



Kültürel Miras Araştırmaları

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/kulmira>

<https://www.kulmira.com/>

e-ISSN 2687-6094



Troya Antik Kenti ve Çevresinde Kaya Manyetizması Yöntemiyle Paleoçevre Koşullarının Belirlenmesi

Aydın Büyüksaraç*¹, Zafer Akpınar², Özcan Bektaş³, Diana Jordanova⁴, Neli Jordanova⁴, Rüstem Aslan⁵, Ertuğ Öner⁶ & İlhan Kayan⁶

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çan MYO, Çanakkale, Türkiye, e-mail: absarac@comu.edu.tr

² Balıkesir Üniversitesi, Müh. Fak., Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye, e-mail: zaferakpinar@gmail.com

³ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Müh. Fak., Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye, e-mail: obektas@cumhuriyet.edu.tr

⁴ Bulgarian Academy of Sciences, National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Department of Geophysics, Sofia, Bulgaria. e-mail: diana_jordanova77@abv.bg

⁵ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enst., Osmanlı Arkeolojisi ABD. Çanakkale, Türkiye, e-mail: rustemaslan@comu.edu.tr

⁶ Ege Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, İzmir. e-mail: onerertug22@gmail.com

Kaynak Göster: Büyüksaraç, A., Akpınar, Z., Bektaş, Ö., Jordanova, D., Jordanova, N., Aslan, R., Öner, E. & Kayan, İ. (2025). Troya Antik Kenti ve Çevresinde Kaya Manyetizması Yöntemiyle Paleoçevre Koşullarının Belirlenmesi, 6 (2), 111-123.

<https://doi.org/10.59127/kulmira.1762037>

Öz

Anahtar Kelimeler

Manyetik
Troya
Kaya manyetizması
Paleoçevre
Paleocoğrafya

Araştırma Makalesi

Geliş: 11.08.2025
Revize: 05.10.2025
Kabul: 06.10.2025
Yayınlanma: 23.12.2025



Bu çalışma, kayaların mıknatıslanma özelliklerinden yararlanarak Troya ve çevresinin paleoçevre koşullarının belirlenmesine odaklanmıştır. Troya ören yerinin kuzey yamacında açılan sondaja ait örneklere, Bulgar Bilimler Akademisi Paleomanyetizma Laboratuvarı'nda kaya manyetizması analizleri uygulanmıştır. Sonuçlar, delta çökel ortamında biriken ve arkeolojik materyaller içeren taşkın ovası sedimanlarının ~340 cm derinliğe kadar sondaj örneklerinden ve sert izotermal kalıntı mıknatıslanma (HIRM) parametresindeki kademeli düşüş göstergesinden oksik bir ortamı temsil ettiğini göstermiştir. 450 cm derinliğin altındaki örnekler, manyetit açısından zengin uzak kaynaklı bir taşkın etkisiyle yoğun demir indirgenmesinin ve olası demir sülfidlerinin varlığını göstermektedir. Bu durum aynı zamanda doygun izotermal kalıntı mıknatıslanma (SIRM) değerlerinin yüksek çıkmasına yol açmıştır.

Determination of Paleoenvironmental Conditions in and Around the Ancient City of Troy by Rock Magnetism Method

Keywords

Magnetic
Troia
Rock magnetism
Palaeoenvironment
Palaeogeography

Research Article

Received: 11.08.2025
Revised: 05.10.2025
Accepted: 06.10.2025
Published: 01.12.2025

Abstract

This study focused on determining the paleoenvironmental conditions of Troy and its surroundings by using the magnetization properties of rocks. Rock magnetism analyzes were applied to the samples of the sounding drilled on the northern slope of the Troy ruins at the Paleomagnetism Laboratory of the Bulgarian Academy of Sciences. The results showed that floodplain sediments deposited in the delta sedimentary environment and containing archaeological materials represented an oxic environment from drilling samples to a depth of ~340 cm and the indicator of gradual decline in the hard isothermal residual magnetization (HIRM) parameter. Samples below 450 cm depth show intense iron reduction and the possible presence of iron sulfides due to the action of a magnetite-rich long-source flood. This has also led to high saturated isothermal residual magnetization (SIRM) values.

1. Giriş

Kayaların mineral manyetizması, içerdikleri manyetik minerallerin konsantrasyonlarından ve tanecik boyutlarından türetilen tortuların manyetik karakterini yansıtır. Geçmiş manyetik enlem ve boylam değerlerinin belirlenmesini amaçlayan paleomanyetizma çalışmalarından farklı olarak yön bağımsız örnekler ile analizler gerçekleştirilir. Bu nedenle, mineral manyetizması için örneklerin yönlendirilmesi gerekli değildir. Konsolide olan tortulardan, uzun bir karot olarak veya standart örnek torbalarında veya özel örnek kaplarında ayrı örnekler olarak toplanabilir. Ancak ayrı örnekler bütüncül karotlara kıyasla stratigrafik çözünürlük kaybına neden olur. Manyetik minerallerin frekansı, boyutu ve şekli, harici bir alan tarafından ne kadar kolay mıknatıslanabileceğini belirler. Bu özellik, maddenin dış manyetik alan içinde mıknatıslanma kazanma yeteneğinin bir ölçüsü olan manyetik duyarlılık (X) olarak bilinir ve basitçe bir örnekte bulunan demir içeren minerallerin miktarının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biridir ve paleoklimsel yeniden yapılandırmada da en yaygın kullanılan çevresel manyetik parametredir. Organik seviyeler daha az ya da eksik anomali verirken, kırıntılı malzemeler (karasal kökenli) orta değerlerde, demirli malzemeler ise pozitif yönde anomali verir. İklim çalışmalarında organik seviyeler yağışlı ve nemli dönemlere işaret eder. Organik madde ya olduğu gibi çökeliyor ya da havzadan nehirlere taşınır.

Tortul istiflerdeki mineral manyetizması analizleri, birçok nedenden ötürü iklimsel olarak yönlendirilen bir manyetik sinyali ortaya çıkarabilir. Birincil indirgenmiş Fe^{2+} içeren kayaç, aşınma-ayırışma süreçleri ile parçalanır ve Fe^{3+} 'a oksitlenir. Bu birincil ve ikincil amorf demir, çeşitli süreçlerle ikincil demir oksitlere (manyetit, maghemit ve hematit gibi), hidroksitlere (götit) ve sülfütlere (pirotit) dönüştürülür. Üst topraktaki fermantasyon, biyolojik olarak indüklenen mineralizasyon ve indüklenen hidroliz gibi pedojenik süreçlerin, birincil ve ikincil demiri manyetite dönüştürdüğü ve daha sonra oksitlenme/indirgenme döngüleri yoluyla maghemite oksitlendiği ortaya konulmuştur [1,2]. Bu olay, pedojenik gelişim olarak bilinir ve aşırı aşınmış topraklarda baskın olarak maghemit artışına neden olur. Uzun süreli aşınma-ayırışma ile bu süreç hematit ve götit oluşumuna da neden olabilmektedir. Pedojenik artışın derecesi, farklı demir oksitlerin, hidroksitlerin ve sülfütlere amorf demir ile bir arada bulunabildiği yerel litoloji tarafından kontrol edilmektedir. Yüzeylemiş mağmatik kayaçlarda manyetit baskın demir oksit iken, tortul kayaçlar önemli ölçüde hematit içerebilir. En büyük artış genellikle büyük miktarlarda birincil demir oksit içermeyen kaya türlerinde görülmektedir [3]. Yaklaşık son Holosen boyunca liman ya da körfez alanları sedimanların denizi doldurmasıyla karaya dönüşmüş ve Troya körfezi yavaşça dolmuştur. Bu bilginin elde edilmesinde manyetik duyarlılık (X) ölçüleri ayırtıcı bulgulardan biri olmuştur. Özellikle nehrin getirdiği

klastik yük, bataklıklaşma, lagünleşme gibi oluşumlardaki manyetik göstergeler sediman kaynak ve insan etkinliğini tespit etmede yardımcı olmuştur. Karasal kökenli mineraller artmışsa manyetik duyarlılık artmış ve akarsu girişi ya da taşkın etkisi güçlüdür [4]. Batı Anadolu'daki Roma limanlarından alınan karotlarda jeokimyasal inceleme, manyetik duyarlılık ölçümleri ve biyolojik göstergeler kullanılarak liman dolumu, insan etkileri ve göl ya da kıyı rejimi çalışılmıştır. Özellikle manyetik duyarlılık profillerindeki manyetik pikler sediman değişimlerini ve antropojenik etkinlikleri işaret etmiştir. Limanların dolumunda hızlı sedimantasyon dönemleri manyetik duyarlılık pikleri ile eşleşmiştir [5]. Çoğu antik liman araştırmalarında manyetik duyarlılık, ARM/IRM, Hysteresis, termomanyetik ve AMS gibi ölçümler kullanılmıştır [6-8].

