsékről, illetve finom-, közepes és durvaszemcsés márványokról. Ezen kifejezések szubjektívek, ez egyes kutatók szubjektív tapasztalatait írják le.



13. ábra: Nyomelemekkoncentrációk különböző nyugat-törökországi lelőhelyekről származó márványok esetében (Zöldföldi & Satir 2003).

Fig. 13.: Trace element concentration of marbles from West-Turkey measured by ICP-MS (Zöldföldi & Satir 2003).



14. ábra: A kvantitatív szöveti elemzés (QTA) és a fraktálemzés (FA) kombinációjának eredményei alapján a törökországi nagy tektonikai egységek (Sakarya Zóna és Menderes masszívum) egymástól jól elkülöníthetők (Zöldföldi & Székely 2004).

Fig. 14.: Combined the Quantitative Texture Analysis (QTA) and Fractal Analysis (FA), the main geological units (Sakarya Zone and Menderes Massif) are clearly to distinguish (Zöldföldi & Székely 2004).

Ezen a téren óriási előrelépést jelentett a kvantitatív szöveti elemzés kifejlesztése, mely folyamat még messze nem zárult le. Természetesen ennek a módszernek is vannak hátrányai: a vékonycsizolat elkészítése és a numerikus adatok kézbe vétele között több idő-, hardver- és szoftverigényes lépés zajlik le. Ennek köszönhető az is, hogy ilyen típusú eredmények napjainkban csak korlátozott számban léteznek, és a különböző módszerfejlesztő csoportok (még) nem minden finom részletben jutottak közös nevezőre.

A módszer csiszolt felületű minták vagy vékonycsizolatok vizsgálatán alapul (Zöldföldi & Székely 2004). 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 kivehetők legyenek, és minden más vonalszerű elem (pl. ikresedés) eltűnjön. Jelen pillanatban a legkisebb hibájú eljárás a szemcsék kézi körberajzolása. Az elemzés közvetlen bemenete tulajdonképpen az így előálló

szemcsékcontúrokat ábrázoló fekete-fehér (bináris) rajz. A kvantitatív szöveti elemzés az egyes szemcsék geometriáját, illetve a szemcsék geometriai paramétereinek statisztikai eloszlását vizsgálja. A leggyakrabban használt és eredetmeghatározási szempontból is jelentős szemcszejellemző a szemcsék legnagyobb kiterjedése, másnéven hossz tengely, amit angol rövidítéssel MGS-nek (Maximum Grain Size) szokás jelölni. További csoportot képeznek a szemcsék területéről származtatott mennyiségek, pl. A legnagyobb előforduló terület (MGA, Maximum Grain Area). Amint azt a **5. ábra** mutatja, a legnagyobb hossz tengely (azaz MGS) rendkívül érzékeny lehet a minta konkrét kivágatára, azaz, hogy a kőzetnek éppen mely darabját vizsgáljuk. Az érzékenység csökkentése érdekében az MGS paraméter módosított, statisztikai szempontból előnyösebb változatát, az MGS_{99%}-t használjuk, amely az a hosszúság, amelynél a mintában lévő szemcsék 99%-nak a hossz tengelye kisebb. Ez a mérőszám sokkal robusztusabb, mivel lényegesen kevésbé valószínű, hogy a minta kivágata érdemben befolyásolja az értéket. Ezzel analóg módon

bevezethetjük a szemcseterületre pl. az $MGA_{99\%}$ -t is (Zöldföldi & Székely 2004).

Egy további elemzési módszer, mely bevetésre kerül a márványok szöveti képének leírásakor, a fraktálanalízis (Zöldföldi & Székely 2004). Itt az előzőekkel ellentétben az egyes szemcséket külön nem vizsgáljuk, hanem épp az egész mintázat jellegét együttesen próbáljuk fraktáljellemzők segítségével megragadni. Ezt a jellemzőt a fraktáldimenzió (D) írja le.

A kvantitatív szöveti elemzés és a fraktálemelés kombinációjának eredményeit mutatja be a **14. ábra**. Habár az eljárás nem alkalmas a pontos származás meghatározására, a különböző geológiai egységekhez tartozó márványok egymástól nagy biztonsággal elkülöníthetők, mint például Nyugat-Anatólia márványok esetében, ahol a fő szerkezeti vonaltól (Izmir-Ankara-Szutúrától) északra és délre eső geológiai egységek elkülönítése adott.

Ugyanezen vékonycsiszolat (érdeemes már a kezdettől fogva polírozott vékonycsiszolatot készíteni) alkalmas a katódlumineszcens vizsgálatokra is. A meghatározott katodómikrofácies alkalmas arra, hogy akár egy geológiai egységből származó mintákat válasszunk szét (pl. Afyon és Usak, Zöldföldi 2010).

