

# ÇEVRE MAĞNETİZMASI ve UYGULAMALARI

## ENVIRONMENTAL MAGNETISM and APPLICATIONS

**Özlem MAKAROĞLU<sup>1</sup>, Naci ORBAY<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar/İST.  
ozlemm@istanbul.edu.tr*

Yayına Geliş (Received): 23.02.12, Yayına Kabul (Accepted): 14.06.12

**ÖZ:** Çevre Mağnetizması sediman, toprak ve toz gibi çevresel materyallerin mağnetik özelliklerinin ölçümünü içerir. Ölçülen bu mağnetik özellikler iklim ve çevre ile ilgili yüksek duyarlılıkta belirteçler sağlar ve tarihleme, küresel ölçekte korelasyon ve doğal/antropojenik etkinin anlaşılması için oldukça etkili sonuçlar verir. Çevre mağnetizması kapsamında ölçülen mağnetik minerallerin özellikleri paleoiklim analizlerinde, sedimanların kaynak çalışmalarında, antropojenik kirliliğin çalışılmasında ve arkeolojik araştırmalarda belirteç (proxy) parametreler olarak kullanılır. Bu özelliklerin hem laboratuardaki hem de arazideki ölçümlerin, yüksek çözünürlüklü, duyarlı, hızlı, örneği tahrip edici olmayan ve en önemlisi ucuz olması çevre mağnetizması konusunu daha cazip kılmaktadır. Bu çalışmada, mağnetizmada oldukça yeni olan Çevre Mağnetizması disiplininin gelişimi ve uygulama alanları belirli konu başlıkları altında özetlenmiştir. Örnek uygulama olarak Van Gölü'nden toplanan sedimanların mıknatıslanma katsayısı verilerinin karşılaştırılması verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çevre Mağnetizması, mağnetik mineraller, antropojenik etki, iklim

**ABSTRACT:** Environmental magnetism involves measurement of the magnetic properties of environmental materials, including soils, sediments and dusts. These magnetic properties provide highly sensitive indicators of climate and environment and it is a powerful method for dating, globally correlating, and understanding natural and/or anthropogenic impacts. In environmental magnetism, the properties of magnetic minerals are used as proxy parameters for paleoclimate analysis, paleoceanographic studies, provenance studies of sediments, studies of anthropogenic pollution, and archeological investigations. Measuring of this properties, both in the field and laboratory, are high resolution, sensitive, rapid, usually non-destructive and cheap, therefore these make environmental magnetism most attractive. In this study, the applications and evolution of environmental magnetism which is new discipline in magnetism was outlined. As a case study, it was presented that correlation of magnetic susceptibility data of sediments from Lake Van.

**Keywords:** Environmental magnetism, magnetic minerals, anthropogenic impacts, climate

## GİRİŞ

Demir oksit ve sülfütlü minerallerin baskın olduğu mağnetik taneler, yüksek yoğunlukta olmasalar da hemen hemen bütün sediman, toprak, toz ve organizmalarda bulunmaktadır. Bu tanelerin yer-mağnetik alanının paleomağnetik kayıtları olduğu uzun zamandan beri bilinmektedir (Nagata, 1961; O'reilly, 1976, 1984; Dunlop ve Özdemir, 1997). Bu bilgiye ek olarak, mağnetik tanelerin paleoiklimsel ve paleoçevresel değişimlere de duyarlı birer kayıtçı olduğu son yıllarda yapılan çalışmalarla ortaya koyulmuştur (Maher ve Thompson, 1999). Geçtiğimiz 30 yıl süresince sedimanların mağnetik özelliklerinin detaylı olarak çalışılması, mağnetik mineral parametrelerinin çevresel çalışmalarda güçlü birer belirteç (proxy) olmasını sağlamıştır. Bundan dolayı, günümüzde mağnetik ölçümler sadece paleomağnetik araştırmalarda değil, özellikle zemin (Mullins, 1977) ve sedimanların (Thompson ve diğ., 1980; Thompson ve Oldfield, 1986; Dekkers, 1997) kullanıldığı çevresel bir çok araştırmada da kullanılmaya başlanmıştır.

Geçmişte meydana gelen çevre ve iklim değişimlerinin nedenlerinin belirlenmesi yerkürenin gelecekte geçireceği değişimlerin tahmin edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Çeşitli yöntemlerle yapılan araştırmalar, geçmiş dönemlerde çok büyük boyutlu çevre ve iklim değişimlerinin meydana gelmiş olduğunu göstermektedir. Ancak, son yıllarda sıkça gündeme gelen günümüze ait çevre ve iklim değişimlerinin ise insan aktivitelerinden kaynaklandığına dair belirtiler mevcuttur (IPCC, 2007). Günümüzde ve geçmiş dönemlerde meydana gelen bu değişimlerin nedenlerinin anlaşılabilmesi için çevre içerisinden alınan materyallerin (toprak, sediman, yaprak, toz vb.) farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bunlardan biri de çevremizde bulunan materyallerin sahip oldukları mağnetik özellikleridir. Sedimanlarda depolanan mağnetik mineraller geçmiş çevre ve iklim değişimlerinin bir kaydını taşırlar. Bu kayıtların detaylı

olarak incelenmesi mağnetizmada yeni bir disiplin olan Çevre Mağnetizmasının doğmasını sağlamıştır. Bu disiplin geçmiş çevre ve iklim değişimlerinin anlaşılabilmesi için ekolojik sistem içerisindeki örneklerin mağnetik özelliklerinin çalışılması esasına dayanır. Sedimanların, toprağın, tozların ve diğer doğal materyallerin mağnetik ölçümleri iklim ve çevre değişimleri ile ilişkili soruları ve problemleri analiz etmek için güçlü ve etkili bir araçtır (Maher ve Thompson, 1999).

Özellikle 1970'lerden sonra konu ile ilgili teorik ve deneysel çalışmaların derlendiği bir çok makale ve kitap (Thompson ve Oldfield, 1986; King ve Channel, 1991; Verosub ve Robert, 1995; Dekkers, 1997; Maher ve Thompson, 1999; Walden ve diğ., 1999; Evens ve Heller, 2003) konuyu açıklamak ve geliştirmek için yayınlanmıştır. Özellikle paleomağnetik çalışmalarda doğal kalıntı mıknatıslanma doğrultularının daha duyarlı bir şekilde belirlenmesi için geliştirilen duyarlılığı yüksek olan aletlerin birçoğu Çevre Mağnetizması çalışmaları için de ideal alet donanımını sağlamıştır.

Geçmiş iklim değişimleri, antropojenik kirliliğin belirlenmesi, sediman hareketlerinin araştırılması, göl ve deniz sedimanlarının mağnetik özelliklerinin bulunması, nehir yataklarındaki sediman süreçlerinin incelenmesi, biyolojik materyallerin mağnetik özelliklerinin araştırılması Çevre Mağnetizması disiplininin uygulama alanlarından bazılarıdır.

## ÇEVRE MAĞNETİZMASI ÇALIŞMALARININ GELİŞİMİ

Yaklaşık 2,6 milyon yıl önceye uzanan Kuvarter zamanı, yerküre tarihinin oldukça yakın bir dönemini kapsar. Bu dönem içerisinde iklimsel salınımları, kıtasal ölçekteki buzulların genişleme ve daralma süreçlerini, küresel ölçekte deniz seviyesindeki düşme ve yükselmeleri, fauna ve florada türlerin yer değiştirme ve yok olmasını ve ayrıca insan nüfusundaki ani artışlar ile karakterize edilen

dinamik süreçleri görmek olanaklıdır. Yerkürenin iklimi ve biyosferindeki bu fiziksel ve kimyasal değişimler sedimanlarda ve buzullarda dönemsel olarak kayıt edilmektedir. Bu kayıtların bulunması ve yorumlanması ile geçmiş iklim ve çevre değişimlerinin mekanizması, oranı ve zamanları tanımlanabilmektedir. Bu kayıtlardan elde edilen bilgi, günümüzün anlaşılması ve geleceğin tahmini için araştırmacılara oldukça yararlı bir kaynak oluşturmaktadır (Maher ve Thompson, 1999).

Kuvaterner ile ilgili çevre mağnetizması çalışmaları, Gustav Ising (1943) tarafından İsviçre'deki bir gölden alınan varvli (iklimsel) sedimanların doğal kalıntı mıknatıslanmalarının ve mıknatıslanma katsayısı (mağnetik süseptibilite) ölçümlerinin yapılmasıyla başlamıştır. Ising göl sedimanlarının mağnetik özelliklerinin kaynaktan uzaklaştıkça nasıl değiştiğini ve mağnetik içeriğinin yıllık bir periyotta nasıl tanımlandığını ve baharda depolanan sedimanların kışın depolanan sedimanlara göre daha yüksek mağnetik özellik taşıdıklarını göstermiştir. Ayrıca, göl sedimanlarının mıknatıslanma katsayısı anizotropisine sahip olduğunu da yaptığı çalışmalarla ortaya koymuştur (Maher ve Thompson, 1999).

Güncel sedimanların mağnetik özellikleri ile ilgili çalışmaların gelişmesinde bir diğer önemli araştırma, Windermere Gölü sedimanlarında yapılan paleomağnetik çalışmadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen karotiyer ile yönlü karot örnekleri alınmış ve göl sedimanlarının paleomağnetik kayıtları ölçülmüştür (Mackereth 1958; 1971).

Çevre Mağnetizmasının gelişmesinde bir diğer önemli araştırmacı Frank Oldfield'tir. Kariyeri boyunca doğal ve antropojenik iklim değişimlerini içeren ekosistem değişimleri ilgisini çekmiş ve 140'tan fazla bilimsel makale yayınlamıştır. Daha önce yapılan polinolojik çalışmalarla bu birbirine geçmiş yorumu karışık ve zor olan değişimlerin yorumlanmasına katkı koyacak bir çok çok-disiplinli çalışma yapmıştır. Bu çalışmaları sonucunda Liverpool Üniversitesinde

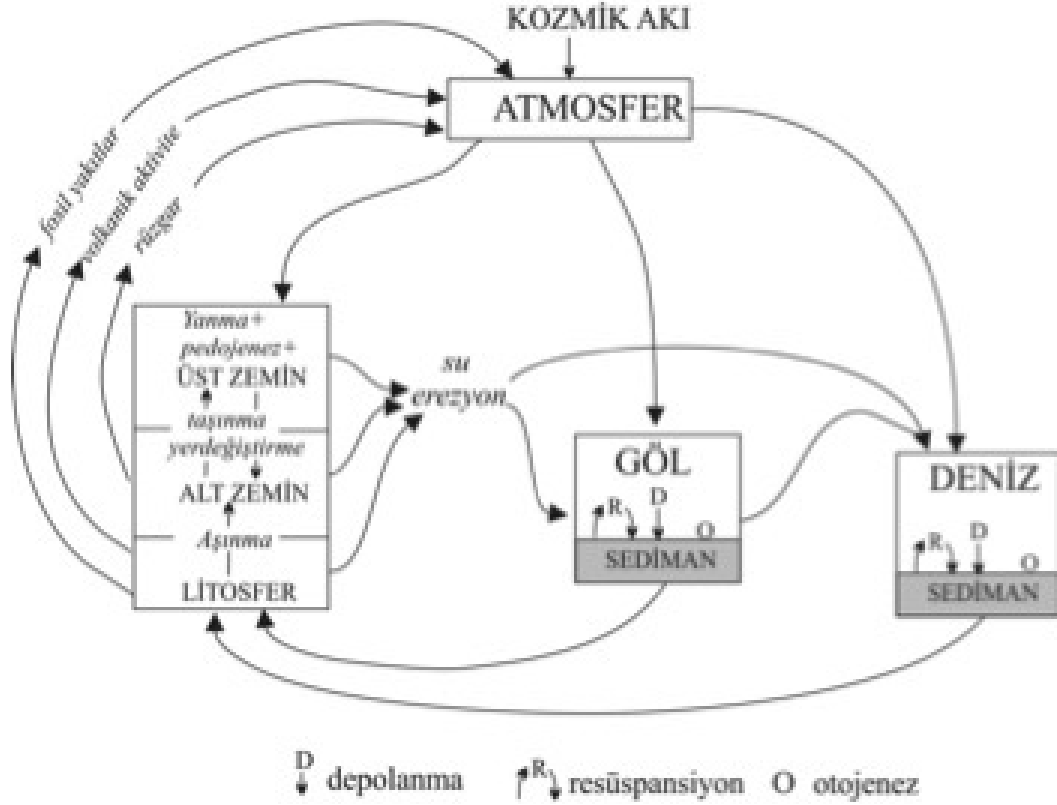
Radyometri, Mağnetik Mineral ve Paleo-çevre Araştırma Merkezini (Radiometric, Mineral Magnetic ve Paleoenvironmental Research Center) kurmuştur. Oldfield 1970'li yıllarda mağnetik ölçüm aletleri geliştiren ve tasarlayan Geoff Bartington ile tanışmış Avrupada bir çok önemli çalışmada Bartington aletini kullanmıştır.

