



Kahramanmaraş Depremlerinin Adıyaman-Gölbaşı Yerleşim Alanındaki Mühendislik Yapılarına Etkisi ve Deprem-Zemin Etkileşimi

The Effect of Kahramanmaraş Earthquakes on Engineering Structures in Adıyaman-Gölbaşı Settlement Area and Earthquake-Soil Interaction

HARUN ÜNAL ¹ , ZEYNAL ABİDDİN ERGÜLER ² 

¹ GEOMEK Mühendislik Geoteknik Proje Ltd. Şti, Konutkent, Ankara, Türkiye

² Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

Geliş (received): 13 Haziran (June) 2023 Kabul (accepted): 21 Ağustos (August) 2023

ÖZ

Gölbaşı ilçesi şehir merkezi ve yakın çevresindeki yapılaşma genel olarak Doğu Anadolu Fay Zonu'nun (DAFZ) Gölbaşı-Türkoğlu segmenti ile ilişkili bir çek-ayır havzasının alüvyal çökelleri üzerinde yer almaktadır. Söz konusu bu segmentin önceki çalışmalarda sismik boşluk olarak değerlendirilmesi ve yıkıcı büyüklüklere sahip deprem üretme potansiyeli dikkate alınarak, günümüze kadar ilçenin imar planına yönelik kapsamlı birçok mühendislik çalışması gerçekleştirilmiştir. Ancak, 6 Şubat 2023 tarihinde büyüklükleri (Mw) sırasıyla 7.8 ve 7.7 olan Kahramanmaraş-Pazarcık ve Kahramanmaraş-Elbistan depremleri, Gölbaşı yerleşim alanı için yıkıcı sonuçlar doğurmuştur. İnşaat kalitesinden kaynaklanan hasarların yanı sıra, zemin sıvılaşması ve yanal yayılma gibi yüzey deformasyonları ile dayanım azalması sonucu taşıma gücü kaybı gibi zemin davranışından kaynaklanan binaların yıkılması, yan yatması veya batması ve tren raylarındaki deformasyonlar gibi önemli hasarlar da bölgede yaygın bir şekilde gözlenmiştir. Ayrıca, dinamik yükler altında gerçekleşen yanal yayılma ile beraber göl kıyı çizgisi de değişmiştir. Bu çalışma kapsamında, Kahramanmaraş depremlerinin Adıyaman-Gölbaşı yerleşim alanındaki mühendislik yapılarına etkisi ve deprem-zemin etkileşimi, sıvılaşma, yanal yayılma ve yanal yayılma sonucu göl kıyı çizgisinin değişimi ve sıvılaşan zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır ve Gölbaşı ilçesi yerleşim alanını kapsayan detaylı yerüstü ve yeraltı araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçlar doğrultusunda, sıvılaşmanın gerçekleştiği noktalarda araştırma çukurları ile sondaj kuyuları açılmış, SPT deneyleri gerçekleştirilmiş ve sıvılaşan ve sıvılaşmayan zeminlerin fiziksel ve mekanik parametrelerin tespiti için örselenmiş ve örselenmemiş örnekler derlenmiştir. Arazi gözlemleri, arazi ve laboratuvar deney sonuçları ile yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, sıvılaşan zeminler için önerilen ölçütlerin dışında kalan zeminlerin Kahramanmaraş depremleri sırasında sıvılaştığı ve dayanım kaybına uğrayarak deformasyona uğradığı belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların sıvılaşma analizlerinde kullanılan yöntemlerdeki belirsizlik ve sınırlamaların anlaşılması açısından yararlı olacağı düşünülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deprem-zemin etkileşimi, Gölbaşı, Kahramanmaraş depremleri, sıvılaşma, yanal yayılma

ABSTRACT

The construction in Gölbaşı district city centre and its vicinity are generally located on the alluvial deposits of a pull-apart basin associated with the Gölbaşı-Türkoğlu segment of the Eastern Anatolian Fault Zone (DAFZ). Considering this segment as a seismic gap in previous studies and its potential to generate earthquakes with destructive magnitudes, many comprehensive engineering studies have been carried out for the construction plan of the district until now. However, the Kahramanmaraş-Pazarcık and Kahramanmaraş-Elbistan earthquakes of magnitudes (Mw) 7.8 and 7.7, respectively, on February 6, 2023, had devastating consequences for the Gölbaşı settlement area. In addition to damages associated with construction quality, significant damages such as collapse, tilting or sinking of buildings and deformations of train tracks caused by ground behavior such as surface deformation like soil liquefaction and lateral spreading, and loss of bearing capacity due to decrease in strength were also widely observed in the region. In addition, the shoreline of the lake has also changed with the lateral spreading realized under dynamic loads. Within the scope of this study, the effects of Kahramanmaraş earthquakes on engineering structures in the Adıyaman-Gölbaşı settlement area and earthquake-soil interaction, liquefaction, lateral spreading and change of lake shoreline as a result of lateral spreading, and evaluation of physical and mechanical properties of liquefied soils were aimed, and detailed surface and subsurface investigations covering the settlement area of Gölbaşı district were carried out. For these purposes, test pits and boreholes were drilled at the locations where liquefaction occurred, SPT tests were carried out, and both disturbed and undisturbed samples were collected to determine the physical and mechanical parameters of liquefied and non-liquefied soils. Considering the results obtained from field observations, field and laboratory test results and analyses, it is determined that soils outside the recommended criteria for liquefiable soils liquefied and deformed with loss of strength during Kahramanmaraş earthquakes. It was thought that the results obtained in this study would be useful in understanding the uncertainties and limitations of the methods used in liquefaction analysis.

Keywords: Earthquake-soil interaction, Gölbaşı, Kahramanmaraş earthquakes, lateral spreading, liquefaction

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1313819>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: zeynal.erguler@dpu.edu.tr

GİRİŞ

Gölbaşı ilçesinin imar planına yönelik çalışmalarında kullanılmak üzere günümüze kadar birçok kapsamlı araştırma gerçekleştirilmiştir (Şanverdi, 1992 ve 2005; Akıl, 2006; Akıl vd., 2008). Akıl vd. (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada deprem riski açısından önemli olan bu sahanın jeolojik, jeofizik ve jeoteknik değerlendirmelerini kapsayan araştırmalara veri sağlanması amacıyla derinlikleri 15-25 m arasında değişen 21 adet sondaj çalışması gerçekleştirmiş olup, zeminlerin taşıma gücü, sıvılaşma ve oturma analizleri yaparak ilçe yerleşim alanının 1/2000 ölçekli mühendislik ve yerleşime uygunluk haritalarını imar planlamasına altlık oluşturacak şekilde hazırlamışlardır. Ayrıca,

Akıl vd. (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Gölbaşı ilçesi sınırları içerisindeki alüvyonal zeminlerin tamamı için mühendislik önlemleri alınması zorunlu olduğu, orta dereceli bir sıvılaşma riskinin bulunduğu ve bu alanlarda yüzeyde hasar meydana getirebilecek sıvılaşmaların gerçekleşebileceği vurgulanmıştır. Ancak, Gölbaşı şehir merkezi ve yakın çevresini kapsayan ve ülkemizin ilgili kurumlarında çalışan yetkin mühendisler tarafından gerçekleştirilen bu çalışmaların çıktıklarına rağmen, son depremlerin yıkıcı etkisini ortadan kaldırılmasında dikkate alınmadığı anlaşılmıştır. Büyüklükleri (Mw) sırasıyla 7.8 ve 7.7 gibi yıkıcı değerlerde olan Kahramanmaraş Pazarcık ve Kahramanmaraş