Összehasonlítás különböző adatbankokkal

Eddig arról írtam, hogy milyen vizsgálati anyagot milyen módszerekkel írunk le. Most röviden arra szeretnék kitérni, hogy a kombinált vizsgálatok után kapott eredményeket mivel hasonlítjuk össze. Különböző adatbázisok léteznek világszerte különböző bányákról, különböző vizsgálati módszerekkel. Itt a kollégáim és általam kifejlesztett MissMarble adatbázist szeretném kiemelni, mely egy internet-alapú és interdiszciplináris adatbázis (www.missmarble.info). Az adatbázis a márványvizsgálatok eredményeit igyekszik a csatlakozó kutatók számára átfogó módon, integráltan rendelkezésre bocsátani; aktuálisan (2010 március) több mint 3000 adatrekorddal rendelkezik mintegy 400 márványtípusról (Zöldföldi et al. 2008a, b, 2009a). A kategóriájától függetlenül (nyersanyag, régészeti vagy műemlékvédelmi minta) minden adatsor tartalmazza a következő tulajdonságokat: a minta azonosítása, pillanatnyi feltalálási helye, ásványtani, közettani, szöveti, szerkezeti, fizikai, kémiai, geokémiai, izotópegeokémiai, mérnökgeológiai vizsgálatok, stb. eredményei. Nyersanyag esetében a földtani besorolás (kor, fácies) jelenik meg új szempontként; műtárgy esetében a tárgyak régészeti ill. művészettörténeti leírása, származásvizsgálati eredményei, konzerválási és restaurálási tapasztalatok rögzítése lehetséges. A rendszer részletesebb bemutatása egy korábbi munkánkban olvasható (Zöldföldi et al.

2008). A kliensszoftveren keresztül a felhasználó különféle lekérdezéseket, elemzéseket végezhet a márványlelőhelyek, illetve régészeti tárgyak, művészettörténeti objektumok és építészeti elemek tekintetében is.

Ezzel kapcsolatban a legnagyobb hátráltató tényezőnek eredetmeghatározás szempontjából az adatbank (tkp. a világon elérhető adatok) hézagoss voltát találok. Ezalatt azt értem, hogy bizonyos módszereket szinte minden „márványkutató” használ, és ezen adatok száma folyamatosan nő (pl. stabil izotópok), míg más módszerek eredményei csak néhány lelőhelyről elérhetőek. Ezekhez tartoznak az időigényes és/vagy drága módszerek, mint pl. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotópok arányának meghatározása vagy pedig a kvantitatív szemcseméret meghatározás.

Kitekintés

Mint láttuk, a módszerek repertoárja igen széles. Az eredmények „jósa” függ magától a mintától, a mintavételtől, a bevetett módszerektől és a bányákról elérhető összehasonlító adatok számától és minőségétől, illetve ezek egymáshoz való összehasonlításának lehetőségétől. Egy jól megalapozott eredetmeghatározás feltétele, a különböző tudományos területeken dolgozó kutatók együttműködésén alapul. Természetesen csak úgy juthatunk előbbre, ha az eredményeinket, tapasztalatainkat (a rosszat is!), de a rendelkezésünkre álló mintaanyagot (egymást kiegészítő vizsgálatok elvégzése céljából) megosztjuk egymással.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazon kollégáknak, akik ebben a sokrétű kutatási folyamatban segítségemre álltak. Külön köszönettel tartozom dr. Székely Baláznak. A vizsgált mintaanyag rendelkezésére bocsátásáért köszönet illeti a Troia Projektet (Prof. Manfred Korfmann), a Magyar Nemzeti Múzeumot (dr. Biró Katalin és Mráv Zsolt), a Baden-Württembergi Múemlékvédelmi Hivatalt Stuttgartban (Otto Wölb), a régészeti ásatásokat Szombathelyen (Sosztarics Ottó), Pantellerián, Olaszországban (Prof. Thomas Schäfer), Elusán, Izraelben (Prof. Moshe Fischer), Portugáliában (dr. Denis Graen), Rómában (Stephan Zink), az Ortiz gyűjteményt, Svájcban. A vizsgálatokat a DFG, DAAD, MÖB, CHARME, Tübingeni Egyetem Geokémiai Tanszéke, Baden-Württembergi Múemlékvédelmi Hivatal, illetve az Antique Analytics, Frankfurt (dr. Robert Neunteufel) finanszírozta. Továbbá köszönetemet szeretném kifejezni dr. Lövey Pál és dr. Demény Attila lektoroknak a kézirat színvonalát javító kritikai észrevételeikért.

