



## Kıbrıs Adası ve Çevresindeki Depremlerin Zamansal ve Mekânsal Dağılımı: Jeoistatistiksel Bir Yaklaşım

### *Spatial and Temporal Distribution of Earthquakes in Cyprus and its Surroundings: A Geostatistical Approach*

ÇAĞAN ALEVKAYALI <sup>1\*</sup>, HİLMİ DİNDAR <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup> Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, Lefkoşa, Kuzey Kıbrıs

Geliş (*received*): 11 Ekim (October) 2021 Kabul (*accepted*): 29 Haziran (June) 2022

#### ÖZ

Yer kabuğundaki ani hareketler sonucunda meydana gelen depremler ortaya çıktıkları bölgenin tektonizması ile ilişkilidir. Kıbrıs Adası ve Kıbrıs Yayı; Afrika, Avrasya ve Arap levhalarının kesiştiği bölgede Alp-Himalaya Kıvrım Kuşağı'nın bir üyesidir. Bundan dolayı Kıbrıs Adası ve çevresi sismik açıdan aktif bir bölgedir. Depremlerin sismik özellikleri ve mekânsal ilişkilerinin ortaya konulması o bölgedeki fay sisteminin ve tektonizmanın işleyişi hakkında bilgiler vermektedir. Bu çalışmanın amacı Kıbrıs Adası ve çevresindeki depremlerin zamansal ve mekânsal dağılımını jeoistatistiksel yöntemlerle ortaya koyarak sismik aktivitenin fay hatları ile olan ilişkisinin açıklanmasıdır. Kıbrıs Adası ve çevresindeki depremlerin mekânsal yoğunluğu Kernel yoğunluk fonksiyonundan yararlanılarak belirlenmiştir. Depremlerin mekânsal kümelenme özellikleri Anselin Yerel Moran'ın I ve Getis-Ord-Gi\* Kümelenme Analizleri kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca çalışma alanında depremlerin zamansal-mekânsal değişimleri, standart sapma elipsi, ortalama merkez ve medyan merkezi hesaplanarak ortaya konulmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar depremlerin Kıbrıs Yayı'nın batısında ve Kıbrıs Adası'nın güneybatısında yoğunlaştığını göstermiştir. Kıbrıs Adası ve çevresindeki depremlerin mekânsal kümelenme özelliklerine bakıldığında kuzeybatıda küçük depremlerin, güneydoğuda ise büyük depremlerin kümelenme gösterdiği tespit edilmiştir. Kıbrıs Adası'nın güneyindeki depremlerin mekânsal yoğunluğu fazla olmasına rağmen bu bölgedeki küçük veya büyük depremlerde anlamlı kümelenme test edilememiştir. Kıbrıs Yayı ve Kıbrıs Adası'nın kuzeyinde  $M \geq 6$  depremlerin gerçekleşmediği sismik bir boşluk belirlenmiştir. Bu bölgedeki enerji birikimi ve transform fayın bulunması büyük depremlerin gerçekleşme potansiyelini oluşturmaktadır. Son olarak Kıbrıs Adası ve çevresinde gerçekleşen depremlerin yıllar arasında mekânsal ortalama ve ortanca merkezlerinin Kıbrıs Yayı boyunca doğu-batı yönlerinde yer değiştirdiği ortaya konulmuştur..

**Anahtar Kelimeler:** Anselin Yerel Moran'ın I, Deprem, Getis-Ord-Gi\*, Mekânsal Dağılım, Kümelenme Analizleri, Kıbrıs Adası

**ABSTRACT**

*Earthquakes that arise as a result of sudden movements in the earth's crust are associated with tectonism in the region where they occur. The island of Cyprus and the Cyprus Arc; is a member of the Alpine-Himalayan Orogenic Belt System at the intersection of the Eurasian, African, and Arabian plates. Therefore, Cyprus and surroundings are a seismically active region. Revealing the seismic characteristics and spatial relationships of earthquakes gives information about the functioning of the fault system and tectonism in that region. The aim of this study is to explain the relationship between seismic activity and fault lines by revealing the temporal and spatial distribution of earthquakes in Cyprus and surroundings with geostatistical methods. Thus, the spatial intensity of earthquakes in Cyprus and surroundings was determined by using the Kernel density function. Spatial clustering characteristics of earthquakes were calculated by applying the spatial cluster analysis techniques such as Anselin Local Moran's I and Getis-Ord-Gi\*. In addition, spatio-temporal changes of earthquakes in the study area are revealed by using standard deviation ellipse, mean center and median center. The results obtained in the study have determined that the earthquakes are concentrated in the west of the Cyprus Arc and in the southwest of the Cyprus. Considering the spatial clustering characteristics of earthquakes in Cyprus and surroundings, it has been determined that small earthquakes in the northwest and large earthquakes in the southeast show clustering. Although the spatial density in terms of earthquakes is high in the south of Cyprus, significant clustering of small or large earthquakes in this region could not be tested. A seismic gap was identified in the north of the Cyprus arc and the whole island where  $M \geq 6$  earthquakes did not occur. The seismic energy accumulation in this region and the presence of the transform fault create a potential for occurrence of massive earthquakes. Finally, in this study, it has been revealed that the spatial mean and median centers of earthquakes in Cyprus have been displaced in east-west directions along the Cyprus Arc..*

**Keywords:** Anselin Local Moran's I, earthquake, Getis-Ord-Gi\*, Spatial Distribution, Cluster Analysis, Cyprus Arc

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1008258>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: caganalevkayali@sdu.edu.tr

**GİRİŞ**

Büyüklikleri, başlangıç hızları, sıklıkları, süreleri ve coğrafi konumları değişiklikler gösteren depremlerin insan yaşamı ve ekonomi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır (Al-Dogom, Schuckma ve Al Ruzouq, 2018). Depremler mekân ve zaman ölçeğinde farklı büyüklüklerde meydana geldiğinden afet oluşturma potansiyeli taşımaktadır (Jalali ve Ramazi, 2018). Kaotik ve stokastik davranışlar gösterdiği bilinen depremlerin fiziksel özelliklerinin anlaşılması için zaman, mekân ve büyüklük açısından incelenmeleri gerekmektedir (Feld vd., 2017). Depremlerin zamansal ve mekânsal dağılımının ortaya konulması tektonik yapının veya fay hatlarının ürettikleri depremlerin sismik paternleri ile ilişkilendirilmesiyle mümkündür (Tağıl ve Alevkayalı, 2014). Depremlerin sismik paternlerini ve mekânsal

ilişkilerinin ortaya konulmasında ise jeostatistiksel yöntemler kullanılmaktadır (Jalali ve Ramazi, 2017). Jeostatistik sadece yerbilimlerine yönelik dağılım problemlerin çözümünde değil depremselliğin paterninin de ortaya konulmasında kullanılmaktadır (Jalali ve Ramazi, 2018). Bu kapsamda mikro depremlerin faylarla olan ilişkisi (Mouslopoulou ve Hristopulos, 2011), aletsel ve tarihi depremlerin mekânsal istatistiksel ilişkileri (Jalali ve Ramazi, 2018), depremlerin zamansal ve mekânsal dağılımı (Menteşe ve Tağıl, 2016; Vasyukivska ve Huerta, 2017), küresel sismik kümelenmenin zamansal ve mekânsal dağılımı (Yang vd., 2019), depremselliğin mekânsal regresyon ile modellenmesi (Larson vd., 2021) şeklinde depremselliğin incelenmesi gibi birçok çalışmada jeostatistiksel yöntemlere başvurulmuştur.

Bu çalışmada depremlerin zamansal ve mekânsal özellikleri Doğu Akdeniz'de yer alan Kıbrıs Adası ve çevresinde incelenmektedir. Bu bölgede Afrika levhasının Doğu Akdeniz'deki kuzey yönlü hareketiyle Anadolu levhasına doğru gerçekleştirdiği dalım, Helen ve Kıbrıs Yayları boyunca dalma batma zonu olarak bilinen bir sistem meydana getirmektedir (Palamakumbura vd., 2016). Afrika levhasından daha hızlı bir şekilde kuzeye doğru hareket eden Arap Levhası'nın Afrika Levhası ile sınırında Ölü Deniz transform fay sistemi bulunmaktadır. Doğu Akdeniz'deki tektonizma Anadolu mikro levhası, Arabistan ve Avrasya levhaları arasındaki Bitlis-Zagros Bindirme Kuşağı'nı oluşturan yakınlaşma hareketinden dolayı Helen Yayına doğru güneybatı yönünde hareket etmektedir (Özbakır vd., 2017). Helen-Kıbrıs Yayı (HKY), Girit Adası'nın ve Rodos Adasının güneyinden itibaren Türkiye'nin güneyine Fethiye Körfezi'ne doğru uzanan ters fay bileşenli sol yönlü doğrultu atımlı fay olarak tanımlanmaktadır (Demirtaş, 2018). Bu sistemin etkisiyle Kıbrıs'ın güneyinde ve doğusundan elde edilen derin sismik yansıma verileri kuzeybatı-güneydoğu yönlü kırılmaların olduğunu göstermektedir (Vidal vd., 2000). Bunun nedeni Kıbrıs Yayının güneyinde bulunan Eratosthenes Deniz Dağının (Guyot) Geç Pliyosen- Erken Pleistosen'den bu yana Afrika Levhası'nın kuzeye doğru hareketini yavaşlatmasıdır (Klimke ve Ehrhardt, 2014). Eratosthenes Deniz Dağının bu etkisi Anadolu levhasına doğru dalan 45 km derinlikte kuzeye eğimli bir yitim levhasının bulunmasından kaynaklanmaktadır (Feld vd., 2017). İlgili literatür incelendiğinde Kıbrıs Adası ve çevresinin sismik aktivitesi ile fay hatları arasında ilişki kurulan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın amacı Kıbrıs Adası ve çevresinde depremlerin zamansal ve mekânsal dağılımını jeostatistiksel yöntemlerle ortaya koyarak sismik aktivitenin fay hatları ile olan ilişkisinin incelenmesidir.

Dahası bu çalışmada Kıbrıs Adası'nın tektonizması dikkate afet oluşturma potansiyeli olan  $M > 4$  büyüklüğündeki depremlerin mekânsal özellikleri ve tektonik yapı arasındaki ilişkinin ortaya konulması hedeflenmektedir.

## MATERYAL VE METOT

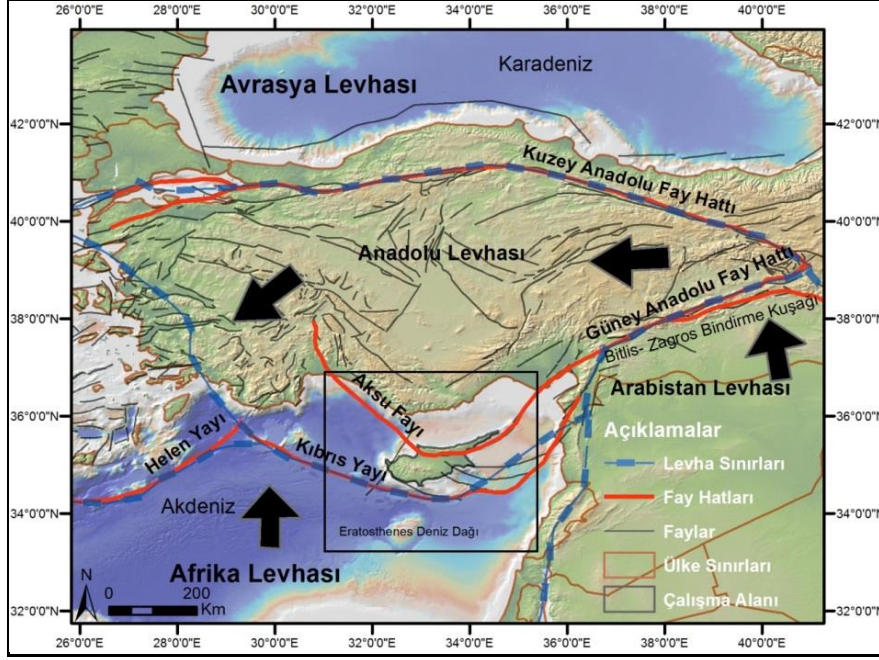
### Çalışma alanı

Depremlerin zamansal ve mekânsal özelliklerinin konu alındığı aynı zamanda çalışma alanı olan Kıbrıs Adası; Doğu Akdeniz'de  $32^{\circ}$ - $35^{\circ}$  Doğu meridyenleri,  $34^{\circ}$ - $36^{\circ}$  Kuzey paralelleri arasında Türkiye'nin güneyinde ve Suriye ile Lübnan'ın batısında yer almaktadır (Şekil 1). Kıbrıs Adası'nın mevcut tektonizması Avrasya, Afrika, Arap levhaları, mikro levhalar ve bloklarla ilişkilidir. Çalışma alanı olan Kıbrıs Adası civarında çarpışma, bindirme, transform fay hatları gibi birçok küçük tektonik yapının olduğu bilinmektedir (Malaliçi vd., 2019). Bu bölgede genellikle bindirme ve doğrultu atımlı mekanizmalar yer almaktadır (Robertson vd., 1995). Kıbrıs Adası, Alp-Himalaya orojenez sisteminin üzerinde aktif fay zonlarından "Kıbrıs Yayı" olarak bilinen dalma batma zonunun etkisi altındadır (Şekil 1).

Kıbrıs Adası ve çevresindeki tektonizmanın neden olduğu sismik aktivitelerle ilgili son elli yıllık dönemde farklı araştırmacılar tarafından tarihsel ve aletsel dönemi kapsayan birçok çalışma yapılmıştır (Ambraseys, 1965; Ambraseys, 1992; Ambraseys ve Adams, 1993; Cagnan ve Tanırcan, 2010; Galanopoulos ve Delibasis, 1965; Palamakumbura ve diğer., 2016; Papadimitriou ve Karakostas, 2006; Papazachos, 1973; Papazachos ve Papaioannou, 1999). Bu çalışmalar dikkate alındığında Kıbrıs Adası ve çevresinde; aktif ve karmaşık neotektonik gelişim süreçleri doğrultusunda tarihsel ve aletsel ölçümlerin yapıldığı yıkıcı depremler kayıt edilmiştir (Harrison vd., 2004). Son elli yılda Kıbrıs Adası yakınlarında 1996 yılında  $M_w=6.8$  büyüklüğünde ve bir gün ardından artçı

olarak  $M_w=5.8$  büyüklüğünde depremlerin meydana gelmesi Afrika ve Anadolu mikro levhasının yaklaşma mekanizmasından kaynaklanmaktadır (Polidou vd., 2004). Ayrıca, Kıbrıs Adası kapsamında yapılan sismik tehlike çalışmalarında Kıbrıs Adası'nın güneyinde

sismik tehlikenin daha fazla olduğu ileri sürülmektedir (Cagnan ve Tanircan, 2010). Kıbrıs Adası ve çevresindeki tektonik ve sismik araştırmalar dikkate alındığında bölgenin aktif deprem kuşağında yer aldığı anlaşılmaktadır.



**Şekil 1.** Kıbrıs Adası ve çevresinin genel tektonizması (Fay hatları kaynak: Feld vd., 2017; Batimetri kaynak: Ryan vd., 2009).

*Figure 1. General tectonism of Cyprus island and its surroundings (Fault lines source: Feld et al., 2017; Bathymetry source: Ryan et al., 2009).*

## Veri

Kıbrıs Adası ve çevresinde gerçekleşen depremlerin episantırlarının konumu ve büyüklüğü ile ilgili katalog verileri, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi tarafından internet üzerinden sunulan <http://www.koeri.boun.edu.tr/> adresinden elde edilmiştir (B.Ü.KRDAE-BDTİM, 2021). Bu çalışmada kullanılan veriler aletsel ölçümlere dayanan Kıbrıs çevresindeki 200 km alanda gerçekleşmiş depremlerin koordinatları (enlem, boylam), gerçekleşme dönemleri (yıl, ay), magnitüdüleri ve derinliklerinden oluşmaktadır.

Kıbrıs Adası ve çevresindeki tektonizma ve depremler arasındaki ilişkinin ortaya konulabilmesi bakımından çalışma alanında meydana gelen depremlerin tamamından değil etki düzeyleri fazla olan  $M>4$  büyüklüğündeki depremlerden yararlanılmıştır.

## Yöntem

Depremlerin mekânsal dağılımlarındaki zamansal değişiminin izlenmesi için son 120 yılda kaydedilen depremler 30 yıllık periyotlarda (1900-1930, 1931-1960, 1961-1990, 1991-2021) incelenmiştir. Depremlerin zamansal değişimlerinin ortaya konulması için

30 yıllık her bir periyod için standart sapma elipsi, ortalama merkezi ve medyan merkezi (ortanca merkezi) şeklindeki jeostatistiksel değerleri hesaplanmıştır (Lee ve Wong, 2001). Depremlerin yoğunluğu episantırların konumlarına bağlı olarak Kernel yoğunluk fonksiyonu ile haritalanmıştır. Kernel fonksiyonu; deprem tehlike analizi (Woo, 1996), sismik yoğunluğun görüntülenmesi (Stock ve Smith, 2002) ve depremlerin mekânsal dağılımının incelenmesi konusunda sıklıkla tercih edilmektedir. Depremlere ilişkin verilerin kümelenme özelliklerinin ortaya konulmasında Anselin Yerel Moran'ın I ve Getis-Ord-Gi Kümelenme Analizlerinden yararlanılmıştır. Bu uygulamalar ile depremlerin mekânsal oto-korelasyonu deprem episantırların hem yakınlığı, hem de öznitelik özellikleriyle yani magnitüd-mesafe arasındaki jeostatistiksel ilişkilerle test edilmiştir.

**Standart sapma elipsi:** Standart sapma elipsi bir bölgede meydana gelen olay ve olguların dağılım derecesi, yayılma derecesi ve yönelimini göstermekte olup, dağılım ve yayılım açısından standart mesafeden farklı olarak, dağılımın doğrultu ve yönelimini ortaya koymaktadır (Kaya vd., 2016). Bir dizi noktanın veya bölgenin trendini ölçmek amacıyla yaygın olarak kullanılan standart sapma elipsinde mesafe x ve y yönlerinde ayrı ayrı hesaplanmaktadır (Bakak, 2016). Bu iki mesafe, özellik dağılımını kapsayan bir elipsin eksenlerini tanımlar. Yöntem, elips eksenlerini tanımlamak için ortalama merkezden diğer noktaların standart sapmasının hesaplanması şeklinde çalışmaktadır.

**Mekânsal ortalama:** Mekânsal ortalama tüm deprem noktalarının X ve Y koordinat değerlerinin ortalamasını hesaplayarak harita üzerinde yeni bir nokta veri oluşturulması esasına dayanmaktadır (Hepdeniz ve Soyaslan, 2015). Böylece yıllık periyodlardaki

mekânsal ortalama değışikliği izlenebilmektedir.

**Ortanca merkezi:** Bir alanda dağınık halde bulunan tüm verilerin x ve y koordinatlarının ilgili özelliğe göre ortanca değerin konumudur (Akyürek ve Arslan, 2018). Ortanca merkezi mekânda bulunan farklı özniteliklere sahip verilerin konuma dayalı değışiklikleri izlemek veya dağılımlarını karşılaştırmak için kullanılmaktadır (Karabulut, 2014).

**Kernel yoğunluk indeksi:** Kernel Yoğunluk İndeksi, konumu belli olan noktasal verinin belirlenen yarıçapa sahip bir daireye düşen nokta yoğunluğunun daire merkezinden uzaklaştıkça artan ya da azalan değışimini ifade etmektedir (Akyürek ve Arslan, 2018). Ayrıca bu yöntem verilerin mekânsal dağılımının hesaplanmasında değışkene ait özellikleri Formül 1'de görüldüğu şekilde parametrik olmayan bir mekânsal enterpolasyon ile gerçekleştirmektedir (Al-Ahmadi vd., 2014).

$$f(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (1)$$

**Anselin Yerel Moran'ın I analizi:** Anselin (1995), yerel bir kümelenmenin hesaplanmasında Moran'ın I indeksinden yararlanarak mekânsal ilişkileri açıklamak için yeni bir indeks önermektedir (Formül 2). Anselin Yerel Moran'ın I analizi, noktaların mekânsal dağılımını değışkenleri dikkate alarak kümelenmeleri tanımlayan yerel ölçekte kullanılabilen bir analizdir (Akyürek ve Arslan, 2018). Sonuç değeri düşük olduğunda, değışkene ait farklı ve birbirine benzemeyen değeri bir araya geldiğini; tam tersi durumda ise değışkene ait benzer değeri bir araya geldiğini göstermektedir (Yakar, 2011).

$$I_i = ((x_i - \bar{X}) / s_i^2) \sum_{j=1}^n x_j - \bar{X}, j \neq i \quad (2)$$

**Geris-Ord-Gi\* analizi:** Mekânsal yoğunlaşmanın, sıcak ve soğuk noktalar şeklinde mesafe ve komşuluk değerlerinden istatistiksel olarak üretilen Z skoru değerlerine bağlı kalarak hesaplamasıdır (Lee ve Wong, 2001). Geris-Ord-Gi, Formül 3'te elde edilen sonuçlar doğrultusunda Z skorun yüksek olması gözlenen değer, beklenen değerden daha büyük olup yüksek değerlerin kümelenmiş olduğunu; Z skor değerinin düşük olması halinde gözlenen değer beklenen değerden daha küçük olduğunu ve düşük değerlerin kümelenmiş olduğunu ortaya koymaktadır (Al-Ahmadi vd., 2014, Akyürek ve Arslan, 2018). Diğer yandan Z skor değeri sıfıra yakınsa hesaplanan değişkenin istatistiksel komşuluk ilişkileri yüksek veya düşük olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır (Huseynova, 2019).

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j}, \forall j \neq i \quad (3)$$

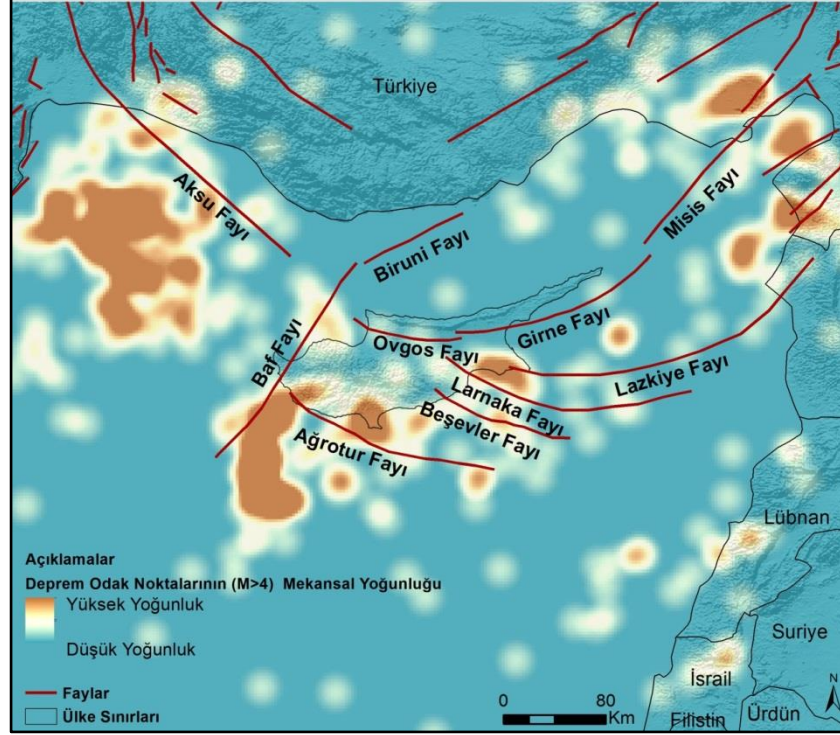
## BULGULAR

Kıbrıs'ın güneydoğusundan güneybatısına kadar uzanan Kıbrıs Dalma-Batma Zonu diğer adıyla Kıbrıs Yayı, Kıbrıs Adasını etkileyen aktif deprem kaynağı olarak görülmektedir (Şekil 1). Kıbrıs Dalma Batma Zonu, Afrika Levhası'nın Kıbrıs Adası altına dalmasıyla oluşan Benioff-Wadati yitim kuşağı olarak bilinen yaklaşık 50-80 kilometre derinliklere ulaşmaktadır (Dindar, 2021). Bu mekanizmanın ürettiği depremlerin mekânsal paterni incelendiğinde depremlerin çalışma alanında yoğunlaştığı bazı bölgeler tespit edilmiştir (Şekil 2). Kıbrıs Yayı'nın batısındaki Aksu Fayı'nın güneyindeki bölge, depremlerin yoğunlaştığı bölgelerden biridir. Baf Fayı'nın güneyinde Ağrotur Fayı üzerinde

ve Lazkiye-Larnaka Fayı arasındaki bölgelerde yine yoğunluğun arttığı belirlenmiştir. Genel olarak Kıbrıs Yayı boyunca Kıbrıs'ın batısından başlayarak Kıbrıs Adası'nın güneyine doğru ilerleyen ve doğuya doğru devam eden çizgisel bir yoğunlaşma fark edilmektedir (Şekil 2). Diğer yandan Kıbrıs Adası üzerinde karada son yüzyılda büyük bir deprem kaydedilmemiş olup adanın Kuzey açıklarında sismik boşluk olarak nitelendirilebilecek bir bölge bulunmaktadır (Şekil 2).

Bu sismik boşluğun Kıbrıs Adası'nın kuzeybatısındaki, Antalya baseni Girne çizgiselliğinden başlayıp Koruçam-Anamur hattında (Kormakitis-Anamur) son bulduğu görülmektedir (Şekil 2). Batıda yoğunlaşan deprem paterninin Aksu üzerinden başlayarak K-G uzanımlı Baf fay zonu ile sonlanan ve transform fay zonu olduğu bilinmektedir (Glover ve Robertson, 1998). Kıbrıs Adası üzerindeki deprem kaynakları ise başkent Lefkoşa'yı doğu-batı yönelimli kesen Ovgos Fayı temsil etmektedir (Şekil 2). Ovgos Fayı ile Trodos zonları (Baf Fayı) arasında M<4 büyüklüğündeki depremler yoğunlaşmaktadır (Şekil 2). Ovgos (Dar Dere) Fay hattı Kıbrıs'ın kuzeyini, Girne (Kyrenia) sıradağları ile güneyinde Trodos Masifi olacak şekilde iki tektonik bölgeye ayırmaktadır. Ovgos Fayının, doğrultu atımlı olarak Geç Miyosen'den Pleistosen'e kadar sürdüğü ifade edilmektedir (McCay ve Robertson, 2012). Ovgos ve Misis-Girne Fay hattı Aksu Fayı'nın güneydoğusunda yer almakla birlikte bu fay hattının deniz içerisinden İskenderun'a kadar uzanmaktadır (Dindar, 2021). Depremlerin oluşturduğu mekânsal örüntüler Ovgos Fayının devamı niteliğinde olan Aksu fayı ve doğuda İskenderun Körfezi üzerinde yoğunlaşmaktadır (Şekil 2). Buradaki fayın ters bileşenli verev atımlı fay olarak nitelendirilmesi Ovgos, Girne ve Trodos kesişme sınırının deprem





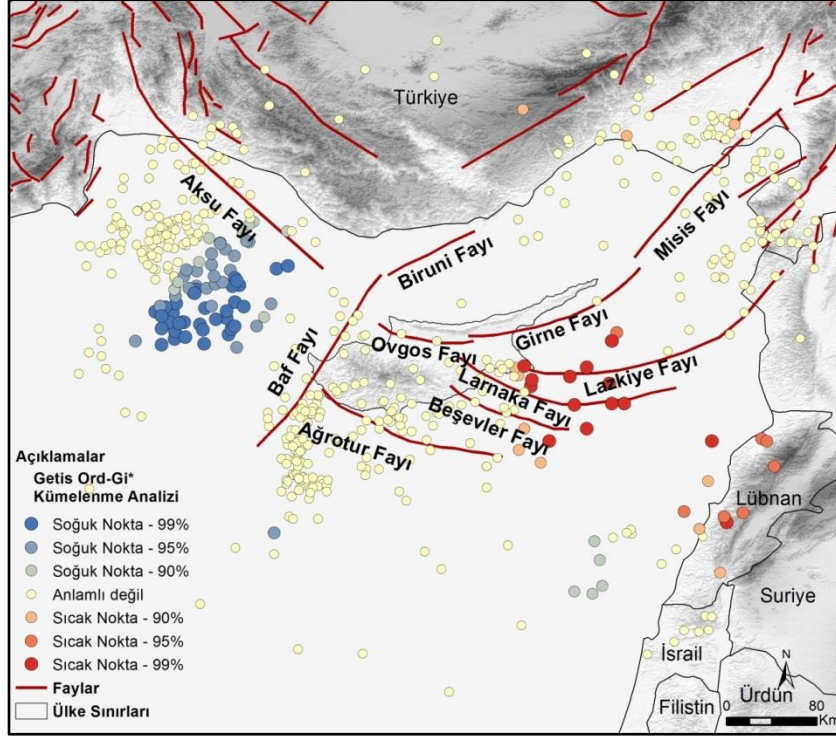
**Şekil 2.** Kıbrıs Adası ve çevresinde gerçekleşen M>4 depremlerin mekânsal yoğunluğu

*Figure 2. Spatial density of M>4 earthquakes around Cyprus Island and its surroundings*

örüntülerinin ilişkili olduğunu göstermektedir (Hakyemez, 2014).

Kıbrıs Adası'nda gerçekleşen aletsel dönem depremlerinin Kıbrıs Yayı boyunca kuzeybatıdan güneye doğru daha sonra güneyden kuzeydoğu yönü arasında yoğunlaşmaktadır (Şekil 2). Bu alanlarda depremlerin jeostatistiksel olarak anlamlı kümelenmeler gösterip göstermediği Getis-Ord-Gi analizi ile %99, %95 ve %90 güven aralığında test edilmiştir. Çalışma alanında

nispeten büyük depremlerin Lazkiye ve Larnaka Fayları üzerinde %99 güven aralığında jeostatistiksel olarak anlamlı bir biçimde kümelenildiği görülmektedir (Şekil 3). Sıcak noktaların yoğunlaştığı Kıbrıs Adası'nın güneydoğu açıklarında istatistiksel olarak anlamlı mekânsal kümelenmeler belirlenmiştir (Şekil 3). Ayrıca soğuk noktalar şeklinde ifade edilen küçük depremler çalışma alanının kuzeybatısında anlamlı kümelenmeler oluşturmaktadır (Şekil 3).



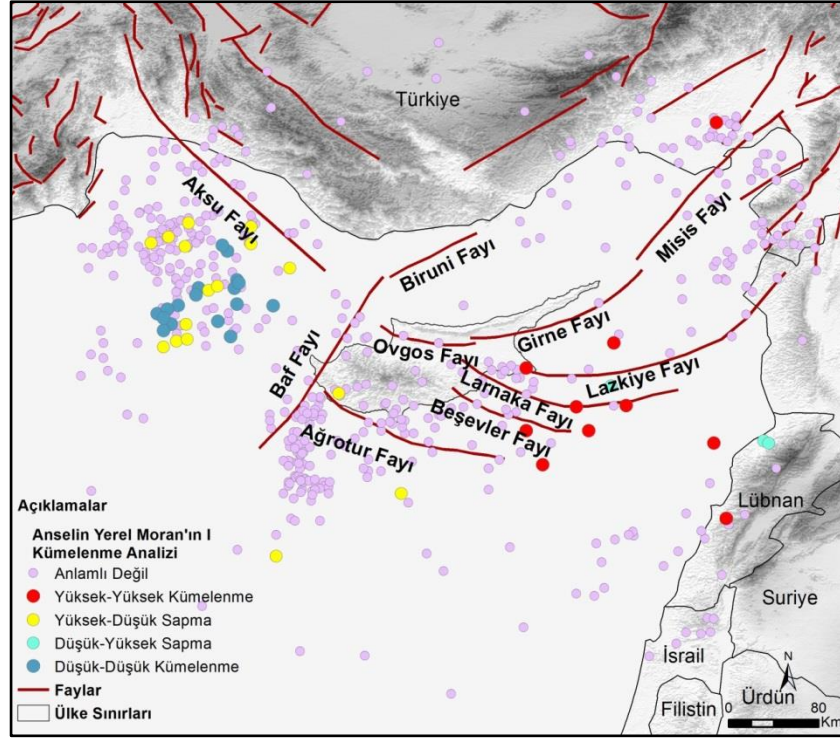
**Şekil 3.** Kıbrıs Adası ve çevresinde aletsel dönem  $M>4$  ve üzeri büyüklükte meydana gelen depremlerin kümelenme (Getis-Ord-Gi\*) özellikleri

Figure 3. The clustering characteristics (Getis-Ord-Gi\*) of earthquakes with magnitude  $M>4$  and above measured in instrumental period around the Cyprus Island and its surroundings

Kıbrıs Yayı üzerinde Anselin Yerel Moran'ın I analizi ile yapılan mekânsal kümelenme analizlerinde yüksek-yüksek depremlerin kümelenmediği, yüksek-düşük sapmalar, düşük-yüksek sapmalar ve düşük-düşük mekânsal kümelenmeler depremlerin büyüklüklerine göre kümelenme özelliklerinin açıklanması kapsamında hesaplanmıştır (Şekil 4). Kıbrıs Adası açıklarında Antalya Körfezi yakınlarında ve Kıbrıs Adası üzerinde ve Adanın güneybatısında gerçekleşen depremlerin

jeostatistiksel olarak anlamlı kümelenmeler gerçekleştirmediği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında çalışma alanının kuzeybatısında Kıbrıs Adası açıklarında düşük-düşük depremlerin kümelenmediği ancak bazı alanlarda jeostatistiksel olarak yüksek-düşük sapmaların olduğu dikkat çekmektedir (Şekil 4). Kıbrıs Adası'nın güneydoğusunda yüksek-yüksek depremlerin kümelenmediği bölgenin Lazkiye ve Larnaka fayları çevresine karşılık geldiği görülmektedir (Şekil 4).





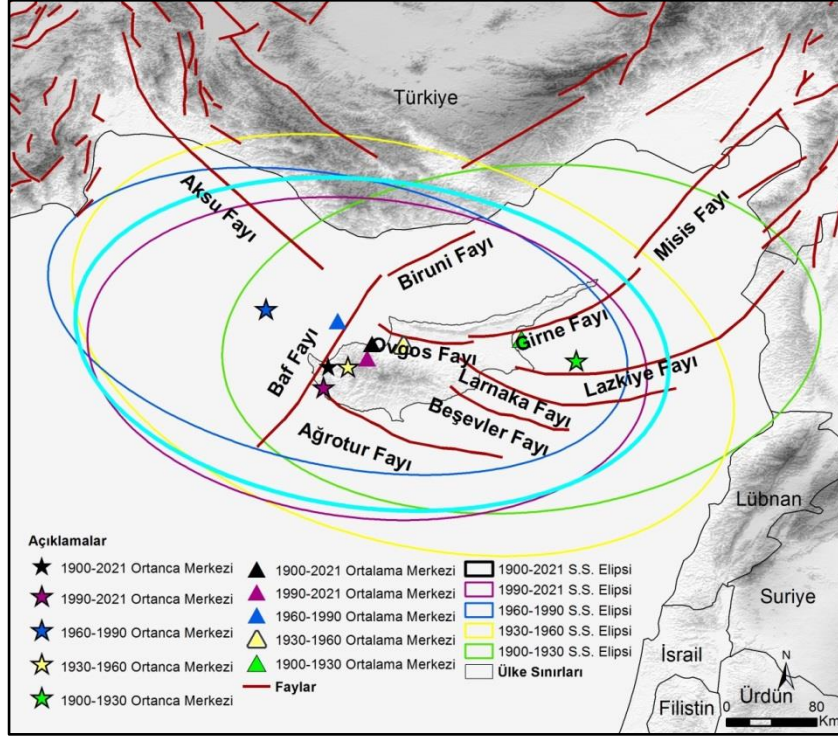
**Şekil 4.** Kıbrıs Adası ve çevresinde aletsel dönem  $M>4$  ve üzeri büyüklükte meydana gelen depremlerin kümelenme (Anselin Yerel Moran'ın I Analizi) özellikleri

Figure 4. The clustering characteristics (Anselin Local Moran's I) of earthquakes with magnitude  $M>4$  and above measured in instrumental period around the Cyprus Island and its surroundings

Bu çalışmada ele edilen diğer bir bulgu deprem episantırlarının zamansal ve mekânsal olarak yer değiştirmesidir. Kıbrıs Adası ve çevresinde 1900-2021 yılları arasında gerçekleşen  $M>4$  ve daha büyük depremlerin zamansal ve mekânsal değişimleri 30 yıllık periyodlara incelenmiştir (Şekil 5). Böylece depremlerin yoğun olarak meydana geldiği bölgenin farklı zamanlarda mekânsal olarak yer değiştirdiği görülmektedir (Şekil 5). Çalışmanın bu kısmında jeostatistiksel yöntemlerden standart sapma elipsi, ortalama ve ortanca merkezlerinden yararlanılmıştır. Standart sapma elipsi genişledikçe depremlerin mekânsal olarak daha çok yayıldığı yani birbirinden daha uzak konumlarda ortaya çıktığı, standart sapma elipsi daraldıkça

birbirlerine daha yakın konumlarda olduğu tespit edilmektedir. Kıbrıs Adası ve çevresindeki depremlerin büyüklüklerine göre dağılımının ortaya çıkarılmasında ise ortalama ve ortanca merkez analizlerinden yararlanılmaktadır. Bu analizlere göre çalışma sahasında gerçekleşen depremlerin 1930-1960 yılları arasında en geniş alana dağıldığı buna karşılık 1990-2021 yılları arasında ise birbirine daha yakın depremlerin gerçekleştiği tespit edilmektedir (Şekil 5). Deprem episantırlarının ortalama ve ortanca merkezlerinin, 1900-2021 yılları arasında ve 1930-1960, 1990-2021 dönemlerinde Kıbrıs Adası üzerinde olduğu belirlenmiştir. Depremlerin büyüklüklerine göre ortalama ve ortanca merkezlerinin 1900-1930 döneminde

diğer yıllara göre Kıbrıs'ın doğusunda olduğu, 1960-1990 yılları arasında ise ortalama ve ortanca merkezinin Kıbrıs Adası'nın batısına kaydığı görülmektedir (Şekil 5).



**Şekil 5.** 30 yıllık periyotlarda Kıbrıs Adası ve çevresindeki depremlerin büyüklüklerine göre standart sapma elipsi, ortalama ve ortanca merkezleri

Figure 5. Standard deviation ellipse, mean and median centers according to the magnitude of earthquakes in Cyprus Island and its surroundings in 30-year periods

## TARTIŞMA ve SONUÇ

Kıbrıs Adası ve çevresinde yirminci yüzyılın başlarından günümüze kadar (1900-2021 yılları arasında) 6'sı  $M=6,0$  ve üzeri büyüklükte diğerleri  $M>4$  büyüklükte olan sayıları 500'den fazla deprem gerçekleşmiştir (B.Ü. KRDAE-BDTİM, 2021). Bu çalışmada Kıbrıs Adası ve çevresindeki farklı büyüklükteki depremlerin mekânsal yoğunluk ve kümelenme özelliklerinin önemli fay hatları ile ilişkisi incelenmiştir. Kıbrıs ve çevresindeki depremlerin mekânsal özellikleri ile fay hatları dikkate alındığında Antalya'nın güneyinde

Aksu Fayı çevresinde, güneybatıda Baf Fayı çevresinde ve güneydoğuda Larnaka Fayı ile Lazkiye Fayları arasında depremlerin yoğunlaştığı üç bölge tespit edilmiştir. Ancak bu bölgeler birbirinden farklı mekânsal kümelenme özellikleri göstermektedir. Kıbrıs Adası'nın batısında depremlerin jeostatistiksel açıdan soğuk bir bölge yani büyüklük olarak daha küçük deprem ürettiği ortaya konulmuştur. Bunun nedeni Afrika levhasının 10 mm/yıl hızında Anadolu mikro levhasının altına doğru yaptığı dalımdan kaynaklanan, Benioff- Wadati zonu olarak da isimlendirilen

dalma batma zonunda 0-50 km arasında gerçekleşen sığ kabuk depremleridir (Dipova ve Cangir 2017).