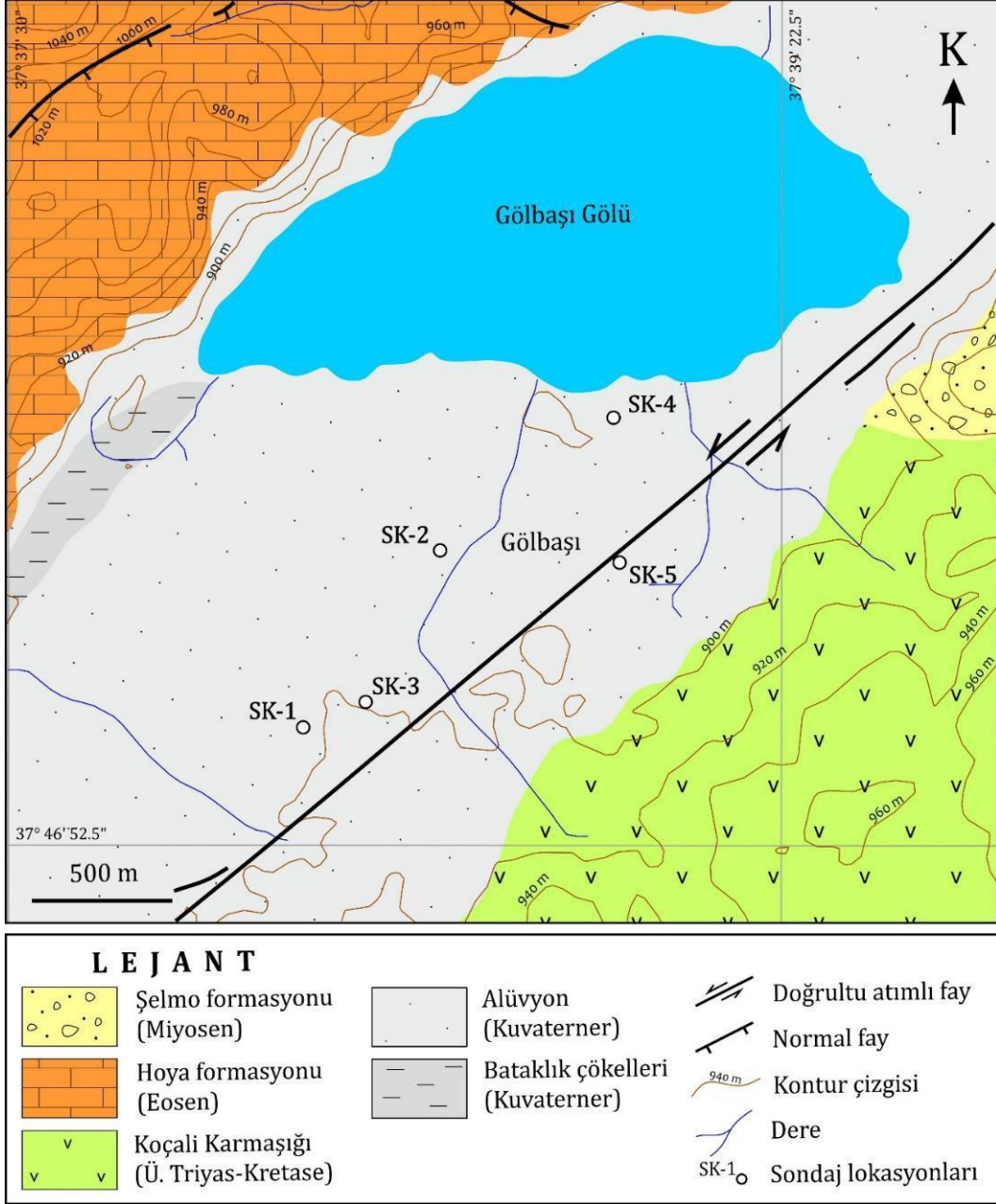
Elbistan depremleri, 6 Şubat 2023 tarihinde yaklaşık 9 saat ara ile gerçekleşmiştir. Doğu Anadolu Fay Zonu'nun Pazarcık ve Amanos Segmenti ve bu zonun dışında Çardak Fayı üzerinde gerçekleşmiş olan bu depremler bütün deprem bölgesinde olduğu gibi, Adıyaman Gölbaşı yerleşim alanı içerisindeki yapılaşma açısından da oldukça yıkıcı olmuştur.

Gölbaşı ilçesindeki yapılaşma genel olarak gevşek durumdaki güncel alüvyonal çökeller üzerinde gerçekleştirilmiş olup, bu birimlerdeki yeraltı su seviyesinin oldukça sığ konumda olduğu bilinmektedir. Çalışma sahasındaki sığ yer altı su seviyesi ve güncel alüvyal çökellerin varlığı, depremler sonrasında deprem-yapı etkileşimi, sıvılaşma, yanal yayılma ve yanal yayılma sonucu göl kıyı çizgisinin değişimi ve sıvılaşan zeminlerin fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesinin, gelecekte olabilecek depremlerden önce alınması gereken tedbirler açısından yararlı olacağı değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, Kahramanmaraş depremleri sonrasında, bölgedeki depremin etkisinin belirlenmesi amacıyla Adıyaman ili Gölbaşı ilçesi yerleşim alanını kapsayan detaylı yerüstü ve yeraltı araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmalar kapsamında, öncelikle deprem sonrası yapılarda meydana gelen hasar durum analizleri yapılmış ve hasarların oluş nedenleri zemin dinamiği açısından incelenmiştir. Özellikle sıvılaşma ve yanal yayılma sorunlarının gözlemlendiği beş ayrı noktada alüvyon zeminde yirmi metrelik sondajlar yapılmış olup, belirli aralıklarla standart penetrasyon deneyi uygulanmış ve örneklemeler gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Bu arazi çalışmaları, gözlemleri, deneyleri ve alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları sonucu elde edilen

değerlendirmeler aşağıda alt bölümlerde sunulmuştur.

ÇALIŞMA ALANININ JEOLojİK VE TEKTONİK ÖZELLİKLERİ İLE DEPREMESELLİĞİ

Adıyaman ilinin Gölbaşı ilçesini oluşturan yapılaşmanın önemli bir kısmı güncel Kuvaterner çökelleri üzerinde yer almaktadır. Önceki çalışmalar (Yönlü, 2012) da dikkate alındığında, bölgede genel ölçekte Miyosen öncesi kaya birimler ile Holosen, Pliyosen ve Pleistosen'de farklı süreçler ile oluşmuş zemin birimleri yüzeylemektedir. Çalışma alanı ve yakın çevresinin temel kayalarını Üst Kretase yaşlı silisli şeyli, killi kireçtaşı, kireçtaşı ve çörtlerden oluşan Karadut karmaşığı oluşturmaktadır. Bu formasyon daha yaşlı jeolojik birimlerin üzerinde tektonik dokanak ile yerleşmiştir. Karadut Karmaşığının üst kısımlarını Germav formasyonu tarafından uyumsuz olarak üzerlenmektedir. Çalışma alanının kuzey batı kesiminde Alt Oligosen yaşlı ince-orta-kalın tabakalı kireçtaşlarından oluşan Hoya formasyonu bulunmaktadır. Çalışma alanının doğu bölgesinde ise orta-kalın tabakalı kireçtaşlarından oluşan Orta Miyosen yaşlı Şelmo Formasyonu yüzeylemektedir. Bu Miyosen öncesi birimlerin üzerine bölgenin zemin dinamiği açısından da önemli olan yamaç molozu ve alüvyal yelpazeden oluşan kohezyonlu ve kohezyonsuz zemin malzemeleri bulunmaktadır (Şekil 1). Bölgede bulunan alüvyon malzemesi kırmızımsı kahverengi ince (kil, silt) ve iri (kum ve çakıl) tane boyu malzemeden oluşmaktadır. Şekil 2'de de görüldüğü gibi, çakıl ve kum tane boyu malzemeden oluşan seviyeler arasında silt ve kil tane boyu malzemeden oluşmuş ara tabakalar yer yer eşlik etmekte olup, söz konusu bu seviyeler kendi aralarında düzensiz bir şekilde ardalanmaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanının ve yakın çevresinin jeolojisi (Herece (2008)'den uyarlanmıştır).

Figure 1. Geology of the study area and its vicinity. (modified from Herece (2008)).



Şekil 2. Çalışma bölgesindeki alüvyal çökellerin iki farklı lokasyondaki zemin profilleri.

Figure 2. The soil profiles of the alluvial deposits in the study area at two locations.