Irodalomjegyzék

- ANDERSON, T. F. & ARTHUR, M. A. (1983): Stable isotopes of oxygen and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems. *In: Stable isotopes in sedimentary geology, SEPM, Short Course No. 10.* Dallas.
- ATTANASIO, D., BRILLI, M. & OGLE, N. (2006): *The Isotopic Signature of Classical Marbles*, Roma, L'Erma di Bretschneider. 297.
- BAJNÓCZI, B., SZÉKELY, B. & ZÖLDFÖLDI, J. (2009): Extended data base of fractal analysis (FA), quantitative fabric analysis (QFA) and cathodoluminescence (CL) properties of South-East European and Anatolian white marbles. *Asmosia IX, Abstracts.* Tarragona: ICAC: 100.
- BRILLI, M., CAVAZZINI, G. & TURI, B. (2005): New data of Sr-87/Sr-86 ratio in classical marble: an initial database for marble provenance determination. *Journal of Archaeological Science*, **32**: 1543-1551.
- BRUNO, M., CONTI, L., LAZZARINI, L., PENSABENE, P. & TURI, B. (2002): The marble quarries of Thasos: an archaeometric study. *In: LAZZARINI, L. (ed.) Interdisciplinary studies on ancient stone.* Padova: Bottega d'Erasmus, 157-162.
- CHAISEMARTIN, N. (1999): Technical aspects of the sculptural decoration at Aphrodisias in Caria. *In: SCHVOERER, M. (ed.) Archeomateriaux - Marbres et Autres Roches.* Bordeaux-Talence: CRPAA Centre de Recherche en Physique Appliquée à l'Archéologie, 261-268.
- CRAIG, H. & CRAIG, V. (1972): Greek Marbles: Determination of provenance by isotopic analysis. *Science*, **176**: 401-403.
- CRAMER, T. (2004): *Multivariate Herkunftsanalyse von Marmor auf petrographischer und geochemischer Basis.* , Berlin, Doctoral Thesis, Technical University Berlin. 334.
- ERIM, K. T. (1967): Ancient Aphrodisias and its marble treasures. *National Geographic*, **132**: 280-294.
- ETTL, H., PFANNER, M. & CLAUB, H. (2006): Das Kindergrabmal La Roche in Basel. Konservierung und Restaurierung von Carrara-Marmor *Restauro*, **112**: 174-181.
- GORGONI, C., LAZZARINI, L., PALLANTE, P. & TURI, B. (2002): An updated and detailed mineropetrographic and C-O stable isotopic reference database for the main Mediterranean marbles used in antiquity. *In: HERRMANN, J. & HERZ, N. (eds.) Interdisciplinary Studies on Ancient Stone.* London: Archetype Publications, 115-131.
- HERRMANN, J. & BARBIN, V. (2002): Sculpture of imported marble on Thasos. *In: LAZZARINI, L. (ed.) Interdisciplinary studies on ancient stone.* Padova: Bottega d'Erasmus, 351-356.
- HERRMANN, J. & NEWMAN, R. (1995): The exploration of dolomitic sculptural marble from Thasos: evidence from Mediterranean and other collections. *In: MANIATIS, Y., HERZ, N. & BASIAKOS, Y. (eds.) The study of Marble and other Stones Used in Antiquity.* London: Archetype, 73-86.
- HERRMANN, J. J. & NEWMAN, R. (1999): Dolomitic marble from Thasos near and far: Macedonia, Ephesus and the Rome. *In: SCHVOERER, M. (ed.) Archeomateriaux - Marbres et Autres Roches.* Bordeaux-Talence: CRPAA Centre de Recherche en Physique Appliquée à l'Archéologie, 293-304.
- HERZ, N. (1985): Isotopic analysis of marble. *In: RAPP, G. J. & GIFFORD, J. A. (eds.) Archaeological Geology.* New Haven: Yale Univ. Press, 331-351.
- KUMAR, B., DAS SHARMA, S., SREENIVAS, B., DAYAL, A.M., RAO M.N., DUBEY, N., CHAWLA, B.R. (2002): Carbon, oxygen and strontium isotope geochemistry of Proterozoic carbonate rocks of the Vindhyan Basin, central India. *Precambrian Research* **113**: 43-63.
- LEN, A. (2006): A kisszögű neutronszórás archeometriai alkalmazási lehetőségei / Possible Applications of Neutron Small Angle Scattering in Archaeology *Archeometriai Műhely*, **3**: 27-31.
- LENO, V., ZÖLDFÖLDI, J. & TAUBALD, H. (in print): Änderung der $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ Isotopenverhältnisse verschiedener Marmorarten in Abhängigkeit der Brenntemperatur. *Archäometrie und Denkmalpflege 2010. Kurzfassungen.* Bochum.
- LIU, Y., BERNER ZS., MASSONE, H.-J., ZHONG, D. (2006): Carbonatite-like dykes from the eastern Himalayan syntaxis: geochemical, isotopic, and petrogenetic evidence for melting of metasedimentary carbonate rocks within the orogenic crust. *Journal of Asian Earth Sciences* **26**: 105-120.
- MORBIDELLI, P., TUCCI, P., IMPERATORI, C., POLVORINOS, A., MARTINEZ, M.P., AZZARO, E. & M. J. HERNANDEZ (2007) Roman Quarries of "Anasol" and "Anasol"-type marbles. *European Journal of Mineralogy* **19**: 125-135.
- MÖLLENKAMP, E., LAMPRECHT, L. & SIGRIST, B. (2006): Das Acrylharzvolltränkungsverfahren. *Denkmalpflege in Westfalen-Lippe*, **12**: 55-59.