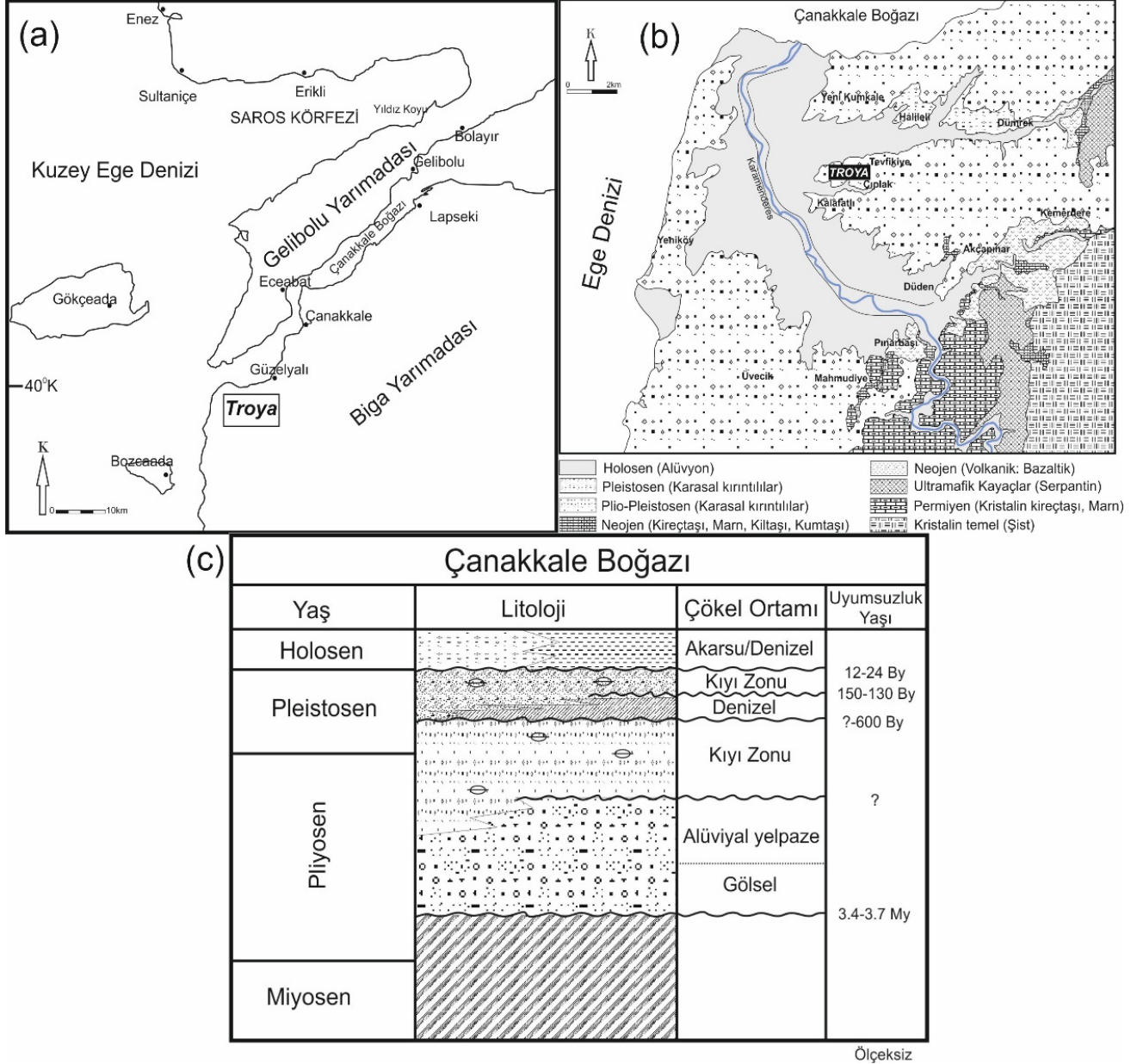
Löslerin paleoklim çalışmalarında kullanılan, sedimanların manyetik duyarlılık (X) ölçümleri, diğer materyallerde de paleoklim göstergesi olarak kullanılmaktadır [9]. Manyetik duyarlılık (X), birçok Kuvaterner paleoklim çalışmasında bir gösterge olarak çalışır çünkü değişen iklim, öncelikle pedojenezin bir sonucu olarak tortuların manyetik özelliklerini değiştirir. [2]Tite & Lington manyetik minerallerin, öncelikle maghemitin, pedojenez sırasında dönüşümlü kimyasal indirgeme ve oksidasyonun bir sonucu olarak oluştuğunu göstermiştir. İklimin genellikle ılık olduğu bölgelerde, bu redoks değişimleri serin ve yağışlı kışlar boyunca sülfat indirgeyici koşullardan kaynaklanırken, sıcak ve kuru yazlar boyunca bakteriler tarafından kolaylaştırılan indirgenmiş demir minerallerinin kimyasal oksidasyonu ile dönüşümlü olarak gerçekleşir. [10]Schwertmann & Taylor toprakların susuz kalmasının maghemitin sıcak iklimlerde yaygın olarak görülmesinin bir açıklaması olarak öne sürmektedir. Yılın bir bölümünde iklim toprağın oksidasyonuna ve dehidrasyonuna neden olduğunda yüksek maghemit üretimi ve buna bağlı olarak manyetik duyarlılık (X)'da artış meydana gelmektedir. [11]Singer & Fine, hem sıcaklığın hem de nemin manyetik duyarlılık (X) üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini ve genel olarak daha sıcak/ıslak koşulların pedojenez sırasında X izini güçlendirdiğini göstermiştir.

Arkeolojik alanlarda fiziki çevredeki değişimlerin belirlenmesinde sadece buralarda yapılan arkeolojik incelemeler yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle çevredeki çukur alanlarda biriken alüvyal ve kolüvyal dolguların da incelenmesi, aşınma-ayırışma ve birikme ortamlarından sağlanan bilgilerin karşılaştırmalı olarak yorumlanması gerekmektedir. Böylece arkeolojik alanlarda binlerce yıl boyunca doğal çevrenin nasıl değiştiğini kaya manyetizması ve benzeri çeşitli bilimsel çalışmalarla ortaya koymak mümkün olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında da Troya çevresinde bugün alüvyal düzlükler olarak görülen alanların paleoçevre koşullarının manyetik duyarlılık (X), Anhisteretik Kalıntı Mıknatıslanma (ARM), İzotermal Kalıntı Mıknatıslanma (IRM), Doygun İzotermal Kalıntı Mıknatıslanma (SIRM) ve Sert

izotermal kalıntı mıknatıslanma (H_{IRM}) gibi kaya manyetizması parametreleri ile yorumlanması hedeflenmiştir.

Çalışmanın gerçekleştirildiği, Çanakkale'nin yaklaşık 35 km batısında bulunan antik Troya kenti, Biga Yarımadası'nın batısında Çanakkale Boğazı'nın Ege Denizi ile birleştiği bölgenin güneyinde Karamenderes Deltası üzerinde kurulmuştur. Troya çevresindeki coğrafi peyzajın bugüne kadar çok

değişmiş olması, Troya ve çevresinin doğal çevre özelliklerinde meydana gelen değişimlerin bilimsel çalışmalarla ortaya konmasını gerekli kılmaktadır. Yakın zamanda Troya antik kenti ören yerinde yapılan bir arkeomanyetizma çalışmasıyla ören yerinde kullanılan malzemelerin yakın civardan alınan malzemeler olduğunu ancak ilksel soğuma konumunu kaybettiğini ortaya koymuştur [12].



Şekil 1. (a) Troya Ören yeri konum haritası, (b) Troya ve çevresinin genel jeoloji haritası (1/500.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritasından modifiye edilmiştir) [13] (MTA), (c) Çanakkale Boğazı'nın genelleştirilmiş kolon kesiti [14] Yaltrak vd.'den basitleştirilerek çizilmiştir.

2. Çanakkale Havzasının Genel Jeolojik Yapısı

KB Anadolu'nun jeolojik evrimi paleotektonik ve neotektonik olmak üzere iki farklı evrede meydana gelmiştir. Paleotektonik evre İstanbul-Zonguldak Tektonik Birliği, Armutlu-Ovacık Zonu, Sakarya Zonu, Istranca Zonu ve Trakya Paleojen havzası gibi beş farklı tektonostratigrafik birlikten oluşmaktadır. Bölge Orta

Miyosen'e kadar sıkışma rejiminin etkisi altında kalmıştır [15-20].

Bölgenin jeolojisi Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı çökeller ile Kuvaterner yaşlı denizel-akarsu çökelleri ve alüvyonlardan oluşmaktadır [21-28]. Troya ve çevresinde, Gelibolu ve Biga Yarımada'nın Miyosen öncesi-Geç Miyosen yaşlı volkanik-tortul kayalar ile tektonik olarak çevrelenen Çanakkale havzasının çökel

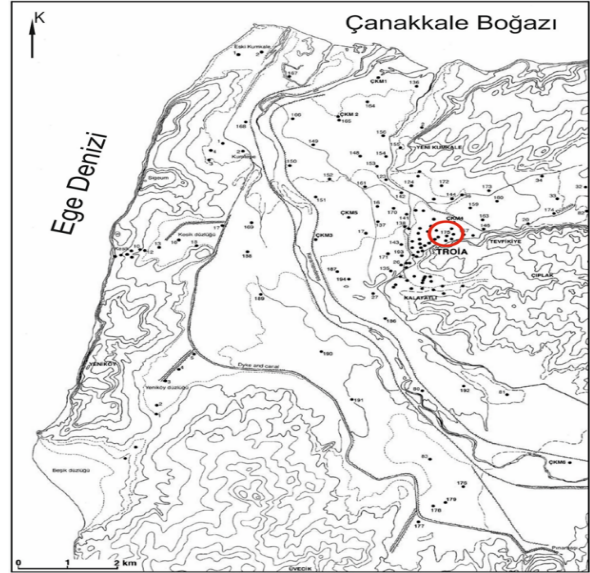
dolgununu ise Geç Miyosen-Kuvaterner yaşlı sedimanter birimler oluşturmaktadır [22,25,27,29,30]. Havzanın Üst Miyosen çökelleri akarsu-göl, kıyı ve sığ denizel çökel ortamlarında biriken silisiklastikler ile kireçtaşı parçalarından oluşmaktadır. Bunlar havzanın kuzey ve güney kesimlerinde bazı volkanik yüzlekle birlikte yer almaktadır. Üst Miyosen yaşlı istifi, Pliyosen yaşlı kırıntılılar üzerlemektedir [21-24]. Güncel nehirlerin Çanakkale Boğazına akmasıyla oluşan Kuvaterner yaşlı birimler ise denizel-akarsu çökelleri ve alüvyonlardan oluşmaktadır [25,27,28] (Şekil 1). Çanakkale Havzası dolgununu oluşturan birimlerden olan alüvyal çökeller havzada etkin olan nehirler ve yan kollarının kontrolünde meydana gelmiştir. Havzanın paleocoğrafik evrimini temsil eden süreçlerde kıyı düzlüklerinin şekillenmesiyle bariyer adası ve lagüner gibi çökel ortamları oluşmuştur. Bu ortamlarda ise farklı taşınma ve çökme süreçleriyle birlikte çökel çeşitliliği de gelişmiştir. Kıyılarda kıyı düzlüklerine ait çökeller gözlemlenirken doğu kesimlerde havza kenarlarına doğru bariyer adası ve lagüner ortam çökelleri görülmektedir. [30] Atabey vd. havzadaki bu değişimin düşey istifte de görüldüğünü ve alüvyonlar üzerindeki kıyı düzlüğü çökellerinin istifi içerisinde lagüner çökellere geçtiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar bu şekilde alt ortamlarda gelişen sedimantasyonun normal hava koşullarındaki dalga ve akıntılarla oluştuğunu, bunun yanında fırtınalı hava koşullarındaki dalga ve akıntılarla da çökellerin taşınıp istiflendiğini ifade etmişlerdir.

