

MARMARA BÖLGESİ SEDİMAN VE VOLKANİK KAYAÇLARININ MAĞNETİK ÖZELLİKLERİNİN TANIMLANMASINDA KAYA MAĞNETİZMA ÇALIŞMASI

ROCK MAGNETIC STUDIES BY DEFINITION MAGNETIC PROPERTIES OF SEDIMENTARY AND VOLCANIC ROCKS IN MARMARA REGION

M. C. ÇİNKU, Z. M. HİSARLI, N. ORBAY

İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34320, Avclar-İstanbul

ÖZ: Marmara baseninde yaşları Alt Eosen-Pliyosen zaman aralığında değişen tüf, volkanik breş ve bazaltlardan oluşan volkanik kayaçlar ile kumtaşı, kuvarsit, kireçtaşı, silttaşı, çamurtaşı, kil-marndan oluşan sedimenter kayaçların mağnetik özellikleri incelenmiştir. Örneklerin Curie sıcaklıkları uygulanan yüksek-alan termomağnetik ölçümleri ile belirlenirken, histeresiz parametreleri ve eş-ısı kalıntı mıknatıslanma (IRM-isoothermal remanent magnetization) ile anhisteritik kalıntı mıknatıslanmaya (ARM-anhysteretic remanent magnetization) ait alternatif mağnetik alan temizleme eğrilerinin karşılaştırılması ile de danelerin domen yapıları ortaya konmuştur. Paleomağnetizma çalışmasında kullanılmak üzere değerlendirilen mıknatıslanma bileşenlerine ait Zijderveld, stereonet diyagramı ile normalize edilmiş mıknatıslanma şiddeti/sıcaklık eğrisi her bir pilot örnek için ayrı ayrı ele alınmıştır. Doğal kalıntı mıknatıslanmaları (NRM- Natural remanent magnetization) 0.023-158mA/m arasında değişen sedimenter kayaçları, mıknatıslanmadan sorumlu mineral içerikleri bakımından gruplandırmak mümkündür. Kumtaşı örneklerinin bir kısmının mıknatıslanma şiddetinin 250-350°C'de sıfıra düşmesi, bünyesinde pirotit ve geotit'in varlığına işaret eder ve mıknatıslanmanın da tek bileşenli olduğunu gösterir. Silttaşı, çamurtaşı ve bazı tüflerin 400-450 °C'de mıknatıslanmalarını yitirdikleri, kireçtaşı ve kumtaşlarından oluşan örneklerin bir kısmının da 500-670 °C'de mıknatıslanmalarını yitirmeleri bünyelerinde mağnetit, hematit, titanyum bakımından fakir titanyumlu mağnetitlerin olduğuna işaret etmektedir. İnceleme alanındaki volkanik kayaçların büyük kısmı bazaltlardan oluşmuş olup oldukça duraylı mıknatıslanma vektörüne sahiptir. Volkanik kayaçların doğal kalıntı mıknatıslanma şiddetleri 1.9-7164 mA/m arasında değişmekte olup, çoğunda mıknatıslanmadan sorumlu mineral olarak mağnetit ve titanyum bakımından fakir titanyumlu mağnetitlerin varlığı söz konusudur.

Anahtar kelimeler: kaya mağnetizması, sedimenter kayaçlar, histeresiz

ABSTRACT: The magnetic properties of volcanic rocks such as tuffs, volcanic breccias, basalts and sedimentary rocks as sandstones, quartzites, limestones, siltstones and mudstones in the age of Lower Eocene-Pliocene are investigated on the Marmara basin. Curie temperatures are determined by high-field thermomagnetic measurements, the domain states of the grains are predicted by hysteresis parameters and by comparing alternative demagnetization curves of isothermal remanent magnetization (IRM) and anhysteretic remanent magnetization (ARM) acquisition curves which carried out for each pilot sample. Magnetization components belonging to Zijderveld, stereonet diagrams and normalized magnetization intensity/temperature curves that used in paleomagnetic study are analysed for each pilot sample. The mineral components of the sedimentary rocks that are responsible from the magnetization are possible to classify according to their magnetization intensity value that varies between 0.023-158mA/m. The magnetization intensity of some kind of sandstone samples dropped into zero at 250-350°C whereas the existence of pyrrhotite and goethite is found as single magnetization component. The blocking temperature of siltstone, mudstone and some tuffes are at 400-450°C, whereas some limestones, sandstones are lost their magnetization at 500-670°C indicating magnetite, hematite and Ti-poor titanomagnetite. The volcanic rocks are mainly existend of basalt samples and are showing quit stable magnetization vectors. The NRM of volcanic samples are changing between 1.9-7164 mA/m and the existence of magnetite is common in most of these samples.

Key words: rock magnetism, sedimentary rocks, hysteresis

GİRİŞ

Paleomağnetik ölçümlerin güvenilir sonuç vermesi, kullanılan kayaçların özelliklerine ve kalıntı mıknatıslanmaya neden olan mağnetik minerallerin doğru tanımlanmasına dayanmaktadır. Kayaçların birincil mıknatıslanmalarının yanısıra zamanla kazandıkları ikincil mıknatıslanmaları, laboratuvarında gerçekleştirilen ısısal ve alternatif mağnetik alan temizleme testleri ile belirlenebilmektedir. Farklı minerallerin kayaç içerisindeki davranışı ve bu minerallerin zamanla ısı, basınç etkisiyle bozulması ise kaya mağnetizma çalışmaları ile aydınlatılabilmektedir. Paleomağnetik çalışmalarda bölgenin belirli bir döneme ait tektonik oluşumunu yorumlarken, kayacın oluştuğu andaki mıknatıslanmasından yani birincil-mıknatıslanmasından bilgi alınır. Birincil mıknatıslanmadan sonra, mıknatıslanmaya neden olan mineralin bozulması veya farklı minerallerin kayaç içerisinde farklı yönlere mıknatıslanmaya neden olması (ikincil mıknatıslanma) mıknatıslanma bileşenini olumsuz yönde etkilemektedir. Kayaçların mağnetik özellikleri ile ilgili önemli bilgi veren kaya mağnetizma çalışmaları paleomağnetizma çalışmasının temel destekçisi olarak göz önüne alınmalıdır.

Kayaçlar pek çok farklı yoldan kalıntı mıknatıslanma kazanabilmektedir. Ferrimağnetik malzemelerin Curie sıcaklığının üstündeki sıcaklıklardan itibaren soğurken ısısal kalıntı mıknatıslanma (TRM-thermal remanent magnetization) kazanmaktadır. Genellikle volkanik kayaçlar tarafından kazanılan ısısal kalıntı mıknatıslanmanın koersif kuvveti büyük olup, bu değer kayaç içerisindeki çok domenli veya tek domenli dane yapısına göre değişim göstermektedir. Kimyasal kalıntı mıknatıslanma (CRM-chemical remanent magnetization), bazı kumtaşları ve şeylerde görülen ve içerdikleri demir oksit minerallerinin kimyasal dönüşümleri sonucu kazanılan mıknatıslanma türüdür. Kırmızı kumtaşlarında mıknatıslanmaya sebep olan hematitin varlığı bu tür mıknatıslanmaya örnek verilebilir. Sedimenter kayaçlarında, içindeki demiroksit minerallerin taşınma ve çökmesi sonucu oluşan çökme kalıntı mıknatıslanma (DRM-depositional remanent magnetization) şiddetinin zayıf olmasına karşın güvenilir mıknatıslanma bileşenlerini yansıtabilme özelliğine sahiptir. Viskos kalıntı mıknatıslanma (VRM-viscous remanent magnetization) ise, kayacın yüksek bir mağnetik alana (örneğin, yıldırım çakması) bırakılması veya basınç karşısında mıknatıslanma yönünün değişmesi sonucunda zamanla kazanılan bir mıknatıslanma türüdür (Van der Voo, 1993). Kazanılan mıknatıslanmanın türü ve şiddeti; minerallerin domen yapısı, uygulanan dış alan, zaman ve ısısal enerji gibi parametreler ile doğrudan ilişkilidir. Kayaçların birincil mıknatıslanmalarını koruyamaması ve ikincil mıknatıslanmasını da kolayca kazanabilmesi, röleksasyon parametresi ile