- PENTIA, M., HERZ, N. & TURI, B. (2003): Provenance determination of classical marbles: a statistical test based on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratios. In: LAZZARINI, L. (ed.): *Interdisciplinary studies on ancient stones*. Bottega D'Erasmus, Padova, 219-226.
- PERUGINI, D., MORONI, B. & POLI, G. (2002): Characterization of marble textures by image and fractal analysis. In: LAZZARINI, L. (ed.) *Interdisciplinary studies on ancient stone*. Padova: Bottega d'Erasmus, 241-246.
- SCHMID, J., AMBÜHL, M., DECROUEZ, D., MULLER, S. & RAMSEYER, K. (1999): A quantitative fabric analysis approach to the discrimination of white marbles. *Archaeometry*, **41**: 239-252.
- SCHUSTER, R., MOSHAMMER, B. & ABART, R. (2005): Tectonic and Stratigraphic Information on Greenschist to Eclogite Facies Metamorphic Austroalpine Units by a Sr–C–O Isotope Study on Marbles. In: TOMLJENOVIC, B., BALEN, D. & VLAHOVIC, I. (eds.): *7th Workshop on Alpine Geological Studies, Abstract book*. Croatian Geological Society, Opatija, 87-88.
- SMITH, R. R. R. (2008): Aphrodisias'tan Roma portreleri, Istanbul, Yapı Kredi Yayınları. 333.
- SNETHLAGE, R., ETTL, H. & SATTLER, L. (1999): Ultraschallmessungen an PMMA-getränkten Marmorskulpturen. *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, **150**: 387-396.
- SZÉKELY, B. & ZÖLDFÖLDI, J. (2009): Fractal analysis and quantitative fabric analysis database of West Anatolian white marbles. In: MANIATIS, Y. (ed.) *ASMOSIA VII. Proceedings of the 7th International Conference of Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity*. Athenes: École française d'Athènes, 719-734.
- TAUBALD, H. (1996): Wechselwirkung zwischen Deponiesickerwasser und Abdichtungsmaterialien - Experimentelle, geochemische und isotopengeochemische Untersuchungen zum Karbonatverhalten in mineralischen Deponieabdichtungen unter Säureeinwirkung, Tübingen, Universität Tübingen. 160.
- TÜTKEN, T., VENEMANN, T. & PFRETZSCHNER, H.-U. (2004): Analyse stabiler und radiogener Isotope in archäologischem Skelettmaterial: Herkunftsbestimmung des karolingischen Maultiers von Frankenthal und Vergleich mit spätpleistozänen Großsäugerknochen aus den Rheinablagerungen. *Praehistorische Zeitschrift*, **79**: 89–110.
- UNTERWURZACHER, M., POLLERES, J. & MIRWALD, P. (2005): Provenance study of marble artefacts from the Roman burial area of feschendorf (Carinthia, Austria). *Archaeometry*, **47**: 265-273.
- ZÖLDFÖLDI, J. & SATIR, M. (2003): Provenance of white marble building stones in the monuments of the ancient Troia In: WAGNER, G.A., PERNICKA, E. & UERPMANN, H.P. (eds): *Troia and the Troad*. Springer, Berlin, 203-223.
- ZÖLDFÖLDI, J. & SZÉKELY, B. (2003): A case study of combining quantitative fabric analysis (QFA) and fractal analysis (FA) on white marbles with conventional analytical techniques for provenance analysis. In: SNETHLAGE, R. & MEINHARDT-DEGEN, J. (eds.) *Proceedings of the 13th Workshop of EU 496 EUROMARBLE*. Munich: Bavarian State Department of Historical Monuments 141-149.
- ZÖLDFÖLDI, J. & SZÉKELY, B. (2004): Kísérlet a nyugat-anatóliai tektonikai egységek kvantitatív textúraelemzésen alapuló szétválasztására régészeti származásvizsgáló szempontból. / An attempt to separate Western Anatolian tectonic units based on Quantitative Textural Analysis for archaeological marble provenance. *Archeometriai Műhely*, **1**: 22-26.
- ZÖLDFÖLDI, J., SZÉKELY, B. & FRANZEN, C. (2004): Interdisciplinary data base of historically relevant marble material for archaeometric, art historian and restoration use. In: GRASSEGGERSCHÖN, G. & PATITZ, G. (eds.) *Natursteinsanierung Stuttgart 2004, Neue Natursteinsanierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen*. München: Siegl, 79-86.
- ZÖLDFÖLDI, J. & SZÉKELY, B. (2005a): Provenance of Roman and Greek marble building stones of Troy. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Archaeometry, 22-26 April 2002, Amsterdam. Geoarchaeological and Bioarchaeological Studies 3*. Amsterdam, 123-129.
- ZÖLDFÖLDI, J. & SZÉKELY, B. (2005b): 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. Geoarchaeological and Bioarchaeological Studies 3*. Amsterdam, 113-119.
- ZÖLDFÖLDI, J. (2008): Untersuchungsbericht zu der Probe KD1. *unpublished report*, Tübingen.
- ZÖLDFÖLDI, J. & SZÉKELY, B. (2008): Quantitative Fabric Analysis (QFA) on marble from West Anatolia: Application of raster- (fractal) and vector-based (geometric) approaches. *British Archaeological Reports Int. 1746*. 413-420.
- ZÖLDFÖLDI, J., HEGEDÜS, P. & SZÉKELY, B. (2008a): Interdisciplinary data base of marble for archaeometric, art historian and restoration use. In: YALCIN, Ü., ÖZBAL, H. & PASAMEHMETOGLU, G. (eds.) *Ancient Mining*