Deprem üretme açısından önemli olan ve doğuda Karlıova yakınlarında başlayıp güneybatıya doğru Akdeniz'e uzanan Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) çalışma alanının merkezinden geçmesi açısından önemlidir. Yönlü (2012) tarafından da vurgulandığı gibi, DAFZ, fay doğrultusundaki değişimler ve sıçrama yaptığı yerler temel alınarak birçok araştırmacı tarafından farklı segmentlere ayrılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma alanının jeolojik birimlerinin tektonizmasını ve dolayısıyla bölgenin depremselliğini Şaroğlu vd. (1987) tarafından ayrılan Gölbaşı-Türkoğlu segmenti etkilemektedir. Genel olarak K55D uzanımlı bu segment 90 km uzunluğunda doğrudan atımın yanında sıkışma bileşeni de içermektedir (Yönlü, 2012). Gölbaşı ilçesi DAFZ'na paralel olarak kuzeydoğu-güneybatı uzanımlı bir vadi boyunca uzanmaktadır. Havza, Gölbaşı-Türkoğlu segmenti arasında sola sıçramalı bir yapıda "çek-ayır (pull-apart)" şeklinde bir havza olarak açılmıştır (Akıl vd.,

2008). İlçenin üzerinde bulunduğu dar vadi güncel oluşmuş birikinti düzlükleri ve diğer kısımları ise küçük dağlar ve engebeli arazilerle kaplıdır. Çalışma alanının ve özellikle depremde hasara uğrayan bölgenin önemli bir kısmının eğim değerleri % 0 ile %10 arasında değişim göstermektedir.

Çalışma bölgesinin de bulunduğu DAFZ etkisindeki bölgede tarih boyunca birçok yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Ancak söz konusu bu depremlerin çok geniş alanda hissedilmeleri nedeniyle deprem merkez üssü konusunda belirsizlikler söz konusudur. Akıl vd. (2008) tarafından 15 yıl önce gerçekleştirilen mühendislik çalışmasında tarihsel deprem kayıtları temel alınarak bu fay zonunun farklı segmentleri üzerinde son yüzyılda büyük ve yıkıcı depremin gelişmediğini, dolayısıyla fay zonunun gelecekte yıkıcı depremlerin riski altında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, Demirtaş ve Yılmaz (1996) Gölbaşı-Türkoğlu

arasında kalan kesimi sistem içerisinde yer alan önemli sismik boşluklardan bir tanesini oluşturduğunu da vurgulamıştır. Bölgede aletsel dönemde kaydedilen önemli depremler ise 1905 Malatya (M=6.8), 1964 Malatya (MS=6.0), 1971 Bingöl (M=6.8), 1977 Palu (M=5.1), 1986 Malatya (MS=5.8), 1986 Malatya (MS=5.6), 2003 Pülümür (MS=5.8), 2003 Bingöl (MS=6.4), 2010 Elazığ (Mw = 6.0), 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık (Mw=7.8) ve 2023 Kahramanmaraş-Elbistan (Mw=7.7) şeklinde sıralanmaktadır.

ARAZI GÖZLEMLERİ VE ÇALIŞMALARI

2023 Kahramanmaraş depremlerinin Gölbaşı yerleşim alanındaki yapılaşma üzerindeki etkileri

6 Şubat 2023 tarihinde yaklaşık 9 saat ara ile 04.17'de ve 13.24'te merkez üssü Kahramanmaraş Pazarcık ve Kahramanmaraş Elbistan olan iki ayrı yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin büyüklükleri (Mw) sırasıyla 7.8 ve 7.7 olarak kaydedilmiştir. Doğu Anadolu Fay Zonu'nun Pazarcık ve Amanos Segment ve bu zonun dışında Çardak Fayı üzerinde gerçekleşmiş olan bu depremlerde KD-GB uzanımlı Gölbaşı-Türkoğlu segmentinin de kırıldığı değerlendirilmiştir. Çalışma bölgesinde yapılan arazi gözlemlerinde, deprem sonrası Gölbaşı-Türkoğlu segmentinde oluşan yüzey kırıklarındaki atım değerlerinin yaklaşık 4 metre civarında olduğu saptanmıştır (Şekil 3). Bu denli yüksek atımlarda deformasyonların gözlemlendiği yerde, kaya birimlerin üzerinde doğrudan inşa edilen ve çoğunlukla az katlı binalarda genellikle herhangi bir hasar tespit edilmemiştir. Ancak, pekişmemiş alüvyonal zemin üzerinde inşa edilen yapılarda önemli oranda hasarlar meydana gelmiştir. Bu depremler sonucu Gölbaşı ilçesinde hasar görmeyen ve tamamen yıkılan binaların

yerleşim alanı içerisindeki genel dağılımı Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil 4'te sunulan ve tamamen yıkılan binaların konumları uygu görüntüleri kullanılarak tespit edilmiş olup, bu hasarların dışında binanın düşeyden sapsması, sivilaşma nedeniyle ani oturma, yan yatma ve eğilme gibi hasarlar uydu görüntülerinden tespit edilemediğinden bu şekilde sunulmamıştır. Bölgedeki en yoğun hasar göl kıyı şeridinin güneyi ile ilçe merkezinde geçen Balkar-Erkenek karayolu arasında gerçekleşmiştir. Söz konusu bu hasarlı yapıların olduğu bölgede yapılan detaylı çalışmalarda, yapılarda gözlenen hasarların önemli bir kısmının zemin sivilaşması sonrası taşıma gücü kaybı ve sonrasında oluşan yanıl yayılmadan kaynaklandığı saptanmıştır. Bölgedeki zemin sivilaşma olgusu genel olarak kum kaynaması ve deprem sonrası oluşan çatlaklardan zeminin yukarı doğru çıkarak sığ derinliklerde kalmasından kaynaklanan zemin deformasyonları şeklinde gözlenmiştir (Şekil 5). Bu yüzey deformasyonlarına bağlı olarak birçok binada düşeyden sapma ve yan yatma gibi sorunlar da tespit edilmiştir (Şekil 6). Bodrum katı bulunmayan bu yapıların batan kısımlarının gerek yeraltısuyu gerekse şebeke suyunda meydana gelen hasarlar nedeniyle suyla dolu olduğu saptanmıştır. Sivilaşma sırasında ağır mühendislik yapılarında meydana gelen bu hasarların yanı sıra, gömülü kanalizasyon yapıları gibi hafif alt yapı elemanları da zemin yüzeyine yükselerek hasarlara maruz kalmışlardır.

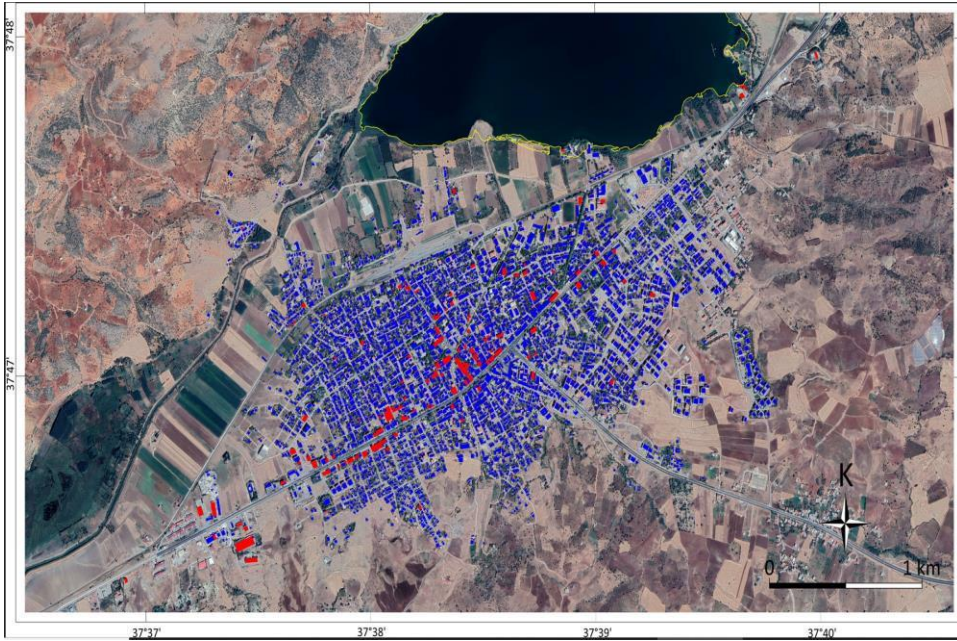
Yanal yayılma ve göl kıyı çizgisinin değişimi