$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{v h_c J_s}{2kT}\right)$$

şeklinde verilmektedir (Neel, 1949, 1955). Bağlında;

C = frekans faktörü $10^8 s^{-1}$

V = tek domenli danenin hacmi

h_c = tek domenli danenin mikroskobik kuvveti

J_s = ferromağnetik malzemeye ait saturasyon mıknatıslanma

kT = Termal enerji

olarak verilmektedir. $vJ_s h_c$ bloklanma enerjisi olarak adlandırılmakta ve J_s 'nin rotasyonu için gerekli olan enerji bariyeridir. Röleksasyon zamanı danenin hacmi ile doğru, termal enerji ile ters orantılı olarak değişmektedir. Eğer kayaç kazandığı orijinal mıknatıslanması dışında yüksek sıcaklığa maruz kalırsa, röleksasyon zamanı küçülür ve ikincil mıknatıslanma kazanma süresi hızla artar. Duraylı kalıntı mıknatıslanma kazanmada, sıcaklığın yanısıra dane boyutu da çok etkilidir. Bu nedenle, güvenilir paleomağnetik bileşen elde etmek için özellikle tek (SD-single domain) veya yalancı tek domenli (PSD-pseudo single domain) dane yapısına sahip örnekler tercih edilmektedir.

Bu çalışmada Marmara Bölgesinde paleomağnetik çalışmalarda kullanılan kireçtaşı, fliş, kırmızı kumtaşı, volkanik breş ve bazaltik örneklerin kaya mağnetizması çalışmaları kapsamında Curie sıcaklıkları, histerisiz ölçümleri, IRM ve ARM ölçümleri çerçevesinde de alternatif mağnetik alan (alternatif magnetic field-AF) temizleme eğrileri incelenerek örneklerin hem dane yapıları hem de mağnetik özellikleri belirlenmiştir.

YÖNTEM

Toplam 47 farklı mevkiden elde edilen el ve karot örnekleri, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Paleomağnetizma laboratuvarında 2.54 çapında ve boyunda silindirik parçalar olarak hazır hale getirilmiştir. Tablo 1'de Kaya mağnetizması ve mıknatıslanma bileşenlerinin analizinde kullanılan örneklerin litoloji, süseptibilite ve mıknatıslanma şiddet değerleri verilmektedir. Araziden yönlendirilmiş örneklerin bir kısmı portatif karot makinesi ile yaklaşık 10-12 cm boyunda silindirik örnekler olarak alınırken, büyük bir kısmı da düz yüzeylerden alınan el örneklerinin daha sonra laboratuvarında mevcut olan sabit karot kesme makinesi ile silindirik örnekler halinde kesilmesi sonucunda gerçekleştirilmiştir. Örneklerin araziden laboratuvara taşınırken oluştukları andaki konumlarını belirlemek için hem jeolog pusulası hem de güneş pusulası yardımıyla yönlendirilmesi yapılmıştır.

Tablo 1: Kaya mağnetizma çalışması ve mıknatıslanma bileşenlerinin analizinde kullanılan örneklerin litoloji, mıknatıslanma şiddet ve süseptibilite değerleri.

Table 1: Lithology, magnetization intensity and susceptibility values of samples used in rock magnetism and magnetization component analysing.

Mevkii	Litoloji	K	J	Mevkii	Litoloji	K	J
ALT EOSEN				OLİGOSEN			
ES12D2	Kumtaşı	3030	28.33	BE1	Silttaşı	27	0.031
GEM1	Fliş	773	12.85	BE2	Silttaşı	173	17.2
GÖK1	Kumtaşı	139	570	GÖK2	Kumtaşı	1540	6.34
KM1	Kumtaşı	161	1.85	GÖK3	Kumtaşı	149	1.02
KM2	Kumtaşı	106	3.28	HS1	K.Kumtaşı	4120	99.7
KM3	Kumtaşı	107	2.32	HS2	İgnimbrit	714	7164
KM4	Kumtaşı	215	3.24	TR2	Çamurtaşı	309	0.26
MUD1	Kuvarsit	5	3.06	MİYOSEN-PLİYOSEN			
OR1	Kumtaşı	406	7.09	BY1	Bazalt	512	1642
PH1	Kireçtaşı	40	0.18	CR1	Bazalt	468	1814
SK1	Kumtaşı	2520	14.3	DM1	Bazalt	613	1155
YTR1	Tüf	85	0.26	GÖK5	breş	710	578
ZEY1	Kumtaşı	138	1.4	KMZ1	Tüf	6070	11.9
ORTA EOSEN				MHS1	Kil-marn	2	0.028
CA1	Kireçtaşı	-7	0.02	MR1	Tüf	208	3.21
CA2	Kireçtaşı	109	2.05	SL2	Tüf	9920	79.7
CA3	Kireçtaşı	90	1.33	SL3	Tüf	6160	73.4
CB3	Kumtaşı	180	2.75	EG2	Kumtaşı	60	1.0
GÖK6	Kumtaşı	544	158.3	CR2	Bazalt	3380	6057
KKR1	Kumtaşı	188	1.98	CR3	Bazalt	488	2671
KR1	Kumtaşı	55	2.81	CR5	Bazalt	504	1869
KY1	Kireçtaşı	-10	0.023	EG1	Kumtaşı	61	4.09
MRE1	Kumtaşı	190	2.82	CB2	Kumtaşı	111	1.94

K=Süseptibilite ($\times 10^{-6}$ SI), J=Mıknatıslanma Şiddeti (A/m), K.Kumtaşı=kırmızı kumtaşı

Termomağnetik ölçümler ve histerisiz parametreleri değişken alan çevrim terazisi (Variable Field Translation Balance-VFTB) şeklindeki Curie terazisi ile gerçekleştirilmiştir. Örneğe ait Curie sıcaklıkları belirli bir gradyan alan içerisinde bir mağnetik moment ile uygulanan güç prensibine göre elde edilmektedir. Örnekler birkaç miligramlık kırıntılı parçalar halinde kuvars camından yapılmış örnek tutacağı içerisinde aletin uzun eksenini boyunca serbestçe salınım yapacak şekilde yerleştirilmektedir. Termomağnetik ölçümler sonucunda elde edilen Curie sıcaklıkları mineral içerisindeki mağnetik fazı ve bozuşma derecelerini ortaya koymaktadır. Bu analiz sonucunda elde edilen ısınma ve soğuma eğrileri tanjant yöntemi (Gromme ve diğ., 1998) yardımıyla değerlendirilmiştir.