in Turkey and the Eastern Mediterranean. Ankara: Atılım University, 225-251.

ZÖLDFÖLDI, J., HEGEDÜS, P. & SZÉKELY, B. (2008b): MissMarble: egy archeometriai, művészettörténeti és műemlékvédelmi célú, internet-alapú, interdiszciplinális adatbázis. *Archeometriai Műhely*, **5**: 41-49.

ZÖLDFÖLDI, J. (2009): Database of white marble from the Indian Subcontinent: a review. *Asmosia IX, Abstracts*. Tarragona: 159.

ZÖLDFÖLDI, J. & NEUNTEUFEL, R. (2009): Provenance of the Bodhisattva marble head from Peshawar. *Asmosia IX, Abstracts*. Tarragona: ICAC: 160.

ZÖLDFÖLDI, J. & SZÉKELY, B. (2009): Carbon, oxygen and strontium isotopic systematics of white marbles used in the Antiquity. *Asmosia IX, Abstracts*. Tarragona: ICAC: 161.

ZÖLDFÖLDI, J., HEGEDÜS, P. & SZÉKELY, B. (2009a): MissMarble: Online Datenbanksystem über Marmor für Naturwissenschaftler, Archäologen, Denkmalpfleger, Kunsthistoriker und

Restauratoren. In: HAUPTMANN, A. & STEGE, H. (eds.) *Archäometrie und Denkmalpflege 2009. Kurzfassungen. Metalla Sonderheft 2.* München, 161-163.

ZÖLDFÖLDI, J., LARISCH, S., PATITZ, G., WEIGELE, J., FELDMANN, G., WÖLBERT, O., SCHMID, M. & MÜNZENMAYER, R. (2009b): Die Marmorskulpturen in Stuttgart. Bestandsaufnahme, Schadenskartierung, naturwissenschaftliche Untersuchungen. In: HAUPTMANN, A. & STEGE, H. (eds.) *Archäometrie und Denkmalpflege 2009. Kurzfassungen. Metalla Sonderheft 2.* München, 164-166.

ZÖLDFÖLDI, J., SCHÄFER, T. & SZÉKELY, B. (2009c): Provenance analysis of the three splendid marble heads of Pantelleria (Italy). *Asmosia IX, Abstracts*. Tarragona: ICAC: 162.

ZÖLDFÖLDI, J. (in print): 5000 years marble history in Troia and the Troad. Archaeopetrological and archaeochemical studies for provenancing white marbles. *PhD Thesis*, University of Tübingen.

