

## METODE DE STUDIU UTILIZATE ÎN STABILIREA PROVENIENȚEI PIESELOR ARHEOLOGICE DIN MARMURA

Între numeroasele materiale folosite în tehnica construcțiilor un loc important îl ocupă rocile, cu o întrebuințare aproape neîntreruptă din cele mai vechi timpuri până în prezent.

Duritatea, rezistența, aspectul lor natural, ușurința la prelucrare pentru unele unelte și posibilitatea de-a fi folosite ca materiale de construcții pentru altele, au făcut ca rocile, utilizate la început ca unelte, arme de apărare și uneori ca pietre de podoabă, să devină cu timpul importante materiale pentru construcții, drumuri și ornamente arhitecturale. Până la descoperirea betonului, marile lucrări de artă (palate, temple, catedrale, etc), lucrările ingineresti (tunele, poduri, apeducte) și lucrările cu caracter militar au fost executate aproape exclusiv din piatră naturală.

Un caz particular în cadrul acestor roci folosite în construcții îl constituie marmura. Criteriul amintit de V. Brana et al. (*Brana '1986*, p. 268): „În practica lucrărilor de construcții se obișnuiește a se numi marmură toate rocile carbonatice care după ce sunt lustruite devin frumoase prin desenul și culoarea lor“ a constituit în trecut (și în unele cazuri se menține chiar în prezent) un mod de a descrie materialul litic dintr-o serie de obiecte și piese arhitectonice. Aceste observații făcute doar pe baza aspectului exterior au dat naștere la o serie de confuzii, perpetuate în timp, ducând uneori chiar la aprecieri eronate privind proveniența materiei prime litice folosite.

În lucrare vom utiliza termenul de „marmură“ în sens strict petrografic, înțelegând prin aceasta roci metamorfice carbonatice constituite în peste 90% din carbonați, formate în procese metamorfice (termice sau regionale) pe seama unui material inițial, sedimentar, de natură calcitică sau dolomitică.

Lucrarea de față a fost concepută în ideea argumentării principelui deja cunoscut (dar prea puțin aplicat), respectiv acela al studiilor interdisciplinare, în cazul nostru particular, coroborarea informațiilor arheologice cu datele geologice de teren și cu rezultatele diferitelor metode de analiză. Lucrarea intenționează să redea pe scurt istoricul cercetării marmurelor antice din zona Mării Mediterane, împreună cu rezultatele obținute, grupate pe zone geografice, în încercarea de-a realiza o bază de date ce ar putea oferi atât geologilor cât și arheologilor implicați în studii privind stabilirea provenienței pieselor de marmură găsite în Dacia Romană un criteriu de comparare.

Nu avem pretenția că am epuizat toate sursele de informație, orice observații și completări fiind binevenite.

## 1. Marmurele „clasice” din zona Mării Mediterane. Localizare geologică și geografică

Prin marmure „clasice” sau „antice” înțelegem marmurele care au fost intens exploatate în Grecia antică și în Imperiul Roman în scopul obținerii de materie primă pentru obiecte de artă sau de cult (statui, basoreliefuri, sarcofage, plăci votive, ...) sau pentru construcții (coloane, arhitrave, ...). Majoritatea acestor marmure sunt grupate în zona Mării Mediterane, în lucrarea de față fiind prezentate doar marmurele de culoare albă și cenușie deschis din Turcia, Grecia și Italia (zona Carrara) (Fig. 1).

Marmura a fost remarcată de timpuriu pentru calitățile sale monumentale și ornamentale și a fost exploatată intensiv. Pentru prelucrare erau folosiți în special abrazivi de tipul „emery”<sup>1</sup>. Vechii greci și romani au exploatat selectiv numai marmura albă, pură, în special pentru statui sau inscripții. Astfel, vizual, majoritatea vechilor marmure, indiferent de sursă seamănă foarte mult între ele și sunt dificil de individualizat.

### 1.1. Grecia

Din punct de vedere geologic, cele mai importante depozite de marmură din regiunea Mării Egee, cu mici excepții, aparțin centurii cristaline a Helenidelor, o continuare naturală a sistemului Alpino-Dinaric (Dürr 1978, p. 460—462; Gorgoni 1992, p. 156). De la nord spre sud se disting următoarele complexe cristaline: Macedonian, Thessalian, Attic-Cicladic și Menderes. În aceste complexe, seria marmurelor mezozoice, ocupă din punct de vedere tectonic cea mai joasă poziție, fiind deschisă în ferestre tectonice. Aproape toate marmurele clasice grecești (Tabel 1), cu excepția celor din Insula Thasos aparțin complexului Attic-Cicladic, afectat de un metamorfism de presiune ridicată și temperatură scăzută (Jacobshagen 1986, p. 147—148). O particularitate o constituie Insula Naxos, unde marmura a luat naștere în jurul unor corpuri intrusive granitice, în urma unui metamorfism de contact.

Marmurele din insula Thasos aparțin formațiunilor cristaline ce înconjoară Masivul Rodopi ce acoperă cea mai mare parte din estul Macedoniei, Tracia (nordul Turciei) și sudul Bulgariei. Masivul Rodopi este alcătuit din roci magmatice și metamorfice de vârstă Precambrian-Mezozoic. Rocile din formațiunile înconjurătoare masivului sunt de vârstă Mezozoic-Neozoic (Herz 1988, p. 10).

Marmurele din provincia Pelopones și din peninsula Mani sunt în general produsul unui metamorfism de intensitate scăzută, peste care s-a suprapus un metamorfism de presiune ridicată. Rocile de vârstă Mezozoic-Neozoic sunt intens deformate și formează structuri în pânze (Herz 1988, p. 10). În Peninsula Mani, metamorfismul de intensitate scăzută ce a afectat rocile preexistente a determinat atât formarea

<sup>1</sup> emery = corindon comun, compact sau în mase granulare, amestecat cu ilmenit, cuarț, magnetit și hematit. Ocurente în Insula Naxos (Grecia), Izmir (Turcia).

Tabel 1

## Principalele cariere antice de marmură din Grecia

Zona			Perimetre de exploatare/Cariere
G r e c i ă	P e n t e l i c i ă	PELOPONES Pen. Mani	Doliana 1, Doliana 2, Doliana-Dollana, Doliana-Mavriki; Mezapos, Diros, Paganea, Profitis Elias; Platsa, Marmaro
		Mt. Pentelikon	Aspra Marmara, Spilia Daveli, (Penesi);
		ATTICA Mt. Hymettus	Kessariani, Veria, Kakorhevma; Thorikos, Agrilessa
		THESSALIA	Volos, Atrax, Kastrion, Gonnos, Kozani, Pteleos, Larisa, Tempi
	i n s u l ă r ă	KAVALLA	Filippi, Kavalla
		THASSOS	Aliki, Skira, Acropolis, Capul Phaneri, Capul Vathy
		PAROS	Paros 1, Paros 2, Paros 3, Maripissa, Chorodaky
		NAXOS	Apollonas, Melanes, Potamia, Kinidaros, Apirantos, Filoti, Moni, Chalkio, Keramoti, Flerio, Mt. Zeus
		EUBEEA	Karystos

Alte insule în care există cariere de marmură de mai mică importanță: DELOS, SAMOS, LESBOS, SIPIINOS, SKYROS, AMORGOS, ANTI-PAROS, DESPOTIKO, KEA, KEROS, RODOS, CRETA

marmurelor albe și cenușii de la Diros, Mezapos și Profitis Elias, cât și a celor roșiatice de la Profitis Elias, Platsa, Paganea și Marmaro. Cele din urmă sunt cunoscute și sub numele de „rosso antico” sau „rosso del Tenaro” fiindcă au fost exploatare în apropierea Capului Tainaron (în prezent Capul Matapan). „Rosso antico” a fost intens exploatată în timpul Imperiului Roman datorită culorii roșii, culoare foarte apreciată în epocă și a fost utilizată predominant pentru elemente arhitecturale de dimensiuni reduse (ex.: cornișe), blocurile extrase fiind de mici dimensiuni. „Rosso antico” a fost o marmură destul de comună în construcțiile romane din orașele mediteraneene începând cu sec. I î.Ch. și în mod deosebit în sec. 2 d.Ch. când a atins maximum de exploatare. Aceași marmură a fost ulterior intens refolosită în Evul Mediu, atât pentru monumentele creștine cât și islamice și este destul de des întâlnită și în construcțiile din perioada Renașterii (Gorgoni 1992, p. 155).

Cea mai timpuriu exploatată și comercializată marmură pentru statui provine din Insula Naxos (Arh. Ciclade, Grecia), începând cu sec. 7 î.Ch. (Herz 1987, p. 35). Principalele cariere antice sunt localizate în perimetrele Apollonas, Melanes și Potamia.

La începutul sec. 6 î.Ch. a fost descoperită pe insula Paros o marmură fin-granulară și translucidă care repede a înlocuit în comerț marmura grosier-granulară de Naxos. Marmura de Paros, așa numitul

„lychnit“ deoarece era exploatată în subteran la lumina lumânărilor, a devenit marmura preferată pentru statui și a continuat să rămână prioritară până în perioada renașterii (*Riederer 1980*, p. 447). Clasicul „lychnit“ este bine evidențiat în exploatările subterane de la „Grotă Nimfelor“ și „Grotă lui Pan“, la sud-est de localitatea Marathi, zone notate de K. Germann et al. (*Germann 1988*, p. 254) ca Paros-1. Aceeași autori menționează și descriu sub numele de Paros-2 marmurele din cel puțin 20 de mici cariere antice de diferite forme și dimensiuni identificate de ei în versantul estic al unei văi la sud-vest de Marahti. Cu Paros-3 autorii menționați anterior notează micile cariere din vecinătatea exploatărilor subterane de „lychnit“. Datorită purității, fineții și translucidității rocii, multe statui din epoca romană au capul sculptat în marmoră de Paros iar trunchiul într-un alt tip de marmură.

Marmura din Muntele Pentelikon, lângă Atena, a fost exploatată începând cu sec. 5 î.Ch. pentru construcțiile și statuile de pe Acropolis. Către sfârșitul sec. 5 î.Ch., marmura albăstruie, fin granulată de pe Muntele Hymettus, situat la est de Atena, a început să fie exploatată și frecvent utilizată în timpul epocii helenistice și romane (*Herz 1990*, p. 1987; *Dworakowska 1975*, p. 28).

### 1. 2. Turcia

În Turcia, R. Brinkmann (*Brinkmann 1976*, p. 47) descrie 4 complexe cristaline: 1). Masivul Istranca, în Tracia (nordul Turciei); 2). Masivul Menderes, în sud-vestul Anatoliei; 3). Masivul Kirsehir, în Anatolia centrală; 4). Masivul Bitlis, în sud-estul Anatoliei.

Al doilea grup de marmure antice și cea mai importantă sursă de marmură turcească pentru perioada romană, cu excepția marmurei de Proconnesos (Insula Marmara) o constituie cele din Masivul Menderes, în celelalte zone nefiind cunoscute cariere antice (*Herz 1988*, p. 8). Cele mai importante cariere de marmură din acest masiv sunt cele deschise în perimetrele Denizli, Afyon-Dokymeion, Aphrodisias, Milas, Efes și Heracleia (*Tabel 2*).

Tabel 2

Principalele carierele antice de marmură din Turcia

Zona	Perimetre de exploatare/Cariere
Turcia continentală (Anatolia)	Denizli (Korkuyu Tepe, Denizcik Tepe, Ahta Tepe) Afyon-Dokymeion (Iscihissar); Aphrodisias; Milas (=Mylasa); Efes (Kusini Tepe); Heracleia (? = Latmos); Aezano; Usak; Iasos; Sardis; Beylerköy
Insula Marmara	Saraylar, Monastyr, Kavala, Iznik

Așa numita marmură de Proconnesos, exploatată în carierele Saraylar, Monastyr, Kavala și Iznik din Insula Marmara, aflorează în treimea nordică a insulei (*Monna 1977*, p. 103—105). Zona centrală a insulei este alcătuită din ortogneise, iar cea sudică din șisturi cristaline. Aceste roci aparțin seriilor metamorfice de vârstă Precambrian-Paleo-

zoic inferior și au fost străbătute de granite hercinice (Paleozoic superior) (Herz 1988, p. 8).

Marmura de Proconnesos a fost cea mai comună marmură folosită la construcțiile antice și pentru sarcofage. Următoarele ca folosință sunt marmurele de Phrygia sau Dokymeion, exploatate de la Aphrodisias până la Afyon.

### 1. 3. Italia

Un al treilea grup de marmure, din punct de vedere al localizării, îl constituie cele din Italia, respectiv din zona Carrara (Tabel 3), de vârstă Hettangian ce aflurează în Alpii Apuani, localizați în nordul Ita-

Tabel 3

Principalele cariere antice de marmură din zona Carrara (Italia)

Zona		Perimetre de exploatare/Cariere
CARRARA	TORANO	Mandria, Polvaccio, Pescina
	MISEGLIA	Betogli, Fantiscritti, Orto di Donna
	COLONNATA	Bacchioto, Fosse Ceva

liei, de-a lungul coastei Adriatice. Alpii Apuani sunt alcătuiți din serii de ofiolite, depozite carbonatice și de fliș, fiind de fapt o fereastră tectonică într-o structură în pânze. În Alpii Apuani s-au identificat două unități tectono-stratigrafice principale (Dean 1988, p. 315): 1. — secvența pânzelor Toscan, nemetamorfozate și 2. — seriile metamorfice autohtone. Seriile autohtone, în care marmura de Carrara este un membru, sunt divizate într-o unitate bazală terigenă ce include roci de vârstă Paleozoic-Triasic și o serie superioară, acoperitoare, formată din evaporite și carbonați de vârstă Triasic-Oligocen.

Marmura de Carrara a fost exploatată pentru prima dată sub Iulius Caesar, în sec. 1 î.Ch. (Kempe 1983, p. 91). Roca a fost folosită pentru statui, dar mult mai puțin comparativ cu marmurele din Grecia. În general a fost utilizată pentru construcții și monumente masive de tipul Columnei lui Marcus Aurelius, arcuri, temple.

## 2. Metode de analiză utilizate în studiul marmurelor clasice

Metodele de cercetare aplicate de-a lungul timpului asupra marmurelor clasice se pot împărți în două mari categorii:

— metode mineralogo-petrografice ce urmăresc descrierea caracteristicilor fabricului (culoare, structură, textură, dimensiunile granoblastelor de calcit, componenți mineralogici) și

— metode fizico-chimice ce urmăresc determinarea compoziției chimice (elemente majore, minore și urmă), raportul izotopilor stabili  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  și  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , etc.