Histerisiz ölçümler kapsamında örneğin koersif kuvveti (H_c), kalıntı mıknatıslanma kazandığı koersif kuvvet (H_{cr}), doymuş mıknatıslanma şiddeti (J_s) ve kazandığı kalıntı mıknatıslanma şiddeti (J_{rs}) olarak bilinen histerisiz parametreler elde edilmiştir. Bu parametreler Day (Day ve diğ., 1977) diyagramına grafiklenerek örneklerin SD, çoklu domen (multi domain-MD) ve PSD yapıları ortaya konulabilmektedir. SD'li daneler pozitif ve negatif olmak üzere iki kutba sahip olup, domen içerisindeki toplam mıknatıslanmanın yönünü değiştirebilmek sahip oldukları yüksek koersif kuvvet sayesinde çok güçlüdür. Bundan dolayı tek domenli daneler kayacın olduğu

anda sahip olduğu birincil mıknatıslanmayı koruduğundan paleomağnetizma çalışmalarında duraylı sonuç vermesi açısından oldukça önemlidir. Şiddetli mıknatıslanmaya sahip mağnetik domenler, domen duvarı içerisinde dışa karşı yansıtıkları mıknatıslanma şiddetini küçültebilmektedirler. Bunun için mağnetik domenlerin yönleri değiştirildiğinde, domen içerisindeki enerjileri bölünüp her bir mağnetik domendeki mıknatıslanma doğrultusu farklı yönlere yönelmektedir. Bu şekilde dışa karşı zayıf bir koersif kuvvete sahip olan çok domenli daneler mıknatıslanmaya ait bilgi taşımada tek domenli danelerden çok daha az etkilidir.

IRM ölçümleri için, oda sıcaklığında kalıntı mıknatıslanması yok edilmiş silindirik pilot örnekler adım adım şiddeti 1500mT'ya kadar değişen bir alan içerisinde kalıntı mıknatıslanma kazandırılmış ve daha sonra adım adım alternatif alanda temizleme işlemine tabii tutularak her adımdaki mıknatıslanma şiddet değişimi Molspin mağnetometresi ile ölçülmüştür. Kazandırılan bu mıknatıslanma çeşidine göre, mağnetik mineraller koersif kuvvetlerine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Mağnetit 0.3T gibi düşük alanlarda doymuş hale gelirken hematit için gerekli doymuş mağnetik alan 0.5-3.5T arasındadır (Collinson, 1983; Ozdemir&Dunlop, 1988).

Anhisteritik kalıntı mıknatıslanma ölçümleri için silindirik örnekler 100 mT'lık mağnetik alana sahip alternatif alan bobini içinde önce 0.05 daha sonra 0.1 mT'lık doğru alana bırakılır. Kazandırılan ARM'nın

şiddeti Molspin fluxgate magnetometresi ile ölçüldükten sonra, örnekler adım adım alternatif alanda temizlenerek her bir temizleme adım sonrasında mıknatıslanma şiddet değeri ölçülür.

Kayaçların dane yapıları belirlenirken sıkça kullanılan histeresiz eğrileri dışında alternatif magnetik alan temizleme eğrileri yardımıyla da domen yapılarını belirlemek mümkündür (Lowrie&Fuller 1971). Bunun için her bir örnek için ayrı ayrı kazandırılan IRM, ARM ve NRM'nin adım adım alternatif magnetik alanda temizlenmesi sonucunda farklı yollardan kazandırılan bu mıknatıslanmalara ait temizleme eğrileri normalize mıknatıslanma şiddetine bağlı olarak grafiklenmektedir. Her bir eğri için, normalize mıknatıslanma şiddet değerinin yarıya düştüğü andaki magnetik alan değeri (Median Destructive Field-MDF) elde edilir. Daha sonra ARM-AF ve IRM-AF'ye ait bu MDF değerlerinin grafiklenmesi ile çoklu ve tek domenli daneleri sınıflamak mümkün olmaktadır. Çok domenli büyük magnetit danelerde IRM'ye ait MDF değerleri ARM'ye ait MDF değerlerinden daha büyük iken tek domenli danelerde bu durum tam tersidir (Dunlop & Özdemir, 1997).

Paleomagnetizma ölçümleri çerçevesinde magnetik minerallerin duraylılıklarının belirlenmesi için, alternatif magnetik alan ve ısısal temizleme eğrileri göz önüne alınmaktadır. Bu amaç için Zijderveld diyagramı (Zijderveld, 1967a), stereonet diyagramı ve demagnetizasyon eğrileri irdelenmiştir. Mıknatıslanma doğrultuların analizi için, mıknatıslanma bileşenlerinin ölçülmesi temel alınmıştır (McElhinny, 1973; Tarling, 1983; Butler, 1992). Sedimenter kayaçların doğal kalıntı mıknatıslanma doğrultu ve şiddet değerleri 2G-Cryogenic magnetometre ile (DC-SQUID) (10E-4 mA/m duyarlılıkta) ölçülürken volkanik kayaçlar Molspin fluxgate magnetometresi ile (10E-2 mA/m duyarlılıkta) ölçülmüştür.

KAYA MAĞNETİZMA ÖLÇÜMLERİ

Sediman ve volkanik kayaçların pilot örneklerinin sabit bir alanda 700°C'ye kadar uygulanan sıcaklık ile bu sıcaklığın oda sıcaklığına kadar belirli adımlarla düşürülmesi sonucunda ısınma ve soğuma eğrileri elde edilmiştir. Sedimenter kayaçlara ait Curie sıcaklıkları genellikle tek bir magnetik fazdan oluşmaktadır. Titanyum bakımından zengin titanyumlu magnetitler bozuşma sonucu titanyum bakımından fakir titanyumlu magnetitlere dönüştüğü görülmektedir. Çoğunlukla bazaltik kayaçlardan oluşan volkanik örneklerde ise, herhangi bir bozuşma olmaksızın, 520-547°C civarındaki Curie sıcaklıkları ile titanyum bakımından fakir titanyumlu magnetitlerin varlığını ortaya koymaktadır.

Şekil 1'de sedimenter ve volkanik kayaçlara ait yüksek-alan termomagnetik eğrileri verilmektedir. Şekil

1a'da CB32D1 örneğine ait mıknatıslanma şiddet değerinin küçük veya duraysız olması, alet hassasiyetinde bozulmalara yol açmış ve Curie sıcaklığının hatalı bulunmasına sebep olmuştur. Şekil 1b'de görülen HS11A2 kumtaşı örneği için 546°C'lik tek bir Curie sıcaklığı elde edilmiştir. Soğuma eğrisine ait mıknatıslanma şiddetinin yaklaşık %70'lik bir kısmının ısınma eğrisine göre azalması örnek içerisinde meydana gelen bozuşmayı göstermekte ve titanyum bakımından zengin titanyumlu magnetitlerin titanyum bakımından fakir titanyumlu magnetitlere dönüştüğünü göstermektedir. GEM12E3 fliş örneğinde 570°C'lik Curie sıcaklığı ve 450°C'de ısınma ve soğuma eğrisinin kesiştiği gözlenmektedir (Şekil 1c). Tek bir magnetik faza sahip örnek içerisinde titanyumlu magnetitlerin magnetite dönüştüğünü söylenebilmektedir. Şekil 1d'de görülen GÖK54B2 örneğinde 550°C'lik Curie sıcaklığı ve ısınma ile soğuma eğrisinde görülen fark, örnek içerisinde önemli ölçüde bir bozuşmanın varlığına işaret etmektedir. Yüksek mıknatıslanma şiddet değerine sahip DM13D2 ve BY12 bazalt örnekleri için 520 ve 550°C'lik tek Curie sıcaklıkları görülmektedir (Şekil 1e, f). Isınma ve soğuma işlemi sonunda örneklere ait mıknatıslanma şiddetlerinde herhangi bir değişimin izlenmemesi, örneklerin titanyum bakımından fakir titanyumlu magnetitlerden oluştuğunu göstermektedir.