Yanal yayılma tekrarlı yükleme koşullarında güncel gevşek kumlu ve siltli çökellerden oluşan az eğimli (% 0.3 - %5) alanlarda veya deniz, göl ve nehir gibi serbest yüzeylere doğru gelişen yaygın bir sivilaşma kaynaklı zemin yenilmesi türüdür. Yanal yayılmaya maruz kalan zeminlerde deformasyon miktarı birkaç



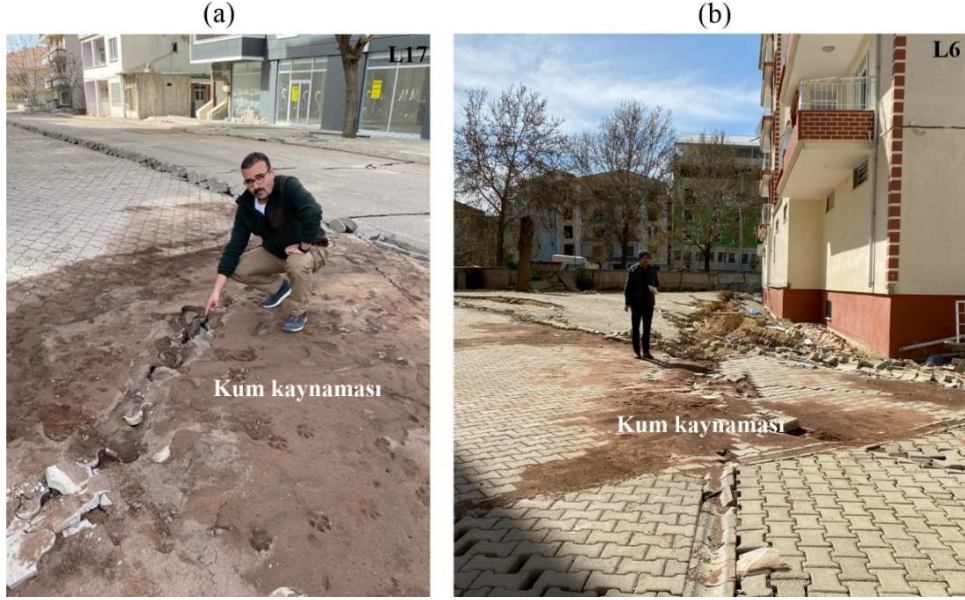
Şekil 3. Gölbaşı-Türkoğlu segmentinde tespit edilen 4 metreye ulaşan atım değerleri ve hasarsız yapılar.

Figure 3. Displacements up to 4 meters and undamaged structures detected on the Gölbaşı-Türkoğlu segment.



Şekil 4. Kahramanmaraş depremleri sonucu genellikle alüvyonal zemin üzerinde bulunan Gölbaşı yerleşim alanında meydana gelen yapı hasarlarının uygu görüntülerinde belirlenen genel dağılımı (mavi rengi hasarsız binaları kırmızı rengi ise tamamen yıkılmış hasara uğrayan yapıları göstermektedir (Görüntü: Google, 2023 CNESS / Airbus).

Figure 4. General distribution of building damages in Gölbaşı settlement area, generally located on alluvial soil, as a result of Kahramanmaraş earthquakes (blue colour shows undamaged buildings and red colour shows completely destroyed and damaged buildings (Map data: Google, 2023 CNESS / Airbus).



Şekil 5. Sıvılaşma sonrası bölgede gözlenen kum kaynamalarının tipik örnekleri: a) SK-1 sondajın yapıldığı Balkan Otel'i yanı, b) SK-2 sondajın yapıldığı yer (Yeşilay sitesi).

Figure 5. Typical examples of sand boils observed in the region after liquefaction: a) next to the Balkan Hotel, where the SK-1 borehole was drilled, b) the location of the SK-2 borehole (Yeşilay site).

santimetreden birkaç metreye kadar ulaşabilmekte olup, bu zemin yenilmesi binalara, köprülere, boru hatlarına ve diğer altyapı unsurlarına önemli zararlar verebilmektedir (Kramer, 2013). Bu yenilme sonucu zeminlerde yatay yer değiştirme yekpare veya bloklar halinde gerçekleşir.

Athanasopoulos vd. (2020) 2014 Kefalonya (Cephalonia) depremleri ($M_w=6.1$ ve 6.0) sonucunda en büyük kümülatif yatay yer değiştirmelerin, kesit konumuna ve serbest yüzün yüksekliğine bağlı olarak 3 cm ile 152 cm arasında değiştiğini, kıydan iç kesimlere doğru azaldığını ve yanal yer hareketinden etkilenen kısımların iç kesimlerde lokasyonlara bağlı olarak 10 m ile 90 m arasında değiştiğini vurgulamıştır. Bir önceki bölümde verilen sıvılaşma sonucu zeminlerde oluşan taşıma gücü kaybı bağlı olarak yapılarda saptanan batma, oturma, yan yatma veya devrilme gibi

yaygın hasarların yanı sıra, göl kıyı çizgisine yakın olan yerlerdeki mühendislik yapılarında yanal yayılma kaynaklı önemli hasar ve deformasyonlar da tespit edilmiştir. Hamada vd. (1986), Japonya'da gerçekleşen 1964 Niigata ve 1983 Nihonkai-Chubu depremleri sonucu meydana genel yatay yer değiştirmelerini haritalamak için bu depremlerin öncesi ve sonrası hava fotoğraflarını kullanmıştır. Benzer yöntem bu araştırmada da kullanılarak, çalışma sahasında yanal yayılmanın olduğu yerlerde deprem öncesi ve deprem sonrası uydu görüntüleri karşılaştırmış olup, yatay yanal yer değiştirmenin yaklaşık 7.4 m. ortalama bir değer ile 2.8 ile 12.6 m. arasında gerçekleştiği belirlenmiştir. Söz konusu bu yanal yayılma sonucu göl kıyı çizgisinde önemli oranda değişim meydana gelmiştir. Göl kıyı çizgisinde meydana gelen bu değişim ve yanal yayılma



Şekil 6. Kahramanmaraş depremleri sonrası binaların ani oturması ve yan yatmasına ilişkin örnekler.

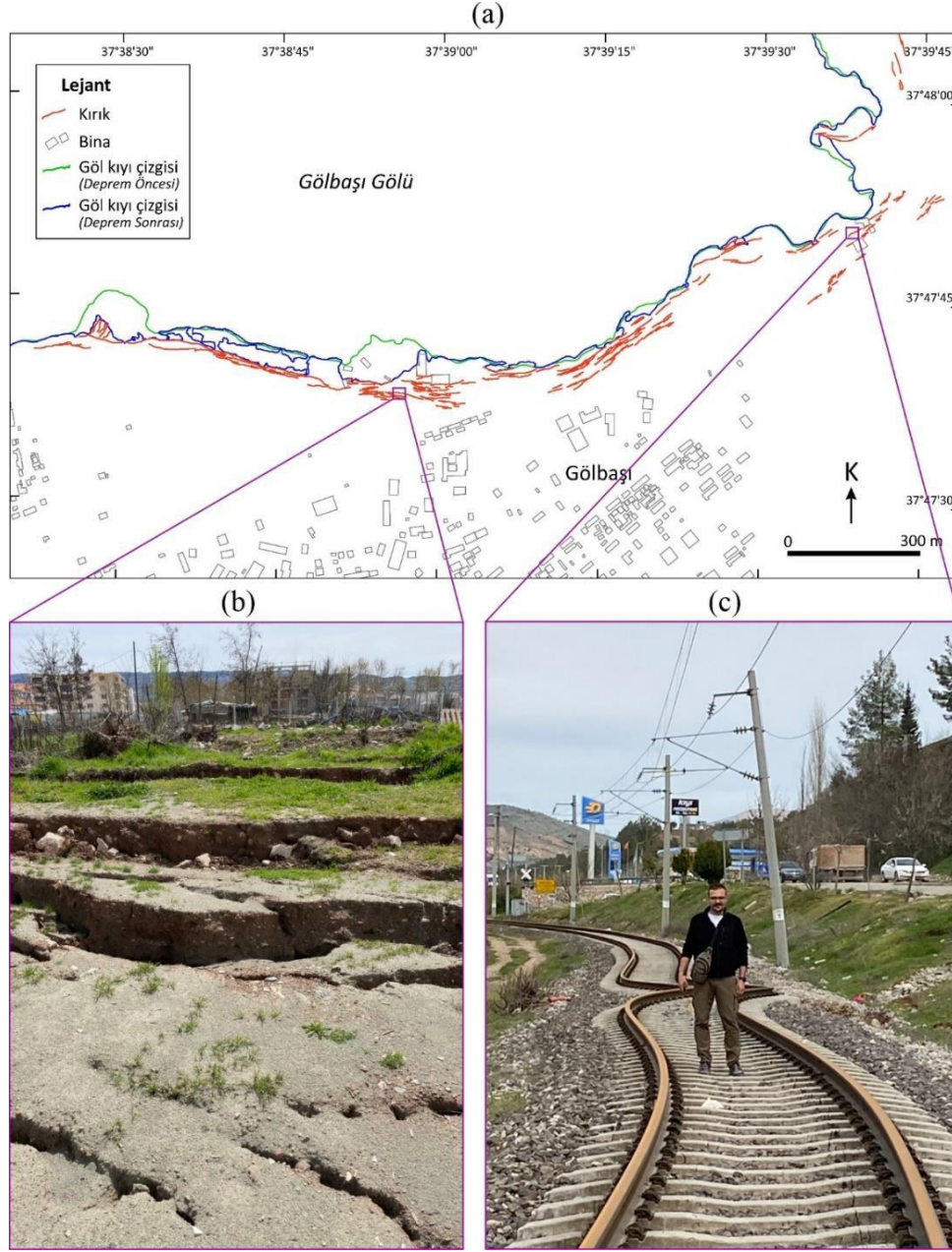
Figure 6. Examples of sudden settlement and tilting of buildings after Kahramanmaraş earthquakes.