## 2. 1. Metode mineralo-petrografice

Printre cele mai timpurii considerații științifice asupra marmurelor sunt cele ale lui G. R. Lepsius (*Lepsius 1890*, după *Moltesen 1992*, p. 277). Între anii 1883—1889, acesta a întreprins călătorii în Grecia pentru Societatea Geologică a Prusiei în scopul de-a întocmi o hartă geologică a Atticei, prima de acest fel. De asemenea, a vizitat Peloponesul, insulele grecești, Turcia și regiunea Carrara din Italia în scopul de-a compara rocile din aceste zone cu cele din Attica. Aceasta se pare că a fost baza pentru lucrarea sa asupra marmurelor grecești. Cartea sa este organizată ca un catalog cuprinzând 388 eşantioane de marmure din cariere și din sculpturi din Muzeul Acropolis, Muzeul Național din Atena, muzeele din Argos, Sparta, Olympia și Larissa, aceste eşantioane fiind descrise în raport cu culoarea, dimensiunea granoblastelor de calcit și mirosul degajat prin lovire.

Studiile petrografice de amănunt au început cu H. S. Washington (*Washington 1898*, după *Kempe 1983*, p. 111), făcându-se distincția între marmurele de Paros și cele de Pentelikon în principal pe baza structurii. Marmura de Paros, ca și cea de Carrara, este mediu până la larg cristalizată. Marmura de Paros a înlocuit-o pe cea de Naxos ca material principal pentru statui (sec. 6—5 î.Ch.) și a fost folosită pentru Hermes din Olympia și Venus din Milo. Pe de altă parte, marmura de Pentelikon, prezintă cristale mari prinse într-o matrice fin granulară, o structură porfiroblastică, comparată de Lepsius cu structura porfirică a unei roci magmatice (*Kempe 1983*, p. 111).

După anul 1940 au apărut o serie de lucrări conținând descrieri ale aspectului textural și stratigrafic al marmurelor grecești. Astfel, G. P. Marines (*Marinos 1948*, p. 386—389) conturează istoria geologică a marmurelor din Marea Egee, concluzionând că structura lor, maclele cristalelor de calcit și rezistența la condițiile atmosferice, printre alte proprietăți, variază funcție de poziția lor geologică și stratigrafică.

În descrierea blocurilor cu inscripții din Grecia, în timpul ultimilor 100 de ani, în mod obișnuit se includea și o descriere a caracteristicilor fizice ale materialului. Primii epigrafi Pittakis și Rangabe au încercat să facă o distincție între varietățile din insule și marmurele de Pentelikon și Hymettus din Attica. Ei au folosit doar culoarea și nuanțele, ignorând mărimea granulelor, nereușind o clasificare a acestor marmure (*Kempe 1983*, p. 112).

N. Herz și W. K. Pritchett (*Herz 1953*, p. 71—83) propun o combinație a culorii, mărimii granulelor, trăsăturilor structurale și a conținutului de minerale accesorii din marmure, ca o metodă de a le diferenția. După ce au descris metoda, ei au testat-o și au găsit-o în general satisfăcătoare. Astfel, N. Herz (*Herz 1995*, p. 499—500) a descris marmurele din Attica, din Muntele Pentelikon și Hymettus ca incluzând 5 tipuri principale: a). brecii de marmure și marmure milonizate; b). marmure șistuoase; c). marmure dolomitice; d). marmure albe, mediu la granulare, așa numitul Pentelikon „estetic”; e). marmure vârgate, așa numitul Hymettus „estetic”. Ocurența tip pentru marmura de Pentelikon a fost considerată cariera antică de la Spilia Daveli (de pe pantă sudică a muntelui) iar pentru marmura de Hymettus, carierele romane

situate de-a lungul părții de vest a muntelui (Kakorhevmă) (Kempe 1933, p. 112). Ultimul tip, Hymettus, este vărgat (dungat), cu benzi albe, cenușiu deschis sau albastrui și este mai fin granular decât cel de Pentelikon.

Analizele structurale aplicate marmurelor sunt descrise în detaliu de către L. E. Weiss (Weiss 1954, p. 641—662). Autorul atrage atenția că în pofida aparenței de simplitate a metodei, aceste principii și tehnici nu pot fi aplicate fără o bună cunoaștere a petrologiei structurale și a cristalografiei. Mai mult, aceste metode necesită timp îndelungat și nu sunt recomandate decât acolo unde metodele simple au dat greș. L. E. Weiss rezumă aceste analize structural-petrologice, sugerând că cunoașterea orientării fiecărui fragment aparținând unui singur bloc de marmură poate conduce la reconstituirea (asamblarea) acestuia și poate mai departe să stabilească sursa întregului bloc. Modul de detașare a probelor ce urmează a fi studiate este prezentat în Fig. 2.

Folosind tehnica proiecțiilor stereografice, orientarea în spațiu a oricărei bucăți dintr-o rocă și astfel a fragmentelor componente formează o „imagine structurală”. Orientarea este dată în general de 3 direcții:

a). axa preferențială  $\beta$ , dedusă din orientarea axei  $[0001]$  a granulelor de calcit și de liniatia macroscopică, când este prezentă

b). și c). maximul statistic al punctelor de compresiune și tensiune deduse din maclarea după  $[0112]$ .

Lucrări anterioare arată că într-un bloc de marmură de dimensiuni suficient de mari încât să cuprindă statui sau piese arhitectonice, aceste 3 direcții tind să aibă o orientare aproximativ constantă. Selectând fragmente cu o imagine structurală apropiată și aranjându-le în funcție de orientarea lor, este posibil a reconstitui blocuri plate de genul stelelor funerare (Fig. 3). Și în cazul statuilor această metodă ar fi fost posibilă dar mult mai greu, ținând cont în acest caz și de a treia dimensiune, respectiv adâncimea. Astfel, primul pas în vederea restaurării este prepararea diagramelor structurale dintr-un număr mare de fragmente. Diagramele astfel obținute vor fi rotite astfel încât poziția axei preferențiale  $\beta$  să fie identică în toate fragmentele. Diagramele care prezintă orientări diferite de cele ale majorității vor fi înlăturate. În Fig. 4 sunt prezentate 8 diagrame structurale obținute din 8 fragmente și care sunt astfel rotite încât toate prezintă aceeași orientare a axei  $\beta$ , singura poziționare a fragmentelor fiind cea arătată. L. E. Weiss subliniază că contribuția sa este doar o descriere preliminară a unei noi și nemălîncercate tehnici. Aplicând-o la 7 marmure grecești a obținut imagini structurale distincte pentru fiecare dintre ele și consideră această metodă ca fiind de un real ajutor în studiul acestor roci.

În același timp cu L. E. Weiss, N. Herz (Herz 1955b, p. 299—305) întreprinde cercetări similare, folosind fragmente orientate din carierele din Naxos, Paros și Delos din Cyclade, din Muntele Pentelikon și Hymettus și din trei fragmente epigrafice. N. Herz a preparat diagrame structurale în care a reprezentat polii corespunzători planelor  $\{0112\}$  (ca și L. E. Weiss), folosind 150 la 400 de poli/diagramă. Rezultatele arată că cele trei fragmente epigrafice, 2 dintr-o lespede, al treilea din

alta, dau diagrame similare, toate semănând cu cea a marmurei de Pentelikon provenind din vechea carieră Spilia Daveli. Totuși, L. E. Weiss și N. Hertz lucrând simultan dar neștiind unul de celălalt, au ajuns la aceeași concluzie: această metodă este promițătoare dar deocamdată preliminară. În prezent, datorită faptului că această metodă necesită timp îndelungat și o experiență corespunzătoare, metodele chimice sunt prioritare.

H. J. Bautsch și H. Kelch (*Bautsch 1960*, p. 691—700) descriu câteva blocuri de rocă de pe coasta Siciliei și concluzionând că nu sunt „în situ” ci provin dintr-o navă scufundată ce transporta materiale pentru construcții, au încercat să le stabilească proveniența. Folosind tehnicile convenționale ale studiului în secțiuni subțiri de tipul stabilirii dimensiunilor granulelor și a raportului calcit/dolomit prin metode colorimetrice, autorii nu au reușit să obțină informații concludente, rezultând astfel insuficiența aplicării doar a studiului petrografic ca metodă de stabilire a provenienței marmurelor.

C. Renfrew și J. S. Peacey (*Renfrew 1968*, p. 45—66) trecând în revistă tehnicile clasice de tipul studiilor macroscopice și microscopice (dimensiunile granulelor, minerale accesorii, culoare, luciu, structură) practicate încă de pe timpul lui Lepsius, ajung la concluzia, după studierea a 84 de marmure albe din 30 de surse, că nu se poate obține o clasificare sau divizare sigură a acestora numai prin aceste metode. Arătând cum recristalizarea sau tectonica pot afecta total înfățișarea unei roci, atât macro cât și microscopic, autorii consideră că vechile metode ar trebui să fie abandonate, accentul urmând să se pună pe noile metode fizico-chimice.

Marmurele antice din Toscana (Carrara), Grecia continentală, insulele grecești și Anatolia, sunt studiate de L. Lazzarini et al. (*Lazzarini 1980*, p. 173—183) combinându-se datele petrografice, chimice (raportul Ca/Sr) și arheologo-istorice cu scopul de-a obține criterii care să servească la diferențierea acestora. Eșantioanele au fost colectate din câte cariere a fost posibil acest lucru, în special din cele cunoscute sau presupuse a fi fost folosite în perioada greco-romană. Examinarea în secțiuni subțiri a constatat în de scrierea structurii, forme și dimensiunilor granoblastelor, maclelor și efectelor metamorfismului. Concluzionând, ca și C. Renfrew și J. S. Peacey (*Renfrew 1968*, p. 65) că o singură metodă nu poate da rezultate sigure, autorii pledează pentru o combinație de tehnici argumentând acest fapt prin rezultatele lor obținute pe obiectele de artă din marmură de Naxos și Marmara.

## 2.2. Scurtă descriere mineralo-petrografică a celor mai importante marmure antice

Studiile în secțiuni subțiri efectuate pe marmure acordă o atenție sporită morfometriei granoblastelor de calcit (limite drepte, curbate, îndintate) și dimensiunilor acestora (*Fig. 5*), în funcție de aceste caracteristici descriindu-se diferite tipuri de structuri. Cu toate acestea nu există o departajare clară a tipurilor de structuri (cel mai frecvent utilizat termen fiind de structuri granoblastice), astfel încât pentru descrierea marmurelor vom utiliza următorii termeni:



— *structură homeoblastică* în cazul marmurelor în crae granoblastele de calcit sunt relativ echidimensionale.

— *structură heteroblastică* la cele la care există o tendință spre heterogenitate, deosebirea făcând-o pe baza dimensiunilor, modului de prezentare a marginilor și a modului de îmbinare (asociere) a granulelor.

Am descris ca având structură homeoblastică-polygonală marmurele în care granoblastele de calcit prezintă limite regulate, predominant drepte (nefiind excluse aici și cele ușor curbate) și în care apar frecvent așa numitele „triple points” — puncte de contact a 3 granule, marginile acestora închizând unghiuri de cca.  $120^\circ$ , acest tip de structură fiind atribuit, cel mai frecvent, proceselor de cristalizare postcinematică. Se descrie frecvent ca având structură heteroblastică (= granoblastică-mosaic) acele marmure la care limitele granulelor sunt neregulate, cel mai adesea zimțate sau strâns ondulate, modul de îmbinare a acestora fiind de tip sutural.

— sub denumirea de *structură de tip mortar* se descriu marmurele rezultate în urma fenomenelor de cataclazare, rocile prezentând cristale mari de calcit, cu margini zimțate, înconjurate de granule mărunte cu limite regulate. Practic, granulele mari sunt cele vechi, anterioare procesului de deformare, fapt indicat de o serie de proprietăți: extincție ondulatorie, macles polisintetice conjugate, clivaje și plane de macles îndoit, torsionate și caracter biax. Pe de altă parte, cristalele mărunte reprezintă cristalele postdeformaționale rezultate prin recrystalizare și care constituie un „liant” pentru cele mari.

— mai rar întâlnite în marmure sunt *structurile porfiroblastice*, în-deosebi în marmurele cu o dispunere neregulată a granulelor de calcit, respectiv granule mari prinse într-o masă fundamentală fină și abundentă, formată din granule de mici dimensiuni (raport fenoblast : mezo-stază = 1 : 3).

Aceste ultime două tipuri de structuri sunt atribuite în general metamorfismului dinamic.

*Marmura de Pentelikon* este o marmură de culoare albă, uneori cu slabe benzi cenușii-albăstrui, alcătuită dintr-un mozaic echidimensional de granoblaste de calcit cu margini drepte sau ușor curbate, realizând o structură homeoblastică. Este o marmură translucidă pe cca. 15 mm. Diametrul mediu și dimensiunile maxime ale granoblastelor de calcit sunt de 0,2 mm și respectiv 0,9—1,5 mm. Componentii accesorii sunt reprezentați prin cuarț, dolomit, muscovit, minerale opace și grafit, acesta din urmă impurificând calcitul sub formă de incluziuni submicroscopice. În comparație cu marmurele albe sau cenușii-deschise din celelalte zone miniere grecești, marmura de Pentelikon prezintă cel mai ridicat conținut în minerale accesorii, cu predominarea cuarțului și dolomitului. Astfel granoblastele de cuarț sunt frecvent corodate, cu dimensiuni maxime de 1,5 mm și formează foarte rar aglomerări de cristale. Dolomitul este un component accesoriu frecvent în marmurele de Pentelikon, dar niciodată nu depășește 10% din volumul total al rocii. Majoritatea mineralelor opace prezintă o simetrie izometrică distinctă, fiind atribuite piritului.