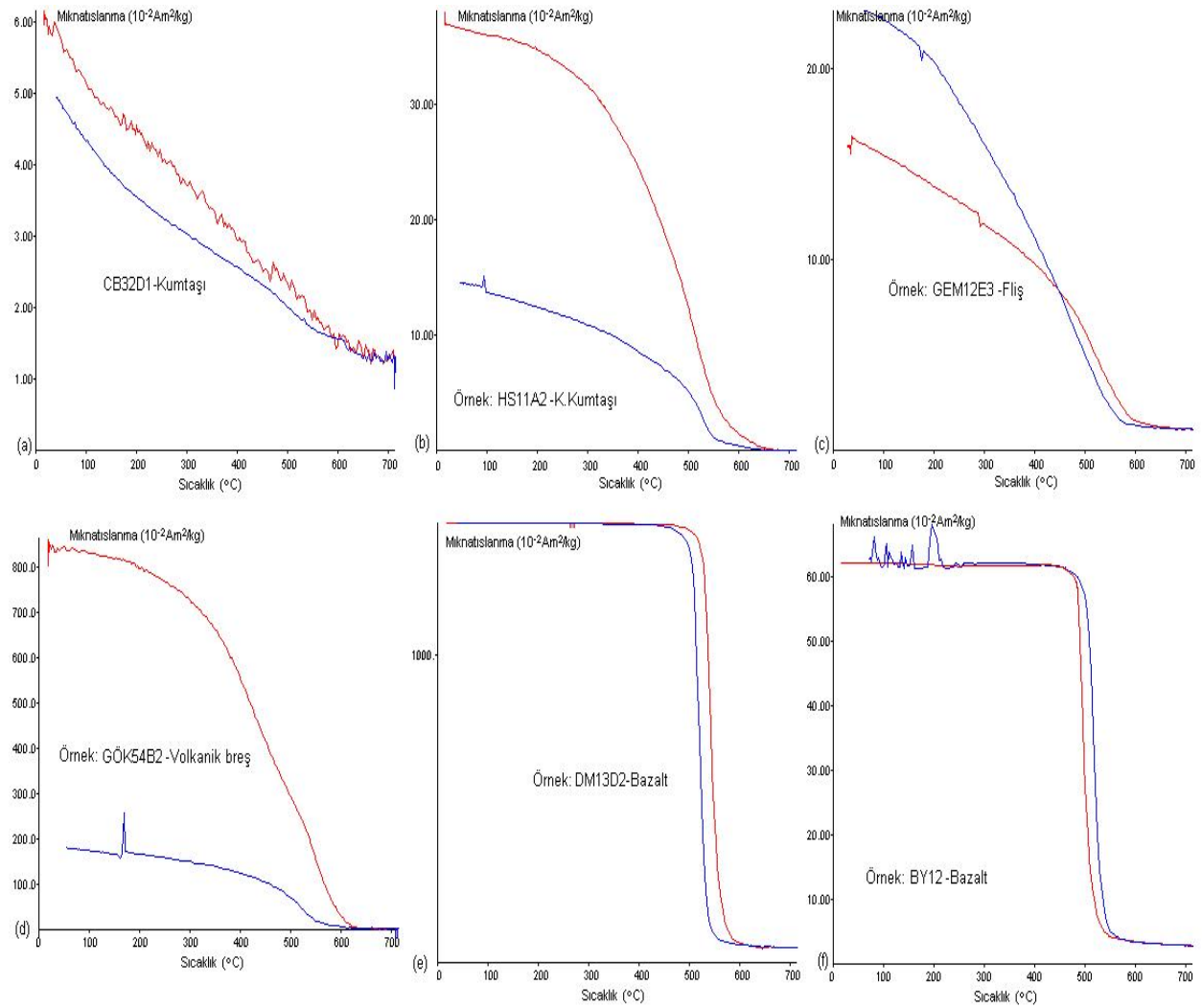
Şekil 2'de pilot örneklere ait histeresiz eğrileri verilirken, Şekil 3'te, bu eğrilerden elde edilen histeresiz parametrelerin Day diyagramına yerleştirilmesi ile dane yapılarının ayırımı görülmektedir. Buna göre Şekil 2a, b, c'de sırasıyla görülen GEM12E3, HS11A2 ve BY12 örnekleri tek domenli bir dane yapısına sahip olup, Şekil 2d'de verilen KY12H2 kireçtaşı örneği 0.0023 mA/m'lik düşük mıknatıslanma şiddetine sahip olup, ölçümler için yeterli hassasiyete sahip değildir.

IRM eğrilerinin magnetik alan karşısındaki davranışı izlenerek mıknatıslanmadan sorumlu mineraller magnetik özelliklerine göre ayırt edilmiştir. Buna göre, Şekil 4a'da görülen pilot örneklerde mıknatıslanma şiddet değeri 800 mT civarlarında doygun hale gelmiştir. Bu örneklerde magnetit mineralinin mıknatıslanmadan sorumlu mineral olduğu söylenebilir. Şekil 4b'de 1500mT'da mıknatıslanma şiddet değerlerinin hala doygunluğa ulaşmaması örnekler içerisinde magnetit mineralin yanı sıra hematit mineralinin de varlığını göstermektedir.

Örneklere ait dane yapısı belirlemede histeresiz ölçümlerin yanı sıra IRM ve ARM ölçümlerine ait alternatif magnetik alan temizleme eğrileri oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 5'de Marmara baseninden elde edilen volkanik kayaç örneklerine ait IRM, ARM, NRM'nin alternatif magnetik alan temizleme eğrileri ve 200 mT'ya kadar uygulanmış normalize edilmiş IRM eğrileri görülmektedir. Şekil