Kıbrıs Yayı'nın batısının yanı sıra güneyinde de depremler yoğunlaşmaktadır. Baf ve Ağrotur Fayları'nın bulunduğu bu bölgede depremlerin mekânsal açıdan yoğunluk gösterdiği ancak buradaki depremlerin jeoistatistiksel olarak anlamlı kümelenmeler göstermediği belirlenmiştir. Bunun nedeni Kıbrıs Yayı'nın batı ve güney kesiminde meydana gelen depremlerin sığ-orta derinlikte meydana gelmesidir (Asim vd., 2020).

Kıbrıs Yayı'nın doğu kesiminin kuzeyinde yer alan Larnaka ile Lazkiye fayları çevresinde ve İskenderun Körfezi'ne uzanan Güney Anadolu Fay Zonu'nun Akdeniz'e ulaştığı bölgede de büyük depremler jeoistatistiksel olarak anlamlı kümelenmeler göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgulardan elde edilen en önemli sonuçlardan biri Kıbrıs Adası'nın doğusundaki fayların büyük depremler üretme potansiyelinin daha fazla olmasıdır. Kıbrıs Adası'nın doğusunda ve güneydoğusunda hem bindirme hem de doğrultu atımlı fayların bulunması bu bölgenin büyük deprem üretme potansiyeli olduğunu desteklemektedir (Wdowski vd., 2006).

Çalışma alanında depremlerin ortalama ve ortanca merkezlerindeki dönemsel değişimler büyük depremlerin farklı konumlarda meydana geldiğini ifade eden göstergelerden biridir. 1918 yılında  $M=6,3$  büyüklüğünde Kıbrıs Adası'nın güneydoğusunda gerçekleşen deprem bu durumun önemli kanıt niteliğindedir (Papadimitriou ve Karakostas, 2006). Kıbrıs Adası ve çevresinde ölçülen  $M=6,8$  büyüklüğündeki deprem ise Kıbrıs Adası'nın güneybatısında Baf Fayı civarında kaydedilmiştir (Wdowski vd., 2006). Büyük depremler anlamlı kümelenmeler göstermemelerine rağmen depremlerin episantrıları dikkate alındığında Kıbrıs Adası'nın güneydoğu ve güneybatısındaki

faylar ve depremlerin büyük deprem üretme potansiyeli olduğu anlaşılmaktadır. Ancak Kıbrıs Adası ve çevresindeki bazı depremlerin ana faydan uzakta genel sistemden bağımsız meydana gelme durumları söz konusudur (Dindar, 2021). Bu durumda Kıbrıs Yayı boyunca depremlerin oluşturduğu yoğunluklar ve mekânsal kümelenmeler dikkate alındığında Kıbrıs Yayı ve çevresindeki fayların uzağında da büyük depremlerin ortaya çıkması muhtemeldir.

Kıbrıs Adası çevresindeki depremlerin zamansal ve mekânsal özellikleri incelendiğinde doğu-batı doğrultulu bir çizgisellik meydana getirdikleri görülmektedir. Elmas (2018) tarafından yapılan çalışmada Kıbrıs Adası ve çevresinde rejyonel gravite verilerinin faylarla uyumlu olduğunu ancak Kıbrıs Adası'nın kuzeyinde, kuzeydoğu-güneybatı yönlü bir çizgiselliğin varlığına dikkat çekilmektedir. Burada ifade edilen yapısal çizgisellik bu çalışmada belirlenen Girne yerleşim yeri açıklarındaki (kuzeyindeki) sismik boşluğa karşılık gelmektedir. Kıbrıs Adası'nın kuzeyindeki sismik boşluğun olduğu yerde Biruni Fayı olarak adlandırılan Kuzey Anadolu Fay Zonu ile Kıbrıs Yayı arasında uzanan sol yanal makaslama zonunun yer aldığı bilinmektedir (Seyitoğlu vd., 2022). Kıbrıs Adası'nın kuzeyindeki bindirmelerin kuzeybatıda depremler meydana getirmesi bu fayın aktif olduğunu kanıtlamaktadır. Bu çalışmada belirlenen sismik boşluğun bahsi geçen sistemin devamında yer alması Biruni Fayı'nın deprem üretme potansiyeli olduğuna işaret etmektedir. Son olarak Kıbrıs Adası ve çevresindeki depremlerden elde edilen sismik örüntülerin deprem etki, tehlike ve risk çalışmalarına altlık oluşturması beklenmektedir.

#### **KATKI BELİRTME**

Katkıları ve yapıcı eleştirilerinden dolayı hakemlere çok teşekkür ederiz.

**KAYNAKLAR**

- Al-Dogom, D., Schuckma, K., Al-Ruzouq, R. 2018. Geostatistical Seismic Analysis and Hazard Assessment; United Arab Emirates. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing Spatial Information Science*, 42 (3), 29-36. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-29-2018>, 2018
- Ambraseys, N.N. 1965. The Seismic History of Cyprus. *Union Internationale Du Secours*, Geneva, 3, 25–48.
- Ambraseys, N.N. 1992. Reappraisal of The Seismic Activity in Cyprus: 1894-1991. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, 34 (133), 41-80.
- Ambraseys, N. N., Adams, R.D. 1993. Seismicity of The Cyprus Region. *Terra Nova*, 5 (1), 85–94.
- Akyürek, Ö., Arslan, O. 2018. Kocaeli İli Ve Çevresinde (1900-2016) Yılları Arasında Gerçekleşen Tarihsel Depremlerin Konumsal İstatistik Analizi. *Geomatik*, 3(1), 48-62. <https://doi.org/10.29128/geomatik.333104>
- Al-Ahmadi, K., Al-Amri, A., See, L. 2014. A Spatial Statistical Analysis of the Occurrence of Earthquakes Along the Red Sea Floor Spreading: Clusters of Seismicity. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(7), 2893-2904. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0974-6>
- Asim, K.M., Moustafa, S.S., Niaz, I.A., Elawadi, E.A., Iqbal, T., Martínez-Álvarez, F. 2020. Seismicity analysis and machine learning models for short-term low magnitude seismic activity predictions in Cyprus. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 130, 105932. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105932>
- Bakak, Ö. 2016. 2005 Sığacık Körfezi (İzmir) Depremlerinin Mekânsal Değerlendirilmesi. *Yerbilimleri*, 37(1), 51-63. <https://doi.org/10.17824/yrb.17485>
- B.Ü. (Boğaziçi Üniversitesi) KRDAE (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü) BDTİM (Boğaziçi Üniversitesi Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi), 2021, <http://www.koeri.boun.edu.tr/>, Son erişim tarihi: 7 Temmuz 2021.
- Cagnan, Z., Tanircan, G.B. 2010. Seismic Hazard Assessment for Cyprus. *Journal of Seismology*, 14 (2), 225-246. DOI 10.1007/s10950-009-9163-1
- Demirtaş, R. 2018. Helenik-Kıbrıs Yay Sistemi Diri Fayları, Paleosismolojik Çalışmalar ve Gelecek Deprem Potansiyelleri, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35140.68487>, Son erişim tarihi: 10 Temmuz 2021.
- Dindar, H. 2021. Jeofizik araştırmalar kapsamında deprem zemin yapı davranışının modellenmesi için MASW, Sismik Kırılma, Tek Nokta ve Dizilim Mikrotremör yöntemlerinin entegrasyonunun sağlanması: K.K.T.C. örneği. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir (Yayımlanmamış).
- Dipova, N., Cangir, B. 2017. Probabilistic seismic hazard assessment for the two layer fault system of Antalya (SW Turkey) *Area Journal of Seismology*, 21, 1067-1077 DOI 10.1007/s10950-017-9652-6
- Feld, C., Mechie, J., Hübscher, C., Hall, J., Nicolaidis, S., Gurbuz, C., Weber, M. 2017. Crustal Structure of the Eratosthenes Seamount, Cyprus and S. Turkey From an Amphibian Wide-Angle Seismic Profile. *Tectonophysics*, 700, 32-59. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.02.003>
- Galanopoulos, A., Delibasis, N. 1965. The Seismic Activity in the Cyprus Area.

- Praktika Tes Akademias Athenon, 40, 387–405.
- Glover, C., Robertson, A.H.F. 1998. Neotectonic Intersection of the Aegean and Cyprus Tectonic Arcs: Extensional and Strike-Slip Faulting in the Isparta Angle, SW Turkey, *Tectonophysics*, 298, 103–132. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00180-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00180-2)
- Güneş, P., Aksu, A.E., Hall J. 2018. Structural framework and deformation history of the western Cyprus Arc *Tectonophysics*, 744, 438-457. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.023>
- Elmas, A. 2018. Kıbrıs Adası Yapısal Süreksizliklerinin EGM08 Gravite Verileri Kullanılarak Belirlenmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 42, 17-32. <https://doi.org/10.24232/jmd.434135>
- Hakyemez, H.Y. 2014. Kuzey Kıbrıs'ın Temel Jeolojik Özellikleri. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 26 (2), 7-44.
- Harrison, R. W., Newell, W. L., Batıhanlı, H., Panayides, I., McGeehin, J. P., Mahan, S. A., ve diğer., 2004. Tectonic Framework and Late Cenozoic Tectonic History of the Northern Part of Cyprus: Implications for Earthquake Hazards and Regional Tectonics. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23 (2), 191–210. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00095-6)
- Hepdeniz, K., Soyaslan, İ. İ., 2015. Burdur İlinde Meydana Gelen Depremlerin Odak Noktalarının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile 3 Boyutlu Modellenmesi ve Jeostatistiksel Analizi. *Uluslararası Burdur Deprem ve Çevre Sempozyumu, Burdur, Türkiye, Bildiriler Kitabı*, 104-112.
- Huseynova, T. 2019. Azerbaycan'da Meydana Gelen Depremlerin Mekânsal İstatistiksel Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü eğitim Enstitüsü, Yerbilimleri Anabilim Dalı, Eskişehir (Yayımlanmamış).
- Jalali, M., Ramazi, H. 2018. Application of Geostatistical Simulation to Compile Seismotectonic Provinces Based on Earthquake Databases (Case Study: Iran). *Journal of Seismology*, 22(4), 957-983. <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9745-x>
- Jalali, M., Ramazi, H. 2017. Statistical and Geostatistical Approaches to Study Spatiotemporal Uncertainties in Earthquake Catalog Databases. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(15), 1-14. DOI 10.1007/s12517-017-3107-9
- Karabulut, M. 2014. Mekânsal İstatistik Teknikleri. *Coğrafya Araştırma Yöntemleri* (Ed. Yılmaz Arı, İlhan Kaya), Balıkesir: Coğrafyacılar Derneği Yayınları, Balıkesir.
- Klimke, J., Ehrhardt, A. 2014. Impact and Implications of the Afro-Eurasian Collision South of Cyprus From Reflection Seismic Data. *Tectonophysics*, 626, 105-119. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.04.002>
- Kaya, Ö., Toroğlu, E., Adıgüzel, F. 2016. 2011 Genel Seçimlerinde Partilerin Aldığı Oy Oranlarının İlçeler Ölçeğinde Mekânsal Analizi. *Coğrafya Dergisi*, 0 (31), 1-13.
- Larson, J., Kramar, D., Leonard, K. 2021. A Geostatistical Analysis of Seismicity in Oklahoma Using Regression Trees and Neural Networks. *Physical Geography*, 42(4), 334-350. DOI: 10.1080/02723646.2020.1762982
- Lee, J., Wong, D.W. 2001. *Statistical Analysis with ArcView GIS*. John Wiley & Sons.
- Malaliçi, B.C., Pamukçu, O., Çırmık, A., Dindar, H. 2019. Deformation Analysis of Cyprus and Its Surroundings (East Mediterranean) with Using SSPX Software. *Dokuz Eylül*

- Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 21(61), 235-246. DOI:10.21205/deufmd.2019216123
- Menteşe, S., Tağıl, Ş. 2016. Türkiye'de Depremlerin Mekânsal Dağılımı: Jeo-İstatistiksel & Mekânsal İstatistiksel Bir Yaklaşım. Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, 9(45), 408-414.
- Mouslopoulou, V., Hristopulos, D.T. 2011. Patterns of Tectonic Fault Interactions Captured Through Geostatistical Analysis of Microearthquakes. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116 (B7). DOI:10.1029/2010JB007804.
- McCay, G.A., Robertson, A.H.F. 2012. Upper Miocene–Pleistocene Deformation of the Girne (Kyrenia) Range and Dar Dere (Ovgos) Lineaments, Northern Cyprus: Role in Collision and Tectonic Escape in the Easternmost Mediterranean Region. Geological Society, London, Special Publications, 372(1), 421–445. <https://doi.org/10.1144/SP372.6>
- Özbakır, A.D., Govers, R. and Wortel, R. 2017. Active Faults in the Anatolian-Aegean Plate Boundary Region with Nubia. Turkish Journal of Earth Sciences, 26 (1), 30-56. DOI:10.3906/yer-1603-4
- Palamakumbura, R.N., Robertson, A. H. F., Kinnaird, T. C., Sanderson, D.C.W., 2016. Sedimentary Development and Correlation of Late Quaternary Terraces in the Kyrenia Range, Northern Cyprus, Using a Combination of Sedimentology and Optical Luminescence Data. International Journal of Earth Sciences, 105 (1), 439–462. DOI 10.1007/s00531-015-1173-3
- Papadimitriou, E.E. Karakostas, V.G. 2006. Earthquake Generation in Cyprus Revealed by the Evolving Stress Field. Tectonophysics, 423 (1–4), 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.03.014>
- Papazachos, B.C. 1973. Distribution of Seismic Foci in the Mediterranean and Surrounding Area and Its Tectonic Implication. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 33 (4), 421–430. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1973.tb02377.x>
- Papazachos, B.C., Papaioannou, C.A. 1999. Lithospheric Boundaries and Plate Motions in the Cyprus Area. Tectonophysics, 308 (1–2), 193–204.
- Pilidou, S., Priestley, K., Jackson, J., Maggi, A. 2004. The 1996 Cyprus Earthquake: A Large, Deep Event in the Cyprian Arc. Geophysical Journal International, 158(1), 85-97. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02248.x>
- Robertson, A.H.F., Grasso, M. 1995. Overview of the Late Tertiary–Recent Tectonic and Palaeo-Environmental Development of the Mediterranean Region. Terra Nova, 7(2), 114-127. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1995.tb00680.x>
- Ryan, W.B.F., Carbotte, S.M., Coplan, J.O., O'Hara, S., Melkonian, A., Arko, R., Weissel, R.A., Ferrini, V., Goodwillie, A., Nitsche, F., Bonczkowski, J., Zensky, R. 2009. Global Multiresolution Topography Synthesis. Geochemistry, Geophysics and Geosystems, 10, Q03014. <https://doi.org/10.1029/2008GC002332>.
- Seyitoğlu, G., Tunçel, E., Kaypak, B., Esat, K., Gökkaya, E. 2022. The Anatolian Diagonal: A Broad Left-Lateral Shear Zone Between the North Anatolian Fault Zone and the Aegean / Cyprus Arcs. Geological Bulletin of Turkey. doi:10.25288/tjb.1015537.
- Stock, C., Smith, E. G. 2002. Adaptive Kernel Estimation and Continuous Probability Representation of Historical Earthquake Catalogs. Bulletin of the Seismological



- Society of America, 92(3), 904-912. <https://doi.org/10.1785/0120000233>
- Şengör, A.M.C., Görür, N., Şaroğlu, F. 1985. Strike-Slip Faulting and Related Basin Formation in Zones of Tectonic Escape: Turkey as a Case Study. <https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0211>
- Tağıl, Ş., Alevkayalı, Ç. 2014. Ege Bölgesinde Depremlerin Mekânsal Dağılımı: Jeostatistiksel Yaklaşım. Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, 6(28), 369-379.
- Wdowinski, S., Ben-Avraham, Z., Arvidsson, R., Ekström, G. 2006. Seismotectonics of the Cyprian Arc. *Geophysical Journal International*, 164 (1), 176-181. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02737.x>
- Woo, G. 1996. Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Source Modeling, *Bulletin of the Seismological Society of America*, S. 86(2), s. 353-362.
- Vasyukivska, V.S., Huerta, N. J. 2017. Spatiotemporal Distribution of Oklahoma Earthquakes: Exploring Relationships Using a Nearest-Neighbor Approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(7), 5395-5416. DOI: 10.1002/2016JB013918
- Vidal, N., Klaeschen, D., Kopf, A., Docherty, C., Von Huene, R., Krasheninnikov, V. A. 2000. Seismic Images at the Convergence Zone From South of Cyprus To the Syrian Coast, Eastern Mediterranean. *Tectonophysics*, 329(1-4), 157-170. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00194-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00194-3)
- Yakar, M. 2011. Nüfus Dağılımının Mekansal Analizi: Afyonkarahisar İli Örneği. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(19), 389-406.
- Yang, J., Cheng, C., Song, C., Shen, S., Zhang, T., Ning, L. 2019. Spatial-Temporal Distribution Characteristics of Global Seismic Clusters and Associated Spatial Factors. *Chinese Geographical Science*, 29(4),614-625. <https://doi.org/10.1007/s11769-019-1059-6>



## Güneydoğu Anadolu Bölgesi Mardin Grubu Dolomitlerinin Dolomitleşme Yaşlarının ve Derinliklerinin Kümelenmiş İzotoplar ve 1B Basen Modeli Kullanılarak Belirlenmesi

### *Determining of Dolomitization Age and Depth of Mardin Group Based on Clumped Isotopes and 1D Basin Model in SE Anatolia (SE Turkey)*

DENİZ ATASOY <sup>1\*</sup>, AYNUR GEÇER BÜYÜKUTKU <sup>2</sup>, AYLİN GEÇER <sup>3</sup>, ARZU AKTOSUN <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, Arama Daire Başkanlığı, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup> Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup> Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, Araştırma Geliştirme Merkezi Daire Başkanlığı, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 29 Mart (*March*) 2022 Kabul (*accepted*): 6 Temmuz (*July*) 2022

#### ÖZ

Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde geniş bir yayılım sergileyen Kretase yaşlı sığ denizel Mardin Grubu karbonatları hidrokarbon açısından en üretken birimdir. Mardin Grubu dolomitlerinin kümelenmiş izotop sıcaklıkları 92 °C ile 125 °C arasında ölçülmüştür. Bir boyutlu (1B) basen modeli kullanılarak, kümelenmiş izotop sıcaklıkları dolomitleşme derinlik ve zaman bilgisine dönüştürülmüş ve dolomitleşmenin 2200 m derinlikten (22 milyon yıl önceden- Erken Miyosen) 3420 m derinliğe (14 milyon yıl önceye kadar- Orta Miyosen) kadar gerçekleştiği anlaşılmıştır. Düşük Fe ve Mn element konsantrasyonları dolomitleşme sularının denizel kökenli olduğunu işaret ederken, 200 ppm'den daha düşük değerler alan Sr element sonuçları ise geç evre dolomitleşmenin olduğunu göstermektedir. Geç diyajenez boyunca paleo-sıcaklık ve derinlik değerlerinin değişimi yeniden kristallenmenin farklı derecelerde meydana geldiğini yansıtmaktadır. Dolomitleşme sularının oksijen izotop değerleri %3.32 ve %6.31 arasında değişmektedir. Bu değerler Kretase deniz sularından izotopik olarak daha ağırdırlar. Sonuçlar gösteriyor ki, çalışma alanında geç dolomitleşme olayı gözlemlenmekte ve yüksek sıcaklıktaki derin gömülmüş ve dolomitleşme ile oluşmuş gözenek suları Mardin Grubu rezervuarının porozite sistemini olumsuz yönde etkilemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Basen Modeli, Dolomit, Dolomitleşme, İz Elementler, Kararlı İzotoplar, Kümelenmiş İzotoplar, Mardin Grup

#### ABSTRACT

*The widespread Cretaceous aged Mardin Group is shallow marine carbonates and is the most prolific section in SE Anatolia (SE Turkey). Clumped isotope temperatures were measured for Mardin dolomites between 92 °C and 125 °C. Using 1D basin model, clumped isotopes temperatures were converted to a depth*

and time for dolomitization from 2200 m (22 Ma-Early Miocene) to 3420 m (14 Ma-Middle Miocene). While low Fe and Mn concentration reflects marine fluids as a dolomitizing water, Sr values less than 200 ppm shows existence of late diagenesis. Both the range of paleotemperature and burial depth reflects different degree of recrystallization event as a result of burial event. The oxygen isotopic composition of dolomitizing fluid varied between 3.32‰ and 6.31‰ which is isotopically heavier than Cretaceous marine waters. The results indicates that late dolomitization are present in the study area and that a deeply buried dolomitizing pore fluid with high T has a negative influence on porosity system of the Mardin Group Reservoir.

**Keywords:** Basin Model, Clumped Isotopes, Dolomite, Dolomitization, Mardin Group, Stable Isotopes, Trace Elements

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1095003>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: datasoy@tpao.gov.tr

## GİRİŞ

Uzun yıllardan beri, dolomitler dünya karbonat rezervuarlarının %50'sini oluşturduklarından dolayı birçok çalışmanın ana konusunu teşkil etmektedirler (Zenger vd., 1980). Dolomitler çoğunlukla, birçok önerilen dolomitleşme modelleri (sabkha, Coorong, deniz suyu, yeniden akış, karışım zonu, gömülme, hidrotermal vb.) ile ikincil olarak oluşmaktadır (Warren, 2000). Genel olarak, dolomitlerin kireçtaşlarına oranla daha iyi rezervuar oldukları düşünülmektedir. Çünkü dolomitleşme reaksiyonu boyunca iki mol kalsitin bir mol dolomite dönüşmesiyle kayacın porozitesinin %11 oranında arttığı ileri sürülmektedir (Murray, 1960). Yalnız birçok çalışmacı tarafından dolomitleşme süreçlerinin poroziteyi sadece olumlu anlamda değil, olumsuz yönde de değiştirdiği kanıtlanmıştır (Swart vd., 2005).

Dolomitlerle ilgili bir diğer genel düşünce, düşük sıcaklıkta meydana gelen dolomitleşme olayının gözeneklilik ve geçirgenlik parametrelerini artırıcı yönde rol oynadığıdır. Buna karşılık, istisnalar hariç yüksek sıcaklıkların rezervuar parametrelerine olumsuz yönde katkıda bulunması beklenmektedir (MacDonald vd., 2015).

Geleneksel olarak uzun yıllardan beri, araştırmacılar dolomitleşme sıcaklıklarını belirlemek amacıyla sıvı kapanım mikrotermometresine (fluid inclusion) ve karbonat oksijen termometresine (carbonate oxygen thermometry) başvurmuşlardır. Dolomitlerde mikrotermometre yönteminin uygulanması a.) sıvı kapanımlarının olmaması b.) kapanım boyutlarının küçük olduğundan dolayı farkedilememesi c.) kapanımların sonradan yeniden düzenlenmesi (reset) gibi faktörler nedeniyle oldukça zordur (Mangenot vd., 2018). Diğer yandan, oksijen paleotermometresi karbonatların sıcaklıklarının tahmin edilmesinde kullanılan bir başka yaygın tekniktir. (McCrea, 1950; Epstein vd., 1951). Bu termometrenin kullanılmasındaki en büyük dezavantaj sıcaklığın hesaplanması için üretilen formülde sıcaklık ve suyun  $\delta^{18}\text{O}$  değeri gibi iki bilinmeyen var olmasıdır. Suyun  $\delta^{18}\text{O}$  değerinin doğrudan ölçülmesi veya tahmin edilmesi oldukça zordur ve ayrıca yapılacak %1'lik bir yanlış tahmin, sıcaklık değerinin 10 °C daha fazla hatalı olarak elde edilmesine sebebiyet vermektedir (MacDonald vd., 2018).

Geleneksel termometrelerin yukarıda belirtilen dezavantajlarından dolayı bu çalışmada kümelenmiş izotop yöntemine (clumped

isotopes) başvurulmuştur. Bu yeni nesil termometrenin temel çalışma prensibi nadir ve ağır olan ( $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ ) izotopların birbirleri ile yapmış oldukları bağların (çoğunlukla  $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}=44$  ppm) sayısının ( $\Delta_{47}$  ile ifade edilmektedir) sıcaklıkla ters orantılı olmasıdır (Huntington vd., 2009).

Bu yöntem ile karbonatların çökelimini gerçekleştiren suyun  $\delta^{18}\text{O}$  değerlerinin bilinmesine ihtiyaç duyulmadan, karbonatın  $\delta^{18}\text{O}$  değerinden bağımsız olarak karbonatların sıcaklık bilgisinin ölçüldüğü bilinmektedir (Eiler, 2007). Literatürdeki ilk uygulama olan Ghosh vd., (2006)'dan beri, kümelenmiş izotop tekniği jeoloji literatüründe, örneğin dolomit problemi gibi konuların çözülmesinde kullanılmaktadır. Bu metot kullanılarak öncelikle 30-80 °C sıcaklıklar arasındaki düşük sıcaklık değerlerine sahip dolomitlerin paleo-sıcaklıkları başarılı bir biçimde ölçülmüştür (Ferry vd., 2011; Sena vd., 2014; Murray ve Swart, 2017). Daha sonra, bu termometrenin 25 °C'den 300 °C'ye varan sıcaklıklarda oluşmuş dolomitlerin paleo-sıcaklıklarının ölçülmesinde oldukça etkin bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır (Bonifacie vd., 2017). Kümelenmiş izotopların güvenilir bir termometre olmasına rağmen, tekniğin kilometrelerce derine gömülmüş rezervuar dolomitlere uygulandığı çalışmaların sayısı hala oldukça sınırlıdır (MacDonald vd. 2015, 2018; Swart vd. 2016).

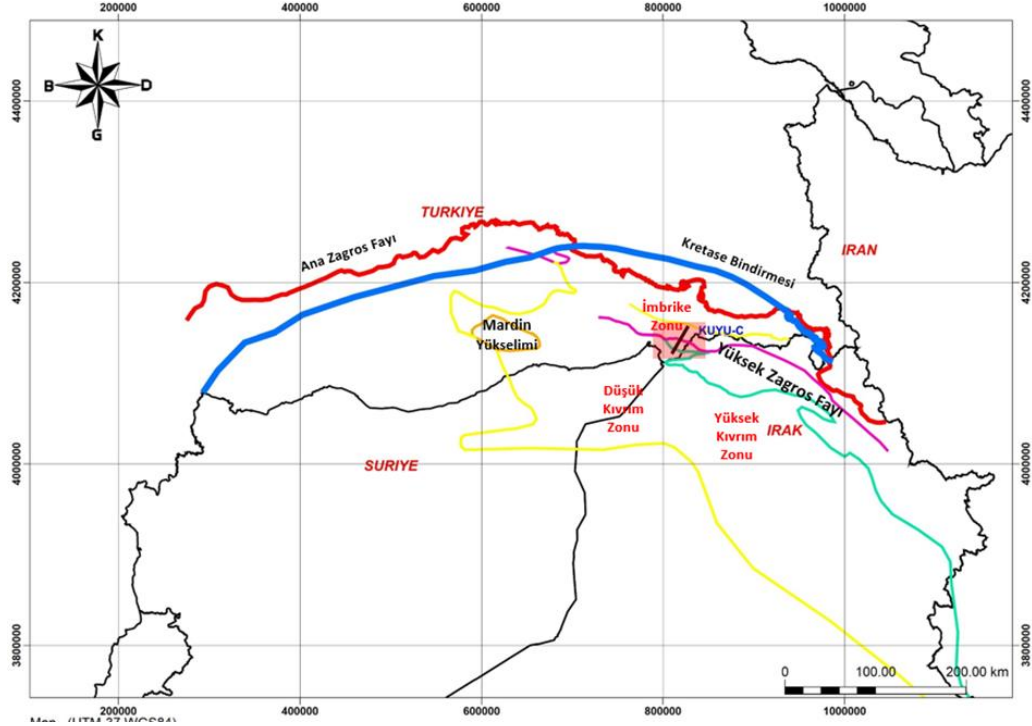
Bu çalışmada bir petrol kuyusundan yaklaşık 3 km derinlikten alınan Mardin Grubu dolomit örneklerine kümelenmiş izotop yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada birincil hedef olarak kümelenmiş izotop jeotermometresiyle elde edilen sıcaklık değerlerinin gömülme tarihçesi ile eşleştirilmesiyle, dolomitleşme süreçlerinin

derinlik ve zaman bilgisinin ortaya çıkarılması amaçlanmaktadır. İkincil olarak, Mardin grubu dolomitlerinin sıcaklık bilgilerinden dolomitleşmeyi gerçekleştiren suyun  $\delta^{18}\text{O}$  değerlerine ulaşılması hedeflenmektedir. Ayrıca, kümelenmiş izotop sıcaklıklarının işaret ettiği geç diyajenezin varlığı, geleneksel yöntemlerle (kararlı izotop ve element jeokimyası) birlikte değerlendirilecektir. Son olarak, Mardin Grubu dolomitlerinin dolomitleşme sürecinin modellenmesi hedeflenmektedir.

### ÇALIŞMA ALANI

Çalışma alanı olan Güneydoğu Anadolu Bölgesi (GDA), tektonik olarak Arap Plakası'nın kuzey kısmında yer almaktadır (Şekil 1). Bölgede Mardin Grubu çökelimi öncesi, Geç Jura-Erken Kretase döneminde yaşanan orojenik hareketlerin yaratmış olduğu blok faylanmaların ürünleri olarak alçalım ve yükselim alanları meydana gelmiştir (Ala ve Moss, 1979). Mardin Grubu bu alanların üzerine Apsiyen transgresyonu ile gelmiş ve Arap Plakası'nın tümüyle kuzeye bakan pasif kıta kenarında çökelmiştir (Çelikdemir vd., 1991). Bölgede Mardin Grubu genellikle Alt Triyas veya Paleozoik birimlerin üzerine uyumsuz olarak gelirken, çalışma alanında Triyas-Jura yaşlı Cudi Grubu'nun üzerine uyumsuz olarak gelmektedir (Şekil 2).

Neo-Tetis Okyanusu'nun güney koluna ait havzada, Mardin grubu bir şelf üzerinde karbonat sedimantasyon koşullarının egemen olduğu bir ortamda depolanmıştır (Cordey, 1971). Bu grup alttan üste doğru Areban (Apsiyen), Sabunsuyu (Albiyen), Derdere (Senomanian-Turoniyen) ve Karababa (Santoniyen-Erken Kampaniyen)



**Şekil 1.** Çalışma alanını ve tektonik unsurları gösterir harita. Kırmızı kutucuk çalışma alanını göstermektedir. Salih vd. (2019)'dan uyarlanmıştır.

**Figure 1.** Location map displaying area of interest with tectonic elements. Red box indicates the study area. Modified from Salih et al. (2019)

formasyonlarından oluşmaktadır (Perinçek, 1979).

Geç Kretase'nin sonuna doğru, Anadolu ve Arap plakalarının konverjan olarak birbirine yaklaşması ile Neo-Tetis Okyanusu kapanmıştır. Bu süreçte, kuzeyden güneye doğru hareket eden ofiyolitik napların önünde oluşan derin deniz ortamında Mardin Grubu üzerine uyumsuz olarak Kampaniyen yaşlı Sayındere formasyonları çökelmiştir (Rigo de Righi ve Cortesini, 1964).

Bahse konu olan plakaların çarpışması sonucunda oluşan Bitis-Zagros suture zonu İran, Türkiye ve Irak'ta bir kuşak şeklinde yer almaktadır (Şekil 1) (Aqrawi vd., 2010, Salih

vd., 2019). Bu kuşak yüksek kıvrımlanma zonu, düşük kıvrımlanma zonu, bindirme zonu ve imbrike zonu olmak üzere dört ana kısımdan meydana gelmektedir (Ahmed, 2021). Çalışmanın yürütüldüğü Kuyu C'nin bulunduğu alan imbrike yapıların var olduğu tektonik alanda yer almaktadır (Şekil 3).

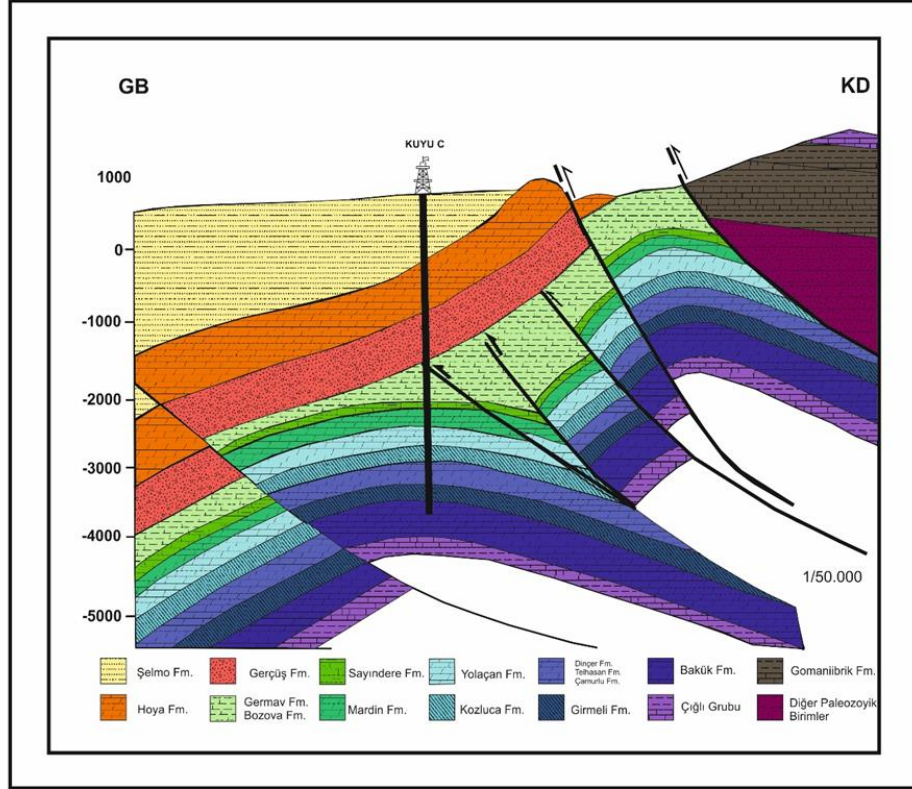
GDA'nın büyük bir bölümünde, Mardin Grubu karbonatları kuyulardan ve mostralardan kuyu logları, petrografi ve biyostratigrafi ile birbirlerinden rahatça ayırt edilirken (Çelikdemir vd., 1991; Mülayim vd., 2016; Özkan ve Demir, 2019), çalışma alanında Mardin Grubu'nun tamamen dolomitleşmesi nedeniyle formasyonlarına ayıramamaktadır.

GENELLEŞTİRİLMİŞ MARDİN GRUBU KOLON KESİTİ								
ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ	ALT SERİ	GRUP	FORMASYON	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR	
MESOZOYİK	KRETASE	MAASTRİHTİYEN	ÜST KRETASE	ŞIRNAK	A.GERMAV		Marn	
		MAASTRİHTİYEN Ü. KAMPANİYEN			BOZOVA			
		ORTA KAMPANİYEN			SAYINDERE		Killi Kireçtaşı	
		ALT KAMPANİYEN APSİYEN			<b>MARDİN GR.</b>		Dolomit	
	JURA	?	ALT		YOLAÇAN		Dolomit	
	TRİYAS			ÜST	CUDI	KOZLUCA		Anhidrit
						DİNÇER		Dolomit
						TELHASAN		Anhidrit
						ÇAMURLU		Dolomit
						GİRMELİ		Anhidrit
						BAKÜK		Dolomit
			ORTA					

Şekil 2. Genelleştirilmiş Mardin Grubu stratigrafik kesiti

Figure 2. Generalized stratigraphic section of Mardin Group





**Şekil 3.** Çalışma alanından geçen GB-KD (A-A') yönlü enine jeolojik kesit

**Figure 3.** SW-NE (A-A') geological cross section throughout the study area

## YÖNTEMLER

### Kuyu Logları

Formasyon dokanak ve kalınlık bilgileri C kuyusuna ait kuyu loglarından elde edilmiştir (Şekil 1). Çalışmada kullanılan kuyu sıcaklığı sıcaklık loguyla ölçülmüştür. Mardin grubu için güncel rezervuar sıcaklığı 90-95 °C arasında yer almaktadır.

### Petrografik Analizler

Çalışma dahilinde 180 m kalınlığa sahip Mardin Grubu istifi öncelikli olarak litolojik olarak incelenmiştir. Her 2 m'de bir alınmış olan kuyu kesintilerinin stereo mikroskop altında litolojik analizleri yapılmış ve ardından uygun görülen

seviyelerden petrografik analizler için numune seçilmiştir. Seçilen 23 adet ince kesit, polarizan mikroskop altında incelenerek petrografik analizleri yapılmıştır. Petrografik değerlendirmelerde Folk 1962, Gregg ve Sibley (1984) ve Sibley ve Gregg (1987) tarafından önerilen terminoloji kullanılmıştır. Petrografik analizler TPAO Ar-Ge Merkezi Sedimentoloji ve Rezervuar Jeolojisi Müdürlüğü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

### $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ Kararlı İzotoplar

Mardin Grubu'ndan alınmış 36 adet dolomit örneğinin  $\delta^{13}\text{C}$  ve  $\delta^{18}\text{O}$  izotopları University of

Miami (RSMAS) Kararlı İzotop Laboratuvarı'nda yer alan Finnigan-MAT 251 kütle spektrometresiyle ölçülmüştür. İzotop sonuçları V-PDB standartlarına göre elde edilmiştir.

#### Kümelenmiş İzotoplar (Clumped Isotopes)

Toz haline getirilmiş dolomit örnekleri 8 mg olarak tartılarak bakır numune kaplarına yerleştirilerek ortak asit yöntemi (common acid method) ile 90 °C sıcaklıkta 30 dakika boyunca reaksiyona sokulmuştur. Gaz saflaştırma ünitesinde Murray vd. (2016) tarafından belirtilen 45 dk'lık bir proses ile dolomit numunelerinden saf CO<sub>2</sub> gazı elde edilmiştir. Bu gaz bir deney tüpü içine hapsedilerek University of Miami (RSMAS) Kararlı İzotop Laboratuvarı'nda yer alan MAT 253 ve MAT 253 Plus kütle spektrometrelerine transfer edilerek analiz edilmiştir.