*Marmura de Paros* este o marmură aproape pură, calcitică, de culoare albă, ce degajă un miros puternic de  $H_2S$  la lovire. Structura rocii variază considerabil de la o localitate (perimetru) la alta și chiar în cazul unei singure cariere. Cele mai frecvente tipuri de structuri sunt cele homeoblastice și heteroblastice, cele de tip mortar apărând subordonat. Dimensiunile medii ale granoblastelor de calcit sunt de ordinul 0,1—0,4 mm, în timp ce dimensiunile maxime variază între 1,8—4,8 mm. Dintre componenții accesorii sunt menționați cuarțul și muscovitul însă în cantități mici ( $< 10\%$ ) și cu dimensiuni sub 0,1 mm. Foarte rar se menționează apariția de mici cantități de grafit și minerale opace. Marmura de tip „lychnit“ se caracterizează printr-un mozaic de granoblaste de calcit cu dimensiuni medii de cca. 0,45 mm, cu margini drepte, determinând o structură homeoblastică ceea ce poate fi cauza extremei trans-lucidității (cca. 35 mm) a acestei marmure.

*Marmura de Naxos* este o marmură calcitică de culoare albă până la alb-cenușiu, cu o granulație clar mai grosieră decât marmurele din insula vecină, Paros. Structurile heteroblastice spre cele de tip mortar sunt determinate de granoblastele de calcit cu dimensiuni destul de neuniforme: dimensiuni medii între 0,5—1,5 mm și maxime între 1,7—12,2 mm, sugerând existența unor fenomene de recristalizare și de deformare cataclastică. Acest fapt este argumentat și de forma marginilor granoblastelor de calcit care variază de la ușor curbate la aspecte suturale sau zimțate. Mineralele accesorii sunt reduse din punct de vedere cantitativ, fiind reprezentate prin cuarț, muscovit, dolomit, minerale opace, grafit, epidot, zircon, serpentin. Dintre acestea, cuarțul și muscovitul sunt cele mai frecvente. Serpentinul și zirconul sunt minerale accesorii tipice pentru marmura de Naxos-Apollonas. Conținutul de dolomit din aceste marmure este în general sub 3%.

*Marmura de Thasos (-Aliki)* este o marmură calcitică de culoare albă, cu un aspect în general grosier-granular dat de granoblastele de calcit ale căror dimensiuni medii variază între 0,5—2 mm, iar cele maxime între 4,2—11,5 mm. Structura variază de la homeoblastică la heteroblastică, semnalându-se uneori și structuri de tip mortar. În cazul primelor două tipuri de structuri, marginile granoblastelor de calcit sunt în general drepte sau ușor curbate, devenind zimțate sau suturate în ultimul caz. Mineralele accesorii sunt la fel de comune ca în marmura de Pentelikon, fiind reprezentate prin cuarț, muscovit, grafit, minerale opace, titanit, zircon și hematit. În cazuri excepționale, cuarțul și muscovitul au dimensiuni  $> 1$  mm și pot fi recunoscute macroscopic. Titanitul este un mineral accesoriu caracteristic acestor marmure.

Singura sursă de marmură dolomitică pură utilizată în antichitate pentru sculptură o constituie marmura din zona Capului Vathy din nord-estul insulei (Doehne 1992, p. 180; Young 1968, p. 124—166; Lloyd 1988, p. 369—377).

*Marmura de Carrara* este o marmură de culoare albă, rareori prezentând pete sau benzi de culoarea cenușie. Dimensiunile maxime ale granoblastelor de calcit variază între 0,6—1,3 mm, marginile acestora fiind în general drepte spre curbate, determinând o structură predomi-

nant homeoblastică cu un aspect frecvent poligonal, cu treceri spre structuri heteroblastice. Dintre componenții accesorii se remarcă cuarțul, muscovitul, grafitul, mineralele opace și feldspatii plagioclazi, aceștia din urmă fiind caracteristici pentru marmura de Carrara.

*Marmura de Proconnesos* (Insula Marmara) este o rocă de culoare albă, pe alocuri cu slabe nuanțe cenușii deschis. Dimensiunile medii ale granoblastelor de calcit variază între 0,3—2,6 mm, iar cele maxime între 2,2—3,6 mm. Marginile granoblastelor de calcit au frecvent un aspect sutural sau zimțat, aceste proprietăți împreună cu planele de maclă și liniile de clivaj îndoite, torsionate, determinând structuri de tip mortar, mai rar heteroblastice. Mineralele accesorii sunt reprezentate prin cuarț, muscovit, grafit, minerale opace și uneori epidot.

## 2.2. Metode de studiu fizico-chimice

### 2.2.1. Analiza de raze X (RX)

Metodă de analiză aplicabilă doar la substanțe cristaline, permite examinarea directă a structurii cristaline a unui mineral. Este o metodă rapidă, nedistructivă (proba este adusă doar în stare de pulbere), necesitând cantități reduse de material. Se pot efectua atât determinări calitative (identificări de minerale) cât și cantitative (determinarea procentului de participare al unui mineral într-o rocă).

Analizele difractometrice au fost destul de rar utilizate în studiul marmurelor antice datorită informațiilor limitate oferite. Astfel, W. J. Young și B. Ashmole (*Young 1968*, p. 124—166) studiază două piese arheologice din marmură aflate în Muzeul de Artă din Boston (SUA) în scopul de-a le stabili proveniența. Printre metodele folosite în compararea cu marmurele de Pentelikon și din insulele Thasos, Siphnos, Naxos și Paros, se numără și analizele RX. Studiile difractometrice utilizate au indicat ca sursă a celor două piese arheologice, marmura dolomitică din insula Thasos (Capul Vathy).

Analizele difractometrice sunt utilizate și de K. Germann et al. (*Germann 1976*, p. 1—14) în studiul marmurelor din provincia Thessalia (Grecia) din perimetrele Atrax și Kastriion. Doar în probele de la Atrax s-au identificat prin această metodă cantități scăzute de dolomit (2% ceea ce le-ar diferenția de cele de la Kastriion).

R. V. Lloyd et al. (*Lloyd 1983*, p. 369—377) folosesc analizele RX ca o metodă complementară a ESR (spectroscopie de rezonanță electronică de spin) utilizând un difractometru Philips APD 3500/3250 controlat automat de un computer. Rezultatele redată în *Tabelul 4* confirmă existența marmurei dolomitice în insula Thasos în zona Capului Vathy.

C. Gorgoni et al. (*Gorgoni 1992*, p. 155—165) utilizează o serie de metode de analiză, printre care și RX în vederea caracterizării marmurelor alb-cenușii și roșietice („rosso antico”) din Peninsula Mani (Grecia). Analizele difractometrice (*Tabel 5*) executate pe probele de marmură din carierele antice au urmărit completarea informațiilor microscopice privind compoziția mineralogică a acestora.

Tabel 4

Conținutul procentual de dolomit în unele marmure din Turcia, Italia și Grecia  
(parțial din Lloyd 1983, p. 374–376, cu completări)

Zona	Cariera;perimetrul	Nr. pr.	% dolomit
Turcia	Denizli	5	0–2
	Efes (Kusini)	5	0–<1
	Marmara (Ins. Marmara)	5	<1–96
Italia (Carrara)	Colonnata	3	0–<1
	Miseglia	1	0
	Torano	3	0–<1
	Seravezza	3	0
Grecia	Doliana (Pelopones)	5	0–3
	Peninsula Mani	5	0–2
	Hymettus (Attica)	4	0–<1
	Paros (lychuit) (Ins. Paros)	4	0
	Aliki (Ins. Thasos)	5	0–<1
	Capul Vathy (Ins. Thasos)	7	99–100
	S de Capul Vathy (Ins. Thasos)	3	95–99

Tabel 5

Rezultatele difractometrice ale probelor de „rosso antico” din Pen. Mani (Grecia)  
(parțial din Gorgoni 1992, p. 157)

Localizare	Cuarț	Plagio- claz	Musco- vit	Clorit
Platsa	++	+		+
Paganea	+++	+	+	+
Paganea	++			+
Paganea	+		+	+
Marmaro	+	+++	+	±
Profitis Elias	+++		+++	+
Profitis Elias	+++	+	++	+
Profitis Elias	++	+	++	+
Prof tis Elias	++		+	+

## 2.2.2. Analize chimice clasice

Analizele chimice clasice sau analizele chimice pe cale „umedă” au la bază analizele gravimetrice prin care proba este dizolvată iar elementele chimice sau oxizii acestora sunt precipitați succesiv în acizi sau soluții alcaline, urmate de filtrare, uscare și cântărire. Între aceste metode pe cale „umedă” sunt incluse atât spectrometria și fotometria de emisie în flacără, utilizate în general pentru determinarea oxizilor elementelor alcaline Na și K cât și tehnicile colorimetrice utilizate pentru o serie de alte elemente: Si, Ti, Al, Fe (total ca  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Mn și P (Kempe 1983, p. 41–42). Astfel de analize necesită o cantitate minimă de probă de 1 g. Dezavantajul acestei metode o constituie durata de timp a analizelor (2–5 zile) și faptul că sunt distructive.

Printre primele analize chimice efectuate asupra marmurelor se numără cele ale lui G. R. Lepsius (Lepsius 1890, după Kempe 1983, p. 111).

care, în lucrarea sa asupra marmurelor grecești include și două analize parțiale ale marmurelor considerate de Pentelikon (provincia Attica) și Insulele Ciclade, în primele stabilind prezența a 0,12%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , pe când în eșantioanele din insule nu a fost detectat deloc fierul. E. Hull (Hull 1872, după Kempe 1983, p. 111) menționează analiza unei marmure de Carrara cu 0,29%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Astfel de simple, dar probabil nesigure distincții chimice ale marmurelor s-au încercat acum 100 de ani.

*Spectrometria de absorbție (AAS) (în flacără — FAAS; electrotermică — EAAS)*

În spectrometria atomică de absorbție, ca și în fotometria de flacără, o soluție preparată din probă este pulverizată într-o flacără determinând componenții prezenți în soluție să se disocieze în atomii lor constituienți. Lumina monocromatică corespunzătoare lungimii de undă caracteristice pentru elementul determinat „strălucește” prin flacără, iar atomii elementului vor absorbi această lumină. Cantitatea totală de lumină absorbită este măsurată și, prin comparare cu standarde, poate fi calculată concentrația. Fiecare element are nevoie de o sursă de lumină diferită pentru a produce radiația sa caracteristică, în afară de cazul când se folosesc surse pentru diferite elemente (Kempe 1983, p. 42). Această metodă necesită în mod ideal 1 g de probă pentru o analiză completă, deși 0,2—0,4 g sunt în general suficiente. Nu se poate determina raportul  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ , apa și  $\text{CO}_2$ , dar este una dintre cele mai bune metode pentru determinarea elementelor majore, minore și o parte din elementele urmă (cu excepția pământurilor rare).

K. Germann et al. (Germann 1976, p. 1—14) în studiul efectuat asupra marmurelor din provincia Thessalia (Grecia), analizează componenta solubilă în HCl a acestor marmure cu ajutorul unui spectrofotometru de absorbție atomică. Probele analizate provin atât din carierele antice din perimetrul orașului Atrax, cât și din unele piese arheologice aflate în muzeele din Larisa, Gonnoi, Volos, Agia și Trikkala, în scopul stabilirii provenienței acestora din urmă. În Tabelul 6 sunt redată rezultatele obținute pe 19 probe de marmură din perimetrul Atrax în comparație cu cele 15 probe prelevate din muzeele menționate și care din punct de vedere arheologic par să provină din aceleași surse. Conținuturile în Mg, Mn, Fe și Sr, precum și abaterile standard calculate statistic, confirmă această presupunere.

K. Germann et al. (Germann 1988, p. 251—262) studiază marmurele din insulele Ciclade (Paros și Naxos) în scopul găsirii unor trăsături caracteristice care să permită individualizarea acestora. Printre meto-

Tabel 6

Valorile medii ale conținuturilor (ppm) și abaterile standard pentru elementele urmă identificate în marmurele de Atrax (Germann 1976, p. 11)

	Nr. probe	Mg		Mn		Fe		Sr	
		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Probe de teren	19	3970	2227	20	18	155	164	190	40
Probe din muzee	15	4140	1670	39	19	160	163	210	70

dele folosite se numără și cele prin AAS, efectuate pe fracția solubilă în acizi a acestor marmure, cu identificarea elementelor Mg, Fe, Sr, Mn și Zn prinse în carbonați. Intervalele și valorile medii (mediana) pentru elementele respective sunt redată în *Tabelul 7*.

Tabel 7

Concentrația în elemente urmă pentru marmurele din insulele Ciclade (*Germann 1988*, p. 258)

Perimetru (nr. probe) Elem. ch.	Paros-1 (12)		Paros-2 (42)		Paros-3 (20)		Naxos (27)	
	Interval	Med.	Interval	Med.	Interval	Med.	Interval	Med.
Mg(%)	0,1–1,6	0,2	0,08–1,93	0,27	0,11–5,1	0,34 13	0,11–1,6	0,9
Mn (ppm)	8–18	10,5	9–37	14	5–34	170	13–120	37
Fe (ppm)	10–200	50	30–630	105	40–730	7	30–1600	170
Zn (ppm)	2–9	6,5	3–20	7	5–25	118	5–24	10
Sr (ppm)	80–200	145	53–250	100	32–166	0,14	50–165	115
Rez. ins. (%)	0,02–0,07	0,07	0,05–0,6	0,1	0,03–0,7		0,1–0,7	0,2

L. Moens et al. (*Moens 1991*, p. 185–202) sintetizează rezultatele obținute pe marmurele clasice de echipa interdisciplinară de belgieni. Autorii au utilizat o serie de metode în scopul determinării elementelor majore, minore și urmă. Pentru elementele Mg, Al și V au folosit AAS. Rezultatele (intervalul și mediana) sunt prezentate în *Tabelul 8*.

Tabel 8

Elementele urmă determinate prin AAS în marmurele din Italia, Turcia și Grecia (*Moens 1991*, p. 190–191)

Perimetru (nr. probe) Elem. ch.	Carrara (27)		Marmara (24)		Afyon (27)		Usak (16)	
	Interval	Med.	Interval	Med.	Interval	Med.	Interval	Med.
Mg(%)	0,36–0,81	0,43	0,24–0,90	0,30	0,054–0,53	0,11	0,15–1,70	0,27
Al (ppm)	36–340	167	16–85	32	22–530	70	9–340	82,5
V (ppb)	220–3650	660	90–2010	480	60–1140	480	200–3870	410

Perimetrul (nr. probe) Elem. ch.	Pentelikon (24)		Paros (22)		Naxos (12)		Thasos (22)	
	Interval	Med.	Interval	Med.	Interval	Med.	Interval	Med.
Mg(%)	0,25–0,87	0,35	0,14–0,47	0,26	0,13–0,63	0,28	0,27–0,43	0,35
Al (ppm)	20–1070	340	16–810	90	58–468	159	16–409	121
V (ppb)	150–1050	420	280–3080	620	44–9800	710	150–2280	570

Analizele colorimetrice au fost utilizate pentru determinarea elementului Si din marmure prin metoda cu silicomolibdat. Aceasta este o metodă de determinare fotometrică a silicei, bazată pe utilizarea albastrului de molibden. Proba se tratează cu diferiți reactivi (Jeffery 1983, p. 402—405) iar densitatea optică a fiecărei soluții, comparativ cu a apei se măsoară cu un spectrofotometru fixat la lungimea de undă de 650 nm. Rezultatele obținute de L. Moens et al. (Moens 1989, p. 618) pentru o serie de probe prelevate din carierele antice din zonele Carrara și Marmara au relevat conținuturi de 41—652 ppm (Carrara) și 0,70—16 ppm (Marmara).