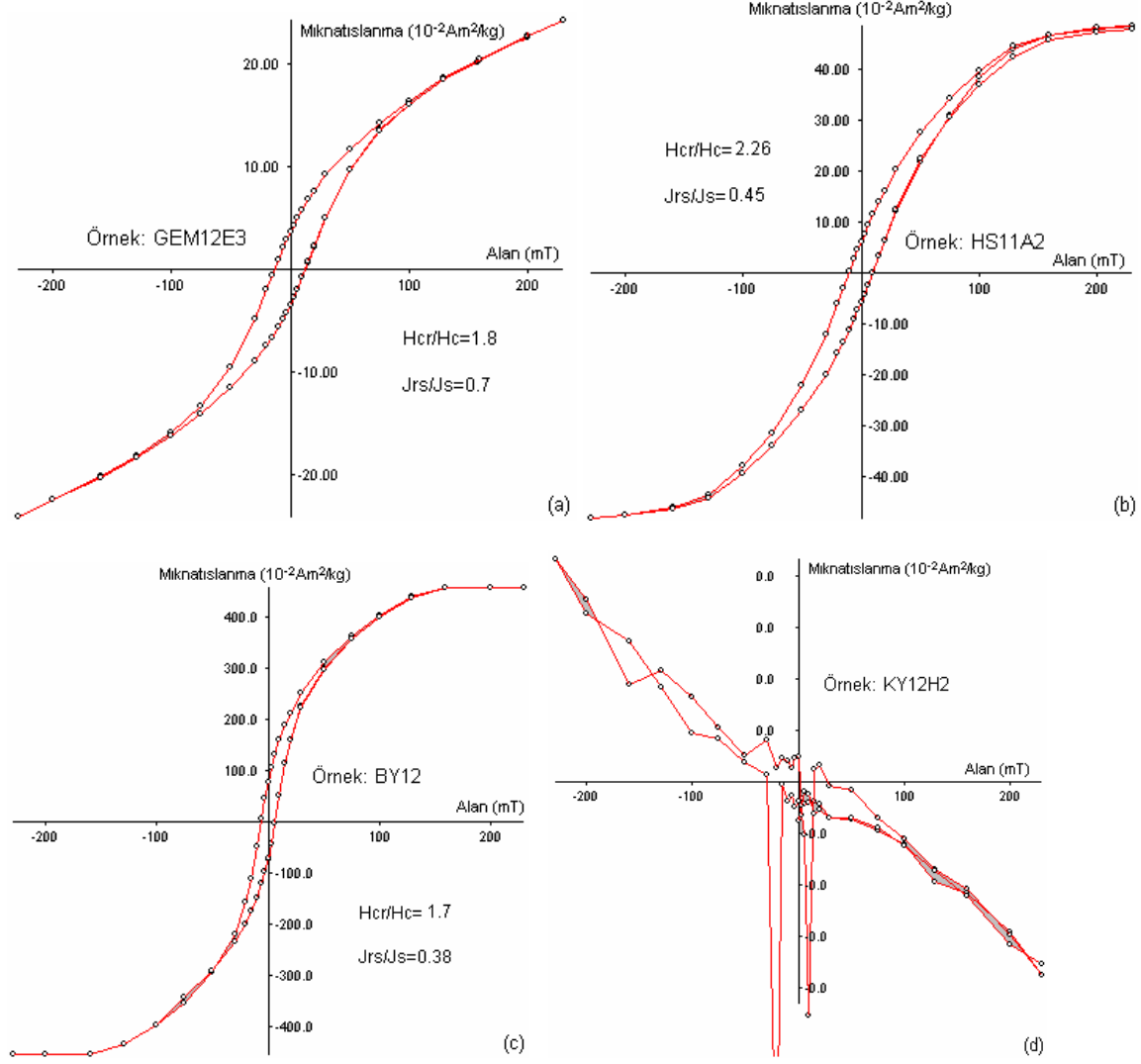
5a'da CR5211 pilot örneğine ait MDF-IRM>MDF-ARM olması çok domenli danelere işaret ederken, Şekil 5b, c ve d'de sırasıyla GÖK51A1, BY12A1 ve CR12G1 örnekleri için MDF-ARM>MDF-IRM için tek domenli dane yapısı mevcuttur. Tablo 2'de bazı volkanik pilot örnekler için MDF-IRM/MDF-ARM değerlerine bağlı olarak tek ve çok domenli dane ayırımı şekil üzerinde gösterilirken, IRM, ARM ve NRM için MDF değerleri mA/m olarak verilmektedir. Marmara havzasındaki

volkanik kayaç örneklerinin alternatif mağnetik alan temizleme eğrileri yardımıyla domen yapıları sınıflandırıldığında genellikle mağnetit minerallerinde tek-domenli danelerin miknatıslanmadan sorumlu olduğu görülmektedir. Şekil 2b ve 3'de BY12A1 örneği için histeresiz parametrelerden elde edilen tek-domenli dane yapısı, Tablo 2'de bu örnek için elde edilen MDF-IRM/MDF-ARM ilişkisinde de ortaya konmuştur.

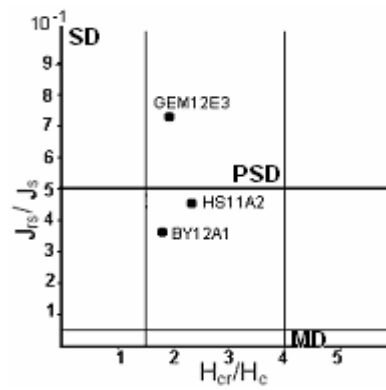


Şekil 1: Farklı sediman ve volkanik kayaçlardan elde edilen **a**, CB32D1; **b**, HS11A2; **c**, GEM12E3; **d**, GÖK54B2; **e**, DM13D2, **f**, BY12 pilot örneklerine ait yüksek-alan termomağnetik eğrilerin miknatıslanma şiddetine bağlı olarak gösterimi.

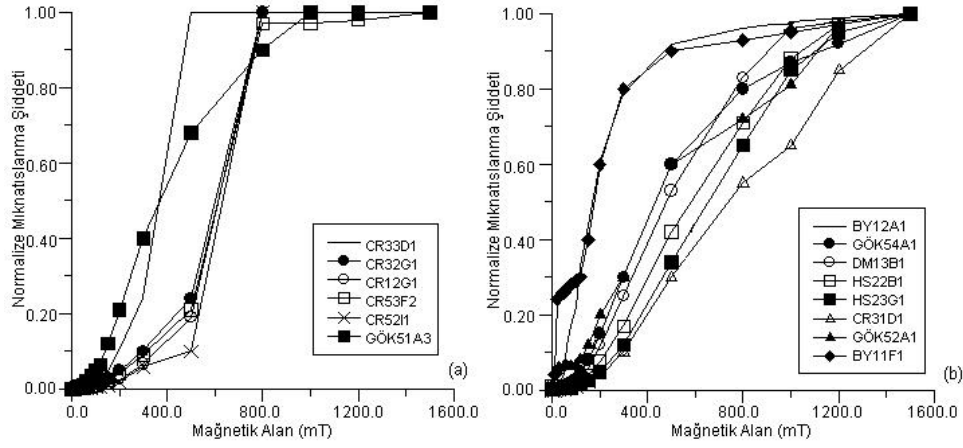
Figure 1: The illustration of high-field thermomagnetic curves as a function of magnetization for **a**, CB32D1; **b**, HS11A2; **c**, GEM12E3; **d**, GÖK54B2; **e**, DM13D2, **f**, BY12 pilot samples obtained from different sedimentary and volcanic rocks.



Şekil 2: a, GEM12E3; b, HS11A2; c, BY12; d, KY12H2 örneklerine ait histeresiz eğrileri.
Figure 2: Hysteresis curves for a, GEM12E3; b, HS11A2; c, BY12; d, KY12H2 samples.