## DOĞAL ÇEVRE İÇERİSİNDE MAĞNETİK MİNERAL DÖNGÜSÜ

Güneşteki ve yerküredeki enerji kaynakları farklı sistemlerin enerji taşınmasını ve malzeme akışını kontrol eder. Litosfer, hidrosfer ve astenosfer arasındaki döngüler, bu malzeme akışını ve enerji taşınmasını kontrol eden en önemli kaynaklardır. Bu döngüler doğal veya antropojen kaynaklı olarak yer sistemleri oluşturmaktadır. Bu döngü içerisinde mağnetik minerallerin taşınması ve hareketi Şekil 1'de özetlenmiştir (Thompson ve Oldfield, 1986).

Doğal çevre içerisinde sıkça rastlanan aşınma, zemin oluşumu ve diyajenez gibi süreçler boyunca paramağnetik mineraller ferri veya antiferromağnetik özelliğe dönüşürken, ferrimağnetik mineraller de diamagnetik minerallere dönüşebilirler. Taşınma, erezyon veya aşınma gibi fiziksel süreçler mağnetik minerallerin parçalanmasına ve yer değiştirmesine neden olur. Bu gibi durumlarda mağnetik minerallerin boyutlarında değişiklikler meydana gelebilir.

## MAĞNETİK MİNERALLERİN DOLAŞIM ŞEMASI



Şekil 1. Mağnetik mineral döngüsü (Thompson ve Oldfield, 1986).

Figure 1. The cycle of magnetic mineral.

Mağnetik mineraller doğal ve antropojenik süreçlerle oluşur, değişir, taşınır ve depolanır (Thompson ve diğ., 1980). Ana kayadan kopan mağnetik mineraller herhangi bir değişim göstermeden ve çok duraylı bir şekilde korunabilirler ya da kimyasal süreçler sonucunda değişime uğrayarak başka mağnetik minerallere de dönüşebilirler (Hilton, 1987; Snowball ve Thompson, 1988). Şekil 1’de gösterilen mağnetik mineral döngüsü içerisindeki mağnetik mineraller, oluşum süreçlerine göre detritik, diyajenik ve biyojenik mağnetik mineraller olarak gruplanabilirler.

### ÇEVRE MAĞNETİZMASI PARAMETRELERİ

Çevre mağnetizması çalışmaları kapsamında yapılan analizlerde amaç, doğal çevremiz içerisinde

bulunan materyallerin sahip olduğu mağnetik minerallerin yoğunluğu, tane boyu ve minerolojisini belirlemektir. Bu amaçla, farklı araştırmacılar tarafından, sentetik ve doğal örneklerin kullanıldığı deneysel çalışmalar ile çevre mağnetizmasında yaygın olarak kullanılan birçok parametre ve oran geliştirilmiştir (Tablo1).

Çevre mağnetizması çalışmalarında yaygın olarak kullanılan en önemli parametrelerden biri  $\kappa$  ya da  $\chi$  sembolü ile gösterilen mıknatıslanma katsayısıdır. Mıknatıslanma katsayısı, düşük bir alanın varlığında bir örneğin sahip olduğu mıknatıslanmasının bir ölçümüdür (Verosub ve Roberts, 1995). Mıknatıslanma katsayısı  $\kappa$  simgesi ile gösterilir ve

$$\kappa = M / H$$

formülü ile belirlenir. SI biriminde mıknatıslanma şiddeti (M) ve magnetik alan (H) aynı birime (A/m) sahip oldukları için bu birim sisteminde mıknatıslanma katsayısı birimsizdir ve hacim mıknatıslanma katsayısı ( $\kappa$ ) olarak adlandırılır. Kütleyle bağlı mıknatıslanma katsayısını ( $\chi$ ) bulmak için hacim mıknatıslanma katsayısı materyalin yoğunluğuna bölünerek,

$$\chi = \kappa / \rho$$

şelinde yazılır.  $\kappa$  birimsiz olduğu için  $\chi$ 'in birimi  $m^3/kg$  dır (Dearing ve diğ., 1996).

Anhisteretik Kalıntı Mıknatıslanma (ARM) ve Eş-Isıl Kalıntı Mıknatıslanma (IRM), çevre magnetizmasında sıklıkla kullanılan parametrelerdendir. Her iki mıknatıslanma da örneğe dışarıdan uygulanan bir alan ile kazandırılır. ARM ölçümlerinde genellikle yermağnetik alan şiddetine yakın değerlerde bir dış alan ve artan alternatif magnetik alan varlığında örneğe kalıntı mıknatıslanma kazandırılır. ARM şiddetinin uygulanan dış alana oranı ile ARM duyarlılığı ( $\chi_{ARM}$ )

**Çizelge 1.** Çevre magnetizmasında kullanılan magnetik parametreler

**Table 1.** The magnetic parameters used in environmental magnetism

Parametre	Belirteç
$\chi$ ( $m^3/kg$ ): mıknatıslanma katsayısı	ferrimağnetik tane yoğunluğu
SIRM= $M_{TS}$ ( $Am^{-1}$ veya $Am^2kg^{-1}$ ): doymuş kalıntı mıknatıslanma	mağnetik mineral yoğunluğu, tane boyu
ARM ( $Am^{-1}$ veya $Am^2kg^{-1}$ ): anhisteretik kalıntı mıknatıslanma	tek domenli ferrimağnetik mineral yoğunluğu
$\chi_{ARM}$ : ARM duyarlılığı	tek domenli ferrimağnetik tanelerin yoğunluğu
$M_s$ ( $Am^{-1}$ veya $Am^2kg^{-1}$ ): doymuş mıknatıslanma	mağnetik mineral yoğunluğu
$B_{cr}$ (mT): kalıntı koersif kuvvet	tane boyu, mineroloji
$B_c$ (mT): kalıntı kuvvet	tane boyu, mineroloji
$T_C$ ( $^{\circ}C$ ): Curie sıcaklığı	mineroloji
$T_M$ ( $^{\circ}C$ ): Morin geçiş sıcaklığı	mineroloji (hematit)
$T_V$ ( $^{\circ}C$ ): Verwey geçiş sıcaklığı	mineroloji (mağnetit)
<b>Oranlar</b>	
$\chi_{fd}$ (%): frekansa bağlı mıknatıslanma katsayısı	tane boyu
$M_{TS}/M_s$ ve $B_{cr}/B_c$ : day diyagramı	tane boyu ( özellikle titano-mağnetit için)
S-oranı	mineroloji (ferrimağnetik)
HIRM	mineroloji (antiferromağnetik)
$\chi_{ARM}/\chi$	tane boyu
ARM/SIRM	tane boyu, tek domenli ferrimağnetik mineral yoğunluğu
SIRM/ $\chi$	mağnetik mineral yoğunluğu, tane boyu, mineroloji

hesaplanır. ARM duyarlılığı her bir sabit (bias) alana karşı ARM değerinin oranıdır (Evens ve Heller, 2003). ARM magnetik tane boyu ile çok net bir ilişki

gösterir (King ve diğ., 1982; Maher, 1988). Tane boyu 0.02-0.4  $\mu m$  aralığında duraylı tek domenli ferrimağnetik tanelerin varlığını belirlemek için

oldukça kullanışlı bir parametredir. Bu değerlerin altında ve üstünde tane boylarına sahip olan ferri-mağnetik minerallerde  $\chi_{ARM}$  değeri belirgin bir düşüş göstermektedir. Bundan dolayı bu parametre kararlı tek domenli ferrimağnetik mineral yoğunluğunu belirlemek için kullanılır (Walden ve diğ., 1999).  $\chi_{ARM}$  özellikle küçük tanelerin (tek domenli- yalancı tek domenli taneler) varlığında oldukça duyarlı iken  $\chi$  ise genellikle kaba tanelerin varlığında daha duyarlıdır. Bundan dolayı, bu iki parametrenin oranı tane boyu belirteci olarak oldukça kullanışlıdır (Banerjee ve diğ., 1981; King ve diğ., 1982; 1983).

IRM, oda sıcaklığında bulunan bir örneğe sabit bir alan altında kalıntı mıknatıslanma kazandırılmasıdır. Uygulanan alanın şiddetinin artmasıyla örnek mıknatıslanana kadar mağnetizasyonu da artar. Örneğin mıknatıslanmasının değişmediği noktada doymuş mıknatıslanma değerine ulaşılır. Bu maksimum eş-ısı kalıntı mıknatıslanma değerine Doymuş Eş-Isıl Kalıntı Mıknatıslanma (SIRM) denir. Uygulanan alanın sürekli olarak yükseltilmesi ve azaltılması sonucu oluşan döngüye de Histerezis döngüsü denir. Bu döngüde mıknatıslanmanın sıfır olduğu alana koersif alan ( $H_c$ ) ve sıfır mıknatıslanmanın kalıntı olduğu alana ise kalıntı koersivite ( $H_{cr}$ ) adı verilir. Bu döngüden elde edilen histerezis parametreleri, mağnetit-titanomağnetit minerallerinin baskın olması durumunda mağnetik minerallerin tane boyunu verir (Day ve diğ., 1977). Mağnetit gibi ferrimağnetik mineraller 0.3 T altında doyunluğa ulaşırlarken hematit gibi antiferromağnetik mineraller ise 2.5 T değerindeki alanlarda doyunluğa ulaşırlar (Verosub ve Roberts, 1995). Minerallerdeki bu farklılık S-oranı olarak adlandırılan parametrenin de temelini oluşturur. S-oranı ( $IRM_{-300nT}/SIRM$ ), düşük koersiviteye sahip ferrimağnetik mineralleri (mağnetit, greigide, maghemit) yüksek koersiviteye sahip antiferromağnetik minerallerden (hematit ve gotit) ayıran bir parametredir (Bloemendal ve diğ., 1992). Mineral kompozisyonunu belirlemek için oldukça kullanışlı bir orandır. Örneğin içindeki

mağnetik minerolojiye bağlı olarak değişir. -1 ile +1 arasında değişen bir değerdir. 1'e yakın olması ferri-mağnetik minerallerin baskın olması anlamına gelir. Antiferromağnetik minerallerin artması ile bu oran azalır.  $(SIRM+IRM_{-300nT})/2$  formülü ile hesaplanan HIRM parametresi ise örnek içerisindeki yüksek koersiviteye sahip mağnetik minerallerin varlığını veren bir parametredir (Bloemendal ve diğ., 1992)

## ÇEVRE MAĞNETİZMASININ UYGULAMA ALANLARI:

### Paleoiklim

Sedimanlar, göl ve deniz tabanında, lös ve paleosollerin biriktiği karalar üzerinde depolanırlar ve bunlar geçmiş iklim değişimlerinin bir kaydını taşırlar. Paleoiklim ile ilgili jeolojik bilgi, küresel sıcaklıklardaki değişimi içerir. Bu sıcaklık değişimi buz kütlelerinde önemli bir değişime sebep olduğundan, deniz suyu sıcaklığını, yağışı, rüzgarın hızını, şiddetini ve yönünü değiştirir. Geçmiş iklim değişimlerinin anlaşılması insan etkisi ile tetiklenmiş ya da gerçekleştirilmiş iklimsel değişimlerin anlaşılmasına da dayanak sağlar. Başka bir deyişle, geçmiş iklim değişimlerini anlamamız bugünkü iklim değişimlerinin doğal kaynaklı mı yoksa antropojen bir kaynakla mı oluştuğu sorusunu yanıtlamamızı sağlar (Reynolds ve King, 1995).