sonucu oluşan çatlakların konumları Şekil 7a'da verilmiştir. Uydu görüntülerinden de gözlenebilen bu çatlaklardan tipik bir görüntü Şekil 7b'de sunulmuştur. Göle yakın inşa edilen Adıyaman Üniversitesi Gölbaşı MYO binalarında, parklarda, dinlenme tesislerinde ve göle yakın geçen tren raylarında önemi oranda hasar ve deformasyonlar kaydedilmiştir (Şekil 7c). Şekil 7c'de tren raylarında gözlenen deformasyonların daha yakın görüntüsü Şekil 8'de verilmiştir. Tren raylarında deprem sırasında oluşan bu deformasyonun oluşmasında, yanıl yayılmanın yanı sıra ilgili

noktada geçen fay segmentinin (Reitman vd., 2023) de etkili olduğu değerlendirilmiştir

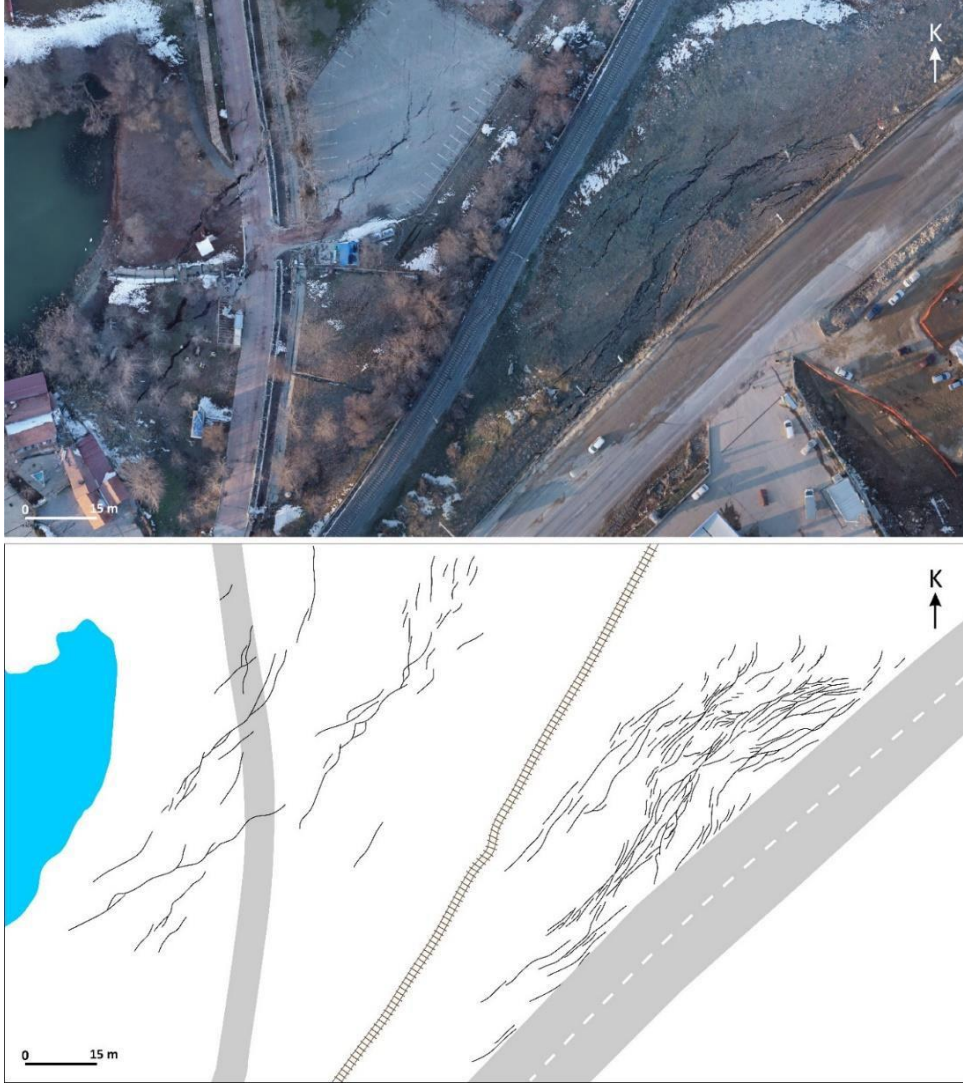
Bölgede sıvılaştan zeminlerin fizikomekanik özellikleri

Jeolojik ölçütler, yoğunluk ve gerilim ile hidrojeolojik koşullarının yanı sıra, zemin sıvılaşması değerlendirmesinde zemin bileşimiyle ilgili ölçütler dikkate alınmaktadır. Seed (1968) tarafından da belirtildiği üzere, sıvılaşma davranışı en yaygın olarak doymuş siltli kumlarda ve ince kumlarda meydana gelir. Zeminlerin tane boyu arttıkça sıvılaşmaya karşı



Şekil 7. a) Yanal yayılma sonucu göl kıyı çizgisinde meydana gelen değişim ve oluşan çatlakların konumları, b) yanıl yayılma sonucu zeminde bloklar halinde gerçekleşen yenilme ve c) tren raylarında yanıl yayılma ve fay segmenti kaynaklı deformasyonlar.

Figure 7. a) Changes in the lake's shoreline due to lateral spreading and locations of the cracks, b) lateral spreading induced failure of the soil in blocks and c) lateral spreading and fault segment-induced deformations in the train rails.

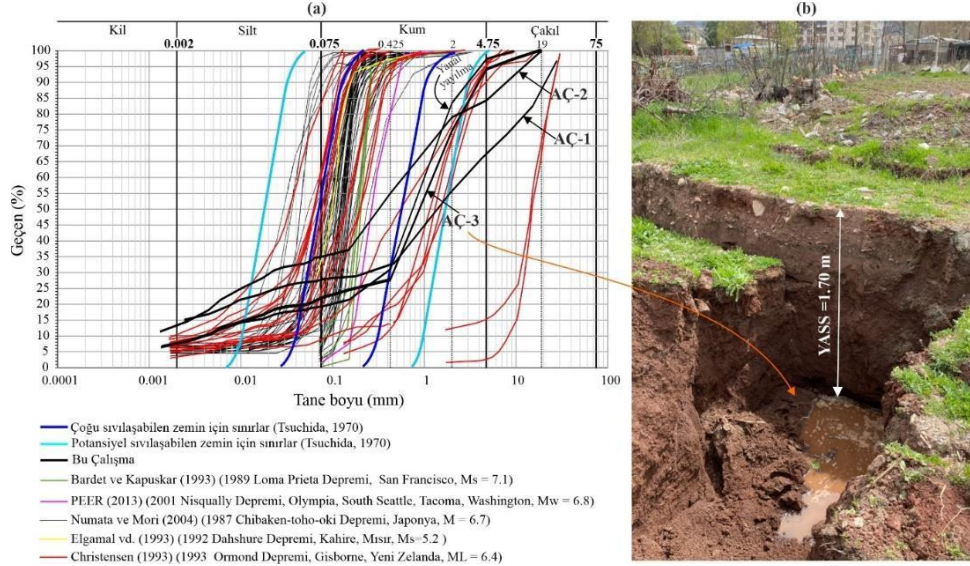


Şekil 8. Tren rayları yakın çevresinde deprem sırasında gelişen deformasyonlar.