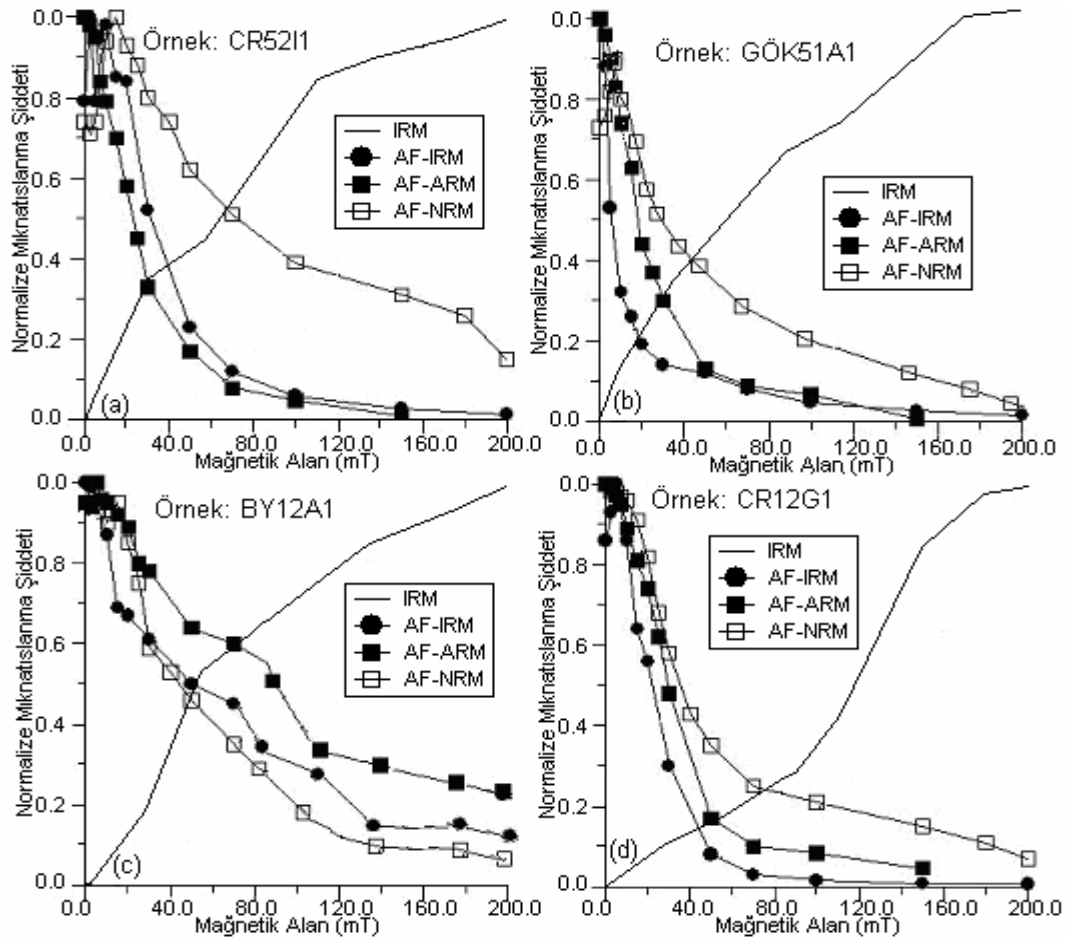


Şekil 3: GEM12E3, HS11A2 ve BY12A1 örnekleri için histeresiz eğrilerinden elde edilen histeresiz parametrelerinin Day diyagramında gösterilmesi.
Figure 3: The Illustration of hysteresis parameters in Day diagram, obtained from hysteresis curves for EM12E3, HS11A2 and BY12A1 samples.



Şekil 4: Marmara havzasındaki farklı kayalardan elde edilen normalize IRM oluşum eğrileri (Uygulanabilen maksimum alan 1500 mT'dir).

Figure 4: Normalized IRM acquisition curves obtained from different rocks in the Marmara basin (maximum acquired field is 1500 mT).

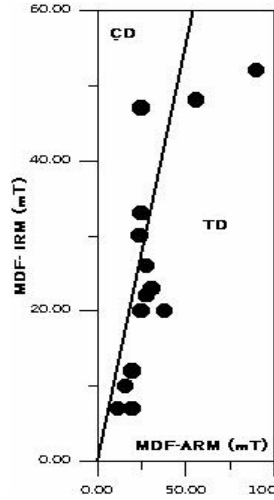


Şekil 5: a, CR52H1; b, GÖK51A1; c, BY12A1, d, CR12G1 örneklerine ait normalize edilmiş IRM oluşum eğrisi ile NRM, IRM, ARM'ye ait normalize edilmiş AF temizleme eğrileri (IRM oluşum eğrileri 200 mT'ya kadar alınmaktadır).

Figure 5: IRM acquisition curves and normalized AF demagnetization curves concerning NRM, IRM, ARM for a, CR52H1; b, GÖK51A1; c, BY12A1, d, CR12G1 samples (IRM acquisition curves are taken up to 200 mT).

Tablo 2: MDF-IRM/MDF-ARM değerlerine bağlı olarak tek ve çok domenli dane ayırımının sınıflandırılması ve IRM ARM ile NRM için MDF değerlerinin tabloda mA/m olarak gösterilmesi.

Table 2: The classification of single and multi domain due to MDF-IRM/MDF-ARM values and the illustration of MDF values for IRM, ARM and NRM as mA/m.



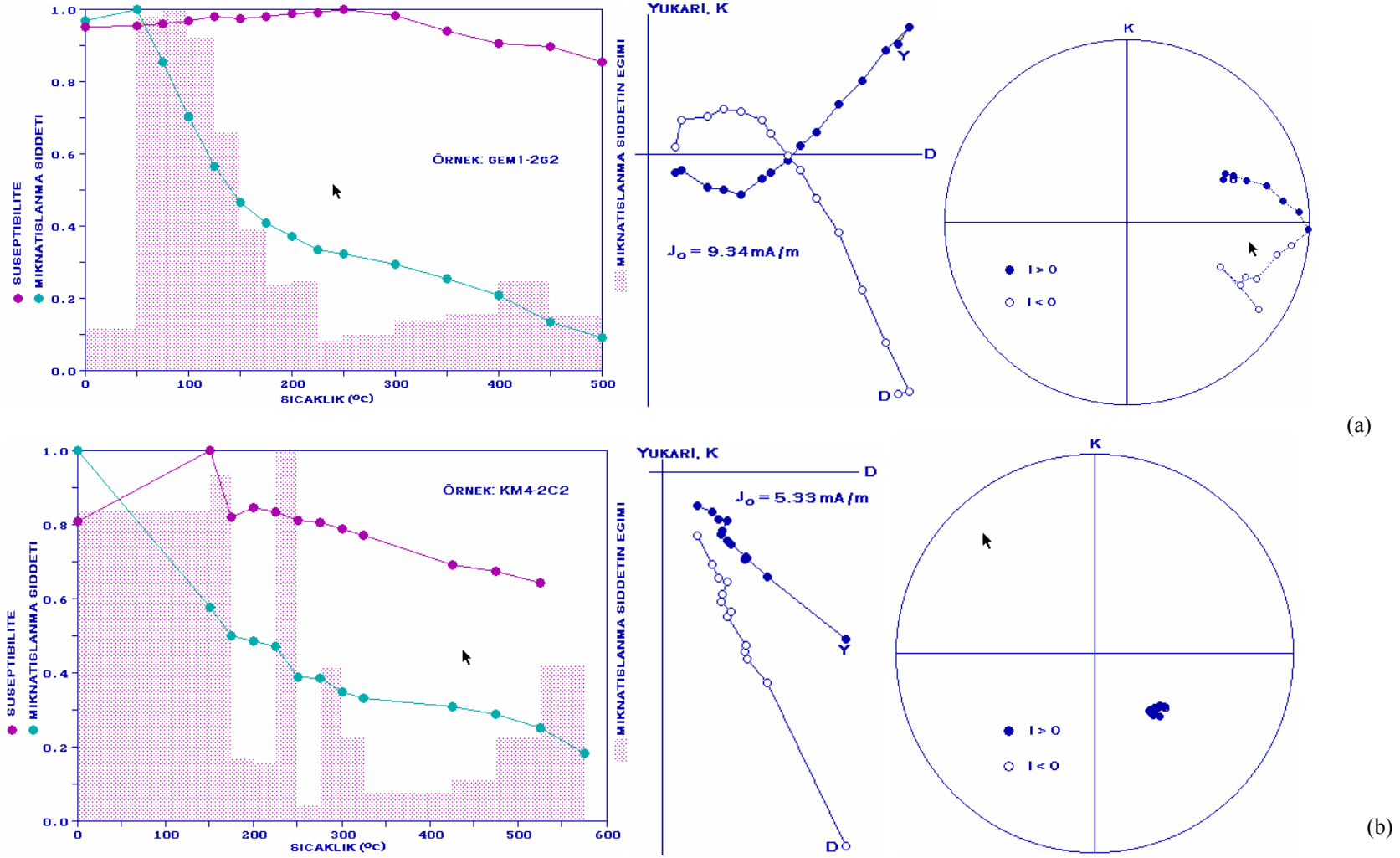
Örnek adı	MDF-IRM	MDF-ARM	MDF-NRM
CR33D1	20	25	35
BY12A1	10	16	18
CR32G1	20	38	35
GÖK54A1	30	24	76
DM13B1	33	25	30
CR12G	22	28	35
HS22B1	52	90	44
HS23B1	48	56	40
CR53G2	26	28	27
CR31D1	47	25	26
GÖK51A3	12	20	44
CR52H	23	31	27
GÖK52A1	7	20	67
BY11G1	7	12	14