Deniz, göl ve lös-paleosol istifindeki paleoiklim değişimleri için belirteçler (proxy) sağlayan özelliklerden biri de mağnetik özelliklerdir. Mağnetik mineraller hemen hemen bütün doğal materyallerde bulunur. Taşınma, erozyon ve aşınmayı etkileyen bir çok iklim süreci, doğal materyallerde bulunan bu mağnetik minerallerin konsantrasyonu, boyutu ve minerolojisi üzerinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir. Bundan dolayı mağnetik özellikler paleoiklim çalışmalarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu özellikler mağnetik minerallerin tane boyutlarının (domen yapıları), konsantrasyonlarının ve kompozisyonlarının değişimini yansıtır. Bu özelliklerin kullanıldığı Çevre Mağnetizması

çalışmaları küresel veya bölgesel iklim değişimlerinin araştırılmasında çok önemli bir rol oynar (Banerjee, 1994). Çevre Mağnetizması çalışmalarından elde edilen yüksek çözünürlüklü ve yüksek duyarlı magnetik kayıtlar "Milankoviç Teorisi" gibi iklim değişimlerinin sebebini ortaya koyan teorileri test etmek için kullanılırlar (Berger, 1988). Magnetik kayıtlar ayrıca sediman istifi ile gözlemlenen buzul-buzul arası terslemelerin bulunmasında, farklı zamanlarda ve ortamlardaki iklim etkisi ile meydana gelen biyolojik ve inorganik değişimlerin yorumlanmasında, okyanusal ve karasal iklim döngülerinin karşılaştırılmasında oldukça önemli belirteçler sağlar. Bu karşılaştırmalar denizel ve kıtasal ortamlardaki farklı sorulara yanıt bulmamızı ve böylelikle iklimsel değişimlerin zamanını ve sürecini anlamamızı sağlamaktadır.

Paleoiklim araştırmalarında çevre mağnetizması çalışmalarının başarılı olması için üç etken vardır. İlki, uzaysal boyutta fiziksel-ekolojik sistem doğru olarak tanımlanmalıdır. Örneğin, bir gölün plaeo-evrimi ile ilgili bilgiye ulaşılmak isteniyorsa bunun için uygun uzaysal boyut göl ve etrafındaki alandır. Küresel bir perspektifte bakılmak isteniyorsa, rüzgar sistemlerinin, akıntıların ve buzul tabakalarının etkisi altında kalan ve bundan dolayı küresel ölçekteki değişimlere duyarlı olan denizel alanlar uygun ortamlar olacaktır. İkinci olarak, sediman istiflerinin kronolojik olarak doğru belirlenmesi süreçlerin zamansal değişimlerini ortaya koymak için oldukça kritiktir. Farklı yaşlandırma tekniklerinin (radyometrik, izotopik, bio-magnetostratigrafik vd.) bir arada kullanılması ile doğru kronolojinin belirlenmesi gerekmektedir. Son olarak sedimanların birikme oranlarının bilinmesi de oldukça önemlidir. Çok hızlı biriken sedimanlar sadece birkaç yüzyıllık periyot ile iklim değişimlerini karakterize etmek için kullanılabilirler. İklimsel birikimlerin oluşturduğu sedimanlar (varved) paleoiklim problemlerinin çözümünü için yüksek çözünürlüklü magnetik özelliklerin çalışılmasında büyük fırsatlar sunar (Reynolds

ve King, 1995).

Özellikle Çin'de yaygın olarak bulunan lös-paleosol depoları iklim değişimlerinin en önemli kayıtlarıdır. Kalınlığı birkaç metreden 200 metreye kadar uzanan lös depoları son 1-2 milyon yıl içerisinde çevre koşullarını adeta bir bilgisayar diski gibi kaydetmişlerdir. Alaska, Belçika, Çin, Almanya ve ABD de yapılan mıknaşlanma katsayısı ölçümleri ile lös depoları içinde paleosol horizonları bulunduğu tespit edilmiştir. Heller ve Liu (1984)'nin yapmış olduğu çalışma lös depoları üzerine yapılan ilk paleomağnetizma çalışmasıdır. Bu çalışma sonucunda bu istiflerinin temelini 2.5 my olduğu ortaya koyulmuştur. Heller ve Liu'nun başlattığı çalışmalar sonucunda paleosollerde doğal kalıntı mıknaşlanma ve mıknaşlanma katsayısı değerleri rölatif olarak yüksek bulunurken, lös seviyelerinde ise bu değerlerin düşük olduğu daha sonra yapılan çalışmalarla da kanıtlanmıştır (Evens ve Heller 1994; Maher ve Thompson, 1995).

### Göl Araştırmaları

Çevre mağnetizması çalışmaları kapsamında iklim değişimleri, sediman depolanması-taşınması, bölgesel volkanik aktivite, paleo-çevre analizlerinin yapılabilmesi için göl sedimanları çok kullanışlı bilgiler içerir. Bu amaçla, göllerin çevre mağnetizmasının çalışıldığı birçok yayın literatürü zenginleştirmiştir. Göl sedimanlarının çevre mağnetizması ile ilgili çalışmalar Ising (1943) tarafından İsviçre'deki bir gölden toplanan sedimanlarının doğal kalıntı mıknaşlanmalarının ve magnetik duyarlılığının ölçümü ile başlamıştır. Daha sonra yine *İsviçre'de bulunan Zug Gölü sedimanlarının mıknaşlanma katsayılarının derinlikle değiştiği ve bu değişimin hızlı ve kesin olarak ölçülebileceği* ortaya koyulmuştur (Thompson, 1974).

Thompson ve diğ., (1975), İngiltere'de bulunan Neagh Gölü'nden alınan sedimanların magnetik özelliklerini ölçerek karot korelasyonu ve sedi-

manların mıknatıslanma katsayıları ile kimyasal ve biyolojik karakterlerini karşılaştırmışlardır. Mıknatıslanma katsayısı kayıtları ile karotları tahrip etmeden karşılaştırma yapılabileceğini ve inorganik malzemeler ile mıknatıslanma katsayısı arasında pozitif bir uyum olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, sedimanlardaki baskın mağnetik mineralin detrital titanomağnetit olduğunu ortaya koymuşlardır.

Avrupa'da bulunan Holosen yaşlı göl sedimanlarının mağnetik kayıtları iki farklı tipte mıknatıslanma katsayısı eğilimi göstermektedir (Dearing, 1979; Thompson ve diğ., 1980). Bunlardan ilki, geç-buzul ve erken Holosen dönemi boyunca yüksek olan değerlerin sediman yüzeyi boyunca düşüş gösterdiği, ikincisi ise sediman yüzeyi boyunca artan ancak orta-geç Holosen boyunca düşük değerlere sahip olan eğilimdir.

Göl sedimanları kullanılarak elde edilen mıknatıslanma katsayısı eğrileri ile polen kayıtlarının karşılaştırıldığı bir çok çalışma, mıknatıslanma katsayısı değerlerinin *Graminae* (buğdaygiller) polen kayıtları (Thompson ve diğ., 1975; Dickson ve diğ., 1978; Thompson ve Edwards, 1982; Higgitt ve diğ., 1991) ve otsul polen kayıtları (Zolitschka, 1998) ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Rosenbaum ve diğ., (1996) çalışmalarında Güney Oregon'daki buzul olmayan bir göl basenindeki küçük bir gölden (Buck Lake) aldıkları sediman örneklerinden polen kayıtları ile mağnetik kayıtların çok iyi karşılaştırıldığını göstermişlerdir. Çalışma sonucunda yüksek mıknatıslanma katsayısı ve mağnetit mineral miktarının iki soğuk iklim zonu ile, buna karşılık düşük mıknatıslanma katsayısı ve hematitin bağlı yüksek miktarının iki sıcak iklim zonu ile karakterize edildiğini ortaya koymuşlardır.

Dünyanın birçok farklı gölünden toplanan sedimanların çevre mağnetizması çalışmaları sonucunda, buzul dönemlerde depolanan sedimanların mıknatıslanma katsayısı değerlerinin yüksek, buzul arası sıcak dönemlerde depolanan sedimanların ise düşük mıknatıslanma katsayısına sahip

olduğu belirlenmiştir. Buzul dönemde ölçülen mıknatıslanma katsayısı değerleri, detritik sedimantasyonun bir sonucu olarak klastik sedimanlar tarafından kontrol edilmekte ve mağnetik mineral yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı yüksek değerlere sahip olmaktadır. Ancak, buzul arası sıcak dönemlerde ölçülen mıknatıslanma katsayısı değerleri ise organik sedimantasyonun yüksek olmasından dolayı düşük mağnetik mineral yoğunluğu ile ilişkili olarak düşük değerlere sahiptir. Yine bu çalışmalardan elde edilen önemli bir bilgi de, buzul dönemlerde baskın mağnetik minerallerin düşük koersiviteli mağnetit, titanomağnetit gibi detritik ferrimağnetik mineraller olduğu buzul arası dönemlerde ise yüksek koersiviteli hematit, geotit gibi antiferromağnetik minerallerin baskın olduğudur (Thouveny ve diğ., 1994; Peck ve King, 1996; Ahlberg ve diğ., 1996; Vlag ve diğ., 1997; Nolan ve diğ., 1999; Inoue ve diğ., 2004). Güney Illinois'teki Kettle Gölü'nde yapılan bir çalışma kapsamında ölçülen mağnetik analizler sonucunda, buzul dönemine ait sedimanların detritik kaynaklı olan kaba taneli mağnetik mineraller içerdiklerini buna karşılık buzul arası örneklerin ise ince taneli mağnetik mineraller içerdiği belirlenmiştir (Geiss ve Banerjee, 1997).

Dearing ve diğ. (1998), Baykal Gölü'nden (Sibirya) <sup>210</sup>Pb yöntemi ile yaşlandırılan altı adet gravite karotunun mağnetik özelliklerini ölçerek greigit minerali, bakteriyel magnetosom ve türbiditlerin bazı seviyelerdeki sedimanların mağnetik özelliklerini etkilediklerini göstermişler. Ayrıca, farklı havzalarda ve uzak mesafelerde bulunan güncel sedimanlardan elde edilen mağnetik veriler arasındaki korelasyonun sağlıklı olmayacağını söylemişlerdir.

Kuzey İngiltere'deki Hawes ve Cunswick Göllerinde yapılan çevre mağnetizması ve jeokimya çalışması sonucunda, göl sedimanlarının mağnetik mineral toplarımlarının diyajenik karbonat sedimanlarını karakterize eden düşük yoğunluklu ince ferrimağnetik tanelerden oluştuğunu ortaya koyul-



muştur (Nolan ve diğ.,1999).

Kuzey İsveç'te bulunan 9000 yıllık-varırlı Sarsjön Gölü sedimanlarında yapılan detaylı mağnetik ölçümler, bu göldeki ferrimağnetik mineral yoğunluğunun organik madde yoğunluğu ile pozitif bir uyuma sahip olduğunu ve bu ferrimağnetik mineral yoğunluğunun mağnetotaktik bakterilerden oluşan tek donemli mağnetitten kaynaklandığını göstermektedir (Snowball ve diğ., 1999).

Negrini ve diğ., (2000), Amerika'da bulunan Summer Gölü sedimanlarının geçmiş 250.000 yıllık paleoklim kayıtlarını ortaya koymak için mağnetik belirteçlerden yararlanmışlardır. İki karot ile paleomağnetik seküler değişim, çevre mağnetizması, tefra kronolojisi ve litostratigrafi temeline dayanan bir korelasyon yapmışlardır. Sedimanların mağnetik minerolojisinin yalancı tek domenli (titano) mağnetit olduğunu ve yüksek/düşük mağnetit yoğunluğunun yüksek/düşük göl suyu seviyesi ile ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Yüksek toplam organik karbon içeriği ile düşük mağnetit yoğunluğu arasında uyum olduğu da ortaya koyulmuştur.