Elde edilen CO<sub>2</sub>'in kontamine olabilme ihtimaline karşılık Δ<sub>48</sub> ve Δ<sub>49</sub> değerleri her analizin sonucunda kontrol edilmiştir. Kalibrasyon amaçlı olarak, analizlere başlamadan önce standart bir numune çalışılmış ve ayrıca cihaz ayda bir kere Murray vd. (2021) tarafından tanımlanan kalibrasyon prosedürüne tabi tutulmuştur. Daha sonra, ölçülen kümelenmiş izotop (clumped isotope) değerleri Dennis vd. (2011)'in referans çalışması ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Ghosh vd. (2006) çalışmalarında kalsit minerallerini kümelenmiş izotop yöntemiyle 25°C sıcaklıkta analiz etmiştir. Analiz süresinin 18-36 saat olması nedeniyle (Wacker et al., 2013), analiz zamanlarını kısaltmak amacıyla bazı laboratuvarlar bu çalışmada olduğu gibi 90°C'de analiz yapmayı tercih etmişlerdir. Bu durum özellikle Δ<sub>47</sub> katsayısının farklılaşmasına neden olmaktadır (Murray vd., 2016). Bu sebepten dolayı, ham Δ<sub>47</sub> değerinin üzerine bir asit farklılaşma katsayısı (AFF) eklenerek Δ<sub>47</sub> değerleri düzeltilmektedir. Çalışmacılar tarafından 90 °C'de analiz edilen

dolomit örneklerinin Δ<sub>47</sub> değerlerinin doğrulanması için günümüze dek %0.082 (Defliese vd., 2015), %0.156 (Murray vd., 2016), %0.176 (Bonifacie vd., 2017) katsayıları uygulanmıştır. Görüldüğü üzere, katsayılar arasında iki kata yakın farklılıkların olması hangi katsayının kullanılması gerektiği hususunda karışıklıklara sebebiyet vermektedir. Diğer yandan, Chaojin vd. (2022)'nin farklı metotları denediği deneysel çalışmalarında, değişken asit sıcaklıkları (25, 50, 75, 90°C) ile tepkimeye sokulmuş dolomitler için Δ<sub>47</sub> değerlerindeki değişimin sabit bir değer olmadığı ispatlanmıştır. Düşük Δ<sub>47</sub> değerlerine sahip dolomitler düşük AFF değişimleri sergilerken, yüksek Δ<sub>47</sub> değerleri yüksek AFF değişimlerine neden olmaktadır. Bu belirsizliklerden uzaklaşmak amacıyla, bu çalışmada Swart vd. (2019) tarafından önerilen ve AFF düzeltmesine ihtiyaç duyulmayan bir sıcaklık formülü kullanılmıştır (Sıcaklık değeri (T) formülde Kelvin cinsindedir). (1)

$$\begin{aligned} \Delta_{47} &= 0.0393 \left( \pm 0.00179 \right) \\ & * \frac{10^6}{T^2 + 0.158} (\pm 0.0088) (R^2 = 0.98) \end{aligned} \quad (1)$$

Daha önceden de bahsedildiği üzere, bu yöntemin en önemli özelliklerinden birisi sıcaklık hesaplamalarından sonra dolomitleşmeyi gerçekleştiren suların δ<sup>18</sup>O değerlerinin kolaylıkla hesaplanabilmesidir. Bu amaçla, dolomitler için Northrop ve Clayton (1966), O'Neil ve Epstein (1966), Fritz ve Smith (1970), Sheppard ve Schwarcz (1970), Matthews ve Katz, (1979), Zheng (1999), Vasconcelos vd. (2005) ve Horita, (2014) formülleri kullanılabilir. Bu formüller kullanıldığında her bir denklem farklı δ<sup>18</sup>O<sub>su</sub> değerleri sağlasa da, δ<sup>18</sup>O<sub>su</sub> ve sıcaklık değerleri arasında daima pozitif bir korelasyon söz konusu olmaktadır. Bu çalışma için güncel bir denklem olan Horita (2014) denkleminin kullanılması tercih edilmiştir.

### İz Element Analizleri

Yaklaşık 20 mg'lık toz haline getirilmiş dolomit numuneleri %4'lük HNO<sub>3</sub> ile bir gün boyunca tepkimeye sokularak numunelerin çözünmesi sağlanmıştır. Elde edilen solüsyondan kalıntı halinde geriye kalan hidrokarbon örnekleri filtrelenerek, HC kalıntılarının analiz sonuçlarını etkileme ihtimalinin önüne geçilmiştir. Ardından, element konsantrasyonları Varian Vista Pro-ICP-OES (University of Miami) atomik emisyon spektroskopisi ile belirlenmiştir. Ölçümlerin kalibrasyonları için standart solüsyonlar kullanılarak bir kalibrasyon yöntemi takip edilmiştir.

### Tek Boyutlu (1B) Basen Modeli

Mardin Grubu'nun tek boyutlu (1B) basen modelinin oluşturulması için Petrel (2019.4) programı kullanılmıştır. Modelin oluşturulması için Mardin Grubu ve sonrası için 10 adet çökelim ve 7 adet erozyon olayı modele girdi olarak kullanılmıştır.

Basen modellemesi için en önemli üç unsur olan i.) paleo-deniz suyu derinliği (PWD-paleo water depth) ii.) deniz suyu sediman etkileşim sıcaklığı (SWIT-temperature at the sediment water interface) iii.) ısı akısı (HF-heat flow) parametrelerinin belirlenmesidir (Akram vd., 2021).

Bu çalışma için, PWD bilgisi her bir formasyon için literatürden alınmıştır (Yılmaz, E. ve Duran, O., 1997; Aqravi ve Badics, 2015; Edilbi vd., 2019). SWIT parametresi, Wygrala (1989) çalışmasına göre belirlenen ortalama deniz suyu sıcaklıklarının baz alındığı programa lokasyon bilgisi (Orta Doğu enlem 37) girilmesiyle elde edilmiştir. HF faktörü çalışma

alanının hemen güneyinde (K.İrak'ta) yürütülmüş bir çalışma için kalibrasyonları yapılmış HF modellerinden alınmıştır (Erken Kretase için 50 MW/m<sup>2</sup>, Orta Kretase için 55-70 MW/m<sup>2</sup>, Geç Kretase-Orta Eosen aralığı için 40-50 MW/m<sup>2</sup> ve Geç Miyosen için 66-77 MW/m<sup>2</sup>) (Hakimi vd. 2018).

### SONUÇLAR

#### Petrografik Analizler

Mardin Grubu dolomitleri çoğunlukla 34-465 µm arasında kristal boyları değişen dolosparitlerden meydana gelmektedir (Şekil 4). Bu dolomitlerin kristalleri çoğunlukla yarı öz şekilli (subhedral) ve kısmen de öz şekillidir (euhedral).

#### δ<sup>13</sup>C ve δ<sup>18</sup>O Analiz Sonuçları

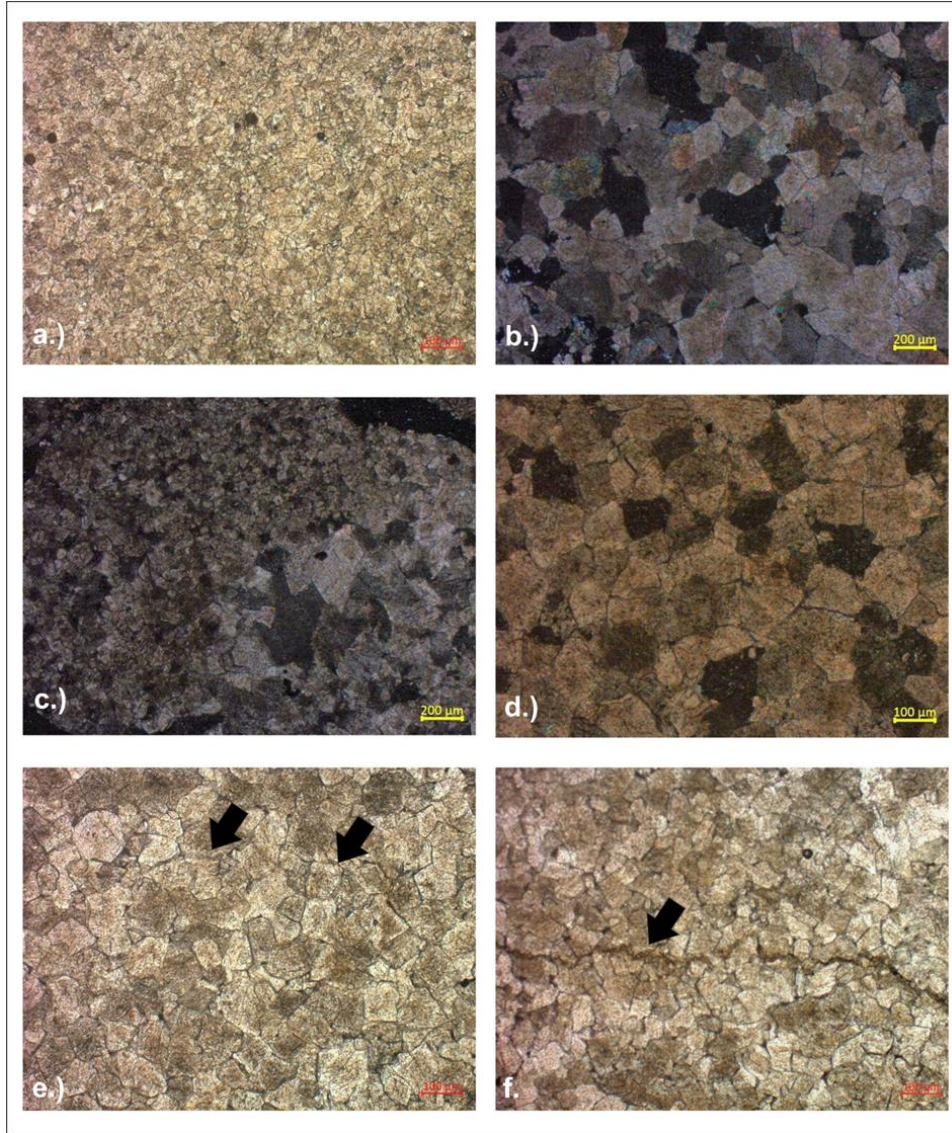
δ<sup>13</sup>C izotopları %-0.58'den %+1.65'e kadar değişen değerler almaktadır. Yaklaşık %2'lik bir aralığa denk düşen değerler çoğunlukla pozitifdir. Buna karşılık, δ<sup>18</sup>O izotopları %-4.06‰ ve %-9.11 arasında oldukça geniş bir aralıkta değişen negatif değerler sergilemektedirler (Tablo 1).

#### Kümelmiş İzotop Yöntemi

Çalışmada, 5 adet dolomit örneğinin Δ<sub>47</sub> değerleri ölçülmüştür. Bu değerler %0.421 ve %0.453 arasında değişmektedir. Kümelmiş izotop sıcaklık değerleri 91.47°C'den 124.96°C'ye kadar değişmektedir. Bu sıcaklık değerlerinden elde edilen suyun δ<sup>18</sup>O değerleri %3.32 ile %6.12 arasında değerler almaktadır (Tablo 2).

#### Element Analizleri

Ortalama 289 ppm konsantrasyona sahip olan Sr elementi, 84.42 ppm'den 1058.26 ppm'e varan değerler almaktadır.



**Şekil 4.** Mardin Grubu dolomitleri ince kesit mikrofotoları. a.) Unimodal, öz şekilsiz, çok ince kristalli dolosparit b.) Polimodal, yarı özşekilli, ince-orta kristalli dolosparit c.) Polimodal ve özşekilli, çok ince-orta kristalli dolosparit d.) Unimodal, öz şekilli, çok ince-orta kristalli dolosparit e.) Kristal arası düşük poroziteye sahip unimodal yarı şekilli-öz şekilli, orta kristalli dolosparit f.) Aşırı basıncın ve gömülmenin sonucu olarak oluşmuş dolomit kristalleri arası stilolit görüntüsü.

**Figure 4.** Thin section photomicrographs of medium coarse to coarse crystalline dolostones from Mardin Group. a.) Unimodal, non-planar and fine crystalline dolomites b.) Polymodal and planar-s fine to medium dolosparite c.) Polymodal, planar-e fine to medium dolosparite d.) Unimodal and planar-e fine to medium olosparite e.) Unimodal subhedral to euhedral dolomites has low intercrystalline porosity f.) A microphotograph of stylolite among dolomite crystals occurred as a product of overpressure and burial.

**Tablo 1.** Mardin Grubu için Kuyu C'den analiz edilen örneklerin derinlik bilgisine karşılık kararlı izotop değerleri

*Table 1. Stable isotope values of the analyzed samples from Well C for Mardin Group are presented versus increasing depth I*

Örnek Sayısı	Derinlik (m)	$\delta^{13}\text{C}$ (%)	$\delta^{18}\text{O}$ (%)	Örnek Sayısı	Derinlik (m)	$\delta^{13}\text{C}$ (%)	$\delta^{18}\text{O}$ (%)
1	2970	0.72	-8.38	19	3070	1.46	-5.80
2	2974	0.30	-8.28	20	3074	-0.10	-6.55
3	2978	0.48	-7.84	21	3078	0.46	-6.82
4	2982	0.43	-7.32	22	3082	0.20	-6.52
5	2986	0.37	-8.41	23	3086	0.18	-6.31
6	2994	0.35	-7.48	24	3090	0.25	-7.04
7	2998	0.77	-8.01	25	3094	-0.19	-7.39
8	3002	0.31	-7.55	26	3098	0.11	-6.49
9	3008	0.65	-6.91	27	3106	1.60	-5.20
10	3014	0.26	-7.80	28	3110	0.57	-7.44
11	3018	0.37	-7.45	29	3114	0.01	-6.00
12	3022	0.01	-6.89	30	3118	0.17	-7.20
13	3026	0.04	-6.89	31	3122	-0.04	-5.77
14	3034	-0.03	-7.42	32	3126	-0.28	-7.04
15	3038	0.03	-7.48	33	3134	-0.35	-7.14
16	3046	0.74	-8.00	34	3140	-0.31	-7.62
17	3050	0.34	-7.56	35	3144	0.34	-4.06
18	3054	1.04	-5.91	36	3146	-0.59	-9.11

**Tablo 2.**  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  ve  $\Delta_{47}$  analiz sonuçlarının özetleri**Table 2.**  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\Delta_{47}$  analyses are summarized in Table 2

Sıra No	Örnek Adı	Derinlik (m)	$\delta^{13}\text{C}$ (%)	$\delta^{18}\text{O}$ (%)	$\Delta_{47}$ (%)	Sıcaklık T (°C)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{su}}$ (%)
1	C-M-3010	3010	0.69	-6.75	0.451	92.54	3.32
2	C-M-3044	3044	0.08	-7.63	0.405	124.96	6.12
3	C-M-3074	3074	0.06	-4.61	0.453	91.47	5.35
4	C-M-3102	3102	0.51	-7.08	0.422	112.42	5.36
5	C-M-3148	3148	-0.38	-6.75	0.430	106.50	5.03

Mn konsantrasyonu 7.65 ppm ile 36.25 ppm arasında değerler alırken, Fe elementi 2.33 ppm ve 54.16 ppm arasında değişen değerlere sahiptir (Tablo 3).

### TARTIŞMA

#### Petrografik Değerlendirmeler

Kristal destekli olan Mardin Grubu dolomitleri çoğunlukla iyi kenetlenmiş, kristal sınırları ve düz tane ilişkili hipidiomorf, bazen de kenetlenmiş, şekilsiz-yarı şekilli kristaller iç dış bükey, düzensiz kristal sınırları olan ksenenomorfik mozaik dokusu göstermektedir. Kristal arası, kovuk ve yer yer de çatlak tipi gözenekliliğe sahip bu dolomitlerin görsel poroziteleri %1-5 arasında değişmektedir.

Sıcaklığın dolomit kristallerinin büyümesini tetiklediği bilinmektedir (Lewis 1975). Sibley ve Gregg (1987) tarafından önerilen kritik kristal büyüme sıcaklığının (critical roughening temperature) dolomitler için 50°C ve 100°C arasında olduğu tahmin edilmektedir. Özşekilli veya özşekilli olmayan dolomit kristalleri kritik pürüzlenme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda meydana gelmektedir. Örneğin, Üst Kambriyen yaşlı Little Falls dolomitlerinin

90°C'nin üzerinde gerçekleşen yeniden kristallenmesi olayının kaba dolomit kristallerinin oluşmasına sebebiyet verdiği öne sürülmüştür (Zenger 1981). Bu kapsamda, Mardin Grubu dolomitlerinin petrografik özellikleri incelendiğinde yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı düşüncesi ortaya çıkmaktadır.

#### Kararlı İzotop Sistematiği

**$\delta^{13}\text{C}$** - Mardin Grubu dolomitlerinin  $\delta^{13}\text{C}$  izotop değerleri yaklaşık olarak %-0,5 ve %1,5 arasında değişmektedir (Şekil 5). Bu değerler, Kretase deniz suları için Veizer vd. (1999) tarafından önerilen aralıkta yer almaktadır.  $\delta^{13}\text{C}$  sinyallerinin sıcaklıkla doğrudan bir ilişkisi olmadığı düşünülse de (Swart, 2015), yüksek sıcaklık değerleri ( $\delta^{18}\text{O}$  sinyallerini etkilediği kadar olmasa da)  $\delta^{13}\text{C}$  sinyallerinin daha negatif değerler almasını sağlamaktadır (Emrich vd., 1970).

Bu çalışmada kullanılmak üzere,  $\delta^{13}\text{C}$  bazlı kemostratigrafik bir değerlendirme yapılarak Mardin Grubu'nun çökelim yaşının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmayı gerçekleştirebilmek amacıyla izotop verisi ile birlikte değerlendirilecek, bir biyostratigrafi



**Tablo 3.** Kuyu C'den elde edilen dolomit örneklerinin iz element kimyası sonuçları**Table 3.** Trace elemental chemistry results of dolomite samples obtained from Well C

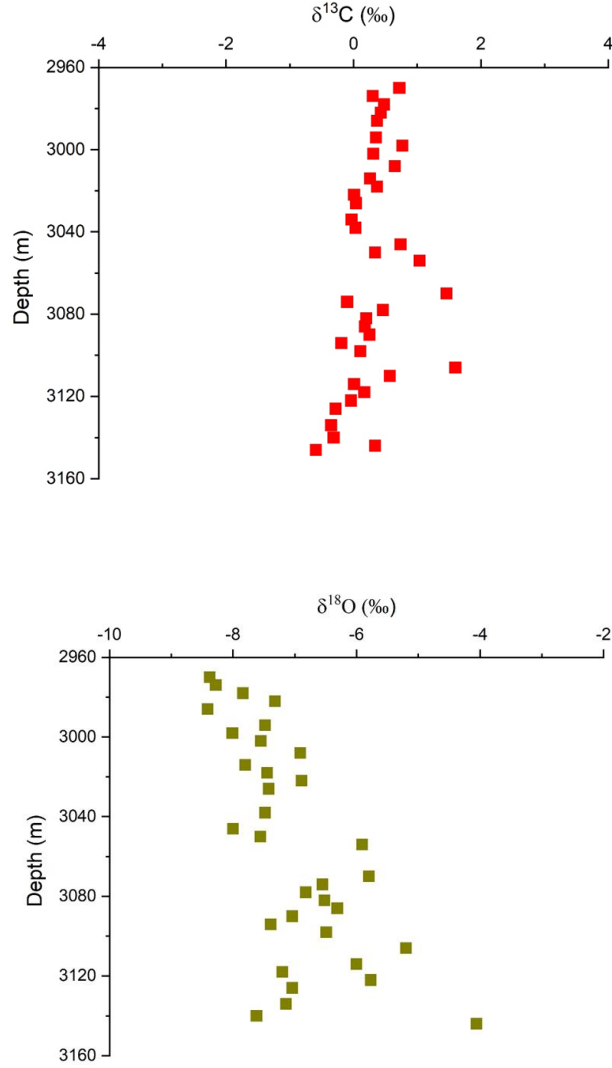
Sıra No	Örnek Adı	Derinlik (m)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Sr (ppm)
1	C-M-2970	2970	11.42	32.92	1058.26
2	C-M-2978	2978	14.16	29.73	403.92
3	C-M-2986	2986	54.16	25.97	162.98
4	C-M-2998	2998	10.72	20.76	126.64
5	C-M-3006	3006	20.03	10.75	131.21
6	C-M-3034	3034	30.69	11.36	114.92
7	C-M-3044	3044	22.87	16.70	130.85
8	C-M-3054	3054	2.33	7.65	178.32
9	C-M-3070	3070	18.01	36.25	918.28
10	C-M-3078	3078	8.96	10.21	134.65
11	C-M-3090	3090	8.35	9.42	84.42
12	C-M-3098	3098	11.17	11.60	107.41
13	C-M-3118	3118	22.16	12.91	124.38
14	C-M-3140	3140	8.47	23.55	462.46
15	C-M-3148	3148	9.58	16.34	196.15

çalışılması yürütülmesi de amaçlanmıştır. Bu sebeple, yaş verisi sağlayacak bentik ve planktonik fosillerin varlığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Mardin istifinin tabanında planktonik foraminiferlerden *Muricohedbergella cf. simplex* ile bentik foraminiferlerden *Discorbis sp.* ile Miliolidae familyasına ait formlar gözlenmiştir. Fakat elde edilen kemostratigrafik bulgular Mardin Grubu'nun çökelmemeziğe veya erozyona maruz kalması Kretase

döneminde gözlemlenen okyanusal anoksik olaylarının tespit edilmesinde kullanılan  $\delta^{13}\text{C}$  zenginleşmeleri izlenmemiş olup ve dolayısıyla yaş tespiti yapılamamıştır.

**$\delta^{18}\text{O}$ -** Mardin Grubu için oksijen izotop değerleri yaklaşık olarak %-9 ve %-4 arasında değişmektedir (Şekil 5). Bu çalışmanın  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri Kuvaterner yaşlı dolomitlerin oksijen izotop verisi (ortalama ‰) ile kıyaslandığında (Swart ve Melim, 2002), Mardin Grubu dolomitlerin oldukça geniş bir aralıkta negatif



**Şekil 5.** Mardin Grubu  $\delta^{13}\text{C}$  (5a) ve  $\delta^{18}\text{O}$  (5b) izotop sinyallerinin artan derinliğe göre değişimi

**Figure 5.** Variations in  $\delta^{13}\text{C}$  (5a) and  $\delta^{18}\text{O}$  (5b) signatures within Mardin Group of Well C with increasing depth.

değerler yansıttıkları görülmektedir. Bu durum, Mardin Grubu dolomitlerinin farklı zamanlarda farklı diyajenetik sıvılarla etkileşerek diyajenetik süreçlere maruz kaldığını göstermektedir.

Yaklaşık %2'lik değişim Kretase dönemi deniz sularının negatif oksijen izotop bileşimi (%-2,6 ve %+1,2) ile açıklanabilmektedir (Lohmann, 1988, Veizer vd., 1999). Diğer yandan, ilksel karbonatların dolomitleşme süreci ile  $\delta^{18}\text{O}$

izotopunda %3'lük bir zenginleşme yaşanacağı da ifade edilebilir (Land, 1980 a, b).

Açıklanması gereken %4-9 değişim, Mardin Grubu'nun oluşum sıcaklığının 16-36 °C kadar günümüz deniz sularından daha sıcak olması ile açıklanması gerekmektedir. Kretase deniz sularının günümüz deniz sularından daha sıcak olduğu bilinmesine rağmen bu husus pek mümkün görünmemektedir. Mardin Grubu dolomitlerinin negatif  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri derin gömülmenin sonucu olarak kazanılan yüksek sıcaklık değerleri ile ilişkilendirilmektedir (Şekil 6).

### **Paleosıcaklıkların Belirlenmesi**

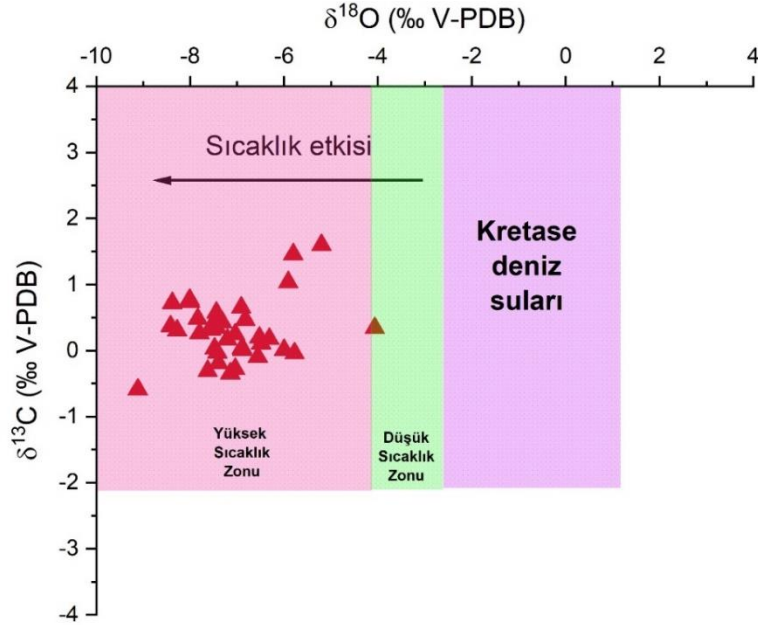
Hidrokarbon için hedef seviye günümüzde 3-3.2 km derinlikte ve 90-95°C rezervuar sıcaklık koşullarında yer almaktadır. Ölçülen kümelenmiş izotop sıcaklık değerleri güncel kuyu sıcaklıkları ile benzer veya yaklaşık 30°C üzerinde değerlerdedir. Buna karşılık, genellikle kümelenmiş izotop sıcaklıklarının güncel kuyu sıcaklıkları ile aynı veya daha düşük değerlerde olması beklenmektedir.

Her teknikte olduğu gibi kümelenmiş izotop yönteminin de bir dezavantajı bulunmaktadır. Literatürde yeniden düzenlenme olarak adlandırılan bu durum, karbonat minerallerinin  $^{13}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  ve  $^{18}\text{O}$  izotoplarının yüksek sıcaklıklarda birbiriyle yapmış oldukları bağların sayısının dolomitleşme ve yeniden kristallenme vb. anında değişerek yanıtıcı  $\Delta_{47}$  değerleri sağlaması ile açıklanmaktadır (Passey ve Henkes, 2012; Henkes vd., 2014). Yeniden düzenlenme, kireçtaşlarının 120°C üzerindeki sıcaklıklara on milyonlarca yıl maruz kalması sonucunda meydana gelmektedir (Stolper ve Eiler, 2015). Buna karşılık, dolomitler kireçtaşlarına göre yeniden düzenlenmeye karşı daha dayanımlıdır (Eiler vd., 2011). Dolomitlerin  $\Delta_{47}$  sinyallerinin yeniden düzenlenmesi için gerekli şart, dolomitlerin çevre sıcaklıklarının 180°C'yi

aşmasıdır (Lloyd vd., 2018). Bonifacie vd. (2017)'e göre bu eşik değer 300 °C'dir. Bu çalışma için elde edilen paleo-sıcaklıkların eşik değerinin oldukça altında olmasından dolayı bu aşamadan sonra Mardin Grubu dolomitleri için kümelenmiş izotop sinyallerinin yeniden düzenlenme ihtimali göz ardı edilecektir.

GDA Bölgesi Mardin Grubu'nun depolandığı Kretase döneminde yaklaşık 15° kuzey enlemde yer aldığından dolayı, çalışma alanında ekvatoryal bir iklim hakim sürmüştür (Dercout vd., 1993). Arap Plakası'nın başka bir bölgesinde (Umman), Alt Kretase yaşlı Qishn Formasyonu'nda iyi korunmuş halde bulunan bir istiridye (oyster) fosilinin kümelenmiş izotop metodu ile ilksel oluşum sıcaklığı 34±4 °C olarak ölçülmüştür (John, 2015). Bu bilgiler ışığında, bu çalışma için Mardin Grubu karbonatlarının dolomitleşme öncesi ilksel karbonatın oluşum sıcaklıkları 30°C olarak kabul edilmiştir. Qishn Formasyonu'nda alınan sığ bir gömülme ile oluşan ince kristalli erken diyajenetik dolomitlerin sıcaklıkları ise 44°C ölçülmüştür (Sena vd., 2014). Bu nedenle, Mardin Grubu dolomitleri için üretilecek dolomitleşme modelinde dolomitleşmenin başlangıç sıcaklığının 40°C olduğu varsayılmaktadır.

Sıvı kapanım metoduyla yürütülen Ellenberger Formasyonu'nun dolomitleşme sıcaklıklarının belirlenmesi çalışmasında, 75°C sıcaklık değeri yeniden kristallenmenin (recrystallization) başlangıcı olarak tespit edilmiştir (Kupecz ve Land, 1991). Diğer yandan, Pinda Formasyonu'nda (Angola) gözlemlenen yeniden kristallenme olayının kümelenmiş izotop sistematiği tarafından kaydedildiği kanıtlanmıştır (MacDonald vd., 2018). Bu bilgiye paralel olarak, Umman'da yer alan Ara Grup dolomitlerinin kümelenmiş izotop tekniği ile yeniden kristallenmesinin 90°C altında gerçekleştiği gözlemlenmiştir (Becker vd., 2019).



**Şekil 6.** Mardin Grubu dolomitlerinin  $\delta^{13}\text{C}$  ve  $\delta^{18}\text{O}$  grafiği

**Figure 6.** Plot of the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values in the Mardin dolomites

MacDonald vd. (2018)'in çalışmasında günümüz kuyu sıcaklığı ile benzer sıcaklıklar sergileyen kümelenmiş izotop sıcaklıkları ölçülmüştür. Elde edilen dolomitlenme sıvılarının ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{su}}$ ), formasyondan alınan gözenek sularının oksijen izotop ölçümleri ile uyumlu olması nedeniyle diyajenezin açık sistemde (formasyon suyu ile karbonat mineralinin etkileşimde olması) gerçekleştiği düşünülmektedir. Bu bilginin ışığında, Mardin Grubu için günümüz formasyon sularına ait oksijen izotop sonuçları bulunmamasına rağmen,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{mineral}}$  değerlerindeki büyük değişimler Mardin Grubu içinde açık sistem bir diyajenetik ortamın var olduğunu doğrulamaktadır. MacDonald vd. (2018)'e göre, kümelenmiş izotopların yeniden kristallenme sıcaklıkları açık sistem diyajenetik ortamlarında sorunsuzca kaydedilmektedir.

Bu çalışma için analiz edilen kaba kristalli dolomitlerin kümelenmiş izotop sıcaklıkları

yaklaşık 92°C ile 125°C arasında değişen değerler almaktadır. Bu durum, kümelenmiş izotopların yeniden kristallenme sıcaklıklarının saptanmasıyla açıklanmaktadır. Bu çalışmada, kümelenmiş izotop sonuçlarındaki 35°C'ye varan sıcaklık farklılıkları Mardin Grubu için yeniden kristallenmenin farklı derecelerde gerçekleştiğini açıkça ifade etmektedir.

Mikro ölçekte yeniden kristallenme, önce ilksel karbonatın çözünmesi ve daha sonra yeniden çökmesi olarak açıklanmaktadır. Bahse konu olan süreç iz element ve izotop kompozisyonunu değiştirmekle kalmamakta (Veillard vd., 2019), ayrıca dolomit kristallerinin büyüklüğünü değiştirerek rezervuarın gözeneklilik ve geçirgenlik değerlerini de değiştirmektedir (Machel, 1997). Örneğin, Bahamalarda 3,5 km derinlikten alınan karot örneklerinin, kümelenmiş izotop sıcaklıkları 70°C üzerinde ölçülmüştür. Yeniden

kristallenme olarak yorumlanan sıcaklıkların varolan dolomit kristallerinin büyümesine neden olduğu belirtilmiştir (Winkelstern ve Lohmann, 2016).

Bu çalışmanın petrografi sonuçlarından da görüldüğü üzere, Mardin Grubu dolomitlerinin kristalleri yüksek sıcaklıklara maruz kalarak büyümüş ve birbirleriyle içiçe geçerek varolan gözenekliliğin kaybolmasına neden olmuştur (Şekil 3e). Bu sebepten dolayı özellikle yeniden kristallenme zamanlaması ve derecesi rezervuar kalitesi bakımından önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, yüksek sıcaklık değerleri rezervuarların porozite değerlerini olumsuz yönde değiştirmekte ve hidrokarbonun kurtarım faktörünü azaltmaktadır.

#### **Dolomitleşme Zamanı ve Derinliğinin Belirlenmesi**

Bir petrol sisteminde termal ve gömülme tarihçelerinin ortaya çıkarılması, rezervuardaki inorganik (diyajenetik değişimlerin) ve organik (kaynak kaya hidrokarbon türüm-atım) süreçlerin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Mangenot vd., 2016). Semail ofiyolitleri Arap Plakası'nın güneybatısına bindirerek D-B yönlü bir diyajenetik sıvı hareketine neden olmuş olup, bu durum rezervuarda yeniden kristallenmeyle birlikte yeni bir porozite-permeabilite sistemini geliştirmiştir. Bu konuya ışık tutabilmek adına, Barremiyen yaşlı Thamama-B rezervuar aralığında yer alan kireçtaşlarının kümelenmiş izotop değerleri ile basen modelleri birlikte yorumlanmıştır. Bu yöntem ile diyajenetik gözenek sıvılarının derinlik-zaman bilgisine kolaylıkla ulaşılmaktadır (Barata vd., 2015).

Bu çalışmada kümelenmiş izotop sıcaklıkları bir basen modeli kullanılarak yeniden kristallenmenin gerçekleştiği zaman ve derinlik değerlerine dönüştürülmüştür (Tablo 4). Bu kapsamda, Mardin Grubu için bir dolomitleşme modeli çıkarılmıştır (Şekil 7). Bu modelde,

Mardin Grubu ilksel karbonatlarının çökelimden (30°C) erken dolomitleşme aşamasına geçmesi (40°C) için 400 m'lik bir sığ bir gömülmeye ihtiyaç olduğu görülmektedir. Yeniden kristallenmenin başlangıcı olduğu düşünülen 75°C sıcaklık değeri için bu diyajenetik sürecin (45 milyon yıl önce-Orta Eosen'de) 1700 m derinlikte başlamış olması öngörülmektedir.

Kümelenmiş izotop yöntemiyle ölçülen C-M-3010 ve C-M-3074 dolomitlerinin yaklaşık 92°C olarak ölçülen sıcaklıkları yeniden kristallenmenin (15 milyon yıl önce-Orta Miyosen) 2200 m derinlikte sonlandığını belirlemiştir. MacDonald vd. (2015)'in araştırmasına göre, dolomitleşme sıcaklıkları güncel kuyu sıcaklıklarının altında yer almaktadır. Buna karşılık, Kuyu C'den alınan bazı örneklerin güncel kuyu sıcaklıklarının üzerinde yer aldığı gözlemlenmiştir. Bu durum üç sebeple açıklanabilmektedir: a.) kuyunun maruz kaldığı paleotermal gradyanın güncel jeotermal gradyandan daha baskın olması b.) Gömülme koşullarında Mardin Grubu dolomitlerinin 125°C'ye varan sıcaklıkları test ettikten sonra tektonik bir olay sonucunda yükselmesi ile grubun güncel pozisyonuna gelmesi c.) hidrotermal solüsyonların dışsal dolomitleşme sıvısı olarak rezervuara dahil olarak dolomitleşme sürecini gerçekleştirmesi.

Yukarıda bahsi geçen, hangi olasılık veya olasılıkların etkin olduğunu anlamak için çalışmanın bu aşamasında en yüksek kümelenmiş izotop sıcaklığına sahip örnek değerlendirilmiştir. Kümelenmiş izotop sıcaklık değeri (124.96°C) kuyunun güncel sıcaklığından 30°C daha yüksektir. Elde edilen basen modeline göre, bu dolomit örneği sıcaklık değerini yaklaşık 14 milyon önce 3430 m'ye kadar gerçekleştiren gömülme ile kazanmıştır. Ortalama jeotermal gradyanın 30°C/km olarak hesaplandığı çalışma alanında, yaklaşık 30°C'lik sıcaklık farkının

**Tablo 4.** Tek boyutlu (1B) basen modeli kullanılarak sıcaklık verisinin dolomitleşme derinliğine ve zamanına çevrilmesi (MY=Milyon yıl önce).

**Table 4.** Conversion of temperature data to burial depth and timing of dolomitization using one-dimensional basin model (MY= Million years ago).

Sıra No	Örnek Adı	Örnek Derinliği	Sıcaklık T (°C)	Dolomitleşme Derinliği (m)	Dolomitleşme Zamanı (MY)
1	C-M-3010	3010	92.54	2240	21
2	C-M-3044	3044	124.96	3420	14
3	C-M-3074	3074	91.47	2200	22
4	C-M-3102	3102	112.42	2900	15
5	C-M-3148	3148	106.50	2620	16

açıklanması için Kuyu C'nin bulunduğu alanın maksimum gömülme sonrası bu yüksek sıcaklığına ulaştıktan sonra 1 km yükseltilmesi gerekmektedir.

Jeolojik kesitten de görüldüğü üzere (Şekil 3), kuzeyde yer alan bindirmenin etkisiyle çalışma alanı Geç Miyosen'de bindirmelerle yükseltilerek günümüz pozisyonuna getirilmiştir. Örneğin alındığı derinlik (3044 m) örneğin dolomitleşmesini tamamladığı düşünülen derinliğin 400 m yukarısında bulunmaktadır. Burada tektonik kaynaklı aşınma ihtimali asla göz ardı edilmemelidir. Mardin Grubu dolomitlerinin maksimum olarak 134°C sıcaklığı deneyimlemelerine karşılık, yeniden kristallenme sıcaklıklarının en yüksek olarak 125°C'yi görmesi yeniden kristallenmenin sonlandığının ve günümüze kadar devam etmediğinin bir işaretidir.

#### **Dolomitleşme Sıvısının Kökeni ve Evrimi**

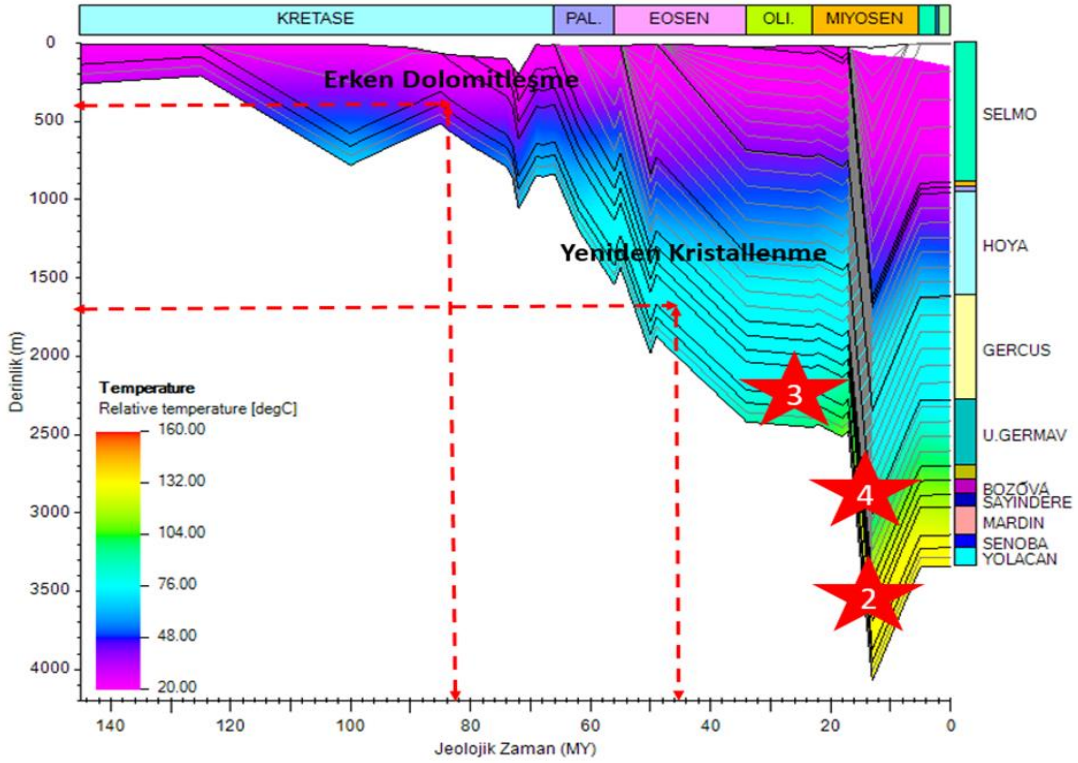
Kretase deniz suları için oksijen izotop değerleri %-2,6'dan %+1,2'ye varan aralıkta

değerler alırken (Veizer vd., 1999), bu çalışmadaki dolomitleşmeyi gerçekleştiren sıvıların  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri %+3.32 ve %+6.5 arasında değişen değerler almaktadır (Şekil 8). Mardin Grubu dolomitleri arasında evaporit bantlarının yer almaması diyajenetik suların yeterince sürede aşırı yoğun buharlaşmaya maruz kalmadığını ve çok yüksek tuzlu olmayan sular olduğunu ispat etmektedir.