### 2.2.3. Analize prin activare cu neutroni (INAA)

Dacă o probă dintr-o rocă sau mineral este iradiată într-un reactor printr-un bombardament de neutroni, anumite elemente chimice, datorită reacțiilor nucleare vor produce izotopi radioactivi. Numărul fotonilor gamma ca și „durata de viață” a izotopilor este proporțională cu concentrația și poate fi înregistrată prin intermediul unor detectori de Ge/Li sau Si/Li. Energiile razelor gamma caracteristice pentru fiecare tip de izotopi sunt bine cunoscute, iar concentrația acestora în probe poate fi determinată prin compararea intensității reflexelor (picurilor) cu cele ale unor standarde iradiate concomitent. Este o metodă ce se pretează la determinarea pământurilor rare, Mn, Sc, Ta, Th, Na, Fe, Hf și U, pe când alte elemente majore ca Mg, Al, Ti și V care produc izotopi de durată scurtă (< 10 minute) solicită tehnici speciale (Kempe 1983, p. 45). Metoda necesită reactor nuclear, accelerator de particule sau o sursă izotopică pentru activarea neutronilor, acest fapt fiind principalul dezavantaj datorită costurilor ridicate, atât a aparaturii propriu-zise, cât și a analizelor în sine.

Acest dezavantaj este însă minor în comparație cu avantajele oferite: cantitate redusă de probă (< 0,1 g), precizie și reproductibilitate foarte bună. Totodată, ținând cont că se pot iradia chiar piese arheologice de mici dimensiuni, se consideră aceasta ca fiind una dintre cele mai bune metode analitice nedistructive. Limita de detecție poate fi lărgită prin folosirea „separării radiochimice”, prin izolarea elementelor chimice urmărite (RNAA). Această metodă se aplică și în cazul conținuturilor foarte scăzute de pământuri rare, însă necesită laboratoare și aparatură specializată. Este o metodă destul de rar utilizată comparativ cu INAA.

Primul studiu chimic important asupra marmurelor din zona Mării Mediterane este realizat de L. Rybach și H. V. Nissen (Rybach 1965, p. 105—117). Circa 230 de probe proaspete (300 mg din fiecare) din marmure albe sau aproape albe provenind din carierele din Attica, Marea Egee și Anatolia au fost analizate pentru a stabili conținuturile în Na și Mn prin INAA folosind reactorul de „apă grea” DIORIT. Rezultatele au arătat un conținut în Mn de 0,5—200 ppm, iar în Na de 2—300 ppm, valorile fiind similare în probele provenind din aceleași cariere. Concentrația în Mn în special, combinată cu alte date a permis identificarea câtorva marmure folosite de către vechii greci. În general, marmurele din Attica luate în grup prezintă conținuturi mai ridicate în Mn. Ori-

cum, se atrage atenția că atunci când se folosește acest element trebuie avut grijă ca proba să fie tipică și nu îmbogățită într-un fel sau altul în Mn (de exemplu să conțină minerale de mangan de tipul piemontitului). Omogenitatea a fost verificată atât în probele din aceeași carieră, cât și în cadrul fiecărei probe, pe eșantioane din Marmara, Afyon și Pentelikon, observându-se că omogenitatea maximă o prezintă eșantioanele din Marmara.

E. Mello et al. (Mello 1988, p. 102—108) și S. Melloni et al. (Melloni 1988, p. 293—301) realizează studii de finete asupra marmurelor provenind din 7, respectiv 10 cariere din zona Mării Mediterane (Tabel 9), ur-

Tabel 9

Localizarea probelor de marmură studiate de E. Mello et al. (Mello 1988, p. 103)

Zona	Perimetrul (Cariera)	Nr. probe
Carrara	Colonnata (Bacchioto), Miseglia (Betogli, Fantiscritti), Torano (Maudria, Polvaccio, Pascina)	7
Marmara	Monastyr, Kavala, Saraylar	20
Denizli	Korkuyu Tepe, Denizcik Tepe, Akta Tepe	5
Aphrodisias	cariera cu „cruce bizantină”	5
Naxos	Kinidaros, Apiranthos, Apolonas	23
Paros		3
Pentelikon		11

mărind conținutul în elemente urmă a acestora. Cca. 5—10 g din fiecare probă au fost aduse în stare de pulbere ( $<15\mu\text{m}$ ). Pentru testarea omogenității, s-au prelevat cât trei subprobe prin amestecul întâmplător al fiecărei probe inițiale. Apoi, 74 astfel de subprobe de câte 250 mg și 74 de câte 500 mg s-au introdus în recipiente de polietilenă și au fost iradiate folosind un reactor de 250 kW TRIGA Mark II, la un flux de cca.  $1 \times 10^{12}$  neutroni  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Pentru comparație s-au folosit 3 standarde: G-1 și BCR-1 aparținând USGS și un standard sintetic preparat prin adăugarea de cantități cunoscute din elementele urmă studiate la un carbonat de calciu pur. Toate au fost supuse unei prime iradiieri în același timp cu probele de marmură timp de 1 oră. Înregistrările au fost efectuate pentru uraniu și mangan după o răcire de 3 ore. A doua iradiere de 60 ore și înregistrări după 1 și 3 săptămâni după răcire au fost efectuate pentru determinarea elementelor chimice, altele decât pământurile rare. Pământurile rare au fost determinate cu ajutorul metodelor radiochimice (RNAA). Radioactivitatea indusă a fost măsurată prin spectrometrie gamma cu ajutorul unui detector de Ge (Li). Rezultatele sunt date ca o medie a trei determinări independente, precizia variind între 20% și 20%, funcție de abundența elementului (Tabel 10).

Echipa interdisciplinară de belgieni probează și analizează majoritatea carierelor antice din zona Mării Mediterane (Roos 1988, p. 263—272; Moens 1987, p. 101—114; Moens 1988, p. 333—348; Moens 1989, p. 613—624; Moens 1991, p. 185—202; Moens 1992, p. 247—252). Astfel au



Conținutul în elemente urmă ( $\mu\text{g/g}$ ) a marmurelor din 7 cariere antice (Mello 1988, p. 105)

Elem.	Carrara	Marmara	Pentelikon	Naxos	Denizli	Aphrodisias	Paros
Sc	$0,11 \pm 0,10$	$13,71 \pm 1,31$	$2,32 \pm 0,11$	$3,65 \pm 0,22$	$0,96 \pm 0,02$	$4,32 \pm 0,90$	$5,16 \pm 0,04$
Cr	$1,28 \pm 0,50$	$13,95 \pm 3,21$	$3,52 \pm 0,29$	$5,75 \pm 0,17$	$1,19 \pm 0,06$	$9,72 \pm 0,54$	$12,63 \pm 0,25$
Co	$0,12 \pm 0,15$	$3,55 \pm 0,17$	$0,71 \pm 0,04$	$0,74 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,04$	$1,36 \pm 0,02$	$1,71 \pm 0,11$
Rb	$14,8 \pm 5,7$	$3,4 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,5$	$5,5 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,6$	$3,4 \pm 0,40$	$5,0 \pm 0,10$
Sb	$0,007 \pm 0,002$	$0,033 \pm 0,017$	$0,07 \pm 0,01$	$0,48 \pm 0,05$	$0,04 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,02$	$0,12 \pm 0,01$
Cs	$0,031 \pm 0,01$	$0,030 \pm 0,003$	$0,078 \pm 0,012$	$0,162 \pm 0,025$	$0,036 \pm 0,011$	$1,472 \pm 0,11$	$0,159 \pm 0,053$
Ba	$38,2 \pm 9,6$	$48,8 \pm 4,9$	$43,1 \pm 2,6$	$93,5 \pm 16,5$	$36,4 \pm 9,4$	$75,2 \pm 5,9$	$51,3 \pm 2,50$
La	$6,0 \pm 4,2$	$16,8 \pm 0,9$	$6,0 \pm 0,3$	$8,3 \pm 1,8$	$1,4 \pm 0,1$	$23,6 \pm 2,4$	$37,3 \pm 5,0$
Ce	$8,37 \pm 3,36$	$20,45 \pm 1,20$	$9,7 \pm 0,92$	$8,61 \pm 0,61$	$16 \pm 0,14$	$29,23 \pm 1,97$	$41,23 \pm 1,95$
Sm	$0,29 \pm 0,12$	$2,11 \pm 0,13$	$0,88 \pm 0,05$	$0,95 \pm 0,02$	$0,17 \pm 0,01$	$2,60 \pm 0,07$	$3,18 \pm 0,35$
Eu	$0,097 \pm 0,028$	$0,514 \pm 0,099$	$0,179 \pm 0,012$	$0,243 \pm 0,021$	$0,037 \pm 0,008$	$0,788 \pm 0,058$	$0,99 \pm 0,034$
Gd	$0,258 \pm 0,138$	$1,949 \pm 0,087$	$0,577 \pm 0,026$	$0,864 \pm 0,026$	$0,161 \pm 0,004$	$2,50 \pm 0,117$	$2,97 \pm 0,010$
Ho	$0,022 \pm 0,009$	$0,348 \pm 0,028$	$0,112 \pm 0,005$	$0,196 \pm 0,036$	$0,037 \pm 0,008$	$0,654 \pm 0,051$	$0,826 \pm 0,015$
Tm	$0,013 \pm 0,002$	$0,175 \pm 0,035$	$0,239 \pm 0,006$	$0,077 \pm 0,011$	$0,013 \pm 0,002$	$0,246 \pm 0,027$	$0,373 \pm 0,015$
Yb	$0,116 \pm 0,051$	$0,353 \pm 0,062$	$0,032 \pm 0,004$	$0,029 \pm 0,003$	$0,007 \pm 0,001$	$0,838 \pm 0,039$	$1,006 \pm 0,020$
Lu	$0,018 \pm 0,011$	$0,029 \pm 0,005$	$0,035 \pm 0,006$	$0,021 \pm 0,001$	$0,012 \pm 0,001$	$0,094 \pm 0,009$	$0,143 \pm 0,011$
Th	$0,061 \pm 0,023$	$0,143 \pm 0,022$	$1,634 \pm 0,215$	$1,680 \pm 0,132$	$0,034 \pm 0,005$	$0,344 \pm 0,102$	$1,346 \pm 0,032$
U	$0,002 \pm 0,002$	$0,002 \pm 0,001$	$0,039 \pm 0,004$	$0,037 \pm 0,003$	$0,002 \pm 0,001$	$0,003 \pm 0,002$	$0,039 \pm 0,004$
Hf	$0,17 \pm 0,04$	$0,07 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,00$	$0,20 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,00$	$0,19 \pm 0,00$

fost colectate 174 eşantioane din perimetrele Carrara (27), Marmara (24), Afyon (27), Usak (16), Pentelikon (24), Paros (22), Naxos (12) și Thasos (22). Probarea și pregătirea probelor au constituit operații riguroase urmăriți în scopul de-a asigura o reprezentativitate și reproductivitate cât mai mare. Astfel, din fiecare carieră s-au prelevat probe de marmură de culoare albă sau cenușie deschis, de cca. 1 kg fiecare, de pe suprafețe cât mai mari, probele nefiind afectate de fenomene de alterare-dezagregare. În laborator, din eşantioanele respective s-au prelevat cu ajutorul unei carotiere de diamant cilindri de cca. 9,50 g (20 mm lungime și 15 mm diametru) la care s-a detașat cca. 1 cm din capătul exterior (operațiune derulată sub jet continuu de apă distilată). Din fiecare eşantion s-au prelevat doi astfel de cilindri, unul pentru INAA iar al doilea urmând să fie mojarat și omogenizat, pentru AAS și analize colorimetrice. În plus, urmărind aceași idee de-a nu contamina probele, cilindrii respectivi obținuți prin carotare au fost introduși imediat sub un jet continuu de  $\text{NH}_3$  (1M) timp de 5 minute pentru INAA, respectiv 10 minute pentru AAS, spălați apoi cu apă distilată 2 minute și uscați la 110°C. Probele astfel purificate au fost iradiate timp de cca. 7 ore într-un reactor TETHIS aparținând Institutului de Științe Nucleare din Gent (Belgia) la un flux termal de neutroni de  $1,5 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>/sec. Spectrometria gamma utilizând un detector de Ge a fost efectuată la 1 zi (timp de măsurare  $t_m = 15$  h), 1 săptămână ( $t_m = 24$  h) și 5 săptămâni ( $t_m = 24$  h). Rezultatele obținute (Tabel 11) sunt considerate reprezentative pentru perimetrele antice de exploatare a marmurei.

A. P. Grimanis și Maria Vassilaki-Grimanis (Grimanis 1988, p. 275—281) utilizează conținuturile de elemente urmă a unor marmure din Grecia (Muntele Pentelikon, Muntele Hymettus, Aghia Marina și Karystos) utilizând tot INAA. Probele au fost colectate sub formă de pulbere din eşantioanele prelevate din cariere utilizând un burghiu armat cu safir sintetic de la o adâncime mai mare de 1 cm față de suprafață, pentru a evita pericolul contaminării cu alte elemente. Pentru a obține probe cât mai reprezentative, dintr-un eşantion de marmură s-au prelevat trei astfel de probe, de câte 1 g fiecare, din locuri diferite și care apoi s-au amestecat bine în recipiente de plastic. Din probele reprezentative astfel obținute s-au ales câte trei subprobe de câte 250 mg fiecare și care au fost analizate împreună cu trei standarde de laborator (GSP-1, SL-1 și un standard sintetic). Pentru testarea preciziei determinărilor s-au analizat și 4 probe prelevate dintr-un cilindru de marmură, la intervale de 10 cm în vederea testării omogenității unui singur eşantion. Abaterea standard găsită a fost sub 6% în toate cele 4 probe. Probele au fost iradiate utilizând un reactor al Centrului de cercetări naționale „Demokritos” din Atena la un flux termal de neutroni de  $2,2 \times 10^{13}$  neutroni cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> timp de 6 ore. Înregistrările s-au efectuat după o perioadă de răcire de 3 zile cu un detector de Ge (Li) timp de 1 oră, în scopul obținerii de rezultate pentru La, Lu, Sm, U și Yb. După o perioadă de răcire de 3 săptămâni, probele și standardele au fost reînregistrate timp de 3 ore pentru Ba, Ce, Cr, Cs, Eu, Gd, Sb, Tb și Tm.