Geiss ve diğ., (2003), Minnesota'da bulunan farklı göllerden aldıkları karotların detaylı mağnetik analizini yaptıkları çalışma ile Holosen iklim değişimi boyunca meydana gelen orman-bozkır geçiş sistemini incelemişlerdir. Orman alanlarının geliştiği dönemlerde düşük yoğunluklu diyajenik mağnetik minerallerin ortaya çıktığını bulmuşlardır.

2000'li yılların başlamasıyla birlikte göllerde çok-disiplinli çalışmalar başlamış ve farklı belirteçler birlikte incelenerek göllerle ilgili problemlerin yorumu yapılmıştır. Özellikle, farklı göllerden veya aynı gölden alınan karotların korelasyonunun yapılması ve kaynak alanların belirlenmesi çalışmalarında yapılan mağnetik analizler oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Metrelerce uzunluktaki göl karotlarının ölçümünde oldukça ucuz ve hızlı sonuç veren ölçümler olmasından dolayı mağnetik analizler çok disiplinli çalışmalarda önemli bir belirteç olarak yerini almıştır. Mıknatıslanma kat-

sayısının, organik karbon ve <sup>18</sup>O verileri ile olan yüksek uyumu ( Rao ve diğ., 2010; Nowaczyk ve diğ.,2007) göl çalışmalarında mağnetik özelliklerin önemini daha da arttırmıştır.

Sibirya'da bulunan El'gygytgyn Gölü sedimanlarının mıknatıslanma katsayısı, toplam organik karbon, biyogenik silika ve TiO<sub>2</sub> analizlerinin yapıldığı çok-disiplinli bir çalışma kapsamında oksik koşulların mağnetiti iyi bir şekilde koruduğu ve düşük toplam organik karbonun yüksek mıknatıslanma katsayısına karşılık geldiği belirlenmiş ve anoksik koşullarda mağnetitin çözülmesine bağlı olarak düşük mıknatıslanma katsayısı değerleri ile organik maddenin çok iyi korunmasından dolayı da yüksek toplam organik madde ölçülmüştür (Nowaczyk ve diğ., 2007).

Haltia-Hovi ve diğ. (2010), Finlandiya'da Lehmilampi Gölü sedimanlarının Holosen boyunca mağnetik özelliklerini çalışarak gölün çevresel değişimlerini ortaya koymuşlardır. Mağnetik minerolojinin karot boyunca mağnetit olarak yorumlanan ferrimağnetik minerallerce baskın olduğunu bunun yanında çok az miktarda antiferromagnetik minerallerin bulunduğunu ortaya koymuşlardır. Mağnetik mineral değişimlerinin sediman litolojisi ve toplam organik karbon değerleri ile uyumlu bulunduğu bu çalışmada bakteriyel üretim sonucunda meydana gelen magnetosomların varlığını ve bu magnetosomların iklim kontrollü oluştuğunu göstermişlerdir.

Göl sedimanlarının çevre mağnetizması çalışmalarında zamansal karşılaştırma için paleomağnetik kayıtlar sıkça kullanılmakta ve mağnetik analizlerin yanında paleomağnetik analizler de eş zamanlı olarak yapılmaktadır. Göl sedimanlarında paleomağnetik verilerin yaş tayininde kullanıldığı çalışmalar Mackereth (1971)'in, Windemere Gölü (İngiltere) sedimanlarının mağnetik özelliklerini çalışmasıyla başlamıştır. Bu bölge içerisinde bulunan Neagh Gölü'nün yaz boyunca sığlaşması ve otrofikasyona başlaması araştırmacıların dikkatini çekmiş, bu değişimin doğal mı yoksa insan etkisiyle

mi meydana geldiğini araştırmak için fosil diatom ve radyokarbon analizleri yapılmıştır. Ancak sedimanları yaşlandırmak için radyokarbon yöntemi sonuç vermemiştir. Mackereth'in Windermere sedimanları üzerinde yapmış olduğu paleomağnetik seküler değişimler ile bu yaşlandırma problemi çözülmüştür. Göl sedimanlarının paleomağnetik kayıtları özellikle Windermere Gölü gibi yaşlandırma problemlerine sahip göllerde çok iyi sonuçlar vermiş ve konu ile ilgili yaygınlaşan çalışmalar ile bölgesel ölçekte korelasyon yapmaya elverişli Paleomağnetik Seküler Değişim (PSV) eğrileri belirlenmiştir.

Günümüzde da hala devam etmekte olan Okyanus Sondaj Programı (ODP-Ocean Drilling Program) ve Uluslararası Kıta Sondaj Programı (ICDP-International Continental Drilling Program) kapsamında dünya üzerinde birçok farklı bölgeden alınan karotların çalışıldığı çok-disiplinli araştırmalarda mağnetik özelliklerinin ölçümü oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmalardan elde edilen mağnetik sonuçlar özellikle karotların korelasyonunda oldukça güçlü sonuçlar vermektedir.

### **Diyajenetik Süreçlerin Araştırılması**

Paleomağnetik kayıtlardaki demir sülfürün diyajenezi uzun yıllardan beri ilgili çalışmaların konusu olmuştur. Organik madde girişinin ve sedimantasyon hızının yüksek olduğu anoksik ortamlarla ilgili yapılan çalışmalar organik maddenin oksidasyonu süresince demir ve sülfat redüksiyonunun olduğunu göstermiştir (Karlin ve Levi., 1983).

Denizel ve gölsel sedimanlardaki mağnetitin diyajenezi bir çok çalışmanın konusu olmuştur (Bloemendal ve diğ., 1992; Karlin, 1990a ve 1990b; Snowball ve Thompson, 1990; 1988; Anderson ve Rippey, 1988). Denizel sedimanlarda redüksiyonun son ürünü olarak pirit oluşurken sülfat yoğunluğunun düşük olduğu göl sedimanlarında ise greigit oluşmaktadır (King ve Channell, 1991). Diyajenez sonucunda; mağnetik mineral yoğunluğunda (c, ARM, SIRM) azalma, mağnetik mineral boyutun-

da (ARM/c, SIRM/c, SIRM/ARM) ve mağnetik mineralojide (düşük mağnetit yoğunluğuna karşı yüksek antiferromağnetik içerik) önemli değişimler olmaktadır (Bloemendal ve diğ., 1992).

Mağnetitin diyajenezinin olduğu sedimanlar mağnetostratigrafi ve paleoşiddet çalışmaları için uygun değildir (Bloemendal ve diğ., 1992). Bundan dolayı bu süreçlerin iyi bir şekilde araştırılması ve belirlenmesi verilerin kalitesi ve sonuçların yorumu açısından oldukça kritiktir.

### **Kirlilik Araştırmaları**

Çevre kirliliği, bütün canlıların sağlığını olumsuz yönde etkileyen, cansız çevre varlıkları üzerinde ciddi zararlar meydana getiren ve onların niceliklerini bozan yabancı maddelerin, hava, su ve toprağa yoğun bir şekilde karışması olayıdır (Çepel, 2003). Sanayinin gelişmesi ile birlikte artan çevre sorunlarının çözümüne dair farklı disiplinler tarafından gerçekleştirilen araştırmalar öncelikli araştırma konuları olarak yapılmaktadır.

Çevre mağnetizması kapsamında zeminlerin mağnetik özellikleri ile ilgili çalışmalar Le Borgne (1960) ile başlamış ve daha sonra birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmalarda toprak oluşumu (pedojenez) süresince mağnetik mineral oluşumları ile yangın, iklim ve litoloji arasındaki ilişkiler incelenmiştir. 1990'larda Güney Polonya'da, Orta Avrupa'da ve Kuzey İngiltere'de yapılan çalışmalarda sanayileşmenin ve kentleşmenin olduğu alanlara yakın yerlerde yüksek mıknatıslanma katsayısı değerleri bulunmuştur (Strzyszczyk ve Magiera, 1998; Kapička ve diğ., 1999; Dearing ve diğ., 1996, Hay ve diğ., 1997). Son yıllarda çevre mağnetizması kapsamında, dünyanın bir çok büyük şehrinde mağnetik ölçüm temeline dayanan kirliliğin görüntülenmesi çalışmaları oldukça hız kazanmıştır (Hay ve diğ., 1997; Bityukova ve diğ., 1999; Magiera ve diğ., 2003; Rothwell ve Lindsay, 2007; Qiao ve diğ., 2011; Xia ve diğ., 2011). Jeokimya ve mağnetik analizlerin

bir arada yapıldığı bu çalışmalarda, toprak, bataklık sedimanları, toz ve yaprak örnekleri gibi oldukça geniş bir yelpazede örneklerin mağnetik özellikleri ölçülerek uzaysal ve zamansal olarak ağır metal kirliliğinin belirlenmesinde mağnetik parametrelerin (mıknatıslanma katsayısı) güçlü bir belirteç olarak kullanabileceğini göstermiştir.

Topraktaki mağnetik minerallerin oluşmasında, toprağın oluşum süreci ve sonradan geçirmiş olduğu değişimler önemli bir rol oynar. Bu değişimler rüzgar, erozyon veya biyolojik etkenler gibi farklı fiziksel ve kimyasal etkenlerle olur. Zeminlerdeki mağnetik mineraller litojenik kökenli olarak ana kayadan türeyerek veya taşlaşma sonucu yerinde oluşabilir. Ayrıca rüzgâr ve sel gibi doğal olaylarla ya da endüstriyel ve trafik tozları gibi antropojen etkilerle atmosferde depolanan materyaller de zeminlerdeki mağnetik mineral yoğunluğuna önemli bir katkı yapar. Çelik ve çimento ve en önemlisi taşkömürü üretimi gibi birçok endüstriyel işlem toz halinde uçuşan mağnetik (demiroksit) partiküller oluşturur. Bu mağnetik partiküller toplam toz miktarının çok az bir bölümünü oluşturmaktadır, ancak sağlığı tehdit eden riske sahip olduğuna dair kanıtlar mevcuttur (Garçon ve diğ., 2000). Yaklaşık % 98 verimlilikle çalışan elektro-filtrelerle bile, tek bir 100-mW tesiste yaklaşık her saat 2 ton uçucu kül atmosfere yayılır ve meteorolojik şartlara bağlı olarak partiküller yüzeye inmeden önce yüzlerce kilometre ilerleyebilirler (Evens ve Heller 2003). Ağaçlardaki ve binalardaki mağnetik madde miktarı bu kirlenici kaynaklara olan uzaklığına göre değişir (Flanders, 1994). Bu mağnetik özelliklerin ayrıntılı olarak ortaya konması sonucu, antropojenik yani insanlar tarafından oluşturulan çevre kirliliği (sanayi atıkları, ağır metal kirlenmesi, otoyol trafiği vb.) ile litojenik etkiler duyarlı bir şekilde ayırt edilebilmektedir (Petrovsky ve diğ., 2000).

### Sediman Hareketleri

Mağnetik ölçümler erozyon ile taşınan mal-

zemenin kaynağını bulmada ve taşınmanın izlenmesinde de kullanılabilir. Bu tip ölçümler, 1970'li yılların ortalarından beri, tarım alanlarında, akarsularda, kıyılarda, göllerde ve baraj göllerinde sürdürülmektedir. Erozyona uğramamış topraklarda yapılan yüzeysel mağnetik ölçüm değerleri yüksek çıkmaktadır. Erozyonla taşınan üst toprağın yerine gelen alt horizonlara ait topraklar mağnetik ölçümlerdeki değerlerin azalmasına neden olur. Böylece, nispeten düşük mıknatıslanma katsayısına sahip topraklar kuşaklar halinde ortaya çıkar ve erozyonun nerede daha yoğun olduğu bu yöntemle saptanabilir. Bununla beraber taşkınlar ve ana kayanın mağnetik özelliklerinin büyük değişkenlik gösterdiği yerlerde bu ölçümler sağlıklı yapılamaz. Mağnetik mıknatıslanma katsayısı ölçümleri ile sedimanların nereden geldiği de bulunabilir. Bu ölçümlerde aynı boyuttaki materyalden alınan örnekte saptanan veriler ile farklı ana kaya özellikleri ayırt edilebilir fakat ana kaya özellikleri iyi araştırılmalıdır. Çünkü bazaltik bir dayk veya maden yatağı gibi yüksek mağnetik değerlere sahip alanlar farklı değerler saptanmasına neden olurlar.