Gömülmenin başlaması ile birlikte dolomitler  $\delta^{16}\text{O}$  izotoplarını bünyesine almayı tercih ederken, gözenek sıvıları  $\delta^{18}\text{O}$  tarafından zenginleşmektedir (Swart vd., 2016). Mardin Grubu dolomitlerinin oldukça negatif değerler alırken, dolomitleşme sıvısının Kretase deniz suyundan daha fazla pozitif değerler alması bu düşüncüyü bu olayda da teyit etmektedir.

Özellikle bu çalışmanın  $\delta^{18}\text{O}$  değerlerinin zenginleşmesi, sıg denizel çökel ortamında gerçekleşen buharlaşmadan daha çok gömülme ile kazanılan sıcaklığın bir ürünü olarak açıklanmaktadır.





**Şekil 7.** C kuyusu tek boyutlu basen modeli ile majör dolomitleşme aşamaları

Numara 2, 3 ve 4 sırasıyla C-M-3044, C-M-3074, ve C-M-3102 örneklerini yansıtmaktadır

**Figure 7.** One-dimensional basin modelling of Well C with major dolomitization stages

Number 2, 3 and 4 are reflective samples of C-M-3044, C-M-3074 and C-M-3102 respectively

Kretase yaşlı Jurf ve Qishn formasyonlarına ait yüzey örneklerinden analiz edilen erken diyajenetik dolomitlerin  $\delta^{18}\text{O}_{\text{su}}$  değerleri ortalama %3.5 iken (Sena vd., 2014), Mardin Grubu dolomitleri için hesaplanan ve %6.5'a varan  $\delta^{18}\text{O}_{\text{su}}$  değerleri bu dolomitleşme sıvılarının derince gömülmüş sular olarak tanımlamasını sağlamaktadır.

#### **Mardin Grubu Dolomitleri İz Element Kimyası**

**Mn elementi**-Mardin Grubu dolomitlerinin Mn element ölçümleri 7.65 ve 36 ppm arasında

değişmektedir. Deniz sularının Mn konsantrasyonunun ortalama 1 ppm olduğu bilinmektedir (Vahrenkamp ve Swart, 1994). Bu husus, Mardin Grubu dolomitlerinin deniz suları tarafından dolomitleştirildiğini işaret etmekle beraber, bu dolomitlerin hidrotermal orijinli sularca dolomitleşme ihtimalinin olmadığını ispat etmektedir.

Mn konsantrasyonu ile sıcaklık arasında bir ilişki olmadığından dolayı geç dolomitleşmeye maruz kalan Mardin Grubu dolomitlerinin

konsantrasyonunda herhangi bir değişim yaşanmamıştır.

**Fe elementi-**Mardin Grubu dolomitleri 2.3 ppm ve 54.1 ppm arasında değişen değerler almaktadır. Bu değerler, Budd (1997) tarafından önerilen normal deniz suyu (3-50 ppm) Fe element konsantrasyonu ile uyumlu gözükmektedir. Reinhold (1998)'e göre, gömülme şartları altında bu elementin konsantrasyonundaki artışlar dolomitleşmenin derecesi hakkında bilgi vermektedir. Artan derinlikle birlikte Fe, Sr ve Na gibi elementler, dolomit kristali içerisinde de Ca yerini almaktadır (Swart, 2015).

Rossinsky vd. (1986) tarafından yüksek Mn ve Fe elementlerinin kaynağının kıtasal kabuk ppm) Fe element konsantrasyonu ile uyumlu gözükmektedir. Reinhold (1998)'e göre, gömülme şartları altında bu elementin konsantrasyonundaki artışlar dolomitleşmenin derecesi hakkında bilgi vermektedir. Artan derinlikle birlikte Fe, Sr ve Na gibi elementler, dolomit kristali içerisinde de Ca yerini almaktadır (Swart, 2015).

Rossinsky vd. (1986) tarafından yüksek Mn ve Fe elementlerinin kaynağının kıtasal kabuk olduğu belirtilmiştir. Bu durumda, Mardin Grubu'nu dolomitleşiren suların karbonat olmayan kayalarla herhangi bir biçimde etkileşim içerisinde olmadığı rahatlıkla söylenebilmektedir.

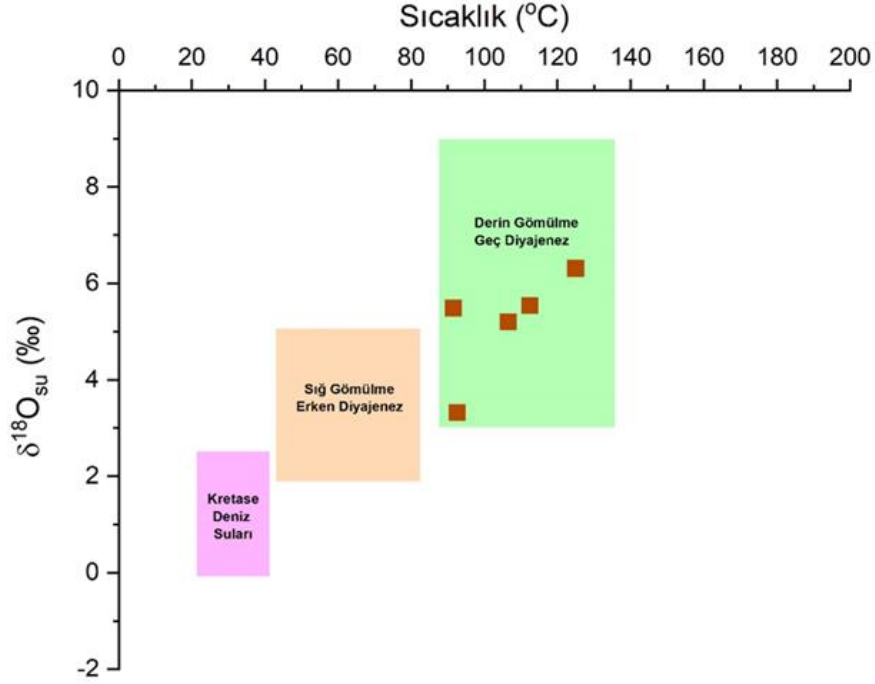
Kümelenmiş izotop yöntemiyle ölçülen 100-120°C sıcaklıklara sahip diyajenetik sıvılarca dolomitleştirilen Jura yaşlı Arab-D Formasyonu dolomitleri 1000 ppm'e varan Fe element değerleri sergilerken (Swart vd., 2005; 2016), bu değerlere oranla Mardin Grubu dolomitleri oldukça düşük Fe konsantrasyon değerleri yansıtmaktadır. Bu durum Mardin Grubu dolomitleri için dolomitleşmenin hidrotermal kökenli bir sıvı tarafından gerçekleştirilmediğini ve Mardin Grubu'nu dolomitleşiren suların

olduğu belirtilmiştir. Bu durumda, Mardin Grubu'nu dolomitleşiren suların karbonat olmayan kayalarla herhangi bir biçimde etkileşim içerisinde olmadığı rahatlıkla söylenebilmektedir.

Kümelenmiş izotop yöntemiyle ölçülen 100-120°C sıcaklıklara sahip diyajenetik sıvılarca dolomitleştirilen Jura yaşlı Arab-D Formasyonu dolomitleri 1000 ppm'e varan Fe element değerleri sergilerken (Swart vd., 2005; 2016), bu değerlere oranla Mardin Grubu dolomitleri oldukça düşük Fe konsantrasyon değerleri yansıtmaktadır. Bu durum Mardin Grubu dolomitleri için dolomitleşmenin hidrotermal kökenli bir sıvı tarafından gerçekleştirilmediğini ve Mardin Grubu'nu dolomitleşiren suları

Fe'ce zengin olmayan sular olduğunu ispat etmektedir.

**Sr elementi-** Dolomitleşme sıvısının kökeninin ortaya çıkarılması için dolomitlerin Sr element konsantrasyonlarına başvurulmaktadır (Machel ve Mountjoy, 1986). Sr konsantrasyonları Vahrenkamp ve Swart (1990) tarafından ölçülen denizel kökenli Bahama dolomitlerinin konsantrasyonları ile Mardin Grubu Sr element ölçümleri benzer değerler almaktadır. Bu çalışmadaki rezervuar kayalar gibi, deniz suları ile dolomitleşen dolomitlerin ortalama Sr element miktarları 600 ppm'dir (Land, 1980b). Genellikle, erken diyajenetik dolomitler 100 ile 1000 ppm arasında değerler alırken, geç diyajenetik dolomitler 30 ppm'den 100 ppm'e varan değerler almaktadır (Veizer ve Demovic, 1974). Bu çalışmada, Sr element miktarı 200 ppm'e kadar değerler alan dolomitler geç diyajenetik dolomitler olarak değerlendirilmektedir (Şekil 9). Bu düşünce petrografik tanımlamalar ve kümelenmiş izotop sonuçları ile de desteklenmektedir. Diğer yandan, geri kalan dolomitler ise anhidrit çimentolara sahip olan örnekler tarafından temsil edilmektedir.



**Şekil 8.** Swart vd. (2019) ve Horita (2014) formülleri kullanılarak elde edilen paleo-sıcaklık ve  $\delta^{18}\text{O}_{\text{su}}$  ilişkisi ( Kırmızı kutular bu çalışmanın sıcaklık tahminlerini ve  $\delta^{18}\text{O}_{\text{su}}$  göstermekte ve  $\delta^{18}\text{O}_{\text{su}}$  derince gömülmüş diyajenetik sıvılarla ilişkilidir. Turuncu kutu sığ gömülmüş veya yoğun buharlaşmaya uğramış  $\delta^{18}\text{O}_{\text{su}}$  değerlerinin olması gerektiği muhtemel alanı işaret etmektedir. Mor kutu ise grafikte Kretase deniz sularının düştüğü alanı yansıtmaktadır)

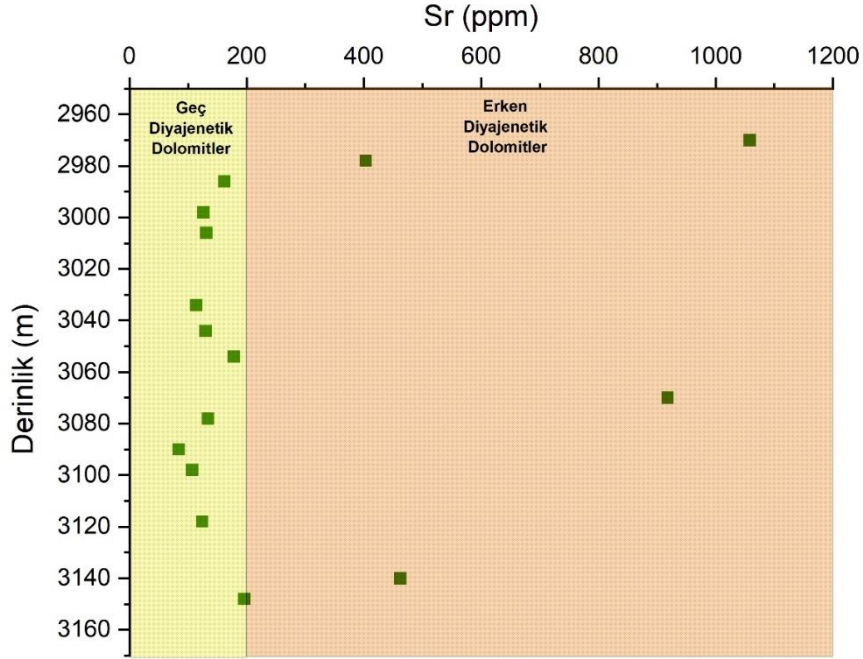
**Figure 8.** Relationship of paleotemperature and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$  values obtained based on equation of Swart et al. (2019) and Horita (2014) (Solid red squares indicates temperature estimations and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$  linking to deeply buried fluids. Orange box presents possible area associated with near surface buried or highly evaporated fluids. Purple box reflects normal marine Cretaceous waters)

Land ve Hoops (1973)'ün belirttiği gibi, 1000 ppm'in üzerinde Sr elementine sahip dolomitler buharlaşmanın yüksek olduğu tuzlu sular tarafından dolomitleştirilmişlerdir. C-M-2970 ve C-M-3070 gibi örnekler için bu durum söz konusudur.

## SONUÇ

Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde Kretase yaşlı Mardin Grubu'nu penetre eden Kuyu C'den

alınan dolomit örneklerinin kümelenmiş izotop sıcaklıkları ölçülmüş ve bu sıcaklıkların yeniden kristallenme sıcaklıklarını kaydettikleri ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışma, ölçülen yüksek sıcaklıkların Kuyu C'nin gömülme tarihçesi ile ilişkili olarak, yeniden kristallenme sürecinin Miyosen'de (günümüzden 22-14 milyon öncesine kadar) 2.2-3.4 km derinlikte gerçekleştiğini göstermektedir.



**Şekil 9.** Kuyu C'deki derinliğe karşı Sr konsantrasyonu

Sarı alan geç diyajenetik dolomitlerin Sr miktarını sergilemektedir.

**Figure 9.** Concentration of Sr in Well C versus depth

Yellow area indicates Sr content of late diagenetic dolomites

Mardin Grubu dolomitlerinin düşük Fe (2-54 ppm) ve Mn (8-36 ppm) element konsantrasyonları dolomitleşmeyi gerçekleştiren suların denizel kökenli olduğunu işaret ederken, 200 ppm değerinin altında konsantrasyona sahip Sr elementi geç diyajenezin varlığını ortaya çıkarmaktadır.

Bu diyajenetik olay değişen sıcaklık değerlerinde farklı derecede oluşan yeniden kristallenme evresini temsil etmektedir. Bu sürecin sonucunda yüksek sıcaklık değerleri dolomit kristallerinin büyümesine neden olarak kristaller arası porozitenin azalmasına neden olmaktadır. Özetle, kümelenmiş izotop yöntemi

ve tek boyutlu basen modelinin birlikte kullanılması derince gömülmüş dolomitlerin dolomitleşme tarihçesinin kantitatif olarak modellenmesine olanak sağlamaktadır.

#### KATKI BELİRTME

Yazarlar TPAO Arama Dairesi Başkanlığı'na bu makalenin yayımlanmasına izin verdiği ve Ar-Ge Merkezi Daire Başkanlığı'na kuyu örneklerinin kullanılmasına olanak sağladıkları için teşekkür etmektedir. Birinci yazar makaledeki jeokimyasal analizleri gerçekleştirdiği University of Miami'deki Kararlı İzotop Laboratuvarı (SIL) müdürü Peter K.

Swart ve ekibine katkılarında dolayı müteşekkirdir. Bu analizlerin gerçekleştirildiği dönemde birinci yazarın ABD'deki yaşamsal giderleri 2214A kapsamında TÜBİTAK tarafından finanse edilmiştir (Proje Numarası:

2016-01-02-001.). Son olarak, yazarlar makalenin son haline gelmesi için yapıcı eleştirilerde bulunan dergi hakemlerine ve editörlerine teşekkür etmektedir.

## KAYNAKLAR

- Ahmed, S., 2021. Stratigraphy, Geometry, and pattern of Imbricated zones, NW Zagros Fold and Thrust Belt in Iraqi Kurdistan Region. *Journal of Zankoy Sulaimani - Part A*. DOI: 23. 73. 10.17656/jzs.10843
- Akram, R., Faqi, A., Jihad, W., Sherwani, G., Al-Ansari, N. (2021). Source Rock Evaluation and 1-D Basin Modelling Approach for the Sargelu Formation, Atrush-2 Well, Kurdistan Region-Iraq. *Open Journal of Geology*, 11, 49-60. DOI:10.4236/ojg.2021.113004
- Ala, M.A. and Moss, 1979. Comparative petroleum geology of SE Turkey and NE Syria. *Journ. Petrol. Best*, J.A., Barazangi, M., Al-Saad, D., Sawaf, T. And Gebran, A., 1993. *Continental margin Geol.* 1, 3-27.
- Aqrawi, A. A. M., Goff, J. C., Horbury, A. D., Sadooni F. N. *The Petroleum Geology of Iraq*. Scientific Press, Beaconsfield, UK, pp. 424. (2010).
- Aqrawi, A., Badics, B., 2015. Geochemical characterisation, volumetric assessment and shale-oil/gas potential of the Middle Jurassic–Lower Cretaceous source rocks of NE Arabian Plate. *Geoarabia -Manama*. 20, 99-140. DOI:10.4236/ojg.2021.113004 10.2113/geoarabia200399.
- Barata, J. , Vahrenkamp, V. , Van Laer, P. J., Swart, P. , and S. Murray. A Regional Analysis of Clumped Isotope Geochemistry to Define the Timing of Creation of Micro-Porosity in a Lower Cretaceous Giant Reservoir. Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2015. doi: <https://doi.org/10.2118/177922-MS>
- Becker, S., Reuning, L., Amthor, J.E., Kukla, P.A., 2019. Diagenetic Processes and Reservoir Heterogeneity in Salt-Encased Microbial Carbonate Reservoirs (Late Neoproterozoic, Oman). *Geofluids*.
- Bonifacie, M., Calmels, D., Eiler, J. M., Horita, J., Chaduteau, C., Vasconcelos, C., Bourrand, J. J., 2017. Calibration of the dolomite clumped isotope thermometer from 25 to 350 °C, and implications for a universal calibration for all (Ca, Mg, Fe) CO<sub>3</sub> carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 200, 255–279. DOI:10.1016/j.gca.2016.11.028
- Budd, D.A., 1997, Cenozoic dolomites of carbonate islands: their attributes and origin: *EarthScience Reviews*, 42, 1–47.
- Chaojin, L., Murray, S., Koeshidayatullah, A., Swart, P. (2022). Clumped Isotope Acid Fractionation Factors for Dolomite and Calcite Revisited: Should We Care?. *Chemical Geology*. 588. 120637. DOI:10.1016/j.chemgeo.2021.120637.
- Cordey, W.G., 1971. Stratigraphy and sedimentation of the Cretaceous Mardin Formation in SE Turkey. In: A.S. Campbell (Ed.). *Geology and History of Turkey*. 13th Annual Field Conf. of the Petrol. Expl. SOC. Libya. 317-348

- Çelikdemir E.M., Dülger S., Görür N., Wagner C., Uygur K., 1991. Stratigraphy, sedimentology, and hydrocarbon potential of the Mardin Group, SE Turkey. Special Publications of the European Association of Petroleum Geoscientists 1: 439–454.
- Defliese, W.F., Hren, M.T. and Lohmann, K.C., 2015 Compositional and temperature effects of phosphoric acid fractionation on D47 analysis and implications for discrepant calibrations. *Chem. Geol.*, 396, 51–60.
- Dennis, K. J., Affek, H. P., Passey, B. H., Schrag, D. P., Eiler, J. M., 2011. Defining an absolute reference frame for 'clumped' isotope studies of CO<sub>2</sub>. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75 (22), 7117–7131. DOI: 10.1016/381.j.gca.2011.09.025
- Dercourt, J., Ricou, L.E., and Vrielynck. B., 1993, Atlas Tethys of Palaeoenvironmental Maps: Commission for the Geologic Map of the World. Paris. 14 maps and explanatory notes.
- Edilbi, A. N. F., Kolo, K., N. R. Muhammed et al., Source rock evaluation of shale intervals of the Kurra Chine Formation, Kurdistan Region-Iraq: An organic geochemical and basin modeling approach, *Egyptian Journal of Petroleum*, DOI:10.1016/j.ejpe.2019.06.003
- Eiler, J.M., 2007. Clumped-isotope geochemistry—The study of naturally-occurring, multiply substituted isotopologues. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3-4), 309-327.
- Eiler, J.M., 2011. Paleoclimate reconstruction using carbonate clumped isotope thermometry. *Quat. Sci. Rev.* 30:3575–88
- Emrich, K., Ehhalt, D.H. and Vogel, J.C. (1970) Carbon isotope fractionation during the precipitation of calcium carbonate. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 8, 363–371.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H. and Urey, H.C., 1951 Carbonate water isotopic temperature scale. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 62, 417–426.
- Ferry, J.M., Passey, B.H., Vasconcelos, C. and Eiler, J.M., 2011 Formation of dolomite at 40-80°C in the Latemar carbonate buildup, Dolomites, Italy, from clumped isotope thermometry. *Geology*, 39, 571–574.
- Folk, R.L., 1962. Spectral Subdivision of Limestone Types, in Ham, W.E., Ed., Classification of Carbonate Rocks-A Symposium. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 1: 62-84
- Fritz, P. and Smith, D.G.W., 1970. The isotopic composition of secondary dolomites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34, 1161–1173.
- Ghosh, P., Adkins, J., Affek, H., Balta, Guo and W., Schauble, E.A., Schrag, D. and Eiler, J.M., (2006) C-13-O-18 bonds in carbonate minerals: A new kind of paleothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70, 1439–1456.
- Gregg, J., Sibley, D., 1984. Epigenetic Dolomitization and the Origin of Xenotopic Dolomite Texture. *Journal of sedimentary petrology*. 54. 908-931. DOI:10.1306/212F8535-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Hakimi, M., Al-Matary, A., Salad, H., O., 2018. Burial and thermal history reconstruction of the Mukalla-Sayhut Basin in the Gulf of Aden, Yemen: Implications for hydrocarbon generation from Paleocene potential source rock. *Journal of African Earth Sciences*.144. DOI:10.1016/j.jafrearsci.2018.04.005.



- Henkes, G.A., Passey, B.H., Grossman, E.L., Shenton, B. J., Perez-Huerta, A. ,Yancey, T.E., 2014. Temperature limits for preservation of primary calcite clumped isotope paleotemperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 139, 362–382.
- Horita, J. ,2014 Oxygen and carbon isotope fractionation in the system dolomite–water–CO<sub>2</sub> to elevated temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 129, 111–124.
- Huntington, K.W., Eiler, J.M., Affek, H.P., Guo, W., Bonifacie, M., Yeung, L.Y., Thiagarajan, N., Passey, B., Tripathi, A., Daeron, M. and Came, R., 2009) Methods and limitations of ‘clumped’ CO<sub>2</sub> isotope (D (47)) analysis by gas-source isotope ratio mass spectrometry. *J. Mass Spectrom.*, 44, 1318–1329.
- John, C.M. 2015. Burial Estimates Constrained By Clumped Isotope Thermometry: Example Of The Lower Cretaceous Qishn Formation (Haushi-Huqf High, Oman). In: Armitage, P.J., Butcher, A.R. Et Al. (eds) *Reservoir Quality of Clastic and Carbonate Rocks: Analysis, Modelling and Prediction*. Geological Society, London, Special Publications, 435. First published online November 18, 2015, <https://doi.org/10.1144/SP435.5>
- Kupecz, J. A., & Land, L. S.,1991. Late-stage dolomitization of the lower Ordovician Ellenburger Group, west Texas. *Journal of Sedimentary Research*, 61, 551–571.
- Land, L.S. and Hoops, G.K., 1973 Sodium in carbonate sediments and rocks: a possible index to the salinity of diagenetic solutions. *J. Sed. Petrol.*. 43. 614–617.
- Land, L.S. 1980a Dolomite. In: *Stable Isotopes in Sedimentary Geology* (Eds M. Arthur, T. Anderson, I. Kaplan, J. Veizer and L. Land), pp. 4-3–4-22. SEPM, Tulsa, OK.
- Land, L.S. 1980) The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: the state of the art. In: *Concepts and Models of Dolomitization*, Special Publication (Eds D.H.)
- Lewis, B. 1975, *Nucleation and growth theory*, in Pamplin, B. R., ed., *Crystal Growth*, New York, Pergamon Press, p. 12-39.
- Lloyd, M.K., Ryb, U. and Eiler, J.M.,2018. Experimental calibration of clumped isotope reordering in dolomite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 242, 1–20.
- Lohmann, K.C. 1988. Geochemical pattern of meteoric diagenetic systems and their application to the studies of paleokarst. In N.P. James and P.W. Choquette (Eds.), *Paleokarst*. New York, Springer Verlag, p. 58-80.
- MacDonald, J., John, C., Girard, J.P., 2015. Dolomitization processes in hydrocarbon reservoirs: insight from geothermometry using clumped isotopes. *Procedia Earth and Planetary Science*, 13, 265–268.
- MacDonald. J. M., John. C. M. and Girard. J.-P. 2018 Testing clumped isotopes as a reservoir characterization tool: a comparison with fluid inclusions in a dolomitized sedimentary carbonate reservoir buried to 2-4 km. In: Lawson. M.. Formolo. M.J. and Eiler. J.M. (eds.) *From Source to Seep: Geochemical Applications in Hydrocarbon Systems*. Series: Geological Society. London. Special Publications (468). Geological Society of London. pp. 189-202. (doi:10.1144/SP468.7)
- Machel, H.G., 1997. Recrystallization versus neomorphism, and the concept of dsignificant recrystallization in dolomite research. *Sediment. Geol.* 113, 161 – 168.

- Machel, H.G., and Mountjoy, E.W., 1986, Chemistry and environments of dolomitization—a reappraisal: *Earth-Science Reviews*, 23, 175–122.
- Mahmood, T. & Abdullah, E., 2019. Reconstruction of Paleo depth and Paleo temperature from C- O stable isotope records of Mishrif Formation, southern Iraq. 1730-1742. 10.24996/ijs.2019.60.8.10.
- Mangenot, X., Gasparrini, M., Gerdes, A., Bonifacie, M., & Rouchon, V., 2018. An emerging thermochronometer for carbonate-bearing rocks:  $\Delta 47$  /(U-Pb). *Geology*, 46 (12), 1067–1070. doi: 10.1130/G45196.1
- Matthews, A. and Katz, A., 1977. Oxygen isotope fractionation during the dolomitization of calcium carbonate. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41, 1431–38.
- McCrea, J.M., 1950. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *The Journal of Chemical Physics*, 18, 849–857.
- Murray, R.C., 1960, Origin of porosity in carbonate rocks: *Journal of Sedimentary Petrology*, 30, 59–64.
- Murray, S.T., Arienzo, M.M. and Swart, P.K., 2016. Determining the  $\Delta 47$  acid fractionation in dolomites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 174, 42–53.
- Murray, S.T. and Swart, P.K., 2017. Evaluating formation fluid models and calibrations using clumped isotope paleothermometry on Bahamian dolomites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 206, 73–93.
- Murray, Sean T., John A. Higgins, Chris Holmden, Chaojin Lu, and Peter K. S., 2021. Geochemical fingerprints of dolomitization in Bahamian carbonates: Evidence from sulphur, calcium, magnesium and clumped isotopes, *Sedimentology*, 68: 1-29.
- Mülayim, O., Mancini, E., Çemen, İ., Yılmaz. İ.Ö., 2016. Upper Cenomanian–Lower Campanian Derdere and Karababa formations in the Çemberlitaşoil field, Southeastern Turkey: their microfacies analyses, depositional environments and sequence stratigraphy. *Turkish Journal of Earth Sciences*. 25. 46–63. DOI: 10.3906/yer-1501-7.
- Northrop, D.A. and Clayton, R.N., 1966. Oxygen isotope fractionation in systems containing dolomite. *J. Geol.*, 74, 174–196.
- O’Neil, J.R. and Mchuntington, S ., 1966. Oxygen isotope fractionation in the system dolomite-calcite carbon dioxide. *Science*, 152, 198–201.
- Özkan, R., Altıner, D., 2019, The Cretaceous Mardin Group carbonates in southeast Turkey: lithostratigraphy, foraminiferal biostratigraphy, microfacies and sequence stratigraphic evolution. *Cretaceous Research*. 98. 153–178. DOI:10.1016/j.cretres.2018.09.021
- Passey, B.H. and Henkes, G.A., 2012. Carbonate clumped isotope bond reordering and geospeedometry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 351, 223–236.
- Perincek, D., 1979. The geology of Hazro-Korudag-Cungus-Maden-Ergani-Hezan-Elazig-Malatya area. *Geol. Soc. of Turkey.*, Sept.1979, 33 pp.
- Reinhold, C., 1998. Multiple episodes of dolomitization and dolomite recrystallization during shallow burial in Upper Jurassic shelf carbonates: eastern Swabian, south Germany. *Sediment. Geol.* 121, 71 – 95.

- Rigo De Righi, M. and Cortesini, A., 1964. Gravity tectonics in foothills structure belt of SE Turkey. *AAPG Bull.*, 48, 1596-1611.
- Rossinsky, V.J., Wanless, H.R., And Swart, P.K., 1986, Penetrative calcretes and their stratigraphic implications: *Geology*, 20, 331–334.
- Salih, N., Mansurbeg, H., Kolo, K., Pr at, A., 2019. Hydrothermal carbonate mineralization, calcretization, and microbial diagenesis associated with multiple sedimentary phases in the Upper Cretaceous Bekhme Formation, Kurdistan-Iraq. *Geosciences*. 9. DOI:10.3390/geosciences9110459.
- Sena, C.M., John, C.M., Jourdan, A.L., Vandeginste, V. & Manning, C., 2014. Dolomitization of lower cretaceous peritidal carbonates by modified seawater: constraints from clumped isotopic paleothermometry, elemental chemistry, and strontium isotopes. *Journal of Sedimentary Research*, 84, 552–566.
- Sheppard, S.M. and Schwarcz, H.P., 1970. Fractionation of carbon and oxygen isotopes and magnesium between coexisting calcite and dolomite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 26, 161.
- Sibley, D., Gregg, J., 1987. Classification of Dolomite Rock Texture. *Journal of sedimentary petrology*. 57. 967-975.
- Stolper, D.A., Eiler, J.M., 2015. The kinetics of solid state isotope-exchange reactions for clumped isotopes: a study of inorganic calcites and apatites from natural and experimental samples. *American Journal of Science*, 315, 363–411.
- Swart, P.K., 2015. The geochemistry of carbonate diagenesis: the past, present and future. *Sedimentology*, 62, 1233–1304.
- Swart, P.K., Cantrell, D.L., Arienzo, M.M. and Murray, S.T. ,2016. Evidence for high temperature and 18O-enriched fluids in the Arab-D of the Ghawar Field, Saudi Arabia. *Sedimentology*, 63, 1739–1752.
- Swart, P.K., James, N.P., Mallinson, D., Malone, M.J., Matsuda, H. and Simo, T. 2002. Data report: carbonate mineralogy of sites Drilled during Leg 182. In: *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results* (Eds Feary, D.A., Hine, A.C. and Malone, M.J.), 182. Ocean Drilling Program, College Station, TX.
- Swart, P.K., Cantrell, D.L., Westphal, H., Handford, C.R. and Kendall, C.G., 2005 Origin of dolomite in the Arab-D reservoir from the Ghawar field, Saudi Arabia: evidence from petrographic and geochemical constraints. *J. Sed. Res.*, 75, 476–491.
- Swart, P.K., Murray, S.T., Staudigel, P.T. and Hodell, D.A., 2019. Oxygen isotopic exchange between CO<sub>2</sub> and phosphoric acid: implications for the measurement of clumped isotopes in carbonates. *Geochem., Geophys. Geosyst.*, 20, 1–21.
- Vahrenkamp, V.C. and Swart, P.K., 1990). New distribution coefficient for the incorporation of strontium into dolomite and its implications for the formation of ancient dolomites. *Geology*, 18, 387–391.
- Vahrenkamp, V.C., and Swart, P.K. 1994, Late Cenozoic dolomites of the Bahamas: metastable analogues for the genesis of ancient platform dolomites, in Purser, B., Tucker, M., and Zenger, D., eds., *Dolomites: International Association of Sedimentologists, Special Publication 21*, p. 133–153.
- Vasconcelos, C., McKenzie, J.A., Warthmann, R. and Bernasconi, S.M., 2005. Calibration of the d18O paleothermometer for dolomite

- precipitated in microbial cultures and natural environments. *Geology*, 33, 317–320.
- Veillard, C., John, C., Krevor, S. and Najorka, J., 2019. Rock-buffered recrystallization of Marion Plateau dolomites at low temperature evidenced by clumped isotope thermometry and X-Ray diffraction analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 252. DOI: 10.1016/j.gca.2019.02.012.
- Veizer, J., Ala, D. et al. 1999. Sr-87/Sr-86, delta C-13 and delta O-18 evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161, 59–88.
- Veizer, J., Demovic, R., Strontium as a tool in facies analysis. *Journal of Sedimentary Research* 1974; 44 (1): 93–115. DOI: 10.1306/74D72991-2B21-11D7-8648000102C1865D
- Wacker, U., Fiebig, J., & Schoene, B. R., 2013. Clumped isotope analysis of carbonates: Comparison of two different acid digestion techniques. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 27(14), 1631–1642. DOI:10.1002/rcm.6609
- Warren, J., 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth Sci. Rev.* 52, 1–81.
- Winkelstern, I. Z., & Lohmann, K. C., 2016. Shallow burial alteration of dolomite and limestone clumped isotope geochemistry. *Geology*, 44(6), 467–470. DOI:10.1130/G37809.1
- Wygrala, B.P, 1989. Integrated Study of An Oil Field in the Southern Po Basin, Northern Italy, Zentralbibliothek und Kernforschungsanlage.
- Yılmaz, E. ve Duran, O., 1997, Güneydoğu Anadolu bölgesi otokton ve allohton birimler stratigrafi adlı sözlüğü "Lexicon": TPAO Araştırma Merkezi Eğitim Yayınları no. 12, 460s.
- Zenger, J.B. Dunham and Ethington R.L.,1980 pp. 87–110. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, OK.
- Zenger, D. H., 1981, Stratigraphy and petrology of the Little Falls dolostone (Upper Cambrian), east-central New York: Map and Chart series 34, New York State Museum, The University of the State of New York, The State Education Department, 138 p.
- Zheng Y.F.,1999. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochem. J.* 33, 109–126.



## Zonguldak Bartın civarında açılan bir kuyuda geçilen Kusuri Formasyonu kumtaşlarının rezervuar özellikleri

### *Reservoir characteristics of Kusuri Formation sandstones passing through a well in Zonguldak Bartın*

AYLİN GEÇER <sup>1</sup>, AYNUR GEÇER BÜYÜKUTKU <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 16 Nisan (April) 2022 Kabul (*accepted*): 04 Temmuz (July) 2022

#### Öz

Batı Karadeniz Bölgesi Zonguldak Bartın civarında açılan bir kuyuda geçilen Orta Eosen yaşlı Kusuri Formasyonu kumtaşlarının rezervuar özellikleri ve diyajenetik oluşumları karot ve kuyu logları ile çalışılmıştır. Bir sondaj kuyusundan alınan 30 kumtaşı karot örneğinin sedimentolojik ve sediment petrografik özellikleri belirlenmiştir. Kusuri Formasyonu kumtaşları %60 kuvars, %35 feldspat, %2 kayaç parçası, %8 kil ve karbonat bağlayıcı içeren arkozik arenitik kumtaşı sınıfındadır. Kumtaşları genel olarak ortaklas, plajiolklas, kuvars, epidot, klorit, sedimenter kayaç parçası (kuvarsit) ve opak minerallerden (pirit) oluşmuştur. Kusuri Formasyonu kumtaşlarında diyajenez sonucu oluşan illit, kaolinit, klorit, karışık tabakalı illit-simektit ve simektit türü otijenik kil mineralleri saptanmış olup, kumtaşı rezervuar kalitesini olumsuz olarak etkilemişlerdir. Bu çalışma Batı Karadeniz Bölgesi'nin Zonguldak Alt Havzası'nda Kusuri Formasyonu kumtaşlarının rezervuar özelliklerine yönelik yapılan ilk araştırma olmasından dolayı önem arz eder. Kusuri Formasyonu deltayık kumtaşlarının diyajenetik özellikleri, kil tipi ve yüzdeleri, gözeneklilik ve geçirimsizlik özellikleri incelenerek orta-iyi kalite bir rezervuar kaya oldukları saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Diyajenez, Hidrokarbon, Kuyu Logu, Otijenik Kil Mineralleri, Porozite ve Permeabilite, Rezervuar

#### ABSTRACT

*Reservoir properties of Middle Eocene aged Kusuri Formation sandstones and diagenetic formations in a well around Zonguldak-Bartın which located in the West Black Sea Region were determined by core and well logs. Thirty sandstone core samples taken from a well were investigated and sedimentological and sedimentary petrographic properties were determined. Kusuri Formation sandstones are arkosic arenitic sandstones containing 60% quartz, 35% feldspar, 2% rock fragments, 8% binders (clay and carbonate). Sandstones are generally composed of orthoclase, plagioclase, quartz, epidote, chlorite, sedimentary rock fragments (quartzite) and opaque minerals (pyrite). Illite, kaolinite, chlorite, mixed layered illite-smectite, and smectite authigenic clay minerals were determined in the sandstones of Kusuri Formation, and they negatively affected the reservoir character. This study is important because it is the first study conducted on the reservoir properties of the Kusuri Formation sandstones in the Zonguldak Sub-Basin in the Western Black Sea Region. The*

*diagenetic properties, clay type and percent, porosity and permeability properties of Kusuri Formation deltaic sandstones were examined in detail and it was revealed that they were a medium-good quality reservoir rock.*

**Keywords:** *Diagenesis, Hydrocarbon, Well Log, Authigenic Clay Minerals, Porosity and Permeability, Reservoir*

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1104425>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: butku@eng.ankara.edu.tr

## GİRİŞ

Petrol bir enerji kaynağı olup, endüstriyel büyümenin en önemli bileşenlerinden biridir. Ancak, keşfi ve kullanımı maliyetli ve riskli bir iştir. Yapısal, stratigrafik ve bileşik (yapısal + stratigrafik) olmak üzere üç tür petrol kapanı vardır. Yapısal kapanları keşfetmek ve delmek kolaydır, oysa stratigrafik ve bileşik kapanların belirlenmesi zordur. Bu tip kapanlarda hidrokarbon birikiminde lito-fasiyes önemli bir rol oynar (Morris, 1988; Serra ve Serra, 2003; Büyükutku vd., 2005, Büyükutku, 2020). Kuyulardan alınan radyoaktif-Gamma Ray (GR), sonik (DT) ve eğim logları (DIP) litofasiyeslerin yanıl ve düşey değışimlerini ve hidrokarbon birikimlerini belirlemede kullanılırlar. Bir petrol havzasında kuyu loglarıyla formasyonların litolojik ve sedimantolojik özellikleri belirlenerek kuru kuyuların açılmasının önüne geçilebilir (Patil, 2014; Geçer vd., 2019; Büyükutku ve Geçer, 2020). Büyükutku, 2020; Selley, 1975; Prior vd., 1981; Soegaard, 1991; Donselaar ve Schmidt, 2005; Kleinhans, 2005; Longhitano, 2008; Patil vd., 2017; Sun vd., 2017 makalelerinde sadece kuyu loglarından yararlanarak deltaların sedimantolojik özelliklerini belirlemişlerdir. Bu çalışmada da Kusuri formasyonu kumtaşlarının deltayik özellikleri kuyu loglarından yararlanılarak belirlenmiştir.

