



İzmir'i etkileyebilecek büyük depremlerin makine öğrenimi yöntemleriyle tahmin edilmesi

Prediction of major earthquakes that may affect İzmir using machine learning methods

AYHAN DOĞAN ^{1*} 

¹ Hacettepe Üniversitesi, Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 9 Aralık (*December*) 2023 Kabul (*accepted*): 16 Nisan (*April*) 2024

ÖZ

Deprem, üzerinde yaşadığımız dünya üzerindeki en büyük doğal afetlerdendir. İnsanlık tarihten günümüze depremlerden dolayı çok sayıda can ve mal kaybı yaşamıştır. Bu nedenle tarih boyunca insanlar depremleri önceden tahmin edebilmek ve önlemler alabilmek için çeşitli çalışmalar yapagelmiştir. Ancak dünyanın karmaşık jeolojik yapısı ve çeşitli dinamikleri nedeniyle depremleri tahmin etmek oldukça zordur. Yapay zeka çalışmalarında son yıllarda meydana gelen gelişmeler sayesinde birçok alanda yeni çözümler ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak gelecekte İzmir ilini etkileyebilecek 6 ve üzeri büyüklükteki depremlerin odak konumları ve odak derinlikleri Random Forest (RF), Decision Tree (DT), Light Gradient Boosting Machine (LGBM), Category Boosting (CB), Support Vector Machine (SVM) makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Girdi verisi olarak 1900-2023 arasındaki deprem katalog verileri ile Gutenberg-Richter yasasına göre bu verilerden üretilen a ve b katsayıları birlikte kullanılmıştır. Sonuçlar RMSE, MAE ve R² metrikleriyle değerlendirilmiştir. Gelecekte İzmir'i etkileyebilecek depremlerin tahmin edilen odak konumları ve derinlikleri tablo halinde verilmiş ve harita üzerinde gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem tahmini, İzmir, makine öğrenimi, odak konumu, odak derinliği

ABSTRACT

Earthquakes are among the most devastating natural disasters worldwide, causing significant loss of life and property throughout history. Therefore, numerous earthquake prediction studies have been conducted, and precautions have been taken. However, due to our planet's complex geological structure and various dynamics, predicting earthquakes remains challenging. New solutions have emerged in various fields thanks to recent advancements in artificial intelligence research. In this study, we predict the hypocenter locations and depths of earthquakes of magnitude 6 or greater, which could impact the İzmir province in the future. We utilize machine learning techniques, specifically Random Forest (RF), Decision Tree (DT), Light Gradient Boosting Machine (LGBM), Category Boosting (CB), and Support Vector Machine (SVM) methods to make

these predictions. The study utilized earthquake catalog data collected between 1900 and 2023, and a and b coefficients generated from this data based on the Gutenberg-Richter law. The evaluation of the results was carried out using RMSE, MAE, and R^2 metrics. The map showcases the predicted hypocenter locations and depths of future earthquakes that could impact İzmir.

Keywords: Earthquake prediction, İzmir, machine learning, hypocenter location, hypocenter depth

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1402618>

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

GİRİŞ

Deprem, genellikle yer altındaki plakaların birbirine çeşitli şekillerde temas etmesi ve fay hattı boyunca oluşan gerilme enerjisinin ortaya çıkması sonucu oluşan sismik olaylardır. Depremler sonucunda ortaya çıkan sismik enerji tüm doğayı etkiler. Ancak depremler sonucunda insanlık açısından en büyük kayıplar, yeterli mühendislik hizmeti almamış veya doğru inşa edilmemiş yapılar nedeniyle meydana gelir. Depremler çok büyük yer tabakalarının hareketleri sonucunda meydana geldiğinden bu hareketleri engellemek mümkün değildir. Depremin neden olduğu zararları en az indirmek için genellikle iki ana konu üzerinde durulmaktadır. Bunlar, depremleri önceden tahmin edip önlemler alabilmek ve depreme dayanıklı yapılar inşa edebilmektir. Depremlerin mekanizması karmaşık olduğundan depremleri önceden tahmin edebilmek çok zordur. Bu nedenle toplumlar depremin zararlarından korunabilmek için depreme dayanıklı yapılar inşa etmeye çalışmaktadır. Bu önemli bir çözümdür. Ancak yine de ekonomik kaygılar, denetim eksikliği, yeterli mühendislik hizmetinin alınmaması, mevzuat yetersizlikleri, üretim hataları ve yeterli bilincin oluşmaması gibi çeşitli nedenlerle uygulamada sıklıkla istenilen seviyede başarılı sonuçlar alınamamaktadır.

İnsanlık tarihi boyunca depremlerin tahmin edilebilmesi önemli olmuştur. Bu amaçla çok

çeşitli çalışmalar yapılmıştır. İlk zamanlarda yeraltı suları, yeraltından çıkan gazlar gibi birçok doğa olayı gözlenmiş, çeşitli hayvanların depremlerden kısa süre önce davranışlarındaki değişiklikler incelenerek depremler tahmin edilmeye çalışılmıştır (Rikitake, 1968; Barsukov vd., 1984; Kirschvink, 2000). Sonra tahmin amacıyla elektrik ve sismik yöntemler başta olmak üzere çeşitli bilimsel yöntemler de kullanılmıştır (Whitcomb vd., 1973; Moustra vd., 2011). Yapılan bu çalışmalar genellikle depremden çok kısa süre öncesinde ortaya çıkan belirtileri olasılıklı olarak kısmen tahmin edebilmektedir (Hayakawa ve Hobara, 2010). Depremler olmadan önce yeterli zamana sahip olabilmek ve öncelikle can kaybını en aza indirebilmek için önlem alabilmek amacıyla depremin zamanını, odak konumunu, derinliğini ve büyüklüğünü saatler ve günler öncesinden tahmin edebilmek çok önemlidir (Michael vd., 2020).

Günümüzde yapay zeka çalışmalarında meydana gelen gelişmeler, deprem tahmini yapabilmek için umut vericidir. Asencio-Cortés vd., (2017) Japonya'da yedi gün içerisinde olabilecek depremleri tahmin etmişlerdir. Çalışmalarında çeşitli yapay zeka yöntemleri kullanmışlar ve kullandıkları yöntemler arasında en başarılı yöntemin Artificial Neural Network (ANN) (Yapay Sinir Ağları (YSA)) olduğunu söylemişlerdir. Benzer bir çalışma Malezya'da deprem tahmini için yapılmış ve iki yöntem arasından ANN yönteminin daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır (Essam

vd., 2021). Diğer bir çalışmada deprem anındaki kırılmanın nasıl olduğunu ve dalga yayılımını anlamak için ANN ve RF yöntemleri kullanılarak tahminler yapılmıştır (Ahamed ve Daub, 2019). Bazı çalışmalarda çeşitli derin öğrenme yöntemleri kullanılarak depremin zamanı, büyüklüğü ve yeri tahmin edilmeye çalışılmıştır (Berhich vd., 2022; Berhich vd., 2023). Arazi verileri yerine laboratuvar deneylerinden elde edilen verileri kullanarak depremin zamanını ve depremlerle ilgili diğer parametreleri tahmin eden çalışmalar da vardır (Rouet-Leduc vd., 2017; Wang vd., 2022).

Sezer, (2004) yaptığı çalışmayla İzmir'in depremselliğini ve deprem riskini, büyük depremlere standart sapma analizi Gumbel-Gutenberg-Richter yöntemleriyle belirlemeye çalışmıştır. Saç ve Camgöz, (2005) İzmir ve çevresindeki depremlerle radon gazı konsantrasyonları arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Sayıl, (2013) Batı Anadolu bölgesi için multiple linear regression (çoklu doğrusal regresyon) tekniğini kullanarak elli yıl içerisinde büyük bir deprem olasılığını değerlendirmiştir. Çalışmaya göre bölgede deprem olasılığı yüksek çıkmıştır. Öncel Çekim vd., (2023) Türkiye'nin batısını kapsayan ve deprem büyüklük tahminine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada 1970 ile 2020 yılları arasındaki deprem katalog bilgileri aylık ortalama deprem büyüklüklerine göre gruplandırılarak kullanılmıştır. Çalışmada çeşitli istatistik ve derin öğrenme yöntemleri kullanılmış, üç yıllık periyotta büyüklük değerlerine bakılarak en iyi deprem tahmin sonuçlarının LSTM yöntemiyle elde edildiği vurgulanmıştır. Çalışmada tahmin edilen büyüklüklerin 4.5'ten küçük olduğu dikkat çekmektedir. Bulbul, (2023) yaptığı çalışmada uzay hava koşullarını dikkate alarak iyonosferde meydana gelen değişiklikleri deprem öncesi ve sonrasında incelemiştir. Çalışmada 2020 yılında meydana gelen İzmir Seferihisar depremi de araştırılmıştır. Çalışma

sonuçlarında 6.5 Mw'den daha büyük depremlerin 1-3 hafta öncesinden günlük toplam elektron içeriği (TEC) anomalilerine neden olabildiği belirtilmektedir. Demirelli vd., (2023) yaptıkları çalışmada İzmir-Balıkesir bölgesine ait jeodezik gerinim hızları, artçı deprem bilgilerinin çıkarıldığı 1970-2021 arasındaki deprem katalog bilgileri, fay uzunlukları ve türlerini kullanarak gerçekleşmiş depremler üzerinde çeşitli makine öğrenimi yöntemlerinin tahmin başarılarını test etmişlerdir. Kullandıkları yöntemlerden RF ve XGBoost yöntemlerinin en iyi sonuçları verdiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada İzmir ve yakın çevresi için gelecekte olabilecek 6 ve üzeri büyüklükteki depremlerin odak koordinatları ve odak derinlikleri makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak tahmin edilmektedir. Bu tahminlerin başarıları performans metrikleriyle ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Çalışma alanı

Türkiye'nin nüfus olarak en büyük üçüncü şehri ve deprem riski yüksek olan İzmir ili çalışma alanı olarak seçilmiştir. İzmir ili ve çevresi çok sayıda aktif fay hattı üzerindedir. Şekil 1'de çalışma alanı ve bölgedeki aktif fay hatları gösterilmektedir.

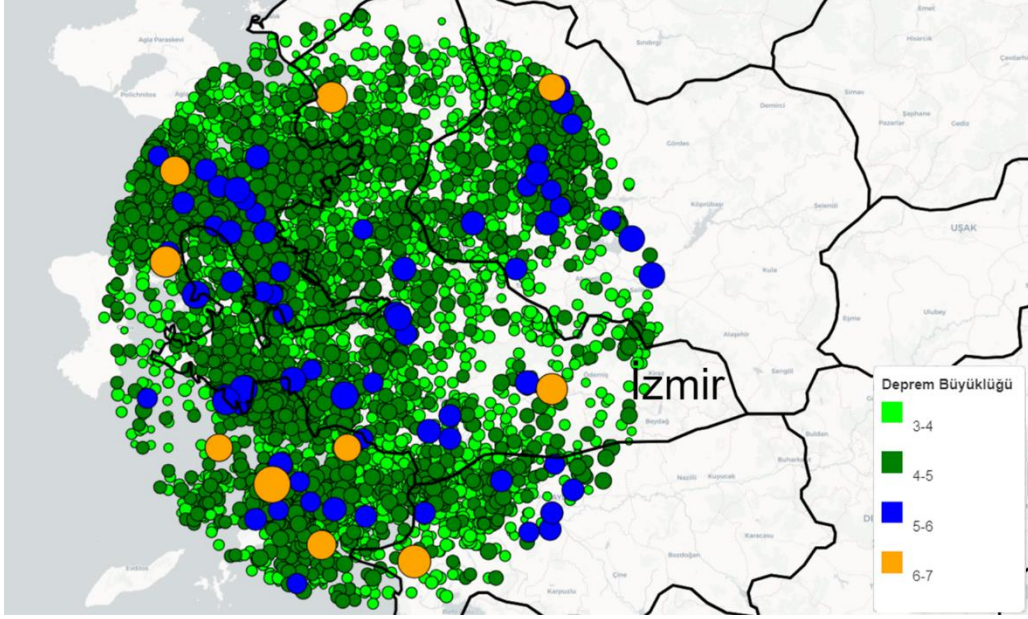
Veri

İzmir'i etkileyebilecek depremlerle ilgili olarak deprem katalog verileri Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nden (KOERI) alınmıştır. Veriler 01.01.1900 tarihi ile 30.11.2023 tarihleri arasında İzmir'in en yoğun yerleşim yerlerinden biri olan Konak ilçesi merkez kabul edilerek 100 km yarıçapındaki alanda meydana gelmiş 3 ve üzeri büyüklükteki depremleri kapsamaktadır (Şekil 1). Bu alan 2020 yılında depremin merkez üssü İzmir'in Seferihisar ilçesine bağlı Sığacık açıklarında Ege denizi içinde meydana gelen depremi de kapsamaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı ve bölgedeki aktif fay hatları (MTA, 2023)

Figure 1. Study area and active fault lines in the region (MTA, 2023)



Şekil 2. Çalışmada kullanılan depremlerin konumları ve büyüklükleri

Figure 2. The locations and magnitudes of the earthquakes used in the study

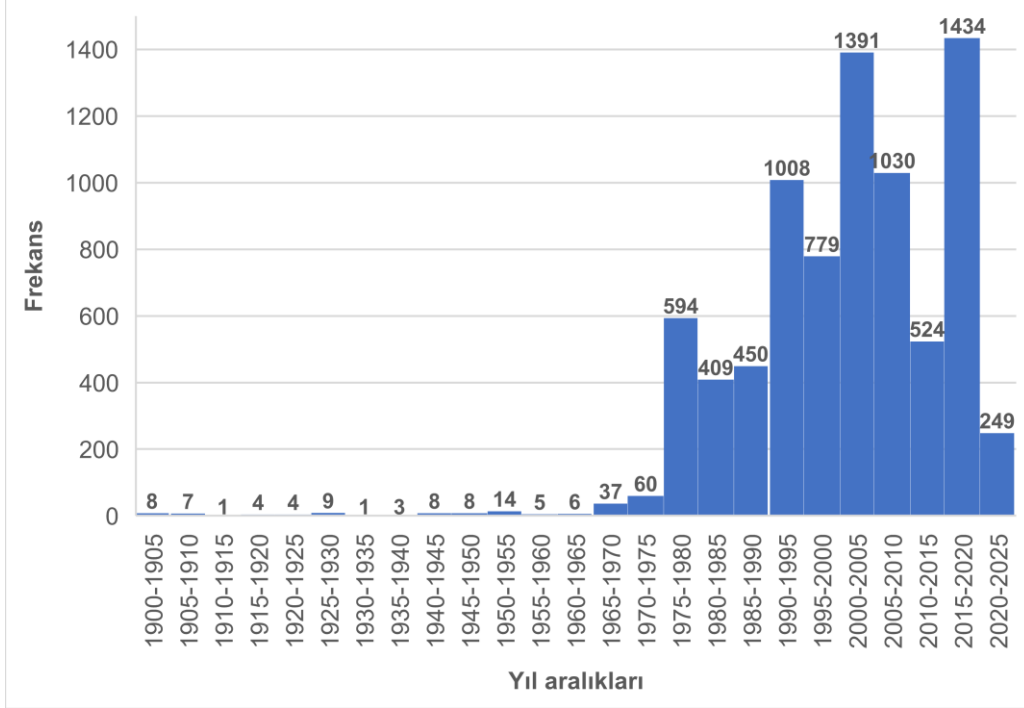
Belirtilen kriter aralıklarında farklı büyüklüklerde toplam 8043 deprem kaydı mevcuttur.

KOERI web sitesinden alınan verilerde magnitüde değerleri farklı büyüklük ölçülerine sahip olduğundan (Md, MI, Ms, Mb, Mw) hepsi Mw büyüklüğüne dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm için Kadıroğlu ve Kartal, (2016)'ın Türkiye için önermiş olduğu dönüşüm bağıntıları kullanılmıştır. Veri içerisindeki deprem oluş tarihi, enlem, boylam, derinlik ve büyüklük verileri alınmıştır.

Bu verilerden Gutenberg-Richter yöntemindeki a ve b katsayıları elde edilmiştir. Tüm veriler standartlaştırma işlemiyle makine öğreniminde kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Çalışmada kullanılan depremlerin konumları ve büyüklüklerine göre harita üzerinde gösterimi Şekil 2'de verilmektedir.

Kullanılan verilere ait istatistiksel bilgiler Tablo 1'de verilmektedir. Bölgede 5 ve üzeri büyüklükte 86 deprem, 6 ve üzeri büyüklükte 10 deprem, 6.5 ve üzeri büyüklükte 2 deprem meydana gelmiştir. Kayıtlara göre 1900 yılından bu yana bölgede 7 ve üzeri büyüklükte deprem olmamıştır.

Kullanılan deprem verilerinin sıklığını gösteren histogram Şekil 3'de verilmektedir. 1965'li yıllardan itibaren deprem sayısında önemli bir artış görülmektedir. Bu durum bölgedeki sismik aktivitenin arttığını düşündürmektedir. Buna ek olarak deprem kayıt istasyonlarının sayısındaki artış da bu sonuçlar üzerinde etkili olabilir. Histogramdaki başka bir dikkat çekici durum ise 1975 yılından başlayarak yaklaşık ortalama her 10-15 yıllık periyotlarla daha fazla sayıda deprem olması ve bunların arasındaki yıllarda ise önceki döneme göre görece azalmasıdır.



Şekil 3. Yıllara göre Mw ≥ 3 depremlerin histogramı

Figure 3. Histogram of earthquakes with a magnitude of Mw ≥ 3 by year

Tablo 1. Büyüklüklerine göre deprem sayıları

Table 1. Number of earthquakes by magnitude

Büyüklük (Mw)	Deprem sayısı
Mw ≥ 4	1869
Mw ≥ 5	86
Mw ≥ 6	10
Mw ≥ 6.5	2

Metot

Bu çalışmada RF, DT, LGBM, CB, SVM makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak gelecekte İzmir ve yakınlarında olması muhtemel büyük depremlerin (Mw=6 ve üzeri) deprem odak koordinatları ve odak derinlikleri

tahmin edilmiştir. Makine öğrenimi modellerinin eğitim ve test aşamalarında 5 katlı K-Fold çapraz doğrulama yöntemi kullanılmış ve performans metrikleriyle (RMSE, MAE ve R²) değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmalarda 1900-2023 yılları arasındaki deprem katalog verileri ile birlikte bu verilerden üretilen Gutenberg-Richter (GR) yasasındaki a ve b katsayıları birlikte kullanılmıştır. GR yasasında depremlerin görülme sıklığı ile büyüklükleri arasındaki ampirik ilişki Eşitlik 1 ile ifade edilmektedir.

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

Bu eşitlikteki N değeri, M'ye eşit veya daha

büyük depremlerin toplam sayısı, a sabiti depremselliğin aktivite düzeyi, b sabiti ise frekans-büyüklik dağılımının eğilimi hakkında bilgi verir (Bayrak vd., 2017). Buradaki a değeri deprem sayısı ve gözlem aralığından da etkilenmektedir (Eyidoğan, 2020). GR yasasından elde edilen değerlerin kullanılma nedenlerinin başında, özellikle b değerinin zamansal değişimleri ile depremlerin oluşumu arasındaki ilişkinin birçok çalışmayla ortaya konulmuş olmasıdır (Nuannin vd., 2005; Wiemer ve Schorlemmer, 2007; Morales-Esteban vd., 2013).

Random Forest (Rastgele Orman)

RF, temelde ağaç tabanlı bir makine öğrenimi yöntemidir. Ağaç tabanlı modeller, önceden belirlenmiş bir durma koşulu karşılınca kadar belirli bir kritere dayalı olarak verilen veri kümesini yinelemeli olarak iki gruba ayırmayı içerir (Schonlau ve Zou, 2020). RF, hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılan bir topluluk (ensemble) yöntemidir. İlk defa Leo Breiman tarafından 2001 yılında tanıtılmıştır (Breiman, 2001). RF yöntemi veri setinden rastgele alt örnekler (bootstrap) üretir ve yeni veri setleri oluşturur. Bu şekilde genel modele uyumu artırmaya çalışır. Oluşturduğu örneklemeler üzerinde derinliği sınırlı ağaçlar oluşturur. Bu sayede aşırı öğrenme önlenir. Ağacın her düğümünde özellik seçimi yapar. Bu işlem her ağacın diğerinden farklı olmasını sağlar. Sonuçta sınıflandırma için oylama, regresyon için ortalama olarak hedefe ulaşır.

Decision Tree (Karar Ağacı)

DT yöntemi karar kurallarını ve sonuçlarını içeren ağaç benzeri bir yapıya sahiptir. Ağaç, kök düğümünden başlar, sonuçları temsil eden yaprak düğümlerinde sonlanır. Her düğüm bir özellik veya test koşuluyla ilişkilidir. Her kenar ise belirli bir test koşulunun doğru veya yanlış olmasına göre gidilecek yolu gösterir. Bu

yöntem eğitim verilerine aşırı uyum gösterebileceğinden aşırı öğrenmeye meyillidir. Bu sorunu çözmek için ağaçların derinliği sınırlanır veya ağacın gereksiz dalları budanır (Maimon ve Rokach, 2014; Correa Bahnsen vd., 2015).

Light Gradient Boosting Machine (Hafif Gradyan Artırma Makinesi)

LGBM, bir tür gradyan artırma algoritmasıdır. Özellikle büyük veri setleri ve yüksek boyutlu özellik uzayları ile başa çıkmak üzere optimize edilmiştir. XGBoost modelinden temel farkları, eğitim sürecini hızlandırmak, bellek tüketimini azaltmak ve derinlik kısıtlamalarıyla yaprak bazında büyüme stratejisi uygulamaktır. Bunun için histogram tabanlı algoritmalar kullanır (Fan vd., 2019). LGBM, geleneksel gradyan artırma algoritmalarına göre eğitim sürecini çok hızlandırır (Ke vd., 2017). Bu yöntemde "leaf-wise" büyüme stratejisi benimsendiğinden, bir ağacın en çok bilgi içeren dalına odaklanarak daha hızlı eğitim sağlanır. LGBM, adım adım zayıf öğreniciler ekleyerek, hataları düzelterek ve bilgi kazancını artırarak bir topluluk modeli oluşturur. Böylece, büyük veri setleri ve yüksek boyutlu özellik uzayları ile çalışırken yüksek performans sağlar (Guo vd., 2023).

Category Boosting (Kategori Artırma)

CB, kategorik değişkenlere özel olarak tasarlanmış bir gradyan artırma yöntemidir. Sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılır (Prokhorenkova vd., 2018). Simetrik ağaç büyümesi yöntemini benimser. Bu yöntem ağaçların daha hızlı büyümesine imkân tanır. Daha önce eklenmiş ağaçların hatalarını düzeltmek üzere yeni ağaçların eklenmesini kontrol eder. Bayes düzenleştirmesi yöntemini kullanarak aşırı öğrenmeyi kontrol altına alır. Sınıf dengesizliği durumuna karşı dirençlidir (Hussain vd., 2021). Eğitim süresini kısaltır ve düşük bellek tüketimi sağlar. Böylece özellikle büyük veri setleri üzerinde çalışırken avantaj

sağlar. Hiperparametreleri otomatik ayarlayabildiğinden el ile müdahaleyi azaltır (Prokhorenkova vd., 2018; Gupta vd., 2021; Baik vd., 2023)

Support Vector Machine (Destek Vektör Makinesi)

SVM, özellikle yüksek boyutlu özellik uzayları ve non-linear veri setlerinde etkili olan bir öğrenme modelidir. Sınıflar arası ayrımı maksimum yapmayı amaçlar. İki sınıf arasındaki en büyük marjı sağlayan bir hiperdüzlem oluşturur (Doğan vd., 2023). Çeşitli çekirdek fonksiyonları kullanarak doğrusal ayrımın mümkün olmadığı durumlarda veri noktalarını daha yüksek

boyutlu uzaya taşıyarak daha etkili çözümler bulmaya çalışır (Cortes ve Vapnik, 1995; Soman vd., 2009).

BULGULAR

Çalışma alanında gelecekte olması muhtemel 6 ve üzeri depremlerin odak konumları ve derinliklerini tahmin edebilmek için beş farklı makine öğrenimi yöntemiyle eğitimler gerçekleştirilmiştir. K-Fold çapraz doğrulama sonucunda performans metrikleriyle elde edilen test sonuçları Tablo 2'de verilmektedir. Test sonuçları incelendiğinde tüm yöntemlerin oldukça başarılı olduğu, bunlar içerisinde en başarılı yöntemin ise RF yöntemi olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Makine öğrenimi tahminlerine ait metriklerin sonuçları

Table 2. Results of machine learning prediction metrics

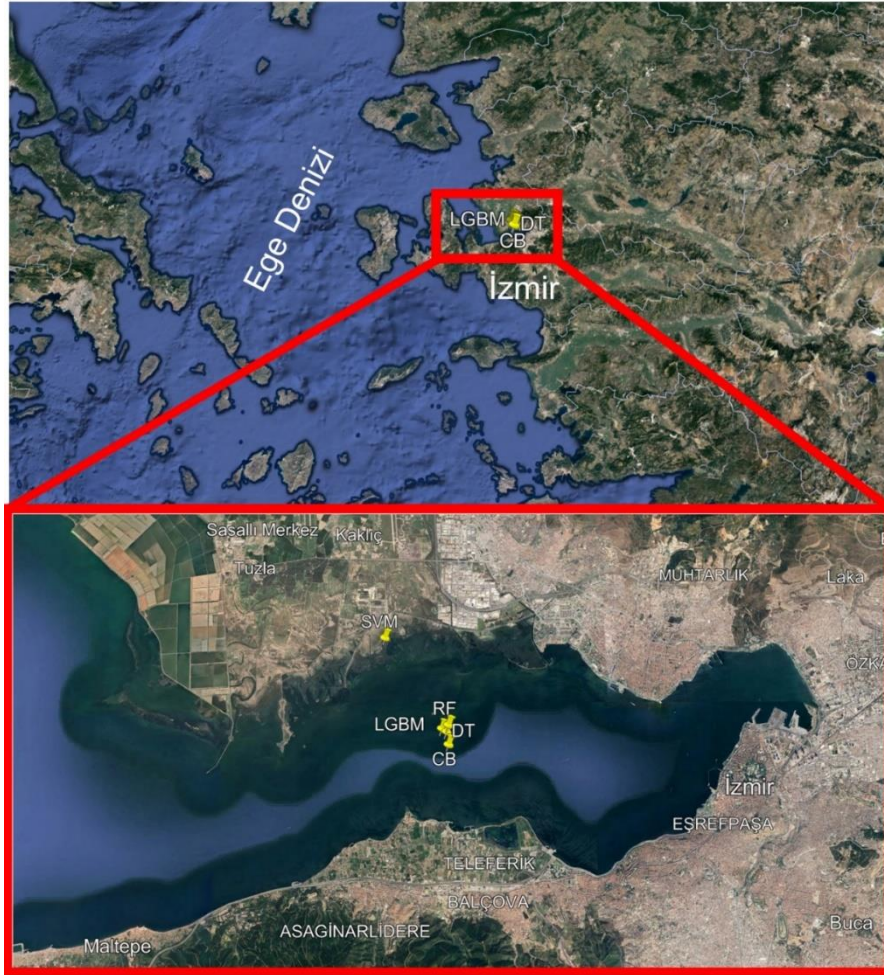
		SVM	CB	LGBM	RF	DT
RMSE	Enlem	0.055	0.004	0.003	0.001	0.001
	Boylam	0.057	0.006	0.003	0.001	0.001
	Derinlik	3.950	0.419	0.767	0.197	0.254
MAE	Enlem	0.040	0.003	0.002	0.001	0.001
	Boylam	0.040	0.003	0.002	0.001	0.001
	Derinlik	0.584	0.064	0.054	0.011	0.015
R ²	Enlem	0.985	0.998	0.998	0.999	0.999
	Boylam	0.986	0.998	0.998	0.999	0.999
	Derinlik	0.764	0.997	0.991	0.998	0.998

Yapılan beş makine öğrenimine ait odak enlem, boylam ve derinlik tahmin sonuçları Tablo 3'te verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde SVM yöntemi dışında diğer dört yöntemle (CB, LGBM, RF, DT) elde edilen odak konumları birbirine çok yakındır ve

aralarındaki uzaklık ortalama 0.3 km'dir. Bu dört yöntemle tahmin edilen odak konumları İzmir körfezi denizi içerisinde göstermektedir (Şekil 4). SVM yöntemiyle tahmin edilen odak konumu ile RF yöntemiyle elde edilen odak konumu arasındaki uzaklık ise sadece 3.5

Tablo 3. Büyüklüğü 6 ve üzeri olan deprem tahmin sonuçları**Table 3.** Earthquake prediction results with magnitude 6 and above

Makine Öğrenimi Yöntemi	Odak		
	Enlem	Boylam	Derinlik (km)
SVM	38.46668236	27.00774065	12.04245709
CB	38.43396077	27.03192379	9.48316773
LGBM	38.43874799	27.02946647	10.14100136
RF	38.43980000	27.03191800	9.30000000
DT	38.43780000	27.03120000	9.30000000

**Şekil 4.** Büyüklüğü 6 ve üzeri olabilecek depremler için tahmin sonuçları (Sarı renkli yer işaretleri: SVM, LGBM, RF, DT, CB)**Figure 4.** Prediction results obtained for earthquakes of magnitude 6 and above (Yellow landmarks: SVM, LGBM, RF, DT, CB)

km'dir. Bilindiği gibi deprem odağına olan uzaklık depremin etkisini etkileyen önemli faktörlerdendir. Elde edilen bulgular gelecekte İzmir'de 6 ve üzerinde depremlerin şehir merkezinin çok yakınlarında olabileceğini göstermektedir. Bu durum depremde oluşabilecek zararı artırabilir.

TARTIŞMA

İzmir ve yakınlarında bugüne kadar yapılan deprem tahmini çalışmaları bu çalışmada kullanılan yöntemlerden farklıdır. Bu çalışmada kullanılan makine öğrenimi yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Aynı zamanda İzmir için deprem katalog bilgileri ile birlikte GR yasasının a ve b sabitlerinin birlikte kullanıldığı herhangi bir makine öğrenimi çalışması da yoktur. Yapılan çalışmalardan bazıları tüm Batı Anadolu bölgesini kapsayacak şekilde farklı yöntemlerle yapılmış, İzmir özelinde yapılmamıştır (Sayıl, 2013; Öncel Çekim vd., 2023). Buna ek olarak bazı çalışmalarda kısıtlı veri seti kullanılmıştır. Çalışmaların birçoğu deprem katalog verilerini kullanmışlar bu verilerden deprem tahmini için anlamlı yeni özellikler türetmemişlerdir. Bir çalışmada yine bu çalışmadan farklı olarak, Batı Anadolu bölgesi için GR yasasının sadece b değeri, gerinim hızları ve fay bilgileri ek özellik olarak kullanılmıştır (Demirelli vd., 2023). Farklı verilerle (TEC, radon gazı vb.) ve başka yöntemlerle yapılmış çalışmalar bulunmaktadır (Saç ve Camgöz, 2005; Bulbul, 2023; Pırtı vd., 2023).

Makine öğrenimi eğitim ve test çalışmalarında mümkün olduğunca veri sayısının çok olması istenir. Depremlerin tekrarlama periyotları bazen onlarca bazen de yüzlerce yıl olabilmektedir. Bu nedenle gelecekteki depremleri tahmin edebilmek için mümkün olduğunca çok sayıda geçmiş yıllara ait deprem verisinin kullanılmasıyla tahmin

başarısının artması beklenmektedir. Ancak geçmişte yapılan bazı çalışmalarda hem yıl olarak hem de deprem büyüklüğü olarak kısıtlı veri kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada 1900-2023 yılları arasında 123 yıllık deprem katalog verisi, büyüklüğü 3 ve üzeri tüm depremleri kapsayacak şekilde kullanılmıştır.

SONUÇ

Depremleri olmadan tahmin edebilmek tarih boyunca insanlar için önemli olmuştur. Bu amaçla çok sayıda bilimsel çalışma yapılmıştır. Makine öğrenimi ise son yıllarda kullanılan yeni tahmin araçları arasındadır. Makine öğrenimi oldukça karmaşık olan deprem mekanizmasını çok sayıda deprem verisini ve bu verilerden elde edilen anlamlı özellikleri de kullanarak oldukça isabetli tahminler yapabilmektedir.

Bu çalışmada İzmir için gelecekte olabilecek büyük depremlerle ilgili tahminler yapılmış ve deprem odak konumu ve derinlikleri tahmin edilmiştir. Bu amaçla deprem katalog bilgileri ve bu verilerden üretilen GR yasası a ve b sabitleri kullanılarak makine öğreniminin tahmin başarısı artırılmaya çalışılmıştır. Performans metrikleri incelendiğinde tahmin başarıları tüm yöntemlerde yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte metriklere göre en başarılı yöntem RF yöntemidir. RF yönteminden sonra en başarılı yöntem ise DT yöntemidir. Diğer yöntemlerde sıralama enlem, boylam ve derinliğe göre değişmektedir. RF yöntemi enlem ve boylam tahmin başarısı RMSE ve MAE metriklerine göre 0.001, R^2 metriğine göre 0.999'dur. Derinlik tahmininde ise RMSE metriğine göre 0.197, MAE metriğine göre 0.011, R^2 metriğine göre 0.998 bulunmuştur. Tüm makine öğrenimi çalışmalarından elde edilen odak konumu tahmin sonuçları birbirine yakındır. Sonuçlar incelendiğinde gelecekte olabilecek >6 büyüklükteki bir depremin odak konumunun İzmir körfezinde olabileceği

tahmin edilmektedir. Odak derinliğine ait sonuçlar incelendiğinde gelecekte olabilecek 6 ve üzeri büyüklükteki bir depremin yaklaşık 9 ile 12 km aralığındaki bir derinlikte olması beklenmektedir. Tüm esnek hesaplama yöntemlerinde olduğu gibi bu çalışmada bulunan tahmin değerleri, belirli bir güven aralığında değişkenlik göstermektedir. Zaman içerisinde deprem katalog bilgilerinin artmasıyla tahmin başarı oranlarının yükselmesi de beklenen bir durumdur. Ayrıca gelecek ile ilgili yapılan deprem tahminlerinin depremlerin karmaşık mekanizması ve yeraltındaki tüm dinamiklerin bilinmemesi sebebiyle kesinlik ifade etmediğini de belirtmek gerekir. Bununla birlikte bu çalışmayla karar vericiler, planlamacılar ve uygulayıcılara yapacakları çalışmalar için önemli bilgiler sağlanırken aynı zamanda bilimsel literatüre de katkıda bulunulmuştur.

KAYNAKLAR

- Ahamed, S., Daub, E. G., 2019. Machine learning approach to earthquake rupture dynamics. arXiv preprint arXiv:1906.06250.
- Asencio-Cortés, G., Martínez-Álvarez, F., Troncoso, A., Morales-Esteban, A., 2017. Medium–large earthquake magnitude prediction in Tokyo with artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 28(5), 1043-1055. <https://doi.org/10.1007/s00521-015-2121-7>
- Baik, S. M., Hong, K. S., Park, D. J., 2023. Application and utility of boosting machine learning model based on laboratory test in the differential diagnosis of non-COVID-19 pneumonia and COVID-19. *Clinical Biochemistry*, 118, 110584. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2023.05.003>
- Barsukov, V. L., Varshal, G. M., Zamokina, N. S., 1984. Recent results of hydrogeochemical studies for earthquake prediction in the USSR. *Pure and Applied Geophysics* 122(2), 143-156. <https://doi.org/10.1007/BF00874588>
- Bayrak, E., Yılmaz, Ş., Bayrak, Y., 2017. Temporal and spatial variations of Gutenberg-Richter parameter and fractal dimension in Western Anatolia, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.01.031>
- Berhich, A., Belouadha, F.-Z., Kabbaj, M. I., 2022. A location-dependent earthquake prediction using recurrent neural network algorithms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 161, 107389. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107389>
- Berhich, A., Belouadha, F.-Z., Kabbaj, M. I., 2023. An attention-based LSTM network for large earthquake prediction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 165, 107663. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107663>
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.
- Bulbul, S., 2023. Investigation of possible causes of ionospheric anomalies pre/post-earthquakes based on space weather conditions (SWC). *Indian Journal of Physics*. 10.1007/s12648-023-02866-x
- Correa Bahnsen, A., Aouada, D., Ottersten, B., 2015. Example-dependent cost-sensitive decision trees. *Expert Systems with Applications*, 42(19), 6609-6619. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.04.042>
- Cortes, C., Vapnik, V., 1995. Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273-297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
- Demirelli, E., Solak, H. İ., Tiryakioğlu, İ., 2023. Makine öğrenmesi algoritmaları ile deprem

- katalogları kullanılarak deprem tahmini. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 13(4), 979-989.
- Doğan, A., Korkmaz, M., Kirmaci, V., 2023. Estimation of Ranque-Hilsch vortex tube performance by machine learning techniques. International Journal of Refrigeration, 150, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.021>
- Essam, Y., Kumar, P., Ahmed, A. N., Murti, M. A., El-Shafie, A., 2021. Exploring the reliability of different artificial intelligence techniques in predicting earthquake for Malaysia. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 147, 106826. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106826>
- Eyidoğan, H., 2020. Manisa Akhisar Civarındaki Deprem Aktivitesi ile Gutenberg-Richter Parametrelerinin Zamansal ve Mekânsal Özelliklerinin İncelenmesi. Türk Deprem Araştırma Dergisi, 2(2), 138-159.
- Fan, J., Ma, X., Wu, L., Zhang, F., Yu, X., Zeng, W., 2019. Light Gradient Boosting Machine: An efficient soft computing model for estimating daily reference evapotranspiration with local and external meteorological data. Agricultural Water Management, 225, 105758. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105758>
- Guo, J., Yun, S., Meng, Y., He, N., Ye, D., Zhao, Z., Jia, L., Yang, L., 2023. Prediction of heating and cooling loads based on light gradient boosting machine algorithms. Building and Environment, 236, 110252. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110252>
- Gupta, H., Kumar, P., Saurabh, S., Mishra, S. K., Appasani, B., Pati, A., Ravariu, C., Srinivasulu, A., 2021. Category boosting machine learning algorithm for breast cancer prediction. Revue roumaine des sciences techniques-série électrotechnique et énergétique, 66(3), 201-206.
- Hayakawa, M., Hobara, Y., 2010. Current status of seismo-electromagnetics for short-term earthquake prediction. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 1(2), 115-155. <https://doi.org/10.1080/19475705.2010.486933>
- Hussain, S., Mustafa, M. W., Jumani, T. A., Baloch, S. K., Alotaibi, H., Khan, I., Khan, A., 2021. A novel feature engineered-CatBoost-based supervised machine learning framework for electricity theft detection. Energy Reports, 7, 4425-4436. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.008>
- Kadirioğlu, F. T., Kartal, R. F., 2016. The new empirical magnitude conversion relations using an improved earthquake catalogue for Turkey and its near vicinity (1900-2012). Turkish Journal of Earth Sciences, 25(4), 300-310. <https://www.doi.org/10.3906/yer-1511-7>
- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q., Liu, T.-Y., 2017. Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree. Advances in neural information processing systems, 30.
- Kirschvink, J. L., 2000. Earthquake prediction by animals: Evolution and sensory perception. Bulletin of the Seismological Society of America, 90(2), 312-323.
- Maimon, O. Z., Rokach, L. 2014. Data mining with decision trees: theory and applications. World scientific,
- Michael, A. J., McBride, S. K., Hardebeck, J. L., Barall, M., Martinez, E., Page, M. T., van der Elst, N., Field, E. H., Milner, K. R., Wein,

- A. M., 2020. Statistical seismology and communication of the USGS operational aftershock forecasts for the 30 November 2018 Mw 7.1 Anchorage, Alaska, earthquake. *Seismological Research Letters*, 91(1), 153-173. <https://doi.org/10.1785/0220190196>
- Morales-Esteban, A., Martínez-Álvarez, F., Reyes, J., 2013. Earthquake prediction in seismogenic areas of the Iberian Peninsula based on computational intelligence. *Tectonophysics*, 593, 121-134. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.02.036>
- Moustra, M., Avraamides, M., Christodoulou, C., 2011. Artificial neural networks for earthquake prediction using time series magnitude data or Seismic Electric Signals. *Expert Systems with Applications*, 38(12), 15032-15039. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.043>
- MTA. 2023. Geosciences Map Viewer. <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx> (Erişim Tarihi: 20.11.2023).
- Nuannin, P., Kulhanek, O., Persson, L., 2005. Spatial and temporal b value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra earthquake of December 26, 2004. *Geophysical Research Letters*, 32(11).
- Öncel Çekim, H., Karakavak, H. N., Özel, G., Tekin, S., 2023. Earthquake magnitude prediction in Turkey: a comparative study of deep learning methods, ARIMA and singular spectrum analysis. *Environmental Earth Sciences*, 82(16), 387.
- Pırtı, A., Hoşbaş, R. G., Yücel, M. A., 2023. Examination of the Earthquake (Samos Island) in Izmir (30.10.2020) by Using Cors-Tr GNSS Observations and InSAR Data. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(1), 135-144. 10.1007/s12205-022-0392-y
- Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., Gulin, A., 2018. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. *Advances in neural information processing systems*, 31.
- Rikitake, T., 1968. Earthquake prediction. *Earth-Science Reviews*, 4, 245-282. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(68\)90154-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(68)90154-2)
- Rouet-Leduc, B., Hulbert, C., Lubbers, N., Barros, K., Humphreys, C. J., Johnson, P. A., 2017. Machine Learning Predicts Laboratory Earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 44(18), 9276-9282. <https://doi.org/10.1002/2017GL074677>
- Saç, M. M., Camgöz, B., 2005. İzmir'de sismik aktiviteler ile radon konsantrasyonları arasındaki korelasyonun incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(3), 47-54.
- Sayıl, N., 2013. Long-term earthquake prediction in western Anatolia with the time-and magnitude-predictable model. *Natural Hazards*, 66(2), 809-834. 10.1007/s11069-012-0532-7
- Schonlau, M., Zou, R. Y., 2020. The random forest algorithm for statistical learning. *The Stata Journal*, 20(1), 3-29.
- Sezer, L. İ., 2004. İzmir sismotektonik yöresinin depremselliği. *Ege Coğrafya Dergisi*, 13(1-2).
- Soman, K., Loganathan, R., Ajay, V. 2009. Machine learning with SVM and other kernel methods. PHI Learning Pvt. Ltd., New Delhi, 477s.
- Wang, K., Johnson, C. W., Bennett, K. C., Johnson, P. A., 2022. Predicting Future Laboratory Fault Friction Through Deep Learning Transformer Models. *Geophysical Research Letters*, 49(19),

e2022GL098233.

<https://doi.org/10.1029/2022GL098233>

Whitcomb, J. H., Garmany, J. D., Anderson, D. L., 1973. Earthquake Prediction: Variation of Seismic Velocities before the San Francisco Earthquake. *Science*, 180(4086), 632-635.
<https://doi.org/10.1126/science.180.4086.632>

Wiemer, S., Schorlemmer, D., 2007. ALM: An asperity-based likelihood model for California. *Seismological Research Letters*, 78(1), 134-140.