Doğal göllerde olduğu kadar baraj göllerinde de erozyonun oluştuğu havzaya ait bilgiler sedimanların içinde bulunmaktadır. Mağnetik mıknatıslanma katsayısı ölçümleri ile sedimanlar ve erozyon süreci arasındaki bağıntılar değişik yollarla yapılabilir. Bunlardan biri organik sedimanların mağnetik ölçümleri ile mineralojik içerikteki değişimin belirlenmesidir. Bu yolla erozyon sürecinde giderek değişen minerojen madde oranı grafik haline dönüştürülür. İkinci bir korelasyon yolu ise değişen erozyon şiddeti ve sediman taşınmasının göl yataklarına getirdiği değişik partiküllerdir. Akarsuların ve erozyonun güçlü olduğu dönemlerde, gölün orta kısmına normalden daha iri boyutta materyal ulaşabilir. Özellikle volkanik bir alandan gelen silt ve ince kum gibi partiküller çok yüksek mağnetik mıknatıslanma katsayısı değerlerine sahip olacaktır. Böylece erozyonun şiddetlendiği dönemler bu yolla

saptanabilir (Thompson ve diğ.,1975).

### **Biyolojik Materyallerin Araştırılması**

Biyolojik malzemelerin mağnetik özelliğinin çalışıldığı biyomağnetizma disiplini son yıllarda çevre mağnetizması çalışmalarında hız kazanmıştır. Çeşitli organizmalar ve bakteriler tarafından üretilen mağnetik mineraller doğal çevre ve canlı içerisinde oldukça yaygın olarak bulunmaktadır ve mağnetik bilgi için önemli bir kaynak sağlamaktadırlar. Konu ile ilgili çalışmalar iki temel başlık altında toplanmıştır. Bunlardan ilki doğal çevre içerisinde bulunan mağnetik bakterilerin (mağnetotaktik bakteri) araştırılması diğeri ise canlı dokularında bulunan mağnetit mineralinin araştırılması üzerinedir. Biyomağnetizma ile ilgili yapılan ilk çalışmalar, magnetotaktik bakterilerin kökenini ve bunların mağnetik yöntemlerle belirlenebileceği üzerinedir. Göl ve denizel sedimanlarda yapılan çalışmalarda bulunan bu mağnetotaktik bakteriler belli bir yönde dizilim gösteren magnetosom zincirlerine sahiptir ve bu magnetosomların her biri mağnetit kristallerinden oluşmaktadırlar. Bu durum bakterilerin ölümünden sonra da kalıntı mıknatıslanma taşıdığını desteklemektedir (Blakemore, 1975; Stolz ve diğ., 1986; Moskowitz ve diğ., 1988; Chasteen ve Harrison, 1999; Waniewska ve diğ., 2004). Göl ve deniz sedimanlarının dışında toprakta da mağnetik bakterilerin varlığı belirlenmiştir (Fassbinder ve diğ., 1990). Duyarlılığı oldukça yüksek olan manyetometrelerin (cryogenic magnetometer) gelişmesi ile birlikte, insan dokuları üzerine mağnetik ölçümler yapılmaya başlanmış ve bu dokularda ferrimağnetik materyallerin varlığı belirlenmiştir (Kirschvink ve diğ., 1992). Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda kanserli ve epilepsi hücrelerinde de mağnetit mineralinin varlığı gösterilmiştir (Dobson, 2001; Brem ve diğ., 2005).

### **Arkeoloji Araştırmaları**

Uzun zamandan beri, mağnetik araştırmalar, arkeoloji ve jeofizik çalışmalar arasında önemli bir kaynak olmuştur. Konu ile ilgili ilk çalışmalar yer-mağnetik alan kayıtlarını ortaya çıkarmak amacıyla yapılan arkeomağnetik çalışmaları içermektedir (Folgerhaiter, 1899). Özellikle seramik örneklerde, antropojenik yanma süreçlerinin belirlenmesinde önemli bir yere sahip olan TRM (Isıl Kalıntı Mıknatıslanma) ölçümlerinin yaygınlaşmasıyla, yermağnetik alanının zamansal değişimlerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Le Borgne'nun (1960) zeminlerin mağnetik mıknatıslanma katsayısı üzerine yapmış olduğu çalışmalarla birlikte, arkeolojik alanlarda zeminlerin mağnetik özellikleri incelenmeye başlanmış ve böylelikle, birbiri içine geçmiş olan arkeoloji ve çevre problemlerinin çözümünde yeni yaklaşımlar gelişmiştir. Bu bağlamda, arkeolojik alanlardaki tabakaların insan-çevre yorumunda mağnetik mineral analizlerini içeren toprak mağnetizması (soil magnetism) gelişmiştir. Konu ile ilgili ilk çalışmalar arkeolojik alanlardan elde edilen mağnetik anomalilerin ana kayadan olup olmadığının belirlenmesi üzerine yapılmıştır.

Britanya'da yapılan bir çalışmada (Le Borgne, 1955), zemin profilinin ilk birkaç santimetresinde ana kayadan daha yüksek mıknatıslanma katsayısı değerleri bulunmuş ve bu yüksek değerlerinin ana kayadan bağımsız olarak oluştuğu düşünülmüştür. İlk başlarda yazar, nemli ve kuru koşullara gereksinim duyan fermantasyon süreçlerinin üst zemindeki bu değişime neden olduğunu düşünmüştür. Ancak daha sonra, yanma etkilerinin de önemli olabileceğini dikkate almıştır. Her iki mekanizmada, son ürün olarak düşük mağnetik şiddetli hematitten, güçlü mağnetik özelliğe sahip maghemit gibi mineraller oluşmaktadır. Zemin nemli olduğu zaman veya vejetasyonla örtülü zeminler yandığı zaman, anaerobik (oksijensiz) koşullar hüküm sürmekte ve hematit mağnetite indirgenmektedir. Daha sonra meydana gelen kuruma veya soğuma durumundaki aerobik (oksijenli) koşullarda, reoksidasyon sonu-

cu maghemit oluşumu gözlemlenmiştir.

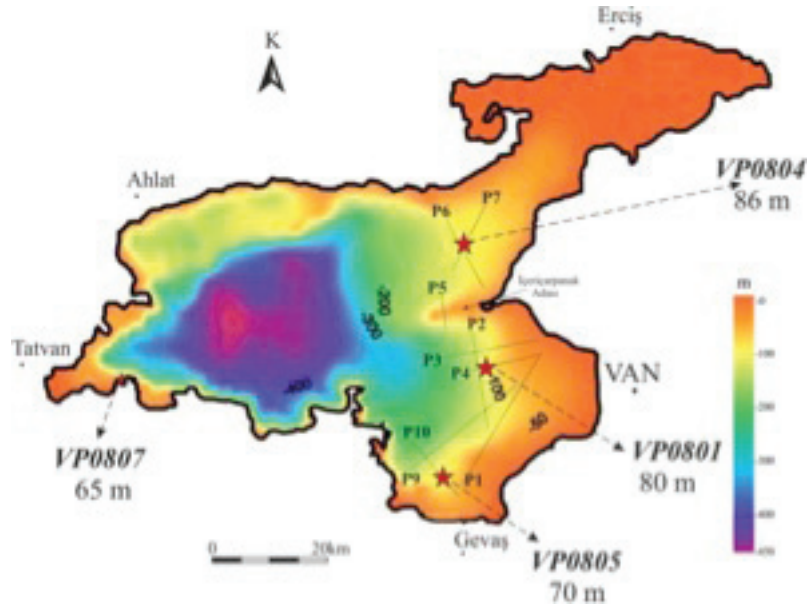
Peters ve Thompson (1998 b), İskoçya'da bulunan arkeolojik bir yerleşmede yaptıkları çalışmada ölçtükleri yüksek mıknatıslanma katsayısı değerlerinin maghemit ve maghemitin süperparamagnetik tanelerinin yanması sonucu oluştuğunu göstermişlerdir. Bulgaristan'da 60 adet yanmış zemin üzerinde yapılan bir çalışmada (Jordonova ve diğ., 2001) magnetik mineral zenginleşmeleri bulunmuş bundan sorumlu magnetik minerallerin çoğunun süperparamagnetik olmak üzere magnetit (düşük Ti oranı ile) mineralinin olduğu sonucuna varmışlardır.

Bir diğer arkeolojik alanda yapılan önemli bir çalışmada, Bronz Çağı yanmış bir toprak yığınının ölçümler sonucunda, yüksek mıknatıslanma katsayısı değerlerinin 4 m. çapında yanmış odunların bulunduğu halka şeklinde olan seviyelerden kaynaklandığı bulunmuştur. Bu geniş şekil, bir ölü yakma ritüeli kapsamında yapılan bir ayin ile ilişkilendirilmiş ve dönem ile ilgili yapılan arkeolojik çalışmalarda da bu gibi ritüellerin oldukça yaygın olarak yapıldığını destekleyen sonuçlar bulunmuştur (Marshall, 1998).

Arkeolojik alanlardaki magnetik mineral zenginleşmesi herhangi bir litojenik magnetit girdisi ya da yanma süreçleri olmadan da gerçekleşebilir (Fassbinder ve Stanjek, 1994). Vilsbiburg'a (Bavaria) yakın neolitik bir alanda yapılan düşey yönlü detaylı örneklemede bazı seviyelerde belirgin bir şekilde mıknatıslanma katsayısı artışı gözlenmiş ve bu seviyeden alınan örneklerin termal analizleri sonucunda elde edilen Curie nokta değeri ve Verwey geçişi magnetit mineralinin varlığını göstermiştir. Ayrıca, elektron mikroskopu ile yapılan çekimler bu magnetit mineralinin ortalama 40 nm kristal boyutunda çok ince taneli magnetit minerali olduğunu desteklemiştir. Bu arkeolojik alanda bulunan çok ince taneli magnetit mineralin bakteriyel kaynaklı olduğu daha sonra yapılan çalışmalarla ispatlanmıştır (Fassbinder ve diğ., 1990).

### ÖRNEK UYGULAMA: VAN GÖLÜ SEDİMANLARININ MIKNATISLANMA KATSAYISI DEĞİŞİMİ

Çevre magnetizması çalışmalarında sıklıkla kullanılan göl sedimanları, karot korelasyonu, iklimsel



Şekil 2. Karot lokasyonları ve göl batimetrisi.

Figure 2. Core locations and bathymetry of the lake.

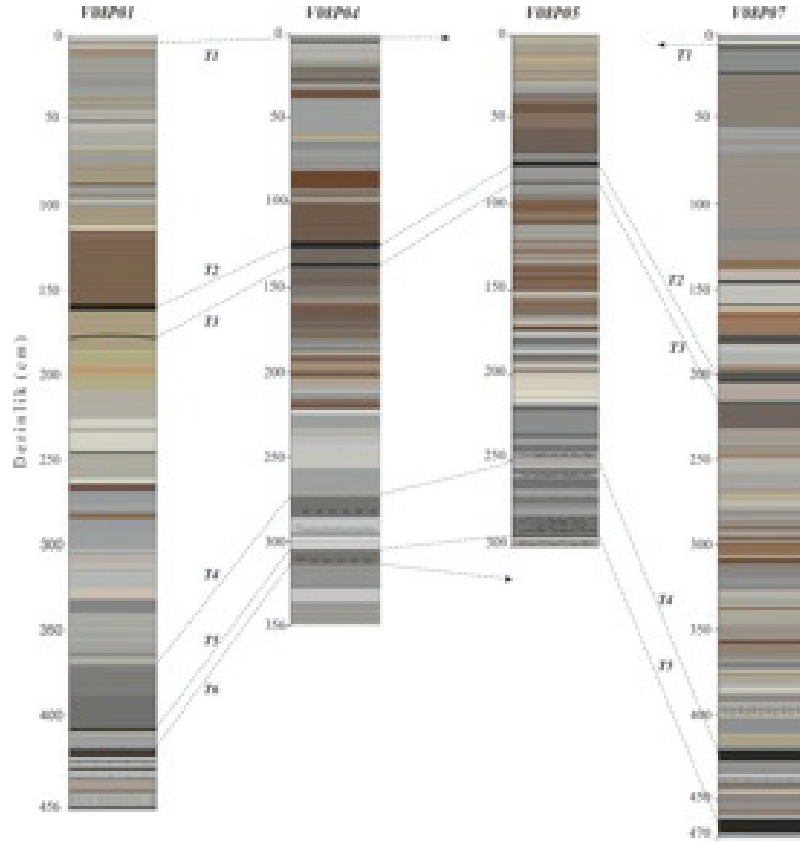
değişimlerin araştırılması, zamansal karşılaştırma gibi farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Burada çevre magnetizması çalışmalarına bir örnek olarak Van Gölü'nden alınan karotların mıknatıslanma katsayısı değişimleri verilecektir. Mıknatıslanma katsayısı değişimlerinin kullanılmasında karotlardaki magnetik mineral yoğunluğunun belirlenmesi, tefra seviyelerinin ayırt edilmesi ve zamansal karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır.