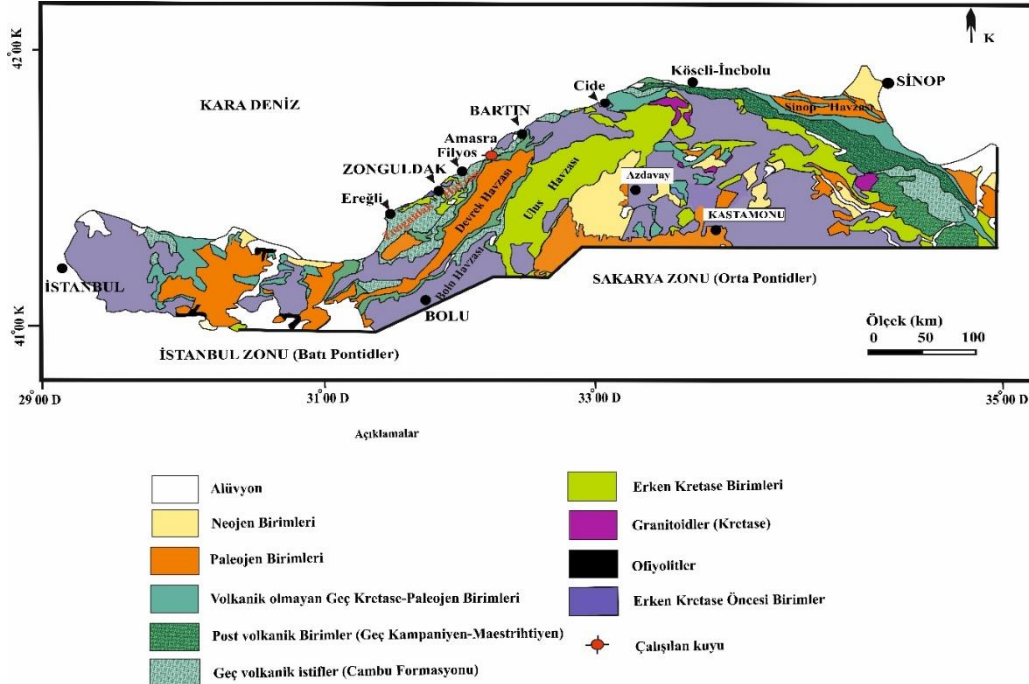
Çalışılan kuyu Bartın civarında 2007 yılında

açılmaya başlanmış bir kuyudur (Şekil 1). Bu çalışmada Zonguldak Bartın civarındaki Kusuri Formasyonu kumtaşlarının rezervuar özellikleri ve diyagenetik oluşumları karot ve kuyu logları gibi yeraltı verileri ile belirlenmiştir. Batı Karadeniz Havzası Türkiye'nin gaz üretilen bir kaç önemli havzasından biridir. Batı Karadeniz Havzası'nda ilk defa 2007 yılında doğal gaz keşfi yapılmıştır.

Havzada deltanın kanal kumtaşları hidrokarbon araştırmaları için ekonomik önem taşımaktadır (Korkmaz, 1984, Büyükutku, 2020). Dünyada Nijerya'da Nijer deltası, Meksika Körfezi'ndeki Mississippi deltası ve Venezuela'da Orinoco gibi deltalar iyi bilinen petrol üreten verimli sahalar olup, önemli stratigrafik petrol kapanlarını oluştururlar. Petrol ve doğal gaz açısından büyük ekonomik değere sahip olmalarına rağmen, literatürde deltalar üzerinde yapılan çalışmaların yeterli olmadığı görülmektedir. Oysaki dünyanın pekçok yerinde deltalardan hidrokarbon üretimi yapılmaktadır (Curry ve Curry, 1954; Hopkins, 1958; Busch, 1959, Fisher ve McGowen, 1969; May ve Stonecipher, 1990; Goddard ve Echols, 1993; Vandré vd., 2007; Acra vd., 2017).

Çalışmanın amacı Kusuri Formasyonu kumtaşlarının (1) dokusal ve mineralojik bileşimini belirlemek (2) kumtaşlarının petrofiziksel parametrelerini değerlendirmek (3) kil minerallerini ve onların rezervuar





**Şekil 1.** Çalışma alanının (Batı Karadeniz Bölgesi-Zonguldak Alt Havzası) jeoloji haritası (Tüysüz, 2011'den değiştirilmiştir)

**Figure 1.** Geological map of the study area (Western Black Sea Region-Zonguldak Sub-Basin) (modified from Tüysüz, 2011)

üzerindeki etkilerini saptamak (4) rezervuar kalitesini belirlemektir.

### MATERYAL VE METOD

Çalışma alanında açılan sondaj kuyusundan alınan karot numuneleri sedimantolojik ve petrografik olarak incelenmiştir. İnceleme kompozit kuyu logları Gamma Ray ve Sonik loglar kontrolünde yapılmıştır.

Batı Karadeniz Zonguldak Alt Havzası'nda Bartın civarında yer alan bir adet sondaj kuyusunda geçilen Orta Eosen yaşlı Kusuri Formasyonu kumtaşlarının hazne kaya özellikleri 30 adet sondaj karot numunesi ve kuyu logları kullanılarak belirlenmiştir. Kumtaşlarının hazne kaya özelliklerine yönelik analizler kumtaşı karotlarının petrografi tanımı, X-ışını kırınımı (XRD, Philips PW-1730), taramalı elektron mikroskop (SEM, Jeol JSM-

840A) ve enerji dağılım spektrometre (EDS, Tracor TN-5502) analizleridir. Petrografik ince kesitler üzerinde mineral türü, kil içeriği, diyajenetik özellikler, tane-gözenek-bağlayıcı ilişkisi, tane boyu, boylanma ve yuvarlaklık parametreleri optik mikroskopta belirlenmiştir.

Petrografik analizler 40 adet ince kesit üzerinde yapılmıştır. Kumtaşları Folk vd. (1970)'e göre sınıflandırılmışlardır.

İncelenen birimlerin mineralojik bileşim, kil tip ve yüzdesini belirlemek amacıyla X ışını difraksiyonu yöntemine dayalı yarı nicel kantitatif kil analizleri yapılmıştır.

Çalışılan örneklerin mineralojik bileşimleri ve detaylı kil analizleri Türkiye Petrollerinde (XRD) 10 adet numune üzerinde tüm kaya ve kil fraksiyonu çekimleri (normal, etilen glikollü ve

550°C ısıtılarak fırınlanmış olarak) yapılarak belirlenmiştir.

Elde edilen XRD'ler, difraktometreye bağlı olan bilgisayarda bulunan 'MDI Jade 7' yazılımında ve ICDD (International Centre for Diffraction Data)'nın ICSD (Inorganic Crystal Structure Database)

veri tabanına göre değerlendirilmiştir. XRD analizlerinden elde edilen otijenik kil minerali ve yüzdeleri kumtaşı hazne kaya kalitesini belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

Taramalı elektron mikroskop cihazı, enerji dağılım analiz cihazı ile birlikte kullanılarak numunelerin mikrodokusal özellikleri belirlenmiştir. SEM-EDS analizi ODTÜ Merkez Laboratuvarı'nda 10 adet karot numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Minerallerin morfolojik özelliklerini inceleyebilmek amacıyla SEM, kil minerallerinin nokta kimyasal bileşimini belirlemeye yönelik olarak da kantitatif element analizi EDS yapılmıştır.

Ayrıca kumtaşlarında mineral yüzdesini Model analiz metodu ile belirlemeye yönelik olarak 20 adet ince kesitte 300 nokta sayılmıştır. Kumtaşlarında tane boyu ölçüm analizleri için optik mikroskopta okuler mikrometre kullanılmıştır.

Kusuri Formasyonu kumtaşlarının hazne kaya kalitesini belirlemeye yönelik olarak yapılan porozite ve permeabilite analizleri kumtaşlarının dağılgan özelliklerinden dolayı porozimetre ve permametre cihazları ile silindirik karot numuneleri kullanılarak gerçekleştirilememiştir. Sadece Sonik loglar ile gerçekleştirilmiştir.

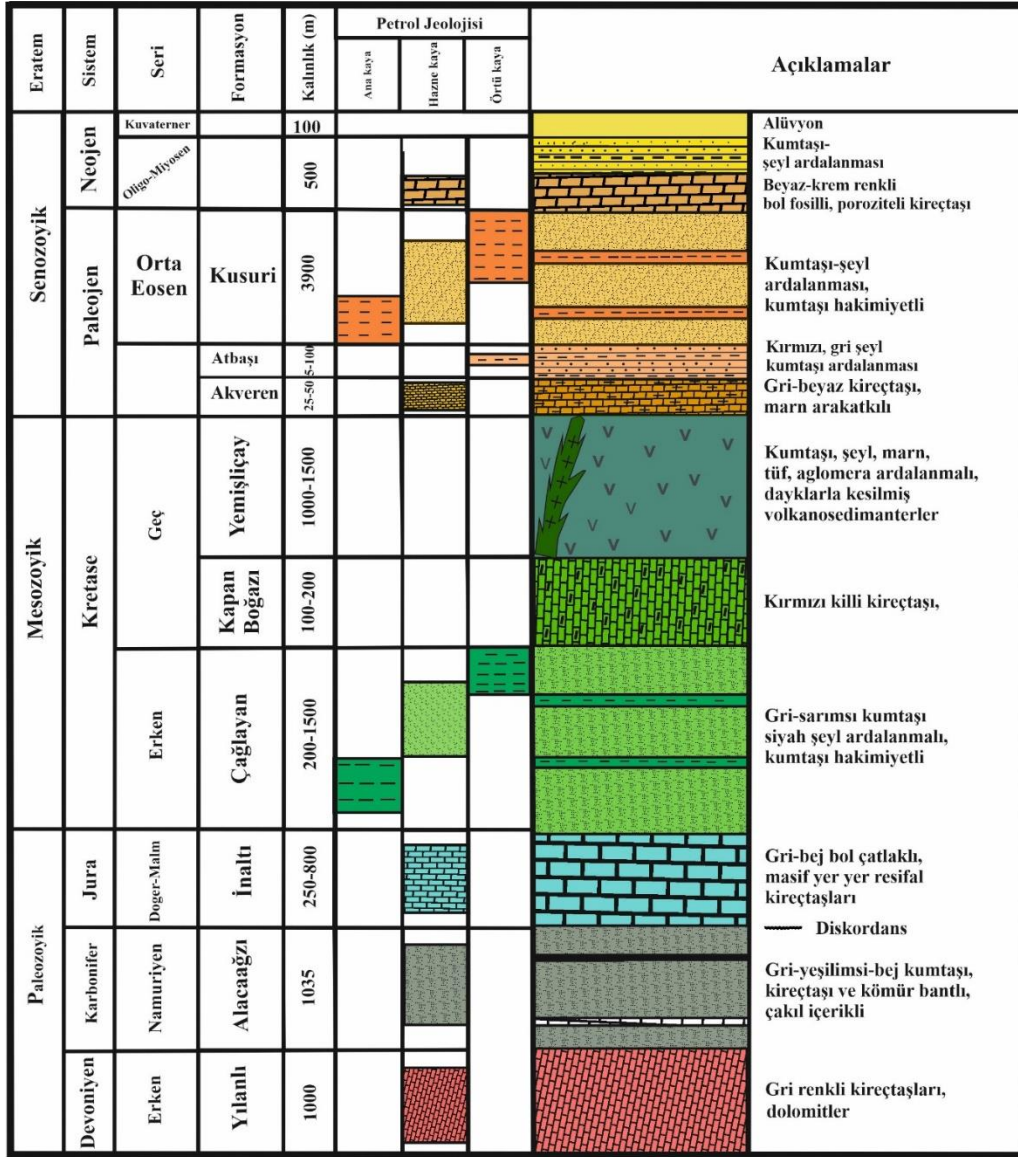
Kusuri Formasyonu kumtaşlarının litofasiyes değişimleri, sedimanter yapıları ve hazne kaya gözeneklilik ve geçirgenlik değerleri kuyu log yorumları ile belirlenmiştir. Bu yorumlamalar Gamma Ray (GR), Sonik (DT) ve eğim logları (DIP) kullanılarak Schlumberger (1989)'a göre yapılmıştır.

Detaylı bir şekilde yapılan analizler ile hazne kaya özelliğindeki Kusuri Formasyonu kumtaşlarının bileşimi, dokusu, otijenik kil mineralleri, çimentolanma türü, ikincil porozite gelişimi ve diyajenetik özellikleri saptanmıştır.

## **ZONGULDAK ALT HAVZASI'NIN JEOLJİSİ**

Batı Karadeniz Bölgesi jeolojik anlamda Türkiye'nin ana tektonik birliklerinden birini oluşturur. Bu birlik Ketin ve Gümüş (1962, 1963) tarafından güney Karadeniz dağ kuşağını kapsayacak biçimde "Pontidler" olarak isimlendirilmiş olup, daha sonraki çalışmalarda birliğe Batı Pontid (Şengör ve Yılmaz, 1981; Tüysüz, 1990), İstanbul Napı (Şengör vd., 1984), İstanbul Zonu (Okay, 1989) gibi isimler de verilmiştir. Batı Karadeniz Bölgesi batıda Çatalca civarından başlayarak, doğuda Azdavay doğusuna kadar yayılan, güneyde ise İntra-Pontid süturu (Şengör ve Yılmaz, 1981) ya da diğer adıyla Armutlu-Eskipazar zonu (Yiğitbaş ve Elmas, 1997) ve Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ile sınırlanmış bir alan olup, temelinde ise Paleozoyik yaşlı çökel topluluğu izlenir (Şekil 1).

Batı Karadeniz Bölgesinin en yaşlı Prekambriyen birimleri, İstanbul Paleozoyik istifinin altında yer almakta olup, Sünnice masifinde, Düzce kuzeyinde (Aydın vd., 1987) ve Araç İlçesi batısındaki Karadere'de yüzeylemektedir (Dean vd., 1997). Prekambriyen birimleri metamorfik kayalar ile özellikle Sünnice masifinde görülen ofiyolit ve granitlerden oluşmaktadır (Yiğitbaş ve Elmas, 1997). Batı Karadeniz Bölgesi'nde İstanbul zonunun Bolu-Akçakoca hattının doğusunda Orta ve Geç Jura-Erken Kretase 'de iki bölgesel transgresyon olmuştur. Kısa ömürlü Orta Jura transgresyonunun yayılımı oldukça sınırlı olup, karasal özellikte kırıntılı bir istifte sona ermektedir. İstanbul zonunda oluşan diğer transgresyon ise Bolu-Akçakoca hattının doğusunda Oksfordiyen-Berriazyen yaşlı



Ölçeksiz

Şekil 2. Çalışma alanının (Zonguldak Alt Havzası) stratigrafik kolon kesiti (Büyükutku, 2020)

Figure 2. Stratigraphic column section of the study area, Zonguldak Sub-Basin (Büyükutku, 2020)

yaygın bir platform karbonat istifinin gelişmesine neden olmuştur. Bolu havzasında Eosen yaşlı resifal karakterde kireçtaşlarının da oldukça geniş bir yayılım sundukları görülmüştür. Eosen resifal kireçtaşları havzada hidrokarbon potansiyeline sahip rezervuar kayaları oluşturmuşlardır (Buyukutku vd., 2005).

Batı Karadeniz Havzasında Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı birden fazla alt basen mevcuttur. Bunlar Zonguldak, Ulus, Devrek, Sinop ve Bolu alt havzalarıdır. Platform karbonatlarının çökmesinin ardından İstanbul zonu üzerinde iki büyük havza açılmıştır. Bunlar bugün birbirlerinden Devrek havzası ile ayrılan Zonguldak ve Ulus havzalarıdır (Derman, 2002). Batı Karadeniz'de Zonguldak havzası Ereğli, Bartın ile Amasra arasında Karadeniz'e paralel olarak uzanan bir alt havza özelliğindedir (Şekil 1). Kusuri formasyonu Zonguldak Havzası'nda ilk defa Ketin ve Gümüş (1962) tarafından Sinop-Ayancık dolayında gözlenmiş olup, gri-koyu gri şeyl, kumtaşı, marn, çamurtaşı, silttaşı, tüfit litolojilerinden oluşmuş olup türbiditik özelliktedir (Şekil 1,2). Gedik ve Korkmaz (1984) tarafından ölçülen tip kesitte Kusuri Formasyonu'nun kalınlığı 1460 m olarak ölçülmüştür. Araştırmacılar Kusuri Formasyonu'nun Cide yakınından başlayarak doğuya doğru geniş bir yayılım sunduğunu belirtmişlerdir.

Güneyde Devrek havzası Üst Kretase-Eosen birimleri tarafından örtülürken, doğuda Cide yükselimine kadar devam eder. Havza çökelleri Geç Barremiyen ve Senomaniyen arasında çökelmiş karbonat ve kırıntılı kayaçları içermektedir.

Batı Karadeniz Bölgesi'nde Turoniyen-Kampaniyen döneminde Güney Karadeniz kuşağını kaplayan yaygın bir magmatik yay gelişmiştir. Turoniyen-Santoniyen döneminde şiddetli bir volkanizma ve normal faylanma da

izlenmiştir. Bölgede Pelajik kireçtaşının gelişim evresini tanımlayan Görür vd. (1993) ve Tüysüz vd. (1989) aynı zamanda Karadeniz'de Erken Kretase'de başlayan gerilme rejimi sonucunda, iyice incelmış olan kıtasal kabuğun koparak, Batı Karadeniz havzası tabanında okyanusal yayılmanın başladığını da belirtmiştir. Batı Karadeniz Bölgesi'nde kuzey kuşakta Maastrichtiyen'de, volkanik istif üzerinde, derin denizel kalsitürbiditler çökelmiştir. Güney kuşakta ise Maastrichtiyen başında yükselerek su üstüne çıkan kalsitürbiditler, çok kısa bir süre sonunda tekrar transgresif olarak örtülmüşlerdir. Maastrichtiyen'deki bu yükselim olasılıkla İstanbul zonunun güneyindeki İntra-Pontid Okyanusu'nun kapanması ile ilişkilidir. Bölgede Maastrichtiyen transgresyonu güney ve batıda, Jura-Erken Kretase süresince aşınma alanı halinde kalan alanları da kaplamış ve varlığını Orta Eosen'e kadar sürdürmüştür. İstanbul ile Akçakoca arasındaki alanda Üst Kretase-Eosen çökelleri, Paleozoyik ve Triyas çökellerini ince bir örtü şeklinde transgresif olarak örtmektedir.

### STRATİGRAFI

Zonguldak-Bartın civarında Zonguldak ilinin kuzeydoğusunda yer alan 1 adet sondaj kuyusunda geçilen Orta Eosen yaşlı Kusuri Formasyonu kumtaşları çalışılmıştır (Şekil 1). Çalışma alanını içeren Zonguldak Alt Havzası stratigrafik kolon kesiti Şekil 2'de verilmiştir

Kusuri Formasyonu genel olarak hazne kaya özelliğine sahip, gözenekli kumtaşlarından oluşur. Çalışma alanında litolojik, petrografik ve kuyu log verileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Kusuri formasyonu bitki kalıntıları içeren laminalı şeyl-marn, gri- koyu gri- krem renkli, sert, çok ince-orta taneli kumtaşı, orta boyulanmalı, az oranda düz- köşeli taneli, çatlak poroziteli, kimi zaman çatlakları kalsit dolgulu, ve nadiren ince bantlar halinde tuf ve tüfit gibi

volkanik birimlerden oluşmuştur. Birim içerisinde magmatik, metamorfik ve sedimanter çakıltaşları izlenmiştir. Formasyonun kalınlığı 1500-3939 m'ler aralığında değişmektedir. Kusuri Formasyonu'na *Assilina sp.*, *Asterigerina retula Kaufmann*, *Discocyclus nummulitice Gumbel*, *Nummulites helveticus Kaufmann* fosilleri ile Orta Eosen yaşı verilmiştir (Albayrak, 1989).

Korkmaz (1984) Kusuri Formasyonu'nun tabanında yer alan kalın tabakalı deltayik kanal dolguları içeren kumtaşlarının iyi bir hazne kaya özelliği gösterdiğini söylerken, Albayrak (1989), Sonel vd. (1992) ise Formasyonun orta derece hazne kaya özelliği gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Kusuri Formasyonu kumtaşı çalışılan kuyuda Akveren Formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelmiştir. Akveren Formasyonu kalsitürbiditik karbonat kayaçları ve marndan oluşmakta olup, 5-100 m kalınlığa sahip bir birimdir. Kusuri Formasyonu türbiditik kumtaşı-şeyl ardalanması ile temsil edilir. Kusuri Formasyonu'nun üzerine Oligo-Miyosen yaşlı kumtaşı-şeyl ardalanmaları ve kireçtaşları gelmiştir. Kusuri Formasyonu kumtaşları kumtaşı-şeyl ardalanması göstermesi, yaygın tabaka altı yapıları, kaval yapıları, yük kalıpları ve Bouma istifinin çeşitli serilerini içermesi açısından türbiditik niteliklidir. İstifin alttan Te-Td iraksak serileriyle başlayıp, üste doğru Tc-Ta ile de yakınsak seriye geçtiği görülmüştür (Sunal, 1998).

## TARTIŞMA

### Kumtaşı Petrografisi

Kusuri Formasyonu kumtaşları genel olarak çok ince-ince, orta, kaba taneli kumtaşlarından oluşmakta olup, birimin petrografik özellikleri 30 adet karot örneği üzerinde çalışılmıştır ve tablo şeklinde özetlenmiştir (Tablo 1).

Petrografik analizler kumtaşı karot örneklerinden hazırlanan 40 adet ince kesit üzerinde optik mikroskop kullanılarak belirlenmiştir (Tablo 1). Kumtaşı mineralojisi ve tane boyu ölçümleri ise 20 adet ince kesit üzerinde 300 nokta sayılarak tanımlanmıştır.

Kusuri Formasyonu kumtaşları litoloji, doku, sedimanter yapı ve petrografik özelliklerine göre A, B ve C olmak üzere 3 litofasiyeye ayrılmıştır. Litofasiyes A kumtaşları orta-kaba tane boyuna sahip (0.4-0.6 mm), orta iyi boylanmalı, yarı yuvarlak-yarı köşeli taneler içerir. Litofasiyes B kumtaşları orta tane boyuna sahip (0.3 mm), orta boylanmalı olup, yarı yuvarlak taneler içerir. Litofasiyes C kumtaşları ise ince, çok ince tane boyuna (0.1-0.2 mm) sahip olup, rezervuar kaya özelliği sunmazlar.

Folk vd. (1970) sınıflamasına göre Kusuri Formasyonu kumtaşları arkozik arenitik kumtaşı sınıfındadır (Şekil 3). Kusuri Formasyonu kumtaşları %60 kuvars, %35 feldspat, %2 kayaç parçası, %8 kil ve karbonat bağlayıcı içerir. Kumtaşları genel olarak ortaklas, plajiyoklaz, kuvars, epidot, klorit, sedimanter kayaç parçası (kuvarsit) ve opak minerallerden (pirit) oluşmuştur.

Optik mikroskopta incelenen ince kesitler kuvars ve feldspat minerallerince zengindir. Plajiyoklaz ve ortoklaz olmak üzere iki çeşit feldspat minerali izlenmiştir. Plajiyoklazlar pijama ikizlenmesi gösterirken, ortoklaz minerallerinde yaygın olarak pertitleşme türü alterasyon gözlenmiştir. Pertitleşme potasyumlu feldspatların sodyumca zengin çözeltilerle zenginleşmeleri ile oluşmuştur. İnce kesit petrografisinde Kuvars mineralleri mono ve poli kuvars olarak iki türdür. Genel olarak incelenen kumtaşlarında mono kuvarslar hakimdir. Litofasiyes A kumtaşları orta-kaba tane boyuna sahip (0.4- 0.6 mm), orta-iyi boylanmalı, yarı yuvarlak-yarı köşeli taneler içerir (Şekil 4A). Kusuri Formasyonu

Litofasiyes B kumtaşları orta tane boyuna sahip (0.3 mm), orta boylanmalı, yarı yuvarlak tanelidir (Şekil 4B). Kuvars mineralleri temiz yüzeyli olup, dalgalı sönme gösterdikleri izlenmiştir. Petrografik kesitlerde yaygın olarak karbonat bağlayıcı izlenmiştir (Şekil 4A).

Feldspat minerallerinde yaygın olarak pertitleşme türü alterasyon izlenmiştir (Şekil 4A). Birimde taneler arası dokanak türü genelde

düz teğet, az oranda dış bükeydir. Kusuri Formasyonu Litofasiyes A kumtaşlarının orta-kaba tane boyları, tanelerin orta-iyi boylanma sunmalarının rezervuar kalitesini olumlu olarak etkiledikleri düşünülmektedir. Buna karşın taneler arası gözenekler kil ve karbonat bağlayıcı tarafından doldurulmuştur (Şekil 4A). Bu durumun kumtaşı rezervuar özelliklerini olumsuz yönde etkileyeceği kaçınılmazdır.

**Tablo 1.** Kusuri Formasyonu kumtaşlarının petrografik özellikleri I

*Table 1. Petrographic features of the Kusuri Formation sandstones I*

İnceleme Kuyusu Derinlik (m)	Kumtaşlarının Litolojisi	Kaya Sınıflaması	Boylanma	Yuvarlaklık
2095.00	İnce taneli (Litofasiyes C) kumtaşı	Arkoz	Orta	Yarı yuvarlak- yuvarlak
2115.20	Orta taneli (Litofasiyes B) kumtaşı	Arkoz	Orta	Yarı yuvarlak
2115.70	Orta-kaba taneli (Litofasiyes A) kumtaşı	Arkoz	Orta	Yarı yuvarlak
2115.80	Orta-kaba taneli (Litofasiyes A) kumtaşı	Arkoz	Kötü-orta	Yarı yuvarlak
2750.00	İnce taneli (Litofasiyes C) kumtaşı	Arkoz	Orta	Yarı yuvarlak- yuvarlak
2760.00	Orta taneli (Litofasiyes B) kumtaşı	Arkoz	Orta	Yarı yuvarlak- yarı köşeli



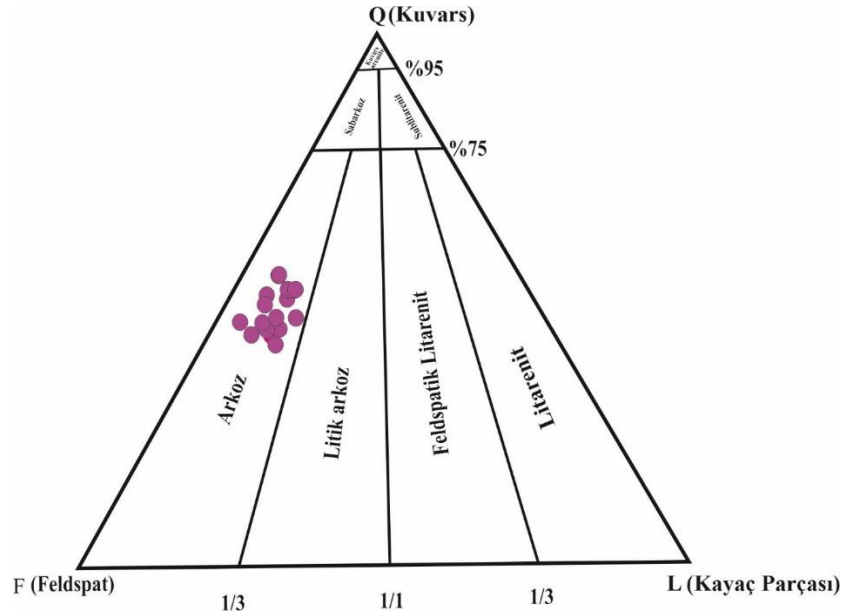
**Tablo 2.** Kusuri Formasyonu kumtaşlarının petrografik özellikleri II**Table 2.** Petrographic features of the Kusuri Formation sandstones II

İnceleme Kuyusu Derinlik (m)	Kuvars %	Feldspat %	Kayaç Parçası %	Matriks	Çimento	Gözenek Türü
2095.00	%35	%60 ortoklaz ve plajiyoklaz	Sedimenter %2	Karbonat	Erken kalsit	-
2115.20	%25	%60 ortoklaz	Sedimenter %2	Kil, karbonat	Erken kalsit	Çatlak
2115.70	%75	%20 ortoklaz ve plajiyoklaz	Sedimenter %2	Karbonat	Geç kalsit	Birincil, çatlak
2115.80	%25	%60 ortoklaz ve plajiyoklaz	-	Karbonat	Geç kalsit	Birincil ,çatlak
2750.00	%35	%60 ortoklaz ve plajiyoklaz	Sedimenter %2	Karbonat	Erken kalsit	-
2760.00	%30	%60 ortoklaz ve plajiyoklaz	Sedimenter %2	Kil (perritleşme) karbonat	Geç kalsit	Birincil çatlak

Litofasiyes B kumtaşları orta tane boyuna sahip, orta boylanmalı ve yarı yuvarlak taneler içeren arkoz türü kumtaşlarıdır (Şekil 4B). Plajiyoklaz (P) mineralleri pijama ikizlenmesi göstermektedirler. Kumtaşı petrografi kesitlerinde ayrıca karbonat minerallerinin gözeneği kapattığı izlenmiştir (Şekil 4A, B). Bu tür otijenik minerallerin gözeneği kapatarak

hazne kayayı olumsuz yönde etkileyebilecekleri düşünülmektedir.

Kusuri Formasyonu Litofasiyes C kumtaşları ince, çok ince taneli (0.1-0.2 mm), bol kil içerikli ve sık dokulu özelliğinden dolayı rezervuar kaya özelliği sunmazlar (Şekil 4C). Litofasiyes C kumtaşlarında yaygın olarak organik madde sıvımaları izlenmiştir (Şekil 4D)



Şekil 3. Kusuri Formasyonu kumtaşı sınıflaması (Folk vd., 1970)

Figure 3. Sandstone classification of the Kusuri Formation (Folk et al., 1970)

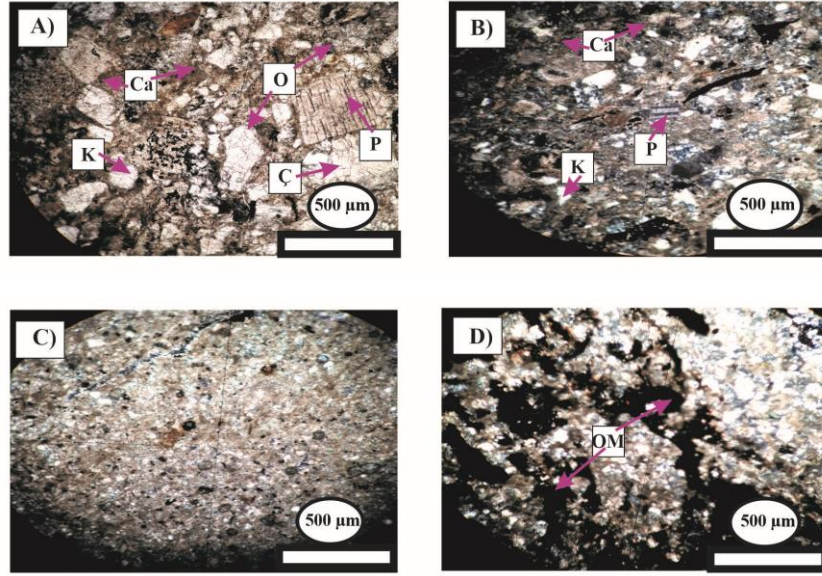
#### Taramalı Elektron Mikroskop ve X-Işınları Difraktometre Analizleri

Kusuri Formasyonu kumtaşlarında 0.1  $\mu\text{m}$  kalınlığında iğnemi yada lif şeklinde gözeneği kapatan %6-16 oranında illit mineralleri (Şekil 5A), kitapçıklar şeklinde %32-50 oranında kaolinit mineralleri izlenmiştir (Şekil 5B). Pirit mineralleri belirlenmiştir (Şekil 6A). 0.1  $\mu\text{m}$  kalınlığında gözeneği kapatan levhamsı %8-24 oranında simektit-illit (Şekil 6B) mineralleri izlenmiştir. X- ışınları difraksiyonu analizlerinde %8-14 oranında izlenen klorit mineralleri Taramalı Elektron Mikroskop fotoğraflarında izlenmemiştir. Kusuri Formasyonu XRD ve SEM sonuçları tablo şeklinde verilmiştir (Tablo 3)

Elektron mikroskop analizlerinde kumtaşlarının birincil gözenek boşluklarının otijenik killerle kapatıldıkları izlenmiştir. Otijenik kil minerallerinin Kusuri Formasyonu kumtaşlarının porozite ve permeabilitesini azalttıkları düşünülmektedir.

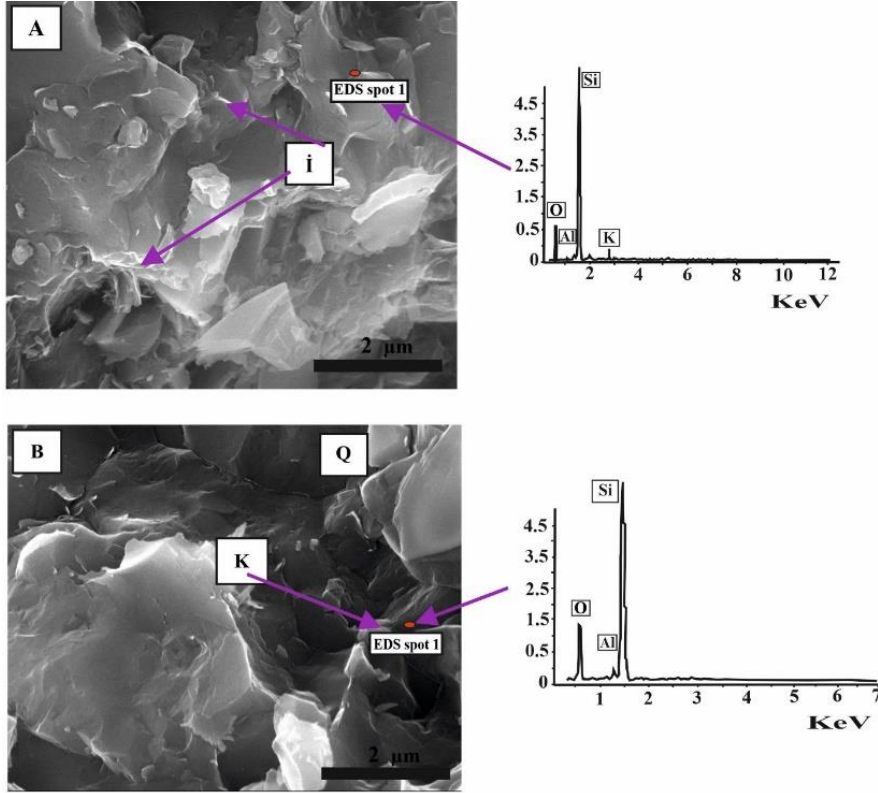
#### Diyajenetik Tarihçe

Kusuri Formasyonu kumtaşları erken kalsit çimento, feldspat, klorit, simektit (montmorillonit), karışık tabakalı illit-simektit, illit, kuvars (silis) büyümesi, ikincil kırık ve çatlak gözenekliliği şeklinde bir diyajenetik sekans içerir (Şekil 7). Bu dizilim petrografik, taramalı elektron mikroskop ve X-ışınları difraktometre (XRD) analizlerine dayalı olarak hazırlanmıştır.



**Şekil 4.** Kusuri Formasyonu kumtaşlarının mikrofotografaları. A) Kusuri Litofasiyes A kumtaşları orta-kaba tane boyuna sahip olup, orta-iyi boylanma özelliği göstermektedir. Birim yarı yuvarlak–yarı köşeli taneler içeren arkozik kumtaşıdır. Birimde taneler arası dokanak türü genelde düz teğet, az oranda dış bükeydir. Fotoğrafta Kuvars (K) ve ortoklaz (O) ve plajiyoklaz (P) mineralleri, çatlak (Ç) ve karbonat bağlayıcı (Ca, erken kalsit çimento) izlenmektedir. Feldspat minerali üzerinde Pertitlesme türü alterasyon izlenmektedir. Karbonat (Ca) mineralinin gözeneği kapattığı görülmektedir. Karot no:2. Derinlik: 2115.20 m B) Litofasiyes B kumtaşları orta tane boyuna sahip, orta boylanmalı, yarı yuvarlak taneler içerir. Fotoğrafta Kuvars (K), plajiyoklaz mineralleri (P) ve karbonat bağlayıcı (Ca, erken kalsit çimento) izlenmektedir. Plajiyoklaz mineralleri (P) pijama ikizlenmesi göstermektedir. Karot no:2. Derinlik: 2115.70 m. C) Litofasiyes C kumtaşları ise ince, çok ince tane boyuna sahiptir. Karot no:1. Derinlik: 2095.00 m D) Fotoğrafta stilolitlerin organik madde (OM) ile kapatıldıkları izlenmektedir. Karot no:3. Derinlik: 2115.90 m. Ölçek:1 cm 500 µm. Çift nikol

**Figure 4.** Microphotographs of the Kusuri Formation sandstones. A) Kusuri Lithofacies A sandstones have medium-coarse grain size and show medium-well sorting. The unit is arcose sandstone containing semi-rounded-semi-angular grains. The type of intergranular contact in the unit is generally straight tangential and slightly convex. Quartz (K), orthoclase (O), plagioclase (P) minerals, fissure (Ç), carbonate binder (Ca, early calcite cement) are observed in the photograph. Pertitization type alteration is observed on the feldspar mineral. It is seen that the carbonate (Ca) mineral closes the pore. Core number: 2. Depth: 2115.20 m B) Lithofacies B sandstones contain medium-sized, medium sorting semi-round grains. Quartz (K), plagioclase minerals (P) and carbonate binder (Ca, early calcite cement) are observed in the photograph. Plagioclase minerals (P) show pajama twinning. Core number: 2. Depth: 2115.70 m. C) Lithofacies C sandstones have a fine, very fine grain size. Core number: 1. Depth: 2095.00 m D) In the photograph, it is observed that the stylolites are covered with organic matter (OM). Core number: 3. Depth: 2115.90 m. Scale: 1 cm 500 µm. Double nicol



**Şekil 5.** K Kusuri formasyonu SEM mikrofotografı. A) Fotoğrafta diyajenetik illit mineralleri (i) iğnemsî şekilde izlenmektedir. EDS grafiğinde K piki hakimdir. Karot no:2. Derinlik: 2115.20 m. B) Kuvars mineralinin (Q) altında kitapçıklar şeklinde gözenek dolgulayıcı kaolinit mineralleri (K) izlenmektedir. EDS grafiğinde Al, Si ve O piklerinin hakim olduğu izlenmektedir. Karot no:2. Derinlik: 2115.20 m

**Figure 5.** SEM microphotographs of Kusuri formation. A) In the photograph, diagenetic illite minerals (i) are observed in an acicular form. The K peak is dominant in the EDS graph. Core number: 2. Depth: 2115.20 m. B) Pore-filling kaolinite minerals (K) are observed in the form of booklets under the quartz mineral (Q). In the EDS graph, it is observed that Al, Si and O peaks are dominant. Core number: 2. Depth: 2115.20 m

Bir kumtaşı rezervuarında şeyllerden kumtaşına geçen gözenek sıvıları diyajenezî şekillendirir ve otijenik mineraller (kalsit, kaolinit, simektit, illit vb.) oluştururlar.