Rezultatele obținute (Tabel 12) reprezintă valorile medii, în μg/g. Valorile limită ( $\pm$ ) reprezintă deviațiile standard obținute în cadrul

Perim.	CARRARA			MARMARA			AFYON			USAK		
Element	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.
Na (ppm)	7,3	100	20,4	20,7	43,8	7,1	3,03	63	6,1	2,06	142	11,9
K (ppm)	18,3	276	95	0,70	16	2,66	1,82	291	18,2	0,018	154	4,36
Sc (ppb)	12,9	247	71	0,31	84	15,1	7,4	208	20,5	0,8	398	24,9
Cr (ppm)	0,215	2,87	1,97	0,23	3,97	1,85	0,023	2,85	0,233	0,27	3,13	0,71
Mn (ppm)	11,1	73	21,8	0,487	9,1	0,85	5,7	141	25,5	1,52	51	14,6
Fe (ppm)	20,4	266	98	4,47	54	16,8	15,9	500	100	13	450	101
Co (ppb)	17,3	124	57	1,34	49	2,76	9,2	325	37,3	3,86	278	38,3
Zn (ppm)	0,76	5,22	1,83	0,26	6	2,09	0,356	5,74	0,91	0,299	14,2	0,67
Sr (ppm)	147	225	170	124	154	165	48,9	200	95	113	410	210
La (ppb)	231	1060	430	<1,9	1070	28,5	36,4	860	118	32,5	2330	94
Hf (ppb)	5,3	30	12,4	<1,3	5	2,8	1,7	44	4,5	0,51	25	4,2
Th (ppb)	9,5	101	30,5	1	19,8	2,61	1,56	126	10,3	<1,3	48	9,9
U (ppb)	45	660	127	38	830	212	23,5	151	53	8,4	940	102

Perim	PENTELIKON			PAROS			NAXOS			THASOS		
Element	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.
Na (ppm)	10,9	164	30,9	1,53	32,1	8,35	2,44	31,8	5,3	5,2	68	23,2
K (ppm)	6,21	411	34,9	0,93	470	22	0,47	247	5,44	1,94	382	28,8
Sc (ppb)	14	232	48,1	2,49	217	61,2	23	179	30,2	4,29	607	142
Cr (ppm)	0,158	1,04	0,52	0,253	5,78	0,93	0,259	4,49	0,96	0,292	1,31	0,545
Mn (ppm)	37,3	294	68	1,68	39	6	3,31	112	24,8	2,19	84	23,5
Fe (ppm)	89	880	240	4,77	301	41,6	23,9	162	49,5	8,1	367	47,9
Co (ppb)	14,6	355	48,1	3,38	93	24,4	8,2	122	2,55	5,9	121	27,8
Zn (ppm)	0,81	9,4	3,73	0,301	2,96	1,91	0,66	12,4	1,84	0,334	43,4	7,4
Sr (ppm)	105	248	181	56,5	293	160	85	298	151	107	179	141
La (ppb)	215	1960	720	60,5	2850	690	107	1150	420	54	3680	800
Hf (ppb)	<1,5	58	3,5	<0,4	32	2,5	2	21	7,1	<1,75	47	4,2
Th (ppb)	4,9	261	21,7	1,10	128	19,6	8,2	69	20,1	2,02	122	20,1
U (ppb)	9,6	109	42,8	23,3	1290	65	29,9	4720	75	12,8	347	85

Tabel 12

Concentrațiile în elemente urmă ( $\mu\text{g/g}$ ) din unele marmure grecești (*Griwanis 1988*, p. 281)

Elem.	HM	HA	PM	PA	AM	KA
La	$1,5 \pm 0,12$	$1,8 \pm 0,14$	$0,9 \pm 0,05$	$6,8 \pm 0,4$	$0,39 \pm 0,04$	$8,3 \pm 0,4$
Ce	$1,1 \pm 0,14$	$1,2 \pm 0,15$	$1,3 \pm 0,14$	$6,8 \pm 1,2$	$0,68 \pm 0,2$	$8,9 \pm 0,9$
Sm	$0,18 \pm 0,02$	$0,22 \pm 0,02$	$0,80 \pm 0,1$	$0,90 \pm 0,09$	$0,16 \pm 0,02$	$1,8 \pm 0,2$
Eu	$0,05 \pm 0,005$	$0,045 \pm 0,004$	$0,02 \pm 0,002$	$0,18 \pm 0,02$	$0,012 \pm 0,001$	$0,31 \pm 0,03$
Gd	$0,13 \pm 0,03$	$0,14 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,003$	$0,57 \pm 0,06$	$0,22 \pm 0,04$	$1,9 \pm 0,2$
Tb	$0,013 \pm 0,001$	$0,012 \pm 0,001$	$0,01 \pm 0,001$	$0,075 \pm 0,006$	$0,01 \pm 0,001$	$0,13 \pm 0,01$
Tm	$0,05 \pm 0,006$	$0,05 \pm 0,0006$	$0,21 \pm 0,04$	$0,24 \pm 0,03$	$0,15 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,05$
Yb	$0,017 \pm 0,002$	$0,014 \pm 0,002$	$0,03 \pm 0,005$	$0,034 \pm 0,005$	$0,03 \pm 0,005$	$0,045 \pm 0,05$
Lu	$0,033 \pm 0,003$	$0,027 \pm 0,003$	—	$0,04 \pm 0,004$	$0,012 \pm 0,001$	$0,065 \pm 0,007$
Ba	$20,3 \pm 1,6$	$18,5 \pm 1,3$	$24,0 \pm 2,3$	$32,5 \pm 4,0$	$12,2 \pm 1,4$	$126 \pm 13$
Cr	$3,2 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,2$	$1,10 \pm 0,3$	$3,6 \pm 0,8$	$1,7 \pm 0,2$	$45,1 \pm 0,3$
Cs	$<0,01$	$<0,01$	$0,063 \pm 0,01$	$0,065 \pm 0,01$	$0,068 \pm 0,01$	$0,37 \pm 0,04$
Sb	$0,025 \pm 0,005$	$0,022 \pm 0,005$	$0,064 \pm 0,01$	$0,071 \pm 0,01$	$0,042 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,005$
U	$0,072 \pm 0,01$	$0,080 \pm 0,01$	$0,045 \pm 0,007$	$0,040 \pm 0,007$	$0,25 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,01$

Obs.: HM = Hymettus modern; HA = Hymettus antic; PM = Pentelikon modern;

PA = Pentelikon antic; AM = Aghia Marina modern; KA = Karystos antic

aceluiași grup de probe. Cele mai ridicate conținuturi în elemente urmă, exceptând Sb și U au fost găsite în marmurele verzi din carierele antice de la Krystos (Insula Eubeea). Valorile obținute pentru marmura de Pentelikon sunt în bună concordanță cu cele obținute de E. Mello et al. (Mello 1988, p. 105).

#### 2.2.4. Fluorescența în ultraviolet

Calcitul este unul dintre numeroasele minerale care prezintă fluorescență în lumină UV de unde lungi ( $> 300$  nm). Un domeniu de aplicare al acestei metode îl constituie studiul urmelor lăsate de sculptori sau a urmelor rămase în carieră în urma detașării blocurilor și care în prezent sunt șterse (intenționat sau nu), acestea putând deveni vizibile uneori în lumină UV (lungime mare). Undele scurte nu se pretează la astfel de determinări și sunt primejdioase. Unele lungimi de undă pot determina reacții chimice ce duc la permanentizarea urmelor respective și în lumină naturală (Kempe 1983, p. 35).

C. Renfrew și J. S. Peacey (Renfrew 1968, p. 61) utilizează fluorescența în ultraviolet în încercarea de individualizare (separare) a marmurelor din diferite surse. Autorii menționați utilizând lumina ultraviolet cu  $\lambda = 366$   $\mu\text{m}$  au reușit separarea marmurelor din insula Rodos, care prezintă o fluorescență de nuanțe roz, de restul marmurelor studiate care prezentau o culoare violet.

#### 2.2.5. Termoluminiscenta (TL)

Termoluminiscenta este probabil una dintre cele mai utilizate metode de datare a materialelor arheologice anorganice. Inițial a fost folosită aproape exclusiv pentru fragmente ceramice, dar în prezent se aplică și la roci și minerale.

Metoda se bazează (Kempe 1983, p. 36—37) pe proprietatea unei materii cristaline (rocă sau mineral) supusă încălzirii la cca.  $500^{\circ}\text{C}$  de a emite o luminiscentă în completarea incandescenței normale la acea temperatură. Această lumină reprezintă degajarea unei energii metastabile înmagazinată în probă și datorată unor electroni prinși în defectele de rețea. Acești electroni sunt excitați de radiația unor izotopi radioactivi de tipul impurităților U, Th,  $^{40}\text{K}$ , iar strălucirea de lumină (TL) sau energia degajată rezultă din faptul că prin încălzire, electronii se întorc la configurația lor normală. Intensitatea strălucirii este în funcție de concentrația în elemente radioactive, dar și de timpul trecut de la o încălzire anterioară, de exemplu temperatura de ardere în cuptor a ceramicii. Astfel, intervalul de timp dintre această ardere în cuptor și încălzirea artificială din prezent este chiar vârsta materialului studiat. În cazul când proba este o rocă magmatică, „arderea” inițială a avut loc odată cu cristalizarea din magmă. Metoda are o acuratețe de  $\pm 10\%$  pe un interval de timp între 100 și 50 000 ani.

În cazul studiului efectuat pe fragmente de marmure grecești, G. Afordakos et al. (Afordakos 1974, p. 47—48) au folosit termoluminiscenta artificială (ATL) și una mixtă (MTL) după ștergerea curbelor naturale (NTL) prin încălzire, iar apoi au supus probele la raze X pentru

a induce o captură de electroni pentru un tratament termic viitor. Astfel, s-au obținut trei parametri: 3 temperaturi și 2 raporturi de intensitate care sunt mult mai diagnostice decât NTL singure. Metoda a fost aplicată cu succes pe probe luate din diferite fragmente în scopul de-a reconstitui statuile fragmentate găsite pe o epavă lângă insula Antikythera.

Referitor la problema stabilirii surselor de marmură, curbele termice ale marmurelor grecești prezintă în general un singur „peak” astfel că nu este posibilă o caracterizare sigură a probelor (Kempe 1983, p. 117).

### 2.2.6. Catodoluminiscența (CL)

Catodoluminiscența este o metodă ce se bazează pe observarea directă a luminiscenței generate de un fascicul de electroni ce cade pe suprafața luată în observație. Fasciculul de electroni poate fi focalizat pe suprafețe mai mici de 10  $\mu\text{m}$ , astfel încât se pot analiza mici granule de mineral sau zone în cadrul unei granule, fără a mai fi necesară detașarea acestora din proba (materialul) gazdă. Se pot utiliza secțiuni lustruite sau secțiuni subțiri fără lamelă, îmbrăcate în carbon. Fasciculul de electroni determină mineralul să emită raze X secundare care pot fi separate și măsurate ca și în cazul XRF. Metoda a fost aplicată în special gresiiilor, în care s-au putut identifica 3 tipuri luminescente de cuarț: violet, brun și ne-luminescent (Kempe 1983, p. 46). Metoda a fost propusă în 1987 de către Danielle Descrouez (Muzeul de Istorie Naturală din Geneva, Elveția) și V. Barbin (Universitatea din Berna, Elveția) ca o nouă și promițătoare tehnică în studiul marmurelor (Barbin 1989, p. 861—866). În prezent există în Elveția, la Berna, o bază de date ce cuprinde caracteristicile CL pentru cca. 1 000 de probe de marmure calcitice și dolomitice din perimetrele carierelor antice.

O privire de ansamblu a metodei de lucru și o încercare de individualizare a marmurelor din carierele antice pe baza CL și a raporturilor izotopilor stabili  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  și  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  este realizată de V. Barbin et al. (Barbin 1992, p. 175—183). Experimentele s-au efectuat pe secțiuni subțiri ce au fost supuse unui voltaj de 30 kV și o densitate de curent de electroni de 0,4  $\mu\text{A}/\text{mm}^2$ . Imaginile au fost înregistrate pe diapozitive color Ektachrome 400 ASA (developate la 800 ASA). Spectrele au fost înregistrate între 300 și 900 nm utilizând un monocromator PTI 01-001 dotat cu un fotomultiplicator Hamamatsu R 928. Spectrele obținute au fost corectate între 370 și 840 nm pentru răspunsul spectral al instrumentului. Fenomenul de catodoluminiscență este obținut prin bombardarea unui mineral (calcitul și/sau dolomitul în cazul marmurelor) cu un flux de electroni. Culorile diferite ale luminiscenței depind de impuritățile găzduite în cristal sau în defectele de rețea. În carbonați, principalul „activator” este manganul (luminiscență portocalie) în timp ce principalul „distrugător” (stingător) este fierul. Rezultatele au permis împărțirea marmurelor albe în trei grupe principale funcție de culoarea dominantă a luminiscenței (Tabel 13). Astfel, marmurele albe calcitice prezintă o luminiscență portocalie sau albastră, în timp ce marmurele dolomitice

Tabel 13

Gruparea carierelor de marmură în funcție de luminiscentă generată (Barbin 1992, p. 178--181)

Marmure cu luminiscentă portocalie	Marmure cu luminiscentă roșie	Marmure cu luminiscentă albastră
Pentelikon, Dokimeion, Naxos-Imerio, Naxos-Appolonas, Thasos-Aliki, Paros-Chorodaky Pteleos, Carrara	Thasos-Capul Vathy, Naxos-Mt. Zeus	Doliana, Hymettus, Naxos-Keramoti, Paros (Iychnit), Marmara (Proconnesos)

au o luminiscentă dominantă roșie. S-a observat că luminiscentă albastră este vizibilă doar atunci când cea portocalie este scăzută, adică atunci când cantitatea de Mn din calcit este sub 5 ppm.