38.2°-39.1°K enlemleri ve 42.2°-43.8°D boylamları arasında bulunan ve Doğu Anadolu platosunda yer alan Van Gölü havzası yaklaşık 16.000 km<sup>2</sup>'lik bir drenaj alanını kapsamaktadır. Hacmi 607 km<sup>3</sup>, alanı 3570 km<sup>2</sup> ve maksimum su derinliği 460 m dir (Litt ve diğ., 2009). Çalışma kapsamında su derinliği 80 ile 60 m arasında değişen derinliklerde dört adet piston karotu alınmış (Şekil 2) ve bu karotlardan alınan toplam 850 adet alt-örneğin mıknatıslanma katsayısı, anizotropi mıknatıslanma katsayısı (AMS), kalıntı mıknatıslanmaları (NRM, ARM, IRM<sub>-300mT</sub> ve IRM<sub>1000mT</sub>), seçilmiş örnekler için de termomagnetik analizler ve histeresiz ölçümlerini içeren detaylı magnetik ölçümler yapılmıştır. Tüm ölçümler Helsinki Üniversitesi Paleomagnetizma Laboruarında gerçekleştirilmiştir. Burada sadece mıknatıslanma katsayısı değişimi ve bu değişimlerden yola çıkarak karotlar arasındaki korelasyon sonuçları verilecektir. İTÜ-EMCOL'e ait piston karotiyeri plastik borularda alınan karot örnekleri EMCOL'de yanılarak litolojik tanımlamaları yapılmıştır (Şekil 3). Manyetik ölçümler için 8 cm<sup>3</sup> lük plastik kutular kullanılarak 2 cm aralıklarla alınan alt-örneklerin önce ıslak kütle ölçümleri yapılmış ve daha sonra hacim mıknatıslanma katsayısı ( $\kappa_{\text{ıslak}}$ ) ölçümleri Agico Kappabridge mıknatıslanma katsayısı ölçüm aleti ile gerçekleştirilmiştir. Örnekler kurutulduktan sonra tekrar kütle ölçümleri yapılarak yoğunlukları hesaplanmış ve kuru kütle mıknatıslanma katsayısı ( $\chi_{\text{kuru}}$ ) değerleri elde edilmiştir. Mıknatıslanma katsayısı eğrilerinin karşılaştırılmasında diamağnetik etkiyi gidermek için

hesaplanan kuru kütle değerleri kullanılarak karotlar arası korelasyon yapılmıştır (Şekil 4).

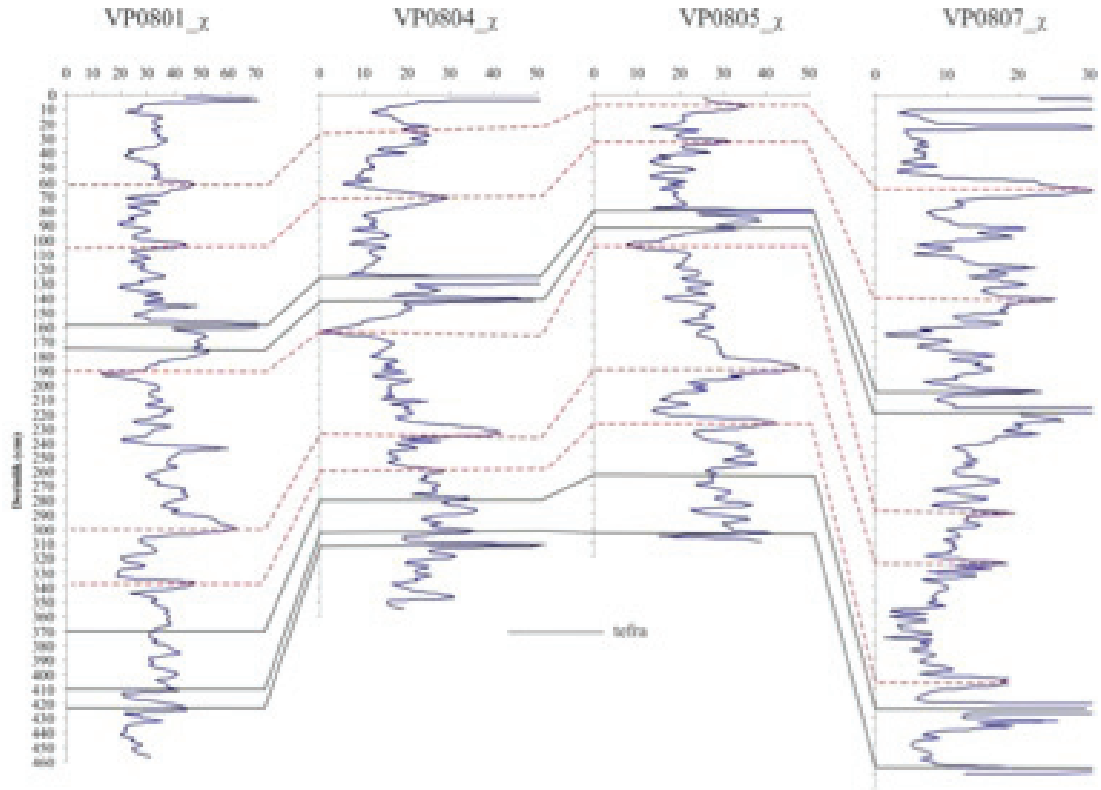
VP0801 no'lu karotta en yüksek mıknatıslanma katsayısı  $140 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  değeri ile 157 cm derinliğinde ölçülmüştür. Ayrıca ilk 6 cm derinliğinde de  $40-70 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  arasında değişen yüksek değerler ölçülmüştür. VP0804 no'lu karotta en yüksek mıknatıslanma katsayısı 127 cm derinliğinde  $140 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  olarak ölçülmüştür. Bu karotun ilk 4 cm derinliğinde,  $40-80 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  arasında değişen yüksek değerler ölçülmüştür. VP0805 no'lu karotta en yüksek mıknatıslanma katsayısı  $82 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  değeri ile 80 cm derinliğinde ölçülmüştür. VP0807 no'lu karotta ölçülen en yüksek mıknatıslanma katsayısı değeri 425 cm derinliğinde  $268 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  olarak ölçülmüştür. Tüm karotlar içerisinde en yüksek  $\chi$  değeri bu karotta ölçülmüştür (Şekil 4).

Van Gölü etrafında geçmişte aktif olan Nemrut, Süphan ve Tendürek gibi önemli volkanlar bulunmaktadır. Bu volkanların ürünleri göl sedimanlarında özellikle karot korelasyonunda oldukça kullanışlı bilgiler içeren tefra seviyelerini oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında tefra seviyelerinin belirlenmesi oldukça kritiktir. Van Gölü karotlarında bulunan bu tefra seviyeleri mıknatıslanma katsayısı ölçümleri ile belirlenmiştir. Bu seviyelerde volkanizmanın karot lokasyonuna olan uzaklığına ve kimyasına bağlı olarak mıknatıslanma



Şekil 3. Karot uzunlukları ve litolojik tanımlamaları. T: tefra sevipleri.

Figure 3. Core length and lithologic description. T: tephra layers.



**Şekil 4.** Van Gölü sedimanlarının mıknatıslanma katsayısı ( $\chi \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) değerlerinin derinlikle değişimi. Sürekli çizgi; karotlarda litolojik olarak tanımlanan tefra seviyelerini, kesikli çizgi; benzer maksimum mıknatıslanma katsayısı değişimlerinin olduğu seviyeleri gösterir.

**Figure 4.** Down-core variations in magnetic susceptibility for the sediments of Lake Van. Tephra layers are identified by solid line, susceptibility maxima are identified by dashed line.

katsayısı değerlerinde yüksek ve ani değişimler göze çarpmış ve böylelikle tefra seviyeleri kolayca ayırt edilmiştir (Şekil 4). Van Gölü sedimanlarında  $0-250 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  arasında değişen mıknatıslanma katsayısı ( $\chi$ ) değerleri ölçülmüştür. Tefra seviyelerinin dışında ortalama mıknatıslanma katsayısı değeri  $30 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  ile oldukça düşüktür. Tefra seviyeleri ise  $40-250 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$  arasında değişen daha yüksek değerlere sahiptir. Mıknatıslanma katsayısındaki bu farklılık sedimanlarda bulunan tefra seviyelerini ayırt etmek için oldukça kullanışlıdır. Mıknatıslanma katsayılarının düşük olması sediman içerisinde bulunan magnetik minerallerin oldukça düşük yoğunlukta olduğunun yanısıra baskın magnetik minerallerin paramagnetik mineraller olduğunu da göstermektedir.

## TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Son yıllarda magnetizma çalışmaları içerisinde önemli bir yeri olan Çevre Magnetizması disiplini dünya genelinde oldukça hızlı bir gelişme yaşamıştır. Özellikle duyarlılığı oldukça yüksek olan magnetik aletlerin (kriyojenik magnetometre, VSM, termomagnetik aletler, vd.) gelişmesi ve birçok laboratuarda yaygınlaşması bu hızlı gelişimin nedenlerinden biridir. Ayrıca son yıllarda doğal çevremiz içerisinde oldukça hızlı ve yıkıcı/tahrip edici bir şekilde meydana gelen değişimler (iklim değişimi, kirlilik, vs.) çevre ile ilgili araştırmaların önemini arttırmış ve bu konuların öncelikli araştırma konuları kapsamında değerlendirilmesine neden olmuştur. Çevre magnetizması da bu paralellikte önem kazanmış ve araştırmacıların dikkatini çekmiştir.



Doğada bulunan bütün materyallerin az ya da çok/negatif ya da pozitif değerinde mağnetik özelliğe sahip olması mağnetik özelliklerin birçok farklı problemin çözümünde kullanımına olanak vermektedir. Ayrıca, mikroskopik ölçekte mağnetik partiküllerin analizinden, küresel ölçekte paleoiklim değişimlerinin incelenmesine kadar oldukça geniş bir ölçekte uygulama alanına sahiptir. Bu uygulama alanı içerisinde jeoloji, kimya, coğrafya, botanik, arkeoloji gibi oldukça farklı disiplinlerle işbirliği içerisinde olması gerekmektedir.

Çevre mağnetizması, örnek sayısının çok fazla olduğu yüksek-çözünürlüklü kuvaterner çalışmalarında hızlı sonuç vermekte ve çok az miktarda seçilmiş örnek kullanılarak duyarlı bir şekilde ölçüm yapmaya olanak vermektedir. Sediman ve zeminlerde mağnetik mineraller karışık olarak bulduklarından dolayı az miktarda alt-örnek kullanılarak başka analizler yapılmakta ve böylelikle mağnetik verinin kalibrasyonu sağlanmaktadır. Örnek içerisindeki mağnetik mineraller ayrıştırılarak XRD ve mikroskop (SEM, TEM) ölçümleri gibi minerolojik analizler de bu kalibrasyona destek sağlamaktadır. Mağnetik özellikler, izotop kompozisyonu, polen içeriği ve jeokimyasal faktörler gibi diğer çevresel belirteçler arasındaki ilişkinin belirlenmesinde uygulanan çok-disiplinli çalışmalarda önemli bir yer almaktadır.