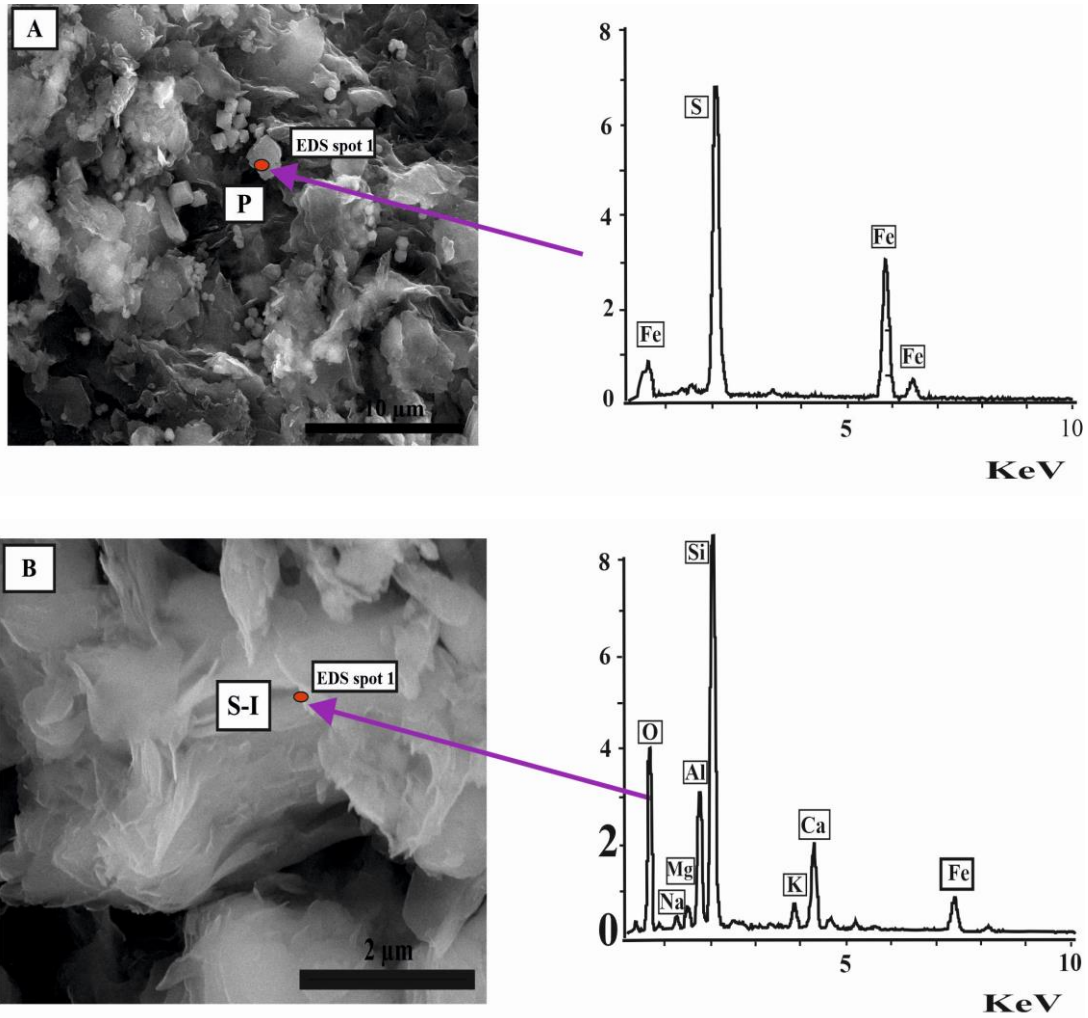
Petrografik kesitlerde erken kalsit çimento yaygın olarak izlenmiştir (Şekil 4 A, B). Kusuri Formasyonu kumtaşlarında ikincil gözeneklilik kırık ve çatlak etkisiyledir (Şekil 4A) Birimde klorit %8-14, illit %6-16, kaolinit %32-50,

karışık tabakalı simektit-illit %8-24 ve simektit (montmorillonit) %12-38 türü kil mineralleri izlenmiş olup, incelenen kumtaşı rezervuarının porozite ve permeabilitesini azaltarak, rezervuar kalitesini olumsuz olarak etkilemişlerdir.

Kaolinit mineralleri XRD analizlerinde oldukça yaygın (%32-50) olup, SEM fotoğraflarında gözenek dolgulayıcı olarak izlenmişlerdir (Şekil

5B). Kaolinit minerallerinin Kusuri Formasyonu kumtaşlarında poroziteyi azaltan major bir mineral olduğu açıkça görülmüştür. Kusuri Formasyonu kumtaşlarında kalsit ve kil

bağlayıcının rezervuarın gözeneklilik ve geçirimlilik gibi petrofiziksel parametrelerini negatif olarak etkiledikleri düşünülmektedir.



**Şekil 6.** Kusuri formasyonu SEM mikrofotografaları. A) Fotoğrafta Pirit (P) mineralleri izlenmektedir. EDS grafiğinde Fe ve S pikleri hakimdir. Karot no:4, Derinlik: 2120.00 m. B) Illit-Simektit türü kil mineralleri görülmektedir. EDS grafiğinde Na, Mg pikleri hakimdir. Karot no:3, Derinlik: 2115.90 m

**Figure 6.** SEM microphotos of Kusuri formation. A) Pyrite minerals are observed in the photograph. Fe and S peaks are dominant in the EDS graph. Core no:4, Depth: 2120.00 m. B) Illite-Smectite type clay minerals are observed. Na, Mg peaks are dominant in the EDS graph. Core no:3, Depth: 2115.90 m

**Log Yorumu**

Kuyu logları yeraltında geçilen kayaçların petrofiziksel parametrelerini derinliğin fonksiyonu olarak gösteren sondaj kuyulardan alınan grafikler olup, havzanın sedimentolojik modellemesinde kullanılan oldukça güvenilir ve doğru bir tekniktir (Schlumberger, 1989)

Petrol araştırmalarında eğim logları yorumlanarak, bir kuyuda geçilen kayaçların sedimanter özellikleri belirlenebilmektedir (Schlumberger, 1989). Eğim logları sondaj kuyularında derinliğe bağlı olarak değişen toplu iğne şeklindeki sembollerle gösterilirler. Toplu iğne şeklindeki sembolün ucu eğimin yönünü gösterirken, toplu iğnenin daire şeklindeki baş kısmı eğimin miktarını veya açısını verir.

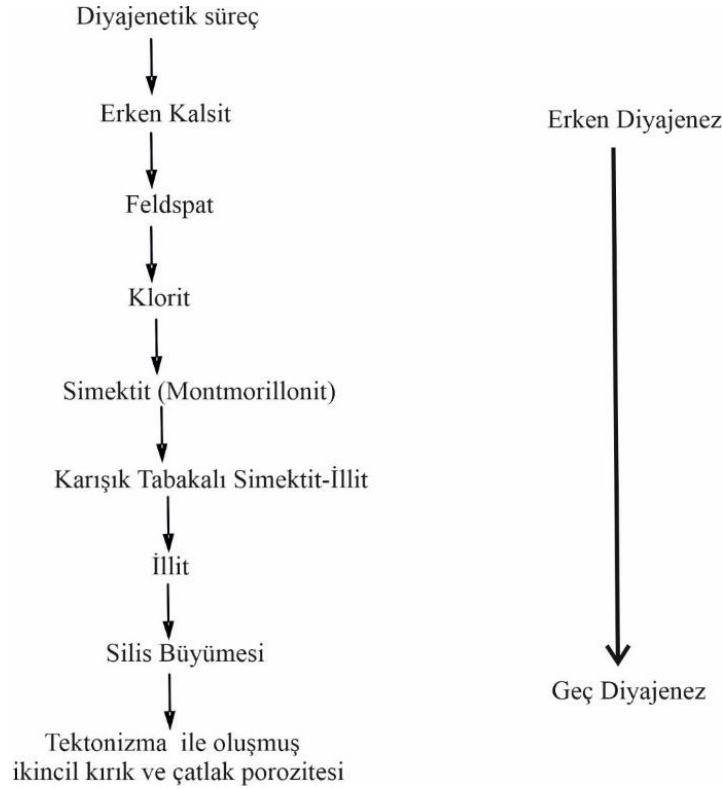
Sembolün sağa doğru yer değiştirmesi eğim açısının büyüklüğünü temsil eder.

Eğim loglarında çeşitli semboller kırmızı, yeşil sarı veya mavi renk ile adlandırılırlar. Kırmızı motifte derinliğe bağlı olarak eğim miktarı artar ve delta kanallarına işaret eder. Mavi motifte eğim miktarı derinliğe bağlı olarak azalır ve delta önü akıntı ile oluşmuş tabakaları işaret eder. Aynı zamanda delta kanallarının aksel bölümünü de gösterirler. Sarı motifte her yöne eğimli olarak izlenen karışık motifler yüksek enerjili hızlı kütle akmalarına ve deltanın yakınsak (proksimal) bölümüne işaret ederler. Yeşil motiflerde ise eğim miktarı değişmez, delta ilerisi gibi düşük enerjili ortamı işaret eder (Schlumberger, 1989'a göre, Şekil 8).

**Tablo 3.** İnceleme kuyusunda Kusuri Formasyonu kumtaşlarının XRD ve SEM sonuçları

*Table 3. XRD and SEM results of the Kusuri Formation in the investigation well*

Örnek No, Karot No	XRD Analizleri Sonucunda Tespit Edilen Mineraller	SEM Analizleri Sonucunda Tespit Edilen Mineraller
Örnek 1, Karot 1, Litofasiyes C	Kuars, kalsit, feldspat, epidot, pirit, illit, klorit, karışık tabakalı illit-smektit, smektit grubu kil mineralleri	-
Örnek 2, Karot 2, Litofasiyes A	Kuars, kalsit, feldspat, kaolinit, illit, klorit, karışık tabakalı illit-smektit, smektit (montmorillonit)	Kaolinit, illit
Örnek 3, Karot 3, Litofasiyes C	Kuars, kalsit, epidot, pirit, feldspat, karışık tabakalı illit-smektit, smektit (montmorillonit)	Karışık tabakalı illit-smektit
Örnek 4, Karot 4, Litofasiyes B	Kuars, kalsit, feldspat, pirit, kaolinit	Pirit
Örnek 6, Karot 6, Litofasiyes C	Kuars, kalsit, feldspat, kaolinit, klorit	-
Örnek 7, Karot 7, Litofasiyes B	Kuars, kalsit, feldspat, kaolinit, klorit	-



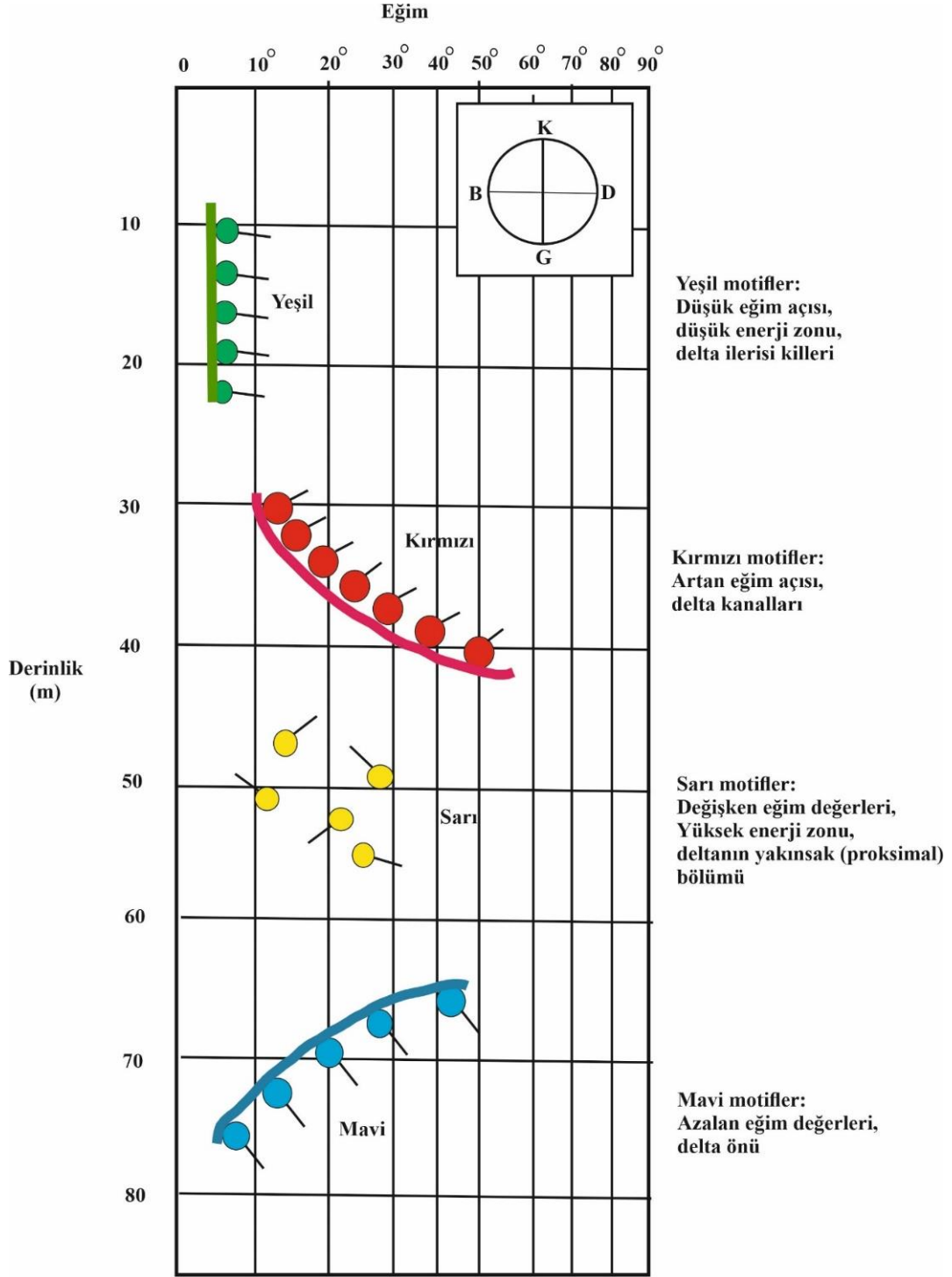
**Şekil 7.** Kusuri Formasyonu kumtaşlarının diyajenetik sekansı

**Figure 7.** The diagenetic sequence of the Kusuri Formation sandstones

İnceleme kuyusunun 2050-2100. m ler aralığında sarı motifler izlenmekte olup, bu durum sedimanın türbülanslı akıntılarla taşındığını gösterirken hızlı kütle akmalarına işaret eder ve deltanın yakınsak tortullarını gösterir (Schlumberger, 1989' a göre). 2125 ile 2225. m ler aralığında mavi motifler eğim miktarlarının derinliğe bağlı olarak azaldığını ve delta önü akıntı ile oluşmuş tabakaları gösterirler. Mavi motifler delta kanallarının eksenal bölümüne de işaret ederler. Buna bağlı olarak delta önü kumtaşları dağılım kanallarının ilerleme evresini ve kanaldaki akıntının yönünü gösterirler (Şekil 9). Kırmızı motifler log üzerinde izlenmemiştir.

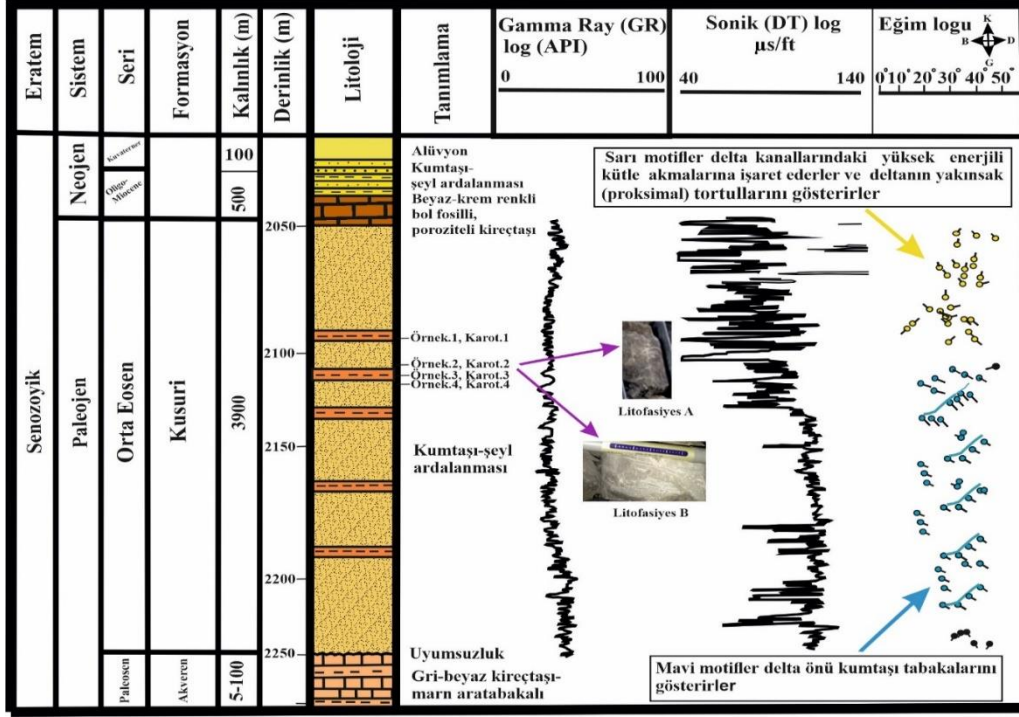
İnceleme kuyusunda Kusuri Formasyonu kumtaşlarında 2050. m seviyesine doğru Sonik logun aşırı pik yapması kumtaşı porozite değerinin yüksek olduğunu gösterir. Gamma Ray logunun genel olarak 10-20 API gibi düşük değerleri, kil oranının azlığını ve Kusuri Formasyonu kumtaşlarının temiz hazne kaya özelliği sunduklarını gösterir (Şekil 9). İnceleme kuyusunda diplog ölçümlerinde, 2600-2725. m ler aralığında delta ilerisi şeyilli birimlerinde eğim logu ile elde edilen miktar 10-15° veya daha fazla, 2725-2775. m ler aralığında delta önü kumtaşlarında izlenen maksimum eğim açısı 35-40° olarak izlenmiştir (Şekil 10).





**Şekil 8.** Eğim log motifleri (Schlumberger, 1989)

**Figure 8.** Dip log motifs (Schlumberger, 1989)



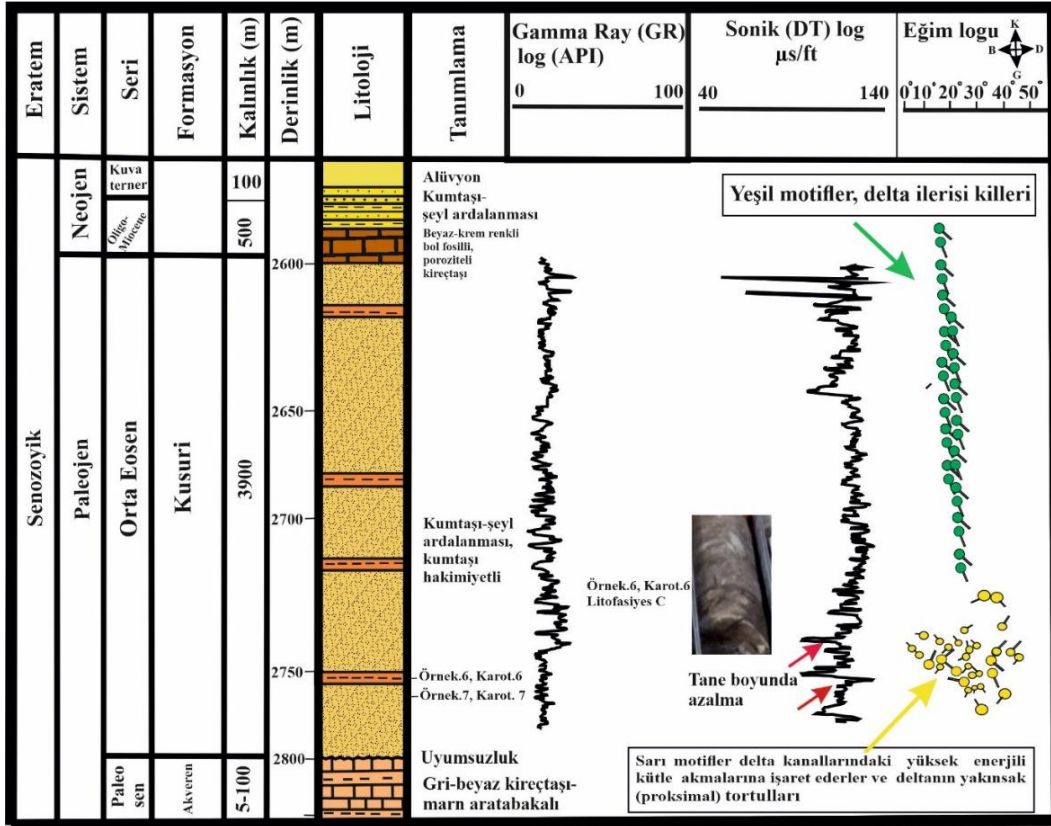
Şekil 9. Kuyu log tekniği ile belirlenen delta bölümleri (Schlumberger, 1989)

Figure 9. Determination of delta sections using the well log technique (according to Schlumberger, 1989)

Kuyu log metoduna göre Kusuri Formasyonu kumtaşları Orta Eosen esnasında Batı Karadeniz Bölgesi Zonguldak Alt Havzasında oluşmuş bir delta olarak yorumlanabilir. Deltaların karakteristik özellikleri kumtaşı karotlarında maalesef çok iyi izlenememiştir. Bu nedenle delta bölümleri kuyu log tekniği ile belirlenmiştir. Korkmaz (1984) Kusuri Formasyonu'nun tabanında yer alan kalın katmanlı ve kanal dolguları içeren delta kumtaşlarının iyi bir hazne kaya özelliği gösterdiğini söylemiştir. Daha önceki çalışmalarla da (Korkmaz, 1984; Albayrak, 1989; Sonel vd.,1992; Büyüktutku, 2020)

karşılaştırıldığında Zonguldak Alt Havzası'nda Kusuri Formasyonu kumtaşlarının bir delta ortamında depolanmış olabileceği ve delta kumtaşlarının önemli petrol rezervuarları oluşturdukları düşünülmüştür.

Kusuri Formasyonu kumtaşlarının porozitesi çalışılan kuyudan alınan sonik logdan elde edilmiştir (Şekil 11). Poroziteler Schlumberger (1986)'ya göre DT ses sinyallerinin geçiş süresi (mikro s/ft= mikro s/0.3048 m) ve porozite ( $\emptyset$ ) grafiğinden belirlenmiştir. Kumtaşlarının Sonik logundan elde edilen ortalama porozite değerleri %20-50 aralığındadır (Şekil 11).



Şekil 10. Kuyu log tekniği ile belirlenen delta bölümleri (Schlumberger, 1989'a göre)

Figure 10 Determination of delta sections using the well log technique (according to Schlumberger, 1989)

Kusuri Formasyonu kumtaşlarının şeyl hacmi ( $V_{sh}$ ) eşitlik (1)'den yararlanarak Schlumberger (1996)'a göre hesaplanmıştır.

$$V_{sh} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (1)$$

$GR_{log}$ = Killi kumtaşının Gamma Ray Log değeri;  $GR_{min}$ = Temiz kumtaşı zonu için en düşük Gamma Ray Log değeri ve  $GR_{max}$ = Killi zon için en yüksek Gamma Ray Log değeridir.

Formasyonun efektif porozite değeri eşitlik (3)'den yararlanarak Schlumberger (1996)'a göre hesaplanmıştır.

$$\phi_{ef} = DT_{cor} \quad (2)$$

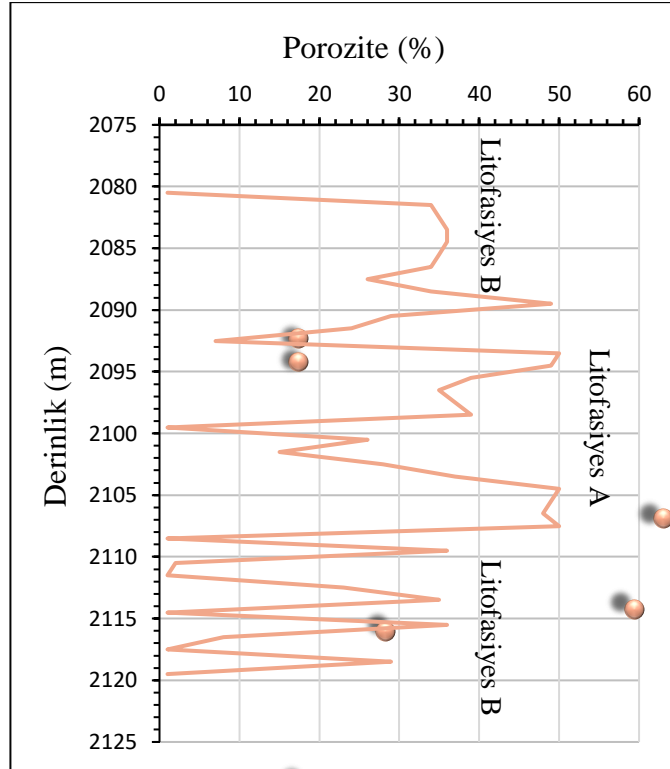
$$DT_{cor} = DT - \frac{V_{sh} * DT_{sh}}{1 - V_{sh}} \quad (3)$$

Eşitlikte  $DT_{cor}$  = Killi kumtaşı için düzeltilmiş Sonik Log değeri;  $DT$ =Sonic Log değeri;  $V_{sh}$ =Kil hacmi;  $DT_{sh}$ =Killi kumtaşı zonu için en yüksek Sonik Log değeri.

İndirgenemez su doygunluğu değeri kullanılarak eşitlik (4)'e (Timur, 1968) göre Kusuri Formasyonu kumtaşlarının permeabilite ( $K$ ) değeri hesaplanmıştır (Şekil 12).

$$K(mD) = 0.136 \frac{\phi_{ef}^{4.4}}{S_w^2} \quad (4)$$

Formülde  $K$ : Permeabilite,  $\phi_{ef}$ : Etkif (etkili) porozite ve  $S_w$ :indirgenemez su doygunluğudur.



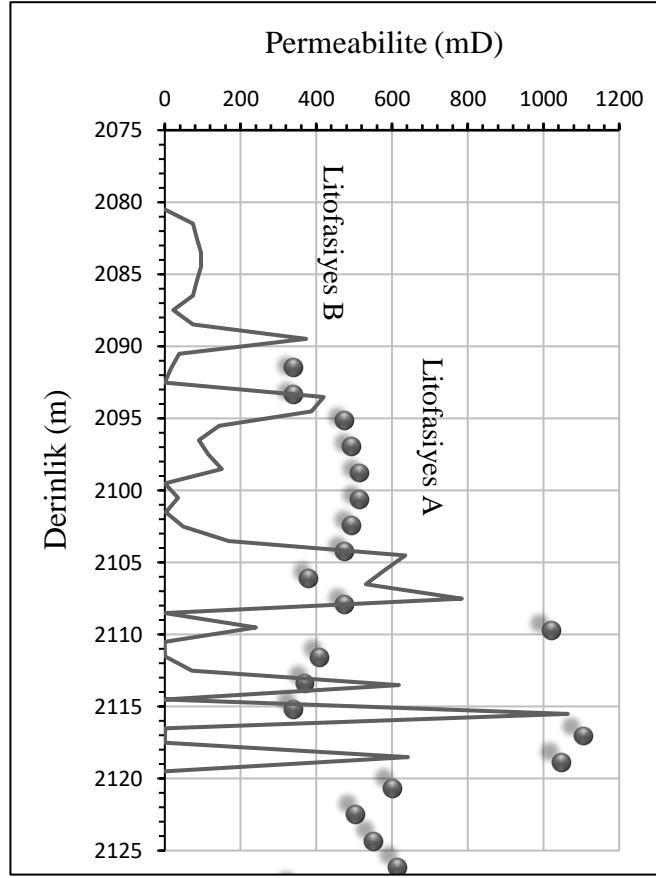
Şekil 11. Kusuri Formasyonu kumtaşlarının derinlik-porozite grafiği

Figure 11. Depth-porosity graph of the Kusuri Formation sandstones

### KUSURİ FORMASYONU KUMTAŞLARININ REZERVUAR ÖZELLİKLERİ

Kusuri Formasyonu Litofasiyes C kumtaşları çok ince taneli, kötü boylanmalı olup, bol kil içeriğinden dolayı rezervuar kaya özelliği sunmazlar. Litofasiyes A ve B kumtaşlarında birincil taneler arası, ikincil kırık ve çatlak

porozitesi hakimdir. Buna bağlı olarak Litofasiyes A ve B kumtaşlarının iyi birer hazne kaya özelliği sundukları düşünülmüştür. Erken kalsit çimento birincil poroziteyi kumtaşı gözeneklerini kapatarak azaltmasına rağmen, geç diyajenetik safhada tektonik etki ile oluşmuş ikincil kırık ve çatlak porozitesi rezervuar kalitesini artırmıştır.



**Şekil 12.** Kusuri Formasyonu kumtaşlarının derinlik-permeabilite grafiği.

**Figure 12.** Depth-permeability graph of the sandstones of the Kusuri Formation.

Kusuri Formasyonu kumtaşlarında porozite değerleri Litofasiyes A kumtaşları için %35 ve 50, Litofasiyes B kumtaşları için ise %20-35 aralığındadır (Şekil 11). Benzer şekilde permeabilite değerleri Litofasiyes A kumtaşları için 400-660 mD, Litofasiyes B kumtaşları için ise 100-400 mD aralığında değişmektedir (Şekil 12). Kusuri Formasyonu kumtaşlarının Levorsen (1967) porozite permeabilite sınıflamasına göre, litoloji, doku ve petrografik özellikler de dikkate alındığında orta-iyi kalitede rezervuar kayalar olduğu söylenebilir.

Gözenek dolgusu otijenik killerin ve erken kalsit çimentonun porozite ve permeabiliteyi azalttığı görülmüştür. Petrografik ve SEM fotoğrafları bu durumu doğrulamaktadır. Sonuç olarak Litofasiyes A ve B kumtaşları Litofasiyes C'ye göre daha kaba taneli ve daha az diyajenetik kil ve karbonat bağlayıcı içermesinden dolayı rezervuar kaya potansiyeline sahiptirler.

#### **SONUÇ**

Kusuri Formasyonu kumtaşları Folk vd. (1970) sınıflamasına göre arkozik arenittir.

Kusuri Formasyonu kumtaşlarının kuyu log verilerine göre ve önceki çalışmalarla da karşılaştırıldığında bir delta ortamında çökeldiği düşünülmüştür.

Kusuri Formasyonu kumtaşları sedimantolojik ve sedimenter petrografik özelliklerine göre Litofasiyes A, B ve C olmak üzere üçe ayrılmıştır. Litofasiyes A ve B kumtaşları kaba tane boyu, daha az kil ve karbonat bağlayıcı içerikleri, daha geniş gözenek çapına sahip olmaları nedeniyle orta- iyi bir rezervuar kalitesi sunarlar. Litofasiyes C kumtaşları çok ince tane boyu, küçük gözenek çapı ve bol kil içeriğinden dolayı çok kötü rezervuar özelliğine sahiptir.

Kusuri Formasyonu kumtaşları erken kalsit çimento, feldspat, klorit, simektit (montmorillonit), karışık tabakalı illit-simektit, illit, kuvars (silis) büyümesi ve ikincil kırık ve çatlak gözenekliliği şeklinde bir diyajenetik sekans sunarlar.

Kusuri Formasyonu kumtaşlarının efektif porozite değeri Litofasiyes A kumtaşları için %35-50 ve Litofasiyes B kumtaşları için ise %20-35 dir. Benzer şekilde ortalama permeabilite değerleri Litofasiyes A kumtaşları için 400-660 mD ve Litofasiyes B kumtaşları için ise 100-400 mD arasında değişmektedir. Kusuri Formasyonu kumtaşları Levorsen (1967) porozite permeabilite sınıflamasına göre, litoloji, doku ve petrografik özellikler de dikkate alındığında orta-iyi kalitede rezervuar kayaç özelliği sunmaktadırlar.

Kusuri Formasyonu kumtaşlarının porozite ve permeabilitesi gözenek dolgusu diyajenetik killer ve erken kalsit çimento tarafından kontrol edilmektedir. Diyajenetik kil ve erken karbonat çimentonun kumtaşı porozite ve permeabilitesini azalttıkları görülmüştür.

Kusuri formasyonu kumtaşlarında petrografik kesitlerde izlenen taneler arası ve özellikle kırık çatlak porozitesi hazne kaya gözenekliliğini artırırken, XRD ve SEM analizlerinde izlenen

illit, kaolinit, klorit, karışık tabakalı illit-simektit ve simektit (montmorillonit) türü otijenik kil mineralleri, rezervuar karakterini olumsuz olarak etkilemişlerdir. Kil mineralleri hazne (rezervuar) kayanın gözenekliliğini ve permeabilitesini azaltmıştır.

#### KATKI BELİRTME

Yazarlar Petrol ve Maden İşleri Genel Müdürlüğüne, TPAO'ya çalışma izni verdiği için ve Ankara Üniversitesi Bilimsel Proje Müdürlüğüne proje desteği nedeniyle teşekkür etmektedir. Analizlerin büyük bir kısmı yazarlar tarafından finanse edilmiştir. Son olarak, yazarlar makalenin son haline gelmesi için yapıcı eleştirilerde bulunan dergi hakemlerine ve editörlerine teşekkür etmektedir.

#### KAYNAKLAR

- Acra, E.J., Ogbonna-Orji, O.C., Adiola, U.P., 2017. Evaluation of hydrocarbon viability and production in Niger delta basin, Nigeria. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(4), 290-298.
- Albayrak, M. 1989. Büyük (Boyabat-Sinop) Civarının Petrol Olanakları. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, Ankara
- Aydın, M., Serdar, H. S., Şahintürk, Ö., Yazman, M., Çokuğraş, R., Demir, O., Özçelik, Y., 1987. Çamdağ (Sakarya - Sünnicedağ (Bolu) yöresinin jeolojisi.TJK Bült., 30, 1-14.
- Busch, D. A., 1959. Prospecting for stratigraphic traps. *Amer. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, 43, 2829-2843.
- Büyüktku, A. G., Sarı, A., Karaçam, A., 2005. The reservoir potential of the Eocene carbonates, in the Bolu Basin, west of Turkey. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 49, 79-91.
- Büyüktku, A., Geçer, A., 2020. Trakya havzası kuzeybatısında Hamitabat

- formasyonu denizaltı yelpaze kumtaşlarının rezervuar potansiyeli. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(1), 174-189.
- Büyükutku, A., 2020. Ereğli Amasra civarında açılan iki kuyuda geçilen Çağlayan formasyonu kumtaşlarının diyajenezi ve rezervuar özellikleri, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri. 1-36.
- Curry, W. H., J., Curry, W. H., 1954. South Glenrock, a Wyoming stratigraphic oilfield. Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., 38, 2119-2156.
- Derman, A. S., 2002. Karadeniz açılma istifleri. TPJD Bülteni, 14(1), 37-66.
- Dean, W. T., Martin, F., Monod, O., Demir, O., Rickards, R. B., Bultynck, P, Bozdoğan, N., 1997. Lower Paleozoic stratigraphy, Karadere-Zirze area, Central Pontides, Northern Turkey. In: Göncüoğlu, M. C. ve Derman, A. S. (eds.), Early Paleozoic in NW Gondwana. Turkish Association of Petroleum Geologists Special Publication, 3, 32-38.
- Donselaar, M. E., Schmidt, J. M., 2005. Integration of outcrop and borehole image logs for high-resolution facies interpretation: example from a fluvial fan in the Ebro Basin, Spain. Sedimentology, 52, 1021–1042.
- Fisher, W.L. ve McGowen, J.H., 1969. Depositional systems in the Wilcox Group (Eocene) of Texas and their relationship to occurrence of oil and gas. Bulletin American Association of Petroleum Geologists, 53, 30–54.
- Folk, R.L., Andrews, P.B. ve Lewis, D.W., 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use New Zealand. New Zealand Journal of Geol Geops., 13(4), 1-34.
- Geçer, A., Büyükutku, A. ve Gültekin, F., 2019. Reservoir descriptions of the Kömürlü and Penek Formations near Erzurum, East Anatolia, Turkey. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 9,1677-1693.
- Gedik, A. ve Korkmaz, S., 1984. Sinop Havzasının jeolojisi ve petrol olanakları. Jeoloji Mühendisliği, 19, 53-80.
- Goddard, D. A. ve Echols, J. B., 1993. Miller reservoir: depositional facies, trapping styles, and reserve estimates-Middle Wilcox, east central Louisiana. Basin Research Institute Bulletin, 3 (1), 3-31.
- Görür, N., Tüysüz, O., Aykol, A., Sarkınç, M., Yiğitbaş, E. ve Akkök, R., 1993. Cretaceous red pelagic carbonates of northern Turkey: Their place in the opening history of the Black Sea. Eclogia Geol. Helv., 86(3), 819-838.
- Hopkins, M. E., 1958. Geology and petrology of the Anvil Rock Sandstone of southern Illinois. Illinois Geol. Survey Circ., 256, 1-49.
- Ketin, İ. ve Gümüş, O., 1962, Sinop, Ayancık ve güneyinde, III. bölgeye dahil sahaların jeolojisi hakkında rapor I, II, TPAO, Rap. No. 213 ve 218, Ankara (yayımlanmamış).
- Ketin, İ. ve Gümüş, A., 1963. Sinop-Ayancık güneyinde üçüncü bölgeye dahil sahaların jeolojisi hakkında rapor (2. Kısım: Jura ve Kretase formasyonlarının etüdü). TPAO, Rap. No. 288, (yayımlanmamış).
- Kleinhans, M.G., 2005. Autogenic cyclicity of foreset sorting in experimental Gilbert-type deltas. Sed. Geol., 18, 215–224.
- Korkmaz, S. 1984. Boyabat (Sinop) kuzeydoğusunun petrol yönünden ve jeokimyasal incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi,194s, Trabzon.



- Levorsen, A. I. 1967. *Geologie of Petroleum*. W. H. Freeman and Company, San Francisco, second ed., 1- 499.
- Longhitano, S., 2008. Sedimentary facies and sequence stratigraphy of coarse-grained Gilbert-type deltas within the Pliocene thrust-top Potenza Basin (Southern Apennines, Italy). *Sed. Geol.*, 210, 87–110.
- May, J. A. ve Stonecipher, S. A., 1990. Depositional environments of the Wilcox Group, Texas Gulf Coast stratigraphic and early diagenetic signatures. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 40, 551-574.
- Morrill, D.C., 1988. Subsurface facies analysis and sequence stratigraphy. *Int. Human Resou. Dev. Corp.*, Boston, 43-45.
- Okay, A. I., 1989. Tectonic units and sutures in the Pontides, northern Turkey. In: *Tectonic evolution of the Tethyan region* (ed. A.M.C. Şengör), Nato Advanced Science Institute (ASI) Series, C 259, Kluwer Academic Publications, Dordrecht, 109-116.
- Patil, M.B., 2014. Dip-meter surveys in Petroleum Exploration. B.S. Publication Pvt. Ltd., Hyderabad, 1-130.
- Patil, M. B. ve Abhay, M. V., 2017, Application of Dipmeter Surveys in Petroleum Exploration. *Journal of Geosciences Research, Special Volume*, 1, 211-215.
- Prior, D.B., Wiseman, Wm.J., Jr. ve Bryant, W.R., 1981. Submarine chutes on the slopes of fjord deltas. *Nature*, 290, 326–328.
- Schlumberger, 1986. Log interpretation charts. Schlumberger Educational Services, Houston, 1–131.
- Schlumberger, 1989, Log Interpretation Principles/Applications, Schlumberger Educational Services, Houston, Texas.
- Schlumberger, 1996. Log interpretation charts. Schlumberger Well Services, Houston, 2–34.
- Selley, R. C., 1975. Subsurface diagnosis of deltaic deposits with reference to the northern North Sea. *Proceedings of the Jurassic Northern North Sea Conference*. Finstad, K. & Selley, R. C. (eds). Norwegian Petroleum Society, Oslo.
- Serra, O. ve Serra, L., 2003. Well Logging and Geology. Bharat Book Bureau, Mumbai, 345-348.
- Soegaard, K., 1991. Architectural elements of fan-delta complex in Pennsylvanian Sandia Formation, Taos Trough, northern New Mexico, in Miall, A.D., ed., *The Three-Dimensional Facies Architecture of Terrigenous Clastic Sediments and Its Implications for Hydrocarbon Discovery and Recovery*. Concepts in Sedimentology and Paleontology. Society for Sedimentary Geology, Tulsa, Okla., 217-223.
- Sonel, N., Albayrak, M. ve Sarı, A., 1992. Bürnük (Boyabat-Sinop) civarının petrol olanaklar., *Doğa Yerbilimleri Dergisi*, 1, 17-35.
- Sun, Z., Zhang, J., Wang, R., Wang, G., 2017. Fan Delta Sedimentation in Eocene of Nanpu Depression, Northeastern China. *Int J Petrochem Sci Eng.*, 2 (5), 139-147.
- Sunal, G., 1998. Cide Kuruçayı ile dolayının jeolojisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, İstanbul.
- Şengör, A. M. C. ve Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181-241.
- Şengör, A. M. C. ve Sungurlu, O., 1984. Tectonics of the Mediterranean Cimmerides: Nature and evolution of the western termination of Paleotethys. In:

- Dixon, J. E.ve Robertson A. H. F. (eds),  
The Geological Evolution of the Eastern  
Mediterranean. Geological Society of  
London Special publication, London, 17,  
17-112.
- Timur, A., 1968. An investigation of  
permeability, porosity, and residual water  
saturation relationships for sandstones  
reservoirs. Log Anal., 9, 3–5
- Tüysüz, O., Yiğitbaş, E. ve Serdar, H. S., 1989.  
Orta Pontidlerin güney kesiminin jeolojisi.  
Report of TPAO, 1- 291
- Tüysüz, O., 1990. Tectonic evolution of a part  
of the Tethyside orogenic collage: The  
Kargı masif, Northern Turkey. Tectonics, 9,  
141-160.
- Tüysüz, O., 2011. Timing and mechanism of  
the opening of the Western Black Sea  
Basin. AAPG Conference, Kiev.
- Vandré, C., Cramer, B., Winsemann, J., 2007.  
Natural gas formation in the western Nile  
delta (Eastern Mediterranean):  
Thermogenic versus microbial. Organic  
Geochemistry, 38(4),523-539.
- Yiğitbaş, E. ve Elmas, A., 1997. Bolu-  
Eskipazar-Devrek-Çaycuma dolayının  
jeolojisi. TPAO Raporu.