Diğer yandan havzada etkin olan gel-git olayları da sedimantasyon süreçlerini önemli derecede etkilemiştir. Çanakkale havzasının sedimantasyonunun jeolojik zamandaki evriminin, havza içi çökme süreçleri ile deniz düzeyi değişimi ve dış süreçlerin etkisiyle geliştiği gözlemlenmektedir. Deniz düzeyi değişimleriyle meydana gelen transgresyon sonucunda alüvyal düzlükler üzerinde denizel sedimantasyonun geliştiği, kıyı hattının gerilemesine bağlı olarak bariyer adası arkasında lagüner ortamın oluştuğu görülmektedir. Troya sırtını çevreleyen alanın Neolitik Çağlarda denizle çevrili olduğu, Bronz Çağında ise Troya çevresindeki alanların karasallaşmaya başladığı ve bunun da Karamenderes Deltasının kıyılarından daha içeride kalmasına neden olduğunu belirtilmiştir [31].

Troya çevresindeki alüvyonların kaynağını, jeolojik zaman içinde Karamenderes Deltasını çevreleyen yükseltilerden taşınan, büyük çoğunluğunu ince kumlu çökeller oluşturmaktadır. Alüvyal çökellerin tane boyu özellikleri onları çökel ortamına taşıyan ve biriktiren taşkınların hacmini yansıtan önemli bir göstergedir. Ancak, Troya çevresinde büyük çoğunluğu ince taneli kumlu anakaya hakimiyetinden dolayı alüvyal sedimanların tane boyu dağılımı, eski birikme ortamları ve eski akarsu yataklarını belirlemek için yeterli veri sunmamaktadır. Bundan dolayı paleoçevre çalışmalarında en uygun ve güvenilir saha verileri için karotlu sondajlarla elde edilen stratigrafik ve sedimantolojik veriler daha sağlıklı sonuçlar vermektedir.

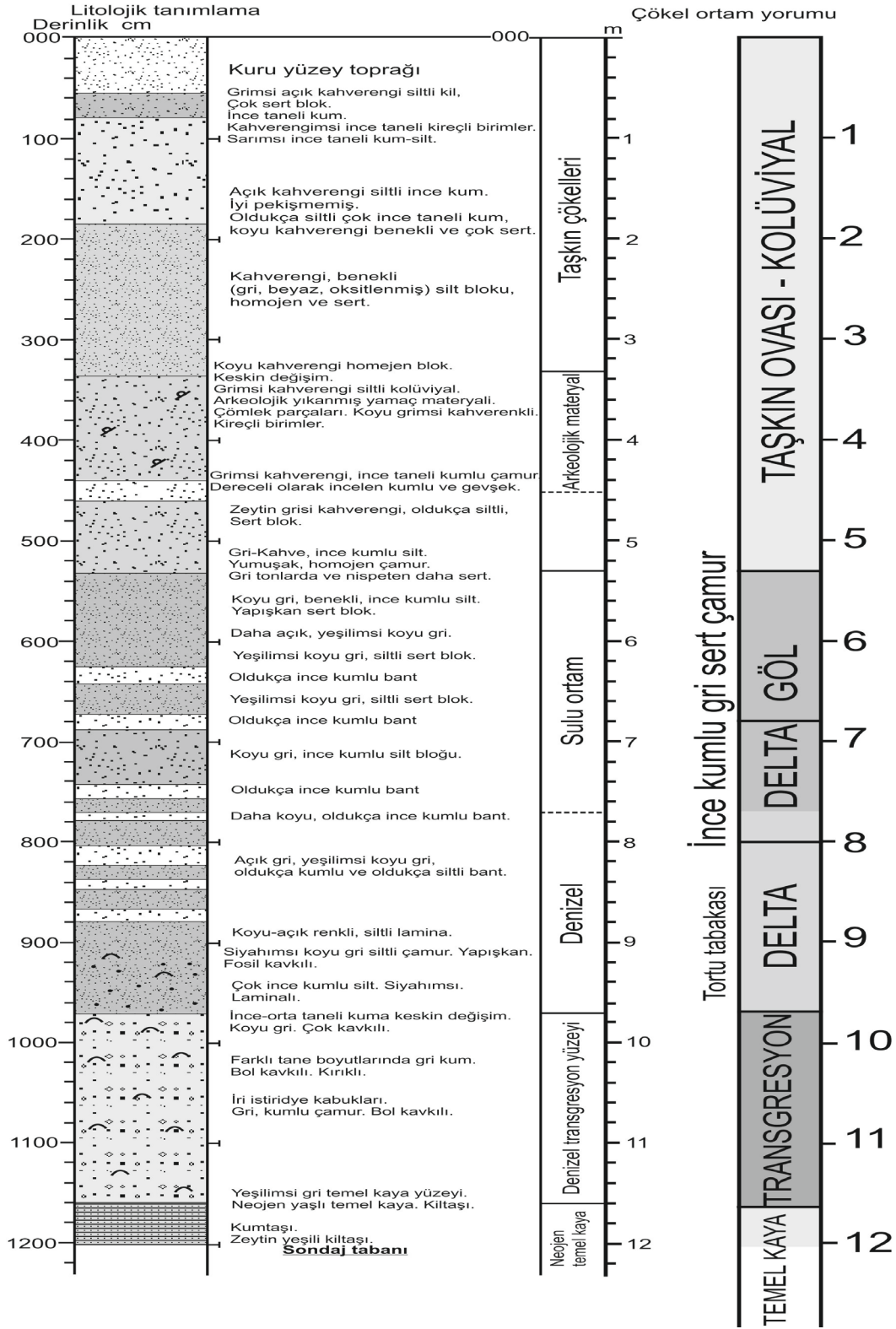
3. Materyal ve Metot

Bu çalışma kapsamındaki kaya manyetizması analizleri için, 2000 yılında Prof. Dr. İlhan KAYAN tarafından Troya'nın kuzey yamacında açılan 175 nolu sondajdan (Şekil 2) alınan 0,5-11,85 metreleri arasını kapsayan 15 adet örnek kullanılmıştır. Bu örneklerin alınmasında Percussion tipi bir sondaj takımı ile motorlu bir kompresör tabanca (Cobra) kullanılmıştır. Kompresör tabanca kullanılarak yere çakılan 1 m'lik delici uç (*gouge drilller*) birer metre uzatılarak derinlere indirilerek uygun seviyelerden örnekler alınmıştır. Bu örnekleme yöntemi ile 60, 50, 35 mm genişlikteki örnekleyciler kullanılarak, bu tür sondaja elverişli yerlerde 15-20 m, gerekirse daha da derinlerden örnek almak mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemle daha ince uçlarla (23 mm) birkaç on metre derinliklerden, daha kısa zamanda örnekler alabilmektedir. Kompresör tabanca ile derine çakılan boruların el yordamıyla değil de hidrolik bir takımla çekilmesi daha temiz ve uygun örneklerin alınmasına olanak sağlamaktadır [31] (Şekil 3).



Şekil 2. Troya Ören Yeri ve çevresi topografik haritası ve sondaj yerleri (siyah noktalar) [31]. Kırmızı ile işaretli yer 175 nolu sondajı göstermektedir.

Alınan örnekler Bulgaristan Bilimler Akademisi Ulusal Jeofizik, Jeodezi ve Coğrafya Enstitüsü Paleomanyetizma Laboratuvarı'nda analiz edilmiştir. Bu çerçevede öncelikle kalıntı mıknatıslama ölçümü için örnekler seramik bir kap içerisinde ezilerek toz haline getirilmiştir. Sırasıyla örneklerin ölçüm sırasında içerisine konulacağı 2 cm çaplı silindirik plastik kaplar temizlenerek boş ağırlıkları ölçülüp kaydedilmiş ve örnekler kalıplara doldurulup sıkıştırılarak ölçüm için hazırlanmıştır. Ölçüme hazırlığın son aşamasında ise kaplara doldurulup sıkıştırılarak ölçüme hazır hale getirilen örneklerin dolu ağırlığı ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Örnekler demanyetizasyon ölçümleri için silindirik kaplar yerine sekizgen şekilli plastik kaplar kullanılarak aynı şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 3. 2000 yılında Prof. Dr. İlhan KAYAN tarafından açılan 175 nolu sondaja ait bilgiler [31]

3.1 Kaya Manyetizması Ölçümleri

Kaya manyetizması ölçümleri, Ulusal Jeofizik, Jeodezi ve Coğrafya Enstitüsü'ndeki (Bulgaristan Bilimler Akademisi) Paleomanyetizma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Manyetik duyarlılık (X), MFK-1A Kappabridge (AGICO Ltd., Çekya) kullanılarak 976 Hz düşük manyetik duyarlılık (X_{lf}) (Tablo 1) ve 15616 Hz yüksek manyetik duyarlılık (X_{hf}) (Tablo 2) iki frekansta ölçülmüştür. Kütleyle özgül manyetik duyarlılık (X),

hacme özgül manyetik duyarlılık (k)'ın örneğin ağırlığına göre normleştirilmesiyle elde edilmiştir.

Ölçüme hazır hale getirilen örneklerin doğal kalıntı mıknatıslanma şiddetleri (NRM) 0,2 mA/m (kısır spin) ile 0,1 mA/m (uzun spin) aralığında gürültü seviyesine sahip, 0,1 mA/m-2500 mA/m aralığında ölçü yapabilen Molspin Minispin spinner manyetometresi kullanılarak manyetik temizleme sonrasında mıknatıslanma tutarlılıklarının belirlenmesi amacıyla x-z, y-z ve x-y doğrultularında üçer kez ölçülerek ortalamaları alınmıştır (Tablo 3). Sonraki aşamada örnekler şiddeti

giderek sifıra doğru azalan bir alternatif manyetik alan uygulanarak, sabit şiddet ve yöne sahip bir dış alanın birlikte etkimesi sonucu kazanılan kalıntı mıknatıslanma çeşidi olan Anhisteretik Kalıntı Mıknatıslanma (ARM) düzeyini belirlemek için Alternatif Alan (AF) temizleme yöntemiyle ölçüme devam edilmiştir.

Örneklerdeki ikincil mıknatıslanmalar AF temizleme yöntemi ile temizlenebilmektedir. Bu yöntemde örnek belirli şiddette bir alternatif manyetik alan içine yerleştirilir, daha sonra alanın şiddeti düzgün bir değişimle sifıra ulaşacak biçimde azaltılır. Alternatif alanla temizleme işlemi sırasında örnek, yer manyetik alanı içinde bulunuyorsa uygulanan alternatif alan şiddeti kademe kademe artırıldıkça, bir yandan doğada kazandığı ikincil mıknatıslanmayı yitirirken istenmeyen bir başka ikincil mıknatıslanma olan ARM kazanır. Bu ikincil mıknatıslanmanın yönü, giderek temizleme işleminin uygulandığı noktadaki yer manyetik alanın yönüne yaklaşıyor. Bir örnek tarafından kazanılan ARM'nin şiddeti, örneğin içinde bulunduğu sabit alanın (h) şiddeti ve örneğe uygulanan alternatif alanın (H) şiddetiyle artış gösterir. Örnek tarafından kazanılan ARM sıcaklıkla temizleme yöntemine karşı çok dirençlidir. Sabit bir dış alan etkisinde bir örnek tarafından kazanılan ARM'nin şiddeti aynı dış alan içinde eşit, IRM şiddetinden küçük, Eş Isıl Kalıntı Mıknatıslanmanın (IRM) şiddetinden büyüktür.