PALEOMAĞNETİK DOĞRULTU ANALİZİ

Marmara havzasındaki sedimenter kayaların mıknatıslanma şiddet değerleri 0.023-158 mA/m arasında değişirken genellikle bazaltlardan oluşan volkanik örnekler için 11.9-7164 mA/m arasında değişmektedir. Şekil 6a,b'de GEM1-2G2 ve KM4-2C2 kumtaşı örneklerine ait mıknatıslanma vektörlerinin ısısal temizleme işlemi sonunda, Zijderveld ve stereonet diyagramındaki izleri ile normalize mıknatıslanma şiddetinin sıcaklık ile olan değişimi verilmektedir. Şekil 6a'da GEM1-2G2 örneğine ait Zijderveld diyagramına bakıldığında mıknatıslanma vektörünün 225 °C'den sonra yön değiştirdiği ve ters polariteli olarak 500°C'den sonra orijine yöneldiği görülmektedir. Mıknatıslanma şiddet/sıcaklık değişim grafiğinde ise doğal kalıntı mıknatıslanma değerinin 9.34 mA/m'den adım adım azaldığı izlenebilmektedir. Şekil 6b'de KM4-2C2 örneği için mıknatıslanma şiddet/sıcaklık değişim eğrisinde 150-300°C'lerde görülen basamaklı yapı, olası bir mineral dönüşümünü yansıtmaktadır. Doğal kalıntı mıknatıslanma değeri 5.33 mA/m olan örneğin stereonetteki davranışı izlendiğinde, herhangi bir ikincil mıknatıslanmanın olmadığı ve mıknatıslanma vektörünün saçılma göstermeksizin belli bir noktada yığıldığı görülmektedir. Mıknatıslanma vektörünün

Zijderveld diyagramındaki davranışı izlendiğinde 400°C'den sonra duraylı ve orijine doğru yönelim gösteren bir yapı sergilediği görülmektedir.

Marmara havzasından örneklenen sedimenter kayaların mıknatıslanma bileşenleri analiz edildiğinde, mıknatıslanma şiddeti 0.023-0.18 mA/m arasında değişen ve çok zayıf bir mıknatıslanma taşıyan kireçtaşı örneklerinin paleomağnetizma çalışması için uygun olmadığı ve duraylı sonuç vermediği görülmüştür. Sedimenter kayaların bir kısmının 250-400°C'de mıknatıslanmalarını yitirmeleri pirotit veya geotitin varlığını gösterirken, kireçtaşı ve kumtaşlarının büyük bir kısmının 500-670°C'de mıknatıslanmalarını yitirmeleri magnetit, hematit, titanyum bakımından fakir titanyumlu magnetite işaret etmektedir. İnceleme alanından elde edilen MUD12 kuvarsit örneğinin 3.06 mA/m'lik bir doğal kalıntı mıknatıslanma değerine sahip olup 550°C'ye kadar bu mıknatıslanma şiddetini duraylı bir şekilde koruduğu görülmüştür. Şiddetleri 1647-7164 mA/m olan bazalt örneklerinin mıknatıslanmalarını 520-600°C'ye kadar korumaları mıknatıslanmadan sorumlu mineral olarak magnetit ve titanyum bakımından fakir titanyumlu magnetitlerin varlığını ortay koymaktadır.



Şekil 6a: GEM1-2G2; **b,** KM4-2C2 pilot örnekleri için adım adım ısısal temizleme işleminin normalize mıknatıslanma şiddeti/sıcaklık grafiğinde, Zijderveld ve stereonet diyagramındaki konumları. Mıknatıslanma şiddeti mA/m olarak verilmektedir. Zijderveld diyagramındaki içi dolu daireler yatay düzlemi gösterirken, içi boş daireler düşey düzlemi belirtmektedir.

Figure 6: The illustration of normalized magnetization/temperature, Zijderveld and stereonet diagrams for **a,** GEM1-2G2; **b,** KM4-2C2 pilot samples by stepwise thermal demagnetization process. Magnetization intensity is given in mA/m. Solid symbols indicate horizontal projection whereas open symbols are as vertical projection in Zijderveld diagram.

SONUÇLAR

Marmara havzasından mıknatıslanma şiddet değerleri 0.023-158mA/m arasında değişen sedimenter kayalar ile 11.9-7164 mA/m arasında değişen volkanik kayaların Curie sıcaklıkları elde edilerek dane yapıları ortaya konmuş ve mıknatıslanma bileşenleri Zijderveld, stereonet ve mıknatıslanma şiddeti/sıcaklık diyagramında analiz edilmiştir.

Sedimenter kayaların bir kısmının 250-400°C'de mıknatıslanmalarını yitirmeleri pirotit ve geotitin varlığını ortaya koymaktadır. Kireçtaşı ve kumtaşlarının büyük bir kısmının mıknatıslanmalarını 520-600°C'ye korudukları, mıknatıslanma bileşenleri duraylı ve normal polariteli bir dağılım gösterirken, GEM ve CB pilot örneklerinin 300°C civarlarında polaritelerini değiştirdikleri gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak doğada farklı zamanda kazanılan mıknatıslanma bileşenlerinin söz konusu olduğu görülmektedir. Marmara havzasından alınan sedimenter kayaların paleomağnetizma çalışması için uygun olmasının yanı sıra, PH1 kireçtaşı örneği ile GN1, MRE kumtaşı, BE3 siltaşı, MHS kil-marn ve MR tuf örnekleri için mıknatıslanmadan sorumlu minerallerin kararsız ve çok fazla bozmuş olabilecekleri gibi, mıknatıslanma şiddet değerinin çok düşük olması, duraylı mıknatıslanma bileşenlerinin elde edilememesine neden olmuştur. KY1 ve CA1 örneklerinin negatif süseptibilite değerleri vermesi (Tablo 1), örneklerin diyamağnetik mıknatıslanmaya sahip olduklarını ve paleomağnetik çalışmalar için elverişli olmadıklarını göstermektedir.