Figure 8. The earthquake-induced deformations developed near the train rails.

direnci drenajın artması nedeniyle artar ve benzer şekilde ince taneli zeminlerde kohezyonun artmasına bağlı olarak sıvılaşmaya karşı direnç de artar (Numata ve Mori 2004). Tsuchida (1970) tane boyutu dağılım eğrilerinin zeminlerin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisini belirlemek için Japonya'da gerçekleşen önceki depremde

sıvılaşabilen zeminler üzerinde kapsamlı bir araştırma yürütmüş olup, Şekil 9a'de gösterilen "çoğu sıvılaşabilen" ve "potansiyel sıvılaşabilen" zeminler için tane boyutu dağılım sınırlarını önermiştir. Dünya genelinde meydana gelen depremlerde sıvılaşan bazı zeminlerde alınan örneklerin tane boyu dağılım grafikleri Şekil 9a'de verilmiştir.



Şekil 9. a) Kahramanmaraş ve diğer farklı depremlerdeki kum kaynamalarından alınan örneklerin tane boyu dağılım eğrileri ile sıvılaşılabilen ve sıvılaşamayan zeminleri ayırt etmek için kullanılan sınırlar, b) zemin profili ve örnekleme için araştırma çukurunun açılması ve bu araştırma çukurunda gözlenen yeraltı suyu seviyesi.

Figure 9. a) The grain size distribution curves of samples taken from sand boils in Kahramanmaraş and other different earthquakes and the boundaries used to distinguish liquefiable and non-liquefiable soils, b) the soil profile and the opening of the investigation pit for sampling and the groundwater level observed in this investigation pit.

Kahramanmaraş depremleri sonucu Gölbaşı yerleşim yerinde sıvılaşılan zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerin tespiti ve derinliğe bağlı değişiminin saptanması amacıyla, çalışma sahasında sıvılaşma ve yanal yayılma etkilerinin yoğun yaşandığı beş lokasyonda (Şekil 1) yirmişer metre derinliğe sahip sondaj çalışması gerçekleştirilmiştir. SK-1, SK-2 ve SK-5 no.lu sondaj kuyularının bulunduğu yerde kum kaynaması ve sıvılaşma kaynaklı deformasyonlar gözlenirken, SK-4 no.lu sondaj kuyusunun bulunduğu yerde ise zemin malzemesi önemli oranda yanal yayılmadan kaynaklanan deformasyona uğradığı saptanmıştır. Sondaj kuyularında tespit edilen yeraltı su seviyesi değerleri 1.10 ile 1.30 m arasında değişmekte olup, bu denli sığ yeraltı su seviyesi derinliği dinamik yükler altında zemin davranışı değişimi için uygun koşulları

oluşturmaktadır. Bu sondajların yanı sıra, kum kaynamaları gibi zemin sıvılaşma izlerinin gözlemlendiği üç lokasyonda araştırma çukurları açılmış (Şekil 9b), sıvılaşma davranışı gösterme potansiyeline sahip seviyelerden (kohezyonsuz kumlu siltli kısımlardan) örnekler alınmıştır. Ayrıca, yanal yayılmanın tespit edildiği yerde gerçekleşen yenilme sonucu açığa çıkan zemin malzemesinden benzer amaçlarla örnekleme gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma çukurlarında yeraltı su seviyesi değerlerinin sondaj kuyularında olduğu gibi oldukça sığ ve sıvılaşma için uygun koşulları oluşturacak şekilde 0.9 ile 2.3 arasında değiştiği saptanmıştır (Şekil 9b). Benzer şekilde bölgede daha önce Akil vd. (2008) tarafından gerçekleştirilen jeoteknik çalışmada ise yeraltı su seviyesi derinliğinin 0.65 ile 3.5 m. arasında değişim gösterdiği belirtilmiştir.

Sondaj kuyularında her 1.5 metrede bir standart penetrasyon deneyi gerçekleştirilmiş, SPT tüpü ile alınan örselenmemiş örnekler tane boyu dağılımı ve kıvam limitlerinin belirlenmesinde kullanılmış olup elde edilen sonuçlar ve değişim aralıkları Tablo 1'de verilmiştir. Sıvılaşmaya uğrayan bu zeminlerin sınıflamaları için Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması Sistemi (USCS) dikkate alınmıştır. Ayrıca, her sondaj kuyusunda UD tüpleri ile alınan temsili örneklerin birim hacim ağırlık ve makaslama dayanım parametreleri belirlenmiştir (Tablo 1). Tablo 1'de verilen makaslama dayanım parametrelerinden de anlaşılacağı üzere, söz konusu UD tüpleri ile alınan bu örneklerin alındığı seviyelerin kohezyonlu zeminler olduğu değerlendirilmiştir. SK-1, SK-2 ve SK-3 no.lu lokasyonlarda alınan siltli kum (SM) ve killi kum (SC) olarak sınıflandırılan örnekler üzerinde gerçekleştirilen doğrudan makaslama deneylerinde kohezyon değerlerinin 7.8 kPa ile 32.4 kPa arasında, içsel sürtünme açısı değerlerinin ise de 14°-21° arasında değişim gösterdiği saptanmıştır. SK-4 ve SK-5 no.lu sondaj kuyularında alınan yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılan örneklerin üç eksenli sıkışma deneyi (UU) ile belirlenen ortalama kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin sırasıyla 53 kPa ve 6° olduğu saptanmıştır.

Arazi çalışmaları sırasında, SK-1, SK-2, ve SK-5 no.lu sondaj kuyularının bulunduğu noktalarda sıvılaşma kaynaklı kum kaynamaları ve zemin deformasyonları gözlenmiştir. SK-1 no.lu sondajın ilk 10 metresinde siltli kum (SM), 10.45-16.00 metreleri arasında killi çakıl (GC) ve daha sonra yüksek plastisiteli kil (CH) şeklinde değişim göstermektedir. SK-2'nin ilk 6 metresinde siltli kum (SC), 6-11 metre arası siltli kum daha sonra killi kum ve siltli kum (SM) şeklinde devam etmiştir. Ancak, deprem kaynaklı yoğun deformasyonların kaydedildiği

SK-5 no.lu sondaj kuyusunda alınan örneklerin tamamı düşük ve yüksek plastisiteli kil (CL ve CH) olarak sınıflandırılmıştır. Sıvılaşmanın gözlemlendiği bu lokasyonların SM olarak sınıflandırılan seviyenin dışında kalan kısımların likit limit değerleri %42.6 gibi ortalama bir değer ile %33.8 ile %56.3 arasında değişim göstermekte olup, plastik limit değerleri ise %21.5 ortalama bir değer ile %17.6 ile %25.9 arasında değişmektedir. Yanal yayılmanın yaşandığı SK-4 no.lu sondajın ilk 13 metresindeki örnekler yüksek plastisiteli kil (CH) ve daha sonra kuyu tabanına kadar düşük plastisiteli kil (CL) olduğu belirlenmiştir. Bu lokasyonun kıvam limitleri oldukça yüksek değerlerde olup, likit limit değerinin %61.2'e kadar çıkmaktadır. Kum kaynaması gibi göstergelerin tespit edildiği yerlerde açılan üç ayrı araştırma çukurundan alınan temsili örnek üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda, bu zeminlerin killi kum (SC) olduğu ve likit limit değerlerinin 31.4 ile 35.5 ve plastik limit değerlerinin ise 19.7 ile 21.7 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Araştırma çukurlarında alınan örneklerin tane boyu dağılım grafikleri ise Şekil 9a'da sunulmuştur. Şekil 9a'da da anlaşılacağı üzere, sıvılaşan zeminler önemli oranda çakıl ve ince tane boyu malzeme içermekte olup, Tsuchida (1970) tarafından önerilen sınırların da dışına çıkabilmektedir.