Deniz Sismiği Verilerinde Düşey Ayrırlılığın Artırılmasında Uygulanan Karşılaştırmalı Yöntemler

Comparative Methods Applied to Increase Vertical Resolution of Marine Seismic Data

Aslıhan NASIF^{1*} 

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, İzmir, Türkiye

Geliş (*received*): 24 Ocak (January) 2024 Kabul (*accepted*): 10 Mayıs (May) 2024

ÖZ

Sismik sinyal yer içinde yayılırken, soğrulma etkisi nedeniyle yüksek frekanslarını kaybeder. Bu durum verinin özellikle derinlerde düşey ayrırlılığının azalmasına neden olur. Yer içindeki hidrokarbon birikimlerinin birçoğunun fiziksel boyutları, toplanan sismik verinin çözünürlük sınırlarının altında kaldığından, sismik verinin zamansal ayrırlılığının artırılması önem taşımaktadır. Düşey ayrırlılığın yüksek olması, sismik verilerle ince tabakaların ayırt edilebilmesini sağlar.

Bu çalışmada yığma sonrası sismik verinin zamansal ayrırlılığını artırmak için iğnecikleştirme dekonvolüsyonu, sismik izin 1. türevi, maksimum entropi (Burg) dekonvolüsyonu, adaptif dekonvolüsyon, Q dengeleme, zaman değişken spektral beyazlatma (TVSW) ve spektral biçimlendirme yöntemleri uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Uygulamalar, her bir yöntemin kendine özgü avantaj ve dezavantajlarının olduğunu göstermiştir. Sismik verideki yansıma genliklerini belirginleştiren ve süreklilikte en fazla iyileştirme yapan, aynı zamanda yansımaların salınımlı görünümünü giderme konusunda en başarılı yöntemler iğnecikleştirme ve maksimum entropi dekonvolüsyonu ile TVSW'dir. Yansıma sürekliliği ve salınım giderme konularında en başarısız yöntemin ise spektral biçimlendirme olduğu görülmüştür. Kullanılan tüm yöntemler, sismik verinin spektrumlarında oldukça belirgin genişleme oluşturmuştur.

İğnecikleştirme ve maksimum entropi dekonvolüsyonları ile spektral biçimlendirme yöntemlerinin birincil yansımalara paralel uzanan yüksek frekanslı ve düşük genlikli yapay olaylar ürettiği görülmüştür. Bu yapay olayların genlikleri birincil yansımalara göre çok küçük olduğundan, olasılıkla sismik veride birincil yansıma genlikleri tarafından bastırılmaktadırlar. TVSW, adaptif dekonvolüsyon ve 1. türev uygulaması dışındaki tüm yöntemler belirgin gelişigüzel gürültü üretmektedir. Bu nedenle bu üç yöntem dışındaki uygulamaların ardından sismik veriye bant-geçişli süzgeç uygulaması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dekonvolüsyon, deniz sismiği, düşey ayrırlılık, sismik veri işlem, spektral bant

ABSTRACT

As seismic signal propagates within the Earth, it loses high frequencies due to absorption effects. This phenomenon leads to a decrease in vertical resolution, particularly in deeper layers. Many hydrocarbon reservoirs are below the seismic data resolution limits depending on their depths. Therefore, increasing the temporal resolution of seismic data is crucial, and high vertical resolution allows us differentiation of thin layers. In this study, various techniques were employed to enhance the temporal resolution of post-stack seismic data, including spiking deconvolution, first derivative of the seismic trace, maximum entropy (Burg) deconvolution, adaptive deconvolution, Q compensation, time-variant spectral whitening (TVSW), and spectral shaping methods, and their results were compared. Applications demonstrated that each method has its own advantages and disadvantages. Spiking and maximum entropy deconvolutions along with TVSW were found to significantly enhance reflection amplitudes and provide the most improvement in trace-by-trace consistency while effectively removing ringy appearances of reflections. The least successful method in terms of reflection continuity and removal of ringy character was spectral shaping. All applied methods resulted in significant widening of spectra in the seismic data.

It was observed that spiking and maximum entropy deconvolutions, along with spectral shaping, produced high-frequency and low-amplitude artificial events parallel to primary reflections. Since the amplitudes of these artificial events are much smaller compared to primary reflections, they are likely suppressed by the amplitudes of primary reflections in the seismic data. Except for TVSW, adaptive deconvolution, and first derivative, all other methods introduce significant random noise. Therefore, it is recommended to apply band-pass filtering to seismic data following the implementation of the methods except for TVSW, adaptive deconvolution, and first derivative.

Keywords: Deconvolution, marine seismic, temporal resolution, seismic data processing, spectral band.

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1425312>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: aslihan.nasif@deu.edu.tr

GİRİŞ

Sismik veri işlemin nihai hedefi, yer içini en iyi temsil eden sismik görüntüyü elde etmektir. En iyi sismik görüntü ise, tabakaların gerçek yerlerinde ve tabaka sınırlarının keskin şekilde görüldüğü, en yüksek ayrımlılıktaki sismik kesit olarak tanımlanabilir (Al-Moughraby, 2004; Sheriff ve Geldart, 1995). Sismik yansıma verilerinin ayrımlılığı, yatay ve düşey ayrımlılık olarak tanımlanır ve sismik veri ile yatay ve düşey yönde ayırt edilebilecek en dar ve en ince tabakanın büyüklüğünü ifade eder (Knapp, 1990; Kallweit ve Wood, 1982; Chopra vd., 2006). Yatay ayrımlılık yapılar arasındaki uzaklığa bağlıdır. Fresnel zonu ile tanımlanır ve sismik dalga hızı, frekans ve derinliğin bir

fonksiyonudur. Yatay ayrımlılık migrasyon işlemiyle iyileştirilir. Düşey ayrımlılığın yüksek olması, sismik verilerle ince tabakaların ayırt edilebilmesini sağlar. Düşey ayrımlılık sismik dalga hızı, frekans veya dalga boyunun bir fonksiyonudur ve sismik dalgacığı sıkıştırarak periyodunun azaltılmasını (veya kullanışlı frekans bandının genişletilmesini) hedefleyen dekonvolüsyon gibi yöntemlerle artırılabilir (Choi vd., 2019).

Deniz sismiğinde amaca yönelik olarak kullanılan farklı türden enerji kaynakları mevcuttur. Bunlardan transduser kullanılarak üretilen sinyaller ortalama 3.5 kHz merkez

frekansındadır ve mühendislik sismiği olarak adlandırılan bu sistemlerin düşey ayrımlılığı 10 cm, fakat etki derinliği (penetrasyonu) ortalama 30 m civarındadır. Genellikle tek kanallı deniz sismiği çalışmalarında kullanılan sparker kaynağı ise ortalama 100-1000 Hz aralığında sinyal üretir. Etki derinliği 200 m civarında olan bu kaynağın düşey ayrımlılığı ortalama 50 cm'dir.

Çok kanallı sismik yansıma çalışmalarında kullanılan sismik enerji kaynağı ise hava tabancası olup, su içerisine ani ve yüksek basınçlı hava boşaltılması ile sismik sinyal üretir. Petrol endüstrisi tarafından kullanılan hava tabancaları 5-200 Hz aralığında sismik sinyal üreten güvenilir ve tekrarlanabilir sismik kaynaklardır (Dragoset, 2000; Dondurur, 2018). Bu çalışmalarda kullanılan hava tabancası enerji kaynaklarının, yeterli ayrımlılığın sağlanması için geniş frekans bantlı ve ortalama 100 Hz civarında baskın frekansa sahip sinyal üretmesi istenir (Dondurur, 2009). Kullanılan hava tabancasının hacmi ile üretilen sinyalin frekans içeriği ters orantılı olup, küçük hava tabancası hacmi yüksek frekans içeriği ve yüksek ayrımlılık, ancak düşük etki derinliği anlamına gelir. Bunun dışında, çok kanallı sismik çalışmalarda alıcı kablo (streamer) derinliği, kaydedilen sinyalin frekans bandını doğrudan etkiler. Hayalet yansıma (ghost) girişiminden oluşan frekans boşluğu (notch) nedeniyle, alıcı kablo ne kadar yüze yakın çekilirse, o kadar geniş bantlı bir spektruma sahip sinyal kaydedilir ve düşey ayrımlılık o denli yüksek olur.

Sismik sinyal yer içinde yayılırken, yer içinin soğurmasından dolayı sismik izin özellikle yüksek frekanslı bileşenleri hızlı bir şekilde sönmüleri. Bu nedenle kesitin derin kısımlarında düşey ayrımlılık daima daha düşüktür. Yüksek frekanslarının sönmülmesi nedeniyle sinyal periyodunun artması, dalgacığın yan salınımları ve ortamın karmaşık

jeolojik yapısından dolayı, sismik veriler girişimli bir karaktere sahiptir (Karslı, 2002; Berkhout, 1984; Knapp, 1993). Sismik verideki bu girişim etkisini gidermek ve ince tabakaları ayırt edebilmek için, içnecikleştirme dekonvolüsyonu başta olmak üzere, verinin zamansal ayrımlılığını artıran birçok farklı veri işlem yöntemi uygulanır.

Son yıllarda, sismik verinin spektral bant genişliğini artırmak için dekonvolüsyon yöntemleri başta olmak üzere birçok farklı teknik önerilmiştir (örn., Sacchi ve Ulrych 2007; Nose-Filho vd., 2016; Wang vd., 2022; Manenti vd., 2018; Naghadeh ve Morley, 2017; Karslı, 2006; Karslı vd., 2006; Karslı, 2011; Karslı, 2002; Zhang vd., 2023; Tian vd., 2022; Jo vd., 2022; Li vd., 2020). Her biri farklı matematik ve fizik temellerine dayanan bu yaklaşımların birbirine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur ve uygulama öncesi en uygun yöntemin ve yönteme uygun parametrelerin seçilmesi için çok sayıda test yapılması gerekebilir. Ayrımlılık artırma amaçlı en çok kullanılan teknik olan dekonvolüsyon yöntemleri, sismik verinin frekans bandını genişletirken, spektral bandın dışındaki frekansları yükseltmez ve bant genişliği açısından sınırlı sonuçlar üretir (Karslı, 2011; Walker ve Ulrych 1983; Karslı 2006).

Bu çalışmanın amacı, G1 türü hava tabancası ile toplanmış çok kanallı bir sismik yansıma kesitinin düşey ayrımlılığının artırılması amacıyla uygulanabilecek farklı yöntemleri karşılaştırmaktır. Farklı yaklaşımların gereksinim duyduğu uygun parametre seçimleri konusundaki detayların ortaya konulabilmesi amaçlanmıştır. Çalışma, migrasyon sonrası bir sismik kesitin düşey ayrımlılığının artırılmasında uygulanan adımların ve parametrelerin analizi ve uygulamalarla ortaya konulmasını kapsamaktadır. Uygulamaların etkinliğinin anlaşılabilmesi için, her bir yöntem sentetik veri üzerinde de uygulanmıştır. Farklı yöntemlerin

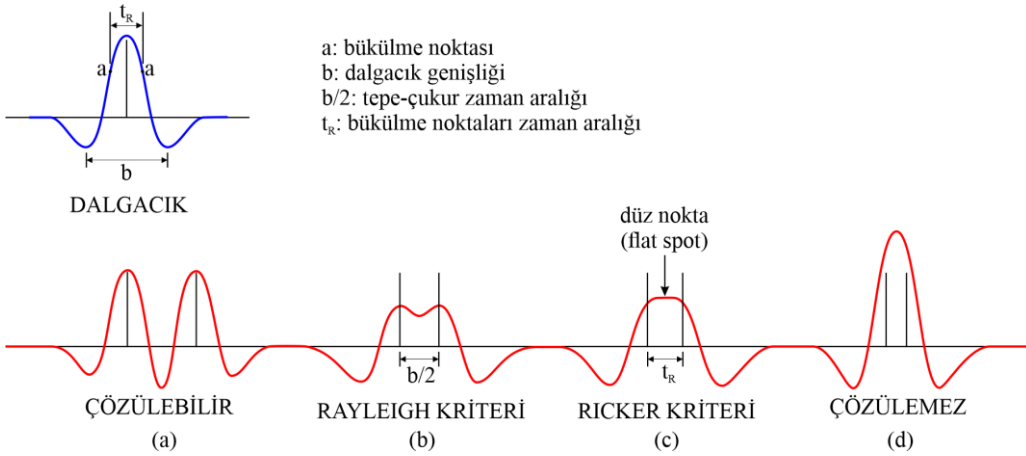
ayrımllığı artırmadaki etkinliği ve sismik yoruma sunacağı katkı, uygulamaların ardından karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

SİSMİK VERİNİN ZAMANSAL AYRIMLILIĞI

Ayırımllık, ince bir tabakanın üst ve alt yansımalarının sismik veride ayrı yansımalar olarak ayırt edilebilmesi anlamına gelir (Kallweit ve Wood, 1982). Dalgacığın genişliği (periyodu) yeterince küçük olduğunda, ardışık iki yansıma sismik kesitte birbirinden ayırt edilebilir (Şekil 1a). Koefoed (1981), bir sismik sinyalin düşey çözünürlük gücünün üç öge tarafından kontrol edildiğini öne sürmüştür: ana salınım genişliği, yan salınım oranı ve yan kuyruk salınımları. Şekil 1'de verildiği gibi sıfır fazlı sinyaller üzerinde yapılan analizler, diğer öğelerden birini bozmak pahasına bu üç öğeden herhangi birinde bir iyileştirme yapılabileceğini göstermiştir. Sismik verinin düşey ayrımllığının tanımlanması ile ilgili olarak, Rayleigh (Jenkins ve White, 1957), Ricker (Ricker, 1953) ve Widess (Widess, 1973) kriteri olmak üzere üç kriter öne sürülmüştür. Rayleigh kriteri, sismik dalgacığın tepe-çukur ayırımının tanımlanmasına dayanır ve ardışık yansımalarından alınan dalgacıkların maksimum ve minimumları arasındaki zaman farkı, ayrımllık limiti olarak tanımlanır (Şekil 1b). Diğer bir deyişle, iki ara yüzey arasındaki mesafe, bunlardan alınan yansımaların tepe-çukur ayırımına eşit veya daha büyükse, bu iki ara yüzey sismik veri ile ayırt edilebilir. Rayleigh kriterinin limit değeri, dalgacığın birinci türevi alınarak bulunabilir (Kallweit ve Wood, 1982). Ricker kriterine göre, her iki dalgacık birbirine yaklaştıkça, ana piklerin genliği azalır ve sonunda tek bir ana maksimum haline gelir. Ricker (1953) ayrımllık limitini, her iki pik birbirine yaklaştığında oluşan sıfır eğriselliğe sahip maksimumun oluştuğu mesafe olarak tanımlamış, bu mesafede oluşan görüntü düz nokta (flat spot) olarak

adlandırılmıştır (Şekil 1c). Bu limit değeri, dalgacığın iki kez türevi alınarak bulunabilir (Kallweit ve Wood, 1982). Rayleigh ve Ricker kriterlerinin ötesinde, birbirine daha yakın mesafedeki iki ara yüzey ise sismik veri ile ayırt edilemez (Şekil 1d).

Düşey ayrımllığı etkileyen en önemli parametre sismik sinyalin dalga boyu olup, $\lambda=V/f$ bağıntısından hesaplanabilir. Burada V sismik dalga hızı (m/s), f ise sinyalin baskın frekansdır (Hz). Widess kriterine göre, tabaka kalınlığı dalgacığın baskın frekansına karşılık gelen dalga boyunun 1/8'i kadardır. (Widess, 1973) tarafından önerilen bu kriter, homojen bir ortamdaki basitleştirilmiş bir kama modeline dayanmaktadır. Bu model, kamanın üstüne ve altına karşılık gelen eşit ve zıt yansıma katsayılarından oluşan bir modeldir. Widess'in kama modeli birçok durumda gerçek yeraltını temsil etmemektedir ve pratik uygulamalar, genellikle yanlış genlik girişimi (tuning) eğrilerinin elde edilmesine yol açmaktadır. Ayrıca, pratik uygulamalar, teorik çözünürlük sınırlarının Widess modelinin önerdiğinden çok daha iyi olduğunu göstermektedir (Chopra vd., 2006). Bununla birlikte, Ricker dalgacıkları için düşey çözünürlük sınırı ise yaklaşık olarak dalga boyunun 1/4'ü ($\lambda/4$) şeklinde ifade edilebilir ve bu sınır "tuning kalınlığı" olarak da bilinir (Faleide vd., 2021). Rayleigh kriteri'ne göre $\lambda/4$ 'den daha ince tabakalar ise sismik veri ile ayırt edilemezler. Daha kısa dalga boylu sismik sinyal daha yüksek çözüm gücüne sahiptir ve daha ince tabakalar ayırt edilebilir. Daha kısa boylu sismik sinyal elde etmenin yolu ise sinyal frekansını artırmaktır. Soğurulma nedeniyle sismik sinyalin frekansı derinlikle azalır ve sismik dalga hızı da derinlikle artar. Dolayısıyla derinliğin artması yatay ve düşey ayrımllığı azaltır. Frekans arttıkça yatay ve düşey ayrımllık artar.



Şekil 1. (a) Birbirinden yeterli uzaklıktaki iki ara yüzeyden alınan iki ayrı yansıma, (b) ara yüzeyler arası mesafe tepe-çukur zaman aralığı ($b/2$) kadarsa Rayleigh kriteri oluşur. (c) Ara yüzeyler arası mesafe, dalgacığın eğriselliğinin değiştiği noktaların zaman aralığı kadar (t_R) olduğunda ise Ricker kriteri oluşur. (d) Birbirine daha yakın mesafedeki iki ara yüzey ise sismik veri ile ayırt edilemez (Kallweit ve Wood, 1982).

Figure 1. (a) Two separate reflections obtained from two interfaces at sufficient distances, (b) Rayleigh criterion occurs when the distance between interfaces is half the peak-trough time interval ($b/2$). (c) Ricker criterion occurs when the distance between interfaces is equal to the time interval at which the curvature of the wavelet changes (t_R). (d) Two interfaces closer to each other are indistinguishable in seismic data (Kallweit and Wood, 1982).

VERİ

Bu çalışmada, ayrımlılık artırma amaçlı uygulamalar, önce bir sıfır ofset sentetik veriye uygulanmıştır. Şekil 2a kullanılan sentetik veriyi, Şekil 2b bunun özilişki kesitini, Şekil 2c ise sentetik kesitin ortalama genlik spektrumunu göstermektedir. Sentetik verinin hesaplanmasında kullanılan derinlik modeli Şekil 2d'de görülmektedir. Model (Karslı vd., 2006) tarafından kullanılan 2B modelin bir kısmından meydana gelmektedir. Kesit, deniz tabanı yansımalarına karşılık gelen eğimli bir yansıma ve bunun altında uzanan yine eğimli bir ara yüzey üzerine onlap yaparak sona eren bir ara yüzeyden meydana gelen bir sentetik veridir. Modellemede dik geliş ışın izleme yöntemi (normal incidence ray tracing) kullanılmış, sentetik izler 40 Hz minimum fazlı kaynak dalgacığı ile hesaplanmıştır. Kullanılan

kaynak dalgacığı Şekil 2d'de verilmiştir. Sentetik veri 1 ms örnekleme aralığı ile hesaplanmış ve iz aralığı 5 m alınmıştır. Veri sadece P dalgası birincil yansımalarını içermekte, S dalgaları, tekrarlılar ve saçılmalar veride bulunmamaktadır. Sentetik kesite küresel açılım genlik düzeltmesi uygulanmıştır. Gerçekçi olması ve uygulanan yöntemlerin gelişigüzel gürültü durumundaki performansını da görebilmek adına, sentetik veriye %10 oranında gelişigüzel gürültü de eklenmiştir.

Gerçek sismik veri olarak, Ege Denizi'nde, Karaburun yarımadası açıklarında toplanmış çok kanallı sismik yansıma verisi kullanılmıştır. Sismik veri, Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü'ne bağlı R/V K. Piri Reis araştırma gemisi ile toplanmış olup, veri toplama parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çalışmada 600 m uzunluğunda

dijital alıcı kablo ve 96 kanallı sismik kayıtçı kullanılmış, atış aralığı 18.75 m alınmıştır. Sismik kaynak olarak Generator-Injector (GI) hava tabancası kullanılmış olup, bu sismik kaynak türü kendi hava kabarcığı gürültüsünü (bubble oscillations) sönmülemektedir. Tüm çalışma sırasında NaviPac bütünleşik navigasyon sistemi ile DGPS alıcısı kullanılmış olup, yatay yöndeki konum hatası 50 cm'nin altındadır.

Çizelge 1. Kullanılan çok kanallı sismik hattın veri toplama parametreleri.

Table 1. Data acquisition parameters of the multichannel seismics line.

Sistem	NTRS-2
Kanal sayısı	96
Streamer uzunluğu	600 m
Kayıt uzunluğu	3000 ms
Gecikme zamanı	130 ms
Örnekleme aralığı	1 ms
Streamer derinliği	4 m
Atış aralığı	18.75 m
Grup aralığı	6.25 m
Kaynak	GI gun (45+105 inç3)
Kaynak derinliği	3 m
Kaynak basıncı	2000 psi (140 bar)
Minimum ofset	50 m
Bird sayısı	4 adet 5011 DigiBird
Atış sayısı	1161
CDP sayısı	7149
Katlama (fold)	16

Çok kanallı sismik veri, SeisSpace/Promax yazılımı kullanılarak işlenmiş ve veriden yorumlanabilir migrasyon kesiti elde edilmiştir. Veri işlem akışı, verideki gürültülerin tür ve miktarına bağlı olarak uygun şekilde seçilmiştir. Bu aşamada sismik veriye sırasıyla veri yükleme, gecikme zamanı giderme (delay-time correction), geometri tanımlama, spektral

analiz ve bant-geçişli süzgeç (10-220 Hz), üst kısımları silme (top mute), iz ayıklama, f-k eğim süzgeci, tekrarlı bastırma (Surface Related Multiple Elimination, SRME), CDP sıralama, hız analizi (her 500 CDP'de bir), NMO düzeltmesi, yığma, Kirchhoff zaman migrasyonu ve kazanç uygulama (automatic gain control, AGC) işlemleri uygulanmıştır. Şekil 2e, elde edilen final migrasyon kesitinin 800 ms'lik kısmını, Şekil 2f bunun özilişki kesitini, Şekil 2g ise sismik kesitin ortalama genlik spektrumunu vermektedir. Verinin frekans bandı 10-220 Hz arasında değişmekte olup, baskın frekansı 80 Hz civarındadır. Kesitin deniz tabanından itibaren ilk 500 ms'lik kısmında, üst üste yığılmış şekilde, ilerleyen delta yapılarının varlığı (Şekil 2e'de K1-K4) göze çarpmaktadır.

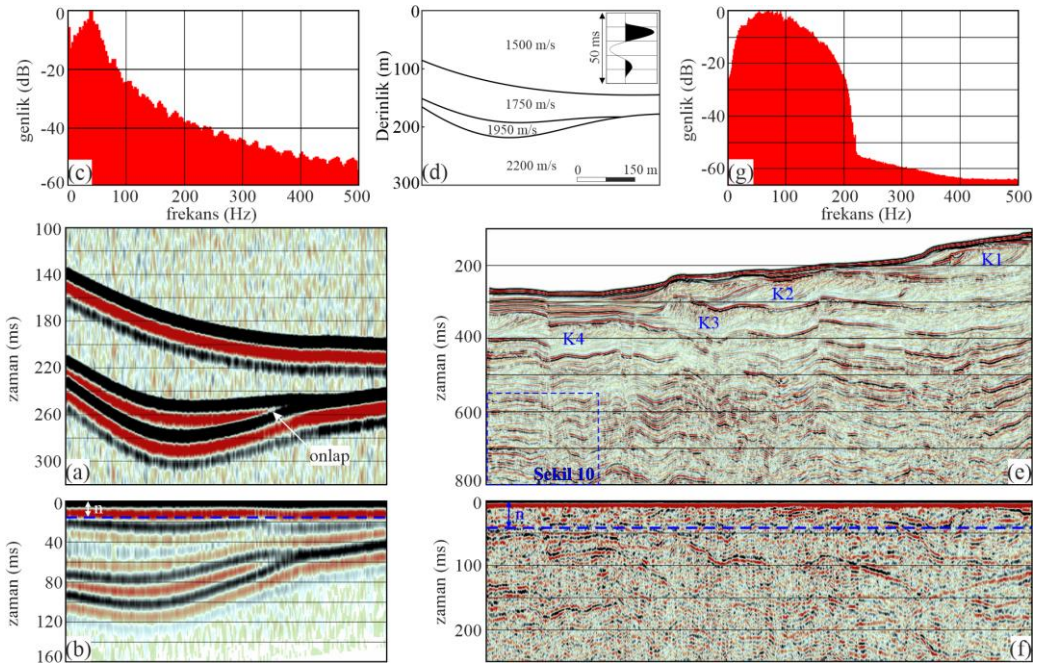
ZAMANSAL AYRIMLILIĞIN ARTIRILMASI

Kaydedilen sismik veri, hayalet yansımaların spektrumda oluşturduğu boşluklar (ghost notches) ve deniz dalgası gürültüsü (swell) genlikleri nedeniyle, spektrumun hem yüksek hem de düşük frekans kısmından bant sınırlı hale gelir (Dondurur, 2018). Sismik verinin zamansal ayrımlılığının artırılması için kullanılan farklı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler genellikle sismik veriden kaynak dalgacığının etkisini gidererek, verinin genlik spektrumunu düzleştirmeye veya veriden soğurulma etkisini yok ederek zamansal ayrımlılığı artırmaya yönelik yöntemlerdir.

Bu çalışmada, yığma sonrası sismik verinin zamansal ayrımlılığını artırmaya yönelik olarak içnecikleştirme dekonvolüsyonu (spiking deconvolution), sismik izin 1. türevi, maksimum entropi (Burg) dekonvolüsyonu, adaptif dekonvolüsyon, Q dengeleme (Q compensation), zaman değişken spektral beyazlatma (time variant spectral whitening, TVSW) ve spektral biçimlendirme (spectral shaping) yöntemleri uygulanmıştır. Bahsi geçen tüm yöntemler, verinin spektral bant

genişliğini artırmaya yönelik uygulamalardır. Dolayısıyla verideki hem düşük ve hem de yüksek frekanslı gürültü genliklerinde artış meydana getirebilirler. Uygulamalar, işlemler sonrasında sentetik verinin düşük frekanslı kısmında yükseltelen genliklerin çıktının ayrımlılığını oldukça düşürdüğünü göstermiştir. Bu nedenle sentetik veriye işlemler sonrası 6

Hz yüksek geçişli süzgeç uygulanmıştır. Gerçek sismik veri ise her bir işlem sonrası 10-220 Hz bant-geçişli süzgeç ile süzölmüştür. Özellikle dekonvolüsyon uygulamalarında, dekonvolüsyon sonrası veriye uygun bir bant-geçişli süzgeç uygulamak standart bir işlem olarak görölmektedir (Yılmaz, 2001).



Şekil 2. (a) Kullanılan sıfır ofset sentetik veri, (b) özilişki kesiti ve (c) kesitin ortalama genlik spektrumu, (d) sentetik verinin hesabında kullanılan derinlik modeli ve minimum faz kaynak dalgacığı. (e) Kullanılan çok kanallı sismik migrasyon kesiti, (f) özilişki kesiti ve (g) kesitin ortalama genlik spektrumu. K1-K4 yığılmış formdaki deltaları, özilişki kesitleri üzerinde gösterilen n ise çalışmada uygulanan dekonvolüsyon yöntemlerinde kullanılan operatör uzunluğunu ifade etmektedir.

Figure 2. (a) Synthetic zero-offset data used in the study, (b) its autocorrelation section, (c) average amplitude spectrum, and (d) depth model and minimum-phase source wavelet used in the synthetic data calculation. (e) Multi-channel migrated seismic section, (f) its autocorrelation section, and (g) average amplitude spectrum. K1-K4 represent stacked deltas, and n in the autocorrelation sections indicates the operator length used in the deconvolution methods applied in the study.

İğnecikleştirme dekonvolüsyonu (spiking deconvolution)

Dekonvolüsyon, sismik izin içerisinde kaynak sinyalinin etkisini sismik izden kaldırmaya çalışan bir işlemdir. Dondurur (2018)'de belirtildiği üzere, ideal koşullarda genel olarak dekonvolüsyon herhangi bir ize uygulandığında,

- Sismik verinin zamansal (düşey) çözünürlüğünü artırır.
- Kaynak dalgacığını veriden indirir.
- Yansımaların salınımlı karakterini zayıflatır.
- Tekrarlı yansımaları bastırır.
- Geniş bantlı sismik veri elde etmek için genlik spektrumunu düzleştirir.

Konvolüsyonel model teorisine göre (Yılmaz, 2001), kaydedilen sismik iz, kaynak sinyali ile yer içinin yansıma katsayıları serisinin basit bir konvolüsyonundan oluşur. Buna göre, kaydedilen her bir yansıma, sismik kaynak sinyalinin de içerisinde bulundurulur. Eğer sismik veriden kaynak dalgacığının etkisi indirgenebilirse, geriye sadece yer içinin yansıma katsayıları serisi kalacaktır. İğnecikleştirme dekonvolüsyonu, sadece minimum fazlı sismik verilerde uygun sonuçlar üretmekte olup, giriş verisinin zamanla durağan (stationary) olması ve gürültü bileşeni de içermemesi beklenir (Yılmaz, 2001).

$$\begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{n-1} \\ a_1 & a_0 & a_1 & \dots & a_{n-2} \\ a_2 & a_1 & a_0 & \dots & a_{n-3} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ a_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & a_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ h_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

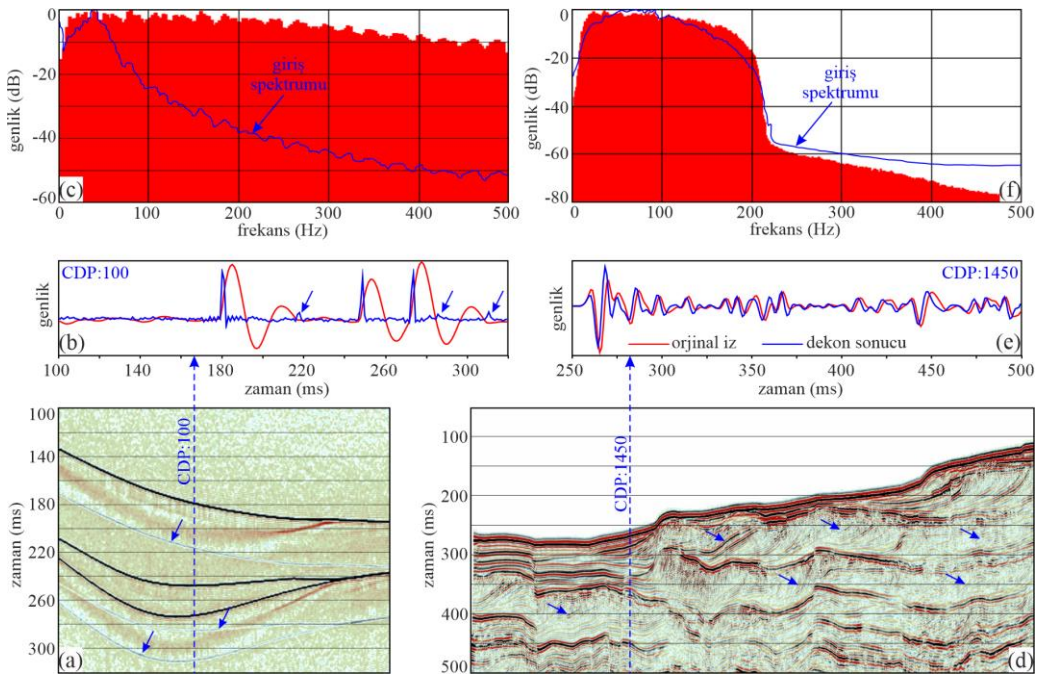
Eşitlik (1), n terimden oluşan bir iğnecikleştirme dekonvolüsyon operatörünü (süzgeç katsayılarını) elde etmek için kullanılan normal denklem takımını göstermektedir (Peacock ve

Treitel, 1969). Burada, a_i sismik dalgacığının özilişkisini ve h_i dekonvolüsyon süzgeç katsayılarını temsil etmektedir. Eşitlik (1)'deki ifade, "normal denklemler" olarak bilinir (Robinson ve Treitel, 1967). Bu simetrik özilişki matrisine "Toeplitz matrisi" denir ve Levinson algoritması ile çözülebilir. Eşitlik (1) çözülerek elde edilen h_i katsayıları, giriş sismik izi ile konvole edilerek iğnecikleştirme dekonvolüsyonu işlemi gerçekleştirilir. Günümüzde bu yöntemi kullanan dekonvolüsyon yaklaşımları Wiener-Levinson algoritması olarak bilinirler. İstatiksel olarak kaydedilen sismik izin özilişkisinin, sismik dalgacığının özilişkisine yaklaşık benzer olduğu ilk geçiş zaman paketinin uzunluğu, "operatör uzunluğu" olarak bilinir ve iğnecikleştirme dekonvolüsyonunun belirlenmesi gereken en önemli parametresidir (Yılmaz, 2001).

Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan iğnecikleştirme dekonvolüsyonu sonucu, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte Şekil 3'de verilmiştir. Dekonvolüsyon işleminde operatör boyu verilerin Şekil 2b ve 2f'de verilen özilişki kesitleri incelenerek ilk geçici genlik paketinin zaman uzunluğuna göre belirlenmiş ve sentetik veri için 15 ms, çok kanallı sismik veri için ise 40 ms alınmıştır. İğnecikleştirme dekonvolüsyonunun, sentetik verinin ayrımlılığını belirgin şekilde artırdığı görülmektedir (Şekil 3a). Şekil 3b'de verilen dekonvolüsyon öncesi ve sonrası 100. iz, işlemin yansımaları bir iğneciğe dönüştürdüğünü göstermektedir. Her bir yansıma dalgacığının periyodu kısalmış, frekans bandı genişlemiştir, bunun sonucu olarak onlap kesilmesi çok daha belirgin hale gelmiştir. Buna karşın, sentetik veriye sadece yüksek geçişli süzgeç uygulandığı için, Şekil 3b'deki çıkış izinde (mavi iz) yüksek frekanslı gürültü de belirgindir. Şekil 3c, orijinal ve dekonvolüsyon sonrası sentetik verinin spektrumlarını karşılaştırmaktadır. Ayrımlılıktaki artış, sentetik verinin

spektrumunda da belirgindir. Dekonvolüsyon sonrası spektrumun genişlediği, Nyquist frekansına kadar (500 Hz) hemen tüm genlik bileşenlerini içerdiği görülebilir. Buna karşın, dekonvolüsyon çıktısında sentetik veride yapay olaylar meydana gelmiştir. Genlikleri oldukça düşük olan bu yapay olaylar birincil yansımalara paralel uzanmakta olup, Şekil 3a ve 3b'de mavi oklarla gösterilmiştir. Yapay olayların uygun olmayan dekonvolüsyon

operatör uzunluğundan meydana gelebileceği düşünülerek, bu parametre üzerinde çok sayıda test yapılmıştır. Daha uzun operatör boyları yapay olayların miktarını ve genliğini belirgin şekilde artırdığı gibi, daha kısa operatör boyları ise dekonvolüsyon işlemini etkisiz kılmaktadır. Dolayısıyla, en uygun operatör boyu olarak, Şekil 2b'deki özilişki kesitinden elde edilen değer kullanılmıştır.



Şekil 3. (a) İğnecikleştirme dekonvolüsyonu sonrası sıfır ofset sentetik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) İğnecikleştirme dekonvolüsyonu sonrası çok kanallı sismik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

Figure 3. Spiking deconvolution results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after deconvolution. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (f) its average amplitude spectrum before and after deconvolution.

Ayrımlılıktaki artış çok kanallı sismik veride de benzer şekildedir. Şekil 3d'de, iğnecikleştirme dekonvolüsyonu sonrası delta yapılarının klinoform yansımaları daha belirgin hale

gelmiştir (mavi oklar). Şekil 3e'de verilen dekonvolüsyon öncesi ve sonrası 1450. iz, dekonvolüsyon sonrası yansımaların periyodunun bir miktar azaldığını

göstermektedir. Ayrırlılıktaki iyileşme, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası verinin ortalama genlik spektrumu karşılaştırmasında da görülmektedir (Şekil 3f). Spektrum, mevcut frekans bandı olan 10-220 Hz içerisindeki hemen tüm frekans bileşenlerinin genliklerini neredeyse eşdeğer oranda içerir. Ayrıca özellikle sığ kısımlardaki yansımalarda görülen salınımlı karakterin, içnecikleştirme dekonvolüsyonu sonrası zayıflatıldığı anlaşılmaktadır.

Sismik izin 1. türevi

Herhangi bir zaman fonksiyonunun türevinin veya integralinin alınması, fonksiyonun baskın frekansının değişmesine neden olur. İntegral işlemi verideki düşük frekansları belirgin hale getirirken, türev işlemi, sismik verilerdeki yüksek frekanslı bileşenlerin genliğini artırarak zamansal ayrırlılığı iyileştirir (Nasıf, 2024). Bunun nedeni, her iki işlemin de verinin spektrumunu ölçekleme özelliğinin olmasıdır.

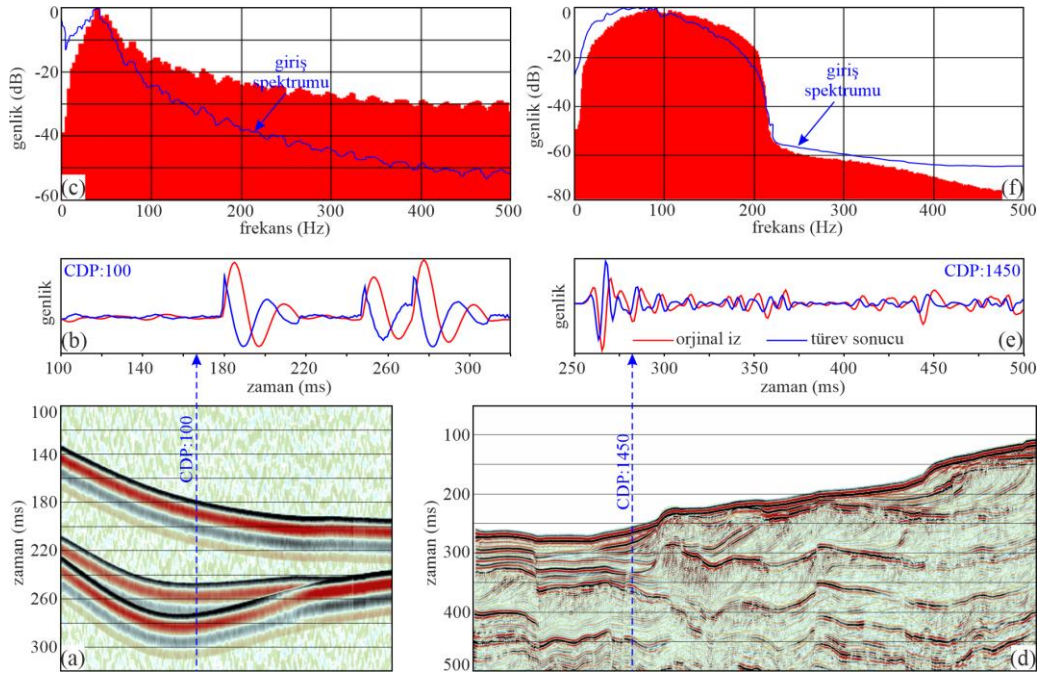
Eğer $f(t)$ zaman serisinin Fourier dönüşümü $F(\omega)$ ise, $f(t)$ 'nin birinci türevinin Fourier dönüşümü (Dondurur, 2018)

$$\mathfrak{F}\left\{\frac{\partial f(t)}{\partial t}\right\} = i\omega F(\omega) \quad (2)$$

şeklinde verilir. Burada $i=\sqrt{-1}$ ve ω ise açısal frekanstır. Buna göre, bir zaman fonksiyonunun türevinin alınmasıyla, Eşitlik (2)'de verilen ω çarpan faktörü nedeniyle, ilgili frekans değerlerine dayalı olarak frekans bileşenleri ağırlıklandırılır ve doğrusal bileşen (DC bileşen) yok edilir. Sonuç olarak, daha yüksek frekanslı bileşenlerin genlikleri, daha düşük frekanslara göre göreceli olarak güçlendirilmiş olur. Böylece, sismik verilerin zamansal ayrırlılığı artarken, spektral bant genişliği değişmez (Nasıf, 2024).

Türev uygulamasının çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulama sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. Sismik izin zaman türevi oldukça basit bir uygulama olup, herhangi bir parametre seçimine gereksinim duyulmadan uygulanabilir. Türev işleminin, sentetik verinin ayrırlılığını artırdığı görülmektedir (Şekil 4a). Yansımaların frekansı artmış, onlap kesilmesi daha belirgin hale gelmiştir. Ayrırlılıktaki artış, Şekil 4b'de verilen türev öncesi ve sonrası 100. İzde ve Şekil 4c'deki sentetik verinin spektrumunda da görülmektedir. 100 Hz ve üzerindeki frekans bileşenlerinin genlikleri türev işlemi sonrası frekansla artan şekilde 10-20 dB arasında yükselmiştir (Şekil 4c). Türev sonrası yansımaların periyodunun azaldığı gözlenmekle birlikte, sentetik veriye uygulanan türev işlemi, sentetik verideki yüksek frekanslı ana yansımaları izleyen düşük frekanslı bir salınım oluşturmuştur (Şekil 4b).

Çok kanallı sismik verideki ayrırlılık artışı da belirgindir. Şekil 4d'deki kesitte ve Şekil 4e'deki 1450. izde, türev işlemi sonrası tüm yansımaların periyodunun azaldığı ve frekansının arttığı, izden ize sürekliliğın iyileştiği, delta klinoformlarından alınan yansımaların daha belirgin hale geldiği gözlenmektedir. Ayrırlılıktaki artış verinin geç varışlarında da belirgindir (Şekil 4d). Ayrıca yansımaların salınımlı karakterinin azaldığı da görülmektedir. Çok kanallı sismik verinin genlik spektrumunda da bir miktar genişleme görülmektedir (Şekil 4f). Spektrumda, özellikle 100-200 Hz arasındaki frekans bileşenlerinin genlikleri en çok 7 dB oranında yükselmiştir. Ancak giriş ve çıkış verisinin spektrumları karşılaştırıldığında, 10-100 Hz arasındaki kısmın genliğinde de benzer oranda bir azalma söz konusudur (Şekil 4f). Bu durum, türev işleminin frekans ölçekleme etkisi nedeniyle, daha çok yüksek frekanslı bileşenler üzerinde etkili olması nedeniyledir.



Şekil 4. (a) Sismik izin 1. zaman türevi işlemi sonrası sıfır ofset sentetik veri, (b) türev işlemi öncesi ve sonrası sentetik verinin 100. izi, (c) türev işlemi öncesi ve sonrası sentetik kesitin ortalama genlik spektrumu. (d) Sismik izin 1. zaman türevi işlemi sonrası çok kanallı sismik veri, (e) türev işlemi öncesi ve sonrası sismik verinin 1450. izi, (f) türev işlemi öncesi ve sonrası sismik verinin ortalama genlik spektrumu.

Figure 4. First time derivative results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after time derivative. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (e) its average amplitude spectrum before and after time derivative.

Maksimum entropi (burg) dekonvolüsyonu

Maksimum entropi (Burg) dekonvolüsyonu, entropi yaklaşımını kullanarak verideki rastgele ve öngörülebilir bileşenleri elde eder. Maksimum entropi, spektral içeriği geliştirmeyi amaçlayan alternatif bir spektral kestirim yaklaşımı olup, maksimum entropi kavramına dayanmaktadır (Dondurur, 2018). Bu yaklaşım, ilk kez Burg (1967) tarafından ses dalgası verilerine uygulanmış ve güç spektrumu hesaplamasına farklı bir yaklaşım olan bir güç spektrumu kestirim algoritması kullanarak çözünürlüğü artırmayı amaçlamıştır.