### 2.2.7. Spectroscopie optică de emisie (OES)

OES este o metodă ce a fost des folosită în trecut, însă în prezent este frecvent înlocuită de spectroscopia atomică de masă sau de ICPMS (spectrometrie de masă cu plasmă cuplată inductiv). Proba (rocă sau mineral) este adusă în stare de pulbere și amestecată cu grafit. Amestecul este apoi introdus într-un arc de carbon și vaporizat. Lumina emisă la lungimi de undă specifice, caracteristice fiecărui element este difractată și apoi înregistrată pe o placă fotografică. Densitatea liniilor produse este comparată cu cea a standardelor, folosind un densimetru (Kempe 1983, p. 42).

Cu toate că metoda este destul de rapidă, a scăzut în importanță în ultimii ani. Principalele dezavantaje sunt: volatilizarea diferită a unor elemente și acuratețea scăzută a metodei, obținându-se în general doar rezultate semi-cantitative. Totuși, acoperă un domeniu larg al elementelor și este larg accesibilă în laboratoarele geologice și geochemice. Cantitatea de probă necesară este de cca. 0,05 g sau mai puțin pentru aproape toate elementele (majore, minore, urmă). Nu se poate determina raportul  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ , apa și  $\text{CO}_2$ .

Analize semicantitative prin OES pentru elementele Fe, Si, Pb, Al, Mn, Mg, Ca, Sn, Cu, Ag, Zn, Na, Ni, Sr, Ti, K, Ba și V sunt executate de W. J. Young și B. Ashmole (Young 1968, p. 124—166) pe două obiecte de artă din Muzeul de Artă din Boston. Ei au comparat rezultatele cu determinările efectuate pe marmurele din Thasos, Siphnos, Naxos, Paros și Pentelikon. O potrivire a fost clar evidențiată între obiectele de artă și marmura dolomitică de Thasos (Capul Vathy), în special pe baza conținutului ridicat în magneziu. Studiile difractometrice și cele în secțiuni subțiri au indicat de asemenea o sursă dolomitică. Totuși, nu este sigur că în cazul unei marmure ne-dolomitice s-ar fi obținut cu atâta siguranță o echivalare prin acest tip de comparație.

L. Conforto et al. (Conforto 1975, p. 201—213) studiind din punct de vedere chimic marmurele din zona Carrara, Marea Egee și Anatolia au determinat și proporția reziduiului insolubil din probă. După stabilirea conținutului în Fe, Mn, Al, Si și Ba prin OES și a conținutului în

K, Sr și Ti prin XRF pe un număr de 137 probe, au ajuns la concluzia că cele mai multe dintre aceste elemente pot fi folosite la împărțirea marmurelor în grupe. Astfel, ei au grupat probele studiate în 6 clase de culoare presupunând că elementele urmă conținute sunt în corelație cu culoarea. Totuși, numai într-o singură grupă, colorată în alb spre cenușiu deschis a putut fi folosit acest criteriu la identificarea zonelor probate: Fe, Mn și Sr au putut fi utilizate la a face distincție între marmurele din Efes, Marmara și Carrara.

### 2.2.8. Spectrometrie de fluorescență de raze X (XRF)

Spectrografia de emisie de raze X este o metodă larg răspândită în prezent și care utilizează sisteme manuale sau automate. Proba adusă în stare de pulbere este presată sau topită, sub formă de pastile, iar apoi iradiată cu raze X primare care determină excitarea electronilor orbitali ai atomilor elementelor chimice din probă, determinându-i să emită raze X secundare sau fluorescente, cu lungimi de undă caracteristice fiecărui element (*Kempe 1983*, p. 3—44). Cristalele analizatoare de tipul LiF sunt folosite pentru a dispersa razele X secundare într-un spectru, iar intensitatea sau energia lor este măsurată cu un detector corespunzător, de regulă un detector de scintilație. Rata de emisie a razelor X secundare este proporțională cu concentrația, iar prin compararea cu standarde poate fi convertită într-o măsurare a cantității în care elementul chimic este prezent. Este o metodă destul de precisă pentru majoritatea elementelor majore, minore și urmă, inclusiv pământurile rare. Nu se pretează pentru elemente chimice cu număr atomic mic (Na și mai jos, litiul fiind un important element chimic care nu poate fi determinat) și pentru raportul  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ , apa și  $\text{CO}_2$ . În mod obișnuit este necesară o cantitate de probă de 1 g, dar se pot analiza și 0,4 g. Este o metodă nedistructivă dar ținând cont că proba este adusă în stare de pulbere, nu prezintă avantaje în cazul obiectelor de artă.

Studiul efectuat de L. Lazzarini et al. (*Lazzarini 1980*, p. 173—183) asupra a patru grupe de marmure antice: Toscana (Carrara), Grecia continentală, insulele grecești și Anatolia, utilizează pe lângă datele petrografice și istorice și analizele chimice (raportul Ca/Sr). Raportul Ca/Sr a fost determinat prin XRF. În *Fig. 6* sunt prezentate raporturile Ca/Sr din cele mai cunoscute marmure folosite în antichitate. Fiecare valoare reprezintă media a două măsurători făcute în 2 părți ale eșantionului. Se poate observa că identificarea marmurelor doar pe baza acestui raport este destul de limitată.

### 2.2.9. Spectroscopie de rezonanță electronică de spin (ESR)

Este o metodă numită uneori și rezonanță paramagnetică electronică (EPR), care împreună cu termoluminescența (TL) este capabilă să identifice un semnal (așa numitul semnal-C) pe acele probe care au suferit un tratament termic. ESR măsoară energia electronilor prinși în rețeaua cristalină prin măsurarea directă a absorbției microundelor într-un câmp magnetic puternic. Este o metodă folosită uneori în locul



TL ca o tehnică de datare a stalagmitelor și ceramicii (Kempe 1983, p. 37—38).

R. V. Lloyd et al. (Lloyd 1988, p. 369—377) studiază proveniența unor piese de artă din marmură utilizând atât RX cât și ESR ca metode ce au avantajul de-a nu fi distructive (exceptând faptul că proba trebuie adusă în stare de pulbere). ESR pune în evidență existența ionilor și compuşilor paramagnetici ce posedă un electron neîmperecheat (ioni ai metalelor de tranziție, radicali liberi). Această tehnică poate furniza informații privind existența ionilor de mangan în probă. Lucrarea extinde ideea lui D. Cordischi et al. (Cordischi 1983), subliniind că această metodă de identificare a ionilor de  $Mn^{2+}$  poate furniza informații atât despre concentrația în mangan cât și despre raportul calcit/dolomit din probă. Ionii  $Mn^{2+}$  substituiți într-un mineral au un spectru ESR observabil la temperatura camerei. Spectrele manganului substituit în locul ionilor de calciu și în locurile celor doi cationi diferiți din dolomit sunt distincte. Oricum, numai relativa ocupare a manganului în locurile celor trei cationi poate fi măsurată din spectre și nu actualul raport calcit/dolomit. În plus, în unele cazuri pot apare alte semnale în spectrul ESR, nelegate de prezența manganului. Acestea sunt în principal cauzate de radiațiile ce dăunează structurii cristaline, radiații determinate de prezența ca urme a radionuclizilor (U, Th, K). De aceea se pot obține mai multe caracteristici independente dintr-un singur spectru ESR, incluzând concentrația în mangan și prezența sau absența semnalelor cauzate de radiații.

Autorii menționați anterior au obținut spectrele ESR cu un spectrometru tip Varian E-4 ESR conectat la un computer pentru înregistrarea și prelucrarea datelor. Din probele aduse în stare de pulbere s-a introdus o cantitate de 10—50 mg în tuburi de cuarț. Concentrația de mangan a fost obținută prin compararea cu curbele standard ale dolomitelor NBS SRM 88A și 88B, rezultatele fiind prezentate în Tabelul 14.

Tabel 14

Concentrațiile în Mn (ppm), media și abaterea standard obținute prin ESR (Lloyd p. 178—181)

Zona	Cariera/perimetrul	Nr. pr.	Mn	Med.	Dev. St.
Turcia	Denizli	5	66—142	99,8	36,1
	Efes (Kusini)	5	42—111	65,8	43,2
	Marmara (Ins. Marmara)	5	23—37	28,2	19,5
Italia (Carrara)	Colonnata	3	39—100	60	58
	Miseglia	1	107		
	Torano	3	89—171	117	40
	Seravezza	3	151—210	174	18
Grecia	Doliana (Pelopones)	5	23—45	33,4	25,7
	Peninsula Mani	5	21—53	34,6	46
	Hymettus (Attica)	4	23—36	27,5	21,1
	Paros (lychnit) (Ins. Paros)	4	30—37	32,3	12,4
	Aliki (Ins. Thasos)	5	92—493	228	69
	Capul Vathy (Ins. Thasos)	7	32—58	43,3	22,2
	S de Capul Vathy (Ins. Thasos)	3	42—63	52,7	19,9

### 2.2.10. Analize izotopice. Raporturile izotopilor stabili $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ și $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$

Spectrometria de masă este o tehnică de măsurare a concentrațiilor dintr-o probă a diferiților izotopi ai unui element. Ionii încărcăți pozitiv pot fi separați într-un spectru de masă cu ajutorul unor câmpuri magnetice (Kempe 1983, p. 47). Izotopii stabili ai carbonului și oxigenului abundă în anumite roci de tipul marmurelor și calcarelor, strâns legați de condițiile de formare ale acestora.

În cazul marmurelor, analizele izotopice constau (Faure 1977, p. 325, 379; Herz 1985, p. 331—351; Herz 1987, p. 38; Valley 1986, p. 445—489; Wenner 1988, p. 325—388) în măsurarea prin spectroscopie de masă a raporturilor  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  și  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  din probe, rezultatele fiind exprimate ca o abatere ( $\delta^{13}\text{C}$  și  $\delta^{18}\text{O}$ ) față de un standard convențional: PDB (un belemnit din formațiunea Pee Dee din Carolina de Sud, SUA) sau SMOW (izotopii oxigenului din apa Mării Mediterane) folosit mai frecvent în Europa. Această deviație, numită  $\delta$  se exprimă ca  $\delta^{13}\text{C}$  și  $\delta^{18}\text{O}$  în părți per mie (‰) și reprezintă „semnătura” izotopică. Transformarea valorilor  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  în  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  se poate face după relația:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 1,0309 \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 30,9^*$$

Probele aduse în stare de pulbere (cca. 50 mg) sunt supuse reacției cu  $\text{H}_3\text{PO}_4$  100% la o temperatură de 25°C, timp de 24 de ore.  $\text{CO}_2$  rezultat este recoltat în recipiente în care cu ajutorul azotului lichid este înghețat la -70°C și analizat cu un spectrometru de masă. Este o metodă distructivă.

În 1972, H. și Valerie Craig (Craig 1972, p. 401—403) au sugerat că raporturile izotopilor stabili ai carbonului și oxigenului pot fi folosite drept criterii în determinarea provenienței marmurelor clasice. Ținând cont că în cadrul marmurelor există variații locale în raportul izotopic  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  și  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , ei au colectat probe din 170 de cartiere din Naxos, Paros, Pentelikon și Hymettus. Eșantioanele au fost colectate din diferite puncte ale carierelor folosite de vechii greci și din cele aflate astăzi în exploatare. O parte din probe (35%) au fost analizate atât pentru izotopii carbonului și oxigenului, cât și pentru concentrația în Sr și Mg. Totodată, au fost studiate și 10 piese arheologice.

Deosebirea dintre marmurele din Muntele Pentelikon și Hymettus confirmă situația geologică existentă în teren, cele două tipuri de roci fiind diferite (un nivel superior și unul inferior) și nu fac parte din aceeași formațiune repetată prin falieri sau cutare. Două tipuri de marmure apar la Naxos, amândouă aflorând în fiecare din cele două cariere existente. Valoarea ridicată a  $\delta^{13}\text{C}$  a marmurei de Paros sugerează la origine o precipitare chimică.

L. Manfra et al. (Manfra 1975, p. 215—221) aplică aceeași tehnică marmurelor antice din vestul Anatoliei. Au fost analizate roci din cinci perimetre: Marmara, Ephesos, Aphrodisias, Denizli și Afyon. Din păcate, gruparea punctelor a fost mai puțin distinctă decât în cazul pro-

\* G. Hutt — Consultant's Group Meeting on Stable Isotope Reference Samples for Geochemical and Hydrological Investigations; Report IAEA, 1987.

belor din Grecia. Oricum, dacă se includ doar marmurele albe sau ușor colorate se obțin câmpuri destul de clare pentru rocile de Marmara și Aphrodisias (Fig. 7). Cele din Ephesos cad aproximativ în două grupe și acoperă câmpurile marmurelor de Naxos și Paros.

Concluzia la care s-a ajuns în urma aplicării acestei metode (Herz 1978, p. 1070—1072; Coleman 1979, p. 107—112; Germann 1980, p. 99—106; Matthews 1992, p. 203—212) este că singură, această metodă nu este de ajuns, ea trebuind fi corelată în cele mai multe cazuri cu datele geologice și chimice. În prezent, raporturile izotopice  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  și  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  sunt intens utilizate în studierea obiectelor de artă, în special a acelor fragmentate pentru a le restaura. Problema cea mai mare este însă aceea de a stabili sursa (proveniența) marmurei). În Tabelul 15 sunt redată valorile  $\delta^{13}\text{C}$  și  $\delta^{18}\text{O}$  pentru unele marmure clasice.