Bu aşamada örnekler için iki farklı düzeyde AF uygulaması yapılmıştır. İlk aşamada ölçüm için hazırlanan örnekler düşük düzeyli 0,2 T'lık alternatif alan temizleme işlemine, ikinci aşamada ise örnekler 2 T'lık AF temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Frekans bağımlı manyetik duyarlılık (X_{fd}), Eşitlik (1) ve (2) ile

$$X_{fd} = X_{lf} - X_{hf} \quad (1)$$

ya da yüzde frekans bağımlı manyetik duyarlılık,

$$\%X_{fd} = (X_{lf} - X_{hf})/X_{lf} \times 100 \quad (2)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada X_{lf} , düşük frekanstaki manyetik duyarlılık ve X_{hf} , yüksek frekanstaki manyetik duyarlılıktır. Ayrıca, örnekler Anhisteretik Kalıntı Mıknatıslanma-Anhisteretic Remanent Magnetisation (ARM) ve İzotermal Kalıntı Mıknatıslanma-Isothermal Remanent Magnetisation (IRM) oluşturmak için kullanılmıştır. AF temizleme, bir spinner manyetometresi (Molspin Ltd., İngiltere) kullanılarak sağlanmıştır. 100 mT'lık AF tepe genliği ve 0,1 mT'lık zayıf ve kararlı bir doğru akım alanı uygulanmıştır. Anhisteretik duyarlılık (X_{ARM}), ARM'nin uygulanan doğru akım alanının şiddetine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Anlık mıknatıslayıcı (Pulse magnetiser) Model IM-10-30 (ASC Scientific, ABD) kullanılarak 2T'lık güçlü alan ve tersine 0,2T'lık zayıf alanlar uygulanarak Doygun İzotermal Kalıntı Mıknatıslanma-Saturated Isothermal Remanent Magnetisation (S_{IRM}) elde edilmiştir. S oranı [32], 0,2T kullanılarak, Eşitlik (3)'te

$$S = IRM_{-0,2T}/S_{IRM} \quad (3)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada $IRM_{-0,2T}$: 0,2T'lık zayıf alanlar uygulanarak Doygun İzotermal Kalıntı Mıknatıslanma değerini ve S_{IRM} , Doygun İzotermal Kalıntı Mıknatıslanmayı gösterir. Sert izotermal kalıntı mıknatıslanma-Hard Isothermal Remanent Magnetisation (H_{IRM}) parametresi, Eşitlik (4)'te

$$H_{IRM} = (S_{IRM} - IRM_{-0,2T})/2 \quad (4)$$

olarak hesaplanmıştır. H_{IRM} , manyetik olarak sert kalıcılık taşıyan minerallerin mutlak konsantrasyonunun bir göstergesi olarak kullanılır [32]. Bu örneklerin mıknatıslanma şiddeti ölçüm sonuçları Tablo 4 ve Tablo 5'te listelenmiştir.

Tablo 1. Sondaj örneklerine ait manyetik duyarlılık ölçümleri (Frekans: 976). Holder ($Re = -1,29 \times 10^{-2}$) ve ($Im = 9,33 \times 10^{-8}$) olarak elde edilmiştir. Re: Kalıntı mıknatıslanma, Im: İndüklem mıknatıslanma, X_{Re_Raw} : Kalıntı mıknatıslanma duyarlılığı (düzeltilmemiş), X_{Im_Raw} : İndüklem mıknatıslanma duyarlılığı (düzeltilmemiş), X_{Re_Corr} : Kalıntı mıknatıslanma duyarlılığı (düzeltilmiş), X_{Im_Corr} : İndüklem mıknatıslanma duyarlılığı (düzeltilmiş), X_{Re_Mass} : Kütle manyetik duyarlılık (kalıntı), X_{Im_Mass} : Kütle manyetik duyarlılık (İndüklem).

No	X_{Re_ham}	X_{Im_ham}	$X_{Re_düz}$	$X_{Im_düz}$	$X_{Re_kütle}$	$X_{Im_kütle}$
TROYA/ 1-1	12,8	$1,96 \times 10^{-5}$	12,9	$1,95 \times 10^{-5}$	$1,27 \times 10^{-2}$	$1,93 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-2	17,9	$2,50 \times 10^{-5}$	18	$2,49 \times 10^{-5}$	$1,77 \times 10^{-2}$	$2,44 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-3	35,4	$4,10 \times 10^{-5}$	35,5	$4,09 \times 10^{-5}$	$3,03 \times 10^{-2}$	$3,49 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-4	41	$4,40 \times 10^{-5}$	41,1	$4,39 \times 10^{-5}$	$3,71 \times 10^{-2}$	$3,96 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-5	24,2	$3,41 \times 10^{-5}$	24,3	$3,40 \times 10^{-5}$	$2,30 \times 10^{-2}$	$3,21 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-6	18,9	$2,73 \times 10^{-5}$	19	$2,72 \times 10^{-5}$	$1,80 \times 10^{-2}$	$2,59 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-7	$6,92 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-2}$	$7,05 \times 10^{-4}$	$1,32 \times 10^{-2}$	$6,69 \times 10^{-7}$	$1,25 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-8	$5,00 \times 10^{-4}$	$1,23 \times 10^{-2}$	$5,13 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-2}$	$4,84 \times 10^{-7}$	$1,15 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-9	$6,50 \times 10^{-4}$	$1,47 \times 10^{-2}$	$6,63 \times 10^{-4}$	$1,46 \times 10^{-2}$	$5,43 \times 10^{-7}$	$1,20 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-10	$9,23 \times 10^{-4}$	$2,64 \times 10^{-2}$	$9,36 \times 10^{-4}$	$2,63 \times 10^{-2}$	$9,03 \times 10^{-7}$	$2,54 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-11	$6,29 \times 10^{-4}$	$2,40 \times 10^{-2}$	$6,41 \times 10^{-4}$	$2,39 \times 10^{-2}$	$5,87 \times 10^{-7}$	$2,18 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-12	$9,68 \times 10^{-4}$	$2,28 \times 10^{-2}$	$9,81 \times 10^{-4}$	$2,27 \times 10^{-2}$	$9,33 \times 10^{-7}$	$2,16 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-13	$5,82 \times 10^{-4}$	$2,08 \times 10^{-2}$	$5,95 \times 10^{-4}$	$2,07 \times 10^{-2}$	$5,95 \times 10^{-7}$	$2,06 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-14	$6,41 \times 10^{-4}$	$2,42 \times 10^{-2}$	$6,54 \times 10^{-4}$	$2,41 \times 10^{-2}$	$6,36 \times 10^{-7}$	$2,34 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-15	$6,64 \times 10^{-4}$	$2,27 \times 10^{-2}$	$6,77 \times 10^{-4}$	$2,26 \times 10^{-2}$	$6,38 \times 10^{-7}$	$2,13 \times 10^{-5}$

Tablo 2. Sondaj örneklerine ait manyetik duyarlılık ölçümleri (Frekans: 15616). Holder ($Re = -1,67 \times 10^{-2}$) ve ($Im = -3,03 \times 10^{-7}$) olarak elde edilmiştir. X_{Re_Raw} : Kalıntı mıknatıslanma duyarlılığı (düzeltilmemiş), X_{Im_Raw} : İndüklem mıknatıslanma duyarlılığı (düzeltilmemiş), X_{Re_Corr} : Kalıntı mıknatıslanma duyarlılığı (düzeltilmiş), X_{Im_Corr} : İndüklem mıknatıslanma duyarlılığı (düzeltilmiş) X_{Re_Mass} : Kütle manyetik duyarlılık (kalıntı), X_{Im_Mass} : Kütle manyetik duyarlılık (İndüklem).

No	X_{Re_ham}	X_{Im_ham}	$X_{Re_düz}$	$X_{Im_düz}$	$X_{Re_kütle}$	$X_{Im_kütle}$
TROYA/ 1-1	12,5	$4,91 \times 10^{-5}$	12,7	$4,95 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^{-2}$	$4,89 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-2	17,7	$6,07 \times 10^{-5}$	17,8	$6,10 \times 10^{-5}$	$1,75 \times 10^{-2}$	$5,98 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-3	34,9	$8,42 \times 10^{-5}$	35,1	$8,45 \times 10^{-5}$	$2,99 \times 10^{-2}$	$7,21 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-4	40,6	$8,70 \times 10^{-5}$	40,8	$8,73 \times 10^{-5}$	$3,68 \times 10^{-2}$	$7,87 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-5	23,9	$7,56 \times 10^{-5}$	24	$7,59 \times 10^{-5}$	$2,27 \times 10^{-2}$	$7,17 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-6	18,4	$6,74 \times 10^{-5}$	18,6	$6,77 \times 10^{-5}$	$1,77 \times 10^{-2}$	$6,43 \times 10^{-8}$
TROYA/ 1-7	$6,71 \times 10^{-4}$	$1,27 \times 10^{-2}$	$6,87 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-2}$	$6,52 \times 10^{-7}$	$1,24 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-8	$4,82 \times 10^{-4}$	$1,48 \times 10^{-2}$	$4,99 \times 10^{-4}$	$1,51 \times 10^{-2}$	$4,70 \times 10^{-7}$	$1,42 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-9	$6,28 \times 10^{-4}$	$1,51 \times 10^{-2}$	$6,44 \times 10^{-4}$	$1,54 \times 10^{-2}$	$5,27 \times 10^{-7}$	$1,26 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-10	$8,82 \times 10^{-4}$	$5,01 \times 10^{-2}$	$8,98 \times 10^{-4}$	$5,04 \times 10^{-2}$	$8,66 \times 10^{-7}$	$4,86 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-11	$5,88 \times 10^{-4}$	$2,46 \times 10^{-2}$	$6,04 \times 10^{-4}$	$2,49 \times 10^{-2}$	$5,53 \times 10^{-7}$	$2,28 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-12	$9,35 \times 10^{-4}$	$4,61 \times 10^{-2}$	$9,52 \times 10^{-4}$	$4,64 \times 10^{-2}$	$9,05 \times 10^{-7}$	$4,41 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-13	$5,47 \times 10^{-4}$	$2,26 \times 10^{-2}$	$5,64 \times 10^{-4}$	$2,29 \times 10^{-2}$	$5,63 \times 10^{-7}$	$2,29 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-14	$6,00 \times 10^{-4}$	$2,44 \times 10^{-2}$	$6,17 \times 10^{-4}$	$2,47 \times 10^{-2}$	$6,00 \times 10^{-7}$	$2,40 \times 10^{-5}$
TROYA/ 1-15	$6,25 \times 10^{-4}$	$2,40 \times 10^{-2}$	$6,41 \times 10^{-4}$	$2,43 \times 10^{-2}$	$6,04 \times 10^{-7}$	$2,29 \times 10^{-5}$