Burg (1967), Eşitlik (1) ile verilen normal denklemlerde özilişki fonksiyonunu hesaplayarak, veriye hem ileri hem de geri yönde uygulanan bir kestirim hata süzgecinin güç değerini en aza indirmiştir. Bu yöntem, bugün maksimum entropi teorisine dayanan ve "Burg algoritması" olarak bilinen güçlü bir spektral dengeleme tekniğidir (Ulrych, 1972). Burg dekonvolüsyonunun matematik temeli Ulrych (1972), Le vd. (2022) ve Theodoridis ve Cooper (1981)'de bulunabilir. Günümüzde yöntem, bazı sınırlamalarına ve dekonvolüsyon sonrası bazı yanıltıcı yapıların ortaya çıkması gibi dezavantajlarına rağmen,

sismik verinin ayrımlılığını artırma amaçlı olarak geniş çapta kullanılmaktadır (Le vd., 2022).

Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan Burg dekonvolüsyonu sonuçları, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte Şekil 5'te verilmiştir. Dekonvolüsyon işlemi operatör boyu verilerin Şekil 2b ve 2f'de verilen özilişki kesitleri incelenerek belirlenmiş ve sentetik veri için 15 ms, çok kanallı sismik veri için ise 40 ms alınmıştır. Burg dekonvolüsyonunun, iğnecikleştirme dekonvolüsyonunda olduğu gibi, sentetik verinin ayrımlılığını belirgin şekilde artırdığı görülmektedir (Şekil 5a). Yansımaların frekansı artmış, onlap kesilmesi çok daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 5b'de verilen dekonvolüsyon öncesi ve sonrası 100. iz, işlemin iz üzerindeki etkilerinin iğnecikleştirme dekonvolüsyonuna benzer olduğunu işaret etmektedir: Burg dekonvolüsyonu da yansımaları bir iğneciğe dönüştürmeye çalışmaktadır. Ayrımlılıktaki artış, sentetik verinin spektrumunda da belirgindir (Şekil 5c). Orijinal verinin spektrumu ile karşılaştırıldığında spektrumun iğnecikleştirme dekonvolüsyonu çıktısına benzer şekilde genişlediği, Nyquist frekansına kadar olan yüksek frekanslı bileşenlerin genliklerinin yükseltildiği görülebilir. Buna karşın, sentetik verinin Burg dekonvolüsyonu çıktısında da yapay olaylar meydana gelmiştir. Birincil yansımalar paralel uzanan ve Şekil 5a ve 5b'de mavi oklarla gösterilen bu yapay olayların genlikleri, iğnecikleştirme dekonvolüsyonunda gözlenenlerden de küçüktür.

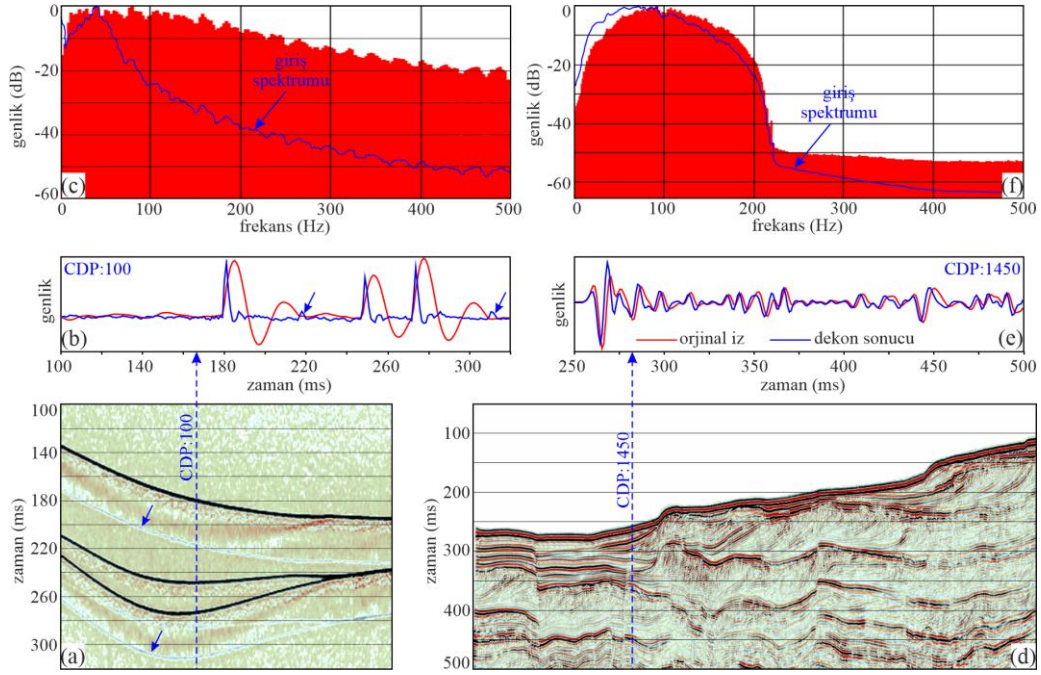
Çok kanallı sismik verinin de ayrımlılığında artış gözlenmekte olup, Burg dekonvolüsyonu sonrası delta klinoformlarından alınan yansımalar daha belirgindir (Şekil 5d). Yansımaların salınımlı karakteri azalmıştır.

Şekil 5e'de verilen 1450. izin dekonvolüsyon öncesi ve sonrası görünümü, işlemin sismik dalgacığı sıkıştırarak periyodunu azalttığını işaret etmektedir. Çok kanallı sismik verinin genlik spektrumunda da genişleme görülmektedir (Şekil 5f). Spektrumda, özellikle 100 Hz üzerindeki frekans bileşenlerinin genlikleri yükselmiş, düzgün değişen bir genlik spektrumu elde edilmiştir.

Adaptif dekonvolüsyon

Kaydedilen sismik veri genellikle durağan olmayan (nonstationary) özellikler sergiler. Wiener kestirim süzgeci yaklaşımı ile uygulanan iğnecikleştirme dekonvolüsyonu, sismik verinin ayrımlılığını artırma amaçlı olarak geniş çapta uygulansa da, bu yaklaşım sismik verinin durağan olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu nedenle, durağan olmayan sismik veriler için Wiener kestirim süzgeci, her zaman mükemmel performans göstermez (Wang, 1977).

En basit haliyle, Wang (1969), bir durağan olmayan zaman serisinin, her pencerenin neredeyse durağan olduğu bir dizi alt pencereye bölünebileceğini belirtmiştir. Daha sonra, her pencere için farklı bir Wiener süzgeci belirlenir ve uygulanır. L1 veya L2 normu gibi yaklaşımlar kullanan ve farklı temellere dayanan birçok dekonvolüsyon yöntemi önerilmiş ve sismik verilere uygulanmıştır (Chapman ve Barrodale, 1983). Adaptif dekonvolüsyon yöntemleri genellikle verinin istatistiksel yapısının, dekonvolüsyon operatörünü oluşturmak için kullanılan tasarım penceresi boyunca durağan olduğunu varsayar. Süzgeç katsayıları, adaptif bir algoritma kullanılarak giriş izinin her örneği için ayrı ayrı tasarlanır (Griffiths vd., 1977) ve dekonvolüsyon parametreleri uygulama sırasında otomatik olarak güncellenir.



Şekil 5. (a) Burg dekonvolüsyonu sonrası sıfır ofset sentetik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) Burg dekonvolüsyonu sonrası çok kanallı sismik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

Figure 5. Burg deconvolution results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after deconvolution. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (e) its average amplitude spectrum before and after deconvolution.

Adaptif dekonvolüsyon, sürekli olarak zamanla değişen bir kestirim hata süzgeci işlemidir. Bu çalışmada kullanılan yaklaşımda, bir iz örneği, geçmiş iz değerlerinin bir alt kümesinden kestirilir ve gerçek iz değeri ile bu kestirilen değer farkı hata olarak alınır. Eğer hata sıfırsa, kestirim süzgeci bir sonraki örneği kestirmek üzere değiştirilmeden bırakılır. Eğer hata sıfır değilse, her süzgeç katsayısı, hata miktarı, karşılık gelen iz değeri ve adaptasyon değerinin çarpımı ile elde edilen bir değere eşit bir miktarda artırılır.

Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan adaptif dekonvolüsyon sonucu, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte

Şekil 6'da verilmiştir. Dekonvolüsyon işlemi operatör boyu verilerin Şekil 2b ve 2f'de verilen özilişki kesitleri incelenerek belirlenmiş ve sentetik veri için 15 ms, çok kanallı sismik veri için ise 40 ms alınmıştır. Uygulamada, L2 normu iğnecikleştirme dekonvolüsyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Adaptif dekonvolüsyon işleminin, sentetik verinin ayrımlılığını belirgin şekilde artırdığı görülmektedir (Şekil 6a). Yansımaların frekansında ve onlap kesilmesinin sürekliliğinde artış olduğu görülmektedir. Şekil 6b'de verilen dekonvolüsyon öncesi ve sonrası 100. iz, adaptif dekonvolüsyonun sentetik iz üzerindeki etkilerini göstermektedir. İşlem, yansımaların

periyodunu azaltarak sismik dalgacığı sıkıştırmıştır. Ayrıca dalgacığın salınımlı karakterinin azaldığı da görülmektedir. Adaptif dekonvolüsyon sonrası sentetik verinin spektrumunda özellikle 60 Hz'in üzerindeki genliklerde ortalama 10 dB artış mevcuttur (Şekil 6c).

Çok kanallı sismik verinin adaptif dekonvolüsyon çıktısında (Şekil 6d) ve 1450. izin dekonvolüsyon öncesi ve sonrası görünümünde (Şekil 6e) de benzer etkiler mevcut olmakla birlikte, ayrımlılıktaki iyileşme sentetik veri kadar belirgin değildir. Sismik verinin genlik spektrumunda 100 Hz'in üzerindeki frekanslara ait genliklerin bir miktar yükseltildiği ve spektrumun genişlediği anlaşılmaktadır (Şekil 6f). Şekil 2e'de verilen orijinal migrasyon kesiti ile karşılaştırıldığında, adaptif dekonvolüsyon işleminin, çok kanallı sismik verinin geç varışlarındaki zayıf genlikli yansımaları biraz daha güçlendirdiği söylenebilir (Şekil 6d).

Q dengeleme (Q compensation)

Sismik sinyalin kaynaktan çıktıktan sonra yer içinde yayılırken maruz kaldığı soğurulma (absorption) etkisi, sinyalin genliğini azaltırken frekans içeriğini de düşürür. Kaynaktan üretilen sinyal genliği A_0 ve kaynaktan r kadar uzaktaki sinyal genliği ise A_r olmak üzere, soğurma etkisi

$$A_r = A_0 e^{-\alpha r} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada α soğurma katsayısıdır ve

$$\alpha = \frac{\pi f}{QV} \quad (4)$$

ile verilir. Burada f sinyalin frekansı, Q kalite faktörü ve V ise ortamın hızıdır. Eşitlik (3)'e göre, soğurma katsayısı α ne kadar yüksekse sinyal o denli fazla soğurulur ve Eşitlik (4)'e

göre de, sinyalin yüksek frekansları düşük frekanslara oranla daha fazla sönüme uğrar.

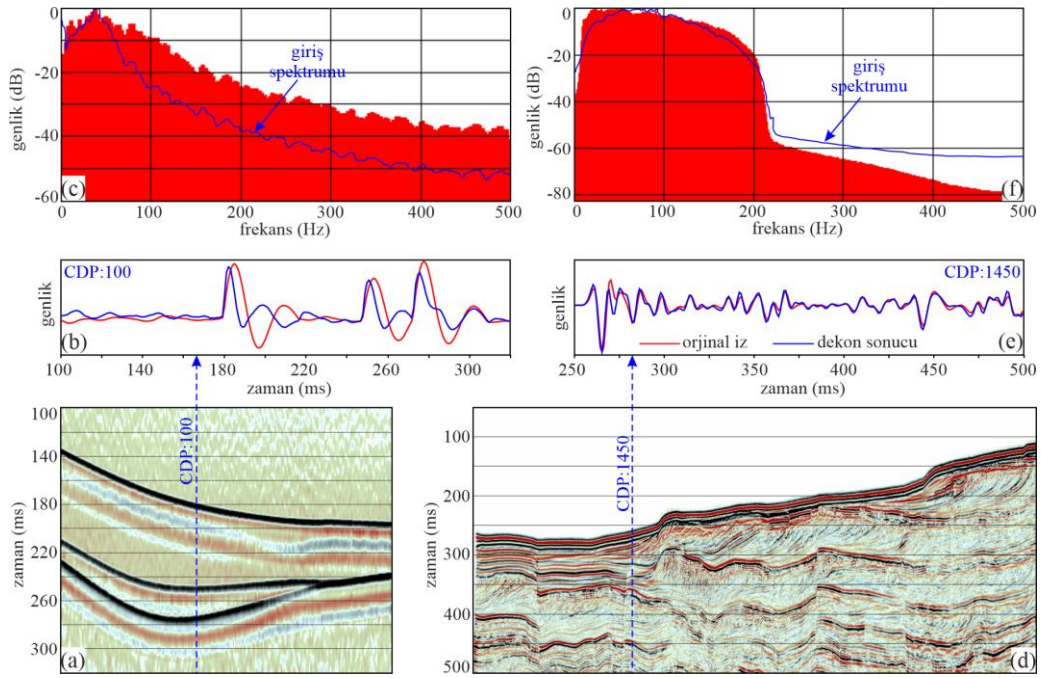
Sismik verilerden kalite faktörü Q 'yu tahmin etmek önemli bir konu haline gelmiştir (Nunes vd., 2011). Bunun üç önemli nedeni vardır. İlk olarak, eğer Q tahminleri mevcutsa, sismik verilerin ayrımlılığı artırılabilir ve bu da stratigrafik seviyelerin detaylı bir şekilde yorumlanmasını sağlar. İkinci olarak soğurma, zaman, genlik ve frekansla birlikte sismik nitelik (attribute) sınıflandırmasının temelini oluşturur. Üçüncü olarak da Q tahminleri, doğrudan hidrokarbon göstergeleri (Direct Hydrocarbon Indicators, DHI) olarak önerilmiştir.

Soğurma katsayısı büyük oranda Q kalite faktörü tarafından kontrol edilir. Buna karşın, yüzey sismik verilerinden Q değerini tahmin etmeye yönelik yöntemler hala sınırlıdır (Dasgupta ve Clark, 1998). Tonn (1991), Düşey Sismik Profil (Vertical Seismic Profile, VSP) verilerinden Q değerini tahmin etmek için kullanılan on farklı yöntemi kapsamlı bir şekilde karşılaştırmıştır. Buna göre, hiçbir yöntem genel olarak diğerinden üstün değildir ve performansları gerçek genlik verilerinin mevcudiyetine ve gürültü içeriğine oldukça bağlıdır (Tonn, 1991; Chen vd., 2014). Gerçek genlik verileri mevcut değilse, en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biri spektral oran yöntemidir. Bununla birlikte, frekansla yaklaşık doğrusal bir davranışı olduğu için, soğurma modeli olarak sıklıkla sabit Q modeli kullanılır. Bu model, ortamın soğurma özelliğini tek bir parametre ile tanımlamak için çok uygun bir modeldir (Nunes vd., 2011). Q değeri, jeolojide kaya mekaniğinde kullanılan Kayaç Kalite Faktörü (RQD) ile ilişkili olup, yüksek Q değerleri ortamın masif bir yapıda olduğunu işaret etmektedir. Yüksek Q değerine sahip ortamlarda sismik dalga daha az soğurulur. Yapılan uygulamalar göstermiştir ki, düşük Q değerleri için Q dengeleme işlemi daha yüksek ayrımlı sismik kesitler üretme eğilimi

göstermektedir. Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan Q dengeleme işlemi sonuçları, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte Şekil 7'de verilmiştir. Q dengeleme işleminde, Q değeri sabit ve sentetik veri için $Q=60$, çok kanallı sismik veri için ise $Q=80$ alınmıştır. Q dengelemenin, sentetik verinin ayrımlılığını oldukça artırdığı görülmektedir (Şekil 7a). Yansımaların frekansı artmış, onlap kesilmesi daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 7b'deki 100. izinin görünümü, sentetik verideki ayrımlılık değişimini ortaya koymaktadır. Buna göre yansımaların periyodu oldukça küçülmüş, yan salınımlarının genlikleri azalmıştır. Bununla birlikte, izdeki yüksek frekanslı gürültü varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 7b).

Ayrımlılıktaki artış, sentetik verinin spektrumunda da görülmektedir (Şekil 7c). Özellikle 100 Hz ve üzerindeki frekans bileşenlerinin genlikleri Q dengeleme sonrası yükselmiştir.

Çok kanallı sismik verideki ayrımlılık artışı da hem sismik kesitte (Şekil 7d), hem de 1450. iz üzerinde (Şekil 7e) oldukça belirgindir. Sismik kesitte, Q dengeleme sonrası tüm yansımaların periyodunun azaldığı ve frekansının arttığı, izden iz sürekliliğinin iyileştiği, delta klinoformlarından alınan yansımaların daha belirgin hale geldiği gözlenmektedir. Yansımaların salınımlı



Şekil 6. (a) Adaptif dekonvolüsyon sonrası sıfır ofset sentetik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) Adaptif dekonvolüsyon sonrası çok kanallı sismik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

Figure 6. Adaptive deconvolution results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after deconvolution. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (f) its average amplitude spectrum before and after deconvolution.

karakteri azalmıştır. Ayrırlılıktaki iyileşme 1450. izde de yansıma periyotlarının azalması şeklinde ortaya çıkmaktadır. Çok kanallı sismik verinin genlik spektrumunda 100 Hz'den düşük frekans bileşenlerinin genliklerinde azalma gözlenirken, 100 Hz ve üzerindeki bileşenlerin genlikleri aynı oranda artmıştır (Şekil 7f).

Zaman değişken spektral beyazlatma (time variant spectral whitening)

Zaman değişken spektral beyazlatma (TVSW), sismik verilerin spektral genişliğini ve dolayısıyla düşey ayrırlılığını artırmak için kullanılan bir yöntemdir (Yılmaz, 2001; Dondurur, 2009; Dondurur, 2018). TVSW, yer içinin sismik veri üzerindeki soğurma etkilerini gidermek için ilk kez Gibson ve Larner (1982) tarafından önerilmiştir. Yöntem, sinyalin kısmi frekans bantlarının, ait oldukları zarflarının tersiyle çarpılması ve bunların toplanması esasına dayanır (Naghadeh ve Morley, 2017).

Sismik veri farklı geçirim bantlarına sahip süzgeçlerle süzülürse, sismik dalgacığın zamanla durağan olmadığı ve daha yüksek frekansların yeryüzüne yakın kısımlarda (erken varışlarda) bulunduğu görülür. TVSW uygulamasında giriş sinyali, farklı dar geçiş bantlarına sahip bir dizi bant geçiren süzgeç uygulayarak farklı frekans bileşenlerine ayrılır. Yüksek frekans bileşenleri daha hızlı soğurulduğu için düşük frekanslı bileşenlerin genliklerinin zayıflama oranları, orta ve yüksek frekanslı bileşenlerinkinden daha küçüktür. Ayrıştırma sonrasında, giriş sinyalinin farklı frekans bantlarındaki genliklerinin zarflarının tersine eşit olan, farklı kazanç fonksiyonları tanımlanır. Daha sonra bu kazanç fonksiyonları süzgeçlenmiş izlerle çarpılır ve sonuçlar toplanarak çıkış TVSW izi elde edilir. Süzgeç paneli sayısı, giriş verisinin mevcut bant genişliğine göre tasarlanır. TVSW bazen iğnecikleştirme dekonvolüsyondan sonra, daha genel olarak da zamansal ayrırlılığını artırmak için son işlem olarak migrasyon kesitlerine

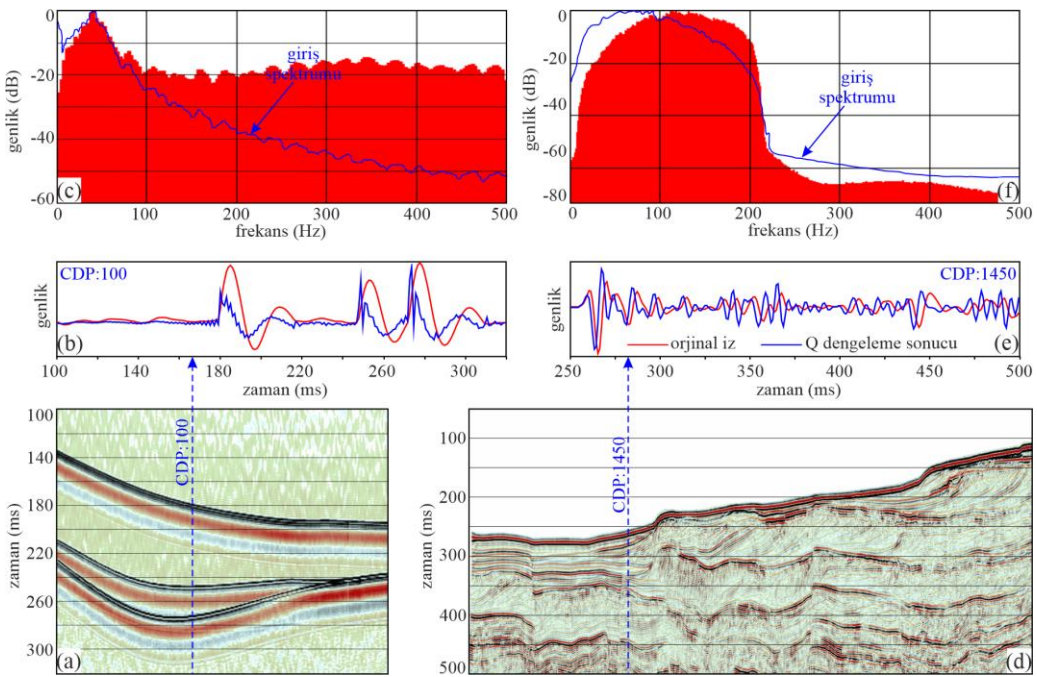
uygulanır. Yöntem, kullanışlı spektral bant içerisindeki genlikleri eşdeğer genlik seviyesine taşımayı hedefler ve spektral bantı düzgünleştirir. TVSW, aynı zamanda verideki sismik dalgacığı kısmen sıkıştırıran bir işlemidir. Geleneksel Wiener dekonvolüsyonundan farkı, dekonvolüsyonun sadece sismik dalgayı sıkıştırmakla kalmayıp aynı zamanda tekrarlı yansımaları ve dalgacığın salınımlı karakterini de yok etmesidir (Dondurur, 2009). Buna karşın TVSW dalgacığı sıkıştırır, ancak sismik verinin salınımlı karakteri ve fazı üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Naghadeh ve Morley (2017), yöntemin yüksek genlikleri azalttığını ve düşük genlikleri ise artırdığını, bu durumun sismik ters çözüm çalışmalarında sorun oluşturabileceğini öne sürmüştür.

Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan TVSW işlemi sonucu, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte Şekil 8'de verilmiştir. TVSW işleminde, sentetik ve çok kanallı sismik verinin her ikisi için de 4 panelden oluşan süzgeçleme yapılmıştır. TVSW uygulamasında kesme frekans aralıkları eşit olarak kullanılabilirdiği gibi, verinin genlik spektrumu incelenerek uygun aralıklar da seçilebilir. Bu çalışmada sismik verinin genlik spektrumundaki değişim bölgeleri dikkate alınarak süzgeç kesme frekansları 8-80, 50-120, 90-150 ve 130-220 Hz olarak alınmıştır. TVSW işleminin, sentetik verinin ayrırlılığını artırdığı, onlap kesilmesinin bir miktar daha belirgin hale geldiği görülmektedir (Şekil 8a). Ancak veride ana yansımaları takip eden yan salınımlar şeklinde ortaya çıkan görece yüksek frekanslı düşük genlikli gürültüler oluşmuştur (Şekil 8b). Bu gürültülerin genliği, adaptif dekonvolüsyon ve Q dengeleme sonrası orta çıkan benzer gürültülere göre çok daha düşüktür. Ayrırlılıktaki artış, sentetik verinin spektrumunda da görülmektedir (Şekil 8c). 50-220 Hz arasındaki frekans bileşenlerinin genlikleri TVSW sonrası en az 20 dB yükselmiştir. TVSW kesme frekansı 220 Hz ile

sınırlandırıldığından, işlem bu frekansın üzerindeki bileşenlerin genliklerinde artış oluşturmamıştır.

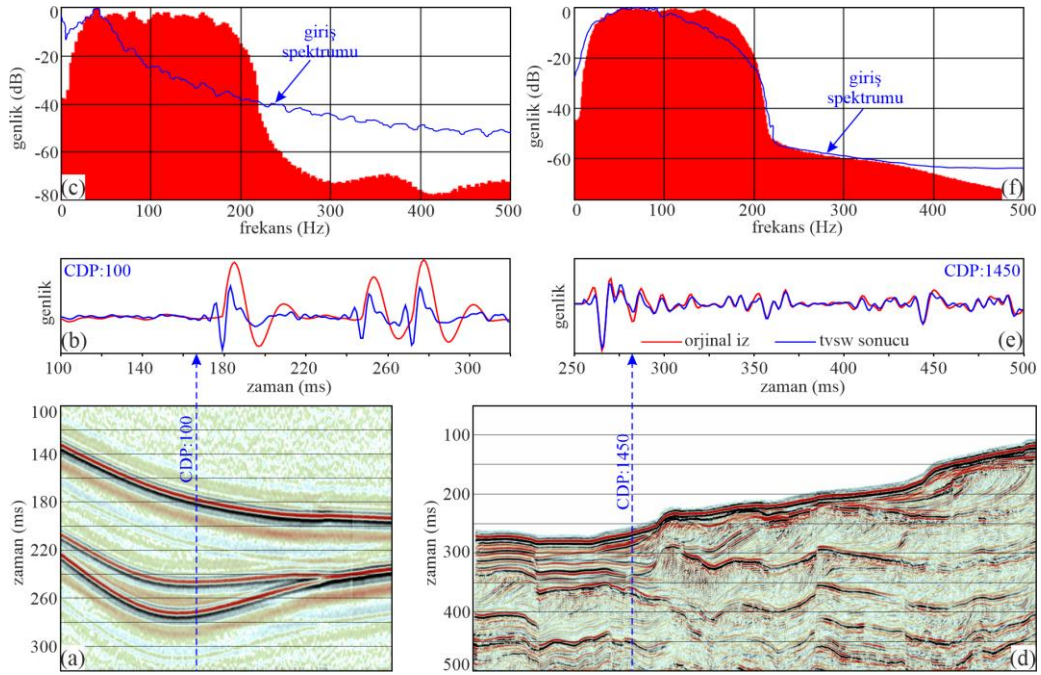
Şekil 8d'deki sismik kesitte TVSW sonrası delta klinoformlarından alınan yansımaların daha belirgin hale geldiği söylenebilir. Ancak TVSW sonrası sismik verinin ayrımlılığındaki artış özellikle verinin geç varışlarında belirgindir. Bu

kısımlarda görülen düşük frekanslı yansımaların frekanslarının TVSW tarafından yükseltildiği gözlenmiştir. Şekil 8e'de verilen 1450. izin TVSW öncesi ve sonrası görünümü, işlemin sismik dalgacığın periyodu üzerindeki etkisinin çok belirgin olmadığını işaret etmektedir. Çok kanallı sismik verinin genlik spektrumunda, özellikle 100-220 Hz arasındaki genliklerde artış meydana gelmiştir (Şekil 8f).



Şekil 7. (a) Q dengeleme işlemi sonrası sıfır ofset sentetik veri, dengeleme öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) Q dengeleme işlemi sonrası çok kanallı sismik veri, dengeleme öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

Figure 7. Q compensation results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after compensation. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (f) its average amplitude spectrum before and after compensation.



Şekil 8. (a) Zaman değişken spektral beyazlatma sonrası sıfır ofset sentetik veri, spektral beyazlatma öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) Zaman değişken spektral beyazlatma sonrası çok kanallı sismik veri, spektral beyazlatma öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

Figure 8. Time variant spectral whitening results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after spectral whitening. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (e) its average amplitude spectrum before and after spectral whitening.

Spektral biçimlendirme (spectral shaping)

Spektral biçimlendirme, sismik izlerin frekans ortamı spektral şekillendirmesini sağlar. İşlem, verinin fazını değiştirmeden tüm frekans bileşenlerini belirtilen bir katsayı değeri ile çarpar. Katsayı değeri, bir dizi frekans-genlik çifti ile tanımlanır. Sismik verinin frekansını yükseltmedeki temel problem, faz spektrumunu değiştirmeksizin verinin genlik spektrumunu genişletmektir. Fourier teoremine göre, bir zaman serisinin genlik ($A(\omega)$) ve faz ($\phi(\omega)$) spektrumları

$$A(\omega) = \sqrt{R(\omega)^2 + I(\omega)^2} \quad (5)$$

$$\phi(\omega) = \text{atan} \left(\frac{I(\omega)}{R(\omega)} \right) \quad (6)$$

şeklinde verilir. Burada $I(\omega)$ sanal, $R(\omega)$ ise gerçel bileşeni göstermektedir. Eşitlik (6)'ya göre, faz spektrumunun sabit kalması için $I(\omega)/R(\omega)$ oranının değişmemesi gerekir. Bu durum, sadece, oranın pay ve paydasının sabit bir katsayı ile çarpılması ile sağlanabilir (Al-Moughraby, 2004). Gerçel ve sanal bileşen değerlerini yükselten ancak faz değerini değiştirmeyen bu katsayının uygulanması ile sismik verinin frekans bandı genişletilebilir. Yapılan işlem spektral biçimlendirme olarak bilinir. Spektral biçimlendirme, belirtilen frekans/genlik çiftlerine göre frekans ortamında

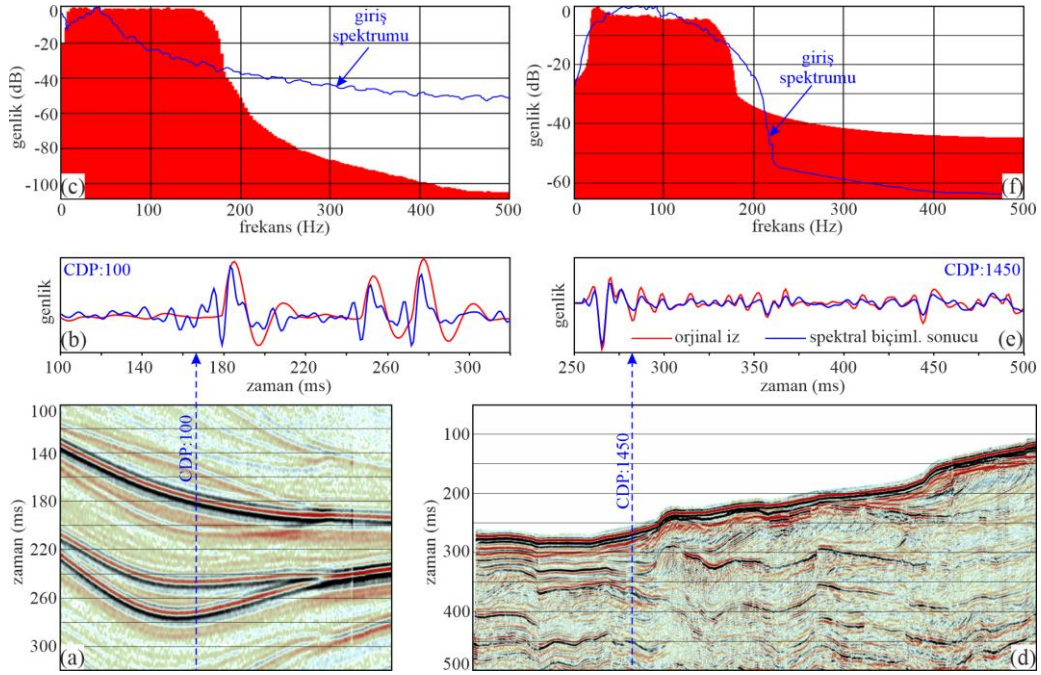
genlik ölçekleme uygular. Ölçekleme fonksiyonu ardışık frekanslar arasında doğrusal olarak enterpole edilir. Bu çalışmada spektral biçimlendirme sonrası genlikler, maksimum genliğin yüzde oranı olarak tanımlanmıştır.

Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan spektral biçimlendirme işlemi sonucu, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte Şekil 9'da verilmiştir. Spektral biçimlendirme işleminde, sentetik ve çok kanallı sismik verinin her ikisi için spektral genlikler maksimum genliğin % oranı olarak ölçeklenmiştir. Sentetik veri için kullanılan frekans/genlik çiftleri 6-0,8-100,150-100,180-0 olarak alınmıştır. Buna göre, spektral biçimlendirme işlemi ile spektrumun 8-150 Hz arasında kalan kısmı düzleştirilmiş, 6-8 Hz ve 150-180 Hz arası ise geçiş bölgesi olarak alınmıştır. Bu şekilde uygulanan spektral biçimlendirme ile 8 Hz altı ve 180 Hz üstü genlikler tamamen bastırılır. Çok kanallı sismik veri için ise kullanılan frekans/genlik çiftleri ise 18-0, 22-100, 150-100,180-0 olarak alınmıştır. Buna göre, işlem sonrası 22-150 Hz arası düzleştirilmiş, 18-22 Hz ve 150-180 Hz arası ise geçiş bölgesi olarak alınmıştır. 18 Hz altı ve 180 Hz üstü genlikler ise spektral biçimlendirme işlemi ile tamamen bastırılır. Spektral biçimlendirme oldukça etkili bir spektral dengeleme yöntemidir. Frekans aralığı gereğinden geniş seçildiğinde, yöntem özellikle yüksek frekanslı gürültü genliklerini de yükseltmekte ve verinin ayrımlılığını düşürmektedir. Bu nedenle spektral

biçimlendirme işleminde çok kanallı sismik verinin yüksek frekans kesme değeri 180 Hz'e kadar düşürülmüştür.

Spektral biçimlendirme işlemi, sentetik verinin ayrımlılığını oldukça yükseltmiştir (Şekil 9a ve 9b). Sentetik verinin genlik spektrumu spektral biçimlendirme işlemi sonrası, tanımlanan spektral bant aralığında (8-150 Hz) tamamen yatay hale gelmiştir (Şekil 9c). Ayrıca, yöntemin veriye bir bant-geçişli süzgeç etkisi yaptığı ve tanımlanan bant genişliği dışındaki genlikleri bastırdığı görülmektedir. Bununla birlikte, spektral biçimlendirme sonrası sentetik veride çok miktarda yapay olay meydana geldiği görülmektedir (Şekil 9a). Bu yapay olaylar görece düşük genliklere sahip olup, ana yansımalara paralel uzanan gürültülerdir.

Çok kanallı sismik verideki ayrımlılık artışı sentetik veriye oranla daha az belirgindir (Şekil 9d ve 9e). Kesitte spektral biçimlendirme sonrası yansıma genlikleri bir miktar daha belirgin hale gelmekle birlikte, işlem sonrası özellikle sığ kısımlarda düşük frekanslı bir gürültünün oluştuğu görülmektedir. Bu gürültü, olasılıkla spektrumda (Şekil 9f) 20 Hz civarı ortaya çıkan yüksek genliklere karşılık gelmektedir. Yöntem hem düşük ve hem de yüksek frekanslı bileşenlerin genliklerini artırma eğilimi gösterdiğinden, söz konusu frekans bantlarındaki gürültü genliklerinde de yükselme meydana getirebilmektedir. Bu nedenle, spektral biçimlendirme uygulanırken kullanılacak frekans bandının çok dikkatli seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 9. (a) Spektral biçimlendirme sonrası sıfır ofset sentetik veri, spektral biçimlendirme öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) Spektral biçimlendirme sonrası çok kanallı sismik veri, spektral biçimlendirme öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

Figure 9. Spectral shaping results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after spectral shaping. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (f) its average amplitude spectrum before and after spectral shaping.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Sismik verinin bant genişliğinin artırılması, verinin hem düşük ve hem de yüksek frekans bileşenlerine sahip olmasının sağlanması, sismik veri işlemin en önemli hedeflerinden biri olmuştur (Yılmaz, 2001; Karlı, 2011; Karlı vd., 2006). Yer altında yayılan sismik dalgaların frekansları soğrulmadan etkilenir. Ayrıca, birçok yer altı hidrokarbon rezervuarı, derinliklerine bağlı olarak sismik verinin çözünürlük sınırlarının altında bulunmaktadır. Bunlar sismik veri ile tespit edilebilse bile, veri setinin bant sınırlı doğası nedeniyle frekans genişliğini artırmadan, bu tür küçük çaplı rezervuarların haritalanması ve karakterize

edilmesi oldukça zordur (Zhang vd., 2023; Kumar vd., 2008).

Yer, sismik sinyalin yüksek frekanslarını zayıflatan bir alçak geçişli süzgeç gibi davranır. Sismik dalgacığın seyahati sırasında sinyalin baskın frekansı düşük frekanslara kayar ve ayrımlılık azalır. Bu aşamada, ayrımlılık (resolution) ve ayırt edilebilirlik (detectability) terimlerinin farklı kavramlar olduğunu belirtmek gerekir. Ayrımlılık, yeraltındaki bir tabakanın her iki sınırına ait yansımaların sismik veride ayrı yansımalar olarak ayırt edilebilmesidir (Kallweit ve Wood, 1982). Genel olarak ayrımlılık, iki olayın sismik kesitte ayrı olaylar olarak tanımlanabilmesi için gereken minimum

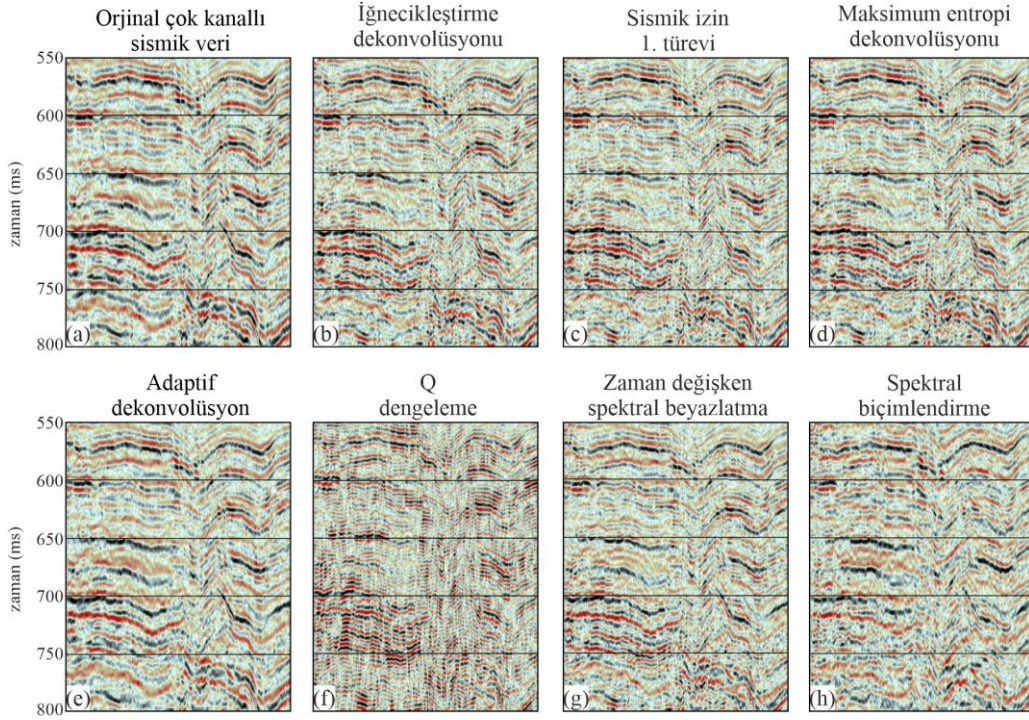
mesafedir (Şekil 1a, Sheriff ve Geldart, 1995). Ayırt edilebilirlik ise, bir yansımanın, ayrı yansıma olayları olarak tanımlanabilmesinden bağımsız olarak, sismik verideki gürültünün içerisinden ayırt edilebilecek kadar güçlü olmasıdır. Ayırt edilebilir yansımalar, sismik verinin ayrımlılığına bağlı olarak, ayrı yansımalar olarak görülebilir veya görülemeyebilir (Kallweit ve Wood, 1982).

Deniz sismiği verilerinin veri toplama parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesi de, sismik verinin ayrımlılığı üzerinde önemli etkiye sahiptir (Dondurur, 2018). Yüzeğe yakın çekilen alıcı kablo ile yüksek frekanslar kaydedilmesine karşın, aynı zamanda alıcılar deniz yüzeyine yakın olduğu için, sismik veri yüzey gürültülerinden de çok fazla etkilenir. Bant-geçişli süzgeç ile hem düşük hem de yüksek frekanslı gürültü genlikleri veriden atılsa da, süzgeçleme, verinin düşey (zamansal) ayrımlılığını çoğu kez artırmaz, verideki gürültü genliklerini bastırır. Düşey ayrımlılığın artırılması için sadece yüksek frekanslara ihtiyaç duyulduğu fikri yanlıştır. Ayrımlılığın artırılması için hem düşük ve hem de yüksek frekanslı bileşenlere aynı anda gereksinim vardır (Yılmaz, 2001). Dolayısıyla sismik verinin hem düşük ve hem de yüksek frekansları aynı anda içeren, geniş bir frekans bandına sahip spektrumu olması istenir (Dondurur, 2009).

Bu nedenlerle, sismik verinin bant genişliğinin artırılması önem taşımakta olup, bu çalışmada, yığma sonrası sismik verinin ayrımlılığını artırmaya yönelik farklı veri işlem yaklaşımları karşılaştırmalı şekilde uygulanmıştır. Şekil 10, ayrımlılık artırmaya yönelik uygulanan yöntemlerin, Şekil 2e'de verilen giriş migrasyon kesitinin bir kısmı üzerindeki sonuçlarının karşılaştırmalı yakınlaştırılmış görünümünü sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, yöntemlerin avantajlarının yanı sıra,

dezavantajlarının varlığını da işaret etmektedir. Bazı yöntemler ayrımlılığı artırmalarının yanı sıra izden ize sürekliliği ve yansıma genliklerini belirginleştirirken (Şekil 10b, 10c ve 10d), bazı yöntemler ise düşey ayrımlılığı belirgin şekilde iyileştirmektedir (Şekil 10b, 10d, 10f ve 10g). Çizelge 2, yöntemlerden elde edilen sonuçların karşılaştırmasını vermektedir. Düşey ayrımlılığı artırma amaçlı kullanılan yöntemler, izden ize süreklilikte yaptıkları iyileştirme, sismik dalgacığın salınımını giderme, verinin spektrumunu genişletme, yapay olay üretme ve verideki gürültüyü bastırabilme kapasiteleri açısından değerlendirilerek karşılaştırılmıştır. Sismik verideki izden ize sürekliliğin iyileştirilmesi konusunda, çok kanallı sismik veri üzerindeki uygulamalardan, yöntemlerin yapay olaylar ve gürültüler üretme durumu ile ilgili olarak ise sentetik veriden çıkarımlar yapılmıştır.