Tabel 15

Domeniile de variație ale  $\delta^{13}\text{C}$  și  $\delta^{18}\text{O}$  pentru o parte din carierele de marmură din zona Mării Mediterane (Riederer 1987, p. 158)

Perimetrul	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
Carrara	2,3—2,6	—1,7— —2,6
Pentelikon	2,5—3,2	—7,0— —9,0
Hymettos	2,7—3,1	—1,8— —3,0
Atrax	3,4—4,5	—4,0— —7,4
Gonnos	1,8—2,9	—1,2— —3,2
Kastrion	2,0—3,0	—4,8— —6,7
Tempi	1,0—3,5	—1,0— —5,0
Paros	3,3—5,6	—2,6— —4,0
Naxos I	2,7—3,0	—8,5— —10,0
Naxos II	1,3—2,6	—4,8— —6,8
Afyon	—1,5—2,7	—3,0— —6,0
Aphrodisias	—1,8—2,4	—2,0— —4,0
Efes I	4,0—5,3	—2,1— —4,7
Efes II	—0,4—2,7	—2,2— —6,0

N. Herz (Herz 1987, p. 35—43) subliniază superioritatea metodei izotopilor carbonului și oxigenului față de celelalte metode, aducând ca argument rezultatele lui H. și Valerie Craig din 1972. Teoretic, valorile variază în limite reduse în cadrul aceleiași cariere sau în cadrul unei zone restrânse a unei formațiuni geologice. Pentru ca identificarea să fie cât mai sigură, aceste valori trebuie să fie uniforme atât în obiectul de artă, într-o carieră și în cazul cel mai fericit să prezinte doar mici variații în cadrul unui district minier. Variațiile  $\delta^{13}\text{C}$  și  $\delta^{18}\text{O}$  în cadrul unui bloc statuar, dacă apar, sunt de 0,5‰, iar în cadrul unei ocurențe (sau cel mult a unei cariere) sunt 2‰ (Herz 1978, p. 1071). Un alt avantaj al metodei este faptul că fiind o analiză distructivă necesită cantități reduse de material ( $\approx 10$  mg).

Combinând toate analizele publicate, cât și cele personale, N. Herz realizează o „bancă de date” pentru marmurele antice, care cuprinde 528 de analize pe probe din 39 de cariere (Herz 1987, p. 39). Accesul la

această bază de date este posibil cu acceptul autorului. Carierele luate în considerare sunt cele din Turcia, Grecia, Italia și Tunisia, toate fiind datate arheologic.

MARCEL BENEÀ

## METHODS USED IN PROVENANCE STUDIES OF MARBLE ARTEFACTS

(Summary)

The aim of this paper is to motivate the importance of the interdisciplinary studies, in our case, to correlate the archaeological and geological informations with the results of different methods of analysis. Most of the petrological works applied to the provenance of artefacts has concerned the smaller items, such as flint and obsidian axes and tools, jade axes and hone stones. A considerable amount of work has been carried out, however, on chips, drilled cylinders and powder scrapings of marble from different buildings, statues, sarcophagi and inscribed slabs in order to establish their source. Like flint, obsidian and jadeite, marbles are very hard to categorise individually. They can be divided into groups but within such groups require sophisticated techniques to identify them positively. The value of such studies in permitting the accurate „fingerprint“ of marble artefacts and fragments is obvious, not only for establishing provenance but also for sorting and matching fragments for restoration, detecting forgeries and for providing approximate dates. Previously the matching of fragments, for example, depended entirely on the expert eye of the archaeologist.

The paper intend to present the history of the studies concerned with the classical marble occurrences from Mediterranean area together with their results in order to establish a small data-base. For each type of analysis (\"wet\" analysis, RX, INAA, UV, TL, CL, OES, XRF, ESR,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) the techniques are shown in order to give the possibility to compare new results with those from literature using the same methodology. A short petrographic description of the most important marble occurrences (Pentelikon, Paros, Naxos, Thasos-Aliki, Carrara and Marmara) is also presented.

Until now no single method could solve the problem of provenance determination in a generally satisfactory way because marbles from different quarries may be quite similar when studied from one point of view. It is however unlikely that different types of marble would show identical characteristics when studied with independent methods as isotopic, chemical and petrographic analysis. Ambiguities inherent to any single method are thus mostly eliminated.

When studying artefacts, the collaboration with art historians and archaeologists is absolutely necessary for the selection of relevant provenance determination studies and for the correct interpretation of their results.

## ABREVIERI ȘI BIBLIOGRAFIE

- Afordakos 1974 G. Afordakos, K. Aloxopoulos, D. Miliotis, *Using artificial thermoluminescence to reassemble statues from fragments*, in *Nature*, 250, 5, 1974, p. 47—48.

- Barbin 1989 V. Barbin, K. Ramseyer, D. Decrouez, R. Herb, *Marbres blancs: caractérisation par cathodoluminescence*, in *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 308, 2, 1989, p. 861—866.
- Barbin 1992 V. Barbin, K. Ramseyer, D. Decrouez, S. J. Burns, J. Chamay, J. L. Maier, *Cathodoluminescence of white marbles: an overview*, in *Archaeometry*, 34, 2, 1992, p. 175—183.
- Bautsch 1960 H.-J. Bautsch, H. Kelch, *Mineralogisch-petrographische Untersuchungen an einigen in der Antike als Baumaterial verwendeten Gesteinen*, in *Geologie*, 9, 1960, p. 691—700.
- Brană 1986 V. Brana, C. Avramescu, I. Calugaru, *Substanțe minerale nemetali-fere*, București, 1986.
- Brinkmann 1976 R. Brinkmann, *Geology of Turkey*, Stuttgart, 1976.
- Coleman 1979 M. Coleman, S. Walker, *Stable isotope identification of Greek and Turkish marbles*, in *Archaeometry*, 21, 1979, p. 107—112.
- Conforto 1975 L. Conforto, M. Felici, D. Monna, L. Serva, A. Taddeuci, *A preliminary evaluation of chemical data (trace element) from classical marble quarries in the Mediterranean*, in *Archaeometry*, 17, 2, 1975, p. 201—213.
- Cordischi 1983 D. Cordischi, D. Monna, A. L. Segre, *ESR analysis of marble samples from Mediterranean quarries of archaeological interest*, in *Archaeometry*, 25, 1, 1983, p. 68—76.
- Craig 1972 H. Craig, Valerie Craig, *Greek marbles: determination of provenance by isotopic analysis*, in *Science*, 176, 1972, p. 401—403.
- Dean 1988 Nancy E. Dean, *Geochemistry and archaeological geology of the Carrara marble, Carrara, Italy*, in N. Herz and M. Waelkens (eds.), *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, Dordrecht/Boston/London, 1988, p. 315—323.
- Doehne 1992 E. Doehne, J. Podany, W. Showers, *Analysis of weathered dolomitic marble from Thasos, Greece*, in *Acta Archaeologica Lovaniensia, Monographiae*, 4, 1992, p. 179—190.
- Dürr 1978 S. Dürr, R. Altherr, J. Keller, M. Okrusch, E. Seidel, *The Median Aegean Crystalline Belt: Stratigraphy, structure, metamorphism, magmatism*, in H. Closs, D. Roeder, K. Schmidt (eds.), *„Alps, Apennines, Hellenides“*, Stuttgart, 1978, p. 455—477.
- Dworakowska 1975 A. Dworakowska, *Quarries in Ancient Greece*, Wrocław, 1975.
- Faure 1977 G. Faure, *Principles of Isotope Geology*, New York, 1977.
- Germann 1976 K. Germann, H. Brühl, E. Eilert, R. Gast, *Geowissenschaftliche Methoden Herkunftsbestimmung von Marmoren in Thessalien*, in *INW, Petrographie*, 7, 1976, p. 1—14.
- Germann 1980 K. Germann, G. Holzmann, F. J. Winkler, *Determination of marble provenance: limits of isotopic analysis*, in *Archaeometry*, 22, 1980, p. 99—106.
- Germann 1988 K. Germann, G. Gruben, H. Knoll, V. Valis, F. J. Winkler, *Provenance characteristics of Cycladic (Paros and Naxos) marbles — a multivariate geological approach*, in N. Herz and M. Waelkens (eds.), *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, Dordrecht/Boston/London, 1988, p. 251—262.
- Gorgoni 1992 C. Gorgoni, I. Kokkinakis, L. Lazzarini, M. Mariottini, *Geochemical and petrographic characterization of „rosso antico“ and other white-grey marbles of Mani (Greece)*, in *Acta Archaeologica Lovaniensia, Monographiae*, 4, 1992, p. 155—165.

- Grimanis 1980 A. P. Grimanis, Maria Vassilaki-Grimanis, *Provenance studies of Greek marbles by instrumental neutron activation analysis*, in N. Herz and M. Waelkens (eds.), *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, Dordrecht/Boston/London, 1988, p. 275—281.
- Herz 1953 N. Herz, W. K. Pritchett, *Marble in Attic epigraphy*, in *Am. J. of Archaeology*, 57, 2, 1953, p. 71—83.
- Herz 1955a N. Herz, *Geology of the building stones of ancient Greece*, in *Transactions of the New York Acad. of Science*, II, 17, 1955, p. 499—505.
- Herz 1955b N. Herz, *Petrofabrics and classical archaeology*, in *Am. J. of Science*, 253, 1955, p. 299—305.
- Herz 1978 N. Herz, D. B. Wenner, *Assembly of Greek marble inscriptions by isotopic methods*, in *Science*, 199, 1978, p. 1070—1072.
- Herz 1985 N. Herz, *Isotopic analysis of marble*, in G. Rapp Jr. and J. Gifford (eds.) *Archaeological Geology*, New Haven, 1985, p. 331—351.
- Herz 1987 N. Herz, *Carbon and oxygen isotopic ratios: a data base for classical Greek and Roman marble*, in *Archaeometry*, 29, 1, 1987, p. 35—43.
- Herz 1988, *Geology of Greece and Turkey: potential marble source regions*, in N. Herz and M. Waelkens (eds.), *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, Dordrecht/Boston/London, 1988, p. 7—10.
- Herz 1990 N. Herz, *Greek and Roman marble: Provenance determination and artifact reconstruction*, in Marinos and Koukis (eds.), *Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites*, Rotterdam, 1990, p. 1987—1994.
- Hull 1872 E. Hull, *A treatise on the building and ornamental stones of Great Britain and foreign countries*, citat din Kempe 1983, p. 111.
- Jacobshagen 1986 V. Jacobshagen, *Geologie von Griechenland*, Berlin, 1986.
- Jeffery 1983 P. G. Jeffery, *Metode chimice de analiză a rocilor*, București, 1983.
- Kempe 1983 D. R. C. Kempe, A. P. Harvey, *The petrology of archaeological artefacts*, Oxford, 1983.
- Lazzarini 1980 L. Lazzarini, G. Moschini, B. M. Stievano, *A contribution to the identification of Italian, Greek and Anatolian marbles through a petrological study and the evaluation of Ca/Sr ratio*, in *Archaeometry*, 22, 2, 1980, p. 173—183.
- Lepsius 1890 G. R. Lepsius, *Griechische Marmorstudien*, citat din Moltesen 1992, p. 277 și din Kempe 1893, p. 111.
- Lloyd R. V. Lloyd, A. Trinh, S. Pearce, M. Cheeseman, D. N. Lumsden, *ESR spectroscopy and X-ray powder diffractometry for marble provenance determination* in N. Herz and M. Waelkens (eds.), *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, Dordrecht/Boston/London, 1988, p. 369—377.
- Manfra 1975 L. Manfra, U. Masi, B. Turi, *Carbon and oxygen isotope ratios of marbles from some ancient quarries of Western Anatolia and their archaeological significance*, in *Archaeometry*, 17, 2, 1975, p. 215—221.
- Marinos 1948 G. P. Marinos, *Notes on the structure of Greek marbles*, in *Am. J. of Science*, 246, 1948, p. 386—389.
- Matthews 1992 K. J. Matthews, L. Moens, S. Walker, M. Waelkens, P. de Paepe, *The re-evaluation of stable isotope data for Pentelic marble*, in *Acta Archaeologica Lovaniensia, Monographiae*, 4, 1992, p. 203—212.
- Mello 1988 E. Mello, D. Monna, M. Oddone, *Discriminating sources of Mediterranean marbles: A pattern recognition approach*, in *Archaeometry*, 30, 1, 1988, p. 102—108.

- Meloni 1988 S. Meloni, M. Oddone, E. Mello, D. Monna, *Neutron activation analysis: a powerful technique in provenance studies*, in N. Herz and M. Waelkens (eds.), *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, Dordrecht/Boston/London, 1988, p. 293–301.
- Moens 1987 L. Moens, P. Roos, J. de Rudder, P. de Paepe, J. van Hende, M. Waelkens, *Identification of archaeologically interesting white marbles by instrumental neutron activation analysis (INAA) and petrography: Comparison between samples from Afyon and Usak (Turkey)*, in *J. of Trace and Microprobe Tech.*, 5, 1987, p. 101–114.
- Moens 1988 L. Moens, P. Roos, J. de Rudder, J. Hoste, P. de Paepe, J. van Hende, R. Marechal, M. Waelkens, *White marble from Italy and Turkey: An archaeometric study based on minor- and trace-element analysis and petrography*, in *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Articles*, 123, 1988, p. 333–348.
- Moens 1989 L. Moens, P. Roos, J. de Rudder, J. Hoste, P. de Paepe, J. Van Hende, R. Marechal, M. Waelkens, *Chemical and Petrographical identification of white marbles from the Mediterranean area. I. Comparison between Carrara and Marmara marbles*, in Y. Maniatis (eds.), *Archaeometry, Proc. of the 25th International Symposium*, 1989, p. 613–624.
- Moens 1991 L. Moens, P. Roos, P. de Paepe, M. Waelkens, *Instrumental neutron activation analysis of white marble: a contribution to the provenance determination of ancient Greek and Roman artefacts*, in *British Museum Occasional Paper*, 82, 1991, p. 185–202.
- Moens 1992 L. Moens, P. de Paepe, M. Waelkens, *Multidisciplinary research and cooperation: keys to a succesful provenance determination of white marble*, in *Acta Archaeologica Lovaniensia, Monographiae*, 4, 1992, p. 247–252.
- Moltesen 1992 M. Moltesen, N. Herz, J. Moon, *The Lepsius Marbles*, in *Acta Archaeologica Lovaniensia Monographiae*, 4, 1992, p. 275–282.
- Monna 1977 D. Monna, P. Pensabene, *Marmi dell'Asia Minore*, Roma, 1977.
- Renfrew 1968 C. Renfrew, J. S. Peacey, *Aegean marble: a petrological study*, in *J. British School of Archaeology in Athens*, 63, 1968, p. 45–66.
- Riederer 1980 J. Riederer, J. Hoefs, *Die Bestimmung der Herkunft der Marmure von Büsten der Münchener Residenz*, in *Naturwissenschaften*, 67, 1980, p. 446–451.
- Riederer 1987 J. Riederer, *Archäologie und Chemie*, Berlin, 1987, p. 157–159.
- Roos 1988 P. Roos, L. Moens, J. de Rudder, P. de Paepe, J. van Hende, M. Waelkens, *Chemical and petrographical characterization of Greek marbles from Pentelikon, Naxos, Paros and Thasos*, in N. Herz and M. Waelkens (eds.), *Classical marble: Geochemistry, Technology, Trade*, Dordrecht/Boston/London, 1988, p. 263–272.
- Rybach 1965 L. Rybach, H.-U. Nissen, *Neutron activation of Mn and Na traces in marbles worked by the ancient Greeks*, in *Radiochemical Methods of Analysis*, I, 1965, p. 105–117.
- Valley 1986 J. W. Valley, *Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks*, in *Reviews in Mineralogy*, 16, 1986, p. 445–489.
- Washington 1898 H. S. Washington, *The identification of the marbles used in Greek sculpture*, citat din Kempe 1983, p. 111.
- Weiss 1954 L. E. Weiss, *Fabric analysis of some Greek marbles and its applications to archaeology*, in *Am. J. of Science*, 252, 1954, p. 641–662.
- Wenner 1988 D. B. Wenner, S. Havert, A. Clark, *Variation in stable isotopic composition of marble: an assessment of causes*, in N. Herz and M. Waelkens (eds.), *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, Dordrecht/Boston/London, 1988, p. 325–338.
- Young 1968 W. J. Young, B. Ashmole, *The Boston Relief and Ludovisi Throne*, in *Bull. of the Boston Museum of Fine Arts*, 66, 1968, p. 124–166.