## Bir mangan cevheri için yer çekimi ile zenginleştirme akım şeması oluşturma çalışmaları

### *Gravity beneficiation flowsheet development studies for manganese ore*

ERGİN GÜLCAN<sup>1\*</sup> , ÖZCAN YILDIRIM GÜLSOY<sup>1</sup> , Ş. LEVENT ERGÜN<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 29 Nisan (*April*) 2022 Kabul (*accepted*): 29 Haziran (*June*) 2022

#### ÖZ

Dünya genelinde oldukça yaygın kullanım alanı bulunan mangan (Mn) metalinin zenginleştirilmesinde kullanılan yöntemlerin, tükenen kaynaklar ve kompleks mineralojik yapılar sebebiyle yer çekimi ile zenginleştirmeden kimyasal ekstraksiyon yöntemlerine doğru kaydığı görülmektedir. Ülkemizde ise farklı jeolojik oluşum şekillerinde, değişen yan kayaçlarda, farklı mineralojik ve yapısal özelliklerde olduğu bilinen Mn rezervlerinin zenginleştirme işlemleri çoğunlukla problemli özellik göstermekte ve gelecekte oldukça maliyetli kimyasal süreçlerin proseslere dahil edilmesi kaçınılmaz görünmektedir. Mangan zenginleştirme işlemleri, nihai üründe Mn/Fe oranını artırmaya dönük prosesleri kapsamaktadır. Bu çalışmada Mn/Fe oranı oldukça düşük (yaklaşık 1) olan ve bu açıdan yerçekimi ile zenginleştirilmesi problemli bir mangan cevherinin, tahribatsız ve kimyasal kullanımının olmadığı fiziksel yöntemlerle zenginleştirilmesinin araştırılması ve uygun tesis tasarımına ilişkin bulgular sunulmaktadır. Deneysel çalışmalar kapsamında cevherin farklı tane boyları üzerinde ağır sıvı analizi ve sallantılı masa testleri gerçekleştirilmiştir. Ağır sıvı sonuçları ve boyut dağılımları kullanılarak yerçekimiyle zenginleştirme devresinin performansı modelleme-simülasyon yardımıyla belirlenmiştir. İlgili mangan cevherine ilişkin yapılan çalışmalar bu anlamda bir ilktir ve tesis ölçekli uygulamaya olanak sağlamıştır.

Cevherin kırma ve zenginleştirilmesine yönelik gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, bünyesinde ağır ortam içeren bir akım şeması kullanılarak cevherden % 51 Mn verimi ile miktarca % 33.3 oranında, % 39.48 Mn ve % 11.75 Fe içerikli bir konsantrenin elde edilmesi mümkün görünmektedir. Konsantrenin SiO<sub>2</sub> içeriği ise % 8-10 seviyelerine düşürülmüştür. Bu kapsamda Mn/Fe oranı yaklaşık "1" olan cevherden, spiraller ve ağır ortam ile zenginleştirmenin entegre edildiği akım şeması kullanılarak Mn/Fe oranı 3.36 olan ve metalurjik süreçlerde kullanılabilir bir mangan konsantresinin elde edilebileceği görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Mangan, cevher zenginleştirme, ağır ortam siklonu, spiral, simülasyon ve modelleme

#### ABSTRACT

*It is foreseen that the methods used in the processing of manganese (Mn), which has very common usage areas throughout the world, are shifting from gravity enrichment to chemical extraction methods due to depleted resources and complex mineralogical structures. In our country, the enrichment processes of Mn reserves, which are known to be in different geological formations, having various host-rocks, and different mineralogical and structural features, are often problematic and it seems inevitable to include costly chemical*

processes in the near future. Manganese enrichment include processes to increase the Mn/Fe ratio in the final product. In this study, the investigation of the enrichment of a problematic manganese ore (Mn/Fe ratio = 1) with non-destructive and chemical-free physical methods and the findings regarding the appropriate plant design are presented. Within the scope of experimental studies, heavy liquid analysis and shaking table tests were carried out on different particle size ranges. Using the heavy liquid results and size distributions, the performance of the gravity concentration circuit was presented with the help of modeling-simulation. The studies on the related manganese ore are a first in this sense and enabled the plant-scale application.

In simulation studies for crushing and concentration of the ore which incorporate heavy medium separation, results showed that it is possible to obtain a 33.3% weight concentrate with a Mn recovery of 51%, having Mn and Fe contents of 39.48% and 11.75%, respectively. The SiO<sub>2</sub> content of the concentrate was reduced to marketable 8-10%. In this context, it is concluded that a manganese concentrate with a Mn/Fe ratio of 3.36 that is usable in metallurgical processes can be obtained from ore with a Mn/Fe ratio of approximately "1" by using the integrated flowsheet of spirals and heavy medium cyclones.

**Keywords:** Manganese, ore beneficiation, heavy medium cyclone, spiral, simulation and modelling

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1111081>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: ergingulcan@hacettepe.edu.tr

## GİRİŞ

En basit tanımıyla yerçekimi ile zenginleştirme yöntemleri, cevher taneleri arasındaki yoğunluk farklılıklarından yararlanan bir yöntemler sınıfıdır (Burt, 1999; Gupta ve Yan, 2006; Burt ve Wills, 1984). Birbirinden farklı yoğunluklara sahip olan taneler, ortam viskozitesi, viskoz ortamdaki harekete karşı direnç, yoğunluk, ağırlık, tane boyu, şekil gibi parametreler veya bu parametrelerin birkaçının etkisiyle ortamda farklı şekillerde hareket ederler (Hanoker ve Richard, 2003). Yerçekimi ile zenginleştirme yöntemleri çok eski madencilik operasyonlarından günümüze cevher zenginleştirme operasyonlarının vazgeçilmez birim elemanlarıdır ve günümüzde hem eski usüllerle hem de modern teknolojik gelişmelere uygun ekipmanlarla yaygın kullanım alanları bulmaya devam etmektedirler (Wills ve Munn, 2006; Fuerstenau ve Han, 2003; Mular vd., 2002). Yerçekimi ile zenginleştirmenin kimyasal kullanımına gerek kalmadan kolay ve geniş kullanım imkanı sunmasına rağmen, ekipman

kapasitelerinin düşük olması ve daha kaliteli ürün talebinin artması, yerçekimi ile zenginleştirmeyi diğer tüm yöntemler başarısız olduğunda her zaman düşünülmesi gereken en son çare haline getirmiştir. Bununla birlikte nispeten daha çevre dostu olan bu yöntemin mevcut kurulumlarının performansının artırılmasının araştırılması, daha entegre ve aşamalı yerçekimi proseslerinin tasarlanması ve modern yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarının geliştirilmesi ile yerçekimi konsantrasyonu yöntemlerine olan ilgi artarak devam etmektedir (Burt, 1999; Gupta ve Yan, 2006; Wills ve Munn, 2006; Fuerstenau ve Han, 2003).

Yerçekimi ile zenginleştirmenin başarılı uygulamalardan bazıları, jigler (altın içeren sülfür mineralleri, kalay, mineral kumlar, kromit, demir, kömür vb. (Richards ve Jones, 2004), santrifüjli yerçekimi ayırıcıları (altın, bakır, platin, kromit cevheri, kömür vb. (Lins vd., 1992; Olyaei vd., 2016; Hanoker vd., 2005), kabaran yataklı ayırıcılar (kömür, kromit, manganez vb. (Tripathy vd., 2013), ağır ortam

siklonları (kömür ve mineraller (*Marion vd., 2017*)), spiral ayırıcılar (kromit, kum, kömür, demir vb. (*Palmer ve Vedeikis, 2010*)), sallantılı masalar (kromit, altın, nadir toprak mineralleri (*Dehaine vd., 2017; Manser vd., 1991*)) ve çoklu yerçekimi ayırıcılarıdır (multigravity separators) (kromit, kömür, grafit, nadir toprak mineralleri (*Patil vd., 1999; Chan vd., 1991*)).

Mangan (Mn), birçok alanda geniş endüstriyel kullanımı olan önemli bir metaldir. Dünyada manganın %90-95'i çelik üretiminde, % 5'i ise geri kalanı ise demir dışı üretim, pil ve diyet katkı maddeleri alanlarında kullanılmaktadır (*Liu vd., 2019*). Mangan yaygın olarak demir (Fe) ve silikatlar (Si-) ile birlikte bulunur ve cevher zenginleştirme süreçleri, çoğunlukla izomorfik olan Fe-Mn cevherlerinde Mn/Fe oranını artırmaya dönük işlemleri içerir. Mn, Fe ve Si bileşenlerinin mangan cevherlerinde bir arada bulunması ve çoğunlukla birlikte cevherleşmesi sebebiyle Mn ve Fe'yi yalnızca yerçekimi ve manyetik ayırma işlemleri gibi fiziksel zenginleştirme yöntemlerini kullanarak etkili bir şekilde ayırmanın çok zor olduğunu bilinmektedir (*Tripathy vd., 2015*). Bu noktada Fe-Mn cevherlerinden Mn ve Fe'nin seçimli ekstraksiyonu ve ayrılması için birçok çalışma yapılmıştır (*Tripathy vd., 2015; Wu vd., 2015*). Mangan cevherine ilişkin cevher zenginleştirme süreçleri, metalurjik olarak değerlendirilebilir ve Mn/Fe oranının yüksek (>3-4) konsantreler alınmasını hedeflemektedir. Metalurjik süreçler açısından Mn/Fe oranının artırılmasının önemine ilişkin pek çok endüstriyel ve akademik çalışma mevcuttur (*Singh vd., 2011; Singh ve Biswas, 2017; Granina vd., 2010*). Bu noktada mangan cevherinin fiziksel ve yerçekimine dayalı süreçlerle zenginleştirilmesinin ve buna ilişkin tesis tasarımının kritik öneme sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında Mn/Fe oranı yaklaşık "1" olan ve yerçekimi ile zenginleştirme açısından problemlili bir mangan cevheri için fiziksel yöntemler ve ağır ortam ile

zenginleştirmenin entegre edildiği bir yerçekimi ile zenginleştirme tesisi tasarımına dönük bulgular sunulmaktadır. Bu kapsamda karakterizasyon testleri ve zenginleştirme testleri uygulanmış, sonuçlar doğrultusunda cevhere en uygun tesisin simülasyon ve modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon testleri kapsamında tane boyu fraksiyonu bazında yoğunluk dağılımını ölçmek amacıyla detaylı "yıkabilirlik" testleri gerçekleştirilmiş, bu kapsamda bir ağır ortam devresinin uygulanabilirliğine dönük veriler elde edilmiştir. Bu açıdan benzer cevherlerle yapılan çalışmalara kıyasla kimyasal süreçlere gerek kalmaksızın ağır ortam devresi ile Mn/Fe oranının artırılabilirdiği ortaya konulmuştur.

## MALZEME ve YÖNTEM

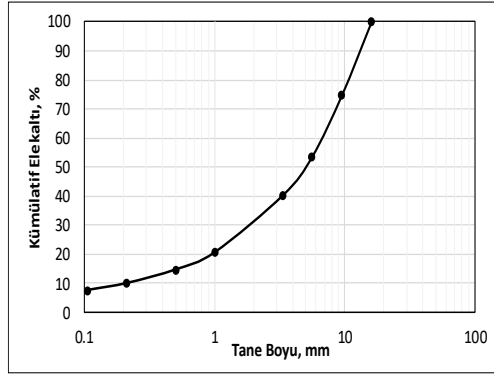
### Numune hazırlama ve karakterizasyon çalışmaları

Numune alma ve hazırlama çalışmaları kapsamında İç Anadolu bölgesindeki bir sahadan temin edilen yaklaşık 500 kg civarındaki temsili karot numunesi laboratuvara teslim edilmiştir. Ana numune yığınının temsili olarak konileme-dörtleme yöntemi ile alınan 65kg numunenin tamamı laboratuvar ölçekli çeneli kırıcı kullanılarak -16 mm tane boyuna indirilmiştir. Kırılan numunenin boyut dağılımı **Şekil 1**'de verilmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan numuneden alınan temsili numune ile gerçekleştirilen kimyasal analiz sonuçları ve beslemenin genel bileşimi **Tablo 1**'de ayrıca verilmektedir. Besleme analizi incelendiğinde mangan içeriği yaklaşık % 20 seviyelerinde olan cevherin temel safsızlıklarının silikatlar, alümina, feldispatik killer ve demir olduğu görülmektedir. Manganın çoğunlukla pirolüsit, bixbit ve polianit mineralleri bünyesinde bulunduğu cevherin ortalama yoğunluğu 3.6 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Mangan ve demirin yoğunluğunun

5 g/cm<sup>3</sup>'ün üzerinde olduğu düşünüldüğünde, cevherden silikat ve diğer safsızlıkların uzaklaştırılmasında, dünyada da mangan zenginleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan fiziksel ayırım yöntemlerinin uygulanabilirliğine ve serbestleşmeye bağlı olarak yoğunluk farkına bağlı zenginleştirilme işlemlerinin yapılabileceği en iri tane boyunun belirlenmesine ilişkin deneysel çalışmalar bu kapsamda planlanmıştır.

### Deneysel yöntem

Deneysel çalışmalar kapsamında öncelikli olarak cevherin farklı tane boylarının değişen yoğunluklarda sıvılardaki davranışı incelenmiştir. 16mm'den inceye kırılan numune miktarı konileme-dörtleme yöntemiyle azaltılmış ve azaltılan numune -16mm+5mm, -5mm+1mm, -1mm+0.2mm ve -0.2mm tane boyu fraksiyonlarına elenmiştir. Yer çekimi ile zenginleştirmeye uygunluğun ve buna uygun tane boyunun belirlenmesi amacıyla yüzdürme-batırma testleri, -16mm+5mm, -5mm+1mm ve -1+0.2mm fraksiyonlarına ayrı ayrı 2.75g/cm<sup>3</sup>, 2.85g/cm<sup>3</sup>, 3.2g/cm<sup>3</sup> ve 3.5g/cm<sup>3</sup> ayırma yoğunluklarında uygulanmıştır.



**Şekil 1.** 16 mm'den inceye kırılan numunenin boyut dağılımı.

**Figure 1.** Size distribution of the sample crushed below 16 mm.

**Tablo 1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin kimyasal analiz sonuçları.

**Table 1.** Chemical analysis results of the sample used in experimental studies.

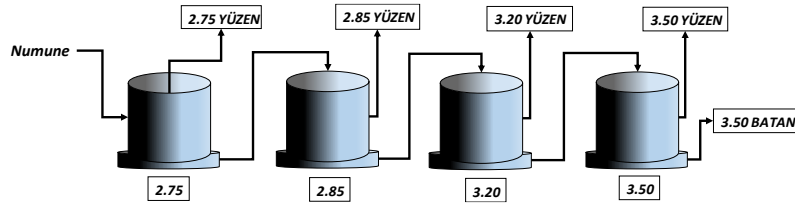
SiO <sub>2</sub>	(%)	40.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	2.39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	19.89
MgO	(%)	0.61
CaO	(%)	2.73
Na <sub>2</sub> O	(%)	0.28
K <sub>2</sub> O	(%)	0.53
TiO <sub>2</sub>	(%)	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	(%)	0.35
Mn	(%)	21.78
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	0.006
Ba	(ppm)	2351
Ni	(ppm)	213
Sr	(ppm)	4001
Zr	(ppm)	23
Y	(ppm)	51
Nb	(ppm)	<5
Sc	(ppm)	5
Kızdırma Kaybı	(%)	9.6

Ağır sıvıların hazırlanması için tetrabrometan, sodyumpolitungstat ve tungsten karbür kullanılmıştır. Yüzdürme-batırma testlerinde kullanılan yöntem **Şekil 2**'de şematik olarak verilmektedir. Yüzdürme-batırma testlerinde -16mm+5mm tane boyu fraksiyonu öncelikle 2.75g/cm<sup>3</sup> yoğunluğundaki sıvıya dökülmüş ve bu sıvıda yüzen ve askıda kalan taneler alınarak 2.75g/cm<sup>3</sup> yüzen ürünü olarak ayrılmıştır. 2.75g/cm<sup>3</sup> yoğunluklu sıvıda batan malzeme süzülerek ayrılmış ve 2.85g/cm<sup>3</sup> yoğunluklu sıvıya aktırılmıştır. Seri bu şekilde tamamlanarak nihai sıvıdan da bir batan ürün alınmıştır. Devamında -5mm+1mm ve -1+0.2mm tane boyu fraksiyonlarına da aynı prosedür uygulanarak alınan tüm ürünler kimyasal analize gönderilmiştir. -0.2mm fraksiyonu bu testin uygulanabilirliği açısından

çok ince bir tane boyu olması sebebiyle ayrı olarak analiz edilmiştir. Yüzdürme-batırma testlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak ağır ortam siklonları, sipiraller, jigler vb. yoğunluğa dayalı yerçekimi ile ayırım yapan ekipmanların zenginleştirmede kullanımına ilişkin değerlendirmeler ve simülasyon çalışmaları yapmak mümkün olmaktadır.

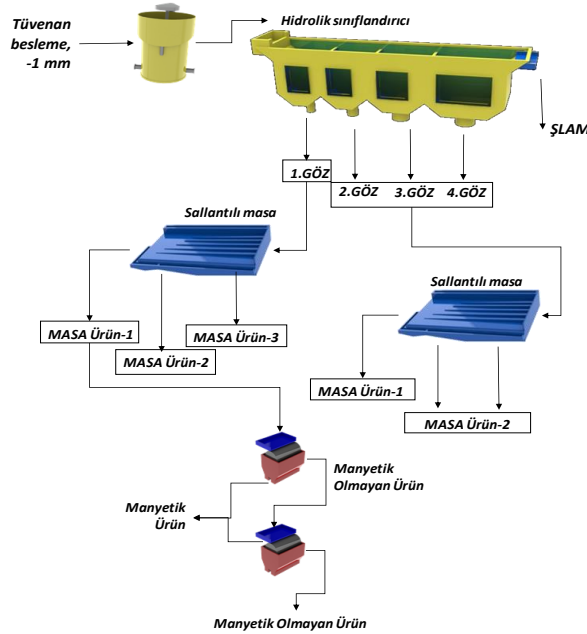
## DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar kapsamında cevherin genel yapısına bağlı olarak, manyetit cevherinden ince boyda manyetit ve flotasyon ile bakır ürünü alınması, aynı zamanda da alkali ve alümina gibi safsızlıkların da uzaklaştırılmasına yönelik test çalışmaları planlanmıştır.



Şekil 2. Yüzdürme batırma test yönteminin şematik olarak gösterimi.

Figure 2. Schematic representation of the sink-float test method.



Şekil 3. -1mm besleme numunesi ile gerçekleştirilen fiziksel zenginleştirme testlerinin şematik görünümü.

Figure 3. Schematic view of the physical beneficiation tests performed with -1mm feed sample.



Zenginleştirme deneylerinde kullanılacak deneysel yöntem, mineralojik veriler ve cevherin serbestleşme davranımı göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Bu kapsamda farklı sondaj karotlarından alınan ocak numunesi -10 mm'ye kırılmış ve temsili numune gruplarına ayrılmıştır. Öncelikle bir grup temsili -10 mm numune iri boyda atık (gang) minerallerinin uzaklaştırılabilirliğini incelemek amacıyla, düşük alan şiddetli kuru manyetik ayırma testlerine (cobbing) tabi tutulmuştur. Devamında, belirlenen tane boylarına öğütülen numunelerle nihai ürünlerdeki kayıplar göz önünde bulundurularak düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırma testleri, yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testleri ve nihai kalite artışına yönelik yaş manyetik ayırma ve flotasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda ilgili cevherin en yüksek verimle zenginleştirilebileceği bir akım şeması tasarlanmıştır.

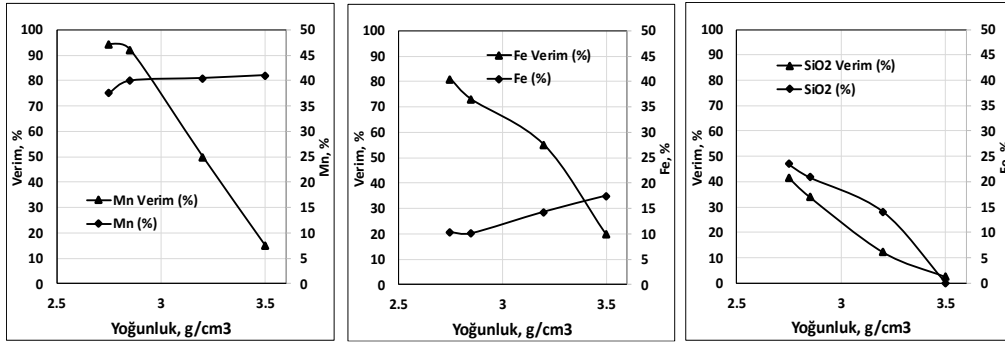
Zenginleştirme çalışmaları kapsamında ise tamamı -1mm'ye kırılan fraksiyon ile de hidrolik sınıflandırıcı, sallantılı masa ve cevher içerisinde demirin önemli ölçüde varlığı sebebiyle manyetik ayırma testleri gerçekleştirilmiştir. Yerçekimi ile zenginleştirme açısından özellikler sulu sistemlerde tanenin yoğunluğu, boyu ve şekli ayırmada önemli parametrelerdir. Mangan cevherinde değerli metal ile safsızlıklar arasındaki yoğunluk farkı göz önüne alındığında, tane boyunun etkisini en aza indirmek amacıyla ayırım öncesinde malzemeyi tane boyuna göre sınıflandırmak gerekmektedir. Ek olarak çok ince boydaki "şlam" denilen tanelerin de sallantılı masa performansını etkilememesi amacıyla, dört adet göze sahip bir hidrolik sınıflandırıcı kullanılarak -1 mm'ye kırılan besleme boya göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca sallantılı

masanın konsantresinin iri fraksiyonuna (1. göz konsantresi) yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırma testi de uygulanmıştır. Fiziksel zenginleştirme testlerine ilişkin deneysel çalışmalarda kullanılan yöntem **Şekil 3**'de şematik olarak verilmektedir. Deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen veriler doğrultusunda yüksek verim ve düşük safsızlık içeren, satılabilir bir mangan ürününün elde edilebileceği zenginleştirme devre stratejileri değerlendirilmiştir.

## SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

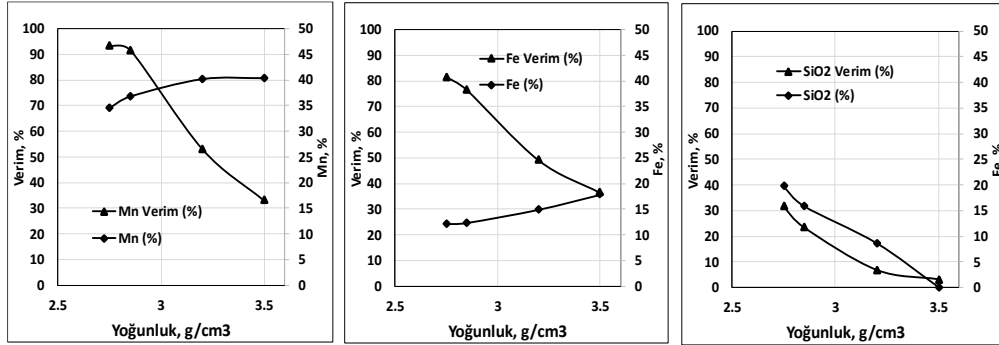
### Yüzdürme-Batırma Testleri

-16mm+5mm, -5mm+1mm ve -1+0.2mm tane boyu fraksiyonlarına uygulanan yüzdürme-batırma testlerinin verim, tenör ve yoğunluk ilişkilerine ilişkin sonuçları sırasıyla **Şekil 4**, **Şekil 5** ve **Şekil 6**'da verilmektedir. Benzer şekilde her fraksiyon için yoğunluğa bağlı bilikimli yüzen ve batan ağırlıkların hedef ürünlerdeki % Mn içeriği ile ilişkileri de **Şekil 7**, **Şekil 8** ve **Şekil 9**'da verilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde, yaklaşık %37.33-%41.05 Mn içerikli ve miktarca % 10.25-19.69 oranında ürünler elde edilebildiği görülmektedir. **Şekil 4**, **5** ve **6** incelendiğinde özellikle incelen tane boyuyla cevherden alınan ürün miktarı, tenörü ve metal veriminin göreceli olarak düştüğü görülmektedir. Yine cevherin yoğunluğa karşı ağırlık ilişkisi (**Şekil 7, 8 ve 9**), eğrinin eğiminin oldukça yüksek olması sebebiyle cevherin yerçekimiyle zenginleştirme ile ayırımının oldukça zor olduğuna işaret etmektedir. Yaklaşık 0.1g/cm<sup>3</sup> yoğunluk değişimiyle ürün miktarındaki sapma yaklaşık olarak %15 civarında olduğu görülmektedir. Oldukça dar bir yoğunluk aralığında yüksek miktarda malzemenin bulunması, sadece fiziksel zenginleştirme yöntemleriyle zenginleştirmenin zorluğuna ilişkin önemli bir bulgudur.



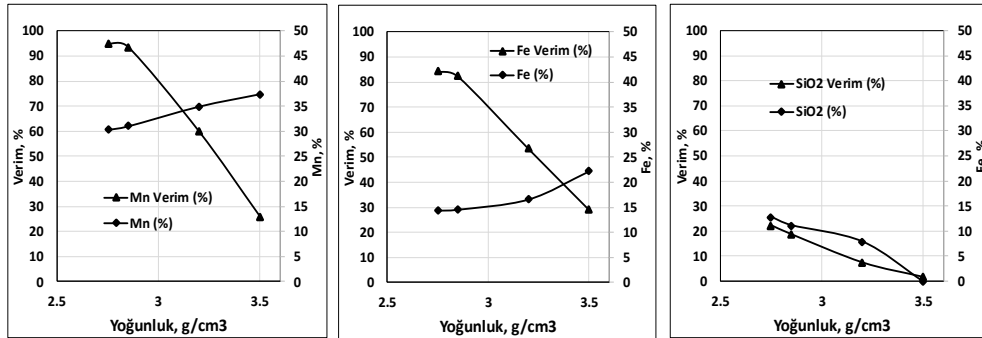
Şekil 4. -16+5mm fraksiyonunun yoğunluğa karşı (Mn, Fe ve SiO<sub>2</sub>) verim ve tenör eğrileri.

Figure 4. Density versus (Mn, Fe and SiO<sub>2</sub>) recovery & grade curves of -16+5mm fraction.



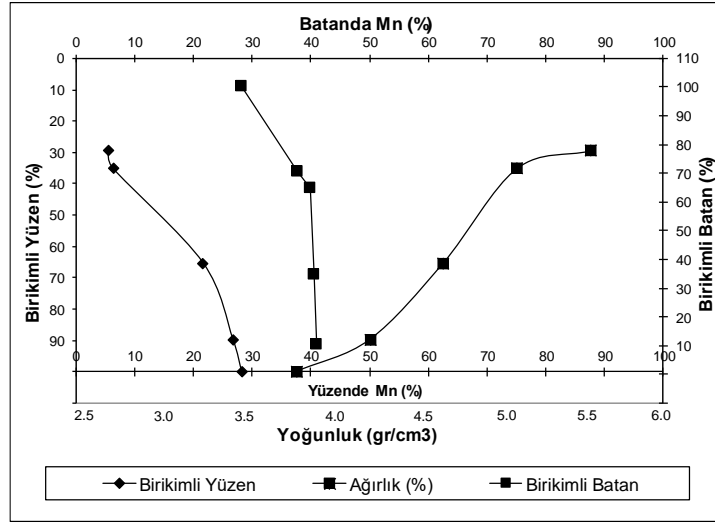
Şekil 5. -5+1mm fraksiyonunun yoğunluğa karşı (Mn, Fe ve SiO<sub>2</sub>) verim ve tenör eğrileri.

Figure 5. Density versus (Mn, Fe and SiO<sub>2</sub>) recovery & grade curves of -5+1mm fraction.



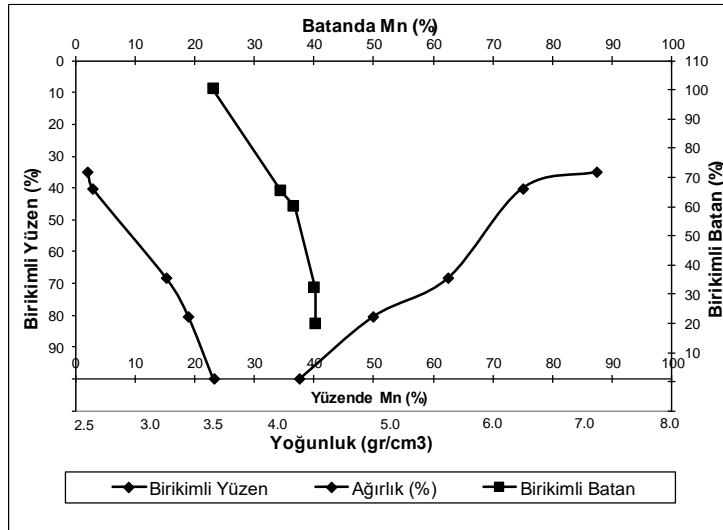
Şekil 6. -1+0.2mm fraksiyonunun yoğunluğa karşı (Mn, Fe ve SiO<sub>2</sub>) verim ve tenör eğrileri.

Figure 6. Density versus (Mn, Fe and SiO<sub>2</sub>) recovery & grade curves of -1+0.2 mm fraction.



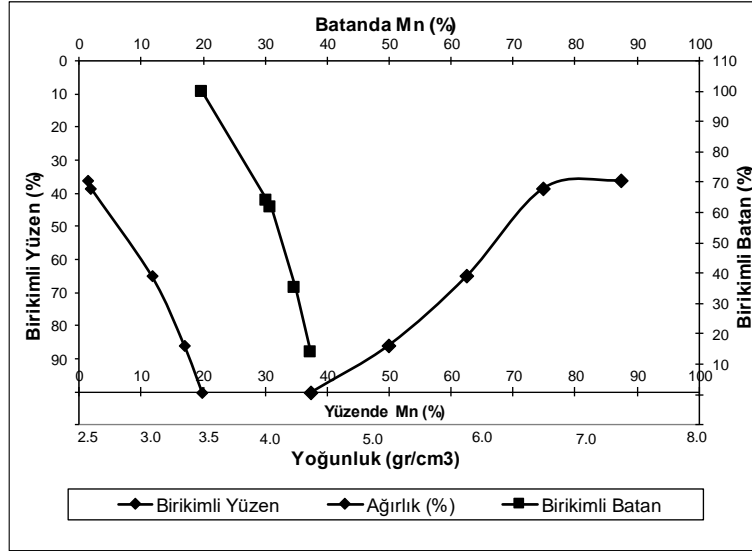
**Şekil 7.** -16+5mm fraksiyonu için yoğunluğa bağlı birikimli yüzen ve batan ağırlıkların hedef üründeki % Mn içeriği ile ilişkileri.

*Figure 7. Relationship of the density-dependent cumulative sink-float weights to % Mn content in the target product for the -16+5mm fraction.*



**Şekil 8.** -5+1mm fraksiyonu için yoğunluğa bağlı birikimli yüzen ve batan ağırlıkların hedef üründeki % Mn içeriği ile ilişkileri.

*Figure 8. Relationship of the density-dependent cumulative sink-float weights to % Mn content in the target product for the -5+1mm fraction.*



**Şekil 9.** -1+0.2mm fraksiyonu için yoğunluğa bağlı bilikimli yüzen ve batan ağırlıkların hedef ürünlerdeki % Mn içeriği ile ilişkileri.

**Figure 9.** Relationship of the density-dependent cumulative sink-float weights to % Mn content in the target product for the -1+0.2mm fraction.

Yüzdürme-batırma testlerinden elde edilen bu sonuçlar neticesinde cevherin zenginleştirilmesinde bir ağır ortam devresinin kullanılmasının zaruri olduğu sonucuna ulaşılmaktadır

#### Hidrolik Sınıflandırıcı ve Sallantılı Masa Testleri

Yüzdürme-batırma testlerinden elde edilen sonuçların sınanması amacıyla ek olarak yaygın fiziksel zenginleştirme yöntemleri de ayrıca deneysel olarak uygulanmıştır. Orjinal cevherden temsili olarak alınan yaklaşık 20 kg numune laboratuvar ölçekli çeneli ve merdaneli kırıcılarla kontrollü olarak -1 mm tane boyuna kırılmış ve tesiste uygulanabilecek şekilde kademeli olarak hidrolik sınıflandırıcı, sallantılı masa ve manyetik ayırma testlerine tabi tutulmuştur. -1mm'ye kırılan numune öncelikle dört ayırma gözü olan hidrolik sınıflandırıcıda iri ve ince tane boyu gruplarına ayrılmıştır.

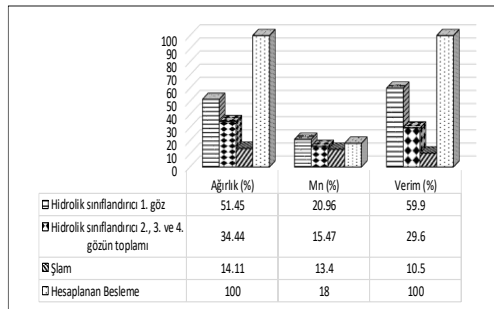
Sınıflandırıcıdan 1. göz ürünü ve diğer gözlerden alınan ürünler olmak üzere 2 farklı boy ve yoğunlukta ürün alınmıştır. Hidrolik sınıflandırıcı testinden elde edilen ürün detayları **Şekil 10**'da sunulmuştur. Devamında sınıflandırıcının 1. gözünden alınan yaklaşık -1mm+0.425 mm tane boyuna sahip numuneye ve diğer 2+3+4 gözlerden alınan yaklaşık -0.425mm+0.212 mm tane boyuna sahip numuneye ayrı ayrı sallantılı masa testleri uygulanmıştır. 1. Göz ürünüyle sallantılı masa testleri nispeten düşük masa eğimi, yüksek frekans ve yüksek su hızında gerçekleştirilmiştir. 1. Göz ve 2+3+4. Gözlerden alınan sınıflandırılmış ürünlerle gerçekleştirilen sallantılı masa test sonuçları sırasıyla **Şekil 11** ve **Şekil 12**'de verilmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde malzemenin yaklaşık %14 gibi bir miktarının hidrolik sınıflandırıcıda şlam olarak atıldığı görülmektedir. Masa ürünlerine bakıldığında birinci göz ürününe

uygulanan testlerde alınabilen en kaliteli ürün 26.33 %Mn içeriğiyle ağırlıkça %14.25 oranında olmuştur. İkinci göz ürününe uygulanan testlerde alınabilen en kaliteli ürün ise 28.06 %Mn içeriğiyle ağırlıkça %4.58 oranındadır. Yüzdürme-batırma testleri ile elde edilen sonuçlarla uyumlu şekilde her iki masa testinden elde edilen ürünlerin de miktar ve kalite olarak oldukça düşük düzeylerde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak elde edilen birbirine uyumlu veriler, zenginleştirme amaçlı oluşturulacak bir akım şemasının da ağır ortam kullanımının zorunluluğunu ortaya koymaktadır.

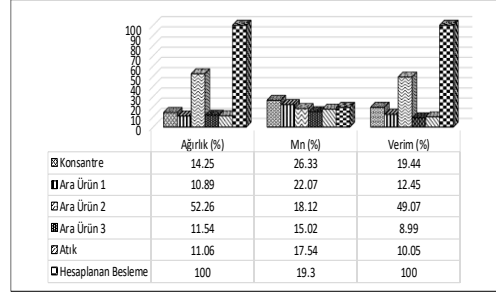
### Yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırma testleri

Elde edilen sonuçlarda manganın satılabilir düzeylere çıkarılabilirliğinin test edilmesi için, özellikle demir ve mangan davranımını incelemek açısından sallantılı masa konsantresine yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırma testi uygulanmıştır. **Şekil 13**'de verilen manyetik ayırma test sonuçları incelendiğinde buradan ağırlıkça % 61.4 oranında % 34.15 Mn ve % 12.77 Fe içeren bir ürün alınabilmesine rağmen, uygulanan prosesin genelinde mangan veriminin % 10-15'lere düşmesi sebebiyle uygulanabilir bir temizleme yöntemi olmadığına karar verilmiştir.



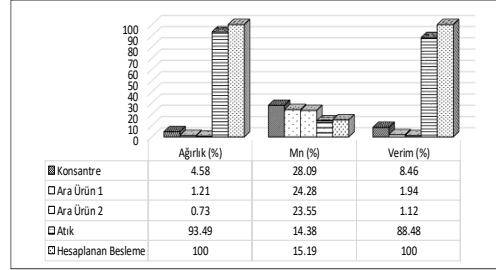
**Şekil 10.** Hidrolik sınıflandırıcı test sonuçları.

*Figure 10. Hydraulic classifier test results*



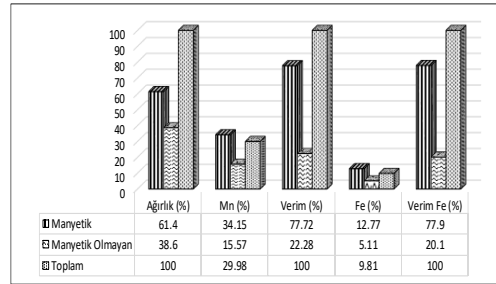
**Şekil 11.** Birinci gözden alınan numunenin sallantılı masa testi sonuçları.