Kesitteki birincil yansımaları belirginleştiren ve izden ize sürekliliği en fazla iyileştiren yöntemlerin iğnecikleştirme ve maksimum entropi dekonvolüsyonu ile Q dengeleme olduğu, yansımaların sürekliliğini en fazla azaltan yöntemin ise spektral biçimlendirme olduğu anlaşılmıştır (Şekil 10, Çizelge 2). Sismik verideki yansımaların salınımlı görünümünü giderme konusunda en başarılı yöntemler de yine iğnecikleştirme ve maksimum entropi dekonvolüsyonu ile Q dengelemedir. Diğer tüm yöntemlerin bu konuda başarısız olduğu söylenebilir. Bu çalışmada kullanılan tüm ayrımlılık artırma amaçlı yöntemler, sismik verinin spektrumunda genişleme oluşturmuştur. Bunlar arasında en başarılı olanlar ise iğnecikleştirme dekonvolüsyonu, sismik izin birinci türevi, TVSW ve spektral biçimlendirmedir (Çizelge 2). Bunun dışında, Burg dekonvolüsyonu ve Q dengeleme ise yüksek frekans genliklerini güçlendirirken, düşük frekanslı bileşenlerin genliklerini azaltmıştır.



Şekil 10. (a) Giriş migrasyon kesitine ayrımlılık artırmaya yönelik uygulanan (b) iğnecikleştirme dekonvolüsyonu, (c) sismik izin 1. Türevi, (d) maksimum entropi (Burg) dekonvolüsyonu, (e) adaptif dekonvolüsyon, (f) Q dengeleme, (g) zaman değişken spektral beyazlatma (TVSW) ve (h) spektral biçimlendirme yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırmalı görünümü. Sismik kesitin tamamı Şekil 2d'de verilmiştir.

Figure 10. Comparison of results with (a) input migration section after applying (b) spiking deconvolution, (c) time derivative, (d) maximum entropy (Burg) deconvolution, (e) adaptive deconvolution, (f) Q compensation, (g) time variant spectral whitening (TVSW), and (h) spectral shaping methods to enhance temporal resolution. The entire seismic section is shown in Figure 2d.

Bu çalışmada kullanılan yöntemler temel olarak ayrımlılık artırmaya yöneliktir. Dolayısıyla, kullanılan yöntemlerin belirgin bir gürültü bastırma özellikleri yoktur. Hatta hemen her yöntem verinin spektrumunu düzleştirmek amacıyla, spektrumun hem düşük hem de yüksek frekanslı kısmındaki genlikleri artırma eğilimi göstermektedir. Bu durum, yöntemlerin sismik verideki gürültüleri bastırmaktan çok, özellikle verideki yüksek frekanslı gelişigüzel gürültü genliklerini artırma eğilimi gösterdiğini işaret etmektedir. Söz konusu durum,

uygulamaların sonuçlarını gösteren çıktıların hemen tamamında, özellikle kesitlerin geç varışlarında artış gösteren gelişigüzel gürültü genliklerinden ve sismik verilerin tek izinin karşılaştırmalı gösterimlerindeki yüksek frekanslı gürültüden anlaşılmaktadır (Şekil 3b'den Şekil 9b'ye ve Şekil 3e'den Şekil 9e'ye). Uygulamalarda sentetik verideki yüksek frekanslı genlikler süzülmediğinden, yöntemlerin ürettiği gürültü miktarı sentetik verinin özellikle tek iz gösterimlerinde belirgindir. Gerçek sismik veri ise bant geçişi

Çizelge 2. Sismik verinin ayrımlılığını artırmaya yönelik uygulanan yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması.

Table 2. Comparison of advantages and disadvantages of the methods employed to improve the vertical resolution of seismics data.

Yöntem	İzden ize süreklilik	Salınım giderme	Spektrum genişletme	Gürültü üretme	Yapay olay üretme
İğnecikleştirme dekonvolüsyonu	çok iyi	çok iyi	çok iyi	yüksek	orta
Sismik izin 1. türevi	iyi	zayıf	orta	düşük	iyi
Burg dekonvolüsyonu	çok iyi	çok iyi	iyi	yüksek	orta
Adaptif dekonvolüsyon	orta	iyi	iyi	düşük	iyi
Q dengeleme	çok iyi	orta	iyi	yüksek	iyi
TVSW	iyi	orta	çok iyi	düşük	iyi
Spektral biçimlendirme	kötü	kötü	çok iyi	orta	kötü

süzgeç ile süzüldüğünden, uygulanan işlemler sonrası hem düşük ve hem de yüksek frekanslı yapay gürültülerden olabildiğince arındırılmıştır. Geç varışlarda görülen gelişigüzel gürültüdeki artış, birinci türev (Şekil 4), adaptif dekonvolüsyon (Şekil 6) ve TVSW (Şekil 8) çıktısında kabul edilebilir düzeydedir (Çizelge 2). Bu durum, diğer tüm yöntemlerin çıktısına uygun bir bant-geçişli süzgeç uygulamasını zorunlu kılabilir. Bu uygulama, konvansiyonel Wiener-Levinson dekonvolüsyon uygulamalarında standart bir işlemdir (Yılmaz, 2001; Dondurur, 2009; Dondurur, 2018). Bu çalışmanın temel amacı, uygulanan yöntemlerin ortaya çıkardığı yan/olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması için çözümler önermekten ve bunları uygulamaktan çok, farklı ayrımlılık artırma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymak olduğundan, yöntemler tarafından üretilen düşük ve yüksek frekanslı gürültülerin detaylı analizine ve bunların veriden atılması ile ilgili yöntemlerin tartışmalarına girilmemiştir.

Uygulanan bazı yöntemlerin yapay olaylar ürettiği görülmüştür (Çizelge 2). Bu yapay olaylar, gerçek sismik veriden çok sentetik veri

üzerinde belirgindir. Bunun nedeni olasılıkla, yapay olayların genliklerinin birincil yansımalarla göre çok küçük olması ve gerçek sismik veride, birincil yansıma genliklerinin altında kaybolduklarından belirgin şekilde görülmemeleridir. Bu olaylar, iğnecikleştirme ve maksimum entropi dekonvolüsyonları ile spektral biçimlendirme sonuçlarında görülen birincil yansımalarla paralel uzanan yüksek frekanslı ve düşük genlikli olaylar olarak ortaya çıkabilmektedir (Şekil 3a, 5a ve 9a).

KATKI BELİRTME

Bu çalışmada kullanılan çok kanallı sismik veri, TÜbitak tarafından desteklenen 121Y225 kodlu TÜbitak-1001 projesi kapsamında toplanmıştır. Projenin yürütücüsü olarak veri üzerinde uygulamaların yapılmasına izin veren ve uygulamalar konusunda destek olan Prof. Dr. Derman Dondurur'a ve makaleye sağladıkları katkılardan dolayı hakemlere de teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Al-Moughraby, B.M. 2004. Seismic Frequency Enhancement Through Spectral Shaping. PhD Thesis, University of Tulsa.
- Berkhout, A.J. 1984. Seismic Resolution: A quantitative analysis of resolving power of acoustical echo techniques. Geophysical Press Limited, London.
- Burg, J.P. 1967. Maximum entropy spectral analysis. Paper presented at the SEG 37th Meeting, Oklahoma.
- Chapman, N.R., and Barrodale, I. 1983. Deconvolution of marine seismic data using the L1 norm. Geophys. J. R. Astr. Soc., 72, 93-100.
- Chen, Z., Chen, X., Wang, Y., and Li, J. 2014. Estimation of Q factors from reflection seismic data for a band-limited and stabilized inverse Q filter driven by an average-Q model. Journal of Applied Geophysics, 101, 86-94.
- Choi, Y., Seol, S. J., Byun, J., and Kim, Y. 2019. Vertical resolution enhancement of seismic data with convolutional U-net. Paper presented at the SEG International Exposition and Annual Meeting, San Antonio, USA.
- Chopra, S., Castagna, J., and Portniaguine, O. 2006. Seismic resolution and thin-bed reflectivity inversion. CSEG RECORDER, 19-25.
- Dasgupta, R., and Clark, R.A. 1998. Estimation of Q from surface seismic reflection data. Geophysics, 63, 2120-2128.
- Dondurur, D. 2009. Deniz Sismiğinde Veri İşlem. TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Yayını.
- Dondurur, D. 2018. Acquisition and Processing of Marine Seismic Data. Elsevier Science Publishing Co.
- Dragoset, B. 2000. Introduction to air guns and air-gun arrays. Leading Edge, 19, 892-897.
- Faleide, T.S., Braathen, A., Lecomte, I., Mulrooney, M.J., Midtkandal, I., Bugge, A.J., and Planke, S. 2021. Impacts of seismic resolution on fault interpretation: Insights from seismic modeling. Tectonophysics, 816, 229008.
- Gibson, B., and Lerner, K.L. 1982. Comparison of spectral flattening techniques. Unpublished technical document, Western Geophysical Company.
- Griffiths, L.J., Smolka, F.R., and Trembly, L.D. 1977. Adaptive deconvolution: A new technique for processing time-varying seismic data. Geophysics, 42(4), 742-759.
- Jenkins, F.A., and White, H.E. 1957. Fundamentals of optics. McGraw Hill Publishing Co.
- Jo, Y., Choi, Y., Seol, S. J., and Byun, J. 2022. Machine learning-based vertical resolution enhancement considering the seismic attenuation. Journal of Petroleum Science and Engineering, 208, 109657.
- Kallweit, R.S., and Wood, L.C. 1982. The limits of resolution of zero-phase wavelets. Geophysics, 47(7), 1035-1046.
- Karslı, H. 2002. Sismik yığma izlerinin karmaşık iz analizi ile ayrımlılık açısından değerlendirilmesi. Yerbilimleri, 26, 15-26.
- Karslı, H. 2011. An application of the autoregressive extrapolation technique to enhance deconvolution results: a 2D marine data example. Geophysical Prospecting, 59, 56-65.

- Karslı, H. 2006. Further improvement of temporal resolution of seismic data by autoregressive (AR) spectral extrapolation. *Journal of Applied Geophysics*, 59, 324-336.
- Karslı, H., Dondurur, D., and Çifçi, G. 2006. Application of complex-trace analysis to seismic data for random-noise suppression and temporal resolution improvement. *Geophysics*, 71(3), V79-V86.
- Knapp, R.W. 1990. Vertical resolution of thick beds, thin beds, and thin-bed cyclothems. *Geophysics*, 55(9), 1128-1296.
- Knapp, R.W. 1993. Energy distribution in wavelets and implications on resolving power. *Geophysics*, 58, 39-46.
- Koefoed, O. 1981. Aspects of vertical seismic resolution. *Geophysical Prospecting*, 29, 21-30.
- Kumar, S., Kumari, K., and Biswal, A. 2008. Frequency enhancement of seismic data - A comparative study. *CSEG Recorder*, 33, 38-43.
- Le, L.V., Kim, T.J., Kim, Y.D., and Aspnes, D.E. 2022. Decoding 'Maximum Entropy' Deconvolution. *Entropy*, 24, 1238.
- Li, Y., Zhang, G., and Duan, J. 2020. Extended stable factor method for the inverse Q-filter. *Geophysics*, 85(3), T155-T163.
- Manenti, R.R., Souza, W.E., and Porsani, M.J. 2018. Spectral whitening based on the singular spectral analysis method. *Journal of Geophysical Engineering*, 15(4), 1460-1469.
- Naghadeh, D.H., and Morley, C.K. 2017. Enhancement of temporal resolution using improved time-variant spectral whitening. *Journal of Geophysical Engineering*, 14(4), 822-832.
- Nasif, A. 2024. Enhancing Low- and high-frequency components of the seismic data to emphasize BSRs and bright spots and implications for seismic attribute analysis. *Journal of Earth System Science*, 133(1), 14-33.
- Nose-Filho, K., Takahata, A.K., and Lopes, R. 2016. A fast algorithm for sparse multichannel blind deconvolution. *Geophysics*, 81(1), V7-V16.
- Nunes, B.I.C., de Medeiros, W.E., do Nascimento, A.F., and Moreira, J.A.M. 2011. Estimating quality factor from surface seismic data: A comparison of current approaches. *Journal of Applied Geophysics*, 75, 161-170.
- Peacock, K.L., and Treitel, S. 1969. Predictive deconvolution: Theory and practice. *Geophysics*, 34, 155-169.
- Ricker, N. 1953. Wavelet contraction, wavelet expansion and the control of seismic resolution. *Geophysics*, 18, 769-792.
- Robinson, E.A., and Treitel, S. 1967. Principles of digital Wiener filtering. *Geophysical Prospecting*, 15, 311-333.
- Sacchi, M.D., and Ulrych, T.J. 2007. On the recovery of missing low and high-frequency information from bandlimited reflectivity data. *AGU Fall Meeting 2007, Expanded Abstracts*, S33E-05.
- Sheriff, R.E., and Geldart, L.P. 1995. *Exploration Seismology*. Cambridge University Press.
- Theodoridis, S., and Cooper, D.C. 1981. Application of the maximum entropy spectrum analysis technique to signals with spectral peaks of finite width. *Signal Processing*, 3, 109-122.
- Tian, Y., Gao, J., and Wang, D. 2022. Improving seismic resolution based on

- enhanced multi-channel variational mode decomposition. *Journal of Applied Geophysics*, 199, 104592.
- Tonn, R. 1991. The determination of the seismic quality factor Q from VSP Data: a comparison of different computational methods. *Geophysical Prospecting*, 39, 1-27.
- Ulrych, T.J. 1972. Maximum entropy power spectrum of truncated sinusoids. *Journal of Geophysical Research*, 77(8), 1396-1400.
- Walker, C., and Ulrych, T.J. 1983. Autoregressive modeling of the acoustic impedance. *Geophysics* 48, 1338-1350.
- Wang, R.J. 1969. The determination of optimum gate lengths for time-varying Wiener filtering, *Geophysics*, 34, 683-695.
- Wang, R.J. 1977. Adaptive Predictive Deconvolution of Seismic Data. *Geophysical Prospecting*, 25, 342-381.
- Wang, Y., Zhang, G., and Li, H. 2022. The high-resolution seismic deconvolution method based on joint sparse representation using logging-seismic data. *Geophysics and Prospecting*, 70(8), 1313-1326.
- Widess, M.B. 1973. How thin is a thin bed. *Geophysics*, 38, 1176-1180.
- Yılmaz, Ö. 2001. *Seismic Data Analysis*. SEG Books.
- Zhang, F., Duan, C., and Lan, N. 2023. Fast sparse Bayesian learning-based seismic resolution enhancement. *Journal of Applied Geophysics*, 219, 105240.



Eosen Yaşlı Çeltek Formasyonunun Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) Sahalarındaki Organik Jeokimyasal İncelemeleri ve Hidrokarbon Üretme Potansiyelleri

Organic Geochemical Investigations and Hydrocarbon Production Potentials of the Eocene Aged Çeltek Formation in the Çeltek (Amasya) and Sorgun (Yozgat) Fields

EBRU ERDOĞAN ^{1*}, ALİ SARI ², ABDURRAHMAN MURAT ³

¹ Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

² Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³ Netto Maden, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 24 Kasım (November) 2023 Kabul (*accepted*): 11 Mayıs (May) 2024

ÖZ

Bu çalışmada, Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) saharındaki Eosen yaşlı bitümlü şeyllerin organik jeokimyasal özellikleri yardımıyla, bölgenin çökelim ortam koşullarının ve hidrokarbon potansiyellerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla da örneklerde; Rock-Eval piroliz, Gaz Kromatografisi (GC), Modified Fischer Assay (MFA) analizleri ve organik fasiyes değerlendirme yapılmıştır. Bitümlü şeyllerin TOC değerleri mükemmel kaynak kaya özelliğine sahip olup bu değerler, Çeltek (Amasya) sahasında ortalama %9,71 ve Sorgun (Yozgat) sahasında ise ortalama %6,19'dur. HI, HI-OI, HI-T_{max}, S₂-TOC, S₂/S₃ parametreleri ve organik petrografik verilere göre kerojen tipleri; Çeltek (Amasya) sahasında Tip-I ve Tip-II, Sorgun (Yozgat) sahasında ise Tip-II'dir. Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) saharına ait örneklerin T_{max} ortalamaları sırasıyla 439,6°C ve 435,04°C'dir. Olgunlaşma ve Bitüm İndeksi değerlerine göre Çeltek (Amasya) sahasında örnekler atım başlangıcında iken Sorgun (Yozgat) sahasında ise hidrokarbon atımının olmadığı tespit edilmiştir. MFA analizine göre Çeltek (Amasya) sahasına ait örneklerin petrol verimleri (% ortalama) %5,13 olup orta derecede ekonomik bir potansiyelde iken Sorgun (Yozgat) sahası örneklerinin ortalama % 2,20 petrol verimi ile ekonomik değere sahip petrol potansiyellerinin olmadığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitümlü şeyl, hidrokarbon potansiyeli, kerojen, MFA (modified fischer assay), organik fasiyes, organik madde

ABSTRACT

In this study, with the help of organic geochemical properties of Eocene aged bituminous shales in Çeltek (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields; It is aimed to evaluate the depositional conditions and hydrocarbon potentials of the region. For this purpose, in the examples; Rock-Eval pyrolysis, Gas Chromatography (GC), Modified Fischer Assay (MFA) analysis and organic facies evaluations were performed. The TOC values of bituminous shales have excellent source rock properties and these values are on average 9.71% in the Çeltek (Amasya) field and 6.19% on average in the Sorgun (Yozgat) field. Kerogen types according to HI, HI-OI, HI-Tmax, S₂-TOC, S₂/S₃ parameters and organic petrographic data; It is Type-I and Type-II in the Çeltek (Amasya) field, and Type-II in the Sorgun (Yozgat) field. The T_{max} averages of samples from Çeltek (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields are 439.6°C and 435.04°C, respectively. According to the maturation and Bitumen Index values, it was determined that the samples in the Çeltek (Amasya) field were at the beginning of expulsion, while there was no HC expulsion in the Sorgun (Yozgat) field. According to MFA analysis: The (average %) oil yield of the samples from the Çeltek (Amasya) field is 5.13% and has a medium economic potential; in the Sorgun (Yozgat) field, it was determined that the samples did not have an economic oil potential with an oil yield of 2.20%.

Keywords: Bituminous shale, hydrocarbon potential, kerogen, MFA (modified fischer assay), organic facies, organic matter

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1395438>

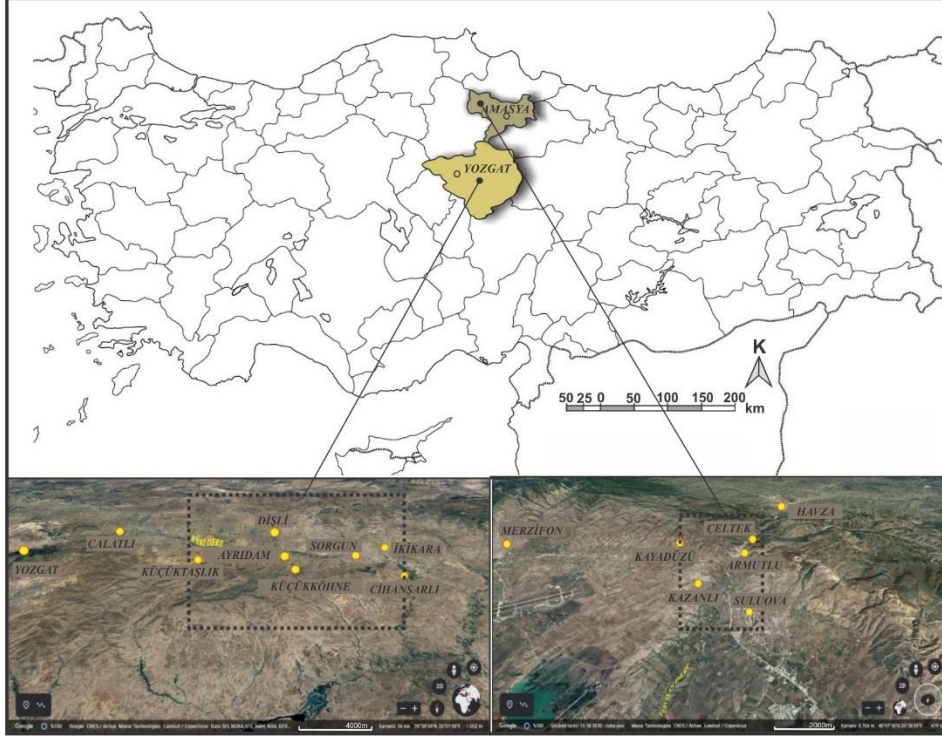
*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: erdoganee@outlook.com

GİRİŞ

Bu çalışmada her iki sahada yüzlek veren koyu gri, koyu kahverengi organik maddece zengin bitümlü şeyller incelenmiş olup organik madde (OM) miktarları, kerojen tipleri, OM olgunlaşmaları ile OM çökelim ortamları tespit edilerek hidrokarbon potansiyelleri ortaya konulmuştur. İnceleme alanları; Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarında yer almaktadır. Çeltek sahası, Samsun ve Amasya illeri arasında yer alırken diğer bir inceleme alanı olan Sorgun (Yozgat) sahası ise Yozgat ili, Sorgun ilçesi sınırları içerisinde yer alır (Şekil 1). Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahaları günümüze kadar genel (Öztürk 1968, 1979; Gümüşsu 1980, 1984; Özcan 1980; Yılmaz 1981; Özdemir ve Bekmezci, 1983; Erler 1991; Şener vd. 1992; Atalay 2001; Koç 2002; Akçay ve Beyazpirinç, 2017) ekonomik ve kömür jeolojisi (Blumenthal, 1937; Hezarfen, 1974; Cicioğlu 1995) kapsamında çalışmalara konu olmuştur. Ekonomik krizler, afetler,

savaşlar, alınan siyasi kararlar, rafineri kapasitesi gibi problemler sebebiyle yükselen petrol fiyatları ve dünyada sürekli artan enerji talebi nedeniyle petrole alternatif enerji kaynaklarının aranması yoluna gidilmektedir. Ülkemizde 2022 yıl sonu itibarıyla ham petrol rezervi 507 milyon varil, doğalgaz rezervi ise 543 milyar m³tür (MAPEG, 2024). Genel enerji dağılımına göre Türkiye’de, kullanım oranı en yüksek enerji kaynakları sırasıyla petrol (%28,81), kömür (%27,24) ve doğalgaz (%26,86)’dır. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda fosil yakıtların kullanım oranının %83 (82,91) ile yüksek bir düzeyde olduğu tespit edilmiştir (Arı ve Yılmaz, 2023).

Petrol fiyatlarındaki aşırı dalgalanmaların ve enerji faturalarındaki artışın önlenmesi, enerjide dışa bağımlılığın azaltılması dolayısıyla sürdürülebilir enerji arzı için yerli kaynakların artırılması, özellikle de geleneksel olarak üretilen petrole alternatif olabilecek



Şekil 1. İncelenen alanların yer bulduru haritası

Figure 1. Location map of study areas

geleneksel olmayan doğal kaynakların başında gelen bitümlü şeylerden üretilebilecek sentetik petrol ihtiyacı önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarında mostralar veren Alt Eosen yaşlı Çeltek Formasyonuna ait bitümlü şeylerin organik jeokimyasal özelliklerini inceleyerek, çökelim ortamlarının ve organik madde (OM) miktarının belirlenmesi, kerojen tipinin tayin edilmesi, organik maddenin olgunluğunun ve en önemlisi de bitümlü şeylerin petrol verimlerinin ekonomik miktarlarda olup olmadıklarının değerlendirilmesidir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, Çeltek formasyonuna ait bitümlü şey örnekleri üzerinde çeşitli organik jeokimyasal ve organik petrografik analizler

gerçekleştirilmiştir. Örneklerin analizleri, TPAO Ar-Ge Merkezi Müdürlüğü laboratuvarında yapılmıştır. Çeltek (Amasya) sahasına ait ölçülü stratigrafik kesitten (ÖSK) 20 adet, yüzey örneğinden 2 adet; Sorgun (Yozgat) sahasına ait ÖSK'den 22 adet, yüzey örneğinden 2 adet örnek üzerinde piroliz analizleri yapılmıştır. Piroliz ölçümlerinde, Rock Eval-VI cihazı ile IFP 160000 standardı kullanılmıştır. Bu analiz sonucunda TOC (Toplam Organik Karbon), S₁, S₂, S₃, T_{max}, RC (Rezidüel karbon), PC (Piroliz edilebilir karbon) değerleri elde edilmiş ve bu değerlere göre HI (Hidrojen İndeksi), OI (Oksijen İndeksi), PI (Üretim İndeksi), Hidrokarbon Tip İndeksi (S₂/S₃), Potansiyel Ürün (PY) ve Bitüm İndeksi (S₁/TOC) değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 1'de verilen TOC, HI ile OI değerleri ve Çizelge 2'de verilen organik petrografi (kerojen tip tayi-

ni) analizlerine göre Çelttek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahaslarından seçilen 10 adet örnek, organik fasiyes analizinde kullanılmıştır. Bitümden (S₁) ve kerojenden kazanılacak sentetik petrol içeriğini (% ağırlık/ağırlık) tespit etmek amacıyla American Society for Testing

and Materials (ASTM D) 3904 standardına uygun olarak Modified Fischer Assay (MFA) analizi uygulanmıştır. Örneklerin petrol verimlerini değerlendirebilmek adına, petrol içeriği (%) - TOC, petrol içeriği (%) - S₁+S₂ arasındaki ilişki değerlendirilmiştir.

Çizelge 1. İncelenen örneklerin Rock-Eval Piroliz analizi sonuçları

Table 1. Rock-Eval Pyrolysis analysis results of the examined samples

Örnek Numarası	TOC (wt %)	S ₁ (mg HC/g kaya)	S ₂ (mg HC/g kaya)	S ₃ (mg CO ₂ /g kaya)	HC Tip İndeksi (S ₂ /S ₃)	PY (S ₁ +S ₂)	PI S ₂ /(S ₁ +S ₂)	Tmax (°C)	HI (S ₂ /TOC)×100	OI (S ₂ /TOC)×100	Bitümen İndeksi, S ₁ /TOC	RC (%)	PC (%)
EÇ-1	8,91	1,04	34,85	1,41	24,72	35,890	0,03	439	391	16	0,12	5,79	3,12
EÇ-2	7,55	1,34	19,15	1,37	13,98	20,490	0,07	434	254	18	0,18	5,56	1,99
EÇ-3	9,15	1,71	39,13	1,19	32,88	40,840	0,04	439	428	13	0,19	5,57	3,58
EÇ-4	9,26	1,73	43,86	1,25	35,08	45,590	0,04	436	474	13	0,19	5,25	4,01
EÇ-5	10,32	1,59	51,93	1,21	42,92	53,520	0,03	442	503	12	0,15	5,73	4,59
EÇ-6	9,62	1,52	48,79	1,66	29,39	50,310	0,03	439	507	17	0,16	5,22	4,40
EÇ-7	13,67	2,40	78,34	1,28	61,20	80,740	0,03	439	573	9	0,18	6,78	6,89
EÇ-8	10,81	2,48	57,26	1,17	48,94	59,740	0,04	440	530	11	0,23	5,65	5,16
EÇ-9	9,36	1,58	59,93	1,09	54,98	61,510	0,03	444	640	12	0,17	4,13	5,23
EÇ-10	9,81	1,89	59,28	1,10	53,89	61,170	0,03	444	604	11	0,19	4,61	5,20
EÇ-11	8,62	1,58	56,21	0,90	62,46	57,790	0,03	442	652	10	0,18	3,69	4,93
EÇ-12	7,44	1,33	40,16	1,80	22,31	41,490	0,03	438	540	24	0,18	3,86	3,58
EÇ-13	8,37	1,83	53,38	0,81	65,90	55,210	0,03	440	638	10	0,22	3,68	4,69
EÇ-14	8,86	1,83	56,74	1,15	49,34	58,570	0,03	440	640	13	0,21	3,87	4,99
EÇ-15	8,08	1,54	55,04	0,95	57,94	56,580	0,03	443	681	12	0,19	3,27	4,81
EÇ-16	11,85	2,17	89,60	0,81	110,62	91,770	0,02	445	756	7	0,18	4,10	7,75
EÇ-17	8,08	1,90	46,27	1,06	43,65	48,170	0,04	431	573	13	0,24	3,96	4,12
EÇ-18	11,14	1,65	76,19	1,10	69,26	77,840	0,02	442	684	10	0,15	4,53	6,61
EÇ-19	16,17	2,53	121,50	1,02	119,12	124,030	0,02	446	751	6	0,16	5,71	10,44
EÇ-20	7,07	1,23	9,67	1,24	7,80	10,900	0,11	429	137	18	0,17	6,02	1,05
Ortalama	9,71	1,74	54,86	1,18	50,32	56,608	0,04	439,6	547,8	12,75	0,182	4,85	4,86
SR-1	7,29	0,26	32,07	0,46	69,72	32,330	0,01	440	440	6	0,04	4,5	2,79
SR-2	6,56	0,25	30,15	0,50	60,3	30,400	0,01	440	460	8	0,04	3,95	2,61
SR-3	2,34	0,14	8,59	0,24	35,79	8,730	0,02	437	367	10	0,06	1,58	0,76
SR-5	4,89	0,25	15,54	0,44	35,32	15,790	0,02	433	318	9	0,05	3,51	1,38
SR-6	2,46	0,11	4,91	0,27	18,18	5,020	0,02	433	200	11	0,04	2,00	0,46
SR-7	7,78	0,33	22,88	0,50	45,76	23,210	0,01	435	294	6	0,04	5,74	2,04
SR-9	9,66	0,30	19,08	0,78	24,46	19,380	0,02	432	198	8	0,03	7,92	1,74
SR-10	2,79	0,19	7,40	0,32	23,12	7,590	0,03	431	265	11	0,07	2,11	0,68
SR-11	4,33	0,25	14,90	0,56	26,61	15,150	0,02	432	344	13	0,06	3,01	1,32
SR-13	6,22	0,30	15,53	0,67	23,18	15,830	0,02	431	250	11	0,05	4,81	1,41
SR-14	10,05	0,54	37,71	0,91	41,44	38,250	0,01	434	375	9	0,05	6,75	3,3
SR-15	9,54	0,84	32,21	0,90	35,79	33,050	0,03	432	338	9	0,09	6,67	2,87
SR-16	10,60	0,36	17,38	1,13	15,38	17,740	0,02	428	164	11	0,03	8,95	1,65
SR-17	3,83	0,26	15,01	0,78	19,24	15,270	0,02	434	392	20	0,07	2,49	1,34
SR-18	3,50	0,24	17,86	0,47	38	18,100	0,01	439	510	13	0,07	1,95	1,55
SR-19	4,38	0,21	17,54	0,48	36,54	17,750	0,01	437	400	11	0,05	2,83	1,55
SR-20	3,20	0,27	17,39	0,26	66,88	17,660	0,02	440	543	8	0,08	1,69	1,51
SR-21	6,54	0,88	41,71	0,41	101,73	42,590	0,02	442	638	6	0,13	2,94	3,6
SR-22	12,57	1,13	86,03	0,57	150,93	87,160	0,01	441	684	5	0,09	5,22	7,35
SR-23	5,88	0,60	40,28	0,40	100,7	40,880	0,01	443	685	7	0,10	2,42	3,46
SR-24	5,36	1,39	32,98	0,41	80,44	34,370	0,04	440	615	8	0,26	2,43	2,93
SR-25	6,48	0,43	18,42	0,59	31,22	18,850	0,02	417	284	9	0,07	4,82	1,66
Ortalama	6,19	0,43	24,45	0,55	49,12	25,232	0,02	435,04	398,36	9,5	0,07	4,01	2,18
ÇM	6,84	1,02	47,12	0,65	72,49	48,140	0,02	436	689	10	0,15	2,74	4,1
ÇP	12,34	29,37	51,52	1,11	46,41	80,890	0,36	433	418	9	2,38	5,52	6,82
Ortalama	9,59	15,20	49,32	0,88	59,45	64,515	0,19	434,5	553,5	9,5	1,265	4,13	5,46
SR-A	10,98	0,31	22,03	1,33	16,56	22,340	0,01	423	201	12	0,03	8,95	2,03
SR-B	6,49	0,37	41,9	0,46	91,09	42,270	0,01	438	646	7	0,06	2,92	3,57
Ortalama	8,74	0,34	31,97	0,90	53,83	32,305	0,01	430,5	423,5	9,5	0,045	5,94	2,8

*EÇ numaralı örnekler Çelttek (Amasya) sahasına ait olup ölçülü stratigrafik kesit (ÖSK) örnekleridir.

*SR numaralı örnekler Sorgun (Yozgat) sahasına ait olup ölçülü stratigrafik kesit (ÖSK) örnekleridir.

*ÇM, ÇP yüzey örnekleri Çelttek (Amasya) sahasından alınmıştır.

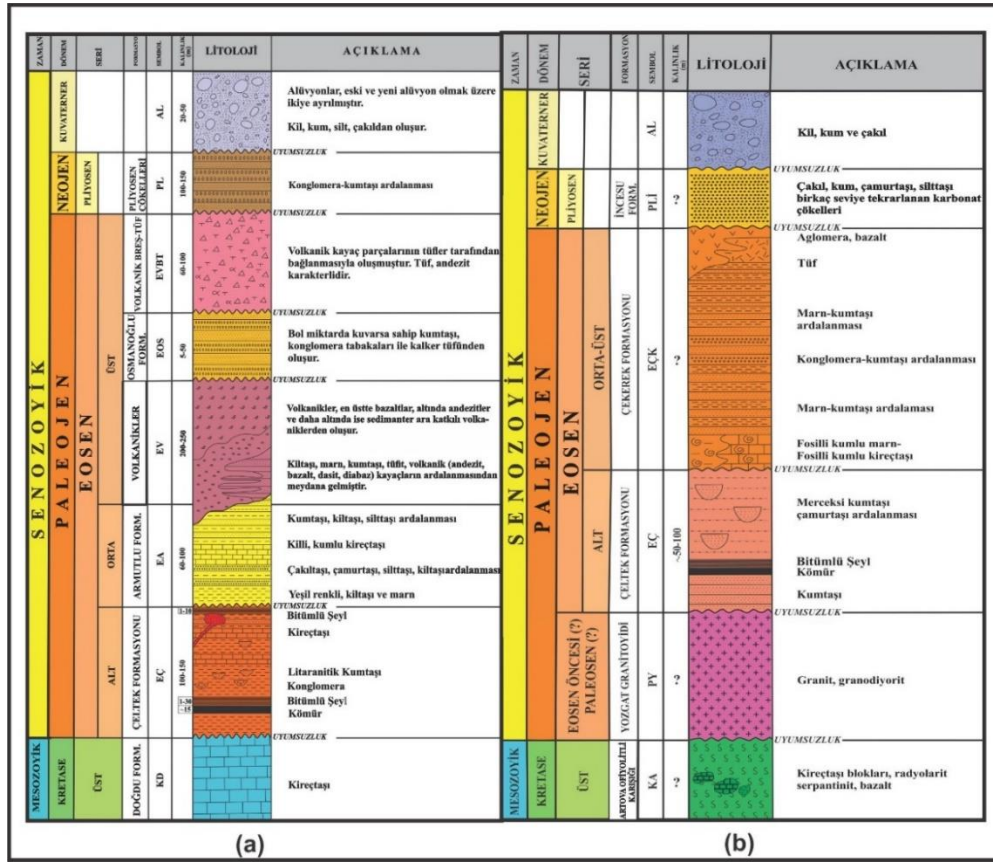
*SR-A, SR-B yüzey örnekleri Sorgun (Yozgat) sahasından alınmıştır.

İncelenen alanlara ait 4 adet yüzey örneği (Çeltek Sahası: ÇM, ÇP; Sorgun Sahası: SR-A, SR-B) üzerinde GC (Gaz Kromatografi) incelemeleri ASTM D 5307-97 standardına uygun olarak, Agilent 6850 GC cihazında yapılmıştır. Ayrıca, 4 adet yüzey örneği (ÇM, ÇP; SR-A, SR-B) üzerinde, İatroscan-MK5 cihazında Norveç Petrol Standardı kullanılarak İnce Tabaka Kromatografi analizi gerçekleştirilmiştir.

BÖLGENİN JEOLJİSİ

Çalışma sahaları, Alpin Orojenezi'nin etkisinde kalmakla beraber, Pontid Tektonik Ünitesinin yakınında yer almaktadır (Ketin, 1966). Her iki sahanın temelinin, Kretase yaşlı kaya birimleri oluşturmaktadır (Şekil 2a,b). Çeltek (Amasya) sahasında, inceleme alanının temel kayası Öztürk (1968) tarafından Doğdu Formasyonu olarak adlandırılan kireçtaşlarından oluşmakta, Sorgun (Yozgat) sahasının temeli ise Özcan vd. (1980) tarafından tanımlanan, Artova Ofiyolitli Karışığından meydana gelmektedir. Artova Ofiyolitli Karışığının üzerine uyumsuz olarak gelen Yozgat Granitoidi, Eosen öncesi (Paleosen?) yaşında olup BGB-DKD yönlü uzanan bir batolittir (Erler vd., 1991). Her iki sahada da Eosen yaşlı birimler, Alt Eosen yaşlı Çeltek Formasyonu ile başlamaktadır. Çeltek (Amasya) sahasındaki Çeltek Formasyonu kömür, bitümlü şeyl, konglomera ve kumtaşları ile temsil edilir. Gümüşsu (1984) tarafından adlandırılmış olan Alt Bitümlü Şeyller, kıltaşı, siltaşı ve kumtaşları ile ardalanmalı olarak görülmekte, sahada oldukça kalın tabakalar halinde bulunmakta ve kalınlığı 1-30 m arasında değişmektedir. Gümüşsu (1984) tarafından adlandırılan Üst Bitümlü Şeyl üyesi, Armutlu Formasyonu ile Çeltek Formasyonu arasında görülmekte ve bu üyenin kalınlığı 1-

10 m arasındadır. Çeltek Formasyonu, içerdikleri kömürlerin ve çökelme koşullarının benzerliğine istinaden Cicioğlu (1995) tarafından, Sorgun (Yozgat) sahasında da aynı adla Çeltek Formasyonu olarak kullanılmıştır. Formasyon tabanda kumtaşı, üzerine kömür, devamında 2-3 m olan kahverengi, 5-10 cm'lik kumtaşı tabakalarının olduğu bitümlü şeyller ve merceksi kumtaşı ile çamurtaşının yer aldığı birimlerden oluşur (Cicioğlu, 1995). Çeltek (Amasya) sahasında, Alt Eosen üzerine uyumsuz olarak Orta Eosen yaşlı Armutlu Formasyonu, onun da üzerine uyumlu olarak volkanikler gelir. Üst Eosen yaşlı Osmanoğlu Formasyonu ise volkanikleri uyumsuz olarak üzerlemektedir. Osmanoğlu Formasyonu ile devam eden seri, üzerine uyumsuz olarak gelen Üst Eosen'in en genç birimi olan Volkanik Breş ile sonlanır (Gümüşsu, 1984). Sorgun (Yozgat) sahasında ise Orta-Üst Eosen yaşlı birimler, Özcan vd. (1980) tarafından tanımlanan Çekerek Formasyonu adı altında fosilli marn, fosilli kumlu kireçtaşı, kumtaşı, konglomera, tuf, aglomera ve bazaltlar ile temsil edilir (Cicioğlu, 1995). Çeltek (Amasya) sahasında Eosen yaşlı birimler üzerine uyumsuz olarak Pliyosen çökelleri gelir. Sorgun (Yozgat) sahasında ise Pliyosen birimleri Yılmaz (1981) tarafından adlandırılan İncesu Formasyonu ile temsil edilir. Her iki sahada da en genç birimler kil, kum ve çakıllardan meydana gelmiş Kuvaterner yaşlı alüvyonlardan oluşur. İncelenen sahalarda Çeltek Formasyonu'ndaki bitümlü kayaç seviyesinden, ölçülü stratigrafik kesit alınmıştır. Çeltek (Amasya) sahasındaki bitümlü kayaç seviyeleri 11,25 metrelik istiften oluşmakta olup bu bölümden 20 adet örnek, Sorgun (Yozgat) sahasından ise 40,05 metrelik istiften 22 adet örnek alınmıştır (Şekil 3 a, b).



Şekil 2. (a) Çeltek (Amasya), (b)Sorgun (Yozgat) sahalarına ait litostratigrafik birimler (Gümüşsu, 1980, 1984; Özdemir ve Bekmezci, 1983; Cicioğlu 1995; Atalay, 2001; Koç, 2002; Akçay ve Beyazpırınç 2017; Erdoğan, 2023; ölçeşsizdir)

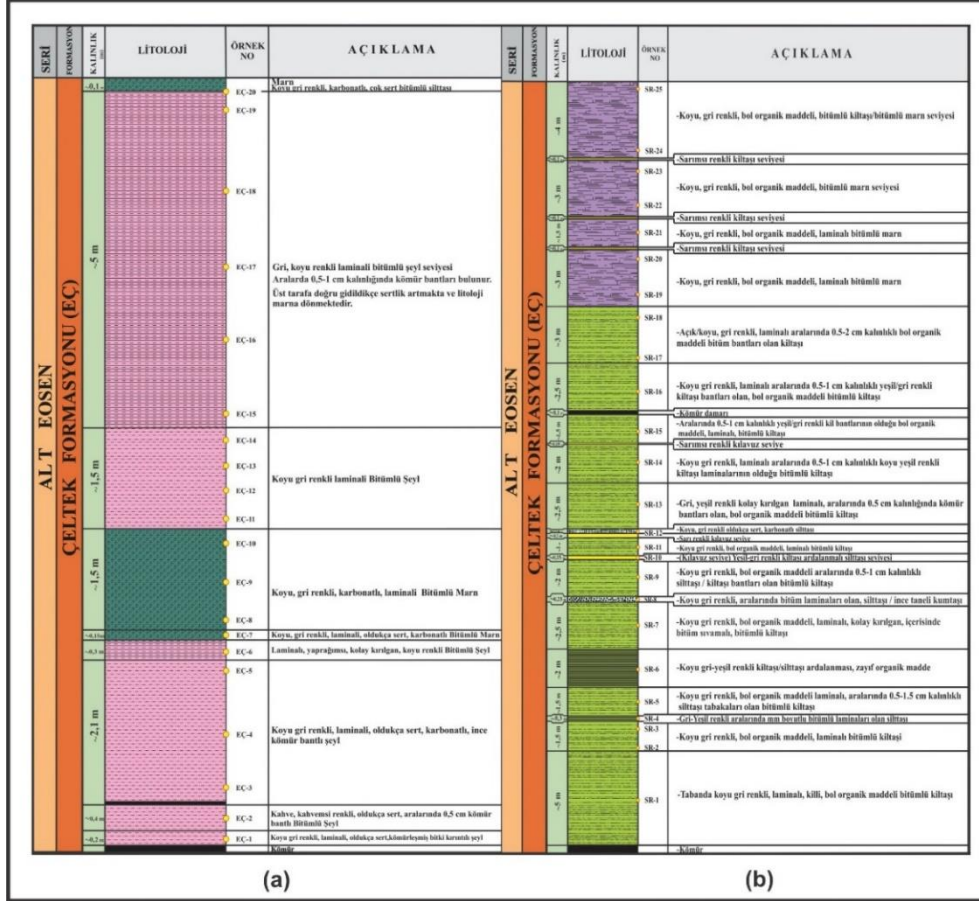
Figure 2. Lithostratigraphic units of (a) Çeltek (Amasya), (b)Sorgun (Yozgat) fields (Gümüşsu, 1980, 1984; Özdemir ve Bekmezci, 1983; Cicioğlu 1995; Atalay, 2001; Koç, 2002; Akçay ve Beyazpırınç 2017; Erdoğan, 2023; not to scale)

ORGANİK JEOKİMYASAL İNCELEMELER

Organik Madde Miktarı ve Kaynak Kaya Potansiyeli

Çeltek (Amasya) sahasında incelenen 20 adet bitümlü şeyl örneğinin TOC değeri ağırlıkça %7,07-16,17 arasında (ortalama %9,71) değişmekte, Sorgun (Yozgat) sahasında incelenen 22 adet bitümlü şeyl örneğinin TOC değerleri ise ağırlıkça %2,34-12,57 arasında (ortalama %6,19) değişmekte olup, bu değerler ile incelenen örneklerin Tissot ve Welte

(1984)'e göre zengin (ağırlıkça %2-10), Jarvie (1991)'e göre yeterli (ağırlıkça % > 1), Peters ve Cassa (1994)'e göre ise mükemmel (ağırlıkça % > 4) kaynak kaya potansiyeline işaret etmektedir. S₁ hidrokarbonları, 300°C'ye kadar olan düşük sıcaklıklarda ve aynı zamanda bakteri faaliyetleri sonucu, genç ya da olgun olmayan sığ derinliklerde oluşan kaynak kaya içerisindeki serbest bitümdür. Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarındaki ÖSK'lerden alınmış bitümlü şeyl örneklerinin S₁ hidrokarbon değerleri 1,04-2,53



Şekil 3. (a) Çeltek (Amasya), (b) Sorgun (Yozgat) sahalarına ait ölçülü stratigrafik kesitler

Figure 3. Measured stratigraphic sections of (a) Çeltek (Amasya), (b) Sorgun (Yozgat) fields

mg HC/g kaya ve 0,11-1,39 mg HC/g kaya (ort:0,43 mg HC/g kaya)'dır. Peters ve Cassa (1994)'e göre Çeltek (Amasya) sahası S_1 değerleri büyük oranda iyi ($1 < S_1 < 2$) petrol potansiyelinde; Sorgun (Yozgat) sahasının S_1 hidrokarbon değerleri ise zayıf ($0 < S_1 < 0,5$) petrol potansiyeline sahiptir. S_2 hidrokarbonları (mg HC/g kaya), numunenin termal pirolizi sırasında oluşan hidrokarbonların hacmidir (Peters, 1986). Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarından alınan örneklerin S_2

değerleri 9,67-121,5 mg HC/g kaya (ort: 54,86 mg HC/g kaya) ve 4,91-86,03 mg HC/g kaya (ort: 24,45 mg HC/g kaya) olup Peters ve Cassa (1994)'e göre büyük oranda mükemmel ($20 < S_2$) petrol potansiyeline işaret etmektedir. Aynı zamanda Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarındaki tüm örneklerin S_2 değerinin S_1 'den büyük olması, bitümlü şeyllerde herhangi bir organik kirlenmenin olmadığını gösterir (Çizelge 1).