4. Bulgular

Manyetik özellikler manyetik duyarlılık (X), anhisteretik kalıntı mıknatıslanma (ARM) ve doygun izotermal kalıntı mıknatıslanma (S_{IRM} veya IRM_{2T}) konsantrasyona bağlı manyetik parametrelerdir. Manyetik duyarlılık, malzemenin harici bir manyetik alana yerleştirildiğinde mıknatıslanma yeteneğini yansıtır ($M=kH$, burada M, indüklenen mıknatıslanma, H, uygulanan manyetik alandır). Manyetik duyarlılık, bu nedenle bir sedimanter kayacın paramanyetik, ferromanyetik, antiferromanyetik tüm mineral bileşenlerinin katkısını gösterir. Frekansa bağlı manyetik duyarlılık X_{fd} veya % X_{fd} , çok ince taneli süper paramanyetik (SP) manyetit/maghemit parçacıklarının göreceli katkısını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır [33]. Öte yandan ARM, ~ 0,03 µm civarında kısıtlı bir tane boyutu aralığını kapsayan tek domenli (SD) manyetik taneler manyetit (maghemit) tarafından en etkili şekilde elde edilir [33-34]. IRM (S_{IRM}), daha büyük manyetik taneler (çoğunlukla çok domenli -*multi domain* (MD) tane boyutu) tarafından en etkili şekilde elde edilir.

Manyetik eğim açıları, oldukça küçük değişim göstermektedir. Bu durum sediman özelliği gösteren bir zemin koşulunun varlığını doğrulamaktadır. Sapma açısı ise farklı değerlere sahiptir bu da taşınan malzemenin özelliği olarak değerlendirilmiştir. 175 nolu sondaj noktasına [31] ait örneklerin ölçümlerinden hesaplanan farklı manyetik parametrelerin derinlikle değişimleri sırasıyla Tablo 6'da listelenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar grafiklenerek çizdirilmiş, stratigrafik katmanlarla ilişkisi de ortaya konulmuştur (Şekil 4). 175 nolu sondaj boyunca farklı manyetik parametrelerin derinlikle değişimleri stratigrafik katmanlarla uyumlu şekilde değişim göstermektedir. 50-160 cm derinlik aralığı, 90-100 cm'de maksimum $X=371 \times 10^{-8}$ m³/kg manyetik duyarlılık değerleri (Şekil 4a) ile karakterize

edilir. ~150-200×10⁻⁸ m³/kg'ı aşan X değerleri, sediman ve topraklar için son derece yüksek olarak kabul edilir [32,35]. Çünkü genellikle Chernozem veya Luvisol tipi iyi havalandırılmış topraklar $X \sim 100 - 120 \times 10^{-8}$ m³/kg'a sahiptir [36]. Sondaj boyunca hiçbir derinlik aralığında bu kadar yüksek manyetik duyarlılık (X) değerleri elde edilmemiştir. X_{ARM}/X , X_{ARM}/S_{IRM} ve S_{IRM}/k oranlarında minimumlar bu değer aralığında gözlenmektedir (Şekil 4b). Şerit ile işaretlenmiş bölümün, manyetik olarak arttırılmış tabakanın baskın olarak iri (çok domenli-*multi domain*) manyetit tipi mineraller (yüksek S oranı) içerdiğini göstermektedir. Stratigrafik açıklamaya göre, bu aralık ince kongresyonlu kahverengimsi silt-kum tortularına karşılık gelir. 170 - 330 cm aralığında, X değeri ~60-80×10⁻⁸ m³/kg mertebesindeki değerlere keskin bir düşüş göstermekte (Şekil 4a) ve derinlik değeri de % X_{fd} ve ARM ile artış kaydetmektedir. IRM_{2T} ve biparametrik oranlar (Şekil 4b) ise nispeten sabit değerlere sahiptir.

Bu değişimler, SP/SD boyutunda çok ince taneli manyetit/maghemit parçacıklarının derinlikle artan göreceli katkısına işaret etmektedir. Aynı zamanda, daha yüksek H_{IRM} değerleri ve S oranındaki en düşük değerler, hematitin de varlığını göstermektedir. Manyetik parametrelerin, Troya çevresindeki alanlardan gelen toprak malzemelerin deltaya girme durumunu yansıttığı varsayılabilir.

330-450 cm aralığı, arkeolojik malzeme (çömlek parçaları) içeren kolüvyon olarak tanımlanmaktadır ve Şekil 4'te gölgeli olarak gösterilmektedir. En dikkat çekici manyetik değişimler, tabakanın üst kısmında maksimum değerler (~%6) gösteren % X_{fd} parametresinde (Şekil 4a-şekilde % X_{fd} grafiğinde taralı kısım) meydana gelir. Derinlikle azalan H_{IRM} ve hafifçe artan S oranı, hematite manyetitten gelen katkının arttığını göstermektedir. 550-780 cm derinlik aralığı, gri-yeşilimsi bantlı siltli-kumlu katmanlarla delta/gölet ortamını yansıtan olarak belirtilmiştir.

Tablo 3. Troya ören yeri sondaj örneklerine ait Doğal kalıntı mıknatıslanma (NRM) şiddet ölçüm sonuçları.

Ölçü No	Mıknatıslanma		Manyetik Eğim (I)
	Şiddeti ($\times 10^{-3}$) (A/m)	Manyetik Sapma (D)	
TROYA/ 1-1	251,9	15	1
TROYA/ 1-2	262,2	2	2
TROYA/ 1-3	267,9	2	3
TROYA/ 1-4	294,6	13	3
TROYA/ 1-5	295,8	5	2
TROYA/ 1-6	286,4	9	2
TROYA/ 1-7	211,7	23	3
TROYA/ 1-8	245,5	9	2
TROYA/ 1-9	281,6	358	1
TROYA/ 1-10	524,2	23	3
TROYA/ 1-11	470,4	353	4
TROYA/ 1-12	411,6	15	3
TROYA/ 1-13	283,6	347	1
TROYA/ 1-14	239,9	7	3
TROYA/ 1-15	233,6	41	3

Manyetik duyarlık, $k = 148 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 'lık bir zirvenin elde edildiği 680-700 cm derinlik hariç, $\sim 80 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ civarında nispeten sabit bir değere sahiptir (Şekil 4a). Kalıntı mıknatıslanmayla ilgili parametrelerde daha fazla dalgalanma gözlemlenmektedir (Şekil 4a). 560-570 cm ve 680-740 cm aralığında gözlenen maksimum değerler, kararlı manyetik tek domenli (Single Domain-SD), görünür tek domenli (Pseudo Single Domain-PSD) ve çok domenli (Multi Domain-MD) manyetit/maghemit taneciklerinin artan miktarına karşılık gelmektedir.

Burada, IRM ve ARM'deki 560-580 cm'de S_{IRM}/k oranında keskin bir pik yaptığı (Şekil 4b) ve 23 kA/m değerine ulaştığı görülmektedir. $\sim 10-20 \text{ kA/m}$ 'yi aşan [37] S_{IRM}/k değerleri greigit/pirotin oluşumunu işaret ettiği düşünülmektedir. S_{IRM}/k tepesine SIRM, ARM ve $\text{IRM}_{0,2}/X_{\text{fd}}$ oranında bir maksimum eşlik etmektedir (Şekil 4b), bu da greigitin potansiyel varlığına güçlü bir şekilde işaret etmektedir. 800 – 1000 cm derinlik aralığı, kumlu-siltli bantlı delta evresi sedimantasyon olarak yorumlanmıştır [38]. Manyetik duyarlık bu derinlik aralığında belirgin değişimler göstermezken, mıknatıslanmadan sorumlu mineralin tane boyutuna duyarlı parametreler SP, SD ve iri MD manyetit tanelerinin değişen konsantrasyonlarını gösterir. 32 S_{IRM}/k değeriyle 950-960 cm derinliklerde greigit (pirotin) varlığına dair güçlü belirtiler bulunur (Şekil 4b).

Tablo 4. Troya ören yerinde yapılan 175 nolu sondaj çalışmasından alınan örneklerle 2T DC alan uygulaması sonucunda IRM şiddeti değerleri

Ölçü No	Mıknatıslanma		Manyetik Eğim (I)
	Şiddeti (A/m)	Manyetik Sapma (D)	
TROYA/ 1-1	14,18	251	90
TROYA/ 1-2	15,94	293	87
TROYA/ 1-3	18,85	42	90
TROYA/ 1-4	24,63	192	89
TROYA/ 1-5	21,82	280	89
TROYA/ 1-6	18,62	268	89
TROYA/ 1-7	8,379	310	89
TROYA/ 1-8	7,709	278	89
TROYA/ 1-9	9,816	301	89
TROYA/ 1-10	13,49	255	89
TROYA/ 1-11	9,553	252	90
TROYA/ 1-12	12,40	306	89
TROYA/ 1-13	8,057	38	90
TROYA/ 1-14	7,955	297	89
TROYA/ 1-15	7,984	293	90

Tablo 5. Troya ören yerinde yapılan 175 nolu sondaj çalışmasından alınan örneklerle -0,2T DC alan uygulaması sonucunda IRM şiddeti değerleri