Çevre mağnetizması, paleoiklim, tarihsel yangınlar, insan etkisi (kirlilik ve arkeoloji), toprak oluşumu gibi paleo-ortam araştırmalarında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmakta ve doyurucu sonuçlar vermektedir. Ayrıca çevre mağnetizması kapsamında ölçülen parametrelerin göl ve deniz karotlarının yaşlandırılmasında önemli bir aşama olan karot korelasyonundaki başarısı bu alanda yapılan çalışmalarda çevre mağnetizmasının önemini arttırmaktadır. Van Gölünde yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar buna çok iyi bir örnektir. Çalışma kapsamında alınan dört adet karotta belirli seviyelerden yaşlandırma

analizi yapılmış ve diğer seviyeler miknatıslanma katsayısı değişimlerine bakılarak karşılaştırılmış ve yaş modeli oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında elde edilen bu güçlü korelasyon <sup>14</sup>C gibi pahalı olan yaşlandırma analizinin sayısını azaltmıştır. Verilen uygulamada da görüldüğü gibi, çevre mağnetizması çalışmaları kapsamında çok sayıda örneğin kullanıldığı yüksek çözünürlüklü ölçümler hızlı ve ucuz yöntemlerle yapılabilmektedir. Van Gölü'nde volkanik aktivite ile ilişkili tefra seviyelerinde ölçülen miknatıslanma katsayısı değerleri arasında yüksek uyum göze çarpmaktadır. Bu sonuç özellikle volkanik aktivitelerin belirlenmesinde miknatıslanma katsayısı ölçümlerinin önemini göstermektedir. Van Gölü sedimanlarında tefra seviyelerinin dışında da yine belirgin bir uyum göze çarpmaktadır. Bu durum göl içerisinde yüksek oranda litolojik korelasyonu desteklemektedir. Birbirinden 20 ile 80 km arasında değişen uzaklıklarda alınan karotlarda (Şekil 2) benzer mağnetik mineral değişimlerinin gözlenmesi, göl ortamının yerel değişimlere bölgesel değişimlerin etkisi altında olduğunu kanıtlamaktadır. Bölgesel ölçekte değişime neden olabilecek önemli süreç iklim süreçleridir. Karotlar arasında VP0801, VP0804 ve VP0805 nolu karotlarda miknatıslanma katsayısı değişimlerinde oldukça yüksek uyum gözlenmiştir. Ancak oldukça dar bir basenden alınan VP0807 nolu karotta miknatıslanma katsayısı diğer karotlardan farklı bir değişime sahiptir. VP0801, VP0804 ve VP0805 nolu karot lokasyonlarının birbirine olan uzak mesafeleri de göz önüne alındığında, karotların mağnetik özelliklerindeki benzer değişimlerin yerel çevresel koşullardaki değişimlerin etkisinden çok iklim kontrolünde oluşabilecek daha geniş ölçekte Van Gölü havza alanındaki değişimlerin etkisi altında meydana geldiğini desteklemektedir. Van Gölü gibi deniz seviyesinden yüksek ve oldukça geniş havza alanına sahip olan bir gölde göl tabanında mağnetik minerallerin birikmesi oldukça zayıf olmaktadır. Bu durum göl içine giren mağnetik minerallerin düşey hareketlerin etkisinden uzaysal alandaki değişimlerin kontrolünde

olduğunu düşündürmektedir. Buradan hareketle, nem ve yağış gibi iklimsel süreçlerin etkisi altında mağnetik minerallerin biriktiği ve buna bağlı olarak mıknatıslanma katsayısının yanında diğer mağnetik parametrelerin de iklim değişimlerine bağlı olabilmekte ve bu parametrelerin yorumu ile geçmiş iklim değişimlerinin belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Ancak diğer karotlara göre kıyıya daha yakın olan ve etrafı yüksek yamaçlarla çeviri olan, oldukça dar bir havzadan alınan VP0807 no'lu karotta bölgesel değişim yerine yerel değişimlerin etkisi ile mağnetik mineral birikmesi daha hızlı ve güçlü olmuştur. Bu karotun alındığı alanda sedimentasyon hızının yüksek oluşu ve mağnetik mineral yoğunluğunun (yüksek mıknatıslanma katsayısı) diğer karotlara göre daha fazla olması bu durumu desteklemektedir. Bu sonuçtan yola çıkarak, volkanik aktivitenin, bölgesel ölçekte iklim süreçlerinin veya heyelan, sel gibi yerel etkiler sonucu detritik malzemenin taşındığı süreçlerin kontrolüne dair ön bilgiye, çevre mağnetizması çalışmaları kapsamında ölçülen mıknatıslanma katsayısı değişimleri ile kolaylıkla ulaşılabilmektedir.

Çevre mağnetizması çalışmalarında toplanan göl ve deniz sedimanları, toz gibi örneklerde mağnetik mineral yoğunluğu oldukça düşüktür. Bu nedenle, sağlıklı ölçümlerin yapılabilmesi için hassas mağnetometrelerin (kriyojenik mağnetometre) yanısıra mağnetik minerallerin yoğunluğu, minerolojisi ve kristal yapılarını belirleyen diğer mağnetik aletlerin de (VSM, MPMS, termomağnetik vd.) laboratuarlarda bulunması gerekmektedir. Dünyadaki paleomağnetik laboratuvarların birçoğunda çevre mağnetizması çalışmalarının ihtiyacı doğrultusunda bu alet donanımı sağlanmıştır. Türkiye'de İ.Ü. Jeofizik Mühendisliği Bölümünde bulunan Yılmaz İspir Paleomağnetizma Laboratuvarı henüz bu hassasiyette alet donanımına sahip değildir. Çevre mağnetizması çalışmalarının önemi ve güncelliği göz önüne alınacak olursa bu eksikliğin giderilmesi oldukça önemli bir konudur.

## SUMMARY

In this study, it has been summarized to applications of environmental magnetism with some example studies which have done by researcher before and it has also been showed an example for core correlation from Lake Van.

Magnetic minerals can be produced, modified, transported and deposited by environmental and anthropogenic processes (Thompson et al., 1980). Properties of magnetic mineral which widely occur in our environment provide important parameters to solve different environmental problems. Thus, environmental magnetism has contact with many other disciplines like geography, chemistry, biology. Magnetic studies of marine and lake sediments provide a basis for core correlation as showed the study of Lake Van (Figure 3), determining diagenetic change and tephrochronologies, reconstructing of climate change. Magnetic measurements of atmospheric samples have an important role for determining sources of volcanic eruptions, wind erosion, industrial and combustion process which is called anthropogenic pollution. Magnetic parameters provide a basis for pollution monitoring in rural as well as urban and industrial environments. Interpretation of magnetic measurements for paleoenvironment is rapid, inexpensive and non destructive for these reasons they are very attractive in multi-disciplinary studies

## TEŞEKKÜRLER

Van Gölü'nde yapılan çalışma kapsamında sağlamış olduğu destekten dolayı Prof. Dr. Namık Çağatay'a ve EMCOL çalışanlarına, mağnetik ölçümler için laboratuvar imkanı sağlayan Prof. Dr. Lauri Pesonen'e teşekkürlerimizi sunarız.

## DEĞİNİLEN BELGELER

Ahlberg, K., Almgren, E., Wright, H.E., Ito, E. and Hobbie, S., 1996, Oxygen-isotope records

- of Late-Glacial climatic change in western Ireland, *Boreas*, 25, 4, 257-267.
- Anderson, N. J. and Rippey, B., 1988**, Diagenesis of magnetic minerals in the recent sediments of a eutrophic lake, *Limnology and Oceanography*, 33, 1476-1492.
- Banerjee, S. K., J. W. King, and J. Marvin, 1981**, A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies, *Geophys. Res. Lett.*, 8, 333-336.
- Banerjee, S.K., 1994**, Contributions of fine-particle magnetism to reading the global paleoclimate record, *Journal of Applied Physics*, 75, 5925-5930.
- Berger, A., 1988**, Milankovitch theory and climate, *Reviews of Geophysics*, 26, 624-657.
- Bityukova, L., Scholger, R. and Birke, M., 1999** Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 24, 9, 829-835.
- Blakemore, R. P., 1975**, Magnetotactic bacteria, *Science*, 190, 377-9.
- Bloemendal, J., King, J.W., Hall F.R. and Doh, S.H., 1992**, Rock magnetism of late Neogene and Pleistocene deep-sea sediments: Relationship to sediment source, diagenetic processes, and sediment lithology, *J. Geophys. Res.*, 97, 4361-4375.
- Brem, F., Hirt, A.M., Simon, C., Wieser, H.G., Dobson, J., 2005**, Characterization of iron compounds in tumour tissue from temporal lobe epilepsy patients using low temperature magnetic methods, *Biometals* 18, 191-197.
- Chasteen, N.D. and Harrison, P.M., 1999**, Mineralization of ferritin: An efficient means of iron storage, *Journal of Structural Biology*, 126, 182-194
- Çepel, N., 2003, Ekolojik sorunlar ve çözümleri, TUBİTAK, Popüler Bilim Kitapları, 180
- Day, R., Fuller, M., Schmidt, A.V., 1977**, Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence, *Physics of the Earth Planetary Interiors*, 13, 260-267.
- Dearing, J.A., 1979**, The use of magnetic measurements to study particle flux in lake-watershed ecosystems. Unpublished PhD Thesis, University of Liverpool.
- Dearing, J.A., 1999**, Magnetic susceptibility. In: *Environmental magnetism: a practical guide*, In: Walden, J., Oldfield, F., Smith, J., (Eds). Technical guide, No. 6. Quaternary Research Association, London, pp. 35-62.
- Dearing, J.A., Dann, R.J.H., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J., Maher, B.A., OGrady, K., 1996**, Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials, *Geophysical Journal International*, 130, 727-736.
- Dearing, J.A., Boyle, J.F., Appleby, P.G., Mackay, A.W., Flower, R.J., 1998**, Magnetic properties of recent sediments in Lake Baikal, *Journal of Paleolimnology*, 20, 163-73.
- Dekkers, M.J., 1997**, Environmental magnetism: an introduction, *Geologie an Mijnbouw*, 76, 163-182.
- Dickson, H.J., Stewart, A.D., Thompson, R., Turner, G., Baxter, M.S., Drndarsky N.D. and Rose, J., 1978**, Flandrian marine and freshwater sediments of Loch Lomond, *Nature*, 274, 548-553.
- Dobson, J., 2001**, Nanoscale biogenic iron oxides and neurodegenerative disease, *FEBS Lett.*, 496, 1-5.
- Dunlop, D.J. and Özdemir, Ö., 1997**, *Rock magnetism: Fundamentals and Frontiers*, Cambridge Univ. Press, UK, 573 pp.
- Evens, M.E. and Heller, F., 1994**, Magnetic enhancement and palaeoclimate: study of a loess/palaeosol couplet across the Loess Plateau of China, *Geophysical Journal International*, 117, 257-264.