Organik Maddenin Tipi

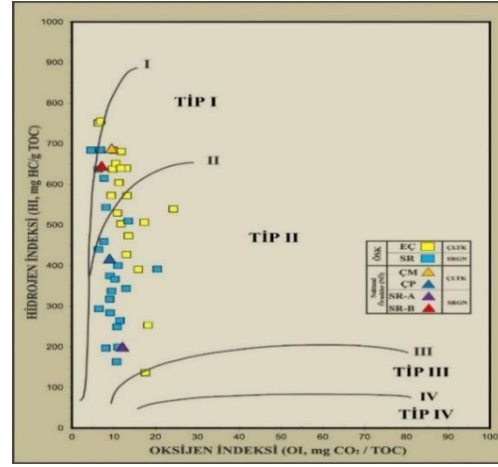
Çeltik (Amasya) sahasında bitümlü şeyl örneklerinin HI değerleri 137-756 mg HC/g TOC (ort: 547,8 mg HC/g TOC) (Çizelge 1) arasında değişmekte olup kerojen tipi Peters ve Cassa (1994)'e göre Tip-I (HI>600) ve Tip-II (300<HI<600); Sorgun (Yozgat) sahasında ise 164-685 mg HC/g TOC (ort: 398,36 mg HC/g TOC) (Çizelge 1) arasında değişmekte olup kerojen tipi Peters ve Cassa (1994)'e göre Tip-II (300<HI<600)'dir. HI-OI ve HI-T_{max} diyagramlarına göre (Şekil 4 ve 5), Çeltik (Amasya) sahasından alınmış örneklerin kerojen tipleri Tip-I ve Tip-II, Sorgun (Yozgat) sahasının kerojen tipi ise Tip-II'dir.

Çeltik Formasyonundan alınan organik maddece zengin örneklerin organik madde türünü belirlemek için Çeltik (Amasya) sahasından 5, Sorgun (Yozgat) sahasından da 5 adet olmak üzere toplamda 10 adet örnekte organik petrografik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlere göre her iki sahaya ait 8 adet örneğin kerojen tipinin %100 algal+amorf, 2 adet örneğin ise % 95 algal+amorf olduğu belirlenmiştir (Çizelge 2).

Çeltik sahasına ait örneklerin Hidrokarbon Tip İndeksi (S₂/S₃) değerleri 7,80-119,12 (ort: 50,32)'dir. Sorgun (Yozgat) sahasında ise 15,38-150,93 (ort: 49,12)'dür. Her iki sahada da incelenen örneklerin Hidrokarbon Tip İndeksi değerleri S₂/S₃>15 olup Peters ve Cassa (1994)'e göre kerojen tipleri Tip-I olarak belirlenmiştir.

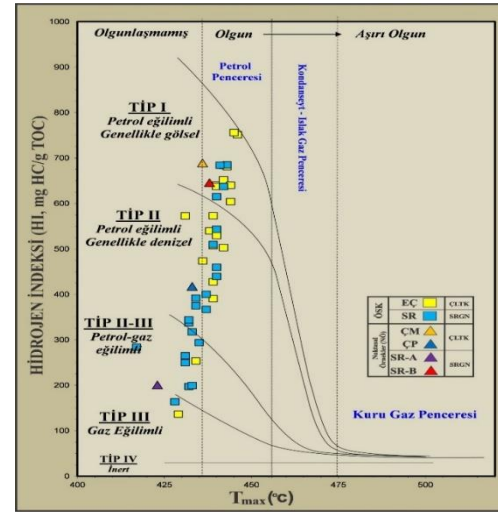
Organik Maddenin Isısal Olgunluğu

Organik maddelerin ısısal olgunluğu T_{max}, PI ve Spor Renk İndeksi'ne göre belirlenmiştir. Çeltik (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahaslarına ait ÖSK'den alınmış rastgele seçilen 10 adet örnek üzerinde yapılan Spor



Şekil 4. Çeltik (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahaslarına ait HI-OI diyagramı (Van Krevelen, 1993)

Figure 4. HI-OI diagram of Çeltik (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields (Van Krevelen, 1993)



Şekil 5. Çeltik (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahaslarına ait HI-T_{max} diyagramı (Hunt 1995, Mukhopadhyay vd., 1995)

Figure 5. HI-T_{max} diagram of Çeltik (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields (Hunt 1995, Mukhopadhyay et al., 1995)

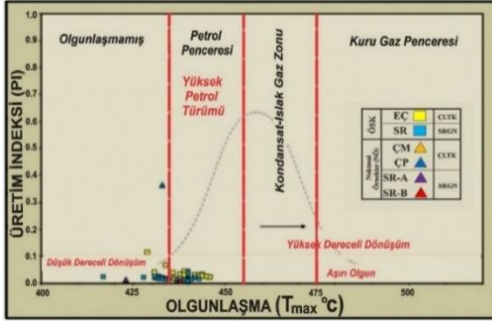
Çizelge 2. Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarına ait bitümlü şeyl örneklerinin organik petrografik sonuçları

Table 2. Organic petrographic results of bituminous shale samples belonging to Çeltek (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields

		ANALİZ SONUÇLARI			
	Örnek Adı	% Amorf + Alg	% Otsu	% Odunsu	% Kömürsü
ÇELTEK (AMASYA) ÖSK	EÇ-3	100			
	EÇ-6	100			
	EÇ-11	95	5		
	EÇ-15	100			
	EÇ-19	100			
	SR-9	100			
	SR-13	100			
SORGUN (YOZGAT) ÖSK	SR-16	100			
	SR-20	100			
	SR-25	95	5		

Renk İndeksi incelemeleri, bu örneklerin olgunlaşmamış bir seviyede (2,5-3) olduklarını göstermektedir (Ediger ve Soylu, 1993). İncelenen bitümlü şeyl örneklerinin T_{max} (°C) değerleri Çeltek (Amasya) sahasında 429-446°C (ort:439,6°C); Sorgun (Yozgat) sahasında ise 417-443°C (ort:435,04°C)'dir. İncelenen örneklerin olgunlaşma parametreleri Éspitalié vd. (1985)'in T_{max} (°C) modeline göre petrol penceresinde ($430 < T_{max} < 460$), Peters ve Cassa (1994)'ün T_{max} modeline göre erken olgun ($435 < T_{max} < 445$) aşamada yer almaktadır. Çeltek (Amasya) sahasında 17 adet örneğin T_{max} (°C) değerinin 435 °C'den büyük olması nedeniyle olgun zon-petrol türetme penceresinde olduğu, 3 adet örneğin (EÇ-2, EÇ-17, EÇ-20) ise 435 °C'den küçük olması sebebiyle olgunlaşmamış zona düştüğü, yani hidrokarbon türetmeyeceği anlaşılmaktadır (Şekil 5). Sorgun (Yozgat) sahasında 10 adet örneğin T_{max} (°C) değerinin 435 °C'den büyük olması nedeniyle olgun zon-

petrol türetme penceresinde olduğu, 12 adet örneğin ise T_{max} (°C) değerinin 435 °C'den küçük olması sebebiyle olgun olmayan bir pencerede yer aldığı ve hidrokarbon türetmeyeceği belirlenmiştir. (Hunt, 1995; Mukhopadhyay vd., 1995). Éspitalié vd. (1985)'in T_{max} (°C) modeline göre Çeltek (Amasya) sahasına ait yüzey örneklerinden ÇM petrol penceresi (T_{max} : 436°C) içerisinde iken ÇP'nin ise olgunlaşmamış (T_{max} : 433°C) olduğu görülmekte, Sorgun (Yozgat) sahasına ait yüzey örneklerinden SR-A'nın olgunlaşmamış (T_{max} : 423°C), SR-B'nin ise petrol penceresinde (T_{max} : 438°C) olduğu görülmektedir (Şekil 5). İncelenen örnekler Şekil 6'da görüleceği üzere genellikle petrol penceresi aralığında bulunmasına rağmen PI değerlerinin 0,1'den daha düşük olması sebebiyle, düşük dereceli dönüşüm aralığına düştüğü, buna bağlı olarak hidrokarbon türünün olmadığı görülmektedir.

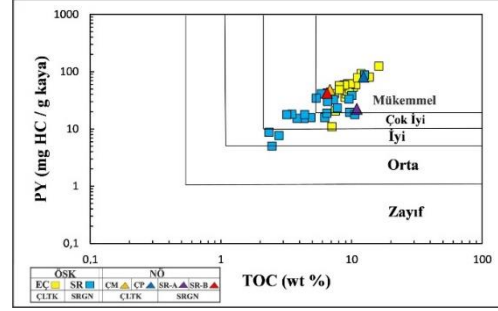


Şekil 6. Çelttek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarına ait PI-T_{max} olgunlaşma ile kerojen dönüşüm diyagramı (Peters, 1986)

Figure 6. Kerogen transformation diagram with PI-T_{max} maturation of Çelttek (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields (Peters, 1986)

Organik Maddenin Hidrokarbon Üretme Potansiyelleri

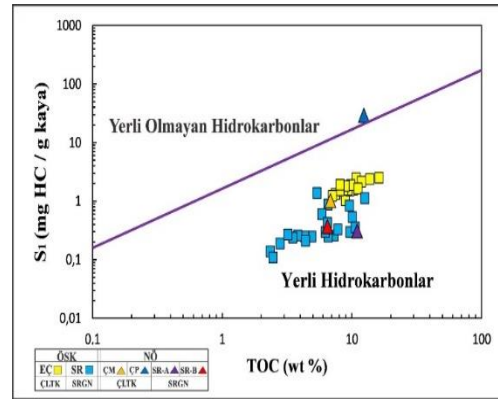
Kaynak kayanın ürettiği petrolü dışarı atmaya başladığı derinliğin hesap edilmesinde Bitüm İndeksi (S₁/TOC) kullanılır (Hunt, 1995). Çelttek (Amasya) sahasına ait S₁/TOC değerlendirmesinde incelenen 16 örnek türüm başlangıcında (0,1<S₁/TOC<0,2), 4 örnekte ise türümün yüksek (0,2<S₁/TOC) olduğu tespit edilmiştir. Sorgun (Yozgat) sahasında ise 19 örnekte henüz türümün olmadığı (0<S₁/TOC<0,1), 2 örneğin türüm başlangıcında ve 1 örnekte ise türümün yüksek olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 1). İncelenen bitümlü kayaçların Clementz (1979)'a ve Peters (1986)'ya göre Hidrokarbon Tip İndeksi (S₂/S₃) değerleri Çelttek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahasında sırasıyla ortalama 50,32 ve 49,12 olup örneklerin petrol türetme (5,0<S₂/S₃) potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 1). Kaynak kayaların petrol türüm verimliliğini temsil eden Potansiyel Ürün (PY) değerleri Çelttek sahasında 56,608 ppm,



Şekil 7. Çelttek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarına ait PY-TOC diyagramı (Ghori, 2002)

Figure 7. PY-TOC diagram of Çelttek (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields (Ghori, 2002)

Sorgun (Yozgat) sahasında ise 25,232 ppm olup, bu değerler Ghori (2002)'ye göre bitümlü şeyllerin çok iyi-mükemmel kaynak kaya potansiyelinde olduklarına işaret eder (Şekil 7). Göç etmiş hidrokarbonları yerinde oluşan hidrokarbonlardan ayırmak amacıyla kullanılan S₁/TOC diyagramında örneklerin ürettiği hidrokarbonların yerli olduğu anlaşılmış, dışardan herhangi bir organik kirlenmenin olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 8).

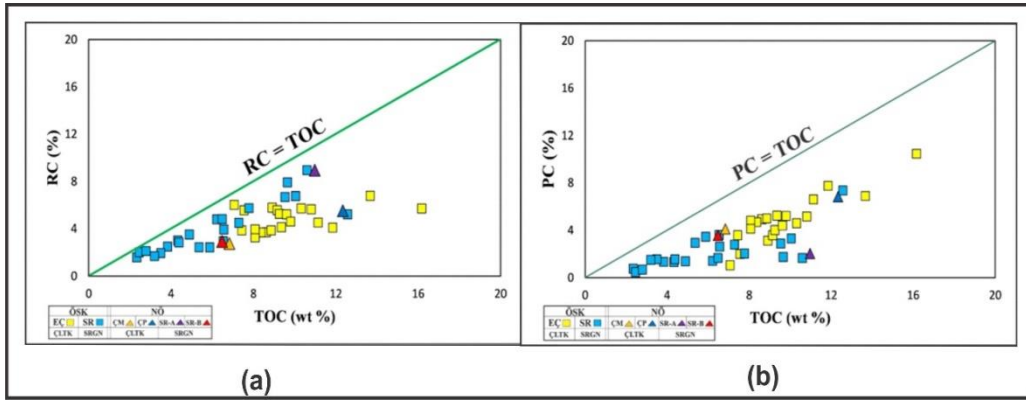


Şekil 8. Çelttek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarına ait S₁-TOC diyagramı (Hunt, 1995)

Figure 8. S₁-TOC diagram of Çelttek (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields (Hunt, 1995)

Kaynak kayaların pirolizi esnasında kayaçtaki TOC'nin bir kısmı piroliz edilebilirken (%PC) bir kısmı da piroliz edilemeden (%RC) kalır (Peters, 1986). Örnekler TOC=PC çizgisinde ya da yakın ise bu piroliz edilebilecek hidrokarbonun, TOC'nin önemli bölümünü oluşturduğunu gösterir. İncelenen örneklerin

piroliz edilebilen TOC=PC çizgisinden uzakta olması, kayaç içerisindeki hidrokarbonun bir kısmının piroliz edilebildiğini (%PC) fakat önemli bir kısmının ise piroliz edilemediğini ve kalıntı karbon (%RC) olarak kaldığını göstermektedir (Şekil 9 a,b).



Şekil 9. (a) Çeltik (Amasya), (b) Sorgun (Yozgat) sahalarına ait RC(%)-TOC(%) ve PC(%)-TOC(%) diyagramı (English vd., 2004)

Figure 9. RC(%)-TOC(%) and PC(%)-TOC(%) diagram of (a) Çeltik (Amasya), (b) Sorgun (Yozgat) fields (English et al., 2004)

Modified Fischer Assay (MFA) İncelemeleri

Çalışma alanlarına ait bitümlü şeyl örneklerinin petrol, su ve gaz içeriklerinin retortlama yöntemi ile tespit edilmesi amacıyla Modified Fischer Assay (MFA) analizleri uygulanmıştır. MFA analizleri ile organik maddeye (TOC, %) ait bitüm (S₁) ve kerojenin (S₂) türeteceği petrol ve gaz hidrokarbonlarının miktarı (MFA verimi), petrol içeriği %, varil/ton, litre/ton cinsinden tespit edilmektedir. İncelenen bitümlü şeyllere ait verilen petrol %'leri (Çizelge 3) Tao vd. (2010)'a göre (Çizelge 4) değerlendirilmiş ve

%TOC ve petrol içeriği (ağırlık/ağırlık) ; S₁+S₂ ve petrol içeriği (ağırlık/ağırlık) arasında ilişki kurularak değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Petrol içeriği % ve TOC % arasındaki ilişki

Tao vd. (2010)'a göre (Çizelge 4) yapılan değerlendirmede örnekler endüstriyel seviyelerine göre değerlendirilmiş ve sırasıyla Çeltik (Amasya) sahası orta kalitede bitümlü şeyl potansiyeline sahipken, Sorgun (Yozgat) sahasında 6 örneğin hidrokarbon veriminin olmadığı, 6 örneğin ise orta kalitede potansiyel sunduğu gözlenmiştir (Şekil 10 a,b).

Çizelge 3. Çelték (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarına ait bitümlü şeyl örneklerinin Petrol % verimi

Table 3. % Oil yield of bituminous shale samples belonging to Çelték (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields

Örnek No	Petrol içeriği (% w/w)	TOC (wt %)	S ₁ +S ₂ (ppm)
EÇ-1	3,39	8,91	35.890
EÇ-2	2,13	7,55	20.490
EÇ-3	3,71	9,15	40.840
EÇ-4	4,15	9,26	45.590
EÇ-5	4,71	10,32	53.520
EÇ-6	5,82	9,62	50.310
EÇ-7	5,76	13,67	80.740
EÇ-8	5,40	10,81	59.740
EÇ-9	6,44	9,36	61.510
EÇ-10	6,31	9,81	61.170
EÇ-11	5,57	8,62	57.790
EÇ-12	5,81	7,44	41.490
EÇ-13	6,31	8,37	55.210
EÇ-14	4,73	8,86	58.570
EÇ-15	5,57	8,08	56.580
EÇ-16	5,33	11,85	91.770
EÇ-17	7,96	8,08	48.170
EÇ-18	5,07	11,14	77.840
EÇ-19	6,46	16,17	124.030
EÇ20	7,20	7,07	10.900
SR-1	2,24	7,29	32.330
SR-2	1,97	6,56	30.400
SR-5	0,71	4,89	15.790
SR-7	1,37	7,78	23.210
SR-9	0,70	9,66	19.380
SR-13	0,98	6,22	15.830
SR-14	1,89	10,05	38.250
SR-15	1,78	9,54	33.050
SR-16	1,85	10,6	17.740
SR-19	1,36	4,38	17.750
SR-21	8,01	6,54	42.590
SR-22	4,86	12,57	87.160
SR-25	0,91	6,48	18.850

Çizelge 4. Fischer Assay verimi (petrol içeriği) ile ilgili ekonomik değerlendirmeler (Tao vd., 2010'dan değiştirilerek)

Table 4. Economic evaluations of Fischer Assay yield (oil content) (modified from Tao et al., 2010)

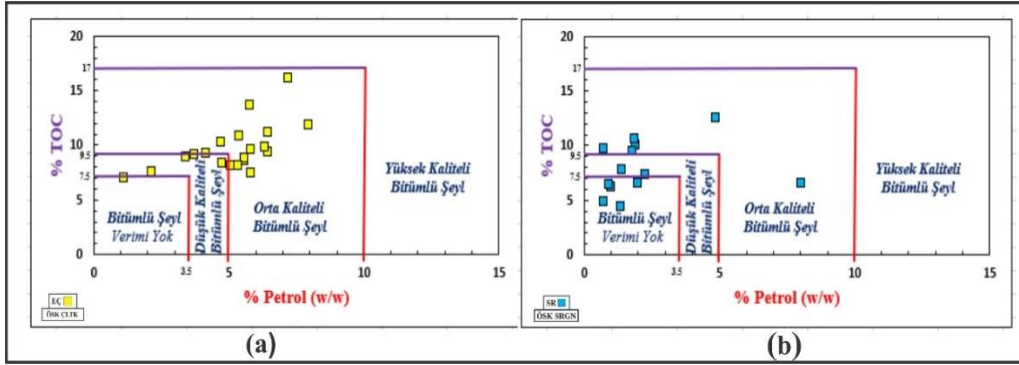
Endüstriyel Kalite	Bitümlü Şeyl Verimi yok	Düşük Kaliteli Bitümlü Şeyl	Orta Kaliteli Bitümlü Şeyl	Yüksek Kaliteli Bitümlü Şeyl
Petrol Verimi (%)	< 3.5	3.5-5	5-10	> 10
TOC %	< 7.5	7.5-9.5	9.5-17	> 17
S ₁ +S ₂	< 34	34-48	48-90	> 90

Petrol içeriği % - S₁+S₂ arasındaki ilişki

Çelték (Amasya) sahasına ait örneklerde petrol içeriği % (ağırlık/ağırlık)-S₁+S₂ arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olup kuvvetli bir korelasyon gözlenmektedir. Sorgun (Yozgat) sahası örnekleri ise 0,42 değeriyle orta derecede bir korelasyon sunmaktadır. Bu sonuçlara göre, Çelték (Amasya) sahasından alınan örnekler orta kalitede bir petrol türüm potansiyeli sunarken Sorgun (Yozgat) sahasına ait örneklerin ise petrol verimi yoktur (Şekil 11a,b).

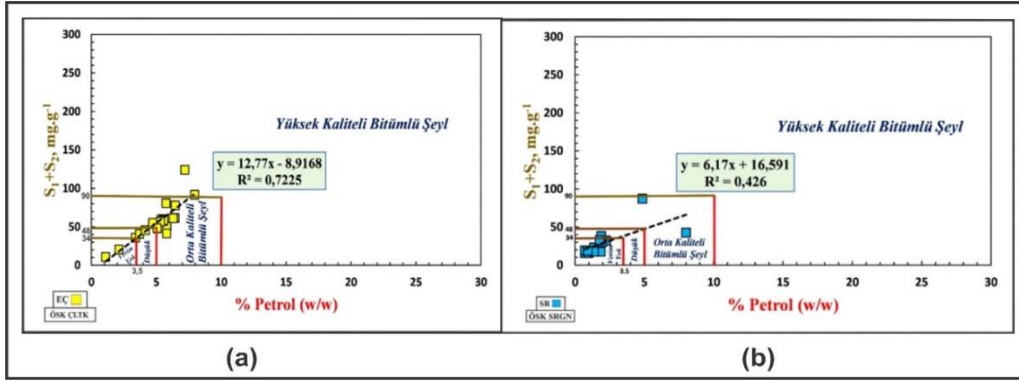
Petrol içeriği % (ağırlık/ağırlık) ve HI (mg HC/g TOC) arasındaki ilişki

Çelték (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarından alınmış, ÖSK'lere ait örneklerdeki % petrol içeriği (w/w); Committee Office of Mineral Resources in China (1987),



Şekil 10. (a) Çeltik (Amasya), **(b)** Sorgun (Yozgat) sahalarına ait petrol % - TOC diyagramı

Figure 10. %Oil-TOC diagram of (a) Çeltik (Amasya), (b) Sorgun (Yozgat) fields



Şekil 11. (a) Çeltik (Amasya), **(b)** Sorgun (Yozgat) sahalarının petrol içeriği % (ağırlık/ağırlık)-S₁+S₂ diyagramı

Figure 11. %Oil content (w/w)-S₁+S₂ diagram of (a) Çeltik (Amasya), (b) Sorgun (Yozgat) fields

Çizelge 5. Bazı araştırmacılara göre Fischer Assay verimi (petrol içeriği) ile ilgili ekonomik değerlendirmeler

Table 5. Economic evaluations regarding Fischer Assay yield (oil content) according to some researchers

Fischer Assay Verimi (%)	Ekonomik Değerlendirme
< %3,5	Zayıf
%3,5 - %5,0	Orta
%5,0 - %10,0	İyi
> %10,0	Çok iyi

Liu vd. (2006), Liu vd. (2015)'e göre (Çizelge 3 ve 5) ve HI (mg HC/g TOC) değerleri Peters ve Cassa (1994)'e göre değerlendirilmiş olup Çeltek (Amasya) sahasına ait ÖSK'den alınmış 20 adet bitümlü şeyl örneğinden; 3 adedinin zayıf, 4 adet örneğin orta ve 13 adet örneğin (Tip I (HI>600) ve Tip II (300<HI<600)) ise iyi ekonomik bitümlü şeyl olduğu tespit edilmiştir. Sorgun (Yozgat) sahasına ait ÖSK'den alınmış 13 adet bitümlü şeylin; 11 adedinin zayıf (Tip II (300<HI<600) ve Tip III (50<HI<200)), 1 adet örneğin iyi ve 1 adet örneğin ise orta ekonomik bitümlü şeyl olduğu gözlenmiştir.

Gaz Kromatografi İncelemeleri

Çeltek ve Sorgun sahalardan alınan (ÇM, ÇP; SR-A, SR-B) bitümlü şeyl örneklerinden elde edilen özütlerin gaz kromatogramlarında her ne kadar humplar görülse de, genellikle baskın pikleri n-alkanlar oluşturmaktadır (Şekil 12). Didyk vd. (1978)'e göre Fristan/Fitan oranı (Pr/Ph) değerlendirmelerinde ÇM, SR-A, SR-B örneklerinin suboksik-disoksik redoks koşullarında (Pr/Ph=1) çökeldikleri, ÇP (Pr/Ph:4) örneğinin ise çökelim ortamının yükseltgen/oksijenli (Pr/Ph>1) olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 6).

İzoprenoid/n-alkan oranı ile Ph/n-C₁₈ ve Pr/n-C₁₇'ye ait nispi bolluklar organik madde tipinin yorumlanması yanında farklı depolanma koşullarının açıklanmasında da kullanılmaktadır (Tissot ve Welte, 1984; Hunt, 1996). İzoprenoid/n-alkan oranında, yaygın olarak Ph/n-C₁₈ ve Pr/n-C₁₇ çift pikleri kullanılır. Yüksek pristana sahip örnekler yükseltgen oksitleyici bir kaynağa, yüksek fitana sahip örnekler ise indirgeyici ortama işaret eder. Çizelge 6'da Çeltek (Amasya) ve Sorgun

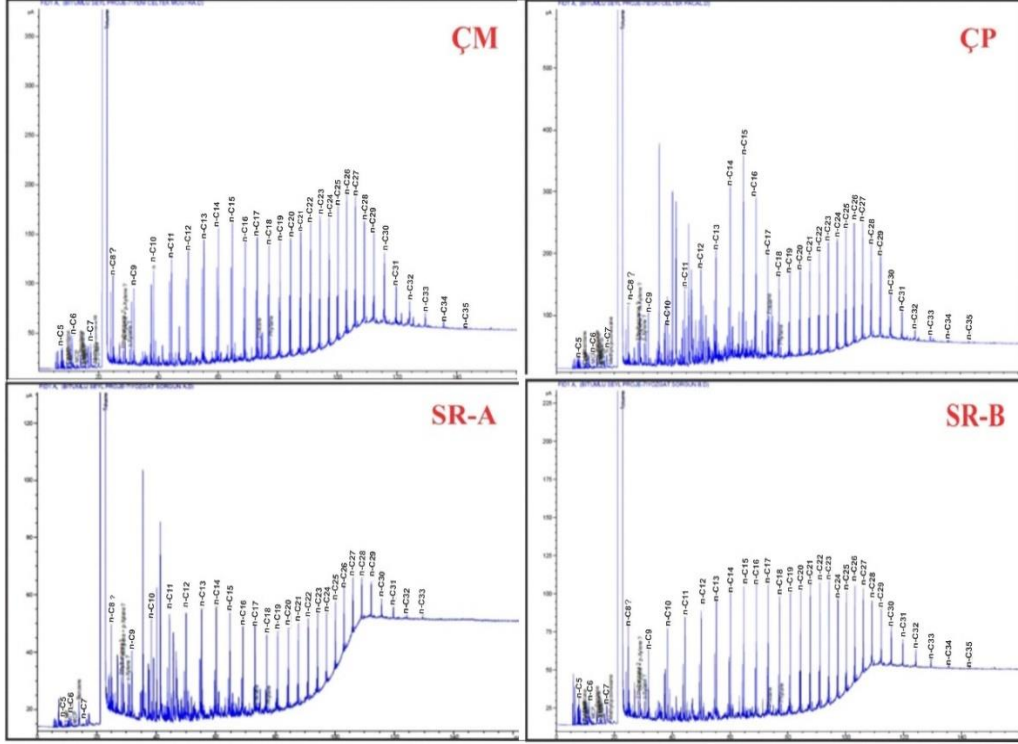
(Yozgat) sahalarda incelenen örneklere ait Ph/n-C₁₈ ve Pr/n-C₁₇'nin oranca değerleri gösterilmiştir. Çeltek (Amasya) sahasına ait bitümlü şeyl örnekleri Ph/n-C₁₈ ve Pr/n-C₁₇ diyagramında (Liu vd. 2018) değerlendirildiğinde ÇP örneğinin yükseltgen ortamda çökeldiği, karasal organik maddeye sahip olduğu ve ÇM örneğinin ise indirgen ortamda depolandığı, geçiş sınırında algal/planktonik kerojenlerden oluştuğu görülmektedir. Sorgun (Yozgat) sahasından alınmış bitümlü şeyl örnekleri Ph/n-C₁₈ ve Pr/n-C₁₇ diyagramında (Liu vd. 2018) değerlendirildiğinde ise SR-A ve SR-B yüzey örneklerinin indirgen ortamda depolandığı, karışık kerojen sınırında, nispeten olgun seviyede oldukları ayrıca örneklerin diyagram üzerinde birbirine yakın ve aynı alanda olması da bu örneklerin kökensel olarak ilişkili olduklarına işaret eder (Şekil 13).

İnce Tabaka Kromatografi İncelemeleri

Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalardan alınmış örneklerin ince tabaka kromatografi analiz sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir. İncelenen örneklerin doymuş hidrokarbonlarca zengin, asfalten ve resinlerce fakir olduğu gözlenmiş, örneklerin düştüğü alanın, dünyadaki birçok petrolün içinde yer aldığı ve normal petroler olarak adlandırılan çizgilerle sınırlandırılmış bir bölge içinde yer aldığı gözlenmiştir. (Şekil 14).

Organik Fasiyes İncelemeleri

Jones (1987); TOC, OI, HI verileri, O/C ile H/C atomik oranları ve egemen organik madde türüne göre 7 farklı organik fasiyes ayırtlaması yapmıştır. Çeltek (Amasya) sahasından



Şekil 12. Çelték (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahaları yüzey örneklerine ait Gaz kromatogramları
Figure 12. Gas chromatographs of surface samples of Çelték (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields

Çizelge 6. Çelték (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarındaki bitümlü şeyl örneklerinin Pr/Ph, Ph/n-C₁₈ ve Pr/n-C₁₇ oranları

Table 6. Pr/Ph, Ph/n-C₁₈ and Pr/n-C₁₇ ratios of bituminous shale samples in Çelték (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields

Örnek No	Pr/Ph	Pr/n-C ₁₇	Ph/n-C ₁₈
ÇM (ÇLTK)	1	0,17	0,18
ÇP (ÇLTK)	4	0,40	0,13
SR-A (SRGN)	1	0,11	0,13
SR-B (SRGN)	1	0,08	0,08

alınmış örneklerle ilişkin Hidrojen İndeks (HI) değerlerinin 137-756 mg HC/g TOC (ort: 547,8 mg HC/g TOC) aralığında yer aldığı ve TOC değerlerinin de ağırlıkça %7,07-16,17 (ort: ağırlıkça %9,71) arasında değiştiği belirlenmiştir (Çizelge 1). Örneklerden, EÇ-11 dışında 4 örneğin (EÇ-3, 6, 15 ve 19) %100 algal + amorf olduğu belirlenmiştir (Çizelge 2).

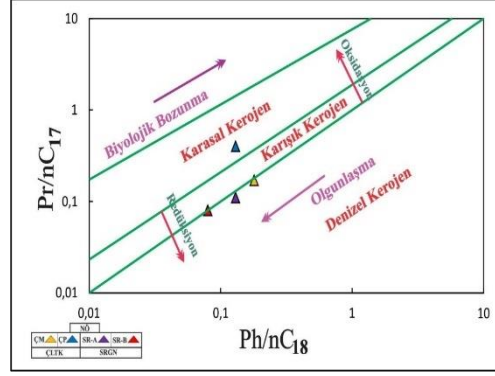
Sorgun (Yozgat) sahasındaki örneklerle ilişkin Hidrojen İndeksi değerlerinin 164-685 mg HC/g TOC (ort: 398,36 mg HC/g TOC) ve TOC değerleri de ağırlıkça %2,34-12,57 (ort: ağırlıkça %6,19) aralığında yer alır. Örneklerden SR-25 numaralı örnek hariç diğer örneklerin (SR-9, 13, 16 ve 20) %100 algal + amorf olduğu belirlenmiştir (Çizelge 2). İncelenen örneklerin %TOC, Hidrojen İndeks (HI), Oksijen İndeks (OI) ve organik petrografik verileri dikkate alındığında Çeltek (Amasya)

Çizelge 7. Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahaslarından alınmış yüzey örneklerinin ince tabaka kromatografi analiz sonuçları

Table 7. Thin layer chromatography analysis results of point samples taken from Çeltek (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields

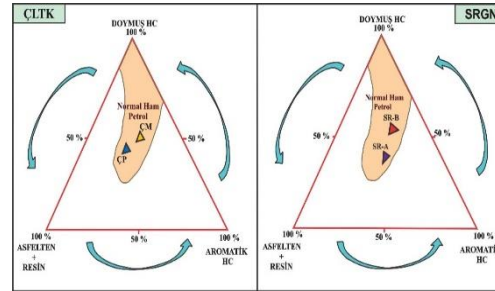
Noktasal Örnekler	Asfelten (%)	Doymuş HC (%)	Aromatik (%)	Resin (%)
ÇM	0,13	52,63	27,05	20,19
ÇP	0,53	45,33	22,29	31,85
SR-A	0,12	40,4	29,57	29,91
SR-B	0,09	54,29	27,64	17,98

sahasında AB-B organik fasiyesinin, Sorgun (Yozgat) sahasında ise B-BC fasiyesinin egemen olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 13. Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahaslarının yüzey örneklerine ilişkin Ph/n-C₁₈ ve Pr/n-C₁₇ diyagramı (Liu vd.2018)

Figure 13. Ph/n-C₁₈ and Pr/n-C₁₇ diagram for surface samples of Çeltek (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields (Liu et al.2018)



Şekil 14. Temel bileşen üçgen diyagramında Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahaslarından alınan yüzey örneklerinin konumları (Tissot ve Welte, 1978'den değiştirilerek)

Figure 14. Positions of surface samples taken from Çeltek (Amasya) and Sorgun (Yozgat) fields in the principal component triangle diagram (modified from Tissot and Welte, 1978)

TARTIŞMA

Bitümlü kayaçlar olarak adlandırılan bitümlü çamurtaşları; bitümlü şeyl, bitümlü kilitaşı ve bitümlü marnlardan oluşur. Ülkemizde bu kayaçların genel olarak kömür sahalarında kömürlü seviyelerin üzerinde yer aldıkları görülürken (örneğin; Beypazarı (Ankara), Seyitömer (Kütahya), Çeltek (Amasya), Sorgun (Yozgat), Ilgın (Konya), Himmetoğlu (Bolu)), bazı sahalarda ise (örneğin; Nallıhan (Ankara), Göynük (Bolu) ve Bayramören (Çankırı)) bu kayaçların altında kömür oluşumları görülmez. Ülkemizde kömür damarlarının üzerinde yer alan bu kayaçların genel olarak Miyosen yaşlı oldukları gözlenirken, kömür oluşumunun görülmediği sahalarda ise genellikle Eosen yaşlı oldukları görülmektedir. Ülkemizde gerek Miyosen gerekse de Eosen yaşlı olan bu kayaçların organik madde miktarları (%TOC) genel olarak %5-56 arasında değişmektedir. Bu sahalarda arasında organik madde miktarı en yüksek olan saha ise Himmetoğlu (Bolu) olup, %6,83-56,34 arasındadır (Sarı ve Geze, 2008). Çalışmamıza konu olan Çeltek (Amasya) sahasında organik madde miktarı %7,07-16,17 (ortalama %9,71) arasında iken, Sorgun (Yozgat) sahasında ise %2,34-12,57 (ortalama %6,19) arasında değişmektedir.

Bu makaleye konu olan Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahası bitümlü kayaçları da dahil ülkemizdeki bitümlü kayaçlar, genel olarak tatlı su ortamlarında depolanmış bitümlü şeyl ve bitümlü marnlardan oluşmaktadır ve organik madde tipleri de büyük çoğunlukla fitoplankton alglerden oluşan Tip-I kerojendir. Ancak, Ilgın (Konya) sahası bitümlü kayaçları

ise tuzlu su ortamında depolanmış olan bitümlü kilitaşlarından oluşmakta ve organik madde tipleri de diyatome türü fitoplankton alglerden oluşan Tip-II kerojendir (Sarı vd. 2024).

Ülkemizde yüzlek veren bitümlü kayaçların genel olarak T_{max} ısısal olgunlaşmaları 415–453 °C arasında değişmekte olup, çoğunlukla da ısısal olgunlaşmaları düşük olduğu için petrol türetmezler. İncelememize konu olan Çeltek (Amasya) sahası bitümlü kayaçlarında T_{max} değerleri 429-446°C (ort:439,6 °C), Sorgun (Yozgat) sahasında ise 417-443°C (ort:435,04 °C)'dir. Ancak, Bayramören (Çankırı) sahası bitümlü marnlarının T_{max} değerleri 443-453 °C arasında olup, ısısal olgunlaşmaları oldukça yüksek olan bu kayaçlar petrol türüm evresindedirler (Büyük, 2024).

Bitümlü kayaçların Modified Fischer Assay (MFA) petrol verimleri, sahip oldukları %TOC ve kerojen tipleri (Hidrojen İndeks (HI)) ile ilişkilidir (Büyük ve Sarı, 2021). Ülkemizdeki gerek Miyosen ve gerekse de Eosen yaşlı bitümlü kayaçların genel olarak Hidrojen İndeks (HI) değerleri 130-963 (mg HC/g TOC) arasında değişmektedir. İncelememize konu olan Çeltek (Amasya) sahası bitümlü kayaçlarında HI değerleri Çeltek (Amasya) sahasında 137-756 mg HC/g TOC, Sorgun (Yozgat) sahasında ise 164-685 mg HC/g TOC arasında olup, bu değerlere göre incelenen kayaçların Modified Fischer Assay petrol verimleri de düşük veya orta-iyi ekonomik seviyededir. Ancak, Göynük (Bolu) sahası bitümlü marnlarında HI değerleri 740-963 mg HC/g TOC (Murat vd. 2016) arasında olup bu

kayaçların Modified Fischer Assay petrol verimleri iyi-mükemmel ekonomik seviyededir. Bu nedenle, Göynük (Bolu) sahası bitümlü marnlarından sentetik petrol retortlamak için Enefit (Estonya) Firması ile TKİ ve TPAO ortaklığında bir retort tesisi kurma çalışmaları halen devam etmektedir.

SONUÇLAR

Çeltek (Amasya) sahası örnekleri ortalama % ağırlıkça 9,71 TOC, Sorgun (Yozgat) sahası örnekleri ortalama % ağırlıkça 6,19 TOC ile mükemmel kaynak kaya potansiyelindedir.

Kerojen tiplerinin, Çeltek (Amasya) sahasında Tip-I ve II, Sorgun (Yozgat) sahasında ise Tip-II olduğu tespit edilmiştir.

T_{max} (°C) olgunluk değerleri Çeltek (Amasya) sahasında ortalama 439,6 °C ve Sorgun (Yozgat) sahasında ise ortalama 435,04 °C olup, örnekler baskın olarak erken olgun durumdadır. Her iki sahaya ait rastgele seçilmiş olan 10 adet örneğin SCI analiz sonuçları ise olgunlaşmamış aşamadır.

Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahasına ait bitümlü kayaçların ürettikleri hidrokarbonların yerli olduğu ve herhangi bir organik kirlenmenin olmadığı tespit edilmiştir.

Çeltek ve Sorgun sahalarına ait bitümlü şeyl örneklerinden elde edilen özütlerin gaz kromatogramlarında genellikle baskın pikleri n-alkanlar oluştururken, düşük karbon numaralı n-alkanların baskın olmasının yanında izoprenoidlerin de yaygın olduğu gözlenmektedir.

İncelenen örneklerin Pr/Ph ve Ph/n-C₁₈ ve Pr/n-C₁₇ oranlarına göre baskın olarak indirgen, suboksik/disoksik koşullarda çökeldikleri belirlenmiştir.

Çeltek (Amasya) sahasına ait 20 adet bitümlü şeyl örneğinin Modified Fischer Assay petrol içeriği ortalama %5,13 olup, bu değerler retort edilebilecek sentetik petrolün orta ekonomik ile iyi ekonomik potansiyelde olduğunu göstermektedir.

Sorgun (Yozgat) sahasına ait 13 adet bitümlü şeyl örneğinin Modified Fischer Assay petrol içeriği ortalama %2,20 olup, bu değerler retort edilebilecek sentetik petrolün ekonomik olmayacağını göstermektedir.

Çeltek ve Sorgun sahalarına ait bitümlü şeyl örneklerinin potansiyel petrol verimlerinin kerojen tiplerine ve %TOC değerlerine bağlı olduğu ve örneklerin petrol verimlerinin %TOC değerlerinin yükselmesiyle birlikte arttığı belirlenmiştir.

Çeltek ve Sorgun sahalarına ait bitümlü şeyl örneklerinde Hidrojen İndeks (HI) parametresi ile S₁+S₂ toplamının beklendiği üzere Modified Fischer Assay petrol verimiyle pozitif bir ilişkisinin olduğu tespit edilmiştir.