Seed vd. (1983), Wang (1979) tarafından sunulan Çin'deki verileri temel alarak deprem sarsıntılarının sonucu killi zeminlerin önemli oranda dayanım kaybına maruz kaldığını belirtmişlerdir. Bu araştırmaya göre, kil içeriği (<0.005 mm) <%15, likit limit (LL) <%35 ve su içeriği >0.9×LL koşullarının sıvılaşma için kriter alınabileceğini vurgulamışlardır. Ancak, Bray vd. (2004) LL > 35 olan çok sayıda zeminin orta derecede sıvılaşma duyarlı olduğunu tespit ettiğinden, LL < 35 koşulunun mutlak bir standart olarak kullanılmasının doğru

Tablo 1. Örneklerin kıvam limitleri, birim hacim ağırlık ve makaslama dayanım parametreleri.**Table 2.** Consistency limits, unit weight and shear strength parameters of the samples.

Yanal Y.: yanal yayılma sonucu açığa çıkan zeminden alınan örnek; LL: likit limit; PL: plastik limit; NP: kohezyonsuz seviyeler; γ : birim hacim ağırlık; İTB: ince tane boyu (200 no.lu eleği geçen); c: kohezyon; ϕ : içsel sürtünme açısı; ^a: doğrudan makaslama deneyi ile belirlenmiştir, ^b: üç eksenli sıkışma deneyi (UU) ile belirlenmiştir;

Sondaj No	Örnek No	Derinlik (m)	γ (kN/m ³)	Kil (%)	Silt (%)	Çakıl (%)	İTB (%)	LL (%)	PL (%)	USCS	c (kPa)	ϕ (°)						
SK-1	SPT-1	1.50-1.95	17.60															
	UD-1	2.50-3.00											5.7	23.3	NP	SM		
	SPT-2	4.50-4.95											2.6	19.6	NP	SM		
	SPT-3	6.00-6.45	10.3										17.5	NP	SM			
	SPT-4	7.50-7.95	4.7										25.2	NP	SM			
	SPT-5	9.00-9.45	21.2										14.8	NP	SM			
	SPT-6	10.50-10.95	6.1										19.9	NP	SM			
	SPT-7	12.00-12.45	40.6										25.8	37.4	18.6	GC		
	SPT-8	13.50-13.95	12.3										17.2	44.6	29.5	39.1	19.9	GC
	SPT-9	15.00-15.45	12.8										17.4	38.9	30.2	37.7	18.4	GC
	SPT-10	16.50-16.95	47.1										38.1	1.3	85.2	54.6	25.2	CH
	SPT-11	18.00-18.45	42.9										35.0	2.1	77.9	55.1	24.6	CH
SPT-12	19.50-19.95	50.2	38.1	0.9	88.3	56.3	25.9	CH										
SK-2	SPT-1	1.50-1.95	17.90															
	SPT-2	3.00-3.45											2.5	29.9	34.4	19.3	SC	
	UD-1	4.00-4.50											5.1	33.3	35.2	17.9	SC	
	SPT-3	4.50-4.95	4.7										35.1	33.9	18.8	SC		
	SPT-4	6.00-6.45	9.4										27.9	36.1	19.0	SC		
	SPT-5	7.50-7.95	2.2										23.3	NP	SM			
	UD-2	8.00-8.50	5.1										25.1	NP	SM			
	SPT-6	9.00-9.45	1.9										22.3	NP	SM			
	SPT-7	10.50-10.95	4.7										24.4	NP	SM			
	SPT-8	12.00-12.45	5.6										19.9	NP	SM			
	SPT-9	13.50-13.95	11.2										30.4	33.8	18.6	SC		
	SPT-10	16.50-16.95	7.4										29.9	37.2	19.6	SC		
SPT-11	18.00-18.45	15.8	33.9	34.4	17.6	SC												
SPT-12	19.50-19.95	11.3	35.2	35.3	19.9	SC												
SK-3	SPT-1	1.50-1.95	18.20															
	SPT-2	3.00-3.45											2.5	34.2	36.4	20.3	SC	
	UD-1	4.00-4.50											4.2	37.1	36.1	22.2	SC	
	SPT-3	4.50-4.95	1.7										33.8	37.2	21.3	SC		
	SPT-4	6.00-6.45	8.4										40.2	39.1	19.6	SC		
	SPT-5	7.50-7.95	6.5										34.2	33.8	18.5	SC		
	SPT-6	9.00-9.45	1.6										41.3	34.0	19.5	SC		
	SPT-7	10.50-10.95	3.3										35.2	35.9	17.7	SC		
	SPT-8	12.00-12.45	5.1										29.9	36.2	19.2	SC		
	SPT-9	13.50-13.95	1.7										34.0	37.2	18.8	SC		
	SPT-10	16.50-16.95	9.4										28.6	35.2	19.5	SC		
	SPT-11	18.00-18.45	10.3										37.2	34.4	18.8	SC		
SPT-12	19.50-19.95	5.7	38.3	33.9	17.7	SC												
SK-4	SPT-1	1.50-1.95	18.50															
	UD-1	2.50-3.00											0.0	94.2	58.4	25.2	CH	
	SPT-2	3.00-3.45											0.0	91.2	60.3	24.6	CH	
	SPT-3	4.50-4.95	0.0										97.2	57.2	25.2	CH		
	SPT-4	6.00-6.45	0.0										94.4	60.1	25.8	CH		
	UD-2	7.00-7.50	0.0										93.3	59.9	24.4	CH		
	SPT-5	7.50-7.95	0.0										90.8	58.8	25.0	CH		
	SPT-6	9.00-9.45	0.0										92.6	57.7	24.9	CH		
	SPT-7	10.50-10.95	0.0										94.0	61.2	26.2	CH		
	SPT-8	12.00-12.45	0.0										94.7	60.3	25.8	CH		
	SPT-9	13.50-13.95	0.0										93.9	58.8	25.0	CH		
	SPT-10	15.00-15.45	3.8										70.6	44.4	22.2	CL		
	SPT-11	16.50-16.95	5.4										68.8	45.1	21.6	CL		
SPT-12	18.00-18.45	7.2	74.2	43.9	23.3	CL												
SPT-13	19.50-19.95	4.6	71.3	45.3	20.2	CL												
SK-5	SPT-1	1.50-1.95	18.30															
	UD-1	2.50-3.00											5.1	69.3	47.0	23.0	CL	
	SPT-2	3.00-3.45											32.3	36.3	3.5	68.6	43.3	22.2
	SPT-3	4.50-4.95	47.9										37.2	1.2	85.1	53.2	25.1	CH
	SPT-4	6.00-6.45	40.8										36.9	1.1	77.7	45.1	24.4	CL
	UD-2	7.00-7.50	38.4										44.9	1.1	83.3	41.2	23.3	CL
	SPT-5	7.50-7.95	36.3										32.4	3.8	68.7	44.4	22.8	CL
	SPT-6	9.00-9.45	52.3										37.9	0.0	90.2	55.9	25.3	CH
	SPT-7	10.50-10.95	37.7										41.8	2.2	79.5	45.1	24.2	CL
	SPT-8	12.00-12.45	35.9										29.6	5.7	65.5	47.2	23.3	CL
	SPT-9	13.50-13.95	32.0										29.2	1.6	61.2	44.9	22.7	CL
	SPT-10	15.00-15.45	30.8										37.1	2.2	67.9	43.0	21.2	CL
	SPT-11	16.50-16.95	33.4										38.8	3.0	72.2	42.8	20.8	CL
SPT-12	18.00-18.45	32.0	36.5	5.8	68.5	44.1	22.2	CL										
SPT-13	19.50-19.95	25.0	32.2	9.2	57.2	41.8	21.0	CL										
AÇ-1							31.4	19.7	SC									
AÇ-2							35.5	19.8	SC									
AÇ-3							33.0	20.6	SC									
Yanal Y.							31.8	21.7	SC									