Bazaltik kayaların mıknatıslanma bileşen analizi ortaya konduğunda çoğu örneklerin 520-600°C'ye kadar mıknatıslanmalarını korudukları ve normal polariteli duraylı mıknatıslanma bileşenleri elde edildiği görülmüştür.

Kaya mağnetizma çalışması kapsamında sedimenter kayaların üzerinde gerçekleştirilen yüksek alan termomağnetik ölçümler sonucunda titanyum bakımından zengin titanyumlu mağnetitlerin titanyum bakımından fakir titanyumlu mağnetitlere dönüştüğü, ve mıknatıslanmadan sorumlu mineral olarak titanyum bakımından fakir titanyumlu mağnetitlerin söz konusu olduğu belirlenmiştir. Bazaltik örnekler için oda sıcaklığında ısınma ve soğuma eğrisine ait mıknatıslanma şiddet değerinde bir farkın olmaması örnekler içerisinde herhangi bir bozuşmanın olmadığını, Curie sıcaklıklarının 520-570°C arasında titanyum bakımından fakir titanyumlu mağnetit veya saf mağnetite sahip tek bir mağnetik fazdan oluştuğu görülmüştür.

Volkanik kayaların IRM eğrileri değerlendirilerek, 1500mT'ya kadar gerçekleştirilen alan yükleme deneyi sonucunda içlerinde hem mağnetit hem de hematit+mağnetit minerallerinin varlığı ortaya konmuştur.

Örneklerin dane yapıları hem histerisiz eğrilerde hem de IRM/ARM'ya ait alternatif mağnetik alan temizleme eğrileri ile değerlendirilmiştir. Buna göre sedimenter ve volkanik pilot örneklerin histerisiz

özellikleri göz önüne alındığında yalancı-tek domenli danelerden meydana geldikleri görülmüştür. IRM/ARM'ye ait alternatif mağnetik alan temizleme eğrilerinden elde edilen MDF değerleri grafik üzerine yerleştirildiğinde çoğu örneklerin tek domenli bir dane yapısına sahip oldukları görülmüştür.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir (Proje no: 101Y078). Laboratuvar çalışmaları Almanya'nın Ludwig Maximilians Üniversitesi Paleomağnetizma ve Kaya Mağnetizması laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar çalışması yardımlarını esirgemeyen Sayın Manuela Weiss'a teşekkürümüzü sunarız. Örnekler Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Paleomağnetizma laboratuvarında ölçüme hazır hale getirilmiş olup, laboratuvarın kullanılmasında her türlü yardımı sağlayan Doç. Dr. Mustafa Kemal Tuncer'e şükranlarımızı sunarız.

SUMMARY

In this study rock magnetic properties and the analysis of magnetization directions due to stepwise demagnetization process illustrated in Zijderveld, stereonet and normalized magnetization/temperature curves which are carried out on sedimentary and volcanic rocks in the age of Lower Eocene-Pliocene from the Marmara basin.

The paleomagnetic and rock magnetic studies are carried out in the Ludwig Maximilians University-Munich at the Paleomagnetic laboratory. Thermomagnetic analysis are made in the range of 18-700°C with the variable field translation balance (VFTB) applying a field of 100 mT according to Forrer principle. Hysteresis measurement were carried out at room temperature with a maximum magnetic field up to 230 mT and the hysteresis parameters are obtained with an Oerstedmeter and a air coil. measurement. Isothermal remanent magnetization (IRM) measurements are made with a water cooled coil in 10-12 stepwise increasing field to a maximum field of 1500 mT followed by alternative demagnetization for each pilot samples. An AC field at 100 mT and a DC field from 0.05 to 0.01 mT is applied in the z-direction for ARM experiments. All ARM acquisition curves were undergone to an stepwise alternative demagnetization procedure.

Strong field thermomagnetic curves were obtained to determine the magnetic phases by giving information about alteration that occurs during the heating process. The sedimentary rocks are characterized by single ferromagnetic phases with Curie temperatures of 500-570°C, compatible with the transform of the oxidation of Ti-rich titanomagnetites to Ti-poor titanomagnetites. The large difference between the heating and cooling curves in most of the sedimentary rocks indicates the alteration degree. The basalt rock samples are characterized by 520-570°C Curie points with no alteration degree suggesting that no alteration occurred due to heating and cooling process.

Investigation of domain state in the frame of hysteresis parameters display a pseudo-single domain grain size whereas the Lowrie–Fuller test with alternative demagnetization curves of isothermal remanent magnetization and anhysteretic remanent magnetization (ARM) measurements have identified single domain type grain size in most of the pilot samples.

Paleomagnetic analyses indicate that the NRM of some of the sedimentary rocks are dominated as a single component with low intensity that is destroyed by about 250-350°C indicating Curie temperature of pyrrhotite. Most of the sedimentary rocks show a stable magnetization up to 520-600°C with normal polarity whereas sandstone samples are as reverse polarity after 300°C demagnetization. Basalt rocks with 1647–7164 mA/m NRM show always stable magnetization up to 520-600°C'ye with normal polarity.

DEĞİNİLEN BELGELER

Butler, R.F., 1992, Paleomagnetism, Magnetic Domains to Geologic Terranes. Blackwell, Oxford, 319.

Collinson, D. W., 1983, Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism: Techniques and Instrumentations, 503 pp., Chapman and Hall, New York.

Day, R., Fuller, M., Smith, V.A., 1977, Hysteresis Properties of Titanomagnetites, Grain Size and Composition Dependence. *Phy. Earth Planet. Inter.*, 13, 260-267.

Dunlop, J. D. & Özdemir, Ö., 1997, Rock Magnetism, Fundamentals and frontiers, Cambridge University Press, 573 pp.

Grommé, C.S., Wright, T.L., Peck, D.L., 1969, Magnetic Properties and Oxidation of Iron-Titanium Oxide Minerals in Alae and Makaopuli Lava Lakes, Hawaii. *J. Geophys. Res.* 74, 5277-5293.

Lowrie, W., and M. Fuller, 1971, On the alternating field demagnetization characteristics of multidomain thermoremanent magnetization in magnetite, *J. Geophys. Res.*, 76, 6339-6349.

McElhinny, M.W., 1973, Paleomagnetism and Plate Tectonics, Cambridge University Press, Cambridge.

Néel, L., 1949, Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites, *Ann. Géophys.*, 5, 99-136.

Néel, L., 1955, Some theoretical aspects of rock magnetism, *Adv. Phys.*, 4, 191-243.

Özdemir, Ö. & Dunlop, D. J., 1988, Crystallization remanent magnetization during the transformation of maghemite to hematite. *J. Geophys. Res.* 93, 6530-6544.

Tarling, D. H., 1983, Principles and Applications of Paleomagnetism, Chapman and Hall, London.

Van Der Voo, R., 1993, Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans, Cambridge University Press, 411 pp.

Zijderveld, J.D.A., 1967a., AC Demagnetization of Rocks: Analysis of Results. In *Methods in Paleomagnetism*, ed. S. K. Runcorn, K. M. Creer & D. W. Collinson, pp. 254-86.

Yayına Geliş - *Received* : 10.04.2005

Yayına Kabul - *Accepted* : 31.10.2005