KATKI BELIRTME

Bu çalışmanın materyalleri Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) Genel Müdürlüğü tarafından temin edilmiş olup, kurumun katkılarından dolayı teşekkür ederiz. Bunun yanında makaleyi değerlendirerek katkılarını esirgemeyen hakemlere de teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Arı, F. ve Yılmaz, V. 2023. Türkiye'de ve Dünyada enerji kaynaklarının genel görünümü ve alternatif enerji kaynaklarının önemi, *Düsbed*, 34, 496-519.
- Akçay, A. E. ve Beyazpınar, M. 2017. Sorgun (Yozgat)-Yıldızeli (Sivas) Önülke Havzası'nın jeolojik evrimi, havzada etkin olan volkanizmanın petrografik, jeokimyasal özellikleri ve jeokronolojisi, *MTA*, (155), 1-32.
- Atalay, Z. 2001. Amasya yöresindeki linyitli Çeltek Formasyonu'nun stratigrafisi, fasiyesi ve çökelme ortamı özellikleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 44(2), 1-22.
- Blumenthal, M. M. 1937. Amasya vilayetine tabi Çeltek'teki linyitli arazinin jeolojik teşekkülü hakkında rapor. *MTA*, Der. No: 157.
- Büyük, F. ve Sarı, A. 2021. Bozcahüyük (Seyitömer/Kütahya) Havzasındaki bitümlü marnların organik jeokimyasal özellikleri, çökelme ortamı ve hidrokarbon potansiyeli. *MTA dergisi*. 164:55-77.
- Büyük, F. 2024. Çankırı Havzasındaki (Bayramören KF'su) Orta Eosen yaşlı Ilica Formasyonunun biyo-jeokimyasal özelliklerinin incelenmesi (İç Anadolu, Türkiye). Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. Org. Jeo. Analiz Sonuçları (Yayınlanmamış).
- Cicioğlu, E. 1995. Sorgun (Yozgat) kömürlerinin kimyasal ve petrografik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi.
- Clementz, D. M. 1979. Effect of oil and bitumen saturation on source-rock pyrolysis: *AAPG Bulletin*, 63(12), 2227-2232.
- Committee Office of Mineral Resources in China. 1987. Reference Manual of Mining Industry Demands. Geology Publishing House, Beijing, 312-315.
- Didyk, B. M., Simoneit, B. R., Brassel, S. C. and Englington, G. 1978. Organic geochemical indicators of paleoenvironmental conditions of sedimentation. *Nature*, 272(5650), 216-222.
- Ediger, V. Ş. ve Soylu, C. 1993. Petrol jeologları için organik jeokimya. TPAO Araştırma Merkezi Grubu Eğitim Yayınları, No. 23, 169 s.
- English, J. M., Fowler, M., Johnston, S. T., Mihalynuk, M. G. and Wight, K. L. 2004. The thermal maturity in the Central Whitehorse Trough, Northwest British Columbia, Resource Development and Geosciences Branch, British Columbia Ministry of Energy and Mines, pp.79-85.
- Erdoğan, E. 2023. Eosen Çeltek Formasyonunun Çeltek (Amasya) ve Sorgun (Yozgat) sahalarında organik jeokimyasal incelemesi ve hidrokarbon türüm potansiyeli. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi. 212s, Ankara,
- Erlor, A., Akıman, O., Unan, C., Dalkılıç, F., Dalkılıç, B., Geven, A. ve Önen, P. 1991. Kaman (Kırşehir) ve Yozgat yörelerinde Kırşehir Masifi magmatik kayaların petrolojisi ve jeokimyası. *Tübitak Doğa*,

- Mühendislik ve Çevre Bilimleri Bülteni, 15: 76-100.
- Espitalié, J., Deroo, G., Marquis, F. 1985. La pyrolyse Rock- Eval et ses applications. Partie 1. Rev. Inst. Fr. Pet. 40, 563–579pp.
- Ghori, K. 2002. Modelling the hydrocarbon generative history of the Officer Basin, Western Australia. PESA Journal, No. 29, pp. 29-42.
- Gümüşsu, M. 1980. Amasya ili Merzifon, Suluova ilçeleri kömür jeolojisi. MTA Der.No 7063, Ankara.
- Gümüşsu, M. 1984. Amasya ili Çeltek Kömür Havzası'nın jeolojisi ve kömür potansiyelinin değerlendirilmesi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hezarfen, C. 1974. Çeltek (Amasya-Suluova) kömür işletmesi civarının jeolojik raporu. MTA, Der. No:6137, Ankara.
- Hunt, J. M. 1995. Petroleum geochemistry and geology. W. H. Freeman and Company, New York, 743 p.
- Hunt, J. M. 1996. Petroleum geochemistry and geology (second edition), W. H. Freeman and Company, New York, 743p.
- Jarvie, D. M. 1991. Factors affecting rock-evalderived kinetic parameters: Chemical Geology, 93, 79-99.
- Jones, R. W. 1987. Organic facies, In: Advances in petroleum geochemistry. Brooks, J. and Welte, D. (eds), Academic Press, 2, pp. 1-91, London.
- Ketin , İ. 1966. Anadolu'nun tektonik birlikleri. MTA dergisi, 66(20).
- Koç, C. 2002. Suluova (Amasya) kuzeybatısındaki Eosen çökellerinde sedimantolojik incelemeler. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Liu, Z. J., Dong, Q. S., Ye, S. Q., Zhu, J. W., Guo, W., Li, D. C., Liu R., Zhang H. and Du, J. F. 2006. The situation of oil shale resources in China. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 36(6), 869–876.
- Liu, R., Liu, Z., Guo, W. and Chen, H. 2015. Charecteristics and compherensive utilization potential of oil shale of the Yin'e basin, Inner Mongolia, China, Vol: 32, No:4, pp 293-312.
- Liu, S., Qi, S., Luo, Z., Liu, F., Ding, Y., Huang, H., Chen Z. and Cheng, S. 2018. The origin of high hydrocarbon groundwater in shallow Triassic aquifer in Northwest Guizhou, China. Environmental Geochemistry and Health, 40(1), 415-433.
- Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü (MAPEG) 2024. 2022 yılı ham petrol ve doğalgaz üretim ve rezerv istatistikleri. Web Sitesi: <https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Petrolistatistik>, Erişim Tarihi: 28.01.2024.
- Mukhopadhyay, P. K., Wade, J. A. and Kruge, M. A. 1995. Organic facies and maturation of Jurassic/Cretaceous rocks and possible oil-source rock correlation based on pyrolysis of asphaltenes, Scotion Basin, Canada, Organic Geochemistry, 22(1), 85-104.

- Murat, A., Sarı, A., Uğur, F. A., Kabadayı, E., 2016. Hydrocarbon potential of Göynük (Bolu-Turkey) oil shale resources and investment research Project of TKİ-TP. International Symposium Oil Shale 100 Years. Estonia, Sept. 20-23. p. 27-28.
- Özcan, A., Erkan, A., Keskin, A., Oral, A., Özer, S., Sümengen, M. ve Tekeli, O. 1980. Kuzey Anadolu Fayı-Kırşehir Masifinin arasının temel jeolojisi. MTA Raporu, Der. No:6722, Ankara.
- Özdemir, İ. ve Bekmezci, F. 1983. Suluova (Amasya ili) Çeltek linyit sahalarının jeoloji ve sondajlı aramalar raporu. MTA Der. No: 7396, Ankara.
- Öztürk, A. 1968. Çerkeş-Eskipazar-Gerede Bölgesinin Jeolojisi. A.Ü. Fen Fakültesi Jeoloji Kürsüsü, Ankara. (Yayımlanmamış).
- Öztürk, A. 1979. Ladik-Destek Yöresinin Stratigrafisi. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, V.22, 27-34. Ankara.
- Peters, K. E. 1986. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, V.70, No: 3, pp. 318-329.
- Peters, K. E. and Cassa, M. R. 1994. Applied source rock geochemistry, in L.B. Magoon and W.G. Dow, eds., The petroleum system from source to trap: AAPG Memoir 60, p. 93-120.
- Sarı, A., Geze, Y., 2008. Organic Geochemical Evaluations of Bituminous Rock and Coals in Miocene Himmetoglu Basin (Bolu, Turkey). Petroleum Science and Technology. 26 (6), 649-664.
- Sarı, A., Erol, F ve Ismayılzade, K., 2024. Ilgın (Konya) Bitümlü Kıltaşı Çökeli Havzasında Paleo-Tuzluluk İncelemeleri: Diyatome Türü Algilerle Tuzluluk Arasındaki İlişki. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (baskıda).
- Şener, M., Şengüler, İ. ve Taka, M. 1992. Çeltek (Amasya) yöresi bitümlü şeyllerinin jeolojisi ve kullanım olanakları. MTA, Der. No:9493.
- Tao, S., Tang, D. Z., Li, J. J., Xu, H., Li, S. and Chen, X. Z. 2010. Indexes in evaluating the grade of bogda mountain oil shale in China. Oil Shale, 27(2).
- Tissot, B. P. and Welte, D. H. 1978. Petroleum formation and occurrence, Springer-Verlag, Berlin.
- Tissot, B. P. and Welte, D. H. 1984. Petroleum formation and occurrence. Springer-Verlag, Berlin, 699 p.
- Van Krevelen, D. W. 1993. Coal. 3rd Edition, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Yılmaz, A. 1981. Tokat ile Sivas arasındaki bölgede ofiyolitli karışığın iç yapısı ve yerleşme yaşı. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, C. 24 s.31-36, Ankara.



Erken Eosen yaşlı adakitik andezitler (Gümüşhane, KD Türkiye) içerisindeki mikrogranüler anklavların jeokimyasal karakteristikleri

Geochemical characteristics of microgranular enclaves in Early Eocene adakitic andesites (Gümüşhane, NE Türkiye)

MEHMET ALİ GÜCER ^{1*}, ABDULKADİR MURAT GÜNER ², OKAY ÇİMEN ³

¹ Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

² Gümüşhane Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gümüşhane, Türkiye

³ Munzur Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Tunceli, Türkiye

Geliş (*received*): 26 Ocak (January) 2024 Kabul (*accepted*): 18 Haziran (June) 2024

ÖZ

Doğu Sakarya Zonu'ndaki (KD Türkiye) erken Senozoyik magmatizması, bölgesel tektonomagmatik gelişime dair önemli veriler sağlamaktadır. Bölgede, adakit veya adakitik intrüzif/ekstrüzif kayalar Geç Paleosen'den Pliyo-Kuvaterner döneme kadar yaygın olarak gözlenmektedir. Çalışma alanında, Erken Eosen adakitik andezitler, genellikle 10 km²'den küçük mostralar halinde gözlenmektedir. Adakitik bileşimli bu andezitler bol miktarda mikrogranüler anklav içermekte olup bu çalışmada petrografik/jeokimyasal özellikleri ve ana kayayla olan petrolojik ilişkileri irdelenmiştir. Ana kayaya kıyasla nispeten bazik bileşimli anklavlar, küreselden elipsoidale kadar değişen şekillerde ve birkaç cm ile 20 cm arasında değişen boyutlarda gözlenmektedir. Anklavlar mikrolitik yer yer porfirik dokulu olup başlıca plajiyoklas, hornblend, klinopiroksen, ortoklas ve opak minerallerden meydana gelmektedir. Gerek petrografik gerekse petrokimyasal özellikleri anklavların bazaltik andezit türünde olduğunu ve sub-alkalin bir magmadan türemiş olabileceğini göstermektedir. Ana ve iz element değişimleri, gelişimlerinde fraksiyonel kristallenmenin etkili olduğunu ve plajiyoklas, piroksen, hornblend, magnetit ve apatit ayrışmasının büyük ölçüde rol oynadığını göstermiştir. Anklav ve ana kayaların benzer iz element davranışları felsik ve mafik magmaların karışması esnasındaki etkileşim süreçlerini işaret edebilir. NTE dağılımları ise gelişimlerinde hornblend fraksiyonlaşmasının önemli rol oynadığını, buna karşılık plajiyoklas ayrışmasının etkili olmadığını işaret etmektedir. Petrokimyasal veriler, anklavların ana magmasının, kuzey Neotetis Okyanusu'nun tamamen kapanmasından hemen sonra; genişlemeli tektonik rejimin başlangıç aşamalarında, amfibol-eklojit fasiyesi koşullarında okyanusal bazaltların kısmi erimesi ile üretildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Adakitik andezit, doğu Sakarya zonu, Erken Senozoyik, mikrogranüler anklav, petrokimya

ABSTRACT

The early Cenozoic magmatism in the Eastern Sakarya Zone (NE Turkey) provides significant insights into the regional tectonomagmatic evolution. Adakite-like intrusive/extrusive rocks have been widely observed from the Late Paleocene to the Plio-Quaternary period in the region. In the study area, Early Eocene adakitic andesites are observed in outcrop areas smaller than 10 km² and they contain abundant microgranular enclaves. This study presents petrochemistry data of the enclaves and discusses petrological relationships with the host rock. The enclaves, with more basic composition compared to the parent rocks, are observed in ranging from a few to 20 cm in size. They are microlithic to porphyritic in texture and mainly composed of plagioclase, hornblende, clinopyroxene, orthoclase and opaques. Both petrographic and petrochemical characteristics indicate that they are of basaltic and basaltic andesite and may have derived from a sub-alkaline magma. Major and trace element variations indicate that fractional crystallization was effective, and plagioclase, pyroxene, hornblende, magnetite and apatite fractionation played an important role. Similar trace element distributions of enclaves and host rocks may indicate interaction processes while mixing of felsic and mafic magmas. Similarly, REE models of the rocks, indicated hornblende fractionation played an important role in their evolution, whereas plagioclase fractionation was less effective. Petrochemical data suggest that the parent magma of the enclaves was produced by the partial melting of oceanic basalts under amphibole-eclogite facies conditions during the initial stages of the extensional tectonic regime just after the complete closure of the northern Neotethys Ocean.

Keywords: Adakitic andesite, Eastern Sakarya Zone, Early Cenozoic, microgranular enclaves, petrochemistry

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1426237>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: maligucer@gmail.com

GİRİŞ

Kayaçların oluşumunda, ilksel bazik magmayı temsil eden mikrogranüler dokulu anklav terimi felsik magmatik kayaların içerdiği koyu renkli, bazik kayaç parçalarını tanımlamak üzere ilk kez Lacroix (1890) tarafından kullanılmıştır. Literatürde en yaygın kabul gören tanımlamanın Didier ve Barbarin (1991) tarafından yapılmış olan anklavlar, olduğu kayaçların kaynak magması, ergiyiklerin oluşum mekanizmaları ve ayrıca kıtasal kabuk ile manto arasındaki etkileşim hakkında önemli bilgiler sağlayabilmektedir (White ve Chappell, 1977). Anklavlar, eşyaşlı felsik (riyolitik) ve mafik (bazaltik) iki farklı magmanın kabuğun

farklı seviyelerinde, özellikle yüzeyde veya baca içerisinde heterojen-fiziksel karışması ya da karışmaması (magma mingling) ile oluşabileceği gibi (Didier ve Barbarin, 1991; Barbarin ve Didier, 1992; Blake and Flink, 2000), bu magmaların derinlerde magma odasında homojen karışmaları (magma mixing) ile de (andezitik hibrid magmalar) oluşabilmektedir. Heterojen karışımında ürün olarak anklavlar, homojen karışımında ise farklı mikroskobik dokular tanımlanmaktadır (Hibbard, 1991). Her ikisinde de magmaların yoğunluğu ve sıcaklığı önemli rol oynamaktadır (Koyaguchi, 1986; Alpaslan, 2001).

Çalışma alanının içerisinde yer aldığı Doğu Sakarya Zonu (KD Türkiye), Türkiye'nin jeolojik olarak şekillenmesinde önemli bir rol oynayan Alp-Himalaya orojenezinin etkisi ile oluşmuş olup farklı türde magmatik kayalar içerdiği bakımından önemli bir alan konumundadır. Karadeniz havzasının güneydoğu kıyısı boyunca uzanan orojenik bir kuşak meydana getiren bu bölge Mesozoyik dönemde kuzeye yitilen okyanusal litosferin üzerinde gelişmiş eski bir ada yayı olarak bilinmektedir (Şengör ve Yılmaz, 1981).

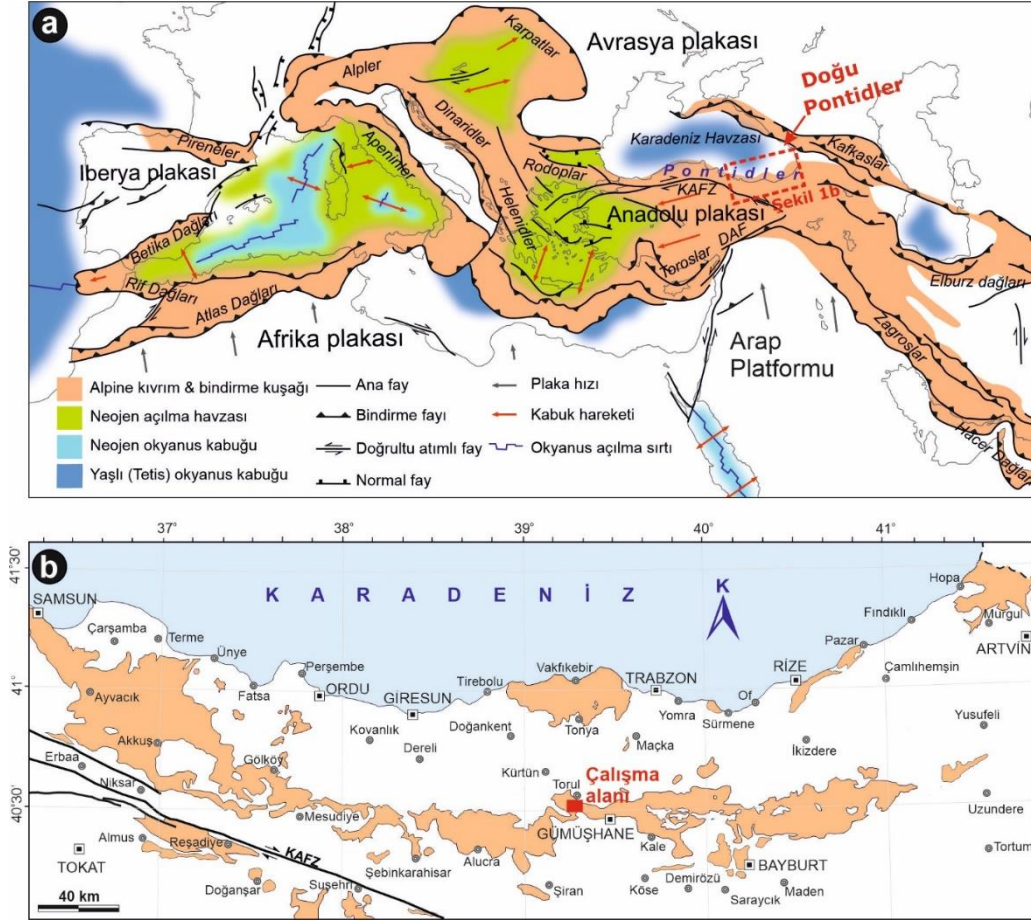
Bölgede yüzeylenen adakitik magmatizma, Türkiye'nin diğer bölgelerine kıyasla nispeten geniş çalışılmış ve çarpışma sonrası adakitik magmatizma için (i) Erken Eosen (Topuz vd., 2005; Karslı vd., 2010a, 2011; Eyüboğlu vd., 2011, 2012; Dokuz vd., 2013; Temizel vd., 2020; Gücer vd., 2017; Gücer, 2021), (ii) Miyosen (Eyüboğlu vd., 2012; Dokuz vd., 2013; Karslı vd., 2019), (iii) Oligosen (Karslı vd., 2020) ve (iv) Pliyo-Kuvaterner (Yücel, 2019) olmak üzere dört farklı dönem tanımlanmıştır. Adakitik bileşime sahip bu kütlelerden bazıları anklav içermeleri bakımından karakteristik olup bunlardan biri olan ve Gümüşhane'nin batısında, Altınpınar (Torul) ve civarında yüzeyleme veren adakitik andezitler çalışma konusu olarak seçilmiştir. Çalışma alanı ve civarında asidik, ortaç ve bazik karakterli volkanik ve piroklastik kayalardan meydana gelen volkanizma, bölgede özellikle kıtasal yay magmatizmasının en iyi gözlemlendiği yerlerden biri olma özelliğindedir (Yücel vd., 2017; Kaygusuz vd., 2019; Arslan vd., 2022; Sipahi vd., 2022; Aydınçakır vd., 2022; Kaygusuz vd., 2022; Sipahi vd., 2023; Arslan ve Temizel, 2023).

Bu çalışmada, Doğu Sakarya Zonunun güney kesiminde, Altınpınar (Torul, Gümüşhane) yöresinde yüzeyleme sunan erken Eosen yaşlı adakitik andezitler (Gücer, 2021) içerisinde gözlenen ve bugüne kadar çalışılmamış olan anklavların petrografik ve petrokimyasal özellikleri ile magmatik gelişimi ve içerisinde bulunduğu ana kaya ile olan jeolojik ilişkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen veriler ışığında, anklavların oluşum mekanizması ve kökeni ortaya konularak bölgenin jeolojisine katkı sağlanmaya çalışılmıştır.

BÖLGESEL JEOLJİ

Güneybatı Avrupa'dan güneydoğu Asya açıklarına kadar uzanan Alp-Himalaya sistemi, Gondwana'dan türeyen parçaları Avrasya kıtasal kabuğuyla birleştiren genç bir orojenik kuşak konumundadır (Şengör vd., 1988; Storetvedt, 1990; Rosenbaum ve Lister, 2002). Genel olarak, Anadolu levhasının oluşumunda jeolojik açıdan önemli bir rol oynayan Mesozoik-Senozoyik deformasyonlarla karakterize edilmektedir (Şekil 1a).

Pontidlerin kuzey Türkiye'deki ana gövdesi, Geç Kretase'de kuzey Neotetis Okyanusu'nun kuzeye yitimi ve ardından Paleosen-Eosen döneminde Pontidlerin Anatolid-Torid Bloğu (ATB) ile çarpışması sonucu gelişmiştir (Şengör ve Yılmaz, 1981; Channel vd., 1996; Okay ve Tüysüz, 1999; Yılmaz Şahin vd., 2012). Doğu Pontidler olarak da bilinen bu kısım, Karadeniz'in güneydoğu kıyısı boyunca doğu-batı doğrultusunda uzanan paleo-yayın en iyi korunmuş örneklerinden birini oluşturur (Şengör ve Yılmaz, 1981; Okay ve Şahintürk, 1997) ve Karbonifer'den Senozoyik'e kadar oluşmuş çeşitli kaya türlerini içerir.



Şekil 1. (a) Batı Alp dağ kuşağının tektonik haritası. Sadece Alpin (Tersiyer) yapıları gösterilmiştir (kaynak: Woudloper, 2009), **(b)** Doğu Pontidler'deki Eosen volkanik kayaların dağılımı (Arslan vd., 2013 ve Temizel vd., 2016'dan değiştirilmiştir).

Figure 1. (a) Tectonic map of the western Alpine mountain belt. Only Alpine (Tertiary) structures are shown (source: Woudloper, 2009). **(b)** Geological map showing the distribution of the Eocene volcanic rocks in the eastern Pontides (modified after Arslan et al., 2013; Temizel et al., 2016).

Doğu Pontidlerin Variskan temeli Erken Karbonifer metamorfik kayaları (Topuz vd., 2004; Dokuz vd., 2022), Orta Karbonifer riyolitleri (Dokuz vd., 2017a), Orta ila Geç Karbonifer kalk-alkalin intrüzyonlarından (Topuz vd., 2010; Dokuz, 2011; Kaygusuz vd., 2012; Karslı vd., 2016; Gücer ve Sarı, 2020; Gücer vd., 2024) oluşmaktadır. Bu temeldeki MORB karakterli metabazitler ve ilişkili metaperidotitler, Reyik Okyanusu'nun okyanusal kompleksleri olarak

yorumlanmaktadır (Dokuz vd., 2011). Permo-Karbonifer sedimanter diziler, temel metamorfik kayaların üzerine uyumsuz olarak gelmektedir (Kandemir ve Loesay-Aubril, 2011). Tüm bu Jura öncesi temel kayalar Erken-Orta Jura bazik ve asidik intrüzifler tarafından kesilmiş (Dokuz vd., 2006; Şen, 2007; Eyüboğlu vd., 2016; Dokuz ve Sünnetçi, 2019) ve ardalanmanın tabanında Ammonitico Rosso fasiesi kireçtaşlarının eşlik ettiği volkaniklastik kayalardan oluşan Şenköy

Formasyonu (Kandemir ve Yılmaz, 2009) tarafından uyumsuz olarak örtülmüştür.

Geç Jura - Erken Kretase kireçtaşları, Erken Jura volkano-sedimanter kayaçları üzerinde uyumlu ve/veya uyumsuz olarak uzanmaktadır (Dokuz vd., 2017b). Kireçtaşları ayrıca kuzeyden güneye doğru önemli fasiyes değişiklikleri gösteren Geç Kretase sedimanter örtüsü ile uyumlu veya uyumsuz olarak örtülmektedir. Kuzeyde esas olarak volkano-klastik ve sedimanter kayaçların ardalanmasından oluşurken (Aydın vd., 2020), Doğu Pontidlerin güneyinde türbiditik sedimanter kayaçlar tüm ardalanmaya hakimdir (Saydam Eker vd., 2016; Saydam Eker, 2020; Saydam Eker ve Arı, 2023). Özellikle kuzey-güney geçiş zonunda volkanoklastik kayaçlara yitimle ilişkili Geç Kretase intrüzifleri eşlik etmektedir (Kaygusuz vd., 2008, 2018; Karanlı vd., 2010b, 2012; Kaygusuz ve Şen, 2011; Aydın, 2014; Sipahi vd., 2018, 2019, 2020a, 2020b; Yücel vd., 2014, 2017; Aydınçakır, 2016). Bölgedeki tüm birimler Eosen birimleri tarafından uyumsuz olarak örtülmekte olup özellikle Orta Eosen dönemi, volkanik kayaçlar ile temsil edilmektedir (Keskin vd., 2008; Aydınçakır ve Şen, 2013; Arslan vd., 2013; Saydam Eker vd., 2016; Yücel vd., 2017; Şekil 1b).

Bölgedeki Erken Eosen adakitik magmatizmasının, yay-kıta çarpışmasının son aşamalarında meydana geldiği ve Erken Eosen dönemdeki açılma rejimine bağlı olarak, büyük olasılıkla kalın alt kıtasal kabuğun veya okyanusal litosferin bir parçasının kısmi erimesinden oluştuğu bilinmektedir (Topuz vd., 2005, 2011; Karanlı vd., 2010a, 2011; Dokuz vd., 2013; Gücer, 2021). Adakitik volkanizma genellikle 2-5 km²'lik küçük mostralarda halinde yüzeylenirken, adakit benzeri plütonizma 8-10 km²'lik boyutlarda mostralarda vermekte ve

birçoğu anklav içermesi ile karakterize edilmektedir (Gücer, 2021).

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında veri elde edebilmek amacıyla araziden derlenen kayaç numuneleri materyal olarak kullanılmıştır. Çalışmanın hedefi doğrultusunda adakitik andezitler içerisinde yaygın gözlenen anklavlardan 20 civarında örnekleme yapılmış ve bunlardan petrografik tayin amaçlı ince kesitler ve jeokimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Petrografik incelemeler için LEICA DM-EP marka polarizan mikroskop kullanılmış ve LEICA DFC295 marka kamera ile mikro görüntüler alınmıştır.

Birimi temsilen 19 adet anklav örneği ayrılmış ve tüm-kayaç jeokimya analizleri Sample Solution Analytical Technology Co., Ltd. (Wuhan, Çin) laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Ana (major) elementler ZSX Primus II marka dalga boyu dağılımlı X-ışını floresans spektrometresi (XRF) yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz edilen numunelerin ön hazırlık işlemlerinde ergitme yöntemi kullanılmıştır. Akı (flux) işlemleri için lityum tetraborat, lityum metaborat ve lityum florürden (45:10:5) oluşan bir karışım kullanılmış olup sırasıyla oksidan ve ayırıcı madde olarak amonyum nitrat ve lityum bromür kullanılmıştır. Erime sıcaklığı 1050°C ve erime süresi 15 dakika olarak uygulanmıştır. Test koşulları voltaj: 50kV ve akım: 60mA şeklinde olup analizlerde GBW07101-14 standardı kullanılmıştır. Veriler teorik α katsayısı yöntemiyle düzeltilmiş olup bağıl standart sapma (RSD) %2'den azdır. İz element jeokimya analizleri Agilent 7700e marka İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ayrıntılı numune hazırlama

prosedüründe şu adımlar izlenmiştir: (1) 200 mesh boyutunda toz halindeki numunenin 12 saat boyunca 105°C'deki bir fırında kurutulması; (2) 50 mg numune tozunun tartılıp bir Teflon tutucuya yerleştirilmesi; (3) Teflon tutucuya yavaş yavaş 1 ml HNO₃ ve 1 ml HF eklenmesi; (4) Teflon tutucunun paslanmaz çelik bir basınç ceketine yerleştirilmesi ve >24 saat boyunca bir fırında 190°C'ye ısıtılması; (5) Soğutulduktan sonra Teflon tutucunun açılması ve 140°C'de bir ısıtıcı plaka üzerine yerleştirilerek başlangıç kuruluşuna kadar buharlaştırılması ve ardından 1 ml HNO₃ ilave edilip tekrar kuruyana kadar buharlaştırılması; (6) 1 ml HNO₃, 1 ml MQ su ve 1 ml 1 ppm In'lik dahili standart çözeltinin ilave edilmesi ve Teflon tutucunun yeniden kapatılarak >12 saat süreyle 190°C'deki fırına yerleştirilmesi; (7) Nihai çözeltinin bir polietilen şişeye aktarılması ve %2 HNO₃ ilavesiyle 100 gr'a seyreltilmesi. Jeokimyasal yorumlar için diyagramlar GCDkit (version 6.2, 2024; Janoušek vd., 2006, <http://www.gcdkit.org/>) ve CoreDRAW® Graphics Suite 2019 (<https://www.coreldraw.com/en/>) yazılımları kullanılarak oluşturulmuştur.

BULGULAR

Saha İlişkileri ve Petrografi

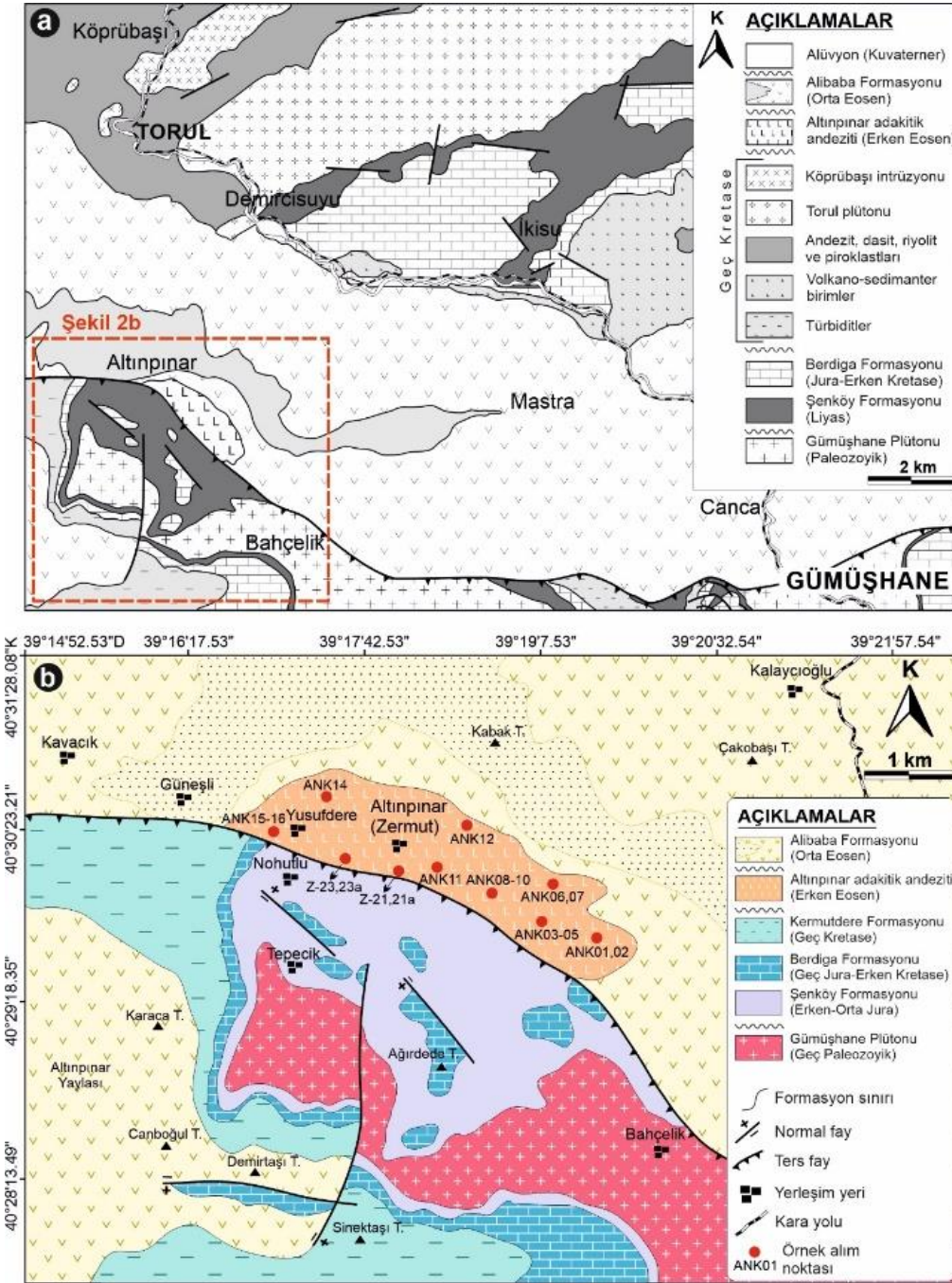
Altınpınar (Torul) ve yakın civarını (Gümüşhane, KD Türkiye) kapsayan çalışma alanı Doğu Sakarya Zonu'nda yer almaktadır. Çalışmaya konu anklavlar ise alanda yüzeyleme veren ve 10 km²'den küçük mostralarda halinde yayılım sergileyen Altınpınar adakitik andezitleri (Gücer, 2021) içerisinde gözlenmektedir (Şekil 2). Adakitik andezitlerin Gümüşhane ve çevresinde Erken Eosen adakitik bileşimli kayalar ile ilişkili olduğu

düşünülmektedir (Gücer, 2021).

Andezitik Ana Kayalar

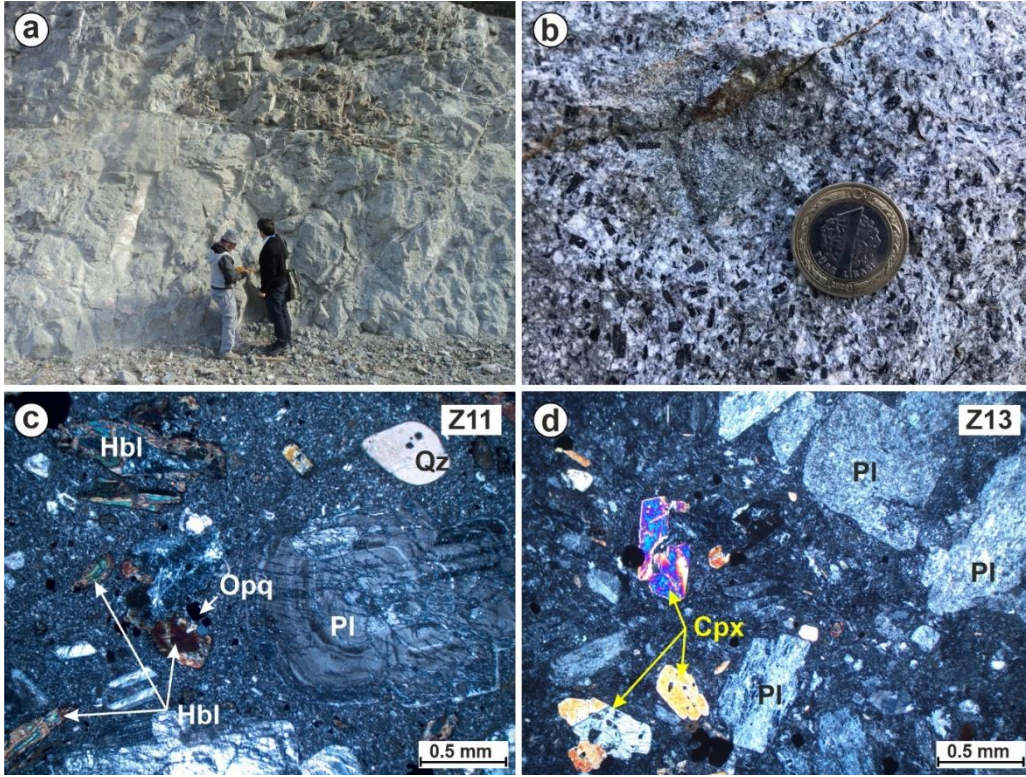
Eosen öncesi litolojileri keserek yerleşen Altınpınar adakitik andezitleri (Gücer, 2021) yaklaşık 5 km²'lik bir alanda yayılım göstermekte olup KB-GD yönünde uzanmakta ve güneyden bir bindirme fayı ile sınırlanmaktadır. Andezitler genel olarak taze ve grimsi renkli görünüm sergilemektedir. (Şekil 3a). Ancak içerisinde gelişmiş ikincil karbonatlaşma ve killeşme gibi alterasyonlar da görülmektedir. Bununla birlikte andezitler, aynı minerallerden oluşan bir hamur içinde yaklaşık 2-3 cm'ye kadar ulaşan boyutlarda iri kristalli plajiyoklas ve hornblend (amfibol) fenokristallerinden oluşan porfirik doku göstermektedir (Şekil 3b). Adakitik andezitler mineralojik olarak başlıca plajiyoklas ve hornblend fenokristalleri ile bu minerallerin mikro ve kriptokristalen tanelerinden meydana gelen hamur içermektedir. Hamur içerisinde ince taneli piroksen, kuvars ve opak minerallere nadiren rastlanır. Dolayısıyla mineral topluluğu plajiyoklas + hornblend ± piroksen ± Fe-Ti oksit ± kuvars ile sınırlandırılabilir. Adakitik andezitlerde ve yer yer anklavların ana kayalar ile olan sınırları boyunca ikincil kalsit, serizit ve epidot minerallerine de rastlanmaktadır. Hornblend mafik faz olarak en yaygın mineral türünü oluşturur. Fenokristalleri genellikle iri, yarı öz şekilli ve öz şekilli gelişmiş, yer yer kırıklı ve kırıklar/dilinimler boyunca altere olmuştur.

Bazı hornblend kristalleri üzerinde opak mineral inklüzyonları da görülmektedir. Tipik olarak hornblend kristallerinin uzun eksenleri boyunca hamur tarafından kemirilme dokuları sıklıkla görülmektedir (Şekil 3c).



Şekil 2. Çalışma alanının jeoloji haritası (Kaygusuz, 2000 ve Gücer, 2021'den değiştirilerek).

Figure 2. Geological map of the study area (modified after Kaygusuz, 2000 and Gücer, 2021).



Şekil 3. Adakitik andezitlerin (a) genel arazi görünümü, (b) iri kristalli plajiyoklas ve hornblend mineralleri ve (c-d) mikroskobik görünümü (Pl: Plajiyoklas, Hbl: Hornblend, Cpx: Klinopiroksen, Qz: Kuvars, Opq: Opak mineral, görüntüler çapraz nikelde alınmıştır).

Figure 3. (a) Field views of adakitic andesites, (b) coarse grain plagioclase and hornblende minerals and (c-d) photomicrograph of adakitic andesites (Pl: Plagioclase, Hbl: Hornblende, Cpx: Clinopyroxene, Qz: Quartz, Opq: Opaque mineral, XPL image).

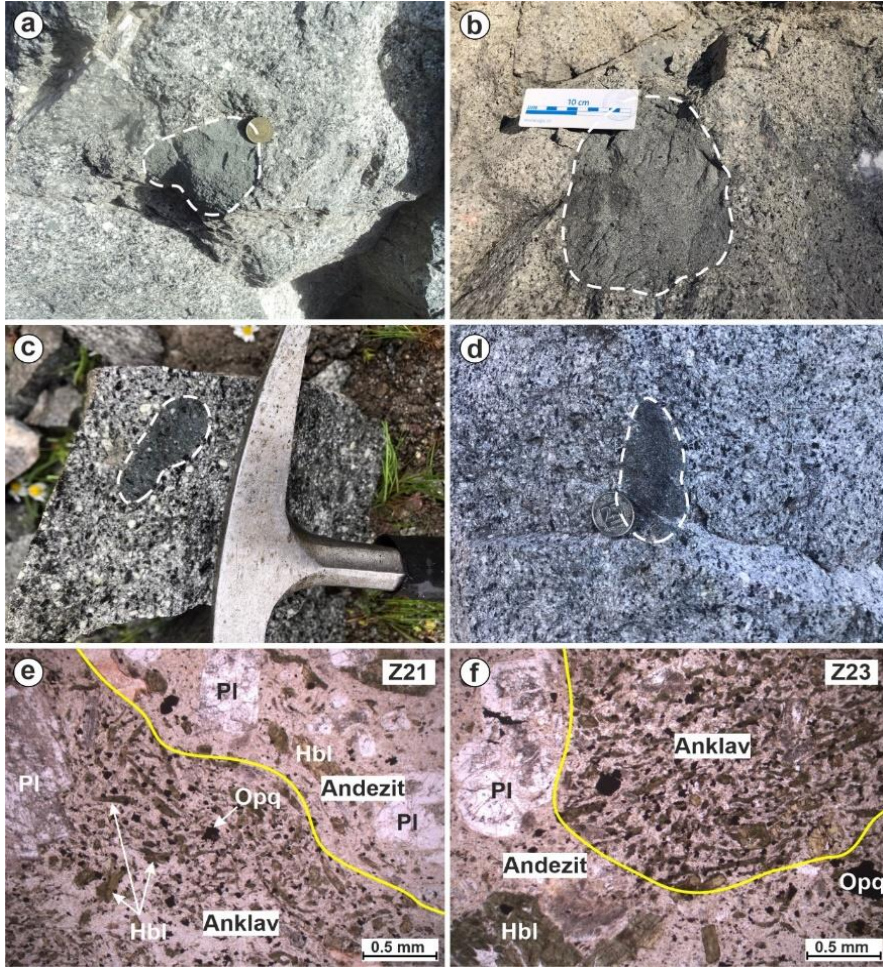
Yapılan mineral kimyası çalışmaları, hornblend minerallerinin Ca-tipi (kalsik) magnezyo-hornblend bileşimine sahip olduğunu ve oluşumları itibarıyla magmatik bir kökeni işaret ettiğini ortaya koymuştur (Gücer vd., 2017). Plajiyoklas çoğunlukla iri kristalli ve yarı öz şekilli fenokristaller, hamurda ise mikrolitler halinde gelişmiştir. Kristaller büyük oranda albit ikizlenmesi göstermekle birlikte, iç içe büyümüş zonlu şekillerde de gelişmiştir (Şekil 3c). Bazı örneklerde farklı büyüklüklerde ve dağınık halde seri dokuyu oluştururlar. Plajiyoklas

minerallerinin bileşimi $An_{40-61}Ab_{38-57}Or_{1-5}$ aralığında değişmekte ve andezin ve labrador türünü yansıtmaktadır (Gücer vd., 2017). Klinopiroksen kayalarda az görülmekle birlikte, genellikle ince taneli, öz şekilsiz, yer yer yarı öz şekillidir (Şekil 3d). Bazı kristaller kırıklı bir yapı sunmaktadır. Türleri ojit olup $Wo_{44-45}En_{43-44}Fs_{12}$ bileşimindedir (Gücer vd., 2017). Opak mineraller ince kristalli ve dağınık halde görülür. Yer yer hornblend ve piroksen kristalleri içerisinde kapanım halinde de bulunmaktadır.

Mikrogranüler anklavlar

İlksel bazik magmanın kalıntıları olan anklavlar çalışma alanında adakitik andezitler içerisinde dağınık halde gözlenmektedir. Dolayısıyla belirli bir gruplaşma sergilememektedir.