Fig. 1. Localizarea principalelor perimetre cu marmure din zona Mării Mediterane (●)



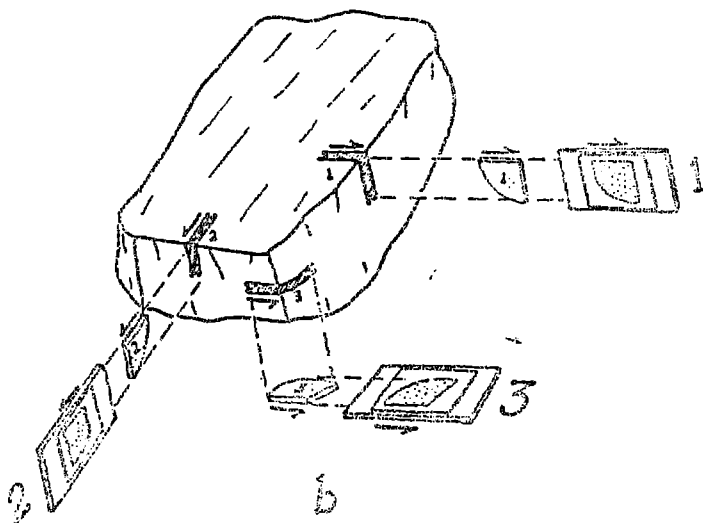


Fig. 2. Modul de tăiere și orientare a secțiunilor subțiri (Weiss 1954, p. 643)

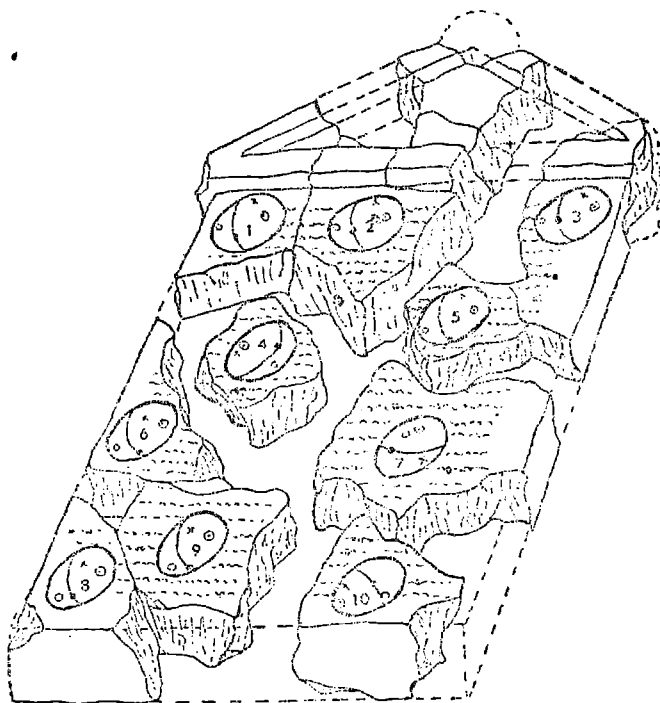


Fig. 3. Reasamblarea ipotetică a unei steli fragmentate utilizând analizele petrostructurale. Simbolurile din cadrul elipselor reprezintă planele structurale și polii. Fragmentele 4, 7 și 10 nu aparțin steli (Weiss 1954, p. 650)

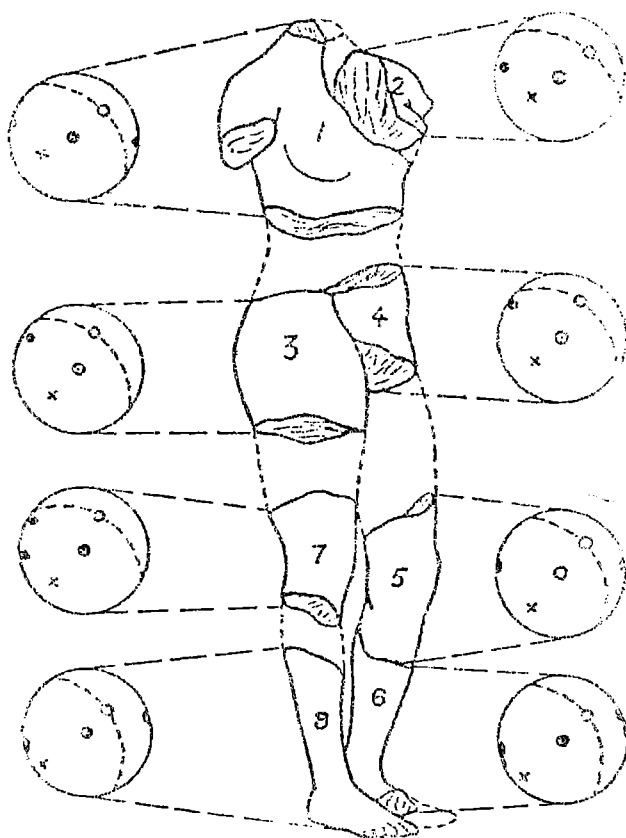


Fig. 4. Modul de restaurare a Afroditei din Cyrene dacă această statuie s-ar fi găsit sub formă de fragmente (în prezent lipsesc doar capul și brațele) (Weiss 1954, p. 651)

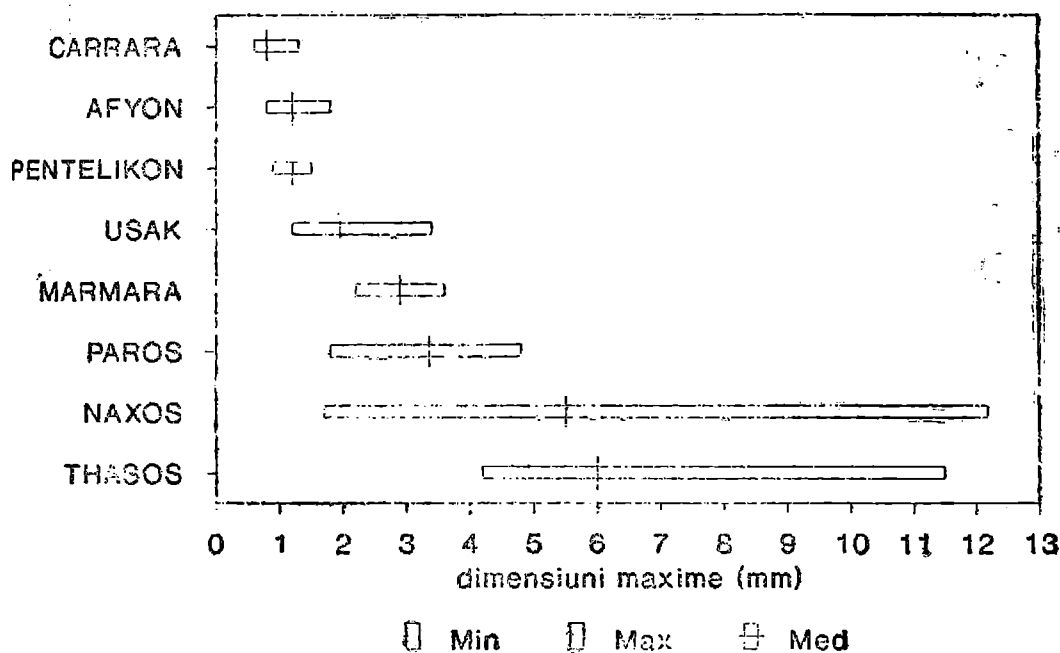


Fig. 5. Dimensiunile maxime ale granoblastelor de calcit în principalele marmuri antice  
 (Ross 1988; p. 269; Moens 1991, p. 194)

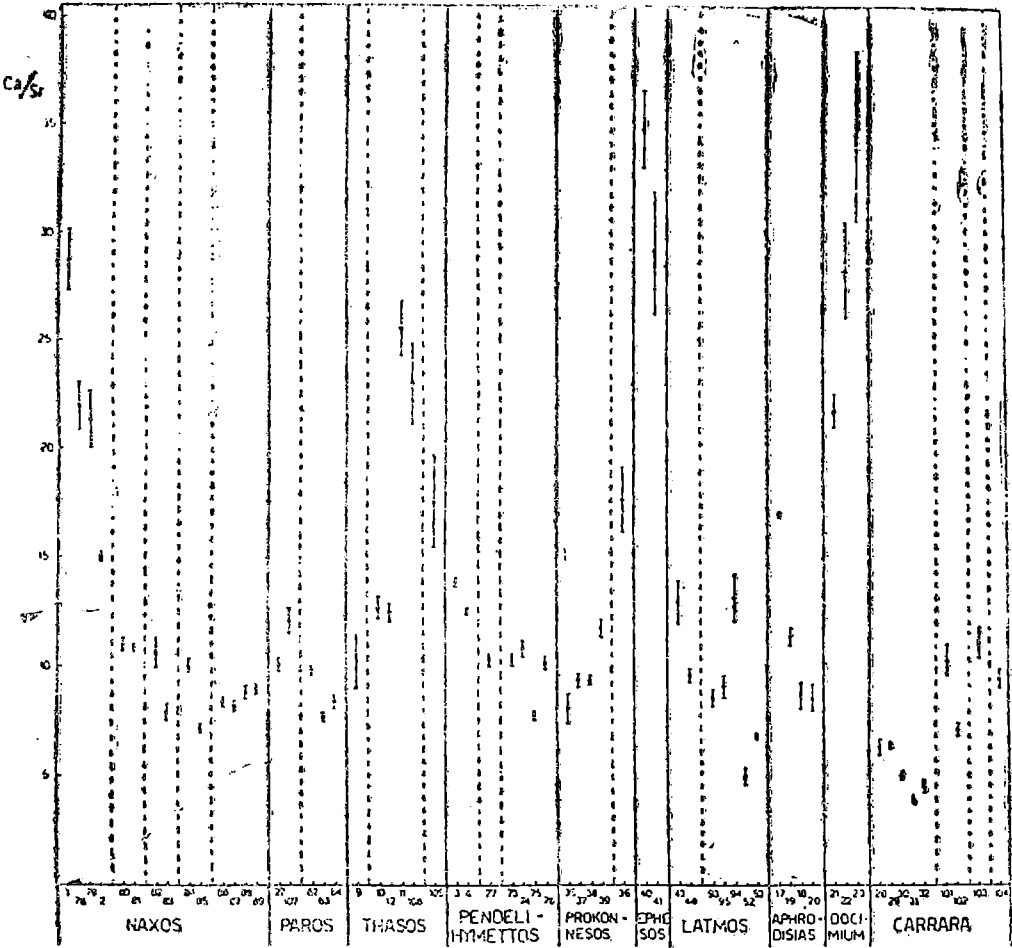


Fig. 6. Raportul Ca/Sr într-o serie de marmure antice (Lazzarini 1980, p. 181)

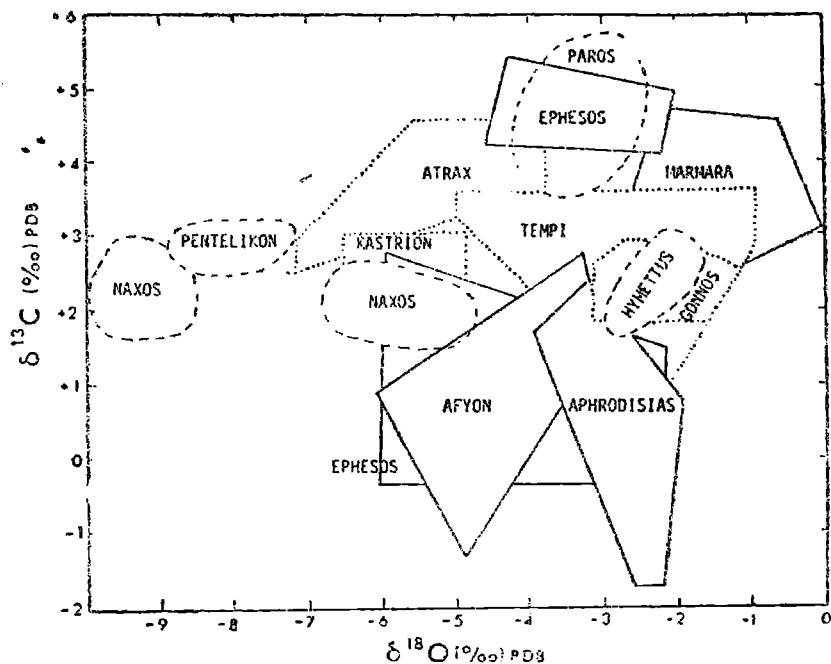


Fig. 7. Diagrama  $^{18}\text{O}$  pentru marmurele din Grecia (linii întrerupte-Craig 1972); marmure din Anatolia (linii continue-Manfra 1975); marmure din Thessalia (linii punctate-Germann 1980) (German 1980, p. 100)