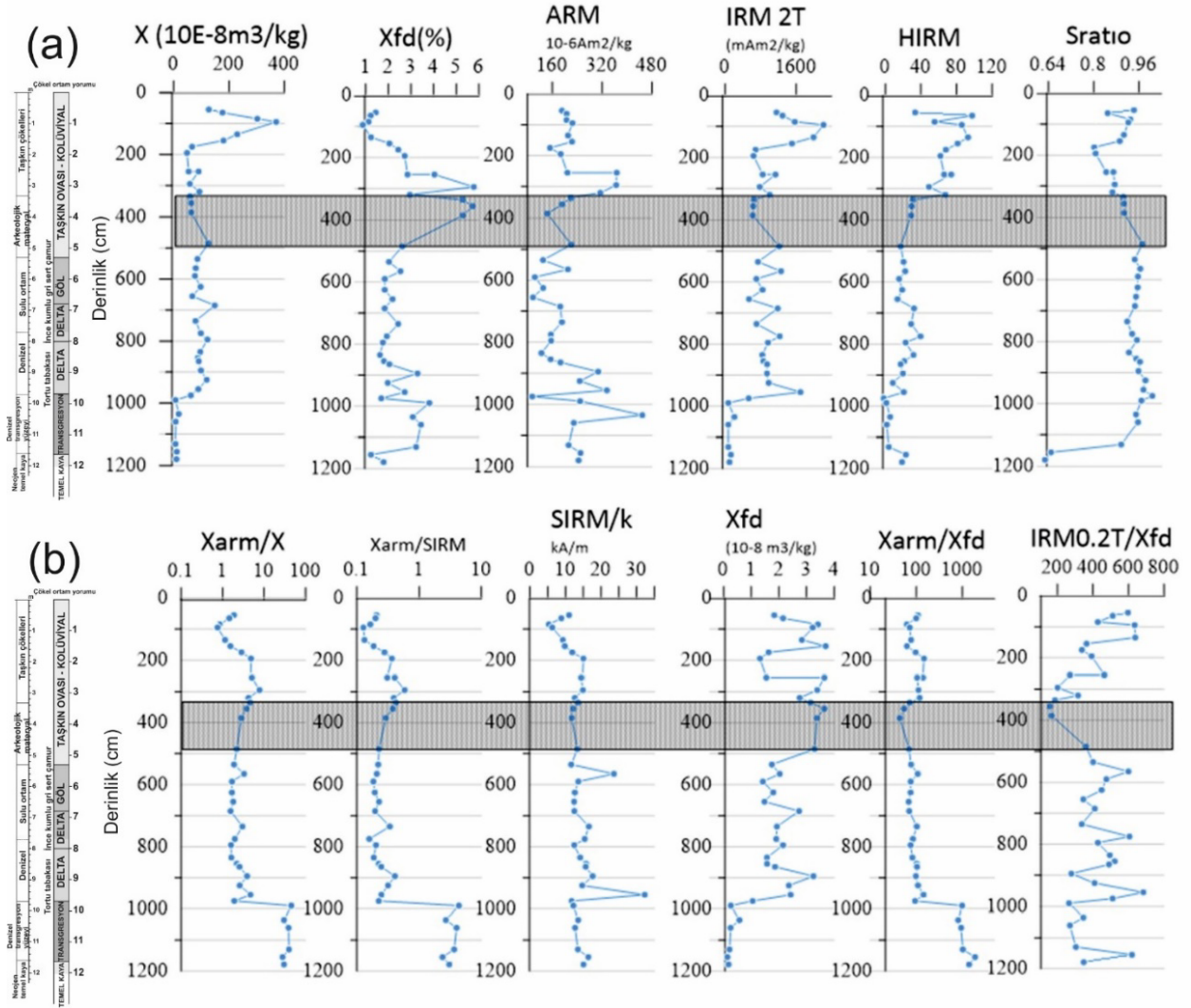
Ölçü No	Mıknatıslanma		Manyetik Eğim (I)
	Şiddeti (A/m)	Manyetik Sapma (D)	
TROYA/ 1-1	13,37	132	-89
TROYA/ 1-2	13,52	145	-90
TROYA/ 1-3	17,54	217	-87
TROYA/ 1-4	21,84	124	-89
TROYA/ 1-5	19,91	127	-89
TROYA/ 1-6	16,61	64	-89
TROYA/ 1-7	6,72	175	-90
TROYA/ 1-8	6,22	177	-89
TROYA/ 1-9	8,294	166	-90
TROYA/ 1-10	11,73	175	-90
TROYA/ 1-11	8,346	26	-89
TROYA/ 1-12	10,74	109	-90
TROYA/ 1-13	7,287	159	-89
TROYA/ 1-14	7,206	314	-90
TROYA/ 1-15	7,237	132	-90

Erken Holosen zamanında, deniz seviyesinin hızla yükselmesiyle (Transgresyon olayı, Şekil 3) delta ortamlarının denize doğru gelişimi ve taşkın yatağı istiflenmeleri Troya ve etrafındaki çevre koşullarını değiştirmiştir. 980 cm derinliğin altında tüm parametrelerde çok belirgin ve keskin bir değişim gözlenir (Şekil 4a,b), konsantrasyona bağlı parametrelerde (X , IRM, H_{IRM}) önemli bir azalma, ancak ARM'de artış görülür. Bu özel davranış, X_{ARM}/X , $X_{\text{ARM}}/X_{\text{fd}}$ ve $X_{\text{ARM}}/S_{\text{IRM}}$ oranlarında çok yüksek bir artışa yol açar; bu durum, kararlı tek domenli manyetit ortamda artış gösterdiğinin bir ölçütüdür [35,37].

Sondajın en derin kısmı, S oranının aniden yüksek değerlerden 0,6'nın altındaki S'ye düşmesiyle manyetik mineralojide belirgin bir değişiklik karakterize edilir; bu, yüksek koherziviteli manyetik minerallerin (hematit, götit gibi) yaygınlığını gösterir. Bu değişiklik, Neojen kiltayla temsil edilen ana kayaca geçişe karşılık gelir.

Tablo 6. 175 nolu sondajdan elde edilen kaya manyetizması parametreleri

Örnek Adı	Derinlik (cm)	Kütle (gr)	X (m ³ /kg)	IRM _{2T} (mAm ² /kg)	IRM _{0.2T} (mAm ² /kg)	ARM/IRM			ARM (×10 ⁻³) (A/m)	IRM _{2T} (A/m)	X _{fd} (×10 ⁻⁸) (%)	X _{fd} (%)	ARM (mAm ² /kg)	IRM _{0.2T} (A/m)
						ARM/X	0.2T	S_Oranı						
TROYA/ 1-1	55	10,22	127,29	11099,80	10457,92	1,50	0,018	0,94	244	14,18	1,83	1,44	190,99	13,360
TROYA/ 1-2	65	10,16	176,91	12535,43	10645,67	1,17	0,02	0,84	261,8	15,92	2,15	1,22	206,14	13520
TROYA/ 1-3	85	10,4	302,73	14500	13476,92	0,68	0,0	0,93	267,4	18,85	3,41	1,13	205,69	17520
TROYA/ 1-4	95	10,73	370,98	19235,78	17744,64	0,60	0,01	0,92	301	2,58	3,22	0,87	224,41	23800
TROYA/ 1-5	135	11,06	229,78	16274,86	14755,87	0,92	0,01	0,91	291	2,25	2,83	1,23	210,48	20400
TROYA/ 1-6	155	10,11	180,38	14733,92	13143,42	1,24	0,02	0,89	282	18,62	3,69	2,05	223,14	16610
TROYA/ 1-7	175	10,25	66,86	6540,48	5244,87	2,28	0,03	0,80	195,2	8,38	1,63	2,44	152,35	6720
TROYA/ 1-8	195	10,38	48,36	5942,19	4793,83	3,87	0,04	0,80	242,6	7,71	1,317	2,72	186,97	6220
TROYA/ 1-9	225	10,79	54,27	7280,81	6146,43	3,84	0,03	0,84	281	9,82	1,54	2,84	208,34	8290
TROYA/ 1-10	255	10,51	90,28	10268,31	8928,64	4,06	0,04	0,87	482	13,49	3,644	4,04	366,88	11730
TROYA/ 1-11	295	10,21	58,69	7482,86	6542,60	6,22	0,05	0,87	466	9,55	3,387	5,77	365,13	8350
TROYA/ 1-12	320	10,13	93,27	9792,69	8481,73	3,37	0,04	0,86	398	12,4	2,751	2,95	314,31	10740
TROYA/ 1-13	335	10,06	59,48	6409,54	5797,21	3,69	0,04	0,90	276	8,06	3,14	5,29	219,48	7290
TROYA/ 1-14	355	9,95	63,60	6391,95	5796,98	3,01	0,03	0,90	237,9	7,95	3,639	5,72	191,27	7210
TROYA/ 1-15	385	9,73	63,78	6561,15	5952,72	2,26	0,02	0,90	175	7,98	3,376	5,29	143,88	7240

**Şekil 4.** 175 nolu sondaj için elde edilen manyetik duyarlık (X) ve mıknatıslanma türleri (ARM, IRM, SIRM ve HIRM) arasındaki ilişkileri de tanımlayan manyetik parametrelerdeki değişimler (a) İksel okumalar, (b) Orsals gösterimler.

5. Tartışma

Paleoçevresel çalışmalarda kaya manyetizması özelliklerinin kullanılmasının genel gerekçesi, tortuların manyetik ve morfolojik özelliklerinin, tortul kökeni, taşıma süreçleri ve/veya diyajenezdeki değişiklikler hakkında çevresel ve ortam koşulları hakkında tutarlı

veriler sunabilmesidir. Çökel rengi genellikle organik karbon içeriği, demirin oksidasyon durumu ve ana kaya içeriğindeki minerallerin rengi tarafından kontrol edilir [38]. Oksik tortular genellikle beyaz, sarı, kahverengi veya kırmızı renktedir. Deniz tortularında oksik/azotludan paslı diyajenetik geçiş meydana geldiğinde, hakim renk Fe³⁺'ın Fe²⁺'a indirgenmesi

nedeniyle kahverengiden zeytin yeşiline döner [39]. Sülfürlü ortamlarda, reaktif Fe³⁺ Fe²⁺'a indirgenir ve tortular organik karbon içeriğine bağlı olarak açık griden koyu griye ve siyaha kadar değişen gri renktedirler. Koyu renkler ayrıca ince taneli pirit ve monosüfitlerin varlığını da gösterebilir [39]. Bu ilişkiler göz önüne alındığında, 175 nolu sondajda, katmanın üzerinde biriken ve arkeolojik materyaller içeren taşkın tortularının (örneğin ~340 cm derinliğe kadar) oksik bir ortamı temsil ettiği varsayılabilir. Bu derinliğe kadar olan birimler arkeolojik malzemeler de içeren kolüvyal bir istif üzerinde bulunan grimsi açık kahverengikahverengi siltli-killi çökeller ile ince taneli kumlardan oluşan taşkın ovası sedimanları ile temsil edilmektedir (bkz. Şekil 3). Buna karşılık, ~450 cm derinliğin altında tanımlanan gri ve zeytin tonları, yoğun demir indirgenmesini ve olası demir sülfidlerinin varlığını doğrulamaktadır. Sondajın bu iki genel bölümü ayrı ayrı ele alınmıştır.