- Evens, M.E. and Heller, F., 2003**, Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics, Academic Press, 299 pp.
- Fassbinder, J.W. and Stanjek, H., 1994**, Magnetic properties of biogenic soil greigite (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>), Geophysical Research Letters, 21, 2349-2352.
- Fassbinder J., W. E., H. Stanjek, and H. Vali, 1990**, Occurrence of magnetic bacteria in soil, Nature, 343, 161-163.
- Flanders, P.J., 1994**, Collection, measurement and analysis of airborne magnetic particulates from pollution in the environment, Journal of Applied Physics 75, 5931-5936.
- Folgerhaier, G., 1899**, Sur les variations seculaires de l'inclinaison magnetique dans l'antiquite. Journal de Physique 8, 660-659.
- Garçon, G., Shirali, P., Garry, S., Fontaine, M., Zerimech, F., Martin, A., Hannotiaux, H., 2000**, Polycyclic aromatic hydrocarbons coated onto Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles: Assessment of cellular membrane damage and antioxidant system disruption in human epithelial lung cells (L131) in culture. Toxicology Letters 117, 25-35.
- Geiss, C. E. and Banerjee S.K., 1997**, A multi-parameter rock magnetic record of the last glacial-interglacial paleoclimate from south-central Illinois, USA, Earth Planet. Sci. Lett., 152, 203–216.
- Geiss C.E., Umbanhowar C.E., Camill P. and Banerjee, S.K., 2003**, Sediment magnetic properties reveal Holocene climate change along the Minnesota prairie-forest ecotone, J. Paleolim., 30, 151-166.
- Haltia-Hovi, E., Nowaczyk, N. and Saarinen, T., 2010**, Holocene palaeomagnetic secular variation recorded in multiple lake sediments cores from eastern Finland, Geophys. J. Int., 180, 609–622.
- Hay, K.L., Dearing, J.A., Baban S.M.J. and Loveland, P.A., 1997**, A preliminary attempt to identify atmospherically-derived pollution particles in English topsoils from magnetic susceptibility measurements, Physics and Chemistry of the Earth, 22, 207–210.
- Heller, F. and Liu, T.S., 1984**, Magnetism of Chinese loess deposits, Geophysical Journal International, 77: 125–141
- Hilton, J., 1987**, A simple model for the interpretation of magnetic records in lacustrine and ocean sediments, Quaternary Research, 27, 160-166.
- Higgitt, S.R., Oldfield, F., Appleby, P.G., 1991**, The record of land use change soil erosion in the Holocene sediments of the Petit Lac d'Annecy, Eastern France, The Holocene, 1, 14-28.
- Inoue, S., Hayashida, A., Kato, M., Fukusawa, H., Yasuda, Y., 2004**, Environmental magnetism of brackish-water sediments from Lake Tougou-ike on the Japan Sea coast, Quat. Int., 123–125, 35–41.
- IPCC (2007)**, "Climate Change 2007: Synthesis Report", [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)
- Ising, G., 1943**, On the magnetic properties of varved clay. Arkiv for matematik, astronomi, fysik, 29A, 1-37.
- Jordanova, N., Petrovsky, M., Kovacheva, M. and Jordanova, D., 2001**, Factors determining magnetic enhancement of burnt clay from archaeological sites. Journal of Archaeological Science 28, 1137-1148.
- Kapička, A., Petrovský, E., Ustjak, S., Macháčková, K., 1999**, Proxy mapping of fly ash pollution of soils around a coal-burning power plant, a case study in the Czech Republic, Journal Of Geochemical Exploration, 66, 291-297.
- Karlin, R., 1990a**, Magnetite diagenesis in marine sediments from the Oregon continental margin, J. Geophys. Res., 95, 4405-4419.
- Karlin, R., 1990b**, Magnetic mineral diagenesis

- in suboxic sediments at Bettis site W-N, NE Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, 91, 4421-4436.
- Karlin, R., and S. Levi, 1983**, Diagenesis of magnetic minerals in recent haemipelagic sediment, *Nature* 303, 327-330.
- King, J., Banerjee, S. K., Marvin, J. and Özdemir, Ö., 1982**, A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: some results from lake sediments, *Earth and Planetary Science Letters*, 59, 404-419.
- King, J., Banerjee, S. K., Marvin, J., 1983**, A new rock-magnetic approach to selecting sediments for geomagnetic paleointensity studies: Application to paleointensity for the last 4000 years, *J. Geophys. Res.*, 88, 5911-5921.
- King, J.W. and Channel, J.E.T., 1991**, Sedimentary magnetism, environmental magnetism, and magnetostratigraphy. *Reviews of Geophysics*, 35, 358-370.
- Kirschvink J.L., Kobayashi-Kirschvink, A., Woodford, B.J., 1992**, Magnetite biomineralization in the human brain, *Proceeding of the Academy of Science Of United States of America*, 89, 7683-7687.
- Le Borgne, E., 1955**, Susceptibility magnétique anormal de sol superficial, *Ann. Geophys.* 11, 399-419.
- Le Borgne, E., 1960**, Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite, *Annales de Geophysique*, 16, 159-95.
- Litt, T., Krastel, S., Sturm, M., Kipfer, R., Orcen, S., Heumann, G., Franz, S.O., Ulgen, U.B., Niessen, F., 2009**, 'PALEOVAN', International Continental Scientific Drilling Program (ICDP): site survey results and perspectives, *Quaternary Science Reviews*, 28, 1555-1567.
- Mackereth, F.J.H., 1958**, A portable core sampler for lake sediments. *Limnology and Oceanography* 3, 181-191.
- Mackereth, F.J.H., 1971**, On the variation in direction of the horizontal component of remanent magnetization in lake sediments, *Earth and Planetary Science Letters*, 12, 332-338.
- Magiera, T., Strzyszczyk, Z., Ferdyn, M., Gajda, B. and MAGPROX Team, 2003**, Screening of anthropogenic dust pollutions in topsoil by using magnetic proxies, In: Pawłowski, L., Dudzińska, M.R., ve Pawłowski, A., (Ed.), *Environmental Engineering Studies, Polish Research on the Way to the EU*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp. 399-407.
- Maher, B.A. and Thompson, R., 1995**, Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and paleosols, *Quaternary Research*, 44, 383-391.
- Maher, B.A. and Thompson, R., 1999**, *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*, 390 pp, Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press.
- Maher, B.A., 1988**, Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 94, 83-96.
- Marshall, A., 1998**, Visualising burnt areas: patterns of magnetic susceptibility at Gutting Power 1 Round Barrow (Glos., UK), *Archaeological Prospection* 5, 159-177.
- Moskowitz, B.M., Frankel, R.B., Flanders, P., Blakemore, R.P. and Schwartz B.B., 1988**, Magnetic properties of magnetotactic bacteria, *J. Magn. Magn. Mater.* 73, 273-288.
- Mullins, C.E., 1977**, Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science- a review. *Journal of soil science*, 28, 223-246.
- Nagata, T., 1961**, *Rock Magnetism*, Revised edition, Tokyo: Maruzen Company, pp. 350.
- Negrini, R.M., Erbes, D.B., Faber, K., Herrera, A.M., Roberts, A.P., Cohen, A., Palacios-Fest, M., Wigand, P., Foit, F., 2000**, A Paleoclimate

- record for the last 250,000 years from Summer Lake, Oregon, U.S.A.: I. Age control and magnetic lake level proxies, *Journal of Paleolimnology*, 24, 125-149.
- Nolan, S.R., Bloemendal, J., Boyle, J.F., Jones, R.T., Oldfield F. and Whitney, M., 1999**, Mineral magnetic and geochemical records of late Glacial climatic change from two northwest European carbonate lakes, *Journal of Paleolimnology*, 22, 97-107.
- Nowaczyk, N., Melles, M., Minyuk, M., 2007**, A revised age model for core PG1351 from Lake El'gygytgyn, Chukotka, based on magnetic susceptibility variations tuned to northern hemisphere insolation variations, *J. Paleo. Limnol.* 37, 65-76.
- O'reilly, W., 1976**, Magnetic minerals in the crust of the Earth. *Reports of Progress in Physics*, 39, 857-908.
- O'reilly, W., 1984**, *Rock and mineral magnetism*, Blackie and Son Ltd., (U.S.A. Chapman and Hall), pp. 220, ISBN 0-216-91460-4.
- Peck, J.A. and King, J.W., 1996**, Magnetofossils in the sediment of Lake Baikal, Siberia, *Earth and Planetary Science Letters*, 140, 159-171.
- Peters, C. and Thompson, R., 1998 b**, Supermagnetic enhancement, superparamagnetism and archaeological soils, *Geoarchaeology* 13, 401-413.
- Petrovsky, E., Kapicka, A., Jordonova, N., Knab, M., Hoffman, V., 2000**, Low-field magnetic susceptibility: A proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. *Environmental Geology* 39, 312-318.
- Qiao, Q., Zhang, C., Huang, B., and Piper, J.D.A., 2011**, Evaluating the environmental quality impact of the 2008 Beijing Olympic Games: magnetic monitoring of street dust in Beijing Olympic Park, *Geophysical. Journal of International*. 187, 1222-1236
- Rao, V.P., Kessarkar, P.M., Thamban, M., Patil, S.K., 2010**, Paleoclimatic and Diagenetic History of the Late Quaternary Sediments in a Core from the Southeastern Arabian Sea: Geochemical and Magnetic Signals, *Journal of Oceanography*, Vol. 66, pp. 133-146.
- Reynolds, R.L. and King, J.W., 1995**, Magnetic records of climate change, *Reviews of Geophysics*, U.S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991-1994, 101-110.
- Rosenbaum, J.G., Reynolds, R.L., Adam, D.P., Drexler, J., Sarna-Wojcicki A.M. and Whitney, G.C., 1996**, A middle Pleistocene climate record from Buck Lake, Cascade range, southern Oregon-Evidence from sediment magnetism, trace-element geochemistry and pollen, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 108, 1328-1341.
- Rothwell, J.J. and Lindsay, J.B., 2007**, Mapping contemporary magnetic mineral concentrations in peat soils using fine-resolution digital terrain data, *Catena* 70, 465-474.
- Snowball, I.F. and Thompson, R., 1988**, The occurrence of greigite in sediments from Loch Lomond, *Journal of Quaternary Science*, 3, 121-125.
- Snowball, I.F. and Thompson R., 1990**, A stable chemical remanence in Holocene sediments, *J. Geophys. Res.*, 95, 4471-4479.
- Snowball, I.F., Sandgren, P. and Peterson, G., 1999**, The mineral magnetic properties of an annually laminated Holocene lake sediment sequence in northern Sweden, *The Holocene* 9, 353-62.
- Stolz, J.F., Chang, S.B.R., Kirschvink, J.L., 1986**, Magnetotactic bacteria and single-domain magnetite in hemipelagic sediments, *Nature*, 321: 849-851.
- Strzyszczyk Z. and Magiera T., 1998**, Heavy metal contamination and magnetic susceptibility in

- soils of southern Poland, *Phys. Chem. Earth*, 23, 1127–1131.
- Thompson, R. and Edwards, K.J., 1982**, A Holocene palaeomagnetic record and a geomagnetic master curve from Ireland, *Boreas*, 11, 335-349.
- Thompson, R. and Oldfield, F., 1986**, *Environmental Magnetism*, Allen and Unwin (Publishers) Ltd, 40 Museum St., London, 0-04-538003-1.
- Thompson, R., 1974**, Palaeomagnetism, *Science Progress*, 61, 349-373.
- Thompson, R., Batterbee, R.W., O'sullivan, P.E. and Oldfield, F., 1975**, Magnetic susceptibility of lake sediments, *Limnology and Oceanography*, 20, 687-698.
- Thompson, R., Bloemendal, J., Dearing, J.A., Oldfield, F., Rummery, T.A., Stober, J.C. and Turner, G.M., 1980**, Environmental Application of magnetic minerals, *Science*, 207, 481-485.
- Thouveny, N., De Beaulieu, J.L., Bonifay, E., Creer, K.M., Guot, J., Icole, M., Johnsen, S., Jouzel, J., Reille, M., Williams, T. and Williamson, D., 1994**, Climate variations in Europe over the past 140 kyr deduced from rock magnetism, *Nature*, 171, 503-506.
- Verosub, K.L. and Roberts, A.P., 1995**, Environmental Magnetism: Past, present, and future, *Journal of Geophysical Research*, 100, 2175-2192.
- Vlag, P., Thouveny, N., Williamson, D., Andrieu, V., Icole M. and Van Velzen, A.J., 1997**, The rock magnetic signal of climate change in the Maar lake sequence of Lac St.Front (France), *Geophys. Jour. Int.*, 133, 724-740.
- Walden, J., Oldfield, F., Smith, J., 1999**, *Environmental Magnetism: A Practical Guide*, Technical Guide No. 6, London, Quaternary Research Association, 0-907780-42-3.
- Waniewska, A.Ś., Roig, A., Gich, M., Casas, L.L., Racka, K., Nedelko, N., Molins, E., 2004**, Effect of surface modifications on magnetic coupling in Fe nanoparticle systems, *Physical Review*, B 70, 5, 054412.
- Xia, D.S., Yu, Y., Tian, S.L., Wang, B., Wang, L., 2011**, Use of environmental magnetic techniques to monitor urban pollution origins in Lanzhou, Northwest China, *Environmental Earth Science* 64:1943–1949
- Zolitschka, B., 1998**, A 14,000 year sediment yield record from western Germany based on annually laminated lake sediments, *Geomorphology* 22, 1–17.