Şekilsel olarak küreselden elipsoidal kadar değişmekle birlikte, boyutları birkaç cm ile 20 cm arasında değişiklik göstermektedir (Şekil 4a-d).



Şekil 4. (a-b) Boyutları 20 cm'ye kadar ulaşan küresel/yuvarlağımsı ve (c-d) küçük ölçekli elipsoidal şekilli anklavların saha görünüşleri. (e-f) Anklavların ana kayaç ile sınırlarının mikroskobik görünüşleri (Pl: Plajiyoklas, Hbl: Hornblend, Opq: Opak mineral, görüntüler tek nikolde alınmıştır).

Figure 4. Field views of (a-b) spherical/round-shaped enclaves with up to 20 cm in size, and (c-d) microgranular enclaves with small and ellipsoidal shaped. (e-f) Photomicrographs of enclaves boundaries with the host rocks (Pl: Plagioclase, Hbl: Hornblende, Opq: Opaque mineral, images were taken PPL).

Bununla birlikte, daha çok elipsoidal/oval biçimli olarak gözlenmektedir. Anklavlar adakitik andezitlerle benzer mineralojik bileşime sahip olmakla birlikte mineralojik oranlarında farklılıklar gözlenmektedir (Şekil 4e-f). Mikrolitik dokulu anklavlar içerisinde yer yer iri kristalli (porfirik) plajiyoklas/ortoklas ve hornblend minerallerine rastlamak mümkündür.

Anklavlar başlıca plajiyoklas, hornblend, opak mineral ve az oranda ortoklas minerallerinden meydana gelmekte iken, klinopiroksen ve kuvars aksesuar oranda bulunmaktadır (Şekil 4e-f). Klinopiroksen minerali bazı örneklerde görülmemekte ve hornblend minerallerinin miktarı ise örnekten örneğe değişiklik göstermektedir. Bazı örneklerde gözlenen klinopiroksen mineralleri kayalarda genellikle ince taneli, öz şekilsiz, yer yer ise yarı öz şekilli kristaller halindedir. Opak mineraller ince kristalli ve kayalarda dağınık halde bulunur.

Tüm Kayaç Jeokimyası

Adakitik andezitler içerisindeki anklavların temsili tüm-kayaç ana oksit, iz ve nadir toprak element analizleri Tablo 1'de listelenmiştir. Gerek saha gerekse petrografik incelemelerde yer yer alterasyonlar gözlemlendiğinden, ayrışma dereceleri CIA kimyasal ayrışma indekslerine göre test edilmiştir (Tablo 1). Anklavların CIA değerleri 44-47 arasında değişmekte olup taze sınıfa girmektedir. Buna karşılık ana kayalarda ise çok az oranda alterasyon görülmektedir.

Anklavların $Fe_2O_3^*$ ve MgO değerleri sırasıyla %6.91-11.31 ve %4.70-7.18, Mg numarası $[Mg\# = \text{molar MgO}/\text{molar (MgO+FeO}^*) \times 100]$ ise 53-59 arasında değişmektedir. Andezitik kompozisyona sahip ana kayalarda ise bu oran 42-60 arasındadır. Bu değerler

anklavların ana kayaca nispeten daha bazik bir bileşime sahip olduğunu ve her iki magmanın etkileşim gösterdiğini desteklemektedir.

Gerek toplam alkali-silis (TAS) diyagramı ve gerekse ayrışma süreçlerinde daha duraylı olan Zr, Nb, Y ve Ti gibi elementlerin dikkate alınarak yapıldığı sınıflamalar anklavların bazaltik andezit bileşimde olduğunu ve sub-alkalin bir magmadan itibaren türediğini göstermektedir (Şekil 5a-b). Diğer yandan ana kayaların ise andezitik kompozisyonda olduğu ve kısmen de olsa alterasyondan etkilendikleri görülmektedir. Bu durum aynı zamanda anklavların taze olduğu ve ayrışmadan pek etkilenmedikleri görüşünü desteklemektedir. K_2O ve SiO_2 içeriklerine göre genel olarak orta-yüksek K'lu kalkalkalin potasik bileşime sahip iken, K_2O ve Na_2O değerleri çoğunlukla sodik kısmen ise potasik bir afiniteye göstermektedir (Şekil 5c-d). Buna karşılık andezitik kompozisyona sahip ana kayaların orta-yüksek K'lu potasik afiniteye sahip bir magmadan itibaren türemiş olabileceğine işaret etmektedir (Şekil 5c-d).

SiO_2 'ye karşı ana element değişim diyagramlarında, gerek anklav gerekse ana kayalar nispeten düzenli dağılım göstermekle birlikte, K_2O 'da pozitif, diğer elementlerde (Al_2O_3 , MgO, CaO, TiO_2 , P_2O_5 ve $Fe_2O_3^*$) ise negatif bir ilişki gözlenmektedir (Şekil 6). Na_2O ise zayıf negatif bir dağılım sergilemektedir. İz element değişim diyagramlarında ise Sr, Y ve Ce negatif, Ni düzensiz ve zayıf negatif, Rb, Ba ve Zr ise düzensiz zayıf pozitif dağılım göstermektedir (Şekil 6). Bununla birlikte, ana ve iz elementlerin SiO_2 'ye göre değişimi, ana kayaç ve anklavların iki farklı üyeyi temsil ettiğini ve Na_2O , Rb, Ni, Sr, Zr, Ce gibi elementlerde etkileşim gösterdiğini işaret etmektedir.

Tablo 1. Mikrogranüler anklavların ana (%), iz (ppm) ve nadir toprak element (ppm) içerikleri.

Table 1. Representative major oxide (wt%), trace (ppm) and rare earth (ppm) element composition of the enclaves.

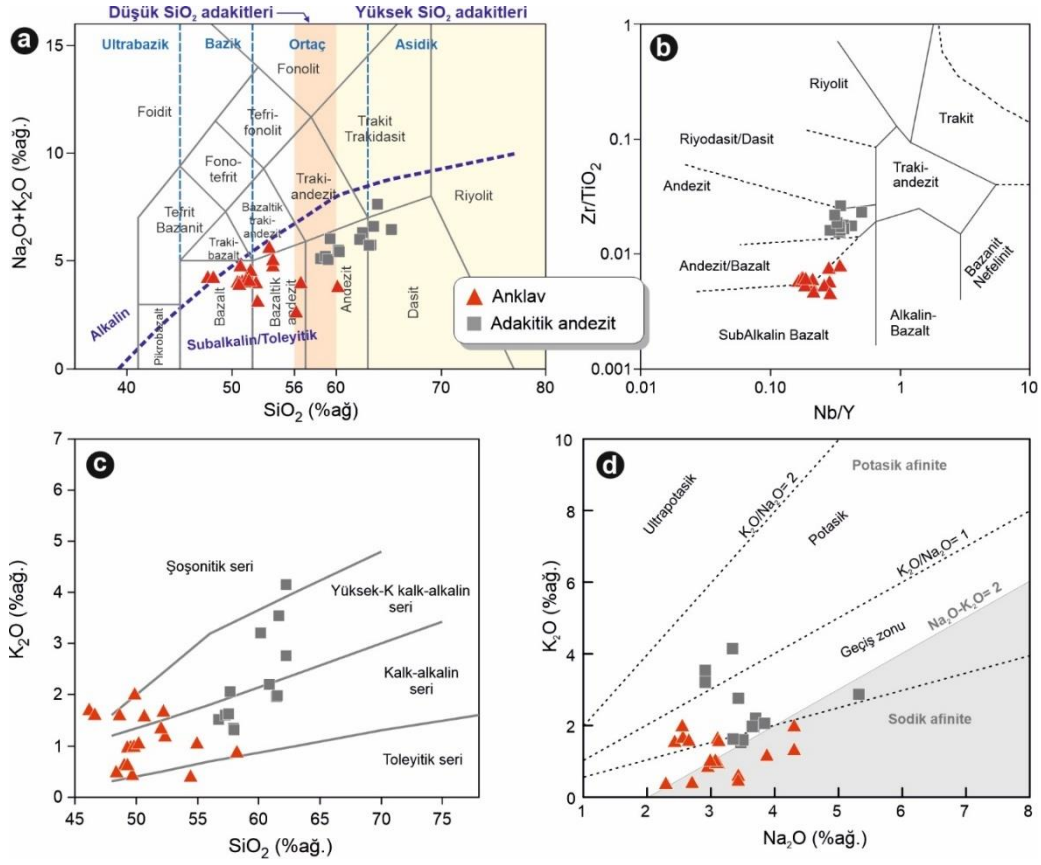
Örnek No	ANK01	ANK02	ANK03	ANK04	ANK05	ANK06	ANK07	ANK08	ANK09	ANK10
SiO ₂	49.57	50.67	46.15	58.21	49.88	54.46	52.23	49.32	49.83	49.68
TiO ₂	0.72	0.73	0.81	0.56	0.74	0.63	0.65	0.74	0.76	0.69
Al ₂ O ₃	18.06	17.32	18.58	16.05	17.59	15.63	18.97	18.26	18.24	15.84
Fe ₂ O ₃ *	9.55	9.96	11.31	6.91	9.97	8.97	7.47	9.93	10.22	9.80
MgO	6.38	6.08	7.12	4.70	5.71	6.16	5.14	6.58	6.88	7.18
CaO	8.92	8.20	8.59	6.75	7.95	8.51	7.83	8.75	8.34	8.42
Na ₂ O	3.12	2.44	2.56	2.96	2.55	2.30	3.11	3.12	3.09	2.71
K ₂ O	0.98	1.58	1.70	0.88	2.01	0.40	1.67	0.97	0.99	0.43
P ₂ O ₅	0.21	0.25	0.25	0.16	0.25	0.24	0.17	0.21	0.21	0.25
MnO	0.18	0.16	0.17	0.11	0.15	0.16	0.13	0.18	0.19	0.20
A.K.	1.67	2.71	1.96	2.18	2.95	2.19	1.92	1.33	1.60	4.57
Toplam	99.35	100.08	99.20	99.47	99.74	99.65	99.26	99.39	100.33	99.76
Li	10.2	11.0	16.9	16.4	9.8	14.2	12.3	10.3	12.6	8.7
Be	1.2	1.3	1.0	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Sc	32.1	29.7	31.6	22.5	28.0	32.6	26.1	31.7	34.0	37.9
V	274.9	280.3	327.0	192.7	284.5	253.9	214.1	277.4	288.7	280.5
Co	29.2	28.3	34.9	22.4	27.9	26.2	24.4	29.5	29.7	31.0
Ni	21.6	13.2	14.0	10.1	10.6	18.8	11.9	21.1	18.8	17.9
Cu	33.0	28.8	148.0	54.1	27.4	32.9	42.3	25.1	20.8	33.6
Zn	82.5	79.1	93.4	66.3	81.0	68.7	74.9	84.0	86.0	77.1
Ga	18.9	18.5	20.0	16.7	18.6	15.6	20.4	19.4	19.9	17.4
Rb	32.9	51.2	48.7	24.1	66.3	5.6	42.7	33.3	34.2	7.3
Sr	828.8	898.4	937.3	871.6	971.2	877.0	764.9	817.3	770.4	480.7
Y	17.3	21.7	17.9	14.7	21.0	19.4	14.3	18.0	17.2	18.2
Zr	65.4	71.2	76.2	72.7	75.4	59.5	89.1	65.7	65.7	65.2
Nb	3.3	3.4	3.2	3.9	3.4	2.9	4.6	3.2	3.3	3.0
Sn	0.8	0.9	1.1	0.8	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Cs	0.9	1.3	2.3	0.6	1.7	0.4	1.4	0.9	1.0	1.2
Ba	394.3	774.6	666.7	506.4	1058.4	212.2	715.7	339.0	302.0	196.0
La	23.0	19.4	16.3	19.2	17.1	23.1	17.7	22.0	20.7	24.3
Ce	42.4	40.9	35.4	34.8	39.6	43.3	34.2	42.0	41.6	47.8
Pr	5.1	5.3	4.6	4.1	5.2	5.2	4.1	5.0	5.2	5.8
Nd	19.7	21.3	20.1	14.9	21.7	21.0	14.6	19.4	19.5	22.6
Sm	4.2	4.8	4.7	3.3	4.8	4.5	3.3	4.1	4.1	4.9
Eu	1.2	1.4	1.4	1.0	1.5	1.2	1.1	1.2	1.2	1.3
Gd	3.5	4.4	4.2	3.0	4.3	3.8	3.0	3.6	3.6	4.1
Tb	0.5	0.6	0.6	0.4	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6
Dy	3.1	3.6	3.4	2.5	3.7	3.3	2.6	3.1	3.1	3.3
Ho	0.6	0.7	0.7	0.5	0.7	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6
Er	1.8	2.0	1.8	1.5	2.0	1.9	1.5	1.8	1.8	1.8
Tm	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3
Yb	1.8	1.9	1.6	1.4	1.8	1.8	1.5	1.8	1.8	1.8
Lu	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3
Hf	1.9	2.1	2.2	2.1	2.2	1.7	2.5	1.9	2.0	1.9
Ta	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2
Pb	10.5	8.7	16.8	13.4	7.2	11.1	12.8	10.0	9.2	10.6
Th	5.3	5.8	6.2	6.6	6.0	5.2	7.9	5.3	5.6	5.2
U	1.0	1.0	0.7	1.9	1.1	1.0	1.3	0.9	1.0	1.1
Mg#	56.9	54.7	55.5	57.4	53.1	57.6	57.7	56.8	57.1	59.2
Eu/Eu*	0.93	0.91	0.98	0.99	0.99	0.87	1.06	0.95	0.95	0.90
La _N /Yb _N	8.83	6.78	6.80	8.94	6.22	8.53	7.69	8.15	7.94	9.21
CIA	44.6	45.6	46.2	47.0	45.8	44.3	47.3	45.3	46.1	43.9

Fe₂O₃*: Fe₂O₃ cinsinden toplam demir. A.K. (Ateşte Kayıp): Toplam uçucu içeriği. Mg# = molar MgO / molar (MgO+FeO*)x100. Eu/Eu* = Eu_N / √(Sm_NxGd_N), N= Kondrit değerleri (Boynton, 1984). CIA (Chemical Index of Alteration/Kimyasal Ayrışma İndeksi)= molar[(Al₂O₃)/(Al₂O₃+CaO+NaO+K₂O)]x100.

Tablo 1'in devamı
Table 1. continued.

Örnek	ANK11	ANK12	ANK13	ANK14	ANK15	ANK16	Z21a	Z22a	Z23a
SiO ₂	50.19	46.62	52.35	54.96	52.04	48.66	49.05	49.30	48.40
TiO ₂	0.73	0.78	0.69	0.64	0.84	0.76	0.70	0.70	0.72
Al ₂ O ₃	18.06	18.39	16.79	15.95	16.23	16.50	18.65	18.51	18.54
Fe ₂ O ₃ *	9.92	11.00	9.54	8.76	9.97	10.45	9.13	9.15	9.36
MgO	6.45	7.14	6.13	5.30	7.04	6.87	6.12	5.89	6.53
CaO	8.60	8.53	6.66	7.46	5.47	7.97	7.99	7.99	8.19
Na ₂ O	3.07	2.66	3.88	2.99	4.31	3.13	3.44	3.43	3.43
K ₂ O	1.05	1.61	1.19	1.05	1.35	1.60	0.63	0.63	0.49
P ₂ O ₅	0.21	0.25	0.23	0.26	0.19	0.23	0.17	0.17	0.18
MnO	0.19	0.16	0.15	0.16	0.24	0.15	0.17	0.17	0.18
A.K.	1.27	2.31	2.47	2.43	2.30	3.59	3.60	3.80	3.70
Toplam	99.74	99.44	100.09	99.94	99.97	99.90	99.72	99.73	99.72
Li	10.2	17.8	8.6	8.2	11.8	8.9			
Be	1.2	0.9	1.3	1.3	1.1	1.1	2.0	2.0	2.0
Sc	31.9	29.8	26.6	33.1	34.1	29.2	26.0	26.0	27.0
V	285.1	310.5	247.8	255.8	284.8	295.3	254.0	258.0	265.0
Co	30.0	34.1	33.3	25.7	32.3	40.7	26.5	25.9	26.2
Ni	21.9	12.5	18.3	14.3	17.9	14.7	5.8	6.3	6.6
Cu	26.8	87.7	72.9	20.3	34.7	49.9	63.5	60.3	56.4
Zn	85.6	90.2	90.5	68.7	87.7	106.4	53.0	57.0	57.0
Ga	20.1	19.6	18.8	17.6	17.9	19.0	17.8	17.4	18.6
Rb	35.9	40.1	29.4	39.5	32.3	34.2	13.7	13.5	9.4
Sr	819.2	934.1	589.0	895.7	583.1	656.6	772.1	761.2	739.7
Y	17.6	17.7	17.6	18.1	19.3	17.7	14.9	15.6	15.6
Zr	64.8	75.7	58.3	64.8	60.1	75.7	65.0	59.3	49.5
Nb	3.2	3.5	3.1	3.0	3.9	3.1	4.0	3.8	4.2
Sn	0.8	1.0	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9
Cs	0.9	1.9	1.0	1.4	1.3	0.9	1.0	1.1	0.9
Ba	396.4	743.7	425.9	257.1	479.4	590.0	207.0	204.0	194.0
La	22.2	17.8	19.8	20.1	14.5	20.6	16.0	16.4	16.3
Ce	42.6	36.9	37.2	44.0	34.1	40.9	35.5	34.0	33.3
Pr	5.2	4.6	4.7	5.6	4.6	5.2	4.4	4.4	4.4
Nd	19.1	19.2	18.1	21.2	18.4	21.4	18.6	17.4	17.7
Sm	4.0	4.4	4.0	4.6	4.2	4.8	3.6	3.4	3.8
Eu	1.2	1.4	1.2	1.3	1.3	1.4	1.1	1.0	1.1
Gd	3.6	4.2	3.7	3.9	3.8	4.3	3.3	3.2	3.5
Tb	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5
Dy	3.1	3.4	3.1	3.1	3.4	3.3	2.9	2.7	2.8
Ho	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6
Er	1.8	1.8	1.7	1.7	1.9	1.7	1.7	1.6	1.7
Tm	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3
Yb	1.8	1.6	1.8	1.7	1.9	1.6	1.7	1.8	1.8
Lu	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3
Hf	1.9	2.2	1.9	1.9	1.9	2.1	1.9	1.8	1.7
Ta	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2
Pb	10.4	20.2	11.5	5.8	6.9	11.4	8.5	8.6	8.7
Th	5.1	6.0	4.9	5.8	3.8	6.1	3.3	3.1	3.2
U	0.8	0.7	0.6	1.2	0.3	1.2	1.1	1.1	1.1
Mg#	56.3	56.2	56.0	54.5	58.3	56.6	57.0	56.0	58.0
Eu/Eu*	0.97	0.99	0.97	0.92	0.98	0.94	0.98	0.96	0.93
LaN/YbN	8.55	7.46	7.64	7.96	5.11	8.83	6.38	6.14	6.04
CIA	45.3	46.0	45.9	44.8	46.7	43.6	47.2	47.0	46.8

Fe₂O₃*: Fe₂O₃ cinsinden toplam demir. A.K. (Ateşte Kayıp): Toplam uçucu içeriği. Mg# = molar MgO / molar (MgO+FeO*)x100. Eu/Eu* = Eu_N / √(Sm_NxGd_N), N= Kondrit değerleri (Boynton, 1984). CIA (Chemical Index of Alteration/Kimyasal Ayrışma İndeksi)= molar[(Al₂O₃)/(Al₂O₃+CaO+NaO+K₂O)]x100.

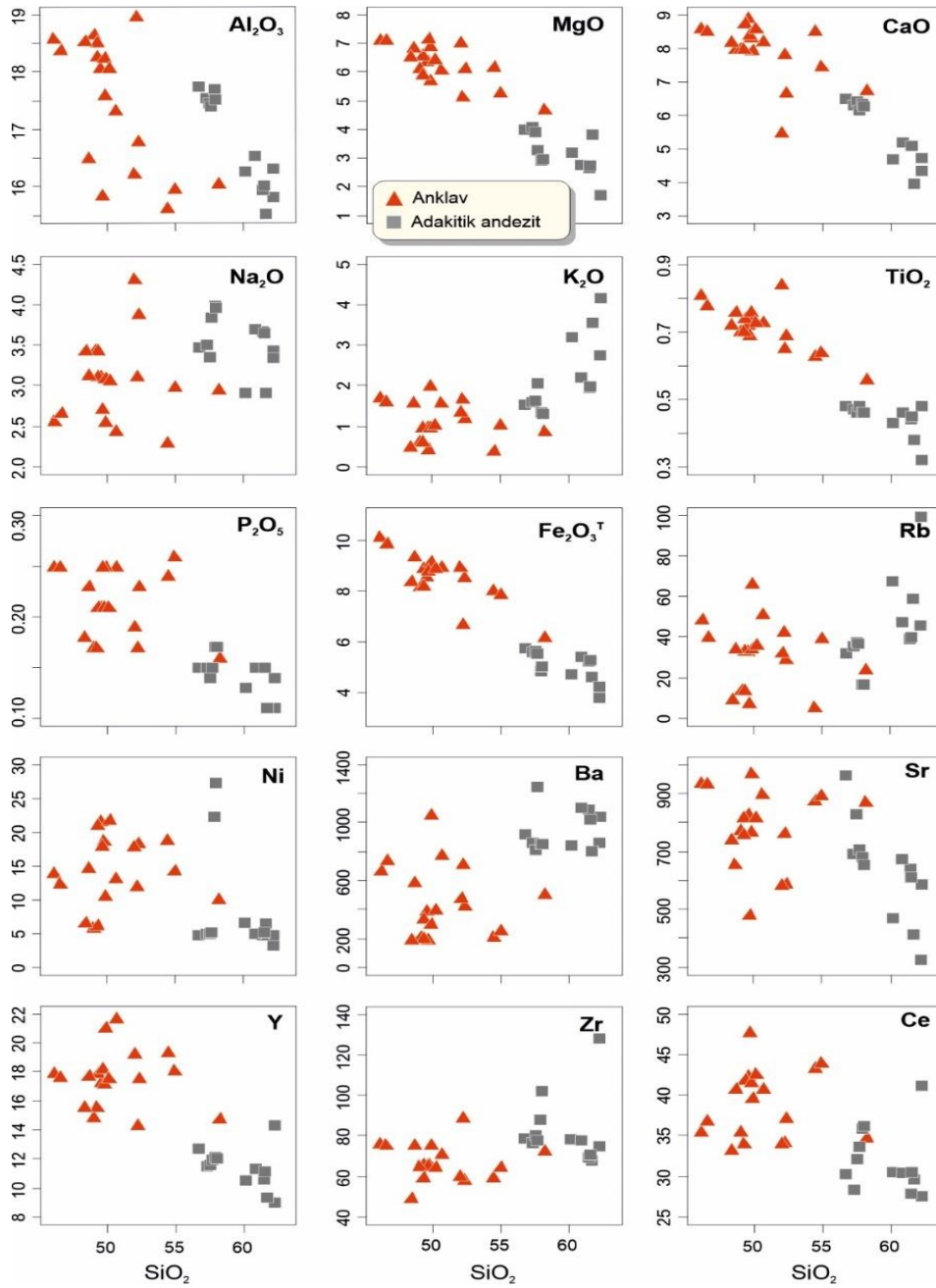


Şekil 5. (a) Toplam alkali-silika (TAS) diyagramı (Le Bas vd., 1986). Alkalın-subalkalin ayırım eğrisi Irvine ve Baragar (1971)'e göre. **(b)** Zr/TiO_2 - Nb/Y diyagramı (Winchester ve Floyd, 1977). **(c)** K_2O - SiO_2 (Peccerillo ve Taylor, 1976) ve **(d)** K_2O - Na_2O (LeMaitre, 2002) diyagramları. Ana kayaların (adakitik andezitlerin) verileri Gücer (2021)'den alınmıştır

Figure 5. (a) Total alkali-silica (TAS) diagram (Le Bas et al., 1986). The line between alkaline and subalkaline series is according to Irvine and Baragar (1971). **(b)** Zr/TiO_2 vs Nb/Y diagram of Winchester and Floyd (1977). **(c)** K_2O vs SiO_2 diagram of Peccerillo and Taylor, 1976 and **(d)** K_2O vs Na_2O diagram of (LeMaitre, 2002). Data for the host rocks (adakitic andesites) are taken from Gücer (2021).

İlksel mantoya normalize edilmiş diyagrama göre (Şekil 7a), Cs, Rb, Ba, Th, K ve Sr gibi büyük iyon yarıçaplı litofil elementleri (LILE'ler), yüksek çekim alanlı elementlere (HFSE'ler) oranla önemli ölçüde zenginleşmiştir. Rb, Nb, P, Zr ve Ti genellikle negatif, Pb ise güçlü pozitif

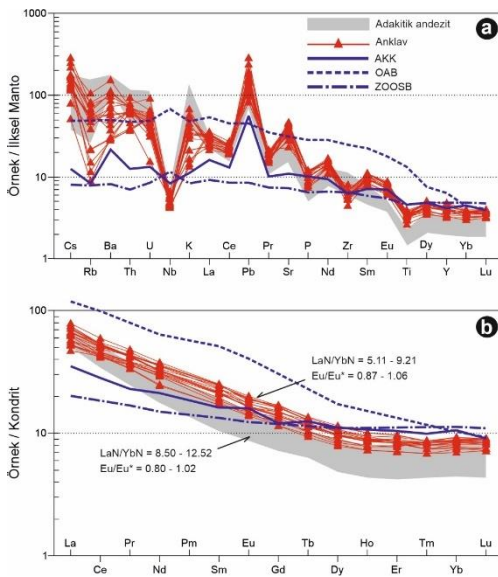
anomali sergilemektedir. İz element modellerinin, andezitik ana kayaç ile oldukça uyumlu bir dağılım sergilediği gözlenmiş olup iki farklı magmanın karışımı esnasında etkileşim süreçleri geçirmiş olabileceğini desteklemektedir.



Şekil 6. Anklav ve andezitik ana kayaçların (Gücer, 2021) SiO_2 (%)'e karşı ana oksit (%) ve iz element (ppm) değişim (Harker) diyagramları.

Figure 6. Major oxide (%) and trace element (ppm) variation (Harker) diagrams versus SiO_2 (%) of enclaves and andesitic host rocks (Gücer, 2021).

Benzer şekilde, kondrite normalize edilmiş nadir toprak element (REE) desenlerinde (Şekil 7b), gerek anklav gerekse andezitik ana kayalar uyumlu olarak dağılmakta olup hafif nadir toprak elementler (LREE'ler) hafif sağa eğimli, ağır nadir toprak elementler (HREE'ler) ise düz desenler sergilemektedir (anklav $La_N/Yb_N = 5.11-9.21$; ana kayaç $La_N/Yb_N = 8.50-12.52$).



Şekil 7. Anklav ve ana kayaların (Gücer, 2021) **(a)** ilksel mantoya (Sun ve McDonough, 1989) ve **(b)** Kondrite (Boynton, 1984) göre normalleştirilmiş iz element dağılım diyagramları. AKK: Alt kıtasal kabuk (Taylor ve McLennan, 1995), OAB: Okyanus adası bazaltı (Sun ve McDonough, 1989), ZOOSB: Zenginleştirilmiş okyanus ortası sırtı bazaltı (Sun ve McDonough, 1989).

Figure 7. Spider diagrams of the enclaves and andesitic host rocks (Gücer, 2021) **(a)** Primitive Mantle (Sun and McDonough, 1989) and **(b)** Chondrite (Boynton, 1984). Lower continental crust: Taylor and McLennan (1995), Oceanic island basalt: Sun and McDonough (1989), Enriched mid-ocean ridge basalt: Sun and McDonough, 1989.

Buna ilaveten, anklav örneklerinin REE değerleri ana kayaca oranla nispeten daha fazla zenginleşmiştir. Bununla birlikte, hem anklav hem de ana kayalar tipik olarak Eu anomalileri göstermemeleri (anklav $Eu/Eu^* = 0.87-1.06$; ana kayaç $Eu/Eu^* = 0.80-1.02$; Şekil 7b) ile karakterize edilmekte olup bu durum örneklerin gelişiminde plajiyoklas ayırılmasının etkili olmadığını işaret etmektedir.

TARTIŞMA

Yapılan çalışmalar volkanik kayaların farklı tektonik ortamlarda ve farklı kaynaklardan itibaren türeyebileceğini göstermektedir. Bunların ayırt edilebilmesi ise kayaların petrokimyasal ve petrolojik özelliklerinin ortaya konması ile mümkün olabilmektedir. Bu nedenle gerek ana kayalar gerekse içerisine aldıkları anklavların oluşum ortamları, kaynak alanları ve gelişim süreçleri bu açıdan irdelenmiştir.

Anklavların Kökeni

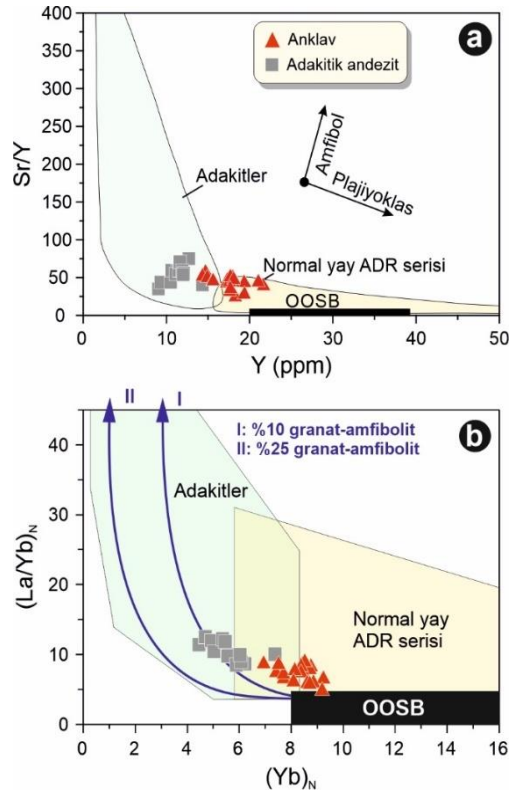
Anklavların, magmatik ve magmatik olmayan kökenleri hakkında, ilk tanımından günümüze uzanan bir tartışma süregelmektedir. Çalışma kapsamında incelenen anklavların magmatik dokular sergilemesi (bkz. Şekil 4) magmatik kökene sahip olduklarının bir göstergesidir. Ayrıca, anklavların tipik kontakt metamorfizma ve/veya kalıntı tortul (sedimenter fabrik) dokusu göstermemeleri bunların ksenolit veya restit olma olasılığını ortadan kaldırmaktadır (Maas vd., 1997; White vd., 1999). Çünkü, restit (mikamsı) anklavlar tipik metamorfik dokuları, mika ve Al bakımından zengin granat ve sillimanit gibi mineralleri ile tanımlanmakta ve baskın olarak S tipi granitoidler içerisinde yer almaktadır (Kaygusuz ve Güloğlu, 2022). Bununla birlikte, incelenen anklavların kümülat dokusu göstermemeleri bunların kümülat anklav (otolit) olamayacağını da işaret etmektedir (Barbarin, 2005). Petrografik

gözlemler ve jeokimyasal özellikler (ana ve iz elementler arasındaki güçlü korelasyonlar), magma odasında felsik ve mafik magmaların karışması esnasında etkileşim (interaction) süreçlerini dolayısıyla magma karışımının (magma mixing/mingling) bir göstergesidir. Dolayısıyla, incelenen anklavlar, magma odasındaki ana kayacın mafik ebeveyn magmasının karışım süreçleri sırasında küçük kütlelerin ürünlerini temsil edebilir.

Kaynak Kayaç Karakteristikleri

Andezitik kompozisyona sahip ana kayalar orta ila yüksek K'lu kalk-alkalin bir magmatizma ile karakterize edilirken, anklavlar nispeten düşük K'lu kalk-alkalin magmatik özellik göstermektedir (bkz. Şekil 5). Dolayısıyla, andezitik ana kayalar potasik benzeri bir bileşime sahip iken, anklavlar potasik-sodik geçişli bir bileşim sergilemektedir. İlkel manto ve kondrite normalize edilmiş modellerde (bkz. Şekil 7), önemli Eu anomalileri göstermeksizin, büyük iyon yarıçaplı litofil elementler (LILE'ler) ve hafif nadir toprak elementler (LREE'ler) bakımından önemli zenginleşmeler görülmektedir. Tüm bu işaretler yitim bölgesi ortamında oluşan kayalarla tutarlılık göstermektedir (Pearce ve Peate, 1995). Bununla birlikte, gerek ana kayalar gerekse anklavlar normal yay andezitleri ve dasitlerinden biraz daha negatif Nb ve Ti anomalileri, daha yüksek Sr/Y (26.36-59.10) ve La_N/Yb_N (5.11-9.21) oranları, daha düşük Y ve Yb_N içerikleri sergilemektedir (Şekil 8).

Tüm bu jeokimyasal izler anklavların, mantodan türemiş ve fraksiyonlaşmış kayalardan ziyade, yiten okyanus levhasından veya alt kıtasal kabuktan gelen bazaltların kısmi erimesiyle, andezitik ana kayaların ise aynı ortamdan fraksiyonlaşmış adakitik kayalarınkilerle tutarlı olduğunu göstermektedir (Defant ve Drummond, 1990;



Şekil 8. Adakit ve normal yay ADR (andezit, dasit ve sodik riyolit) serisi ayırtman diyagramı. **(a)** Sr/Y - Y ve **(b)** $(La/Yb)_N$ - $(Yb)_N$ diyagramları (Defant ve Drummond, 1990). Adakit, normal yay ADR serisi ve OOSB alanları Martin (1999), kondrit değerleri Taylor ve McLennan (1985) ve ana kayaların (adakitik andezitlerin) verileri Gücer (2021)'den alınmıştır. Her bir kısmi ergime eğrisi farklı bir OOSB kaynak alanını temsil etmektedir.

Figure 8. Adakite and normal arc ADRs (andesites, dacites, and sodic rhyolites) discrimination diagrams. **(a)** Sr/Y vs Y and **(b)** $(La/Yb)_N$ vs $(Yb)_N$ diagrams (Defant and Drummond, 1990). Fields of adakites, normal arc ADR series and MORB are from Martin (1999). Chondrite values are from Taylor and McLennan (1985). Each partial melting curves refer to a different MORB source. Data for the host rocks (adakitic andesites) are taken from Gücer (2021).

Stern ve Kilian, 1996; Martin vd., 2005; Castillo, 2006).

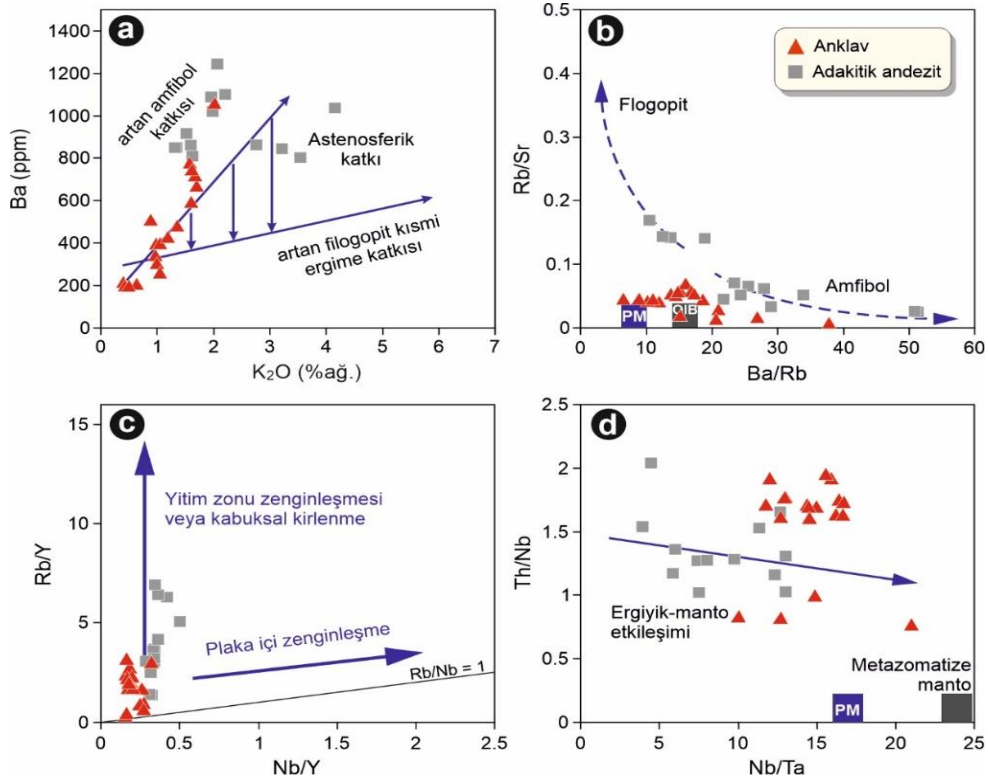
Ana kayacın ve anklavların LILE bakımından zenginleşmiş, HFSE ve TiO₂ içerikleri bakımından ise tüketilmiş olmaları, ayrıca litosferik mantodaki yitim zonu metazomatizmasıyla da ilişkilidir. Yitim sırasında yiten plakanın yüksek çekim alanlı elementleri tutması, bu metazomatizmayla açıklanırken, LILE ve LREE yiten plaka boyunca manto kamasını zenginleştiren akışkan ve ergiyikler vasıtasıyla yukarı yönde hareket eder (Münker vd., 2004) veya yiten sedimanlar yardımıyla manto kaynak alanına geçerler (Conticelli ve Peccerillo, 1992; Hawkesworth vd., 1993). Bu nedenle andezitlerin LILE ve LREE içeriklerinde gözlenen bu zenginleşme, kaynak alanda yitim zenginleşmesinin bir sonucu olarak yorumlanabilir (Pearce ve Peate, 1995).

Anklavların Ba içerikleri tek örnek (ANK05: 1058 ppm) dışında 194-775 ppm arasında iken, adakitik ana kayaçlar anklavlara kıyasla yüksek Ba içerikleri (802-1244 ppm; Gücer, 2021) sergilemektedir. Bu durum felsik ve mafik karakterli farklı magma kökenlerini işaret etmekle birlikte, gerek anklav gerekse ana kayaçların kaynak alanında flogopit yerine amfibol katkısını da göstermektedir (Şekil 9a). Anklavların düşük Rb ve Ba içerikleri ve ilksel mantodan okyanus adası bazaltı bileşimine doğru dağılım sergilemesi, bu kayaçların ilksel mantodan itibaren farklılaşarak geliştiğini göstermekte iken, adakitik ana kayaçlardaki Rb elementinin tüketilmesi, yiten levha kaynağında amfibolün varlığını ve manto kamasının yükselen adakit magma ile çok az etkileşime girdiğini göstermektedir (Rogers vd., 1985; Calmus vd., 2003; Şekil 9b). Anklav'lar genel olarak düşük Ba/Rb (6.50–37.83) ve Rb/Sr (0.01-0.07) oranları ile karakterize iken,

andezitik ana kayaçlar yüksek Ba/Rb (10.46–51.33) ve düşük Rb/Sr (0.02–0.17) oranlarıyla (Gücer, 2021) karakterize edilir. Bu durum anklavların ilksel mantodan itibaren gelişen, andezitik ana kayaçların ise kaynaktaki amfibol içeren özelliği ile uyumludur (Şekil 9b). Sonuç olarak, amfibol ile ergiyik dengesinde Rb/Sr oranının düşük (<0.1), Ba/Rb oranını ise yüksek (>20) olması beklenirken, flogopit ile ergiyik dengesi yüksek Rb/Sr (>0.1) ve düşük Ba/Rb (<20) oranları ile karakterize edilmektedir (Furman ve Graham, 1999). İncelenen örneklerin eriyiğinin oluşumu sırasında, Şekil 9'da görüldüğü üzere, manto kaynağının büyük iyon yarıçaplı litofil element (LILE) içerikleri ağırlıklı olarak flogopitten ziyade amfibol tarafından kontrol edilmiştir.

Levha ergiyikleri tarafından metasomatize edilen manto kaması türevli magmaların Nb içerikleri genellikle 7 ppm'den yüksektir (Defant vd., 1992; Maury vd., 1996; Martin vd., 2005). Nb içerikleri gerek anklavlarda (2.9-4.6 ppm) gerekse andezitik ana kayaçlarda (3.4-4.9 ppm; Gücer, 2021) manto türevli magmalara göre daha düşüktür. Bu değerler, incelenen örneklerin okyanusal levhanın bazik kayaçlarına benzeyen, manto kamasından daha düşük Nb içeriğine sahip bir kaynaktan türetilmiş olabileceğini ortaya koymaktadır (Şekil 9c). Diğer yandan, Th/Nb'nin artan Nb/Ta ile negatif ilişkisi (Şekil 9d), yitim bileşenleri tarafından farklı derecelerde modifiye edilmiş metasomatize bir manto kamasının etkileşimiyle uyumludur (Dokuz vd., 2013).

Bu, litosferik mantonun levha türevli akışkanlardan daha yüksek Nb içeriğine sahip olması nedeniyle ergiyik-manto etkileşimini işaret etmekte olup örneklerin negatif bir korelasyon göstermesine sebebiyet vermektedir (Dokuz vd., 2013).



Şekil 9. (a) Ba (ppm) - K_2O (%ağ.) ve (b) Rb/Sr - Ba/Rb diyagramları. (c) Rb/Y - Nb/Y (vektör yönleri yitim zonu bileşenlerinin katkısını gösterir) ve (d) Th/Nb - Nb/Ta diyagramları. OIB: Okyanus adası bazaltı, PM: İlksel manto. Ana kayaların (adakitik andezitlerin) verileri Gücer (2021)'den alınmıştır.

Figure 9. (a) Ba (ppm) vs K_2O (wt%) and (b) Rb/Sr vs Ba/Rb diagrams. (c) Rb/Y vs Nb/Y and (d) Th/Nb vs Nb/Ta diagrams. OIB: Oceanic-island basalt, PM: Primitive mantle. Data for the host rocks (adakitik andesites) are taken from Gücer (2021).

Magma Karışımı

Magma karışımı olayı, birbirinden farklı mafik ve felsik bileşimdeki magmaların fiziksel ve kimyasal olarak karışımı şeklinde ifade edilmektedir. Eş yaşlı mafik ve felsik magmaların, kendi fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruyarak heterojen bir şekilde karışmalarına magma mingling; aksi durumda fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruyamayarak homojen bir şekilde karışmalarına ise magma mixing olarak tanımlanmaktadır. Magmaların viskozitesi, karışımının homojen veya heterojen olarak gelişmesindeki en önemli

faktörü oluşturmaktadır (Didier ve Barbarin, 1991).

Çalışma konusu anklavların andezitik ana kayalarının magmalarında homojen karışımının etkin olduğu görülmektedir (Gücer vd., 2017). Eş yaşlı mafik ve felsik magmalar arasında meydana gelen mekanik etkileşimin derinliğinin, bazı magma karışımı oluşuklarının görülebilmesi açısından önemli olduğu bilinmektedir (Barbarin ve Didier, 1992). Anklavları barındıran andezitik ana kayaların kalsik amfibol jeotermobarometri denklemleri kullanılarak yapılan hesaplamalarında 790 ± 20

°C sıcaklık ve 2.5-4 kbar P ($f_{O_2} / \Delta NNO = 14.4$ ile -11.1) basınç koşullarında ve kıtasal kabukta 9-15 km derinliklerde kristallendiği bilinmektedir (Gücer vd., 2017). Bu değerler karışmış andezitik ana magmanın orta derinlikte kıtasal kabukta yerleşmiş olduğunu vurgulamaktadır. Homojen karışım birbirleriyle dengede olmayan mineral toplulukları, minerallerde gözlenen karmaşık zonlanma gibi özel dokusal özelliklerle ifade edilmektedir. Andezitik ana kayalar için ana magmada magma karışımını işaret en önemli veriler, ana kayalar içerisinde gözlenen dengesizlik dokuları olup bunlar; elek dokulu, zonlu ve salınımlı zonlanma gibi dengesizlik dokuları gösteren plajiyoklaslar, iri plajiyoklas mineralleri üzerinde daha küçük plajiyoklas latalarının bulunması, bıçağımsı hornblendler, plajiyoklas, ortoklas ve mafik mineraller üzerinde daha küçük minerallerin oluşturmuş oldukları poiklitik dokulardır (Gücer vd., 2017; Gücer, 2021).