Sondajın en üst ~360 cm'sini oluşturan taşkın çökelleri oksik ortamda birikmiş olarak kabul edilebilir ve bu nedenle manyetik parametrelerdeki değişimler hidrolojik değişimlerle ilişkili olabilir [40]. SIRM esas olarak manyetit gibi ferrimanyetik minerallerin konsantrasyonuna bağlıdır [32] ve bundan dolayı SIRM, biriken çökellerin kaynağı tarafından kontrol edilir. Karot yüzeyinden itibaren manyetik parametrelerin derinlikle değişimleri (Şekil 4), muhtemelen çökel ortamına uzak kaynaklardan ferrimanyetik mineraller açısından zengin malzeme getiren oldukça büyük bir taşkın olayını göstermektedir. Bu seviyenin de yüksek oranda güçlü manyetik mineral içeriğine sahip bir tabakanın (50 -160 cm) varlığına işaret ettiği düşünülmektedir. Bu hipoteze uygun olarak, manyetik tane boyutu göstergeleri (%X_{fd}, iki parametrelilik oranlar (Şekil 4b) kaba taneli manyetik fraksiyonu işaret etmektedir. Bu tabakadaki son derece yüksek manyetik duyarlılık (X) değerleri dikkate alındığında, bu fraksiyonun kaynağı volkanik/granitik kayalar [32] veya antropojenik yanmış kil malzemeleri [41] olduğu varsayılmaktadır. Ferrimanyetik fraksiyonun konsantrasyonundaki bu maksimuma, H_{IRM} parametresindeki (hematit içeriğinin bir temsilcisi) bir maksimum daha eşlik ettiğinden, bu dönemde hakim iklim koşullarının aşırı yağışlı ve sıcak olduğu söylenebilir [42]. [31] Kayan, alüvyal düzlüklerin çevresindeki eteklere doğru tabandaki taşkın çökellerine kolüvyal malzemelerin karıştığını ifade etmektedir. Bunlar Troya çevresindeki Neojen yaşlı, alçak sırt yamaçlarından yağmur suları ile yıkanıp eteklerde istiflenen, genellikle ince kumlu sedimanlardır ve bunların kökeni alüvyal düzlüklerden yüksek alanlarda oluşan killi toprak materyali olduğu için, taşkın sedimanlarından ayrılmaktadır. 200 cm derinliğin altında, konsantrasyona bağlı manyetik parametreler, güçlü manyetik fraksiyonun konsantrasyonunda ani bir düşüşe işaret etmektedir (Şekil 4a), bu veri de daha eski tortuların yerel kaynaklardan beslendiğini göstermektedir. Yüzeyden 200 cm derinliğe kadar olan seviyede %X_{fd}, X_{ARM}/SIRM, X_{ARM}/X'deki sürekli artış, ince taneli fraksiyonun göreceli oranındaki kademeli bir artışa karşılık gelmektedir. Ayrıca bu seviyeye kadar gözlenen yer yer bloklu ve arkeolojik malzemeler de

kaba taneli manyetik minerallerin varlığına işaret etmektedir. Bu desen, sediman arzının yoğunluğunun azalması ve dolayısıyla daha sıcak iklim ve daha düşük yağış (örn. kuraklaşma eğilimi) koşulları ile tutarlıdır. 250 cm'den başlayarak ~400 cm'ye kadar uzanan ARM ve %X_{fd}'deki keskin pikler, karotun daha derin alt kesiminin üst sınırını (330 cm derinlik) temsil etmesine rağmen, kolüvyal birikim evreleri antropojenik tortularla da temsil edilmektedir. Artan ARM ve %X_{fd} değerleri, yanmış kilden oluşan arkeolojik malzemeler için tipiktir [41]. Sondajın bu oksik üst kısmı ayrıca H_{IRM} parametresindeki (bir hematit göstergesi) kademeli düşüşle de karakterize edilir. Bu da hematitin (manyetit oksidasyon ürünü) muhtemelen sediman birikiminden sonra oluştuğu anlamına gelir.

Sondajın açıklamasında tanımlanan "Pond" aşaması (~550-700 cm derinlik, Delta-Göl ortamı) H_{IRM} varyasyonlarında açıkça ayrılmıştır (Şekil 4a) ve bu katmandaki düşük sabit değerlerle karakterize edilmiştir. ARM, IRM ve %X_{fd}'deki dalgalanmalar muhtemelen hakim redoks koşullarında ve ilgili diyajenetik ortamda belirgin değişiklikleri göstermektedir [39]. Yüksek SIRM/k, X_{ARM}/X ve IRM_{0.2T}/X_{fd} ile bu aralıktaki oluşan katman, kararlı tek alan tane boyutuna sahip greigit veya pirotitin olası varlığını göstermektedir. [39,43] çalışmalarında, detrital monoklinik pirotitin aşınan metamorfik kayaların hızlı sel suları ile taşınarak tortul çukurlara biriktirilebileceğini ortaya koymuşlardır.

~660-960 cm katmanı için ortaya çıkarılan deltaik çökelme ortamı koşulları, manyetik parametrelerle iyi bir şekilde görselleştirilmiştir. Bu katman nispeten daha yüksek manyetik duyarlılık (X) değerleri ve salınımlı %X_{fd}, ARM, SIRM oranları içermektedir (Şekil 4). Bu durum, sediman birikim süreci ve organik maddedeki değişikliklerden kaynaklanan kimyasal reaksiyondaki (indirgenme-yükseltgenme) koşullarındaki etkileri gösterir. Transgresyon fazının hemen üzerindeki katmanda, greigit açısından zengin katman da çıkarılabilir. Bu nedenle numunenin bu seviyesi, yağışta önemli artışla çok daha sıcak bir iklim dönemine karşılık gelmektedir.

Sondajın transgresyon fazına karşılık gelen en alt kısmı, tüm manyetik parametrelerde (Şekil 4) güçlü manyetik minerallerin en düşük bağlı konsantrasyonu (örn. X, SIRM, H_{IRM}'deki minimumlar) agresif bir şekilde artan SP ve SSD tanecik içeriği (sırasıyla %X_{fd} ve ARM) ile çok keskin bir şekilde yansıtılmıştır. İki parametrelilik oranların elde edilen değerleri (Şekil 4), manyetotaktik bakteriler tarafından üretilen bir manyetozom fraksiyonunun varlığı için beklenen değerlerle de tutarlıdır (X_{ARM}/X>40, X_{ARM}/X_{fd}>1000, X_{ARM}/SIRM >4) [32].

6. Sonuç

175 nolu sondajda, katmanın üzerinde ~340 cm derinliğe kadar biriken ve arkeolojik materyaller içeren taşkın tortularının oksik bir ortamı temsil ettiği varsayılmaktadır. Diğer yandan, ~450 cm seviyesinin altında tanımlanan gri ve zeytin tonları, yoğun demir indirgenmesini ve olası demir sülfidlerinin varlığını doğrulamaktadır.

Sondajın en üst ~360 cm'sini oluşturan taşkın çökelleri oksik ortamda birikmiş olduğundan manyetik parametrelerdeki farklılaşmalar hidrolojik değişimlerle ilişkilendirilmiştir.

Yüzeyden itibaren manyetik parametrelerin derinlikle değişimleri, muhtemelen çökel ortamına uzak kaynaklardan ferrimanyetik mineraller açısından zengin malzeme transferine oldukça büyük bir taşkın olayının neden olduğunu göstermektedir. Bu seviyenin de yüksek oranda güçlü manyetik mineral içeriğine sahip bir tabakanın (50 -160 cm) varlığına işaret ettiği düşünülmektedir. Bu dönemdeki hakim iklim koşullarının aşırı yağışlı ve sıcak olduğu söylenebilir.

200 cm altında, konsantrasyona bağlı manyetik parametreler, güçlü manyetik fraksiyonun konsantrasyonunda ani bir düşüşü göstermektedir. Bu durum da daha eski tortulların yerel kaynaklardan beslendiğini işaret etmektedir. Bu veri, sediman arzındaki yoğunluğunun azalması ve dolayısıyla daha sıcak iklim ve daha düşük yağış koşulları ile tutarlı gözükmektedir.

~660-960 cm katmanı için ortaya çıkarılan deltaik Çökelleme ortamı koşulları, manyetik parametrelerle oldukça iyi desteklenmektedir ve bu seviye yağış oranındaki önemli bir artış ile oldukça sıcak bir iklim dönemini işaret etmektedir.

1000 cm civarında gözlenen transgresyon yani denizel tortulların karasal tortullar üzerine gelmesi sonucu manyetik duyarlılık değeri belirgin şekilde düşmüştür.

Teşekkür

Bu proje FBA-2023-4318 nolu bağımsız araştırma projesi olarak ÇOMÜ BAP Birimi tarafından desteklenmiştir. Troya Ören yerinden numune toplanması sırasında yardımlarını ve katkılarını esirgemeyen Troya Müze Müdürlüğü ve Troya kazı ekibine teşekkür ederiz.

Yazarların Katkısı

AB-Projenin yürütücüsüdür. Makale yazımında ve proje verilerinin elde edilmesinin koordinasyonunda görev almıştır. **ZA**-Makale yazımı, arazi ve laboratuvarında verilerin elde edilmesinde görev almıştır. **ÖB**-Makale yazımı, arazi ve laboratuvarında verilerin elde edilmesinde görev almıştır. **DJ**-Makale yazımı, laboratuvarında verilerin elde edilmesi ve yorumlanmasında görev almıştır. **NJ**-Makale yazımı, laboratuvarında verilerin elde edilmesi ve yorumlanmasında görev almıştır. **RA**-Troya Kazı Başkanı'dır. Troya'dan numunelerin alınması ve arkeolojik bilgilerin derlenmesinde katkı sağlamıştır. **EÖ**-Troya ören yeri sondaj verisinin temininde ve makale yazımında görev almıştır. **İK**- Troya ören yeri sondaj verisinin kullanımına olanak tanımış, makalenin iklim yorumlanması aşamasında yayınları ve sözlü bilgileriyle katkı sağlamıştır.