*Figure 11. Shaking table test results of the sample collected from first compartment.*



**Şekil 12.** İkinci, üçüncü ve dördüncü gözlerden alınan toplam numunenin sallantılı masa testi sonuçları.

*Figure 12. Shaking table test results of the sample collected from first compartment.*



**Şekil 13.** Sallantılı masa konsantreleri ile gerçekleştirilen manyetik ayırma toplu test sonuçları.

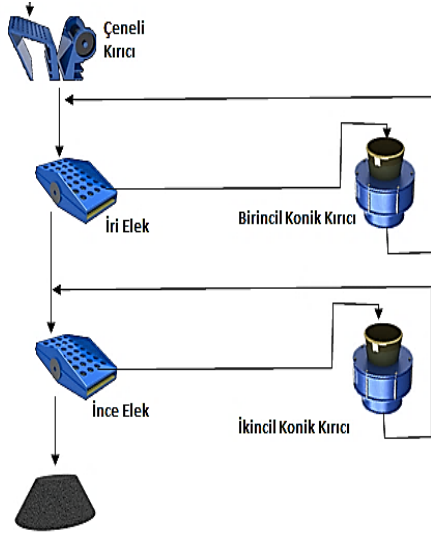
*Figure 13. Magnetic separation batch test results with shaking table concentrates.*

## SİMÜLASYON ve MODELLEME ÇALIŞMALARI

Elde edilen deneysel sonuçlar dikkate alınarak, ekipman tasarım ve işletme parametrelerinden bağımsız olmak suretiyle, cevherden üretilebilecek ürün miktar ve niteliklerinin tahmini için temsili 100 t/saat besleme için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

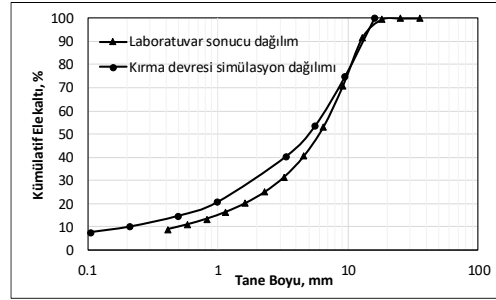
Cevherin öncelikle konvansiyonel bir kırma devresinde yaklaşık 25mm altına kırılma davranımı değerlendirilmiş ve bir kırma ürünü elde edilmiştir. Simülasyonda kullanılan basit kırma devresi akım şeması **Şekil 14**'de ve kırma sonucu elde edilen ürün boyut dağılımı **Şekil 15**'de verilmektedir.

Kırılan cevher boyut dağılımı kullanılarak zenginleştirme devresi simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda cevher öncelikle 1mm'den elenerek +1mm fraksiyonu ağır ortam devresinde zenginleştirilmiştir.



**Şekil 14.** Kırma simülasyonu akım şeması.

*Figure 14. Flowsheet used in crushing circuit simulation.*



**Şekil 15.** Kırma simülasyonu ürünü boyut dağılımı.

*Figure 15. Size distribution of the crushing simulation product.*

-1mm fraksiyonundan ise öncelikle şlam atılmış ve şlamı atılmış cevher iki kademe zenginleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Uygulanan simülasyona ilişkin akım şeması ve akışlara ait veriler **Şekil 16**'da verilmiştir.

Yüzdürme-batırma testlerine dayalı karakterizasyon çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak potansiyel bir ağır ortam akım şeması tasarlamak amacıyla, mangan cevherinden satılabilir ürün eldesini hedefleyen çeşitli kütle dengesi modellerinin kullanıldığı nihai bir akım şeması değerlendirilmiştir. Modelleme çalışmalarında özellikle tane boyu fraksiyonlarına göre yıkanabilirliklere (yüzdürme-batırma testi davranımına) uygun ekipmanın seçimine, her akıştaki verimlere ve istenen nihai kazanımlara odaklanılmıştır. Ağır ortam kullanılarak gerçekleştirilecek zenginleştirme devrelerinde ayırma yoğunluğu, ekipman kapasitelerini ve hedeflenen ürün kalitesini sınırlayan en belirleyici parametredir. Bu nedenle çeşitli yoğunluklarda ayırma ve tesis performans değerlendirme çalışmalarından elde edilen  $E_p$  (Ecart probability) değerleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Burada  $E_p$ , "Ecart olasılık katsayısını" ifade etmektedir.  $E_p$  basitçe, ayırma

işlemin verimsizliğini belirten yoğunluk kesme noktası çevresinde seçilen bir "aralık" olarak ifade edilebilir (Napier-Munn vd., 2009). Deneysel çalışmalardan elde edilen model parametrelerinin yanı sıra, zenginleştirme tesisi için gerçekçi koşulları temsil etmeye yönelik modelleme ve simülasyon parametreleri seçilmiştir.

Ağır ortam ile zenginleştirme işlemleri için, bir partiyon eğrisinin (**Eşitlik 1**) (Wills ve Munn, 2006) modellenmesinde kullanılan ve JKMRRC'de (Avustralya) geliştirilen yaklaşım kullanılmıştır.

$$Y_i = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{\ln 3(\rho_{50} - \rho_i)}{E_p}\right]} \quad (1)$$

Burada;

$Y_i$ , ayırım sonrasında batan ürüne giden  $\rho_i$  yoğunluklu fraksiyonun partiyon numarasını,

$\rho_{50}$ , ayırım yoğunluğunu,

ve  $E_p$ , ayırımın verimsizliğini gösteren Ecart olasılık katsayısını ifade eder ( $E_p = (\rho_{75} - \rho_{25})/2$ ).

Boyut ayırımlarının simülasyonu için ise **Eşitlik 2**'de (Wills ve Munn, 2006) verilen ve Whiten tarafından geliştirilen verimlilik eğrisi modeli kullanılmıştır.

$$E_{OA} = C \left[ \frac{(1 + \beta \cdot \beta^* \cdot x) (e^\alpha - 1)}{e^{(\alpha \cdot \beta^* \cdot x)} + e^\alpha - 2} \right] \quad (2)$$

Burada;

$E_{OA}$ , ince ürüne giden besleme yüzdesini,

$C$ , ayırma tabii tutulan beslemenin yüzdesini (100-kaçak),

$\alpha$ , keskinlik parametresini,

$\beta$ , "fish-hook" parametresini,

$\beta^*$ , hesaplanan "β" parametresini,

ve  $x$  normalleştirilmiş tane boyutunu ( $d/d_{50c}$ ), burada da  $d$  tane boyutu ve  $d_{50c}$  ise düzeltilmiş ayırım boyunu ifade eder.

Bu modeller, kurum içinde geliştirilen Lave® kömür simülatörüne dahil edilmiş ve mangan numunesinin boyut dağılımı ve yıkanabilirlikleri kullanılarak prosesin kütle akış hızları hesaplanmıştır.

Simülasyon devre tasarımında kırma tane boyu dağılımı **Şekil 15**'te verilen cevher öncelikle 1 mm'den elenmiştir. Elek üstü +1 mm malzeme yaklaşık 3 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğunda ağır ortam siklonu ile zenginleştirmeye tabi tutulduğunda satılabilir standartlara uygun % 40.3 Mn ve % 10.9 Fe içeren bir iri ürün elde edilebilmektedir. -1 mm malzemeden ise öncelikle hidrolik sınıflandırıcı ile ince boydaki şlamın uzaklaştırıldığı ve devamında spiraller ile iki kademe fiziksel zenginleştirmenin uygulandığı bir devre uygulanmıştır. Burada yaklaşık % 14 Mn içeren ağırlıkça % 3.7 miktarında bir atık uzaklaştırıldıktan sonra elde edilen ürünün, ağır ortam siklonu ile elde edilen iri ürünle karıştırıldığı nihai bir ürün elde edilmiştir. Simülasyon sonucunda ağır ortam ve yer çekimiyle zenginleştirmenin birlikte kullanıldığı cevherden, besleme tonajının ağırlıkça % 33.3'ü oranında, %51 Mn verimi ile % 39.48 Mn ve % 11.75 Fe içerikli ürün elde edilebileceği görülmektedir.

## SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yerçekimi, yoğunluk farkı ve fiziksel ayırım prensipleriyle zenginleştirilen cevherlerde taneler arasındaki yoğunluk farkı en önemli ayırım parametrelerinden birisidir. Yoğunluk farkının tane boyu fraksiyonları özelinde dağılımı, prosesde kullanılacak ekipman ve yöntemlerin seçiminde önemli bir rol oynar. Mevcut çalışma kapsamında bir mangan cevheri için yerçekimi ve fiziksel zenginleştirme yöntemlerinin uygulanabilirliği ve

karakterizasyon testleri doğrultusunda cevhere uygun bir akım şemasının geliştirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Mangan cevheri ile karakterizasyon amaçlı gerçekleştirilen yüzdürme batırma testlerinden yaklaşık % 37.33-% 41.05 Mn içerikli ürünler elde edilebildiği görülmüştür. Cevherin ağır sıvı analizi sonuçları incelendiğinde yerçekimiyle zenginleştirme ile ayırımının oldukça zor olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu sebeple cevherin zenginleştirilmesinde yoğunluk farkına dayalı daha hassas ayırma olanak veren bir ağır ortam devresinin kullanılmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer özelliklere sahip Mn cevherine ilişkin değerlendirmelerin yapıldığı bir çalışmada (*Singh vd., 1991*) fiziksel ve gravite zenginleştirme yöntemlerine ilişkin değerlendirmelerde karakterizasyon amaçlı bir yoğunluk dağılımı belirlenmesi yoluna gidilmemiş, sadece jig ve sallantılı masa testlerine göre karar verilmiştir. Yine aynı ekibin bir diğer çalışmasında (*Singh ve Biswas, 2017*) nispeten yetersiz bir gravite karakterizasyonunun ardından fiziksel ve kimyasal yöntemlerin bir arada kullanımının değerlendirildiği görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında, detaylı yoğunluk dağılımının fraksiyonel olarak belirlenmesi ile bir ağır ortam devresinin simülasyonu ve uygulanabilirliği ortaya konulabilmiştir.

Yerçekimine dayalı zenginleştirme çalışmaları kapsamında -1mm boyutuna uygulanan sallantılı masa testlerinde cevherin yaklaşık %14'ünün şlam boyutunda ve değerlendirilemez nitelikte olduğu görülmüştür. Masa testlerinde tek kademedede % 26.33-28.06 Mn içerikli ve ağırlıkça % 4.58-14.25 oranında ürünler alınabilmiştir. Masa testlerinde tek kademedede elde edilen ürünler miktar ve kalite olarak oldukça düşük düzeylerde kalmıştır. Masa konsantresine uygulanan manyetik ayırma testinde % 34.15 Mn ve % 12.77 Fe

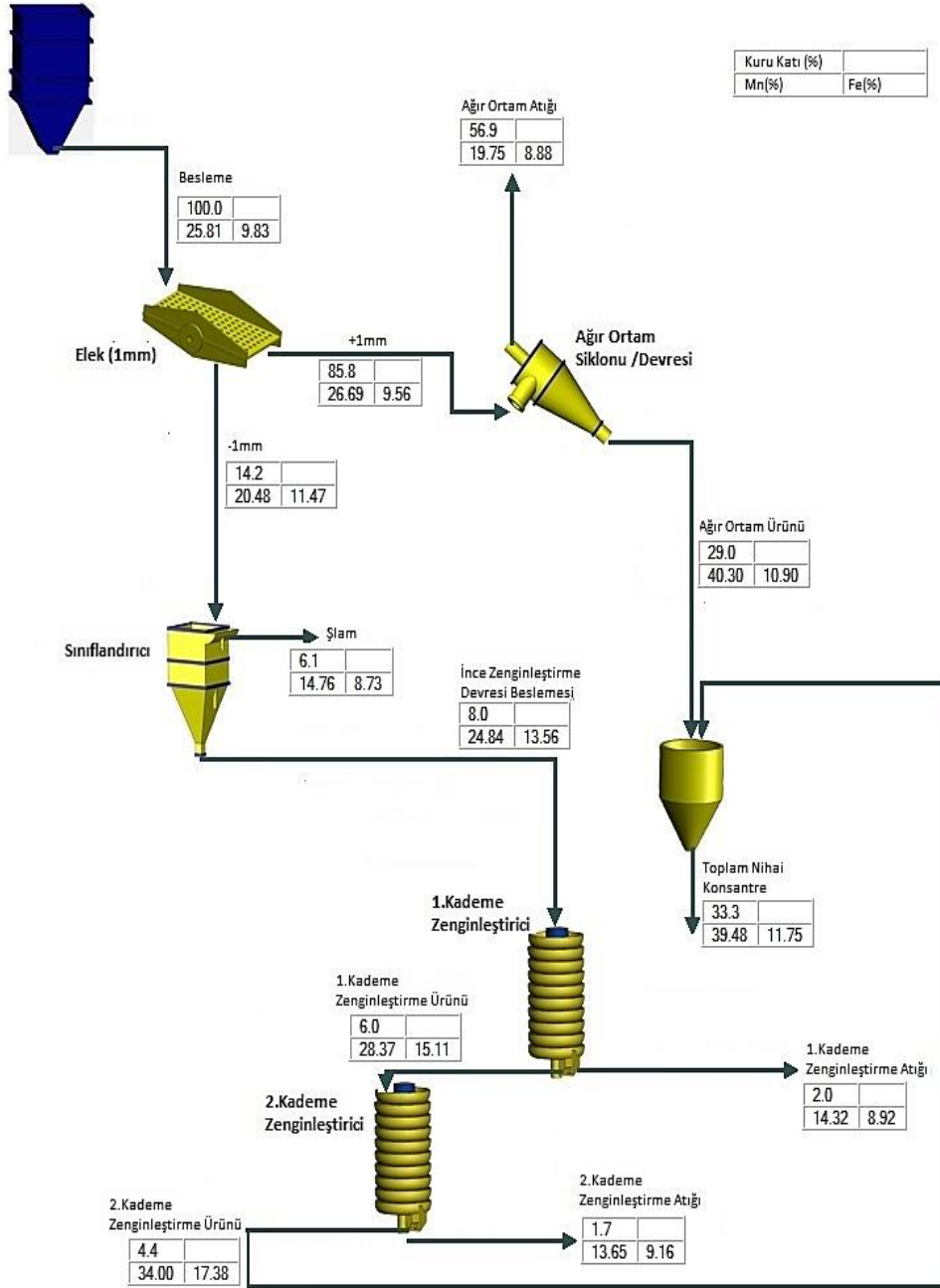
içerikli, ağırlıkça % 61.4 oranında ürün elde edilmiştir.

Yüzdürme-batırma test sonuçlarından elde edilen göreceli başarılı sonuçlar, ilgili cevherin zenginleştirilmesine yönelik tasarlanacak bir akım şemasında, ağır ortam devresinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bünyesinde ağır ortam içeren bir akım şeması ile cevherin zenginleştirilmesine yönelik gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında cevherden % 51 Mn verimi ile miktarca % 33.3 oranında % 39.48 Mn ve % 11.75 Fe içerikli ürünün elde edilmesi mümkün olduğu görülmüştür. Bu kapsamda Mn/Fe oranı yaklaşık "1" olan ve yerçekimi ile zenginleştirme açısından problemlili bir mangan cevherinden, spiraller ve ağır ortam ile zenginleştirmenin entegre edildiği akım şeması kullanılarak Mn/Fe oranı 3.36 olan ve metalurjik süreçlerde kullanılabilir bir mangan konsantresi elde edilebileceği görülmektedir.

#### **KATKI BELİRTME**

Çalışmanın değerlendirilme sürecinde katkı veren değerli Yerbilimleri editör ve hakemlerine teşekkürlerimizi sunarız.





Şekil 16. Zenginleştirme simülasyonu akım şeması ve akışlara ait veriler.

Figure 16. Flowsheet of beneficiation simulation and data of each flow.

**KAYNAKLAR**

- Burt RO., 1999. "The role of gravity concentration in modern processing plants". *Minerals Engineering*, Vol. 12 No. 11, 1291-1300.
- Burt RO, Mills C. , 1984. "Gravity Concentration Technology". Elsevier Science Publishing Company Inc, New York, sf.605.
- Chan BSK, Mozley RH, Childs GJC. , 1991. "Extended trials with the high tonnage multi-gravity separator", *Minerals Engineering* Vol. 4 Issues 3–4, 489-496.
- Dehaine Q, Filippov LO, Joussemet R. , 2017. "Rare earths (La, Ce, Nd) and rare metals (Sn, Nb, W) as by-products of kaolin production – Part 2: Gravity processing of micaceous residues", *Minerals Engineering* Vol. 100, 200-210.
- Fuerstenau MC, Han KN. , 2003. "Principles of Mineral Processing". Colorado Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. SME, sf.73.
- Gupta A, Yan DS., 2006. "Mineral Processing Design and Operations". Amsterdam, Elsevier, sf.516.
- Granina LZ, Mats VD, Phedorin MA., 2010. "Iron-manganese formations in the Baikal region", *Russ. Geol. Geophys.*, 51, sf. 650-660.
- Honaker R, Das A, Nombe M., 2005. "Fine coal cleaning using a Centrifugal Fluidized Bed Separator". SME Annual Meeting No. 05-96.
- Honaker R, Richard W., 2003. "Advances in Gravity Concentration". SME Littleton Colorado USA, sf.196, ISBN: 0-87335-227-0.
- Lins FF, Veiga MM, Stewart JA, Papalia A, Papalia R., 1992. "Performance of a new centrifuge (Falcon) in concentrating a gold ore from texada island B.C. Canada". *Minerals Engineering* Vol. 5 Issues 10–12, 1113-1121.
- Liu B, Zhang Y, Lu M, Su Z, Li G, Jiang T., 2019. "Extraction and Separation of manganese and iron from ferruginous manganese ores: A review", *Minerals Engineering*, Volume 131, Pages 286-303.
- Manser RJ, Barley RW, Wills BA., 1991. "The shaking table concentrator — The influence of operating conditions and table parameters on mineral separation — The development of a mathematical model for normal operating conditions", *Minerals Engineering* Vol. 4 Issues 3–4, 369-381.
- Maré E, Beven B, Crisafio C., 2015. "Chapter 10: Developments in nonmagnetic physical separation technologies for hematitic/goethitic iron ore". *Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability-Iron Ore*, 309-338.
- Marion C, Williams H, Langlois R, Kökkılıç O, Waters KE., 2017. "The potential for dense medium separation of mineral fines using a laboratory Falcon Concentrator", *Minerals Engineering* Vol. 105, 7-9.
- Mular AL, Halbe DN., Barratt DJ., 2002. "Mineral Processing Plant Design, Practice and Control". Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. SME, sf.2422.
- Munn, Napier-T.J., Gibson, G., Bessen, B., 2009. Advances in dense medium cyclone plant design. In: Proc. 10th Mill Operators' Conf., Adelaide, Ekim (AusIMM).

- Olyaei Y, Aghazadeh S, Gharabaghi M, Mamghaderi H, Mansouri J., 2016. "Gold, Mercury, and Silver Extraction by Chemical and Physical Separation Methods". *Rare Metal Materials and Engineering* Vol. 45 Issue 11, 2784-278.
- Palmer M, Vadeikis C. 2010. "New Developments in Spirals and Spiral Plant Operations, XXV International Mineral Processing Congress (IMPC)", Brisbane, Qld, Australia.
- Patil DP, Govindarajan B, Rao TC, Kohadi VP, Gaur RK., 1999. "Plant trials with the multi gravity separator for the reduction of graphite", *Minerals Engineering* Vol. 12 Issue 9, 1127-1131.
- Richards RG, Jones TA., 2004. "Kelsey centrifugal jig-an update on technology and application" SME Annual Meeting Denver, No. 04-21.
- Singh V, Biswas A., 2017. "Physicochemical processing of low grade ferruginous manganese ores", *Int. J. Miner. Process.*, 158, sf. 35-44.
- Singh V, Ghosh TK, Ramamurthy Y, Tathavadkar V., 2011. "Beneficiation and agglomeration process to utilize low-grade ferruginous manganese ore fines", *Int. J. Miner. Process.*, 99, sf. 84-86.
- Tripathy SK, Banerjee PK, Suresh N., 2015. "Effect of desliming on the magnetic separation of low-grade ferruginous manganese ore", *Int. J. Min. Met. Mater.*, 22 (7), sf.661-673.
- Tripathy SK, Mallick MK, Singh V, Rama Murthy Y., 2013. "Preliminary studies on teeter bed separator for separation of manganese fines", *Powder Technology* Vol.239, 284-289.
- Wills BA, Napier-Munn T., 2006. "Wills' Mineral Processing Technology". Elsevier Science & Technology Books, sf.512.
- Wu XD, Ming XQ, Huang GH, Chen NX, Huang BL, Lu WS., 2015. "Production by using low poverty manganese mine to smelt quality rich manganese slag", *China's Manganese Ind.*, 33 (3), sf.131-133.



## Evaluation Of Effect Of Drilling Fluids On Wellbore Stability

### *Sondaj Sıvılarının Kuyu Duraylılığı Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi*

HASAN KARAKUL<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Geliş (*received*): 16 June (*Haziran*) 2022 Kabul (*accepted*): 29 August (*Ağustos*) 2022

#### ABSTRACT

Wellbore stability evaluation is one of the important applications of rock mechanics and should be regarded to prevent instabilities that may develop in the wells for various reasons (such as complex field conditions, interaction between rock and drilling fluid, directional drilling etc.). The saturation of rocks by drilling fluids causes significant changes on mechanical properties of rocks. However the level of these variations may be changed due to drilling fluid compositions. In this study, the effect of these variations on wellbore stability was examined for different well profiles. In order to assess the effect of saturation on stability of wellbores, three different drilling fluid compositions (bentonite, KCl and polymer based muds) were considered. The results of assessment suggested that the saturation by bentonite and KCl based drilling fluids create adverse effect on critical fracture and collapse pressures. However the pressure values determined as a result of saturation by polymer based drilling fluid are close to those obtained for dry condition. It should be also stated that the range of mud pressure ensuring the stability of wellbore is also significantly affected by variation of collapse and fracture pressures calculated under drilling fluid saturation.

**Keywords:** Rock mechanics, drilling fluid, wellbore stability, collapse pressure, fracture pressure

#### ÖZ

*Kuyu duraylılığı değerlendirilmesi, kaya mekaniğinin önemli uygulamalarından biridir ve çeşitli nedenlerle ( karmaşık saha koşulları, kaya ve sondaj sıvısı arasındaki etkileşim, yönlü sondaj vb.) kuyularda gelişebilecek duraysızlıkları önlemek için dikkate alınmalıdır. Kayaların sondaj sıvılarıyla doyurulması mekanik özelliklerinde önemli değişimlere neden olur. Ancak bu değişimlerin düzeyi, sondaj sıvısı bileşimlerine bağlı olarak değişebilir. Bu çalışmada, sözkonusu değişimlerin kuyu duraylılığı üzerindeki etkisi farklı kuyu profilleri için incelenmiştir. Doğunluğun kuyuların duraylılığı üzerindeki etkisini değerlendirmek için üç farklı sondaj sıvısı bileşimi (bentonit, KCl ve polimer bazlı çamurlar) dikkate alınmıştır. Değerlendirme sonuçları, bentonit ve KCl bazlı sondaj sıvıları ile gelişen doğunluğun kritik çatlama ve çökme basınçları üzerinde olumsuz etki yarattığını ortaya koymuştur. Ancak polimer bazlı sondaj sıvısı ile doyurma sonucunda belirlenen basınç değerleri kuru koşul için elde edilenlere yakındır. Ayrıca kuyu stabilitesini sağlayan çamur basıncı aralığının,*

sondaj sıvısı doygunluğu altında hesaplanan çökme ve çatlatma basınçlarındaki değişimden de önemli ölçüde etkilendiği belirtilmelidir

**Anahtar Kelimeler:** Kaya mekaniği, sondaj sıvısı, kuyu duraylılığı, çökme basıncı, çatlatma basın

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1221822>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: hasan.karakul@ikcu.edu.tr

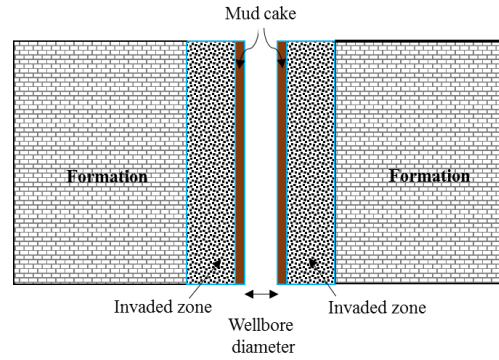
## INTRODUCTION

Rock mechanics has widespread applications on oil and gas industry due to increment the number of directional wells and existence of harsh conditions (high temperatures and stresses) (Aadnoy et al., 2009). There are four main types of wellbore instability problems (hole closure, hole enlargement, fracturing and collapse) and while lost circulation and possible kick occurrence are developed as a result of fracturing, pipe sticking and possible loss of well problems are related to collapse induced failures (Azar and Samuel, 2007). The major factors and processes, which give rise to the development of wellbore instabilities, are interaction between rock and drilling fluid, existence of complex stress conditions, deviated wellbore orientations, variable reservoir behaviour, problematic drilling practices, the reservoir with high temperatures and high pressures (Aadnoy and Looyeh, 2011).

The interaction process between drilling fluid and rock is carried out across the invaded zone around the wellbore (Figure 1). So, the adverse effect due to pronounced interaction is limited to this invaded zone. So, as emphasized by Karakul (2018), there are two regions (invaded and uninvaded) around a wellbore with different geomechanical parameters and the properties of invaded zone should be regarded in instability analyses.

Up to date, the adverse effect on mechanical properties (uniaxial compressive strength, triaxial strength, shear strength parameters,

tensile strength and fracture toughness) of rocks due to interaction by drilling fluids were examined by a few studies (Liu et al., 1998; Ewy et al., 2008; Yan et al., 2013; Yu et al., 2013; Mkpoikana et al., 2015, Karakul 2018; Karakul, 2021).



**Figure 1.** A general view of invaded zone around the wellbore.

**Şekil 1.** Kuyu çevresindeki istila edilmiş bölgenin genel bir görünümü

All of these studies state that drilling fluid saturation has a considerable effect on mechanical properties. Karakul (2018) stated that the geomechanical properties obtained for tested rocks saturated by polymer based drilling fluids have higher compared to those saturated by bentonite or KCl based muds. Similar trends were also found for fracture toughness values of rocks by Karakul (2021). On the other hand, Zhang et al (2021) studied the weakening effect of saturation with oil based drilling fluid on shale formation and stated that collapse pressure increment of 0.2 g/cm<sup>3</sup> was determined after soaking. The

experimental results summarized above state that in-situ field conditions should be regarded to perform precise calculation of fracture and collapse pressures and to evaluate the stability conditions of wellbores.

If the symmetric conditions are regarded, wellbore fracturing pressure can be calculated by using the following equations (Aadnoy and Looyeh, 2011) .

$$P_{wf} = 3\sigma_x - \sigma_y - P_0 - \sigma_t \quad \text{for } \sigma_x < \sigma_y \text{ and } \theta = 90^\circ \quad (1)$$

$$P_{wf} = 3\sigma_y - \sigma_x - P_0 - \sigma_t \quad \text{for } \sigma_y < \sigma_x \text{ and } \theta = 0^\circ \quad (2)$$

Aadnoy and Looyeh (2011) stated that tensile strength parameter given above equations can be neglected if the rock contains cracks or fissures. However this assumption could not be always considered as valid. If there is no a discontinuity around the borehole wall, the rock material has a considerable tensile strength so this should be regarded in the calculations of fracture pressure. So, in order to take into account the tensile strength of rocks located around the borehole wall, tensile strength tests of rocks should be determined by experiments.

The critical borehole pressure at collapse can be calculated from the following equation (Aadnoy and Looyeh, 2019).

$$P_{wc} = \frac{1}{2}(3\sigma_x - \sigma_y)(1 - \sin\phi) - \tau_0 \cos\phi + P_0 \sin\phi \quad \text{for } \sigma_x > \sigma_y \text{ and } \theta = 90^\circ \quad (3)$$

$$P_{wc} = \frac{1}{2}(3\sigma_y - \sigma_x)(1 - \sin\phi) - \tau_0 \cos\phi + P_0 \sin\phi \quad \text{for } \sigma_y > \sigma_x \text{ and } \theta = 0^\circ \quad (4)$$

As can be understood from the equations given above, the shear strength parameters (cohesion and internal friction angle) of rocks located around the borehole are used for

calculation of collapse pressure and should be determined by triaxial tests.

In order to reflect the field conditions, both tensile strength and shear strength parameters should be determined under the field conditions. As stressed by Zhang (2017), invasion (of drilling fluid) depth depends on porosity and permeability values and may take the values close to 3 m for formations with high permeability values. So the condition of drilling fluid saturation should be regarded for fracture and collapse pressure calculations. However, this effect was not comprehensively considered for saturation with water based drilling fluids in the studies performed up to date. By considering the deficiency mentioned above, this study mainly aimed to evaluate the effect of drilling fluid saturation on fracture and collapse pressures for vertical and the deviated well profiles. The mud weight window variation was also examined and the parameters which are effective on these values were also investigated in this study.

## MATERIAL AND METHOD

The mechanical properties of mudstone, which was previously determined by Karakul (2018), used in the analyses and given in Table 1. In addition to dry condition, the saturation created by three different drilling fluids (bentonite based drilling fluid, polymer based drilling fluid and KCl based drilling fluid) were also considered to explain the saturation effect on the fracture and collapse pressure values. In the analyses two different well trajectories (vertical and directional wells) were considered to simulate the drilling fluid effect on mud weight window. As the wellbore instability problems were frequently encountered for directional wells, this profile was also considered in the analyses. The well profiles and related parameters used in calculations were given in Table 2.

**Table 1.** Mechanical and physical properties of mudstone <sup>(1)</sup> .**Tablo 1.** Çamurtaşının mekanik ve fiziksel özellikleri <sup>(1)</sup>

	Test Condition			
	Dry	Saturated (Bentonite mud)	Saturated (KCl mud)	Saturated (Polymer mud)
<b>Cohesion, c (MPa)</b>	19.90	17.82	19.79	21.10
<b>Internal Friction Angle, <math>\phi</math> (°)</b>	49.70	53.03	50.71	53.87
<b>Tensile Strength, <math>\sigma_t</math> (MPa)</b>	12.65	10.61	10.69	11.64
<b>Biot Coefficient, <math>\alpha</math></b>			0.87	
<b>Young Modulus, E (GPa)</b>			17.59	
<b>Poisson's ratio, <math>\nu</math></b>			0.25	
<b>Unit Weight, <math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>			26.67	

(1) Karakul (2018)

**Table 2.** The considered well profiles and related properties used in the analyses.**Tablo 2.** Dikkate alınan kuyu profilleri ve analizlerde kullanılan ilgili özellikler.

(\*) Aadnoy and Looyeh (2011)

	Type	Azimuth angle , $\theta$ (°)	Inclination Angle, $\phi$ (°)	Maximum Depth (ft)	Pore Pressure Gradient (psi/ft)
<b>Well 1</b>	Vertical	0	0	10000	0.465 <sup>(*)</sup>
<b>Well 2</b>	Deviated	10	10-90		

The calculation of collapse and fracture pressures was carried out assuming that the horizontal stresses are equal. So the horizontal stress induced by tectonical processes was neglected. The anisotropy effect was not also considered in the analyses.

## RESULTS

As emphasized previous section, the fracture and collapse pressures are functions of tensile and shear strength properties, respectively. On the other hand, it is known and proved by a few studies mentioned above that the saturation.



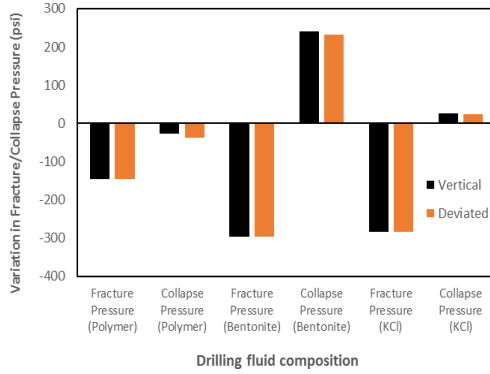
**Table 3.** Fracture and collapse pressures of 10000 ft depth calculated for vertical and deviated well ( $\varphi=10^\circ$ ) profiles.**Tablo 3.** Düşey ve yönlü kuyu profilleri için 10000 ft derinliğinde hesaplanan çatlatma ve çökme basınçları

Condition	Vertical Well Profile		Deviated Well Profile	
	Fracture Pressure, $P_{wf}$ (psi)	Collapse Pressure, $P_{wc}$ (psi)	Fracture Pressure, $P_{wf}$ (psi)	Collapse Pressure, $P_{wc}$ (psi)
Dry ( $\sigma_t$ is neglected)	8602,05	3251.77	8446,58	3307.18
Dry	10436.78	3251.77	10281.3	3307.18
Saturated (Bentonite-mud)	10140.90	3492.51	9985.43	3539.47
Saturated (KCl-mud)	10152.50	3278.64	9997.03	3331.42
Saturated (Polymer-mud)	10290.29	3224.99	10134.8	3269.91

with drilling fluids has a considerable effect on mechanical properties of rocks. However, the level of this effect is controlled by the type and composition of drilling fluid. In order to explain the effect of drilling fluid compositions on wellbore stability, the fracture and collapse pressures were calculated for vertical and deviated well profiles under dry and saturated conditions and given in Table 3.

The fracture pressures calculated by ignoring the tensile strength is considerably lower than the those calculated by regarding the tensile strength. So if there isn't any discontinuity around the borehole wall, tensile strength values of rocks should be regarded in the calculations of fracture pressure. In order to take into account the tensile strength of rocks located around the borehole wall, tensile strength tests should be carried out on rock samples located at interested depth.

It is clear from Table 3 that while the fracture pressures obtained for deviated well is lower than those calculated for vertical well, the collapse pressures of deviated well profile are higher than those determined for vertical well profile for all conditions regarded in the calculations. On the other hand, the data given in Table 2 refers that the drilling composition is also effective on both fracture and collapse pressure values. The most critical condition in terms of fracture pressure (lower fracture pressures) and collapse pressure (higher collapse pressure) was obtained under bentonite-based drilling fluid saturation. The optimum fracture and collapse pressure values were calculated under dry and polymer-based drilling fluid saturation, respectively. The variations in fracture and collapse pressures due to saturation are also represented in Figure 2.

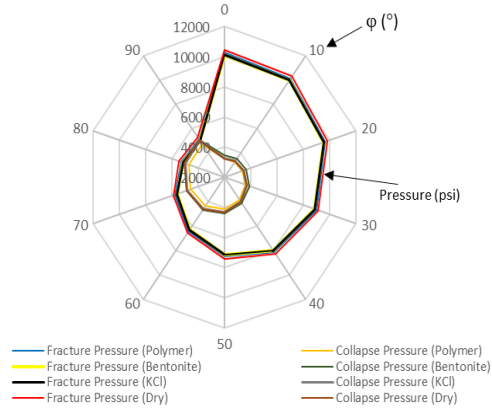


**Figure 2.** The variation in fracture and collapse pressures due to saturation by different drilling fluids.

*Şekil 2. Farklı sondaj sıvılarıyla doyurulmaya bağlı olarak çatlatma ve çökme basınçlarındaki değişim*

The effect of inclination angle of well on the results was also examined in this study. Figure 3 shows that as the inclination angle increases, the collapse pressure is also increased. However, inclination angle is inversely proportional to the fracture pressure. It means that as the inclination angle increases collapse and fracture pressure values close to each other. In order to satisfy the borehole stability, the mud weight window should be kept between collapse and fracture pressure values. So the mud pressure should be selected by considering the fracture and collapse pressures. Therefore mud pressure interval, which should be used not to give reason any kind of instability problems, is reduced as the inclination angle increases. However, this general trend may differ if drilling mud of different composition is used.

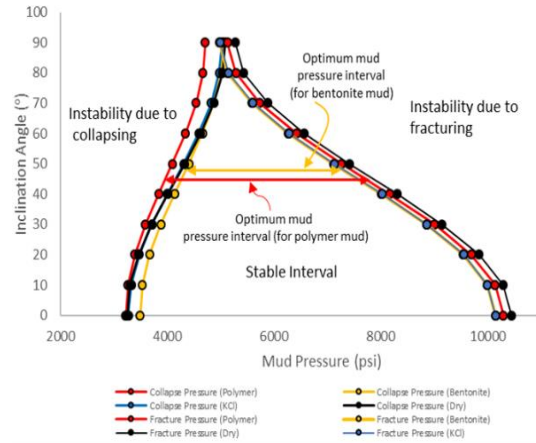
The gradient curves of fracture and collapse pressure are overlapped at inclination angle of  $84.15^\circ$  due to saturation by bentonite based mud as shown in Figure 4. It shows that a stable mud pressure interval does not exist for inclination angle values greater than  $84.15^\circ$  in case of using bentonite drilling mud.



**Figure 3.** The effect of inclination angle of well on the fracture and collapse pressure values

*Şekil 3. Kuyunun düşeyden sapma açısının çatlatma ve çökme basınç değerleri üzerindeki etkisi*

A similar situation is valid due to saturation by KCl based mud. On the other hand, if the polymer based drilling fluid is used, stable mud pressure interval is satisfied for all inclination angle values and this interval is larger than the interval obtained for dry condition for high inclination angle values (Figure 3).



**Figure 4.** The gradient curves of fracture and collapse pressure under dry and saturated conditions.

*Şekil 4. Kuru ve doymuş koşullar altında çatlatma ve çökme basınçları gradyan eğrileri*

As stated by Zosel (1985), higher strength values are generated as a result of polymer usage and this is mainly due to adhesive bond created by polymers. It is clear from the results of analyses that in-situ field conditions should be regarded for sensitive calculation of collapse and fracture pressure. It means that the geomechanical properties of rock samples around the borehole walls should be determined under the drilling fluid saturation. Therefore mud weight window should be calculated by considering the experimental data obtained under the in-situ conditions.

### CONCLUSIONS

The effect of drilling fluid type on collapse and fracture pressures was evaluated in this paper. Considerable effect of saturation on mechanical properties for different kind of rocks studied a few investigators was firstly examined. Then two different wellbore trajectories (vertical and deviated) were considered to measure the effect of variation of

geomechanical properties under the saturation on collapse and fracture pressures. The results of analyses showed that type of drilling mud has an significant effect on fracture and collapse pressure values. While the bentonite and KCl based drilling fluids create adverse effect on fracture and collapse pressure values, the values calculated under polymer based drilling fluid saturation are close to the values calculated for dry condition. The results are also effective on mud weight window, which is important to satisfy the stability condition of wellbores. However the analyses conducted in this study use a few assumptions and literature data, it should be also noted that new studies considering in-situ geomechanical and stress data may also be helpful for further improvement.

### ACKNOWLEDGEMENT

The author would like to thanks to the reviewers for their constructive comments.

### REFERENCES

- Aadnoy, B., Cooper, I., Miska, S., Mitchell, R.F., Payne, M.L., 2009. *Advanced Drilling and Well Technology*. Society of Petroleum Engineers, USA.
- Aadnoy, B., Looyeh, R., 2011. *Petroleum rock mechanics – Drilling operations and well design*. Gulf Professional Publishing, Oxford.
- Aadnoy, B., Looyeh, R., 2019. *Petroleum rock mechanics – Drilling operations and well design*. Gulf Professional Publishing, United Kingdom.
- Azar, J.J., Samuel, G.R., 2007. *Drilling engineering*. PennWell Corporation, Tulsa, Oklahoma, USA.
- Ewy, R.T., Bovberg, C.A., Stankovich, R.J., 2008. Shale Triaxial strength alteration due to brine exposure. 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium (USRMS), San Francisco, California, ARMA-08-304.
- Karakul, H., 2018. Effects of drilling fluids on the strength properties of clay-bearing rocks. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 450.
- Karakul, H., 2021. Investigation of fracture properties of rocks under drilling fluid saturation. *Environmental Earth Sciences*, 80, 496.
- Liu, C., Huang, Y., Stout, M.G., 1998. Enhanced mode-II fracture toughness of an epoxy resin due to shear banding. *Acta Materialia*, 46 (16), 5647-5661.

- Mkpoikana, R., Dosunmu, A., Eme, C., 2015. Prevention of shale instability by optimizing drilling fluid performance. SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Nigeria, SPE-178299-MS.
- Yan, C., Deng, J., Yu, B., 2013. Wellbore stability in oil and gas drilling with chemical-mechanical coupling. The Scientific World Journal, Vol. 2013, Article ID 720271.
- Yu, B., Yan, C., Nie, Z., 2013. Chemical effect on wellbore instability of Nahr Umr shale. The Scientific World Journal, Vol.2013, Article ID 931034.
- Zhang, F, Liu, H.B., Cui, S., Meng, Y.F. and Wang, J.J., 2021. Influence of the Weakening Effect of Drilling Fluid on Wellbore Stability in Anisotropic Shale Formation. Frontiers in Physics, Vol. 9, 745075.
- Zosel, A., 1985. Adhesion and tack of polymers: influence of mechanical properties and surface tensions. Colloid and Polymer Science ,263, 541-553.