Heterojen magma karışımı olarak söz edilen magma mingling süreçleri, çalışma alanında ana kayaların içerisindeki anklavların varlığı ile temsil edilmektedir. Gerek dokusal gerekse mineralojik açıdan anklav ve ana kayacın dokusal özellikleri birbirinden farklılık göstermektedir (bkz. Şekil 3-4). Anklavlar ana kayaya kıyasla daha ince taneli görünüm sunmakta ve başlıca plajiyoklas, hornblend, opak mineral ve az oranda ortoklas ve klinopiroksen minerallerinden meydana gelmektedir. Hamur büyük oranda kristallerden oluşmakta ve daha az miktarda volkan camı içermektedir. Dolayısıyla çalışma konusu kayalarda gözlenen anklav ve karışım dokularının izleri gerek petrografik gerekse jeokimyasal olarak izlenebilmektedir.

Fraksiyonel Kristallenme ve Asimilasyon Süreçleri

Fraksiyonel kristallenme süreçleri ana ve iz elementlerin çeşitli korelasyonları ile ortaya konabilmekte olup SiO_2 özellikle ortaç ve felsik kayalarda en geniş değişime sahip olduğu için yaygın olarak kullanılan ana oksittir. SiO_2 'ye karşı ana ve iz element dağılımları, anklavların ve ana kayalarının magmalarının karışması esnasındaki etkileşim süreçlerini işaret etmektedir. Bununla birlikte, CaO , Al_2O_3 , $Fe_2O_3^*$ azalması önemli ölçüde plajiyoklas ve piroksen farklılaşmasının, Al_2O_3 azalması ise aynı zamanda hornblend ayrışmasının da etkili olabileceğinin bir göstergesidir (Cawthorn ve O'Hara, 1976). $Fe_2O_3^*$ ve TiO_2 azalmasının magnetit ayrışması, P_2O_5 'deki yönsemenin ise apatitin kristallenmesi ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Tüm bu değişimler hem anklav hem de andezitik ana kayaların gelişiminde fraksiyonel kristallenmenin etkili olduğunu ve plajiyoklas, piroksen, hornblend, magnetit ve apatit ayrışmasının büyük ölçüde rol oynadığını göstermektedir. Bununla birlikte, ilksel mantoya normalize edilmiş diyagramlarda gözlenen zenginleşmeler (bkz. Şekil 7) kaynak bölgesinde düşük dereceli bir kısmi ergime veya kaynağa yitim katkısı gibi kabuksal bileşenlerin etkisini de göstermektedir.

Rb, Nb, P, Zr ve Ti gibi elementler gözlenen negatif ve Pb elementinde gözlenen güçlü pozitif anomali adayları bazaltlarına olan benzerliği göstermektedir. Genellikle ana magmanın gelişiminde yitim bileşenlerinin etkili olduğunu işaret eden bu değişimler, yiten eklojit kabuğun üst kısımlarının kısmi ergimeye uğraması sırasında bu elementlerin rutil, sfen ve perovskit tarafından tutulmasına bağlı

olabilir. HREE'ler özellikle amfibol mineralinin bünyesine girdiğinden (Gill, 1981; Romick vd., 1992; Thirlwall vd., 1994) elementlerde gözlenen bu içbükey dağılım (bkz. Şekil 7) ise kayaçların gelişiminde hornblend fraksiyonlaşmasının (Fujimaki vd., 1984) önemini vurgulamaktadır. Mineralojik olarak gerek anklav gerekse ana kayaçlarda hornblend mineralinin bol miktarda gözlenmesi bu durumu destekler niteliktedir.

Anklav örnekleri düşük FeO*/MgO ve düşük SiO₂ (%ağ.) içeriklerine sahip iken, andezitik ana kayaçlar nispeten yüksek değerler göstermektedir (Şekil 10a). Anklavlar artan SiO₂ (%ağ.) yönüne doğru yataya yakın lineer bir dağılım sergilemekte olup manto ergiyiği/reaksiyonu yönünde yönsemeye sahiptir. Buna karşılık andezitik ana kayaçlar düşükten yüksek FeO*/MgO ve yüksek SiO₂ (%ağ.) fraksiyonel kristalleşme yönüne doğru bir eğilim göstermektedir (Şekil 10a). Benzer şekilde, V (ppm) değerlerine karşın TiO₂ (%ağ.) değerlerinde gözlenen pozitif eğilimi (Şekil 10b) amfibol fraksiyonlaşmasının magma gelişimi sırasında etkili olduğunu göstermektedir. Bu durum, kondrite normalize edilmiş nadir toprak element diyagramında (bkz. Şekil 7b) ağır nadir toprak element modellerinin tipik olarak düze yakın dağılması tarafından da desteklenmekte olup gerek anklav gerekse ana kayaçların oluşumu esnasında hornblend fraksiyonlaşmasının rolünü vurgulamaktadır (Gill, 1981). Bir başka dikkat çekici özellik de, hem anklav hem de ana kayaçların gelişiminde plajiyoklas fraksiyonlaşmasının baskın olmadığı veya önemsiz olduğunu ima eden önemli Eu anomalilerinin olmamasıdır.

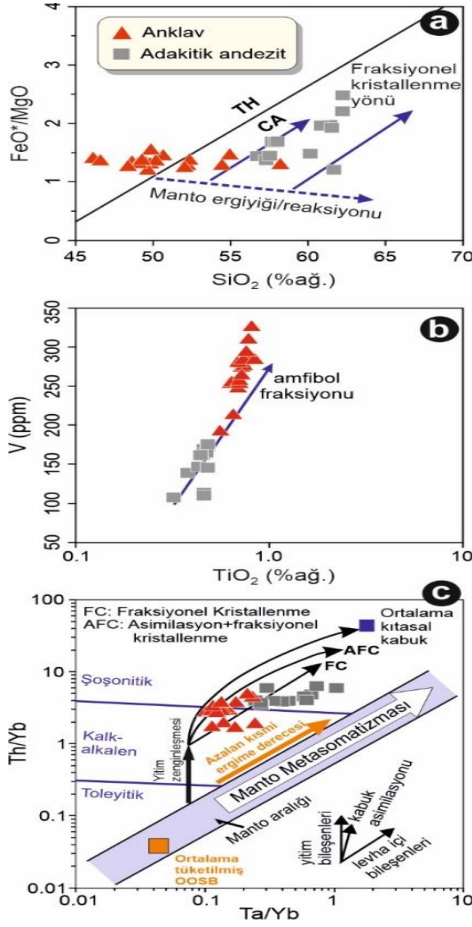
Örneklerde Th/Yb ve Ta/Yb oranları, kaynak alanı ve bu kayaçların gelişiminde kabuk kirlenmesinin etkisinin yorumlanmasına imkan sağlamaktadır (Pearce, 1983; Pearce vd., 1990). Gerek anklav gerekse andezitik ana kayaçlar yüksek Th/Yb oranlarına sahiptir.

Anklav örneklerinde yitim zenginleşmesinden fraksiyonel kristallenme-asimilasyon yönünde bir dağılım görülürken, ana kayaçlarda fraksiyonel kristallenme süreçleri daha baskın gözlenmektedir (Şekil 10c). Ayrıca, manto aralığına paralel veya yarı paralel değişimler fraksiyonel kristallenme ve asimilasyonla beraber gelişen fraksiyonel kristallenmeyi işaret etmektedir. Nitekim, tüm örneklerin manto çizgisinden sapması, örneklerin yitim etkisiyle zenginleşmiş mantodan türemiş veya yükselimi sırasında kabuk tarafından kirlenmiş magmalardan itibaren oluştuğunu işaret etmektedir. Gözlenen bu sapma kaynak bölgesinde yitimle ilgili bir metasomatizma ile açıklanabileceği gibi, manto türevli ergiyiklere önemli ölçüde kabuksal ergiyik katılımına da işaret edebilir.

SONUÇLAR

Altınpınar (Torul, Gümüşhane) yöresinde yüzeyleme veren Erken Eosen adakitik andezitler içerisindeki anklavların mineralojik, petrografik ve jeokimyasal verileri ışığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Anklavlar Erken Eosen yaşlı Altınpınar adakitik andezitleri içerisinde gözlenmekte olup oluşumu itibarıyla Gümüşhane ve çevresinde yayılım gösteren Erken Eosen adakitik bileşimli kayaçlar ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.
- Küreselden elipsoidale kadar farklı şekillerde ve birkaç cm ile 20 cm arasında değişen boyutlarda gözlenmekte, mineralojik olarak başlıca plajiyoklas, hornblend, opak mineral ve az oranda ortoklas, aksesuar oranda klinopiroksen ve kuvars minerallerinden meydana gelmektedir.
- Gerek petrografik gerekse jeokimyasal olarak bazaltik andezit bileşimde ve sub-alkalin bir magmadan itibaren türemiş, Ana ve iz element değişimleri hem anklav hem de



Şekil 10. (a) FeO*/MgO - SiO₂ (%ağ.) diyagramı. Toleyitik ve kalk-alkalin ayırım çizgisi Irvine ve Baragar (1971)'e göredir. FeO* = 0.899Fe₂O₃. TH: Toleyitik, CA: Kalk-alkalin. **(b)** V (ppm) - TiO₂ (%ağ.) diyagramı. **(c)** Th/Yb-Ta/Yb diyagramı (Pearce, 1983; Pearce vd., 1990). Ana kayaçların (adakitik andezitlerin) verileri Gücer (2021)'den alınmıştır.

Figure 10. (a) FeO*/MgO vs SiO₂ (wt%) diagram. The tholeiitic and calc-alkaline line is according to Irvine and Baragar (1971). FeO* = 0.899Fe₂O₃. TH: Tholeiitic, CA: Calc-alkaline. **(b)** V (ppm) vs TiO₂ (wt%) diagram. **(c)** Th/Yb vs Ta/Yb diagram (Pearce, 1983; Pearce et al., 1990). Data for the host rocks (adakitik andesites) are taken from Gücer (2021).

andezitik ana kayaçların gelişiminde fraksiyonel kristallenmenin etkili olduğunu ve plajiyoklas, piroksen, hornblend, magnetit ve apatit ayrımlaşmasının büyük ölçüde rol oynadığını göstermiştir.

- Anklav ile ana kayaçlarının benzer iz element davranışları farklı magmaların karışması esnasındaki etkileşim (interaction) süreçlerini işaret etmektedir. Nadir toprak element dağılımları ise gerek anklav gerekse ana kayaçlarda hornblend fraksiyonlaşmasının önemli rol oynadığını, belirgin Eu anomalisi göstermemeleri (anklav: Eu/Eu* = 0.87–1.06; ana kayaç: Eu/Eu* = 0.80–1.02) örneklerin gelişiminde plajiyoklas ayrımlaşmasının etkili olmadığını veya çok az etkili olduğunu işaret etmiştir.

- Yüksek Sr/Y (26.36-59.10) ve La_N/Yb_N (5.11-9.21) oranları ve daha düşük Y ve Yb_N içerikleri anklavların, mantodan türemiş ve fraksiyonlaşmış kayaçlarından ziyade, yitim okyanus levhasından veya alt kıtasal kabuktan gelen bazaltların kısmi erimesiyle, andezitik ana kayaçların ise aynı ortamdan fraksiyonlaşmış adakitik kayaçlarınkilerle tutarlı olduğunu göstermektedir.

- Kayaçların ana eriyiğinin oluşumu sırasında, manto kaynağının büyük iyon yarıçaplı litofil element (LILE) içerikleri ağırlıklı olarak flogopitten ziyade amfibol tarafından kontrol edilmiş olduğu belirlenmiştir. Tüm örneklerde Th/Nb'nin artan Nb/Ta ile negatif korelasyonu, yitim bileşenleri tarafından farklı derecelerde modifiye edilmiş metasomatize bir manto kamasının etkileşimiyle uyumludur.

- Yapılan çalışmalar andezitik ana kayaçların magmasının orta derinlikte kıtasal kabukta (9-15 km) yerleşmiş olduğunu göstermekte olup homojen ve heterojen magma karışımları gerek petrografik gerekse jeokimyasal olarak izlenebilmektedir.

- Ana ve iz element değişimleri anklavları içeren ana kayaların fraksiyonel kristallenme ile ayırdığı ve magma gelişimi sırasında hornblend fraksiyonlaşmasının önemli bir rol oynadığına desteklemektedir.
- Petrokimyasal veriler gerek anklavların gerekse ana kayacının ana magmasının, kuzey Neotetis Okyanusu'nun tamamen kapanmasından hemen sonra; genişlemeli tektonik rejimin başlangıç aşamalarında, amfibol-eklojit fasiyesi koşullarında okyanusal bazaltların kısmi erimesi ile üretildiğini göstermektedir.

KATKI BELİRTME

İkinci yazarın yüksek lisans tezinden üretilen bu çalışma Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (GÜBAP) Koordinatörlüğü tarafından maddi olarak desteklenmiştir (proje no: 22.F5114.02.01). Projeye verdiği destekten ötürü GÜBAP'a şükranlarımızı sunarız. Saha çalışmalarındaki yardımları için Kadir SÜNNETÇİ ve Hasan SİNİCAR'a teşekkür ederiz. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamalarındaki değerli katkı ve yorumlarından dolayı baş editör Prof. Dr. Elif VAROL MURATÇAY ve hakemler Prof. Dr. Orhan KARSLI ve Prof. Dr. Sabah YILMAZ ŞAHİN'e şükranlarımızı sunarız.

KAYNAKLAR

- Alpaslan, M., 2001. Volkanik kayalarda magma karışım dokuları ve mekanizmaları, D. Boztuğ ve N. Otlu (editörler), Magmatik Petrojenez, TÜBİTAK Lisansüstü Yaz Okulu, Akçakoca, s. 244-262.
- Arslan, M., Temizel, İ., Abdioğlu, E., Kolaylı, H., Yücel, C., Boztuğ, D., and Şen, C., 2013. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating, whole-rock and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of post-collisional Eocene volcanic rocks in the southern part of the Eastern Pontides (NE Turkey): implications for magma evolution in

extension-induced origin. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166, 113–142. DOI: 10.1007/s00410-013-0868-3

- Arslan, M., Temizel, İ., Ackerman, L., Yücel, C., and Abdioğlu Yazar, E., 2022. Highly siderophile element and Os isotope systematics of the Cenozoic volcanic rocks from the Eastern Pontides, NE Turkey: Constraints on the origin and evolution of subcontinental mantle-derived magmas. *Lithos*, 410–411, 106575. DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106575

- Aydıncakır, E., 2016. Subduction-related Late Cretaceous high-K volcanism in the Central Pontides orogenic belt: Constraints on geodynamic implications. *Geodinamica Acta*, 28 (4), 379-411. DOI: 10.1080/09853111.2016.1208526

- Aydıncakır, E., Yücel, C., Ruffet, G., Gücer, M.A., Akaryalı, E., and Kaygusuz, A., 2022. Petrogenesis of post-collisional Middle Eocene volcanism in the Eastern Pontides (NE, Turkey): Insights from geochemistry, whole-rock Sr-Nd-Pb isotopes, zircon U-Pb and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. *Geochemistry*, 82 (2), 125871. DOI: 10.1016/j.chemer.2022.125871

- Aydin, F., 2014. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Maçka Subvolcanic Intrusions: Implications for the late Cretaceous Magmatic and Geodynamic Evolution of the Eastern Part of the Sakarya Zone, Northeastern Turkey. *International Geology Review*, 56 (10), 1246-1275. DOI: 10.1080/00206814.2014.933364

- Aydin, F., Oğuz Saka, S., Şen, C., Dokuz, A., Aiglsperger, T., Uysal, İ., Kandemir, R., Karlı, O., Sarı, B., and Başer, R., 2020. Temporal, geochemical and geodynamic evolution of the Late Cretaceous subduction zone volcanism in the eastern

- Sakarya Zone, NE Turkey: Implications for mantle-crust interaction in an arc setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 192, 104217. DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.104217
- Barbarin, B., 2005. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: Nature, origin, and relations with the hosts. *Lithos*, 80, 155-177. DOI: 10.1016/j.lithos.2004.05.010
- Barbarin, B., and Didier, J., 1992. Genesis and evolution of mafic microgranular enclaves through various types of interaction between coexisting felsic and mafic magmas. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83(1-2), 145-153. DOI: 10.1017/S0263593300007835
- Blake, S., and Fink, J.H., 2000. On the deformation and freezing of enclaves during magma mixing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 95, 1-8. DOI: 10.1016/S0377-0273(99)00129-8
- Boynnton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements; Meteorite Studies. In: *Rare Earth Element Geochemistry*. P. Henderson (eds), Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam. 63-114. DOI: 10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3
- Calmus, T., Aguilon-Robles, A., Maury, R.C., Bellon, H., Benoit, M., Cotten, J., Bourgois, J., and Michaud, F., 2003. Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites (bbajaitesQ) from Baja California, Mexico: the role of slab melts. *Lithos*, 66, 77-105. DOI: 10.1016/S0024-4937(02)00214-1
- Castillo, P.R., 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 51 (3), 257-268. DOI: 10.1007/s11434-006-0257-7
- Cawthorn, R.G., and O'Hara, M.J., 1976. Amphibole fractionation in calcalkaline magma genesis. *American Journal of Science*, 276, 309-329. DOI: 10.2475/ajs.276.3.309
- Channel, J.E.T., Tüysüz, O., Bektaş, O., and Şengör, A.M.C., 1996. Jurassic-Cretaceous paleomagnetism and paleogeography of the Pontides (Turkey). *Tectonics*, 15, 201-212. DOI: 10.1029/95TC02290
- Conticelli, S., and Peccerillo, A., 1992. Petrology and geochemistry of potassic and ultrapotassic volcanism in central Italy: petrogenesis and inferences on the evolution of the mantle sources. *Lithos*, 28, 3-6, 221-240. DOI: 10.1016/0024-4937(92)90008-M
- Defant, M.J., and Drummond, M.S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347, 662-665. DOI: 10.1038/347662a0
- Defant, M.J., Jackson, T.E., Drummond, M.S., De Boer, J.Z., Bellon, H., Feigenson, M.D., Maury, R.C., and Stewart, R.H., 1992. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview. *Journal of the Geological Society*, 149, 569-579. DOI: 10.1144/gsjgs.149.4.0569
- Didier, J., 1973. Granite and their enclaves: The bearing of enclave on the origin of granites. *Development in Petrology*, Elsevier, Amsterdam.
- Didier, J., and Barbarin, B., 1991. The different type of enclaves in granites: Nomenclature. J., Didier and B., Barbarin (Eds.), *Enclaves*

- in Granite Petrology. Amsterdam, Elsevier. 19-23.
- Dokuz, A., 2011. A slab detachment and delamination model for the generation of Carboniferous high-potassium I-type magmatism in the Eastern Pontides, NE Turkey: Köse composite pluton. *Gondwana Research*, 19, 926-944. DOI: 10.1016/j.gr.2010.09.006
- Dokuz, A., and Sünnetçi, K., 2019. Jurassic acidic magmatism in a back-arc setting, eastern Sakarya Zone, Turkey: Geochemical constraints and an evolutionary model. *Lithos*, 312–327. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.02.022
- Dokuz, A., Aydınçakır, E., Kandemir, R., Karlı, O., Siebel, W., Derman, A.S., and Turan, M., 2017a. Late Jurassic Magmatism and Stratigraphy in the Eastern Sakarya Zone, Turkey: Evidence for the Slab Breakoff of Paleotethyan Oceanic Lithosphere. *The Journal of Geology*, 125, 1-31. DOI: 10.1086/689552
- Dokuz, A., Gücer, M.A., Karlı, O., and Yi, K., 2022. From Cadomian back-arc basin to Rheic Ocean closure: the geochronological records of the Kurtoğlu Massif, eastern Sakarya Zone, Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 111 (4), 1333-1355. DOI: 10.1007/s00531-022-02183-4
- Dokuz, A., Külekçi, E., Aydınçakır, E., Kandemir, R., Cihat Alçiçek, M., Pecha, M.E., and Sünnetçi, K., 2017b. Cordierite-bearing strongly peraluminous Cebre Rhyolite from the eastern Sakarya Zone, NE Turkey: Constraints on the Variscan Orogeny. *Lithos*, 278-281, 285-302. DOI: 10.1016/j.lithos.2017.02.002
- Dokuz, A., Tanyolu, E. and Genç, S., 2006. A mantle- and a lower crust-derived bimodal suite in the Yusufeli (Artvin) area, NE Turkey: trace element and REE evidence for subduction-related rift origin of Early Jurassic Demirkent intrusive complex. *International Journal of Earth Sciences*, 95, 370-394. DOI: 10.1007/s00531-005-0046-6
- Dokuz, A., Uysal, İ., Kaliwoda, M., Karlı, O., Ottley, C.J., and Kandemir, R., 2011. Early abyssal- and late SSZ-type vestiges of the Rheic oceanic mantle in the Variscan basement of the Sakarya Zone, NE Turkey: Implications for the sense of subduction and opening of the Paleotethys. *Lithos*, 127, 176-191. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.08.015
- Dokuz, A., Uysal, İ., Meisel, W., Turan, M., Duncan, R., and Akçay, M., 2013. Post-collisional adakitic volcanism in the eastern part of the Sakarya Zone, Turkey: evidence for slab and crustal melting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166, 1443-1468. DOI: 10.1007/s00410-013-0936-8
- Eyüboğlu, Y., Dudas, F.O., Santosh, M., Zhu, D.-C., Yi, K., Chatterjee, N., Jeong, Y.-J., Akaryalı, E., and Liu, Z., 2016. Cenozoic forearc gabbros from the northern zone of the Eastern Pontides Orogenic Belt, NE Turkey: Implications for slab window magmatism and convergent margin tectonics. *Gondwana Research*, 33, 160-189. DOI: 10.1016/j.gr.2015.07.006
- Eyüboğlu, Y., Santosh, M., and Chung, S.L., 2011. Crystal fractionation of adakitic magmas in the crust–mantle transition zone: Petrology, geochemistry and U-Pb zircon chronology of the Seme adakites, eastern Pontides, NE Turkey. *Lithos*, 121, 151-166. DOI: 10.1016/j.lithos.2010.10.012
- Eyüboğlu, Y., Santosh, M., Yi, K., Bektaş, O., and Kwon, S., 2012. Discovery of Miocene adakitic dacite from the Eastern Pontides Belt and revised geodynamic model for the late Cenozoic evolution of eastern

- Mediterranean region. *Lithos*, 146-147, 218-232. DOI: 10.1016/j.lithos.2012.04.034
- Fujimaki, H., Tatsumoto, M., and Aoki, K., 1984. Partition coefficients of Hf, Zr, and ree between phenocrysts and groundmasses. *Journal of Geophysical Research*, 89 (S02), B662–B672. DOI: 10.1029/jb089is02p0b662
- Furman, T., and Graham, D., 1999. Erosion of lithospheric mantle beneath the East African Rift system: Geochemical evidence from the Kivu volcanic province. *Lithos*, 48, 237-262. DOI: 10.1016/S0024-4937(99)00031-6
- Gill, J.B., 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin, Springer-Verlag.
- Gücer, M.A., 2021. Origin, petrogenesis and geodynamic implications of the early Eocene Altınpınar adakitic andesites in the eastern Sakarya Zone, northeastern Turkey. *Geochemistry*, 81 (2), 125766. DOI: 10.1016/j.chemer.2021.125766
- Gücer, M.A., Aydınçakır, E., Yücel, C., and Akaryalı, E., 2017. Tersiyer yaşlı Altınpınar hornblendli andezitlerinin (Torul-Gümüşhane) petrografisi, mineral kimyası ve p-t kristalleşme koşulları. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 236-267. DOI: 10.17714/gumusfenbil.310263
- Gücer, M.A., Delimehmet, Z., Çimen, O., 2024. Güneydere (Bayburt) civarında yüzeylenen Karbonifer yaşlı granitlerin jeokimyasal ve petrolojik karakteristikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* (baskıda). DOI: 10.5505/pajes.2024.99602
- Gücer, M.A., ve Sarı, E., 2021. Karbonifer Pamuktaş Plütönu'nun petrografisi, jeokimyası ve petrolojik özellikleri, Bayburt (KD Türkiye). *Yerbilimleri*, 42 (1), 85-120. DOI: 10.17824/yerbilimleri.889227
- Hawkesworth, C.J., Gallagher, K., Hergt, J.M., and McDermott, F., 1993. Trace element fractionation processes in the generation of island arc basalts. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*, 342(1663), 179-191. DOI: 10.1098/rsta.1993.0013
- Hibbard, M.J., 1991. Textural anatomy of twelve magmamixed granitoid systems. In: Didier, J., Barbarin, B. (Eds.), *Enclaves and Granite Petrology, Developments in Petrology*, vol. 13. Elsevier, Amsterdam, pp. 431–444.
- Irvine, T.N., and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548. DOI: 10.1139/e71-055
- Janoušek, V., Farrow, C.M., and Erban, V., 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDKit). *Journal of Petrology*, 47 (6), 1255-1259. DOI: 10.1093/petrology/egl013
- Kandemir, R., and Yılmaz, C., 2009. Lithostratigraphy, facies and deposition environment of the Lower Jurassic Ammonitico Rosso Type Sediments (ARTS) in the Gumushane area, NE Turkey: Implications for the opening of the northern branch of the Neo-Tethys Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34, 586-598. DOI: 10.1016/j.jseaes.2008.08.006
- Kandemir, R., Lerosey-Aubril, R., 2011. First report of a trilobite in the Carboniferous of Eastern Pontides, NE Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 20, 179-183. DOI: 10.3906/yer-0911-3

- Karslı, O., Caran, S., Dokuz, A., Coban, H., Bin, C., and Kandemir, R., 2012. A-type granitoids from the Eastern Pontides, NE Turkey: records for generation of hybrid A-type rocks in a subduction-related environment. *Tectonophysics*, 530-531, 208-224. DOI: 10.1016/j.tecto.2011.12.030
- Karslı, O., Caran, Ş., Çoban, H., Şengün, F., Tekkanat, O. and Andersen, T., 2020. Melting of the juvenile lower crust in a far-field response to roll-back of the southern Neotethyan oceanic lithosphere: the Oligocene adakitic dacites, NE Turkey. *Lithos*, 370-371, 105614. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105614
- Karslı, O., Dokuz, A., and Kandemir, R., 2016. Subduction-related Late Carboniferous to Early Permian Magmatism in the Eastern Pontides, the Camlik and Casurluk plutons: Insights from geochemistry, whole-rock Sr-Nd and in situ zircon Lu-Hf isotopes, and U-Pb geochronology. *Lithos*, 266, 98-114. DOI: 10.1016/j.lithos.2016.10.007
- Karslı, O., Dokuz, A., Kandemir, R., Aydin, F., Schmitt, A.K., Ersoy, E.Y., and Alyıldız, C., 2019. Adakitic parental melt generation by partial fusion of the juvenile lower crust, Sakarya Zone, NE Turkey: a far-field response to break-off of the southern Neotethyan oceanic lithosphere. *Lithos*, 338-339, 58-72. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.03.029
- Karslı, O., Dokuz, A., Uysal, I., Aydin, F., Bin, C., Kandemir, R., and Wijbrans, R.J., 2010b. Relative contributions of crust and mantle to generation of Campanian high-K calc-alkaline I-type granitoids in a subduction setting, with special reference to the Harşit pluton, Eastern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160, 467-487. DOI: 10.1007/s00410-010-0489-z
- Karslı, O., Dokuz, A., Uysal, I., Aydin, F., Kandemir, R., and Wijbrans, R.J., 2010a. Generation of the early Cenozoic adakitic volcanism by partial melting of mafic lower crust, Eastern Turkey: implications for crustal thickening to delamination. *Lithos*, 114, 109-120. DOI: 10.1016/j.lithos.2009.08.003
- Karslı, O., Uysal, I., Ketenci, M., Dokuz, A., Aydin, F., Kandemir, R. and Wijbrans, R. J., 2011. Adakite-like granitoid porphyries in Eastern Pontides, NE Turkey: potential parental melts and geodynamic implications. *Lithos*, 127, 354-372. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.08.014
- Kaygusuz, A., 2000. Torul ve çevresinde yüzeylenen kayaçların petrografik ve jeokimyasal incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 253 s, Trabzon
- Kaygusuz, A., and Guloglu, Z.S., 2022. Petrographical, Geochemical and Petrological Characteristics of the Mafic Microgranular Enclaves in the Arpaköy (Kürtün/Gümüşhane) Granitoid. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 11(1), 1982-1997.
- Kaygusuz, A., and Şen, C., 2011. Calc-alkaline I-Type plutons in the Eastern Pontides, NE Turkey: U-Pb zircon ages, geochemical and Sr-Nd isotopic compositions. *Chemie der Erde Geochemistry*, 71, 59-75. DOI: 10.1016/j.chemer.2010.07.005
- Kaygusuz, A., Arslan, M., Siebel, W., Sipahi, F., and İlbeyli, N., 2012. Geochronological evidence and tectonic significance of Carboniferous magmatism in the southwest Trabzon area, eastern Pontides, Turkey. *International Geology Review*, 1776-1800. DOI: 10.1080/00206814.2012.676371
- Kaygusuz, A., Aslan, Z., Aydınçakır, E., Yücel, C., Gücer, M.A., and Şen, C., 2018.

- Geochemical and Sr-Nd-Pb isotope characteristics of the Miocene to Pliocene volcanic rocks from the Kandilli (Erzurum) area, Eastern Anatolia (Turkey): Implications for magma evolution in extension-related origin. *Lithos*, 296-299, 332-351. DOI: 10.1016/j.lithos.2017.11.003
- Kaygusuz, A., Gücer, M.A., Yücel, C., Aydınçakır, E., and Sipahi, F., 2019. Petrography and crystallization conditions of Middle Eocene volcanic rocks in the Aydıntepe-Yazyurdu (Bayburt) area, Eastern Pontides (NE Turkey). *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 8 (2), 1205-1215.
- Kaygusuz, A., Siebel, W., Şen, C., and Satir, M., 2008. Petrochemistry and petrology of I-type granitoids in an arc setting: the composite Torul pluton, eastern Pontides, NE Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 97, 739-764. DOI: 10.1007/s00531-007-0188-9
- Kaygusuz, A., Yücel, C., Aydınçakır, E., Gücer, M.A., and Ruffet, G., 2022. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating, whole-rock and Sr-Nd isotope geochemistry of the Middle Eocene calc-alkaline volcanic rocks in the Bayburt area, Eastern Pontides (NE Turkey): Implications for magma evolution in an extension-related setting. *Mineralogy and Petrology*, 116 (5), 379-399. DOI: 10.1007/s00710-022-00788-w
- Koyaguchi, T., 1986. Textural and compositional evidence for magma mixing and its mechanism, Abu volcano group, Southwestern Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 93, 33-45. DOI: 10.1007/BF00963583
- Lacroix, A., 1890. Sur les enclaves acides des roches volcaniques d' Auvergne. *Bulletin du Service de la carte géologique de la France*, 2, 25-56.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., and Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750. DOI: 10.1093/petrology/27.3.745
- LeMaitre, R.W., 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge University Press.
- Martin, H., 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46, 411-429. DOI: 10.1016/S0024-4937(98)00076-0
- Martin, H., Smith, R.H., Rapp, R., Moyen, J.F., and Champion, D., 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79, 1-24. DOI: 10.1016/j.lithos.2004.04.048
- Maas, R., Nicholls, I.A., Legg, C., 1997. Igneous and Metamorphic Enclaves in the S-type Deddick Granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia: Petrographic, Geochemical and Nd-Sr Isotopic Evidence for Crustal Melting and Magma Mixing. *Journal of Petrology*, 38, 815-841. DOI: 10.1093/etroj/38.7.815
- Maury, R.C., Sajona, F.G., Pubellier, M., Bellon, H., and Defant, M.J., 1996. Fusion de la croûte océanique dans les zones de subduction/collision récentes: l'exemple de Mindanao (Philippines). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 167, 579-595.

- Münker, C., Wörner, G., Yogodzinski, G., and Churikova, T., 2004. Behaviour of high field strength elements in subduction zones: constraints from Kamchatka-Aleutian arc lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 224, 3-4, 275-293. DOI: 10.1016/j.epsl.2004.05.030
- Okay, A.İ., and Şahintürk, Ö., 1997. Geology of the Eastern Pontides, In: Robinson, A.G. (Eds), *Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region*. AAPG Bulletin, 68, 291-311. DOI: 10.1306/m68612c15
- Okay, A.İ., and Tüysüz, O., 1999. Tethyan Sutures of Northern Turkey. *The Mediterranean Basin: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*. Geological Society, London, Special Publications, 156, 475-515. DOI: 10.1144/GSL.SP.1999.156.01.22
- Pearce, J. A., ve Peate, D. W., 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23, 251-285. DOI: 10.1146/annurev.earth.23.050195.001343
- Pearce, J.A., 1983. The Role of Sub-Continental Lithosphere in Magma Genesis at Destructive Plate Margins. C.J. Hawkesworth, M.J. Norry (eds) In: *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, Shiva Publishing, Cheshire, 230-249.
- Pearce, J.A., Bender, J.F., De Long, S.E., Kidd, W.S.F., Low, P.J., Güner, Y., Şaroğlu, F., Yılmaz, Y., Moorbath, S., and Mitchell, J.J., 1990. Genesis of collision volcanism in eastern Anatolia Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44, 189-229. DOI: 10.1016/0377-0273(90)90018-B
- Peccerillo, A., and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81. DOI: 10.1007/BF00384745
- Rogers, G., Saunders, A.D., Terrell, D.J., Verma, S.P., and Marriner, G.F., 1985. Geochemistry of Holocene volcanic rocks associated with ridge subduction in Baja California, Mexico. *Nature*, 315, 389-392. DOI: 10.1038/315389a0
- Romick, J.D., Kay, S.M., and Kay, R.W., 1992. The influence of amphibole fractionation on the evolution of calc-alkaline andesite and dacite tephra from the central Aleutians, Alaska. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 112, 1, 101-118. DOI: 10.1007/BF00310958
- Rosenbaum, G., and Lister, G.S., 2002. Reconstruction of the evolution of the Alpine-Himalayan orogen - an introduction. In: G. Rosenbaum, G.S. Lister, (eds.), *Reconstruction of the evolution of the Alpine-Himalayan Orogen*. *Journal of the Virtual Explorer*, 8, 1-2. DOI: 10.3809/jvirtex.2002.00051
- Saydam Eker, Ç., 2020. Geochemical differences between bed and terrace sediments of the Harşit Stream (NE Turkey): Implications for mixed source rocks, weathering and mass transfer. *Yerbilimleri*, 2020, 41 (1), 1-29. DOI: 10.17824/yerbilimleri.684511
- Saydam Eker, Ç., Akpınar, İ., and Sipahi, F., 2016. Organic geochemistry and element distribution in coals formed in Eocene lagoon facies from the Eastern Black Sea Region, NE Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 25, 467-489. DOI: 10.3906/yer-1512-12
- Saydam Eker, Ç., Arı, U. V., 2023. Geochemical characterization of late Jurassic–early Cretaceous age limestones from Gümüşhane (NE-Türkiye):

- identification of the source of organic matter and paleo-environment conditions. *Carbonates Evaporites* 38, 12. DOI: 10.1007/s13146-022-00835-9
- Sipahi, F., Gücer, M.A., and Sadıklar, M.B., 2020b. Nature of clays in Late Cretaceous dacitic rocks in the eastern Sakarya Zone (NE Turkey): A geochemical and isotopic approach. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 29 (6), 831-852. DOI: 10.3906/yer-2002-9
- Sipahi, F., Gücer, M.A., and Saydam Eker, Ç., 2020a. Geochemical composition of magnetite from different iron skarn mineralizations in NE Turkey: implication for source of ore forming fluids. *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (2), 70. DOI: 10.1007/s12517-019-5052-2
- Sipahi, F., Gücer, M.A., Dokuz, A., Yi, K., Kaygusuz, A., Akaryalı, E., Saydam Eker, Ç., and Doruk, C., 2023. The Sr, Nd, Pb and Hf isotopes and crystallization conditions of the middle Eocene Dağdibi Pluton in the eastern Sakarya Zone, Turkey. *Geological Magazine*, 160 (6), 1193-1210. DOI:10.1017/S001675682300033X
- Sipahi, F., Gücer, M.A., ve Sadıklar, M.B., 2019. Zigana Dağı (Gümüşhane, KD Türkiye) Dayklarının Jeokimyası ve Jeolojik Anlamı. *Yerbilimleri*, 40 (3), 293-325. DOI: 10.17824/yerbilimleri.633036
- Sipahi, F., Kaygusuz, A., Saydam Eker, Ç., Vural, A., and Akpınar, İ., 2018. Late Cretaceous arc igneous activity: the Eğrikar Monzogranite example. *International Geology Review*, 60 (3), 382-400. DOI: 10.1080/00206814.2017.1336120
- Sipahi, F., Saydam Eker, Ç., Akpınar, İ., Gücer, M.A., Vural, A., Kaygusuz, A., and Aydurmuş, T., 2022. Eocene magmatism and associated Fe-Cu mineralization in northeastern Turkey: a case study of the Karadağ skarn. *International Geology Review*, 64 (11), 1530-1555. DOI: 10.1080/00206814.2021.1941323
- Stern, C.R., and Kilian, R., 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123 (3), 263-281. DOI: 10.1007/s004100050155
- Storetvedt, K.M., 1990. The Tethys Sea and the Alpine-Himalayan orogenic belt; mega-elements in a new global tectonic system. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 62, 141-184. DOI: 10.1016/0031-9201(90)90198-7
- Sun, S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42, 313-345. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Şen, C., 2007. Jurassic volcanism in the Eastern Pontides: Is it rift related or subduction related? *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 523-539.
- Şengör, A.M.C., Altıner, D., Cin, A., Ustaömer, T., and Hsü, K.J., 1988. Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land. Geological Society, London, Special Publications, 37, 119-181. DOI: 10.1144/GSL.SP.1988.037.01.09
- Şengör, A.M.C., and Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181-241. DOI: 10.1016/0040-1951(81)90275-4
- Taylor, S.R., and McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and

- Evolution. Blackwell Scientific Publications, Blackwell, Oxford, U.K., 312 p.
- Taylor, S.R., and McLennan, S.M., 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33, 241–265. DOI: 10.1029/95RG00262
- Temizel, İ., Arslan, M., Yücel, C., Abdioğlu Yazar, E., Kaygusuz, A., and Aslan, Z., 2020. Eocene tonalite-granodiorite from the Havza (Samsun) area, northern Turkey: adakite-like melts of lithospheric mantle and crust generated in a post-collisional setting. *International Geology Review*, 62, 1131-1158. DOI: 10.1080/00206814.2019.1625077
- Temizel, İ., Arslan, M., Yücel, C., Abdioğlu, E., and Ruffet, G., 2016. Geochronology and geochemistry of Eocene-aged volcanic rocks around the Bafra (Samsun, N Turkey) area: Constraints for the interaction of lithospheric mantle and crustal melts. *Lithos*, 258-259, 92-114. DOI: 10.1016/j.lithos.2016.04.023
- Thirlwall, M.F., Smith, T.E., Graham, A.M., Theodorou, N., Hollings, P. and Davidson, J.P., 1994. High Field Strength Element Anomalies in Arc Lavas: Source or Processes. *Journal of Petrology*, 35, 819-838. DOI: 10.1093/petrology/35.3.819
- Topuz, G., Altherr, R., Kalt, A., Satır, M., Wemer, O. and Schwarz, W.H., 2004. Aluminous granulites from the Pular complex, NE Turkey: a case of partial melting, efficient melt extraction and crystallization. *Lithos*, 72, 183-207. DOI: 10.1016/j.lithos.2003.10.002
- Topuz, G., Altherr, R., Schwarz, W.H., Siebel, W., Satır, M. and Dokuz, A., 2005. Post-collisional plutonism with adakite-like signatures: the Eocene Saraycık granodiorite (Eastern Pontides, Turkey). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150, 441-455. DOI: 10.1007/s00410-005-0022-y
- Topuz, G., Altherr, R., Wolfgang, S., Schwarz, W.H., Zack, T., Hasanözbek, A., Mathias, B., Satır, M. and Şen, C., 2010. Carboniferous high-potassium I-type granitoid magmatism in the Eastern Pontides: The Gümüşhane pluton (NE Turkey). *Lithos*, 116, 92-110. DOI: 10.1016/j.lithos.2010.01.003
- Topuz, G., Okay, A.İ., Altherr, R., Schwarz, W.H., Siebel, W., Zack, T., Satır, M., and Şen, C., 2011. Post-collisional adakite-like magmatism in the Ağvanis massif and implications for the evolution of the Eocene magmatism in the Eastern Pontides (NE Turkey). *Lithos* 125, 131-150. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.02.003
- White, A.R., and Chappell, B.W., 1977. Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophysics*, 43, 7–22. DOI: 10.1016/0040-1951(77)90003-8
- White, A.J.R., Chappell, B.W., Wyborn, D., 1999. Application of the Restite Model to the Deddick Granodiorite and its Enclaves—a Reinterpretation of the Observations and Data of Maas et al. (1997). *Journal of Petrology*, 40, 413-421. DOI: 10.1093/petroj/40.3.413
- Winchester, J.A., and Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343. DOI: 10.1016/0009-2541(77)90057-2
- Wood, D.A., 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth*

- Planet Science Letter, 50, 11-30. DOI: 777. DOI: 10.1016/0012-821X(80)90116-8 10.1080/00206814.2018.1461029
- Woudloper, 2009. Tectonic map Mediterranean EN. https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Woudloper#/media/File:Tectonic_map_Mediterranean_EN.svg (licensed under CC BY-SA 1.0 via Wikimedia Commons). Accessed: 3 October 2020.
- Yılmaz Şahin, S., Aysal, N., and Güngör, Y., 2012. Petrogenesis of Late Cretaceous Adakitic Magmatism in the İstanbul Zone (Çavuşbaşı Granodiorite, NW Turkey). Turkish Journal of Earth Sciences, 21, 1029-1045. DOI: 10.3906/yer-1005-15
- Yücel, C., 2019. Geochronology, geochemistry, and petrology of adakitic Pliocene-Quaternary volcanism in the Şebinkarahisar (Giresun) area, NE Turkey. International Geology Review, 61 (6), 754-
- Yücel, C., Arslan, M., Temizel, I., and Abdioğlu Yazar, E., 2014. Volcanic facies and mineral chemistry of Tertiary volcanics in the northern part of the Eastern Pontides northeast Turkey implications for pre eruptive crystallization conditions and magma chamber processes. Mineralogy and Petrology, 108(3), 439-467. DOI: 10.1007/s00710-013-0306-2
- Yücel, C., Arslan, M., Temizel, İ., Abdioğlu Yazar, E., and Ruffet, G., 2017. Evolution of K-rich magmas derived from a net veined lithospheric mantle in an ongoing extensional setting: Geochronology and geochemistry of Eocene and Miocene volcanic rocks from Eastern Pontides (Turkey). Gondwana Research, 45, 65–86. DOI: 10.1016/j.gr.2016.12.016