AB: Aydın Büyüksaraç, **ZA**: Zafer Akpınar, **ÖB**: Özcan Bektaş, **DJ**: Diana Jordanova, **NJ**: Neli Jordanova, **RA**: Rüstem Aslan, **EÖ**: Ertuğ Öner, **İK**: İlhan Kayan

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynakça

1. Maher, B. A. (1998). Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137, 25–54. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00103-X)
2. Tite, M. S. & Linington, R. E. (1975). Effect of climate on the magnetic susceptibility of soils, *Nature*, 265, 565-566. <https://doi.org/10.1038/256565a0>
3. Shenggao, L. (2000). Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. *Catena*, 40, 359–73. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00092-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00092-8)
4. Kraft, J. C., Rapp, G., Kayan, İ. & Luce, J. V. (2003). Harbor areas at ancient Troy: Sedimentology and geomorphology complement Homer's Iliad, *Geology*, 31(2), 163–166.
5. Delile, H., Blichert-Toft, J., Goiran, J. P., Stock, F., Arnaud-Godet, F., Bravard, J. P., Brückner, H. & Albarède, F. (2015). Demise of a harbor: a geochemical chronicle from Ephesus, *Journal of Archaeological Science*, 53, 202-213, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.10.002>.
6. Rosenbaum, J. G., Reynolds, R. L., Adam, D. P., Drexler, J., Sarna-Wojcicki, A. M. & Whitney, G.C. (1996). A middle Pleistocene climate record from Buck Lake, southern Oregon—Evidence from sediment magnetism, trace-element geochemistry, and pollen, *Geological Society of America Bulletin*, 108, 1328–1341.
7. Parés, J. M. (2015). Sixty years of anisotropy of magnetic susceptibility in deformed sedimentary rocks, *Frontiers in Earth Science*, 3, 4-13. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00004>
8. Finkler, C. (2017). *The geological record of ancient harbours – using ancient harbour geoarchives of Corcyra (Greece) to reconstruct the palaeoenvironmental development and to identify extreme events by means of a multi-proxy based geoarchaeological approach* (Dissertation Johannes Gutenberg-Universität in Mainz).
9. Heller, F. & Evans, M. E. (1995). Loess magnetism. *Reviews of Geophysics*, 33, 211-240. <https://doi.org/10.1029/95RG00579>.
10. Schwertmann, U. & Taylor, R. M. (1977). Iron oxides. In: Minerals in soil environments, J. B. Dixon and S.B. Weed, eds. *Soil Science Society of America Journal*, 145-179.
11. Singer, M.J. & Fine, P. (1989). Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of Northern

- California soils. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 1119-1127. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300040023x>.
12. Büyüksaraç, A., Akpınar, Z., Bektaş, Ö., & Aslan, R. (2025). Troya Antik Kenti'nde Arkeomanyetik İncelemeler. *Kültürel Miras Araştırmaları*, 6(1), 32-42. <https://doi.org/10.59127/kulmira.1670968>.
 13. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) (2002). *Türkiye Jeoloji Haritası, Çanakkale Paftası (1:500.000 ölçekli)*. MTA, Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.
 14. Yaltrak, C., Alpar, B., Sakıncı, M. & Yüce, H. (2000). Origin of the Strait of Çanakkale (Dardanelles): regional tectonics and the Mediterranean-Marmara incursion. *Marine Geology*, 164, 139-156. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00134-6](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00134-6).
 15. Şengör, A. M. C. (1979). The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance. *Journal of Geological Society London*, 136, 269-282. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.136.3.0269>.
 16. Şengör, A. M. C. & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181-241, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4).
 17. Şengör, A. M. C., Satır, M. & Akkök, M. (1984). Timing of tectonic events in the Menderes Massif, western Turkey: implications for tectonic evolution and evidence for Pan-African basement in Turkey, *Tectonics*, 3, 693-707. <https://doi.org/10.1029/TC003i007p00693>.
 18. Yılmaz, Y. (1989). *An approach to the origin of young volcanic rocks of Western Turkey*. In: Şengör, A.M.C. (Ed.), *Tectonic evolution of the Tethyan Region*. Kluwer Ac. Publ., 159-189. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2253-2_10.
 19. Yılmaz, Y. (1997). *Geology of Western Anatolia*. In: Schindler, C., Fister, M.P. (Eds). *Active Tectonics of Northwestern Anatolia-The Marmara poly-project*. Vdf Hochschulverlag A G an der ETH, Zurich. E.T.H. Univ. Press, Zurich, 31-53.
 20. Genç, Ş. C. (1998). Evolution of Bayramiç magmatic complex. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85 (1-4), 233-249. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00057-2).
 21. Erol, O. (1992). Çanakkale bölgesinin jeomorfolojik ve neotektonik evrimi. *Bulletin of Turkish Association Petroleum Geology*, 4 (1), 147-165.
 22. Elmas, A. & Meriç, E. (1998). The seaway connection between the Sea of Marmara and the Mediterranean: tectonic development of the Dardanelles, *International Geology Review*, 40(2), 144-162. <https://doi.org/10.1080/00206819809465203>.
 23. Çağatay, N., Görür, N., Alpar, B., Saatçılar, R., Akkök, R., Sakıncı, M., Yüce, H., Yaltrak, C. & Kuşçu, I. (1998). Geological evolution of the Gulf of Saros, NE Aegean Sea. *Geo-Marine Letters*, 18, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s003670050045>.
 24. Tüysüz, O., Barka, A. A. & Yiğitbaş, E. (1998). Geology of the Saros Graben: its implications on the evolution of the North Anatolian Fault in the Ganos-Saros Region, NW Turkey. *Tectonophysics*, 293, 105-126. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00085-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00085-7).
 25. Yaltrak, C., Alpar, B., Yüce, H. (1998). Tectonic elements controlling the evolution of the Gulf of Saros (northeastern Aegean Sea, Turkey). *Tectonophysics*, 300, 227-248. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00242-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00242-X).
 26. Gökaşan, E., Ergin, M., Özyalvaç, M., Sur, H. İ., Tur, H., Görüm, T., Ustaömer, T., Batuk, F., Alp, H., Birkan, H., Türker, A., Gezgin, E. & Özturan, M. (2008). Factors controlling the morphological evolution of the Çanakkale Strait (Dardanelles, Turkey), *Geo-Marine Letters*, 28, 107-129. <https://doi.org/10.1007/s00367-007-0094-y>.
 27. Gökaşan, E., Görüm, T., Tur, H. & Batuk, F. (2012). Morpho-tectonic evolution of the Çanakkale Basin (NW Anatolia): evidence for a recent tectonic inversion from transpression to transtension, *Geo-Marine Letters*, 32(3), 227-239. <https://doi.org/10.1007/s00367-011-0262-y>.
 28. Ustaömer, T., Gökaşan, E., Tur, H., Görüm, T., Batuk, F., Kalafat, D., Alp, H., Ecevitoglu, B. & Birkan, H. (2008). Faulting, mass-wasting and deposition in an active dextral shear zone, the Gulf of Saros and the NE Aegean Sea, NW Turkey. *Geo-Marine Letters*, 28 (3), 171-193. <https://doi.org/10.1007/s00367-007-0099-6>.
 29. Gökaşan, E., Tur, H., Ergin, M., Görüm, T., Batuk, F. G., Sağcı, N., Ustaömer, T., Emem, O. & Alp, H. (2010). Late Quaternary evolution of the Çanakkale Strait region (Dardanelles, NW Turkey): implications of a major erosional event for the postglacial Mediterranean-Marmara Sea connection. *Geo-Marine Letters*, 30 (2), 113-131. <https://doi.org/10.1007/s00367-009-0166-2>.
 30. Atabey, E., Ilgar, A. & Sakıtaş, A. (2004). Çanakkale Havzasının Orta-Üst Miyosen stratigrafisi, Çanakkale, KB Türkiye. *MTA Dergisi*, 128, 79-97.
 31. Kayan, İ. (2000). *The water supply of Troia. Studia Troica*. Band 10, Philipp von Zabern, Mainz am Rhein. Germany p. 135-144.
 32. Thompson, R. & Oldfield, F. (1986). *Environmental magnetism*. by R. Allen and Unwin (Publishers) Ltd, 40 Museum St., London WC1A 1LU, ISBN 0-04-538003-1, 227 pp.
 33. Dunlop, D. J. & Özdemir, Ö. (1997). *Magnetism in nature*. In: *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge Studies in Magnetism. Cambridge University Press, Cambridge, UK 1-15. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612794>.
 34. Maher, B. A. (1988). Magnetic properties of some synthetic submicron magnetites. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 94, 83-96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1988.tb03429.x>

35. Evans, M. & Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. Volume 86 in the International Geophysics Sreies: Edited by Renatadmowska, James R. Holton and H. Thomas Rossby. Academic Press, San Diego, CA, USA. p.317.
36. Jordanova, N. (2016). *Soil Magnetism: Applications in Pedology, Environmental Science and Agriculture*. Academic Press, Elsevier, p. 445.
37. Oldfield, F. (1994). Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments. *Journal of Geophysical Research*, 99(B5),9045-9050. <https://doi.org/10.1029/93JB03137>.
38. Dearing, J. A., Hu, Y., Doody, P., James, P.A. & Brauer, A. (2001). Preliminary reconstruction of sediment-source linkages for the past 6000 yrs at the Petit Lac d'Annecy, France, based on mineral magnetic data, *Journal of Paleolimnology* 25, 245–258. <https://doi.org/10.1023/A:1008186501993>.
39. Roberts, A. P. (2015). Magnetic mineral diagenesis (Invited review). *Earth-Science Reviews*, 151, 1–47. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.09.010>.
40. Siteo, S. R., Risberg, J., Norström, E., Snowball, I., Holmgren, K., Achimo, M. & Mugabe, J. (2015). Paleo-environment and flooding of the Limpopo River-plain, Mozambique, between c. AD 1200-2000. *Catena*, 126, 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.038>.
41. Jordanova, N., Jordanova, D. & Kostadinova-Avramova, M. (2024). *Synergy of Environmental Magnetism and Archaeomagnetism for the Benefit of Archaeology-State of the Art in Bulgaria*. In book: World Archaeo-Geophysics. Integrated minimally invasive approaches using country-based examples, Eds. Carmen Cuenca-Garcia, Andrei Asăndulesei, Kelsey M. Lowe; Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-57900-4>.
42. Makaroğlu, Ö. (2023). Küçükçekmece Lagünü'nün Çevre Manyetizması: Son 3900 yıl boyunca paleo-ortam değişimleri, *Çanakkale Onsekiz Mart University, Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 9(3), 545-559. <https://doi.org/10.28979/jarnas.1246766>.
43. Horng, C. S. & Roberts, A. P. (2006). Authigenic or detrital origin of pyrrhotite in sediments?: Resolving a paleomagnetic conundrum, *Earth Planetary Science Letters*, 241, 750–762. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.008>.



© Author(s) 2025. This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>