olmadığını belirtmişlerdir. Nitekim, Menzer (2009) "1994 Northridge, 1999 Kocaeli ve 1999 Chi-Chi depremleri sonrasında oluşan zemin yenilmeleri düşük plastisiteli silt-kil karışımlarının üzerlerinde bulunan yapıya ciddi hasar verebilecek miktarda boşluk suyu basıncı üretebildiğini ve bu karışımların birim deformasyon altında yumuşama davranışı sergilediğini" vurgulamıştır. Söz konusu bu depremlerde elde edilen bu sonuçlar sonraki yıllarda ince tane boyu içeriği yüzdesinin daha yüksek olduğu zeminlerin sıvılaşabilirliğini kapsayan araştırmaların artmasını sağlamıştır (Menzer, 2009). Önceki depremlerde ve ilgili bilimsel çalışmalarda elde edilen bu sonuçlara benzer şekilde, bu çalışma kapsamında da kum kaynamasının gözleendiği noktalarda açılan araştırma çukurlarından alınan zeminlerin LL değerlerinin % 35 gibi değerlere ulaşmalarına rağmen, deprem sırasında önemli düzeyde sıvılaşma davranışı ve/veya bu sismik dalgalar karşısında önemli oranda dayanım kaybına uğrayarak deformasyon gösterdiği saptanmıştır. Benzer yüksek kıvam limiti değerleri sıvılaşmanın gerçekleştiği SK-1 ve SK-2 ile deprem kaynaklı yoğun deformasyon ve binalarda oturmanın gözleendiği SK-5 no.lu sondaj kuyularının bulunduğu yerlerden derlenen örneklerde de tespit edilmiştir.

Standart Penetrasyon Deneyi Temel Alan Sıvılaşma Analizleri

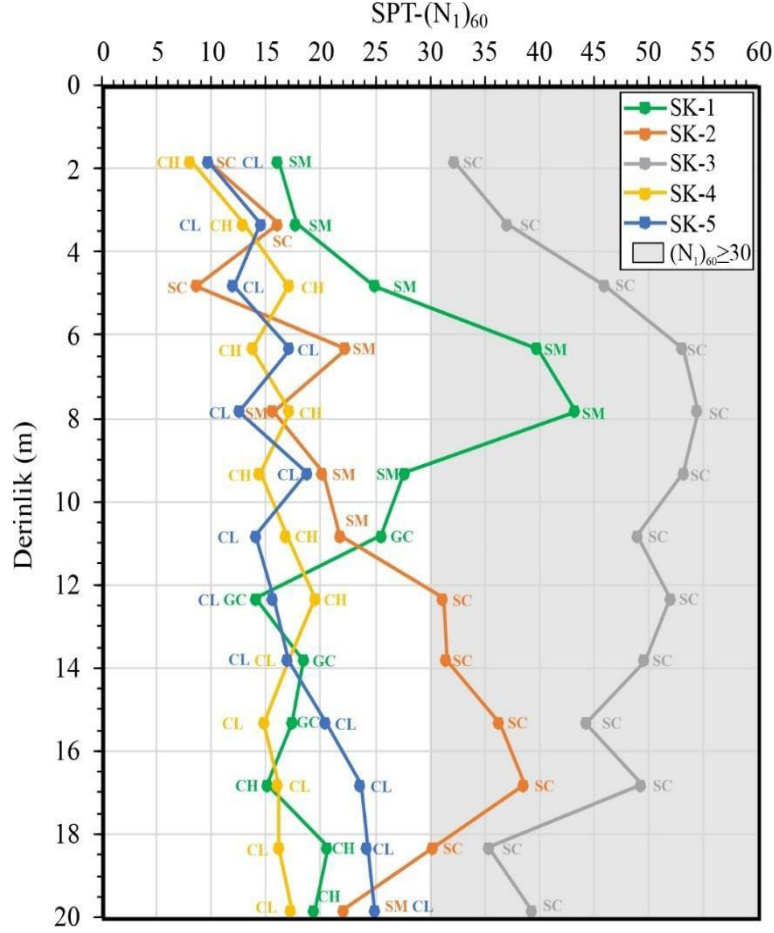
Yapılan SPT deneylerinde elde edilen düzeltilmiş SPT- $(N_1)_{60}$ değerlerinin derinliğe bağlı değişim grafikleri ve ilgili derinliklerde alınan zemin örneklerin USCS göre zemin sınıfları Şekil 10'da verilmiştir. Çalışma alanı zeminlerinin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde SPT verileri ile tane boyu dağılımı verilerini esas alan ve Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen, zamanla Seed

(1979), Seed ve Idriss (1982), Seed vd. (1985), Seed ve DeAlba (1986) ve son olarak Youd ve Idriss (2001) tarafından modifiye edilen yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde "tekrarlı gerilim

oranı (CSR)" kullanılmakta olup, depremde meydana gelen gerilimler ile zeminde gelişen ortalama tekrarlı makaslama geriliminin (τ_{av}), tekrarlı gerilimlerin meydana gelmesinde önce zemine etki eden ilk düşey gerilmeye (σ'_0) oranı olarak tanımlanmaktadır.

Sıvılaşma değerlendirmesi için önerilen bütün ölçütler kullanıldıktan sonra, sıvılaşma ihtimaline sahip herhangi bir zeminde sıvılaşmanın meydana gelip gelmeyeceğinin belirlenmesinde, tekrarlı dayanım oranının ($CRR_{7.5}$) depremin neden olduğu tekrarlı gerilim oranına (CSR) bölünmesi ile elde edilen ve sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (F_L) olarak tanımlanan parametre kullanılmaktadır. Bu sıvılaşma analiz yöntemi $(N_1)_{60} < 30$ koşulu için geçerli olup, $(N_1)_{60} \geq 30$ olduğu durumlarda sıvılaşma olgusunu sağlayacak boşluk suyu basıncını meydana gelebileceği belirtilmiştir (Youd ve Idriss, 2001). Sıvılaşma potansiyeline sahip güncel çökellerin yanal ve düşey yöndeki ani litolojik değişimleri F_L parametresinin oldukça noktasal değerlendirme yapmasına neden olmakta ve bu parametre deprem esnasından zemin malzemesinin büyük ölçekte nasıl bir davranış sergileyeceği konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, Iwasaki vd. (1982) zeminlerin sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesinde F_L temel alan Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (I_L) kavramını önermişlerdir.

Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (F_L) ve Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (I_L) değerleri proje sahasındaki sondaj lokasyonları için belirlenmiştir. Sıvılaşma potansiyeli indeksi parametresinin hesaplamasında Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen ölçütlerin yanı sıra Sonmez ve Gokceoglu (2005) tarafından yapılan öneriler de dikkate alınmıştır.



Şekil 10. SPT- $(N_1)_{60}$ değerlerinin derinliğe bağlı değişimi ve ilgili derinliklerde alınan örneklerin USCS'e göre zemin sınıflamaları.

Figure 10. Depth-dependent variation of SPT- $(N_1)_{60}$ values and USCS based soil classifications of the samples taken at the related depths.

Gerçekleştirilen bu analizlerde SK-3, SK-4 ve SK-5 no.lu sondajların bulunduğu yerlerde sıvılaşma riski derecesi “çok düşük” çıkmıştır. Ancak, SK-1 ve SK-2 no.lu sondaj kuyularında analizlere tabi tutulan seviyelerin zeminlerin sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (F_L) değerleri 0.13 ile 0.69 arasında değişmektedir. Bu iki lokasyonun sıvılaşma potansiyeli indeksi değerlerinin (I_L) 20-42 arasında değişmekte olup, sıvılaşma riski derecesinin “çok yüksek” olduğu saptanmıştır.

SONUÇLAR

Bu araştırmanın amaçları kapsamında yapılan sondaj çalışmaları, araştırma çukuru, örselenmiş ve örselenmemiş zemin örneklerinin derlenmesi, uygun arazi ve laboratuvar deneylerinin yanı sıra arazi çalışmaları sonucunda ulaşılan genel verilerin bir bütün analizleri sonucu elde edilen sonuçlar dikkate alınarak yapılan değerlendirme ve analizler aşağıda özet bir şekilde sunulmuştur:

- Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) çalışma alanının merkezinden geçmesi açısından önemli olup, Gölbaşı ilçesinin depremselliğini ve zemin dinamiğini genel olarak K55D uzanımlı 90 km uzunluğunda ve önceki çalışmalarda önemli sismik boşluklardan biri olarak değerlendirilen Gölbaşı-Türkoğlu segmenti etkilemektedir.
- Gölbaşı-Türkoğlu segmentinin de kırıldığı Kahramanmaraş-Pazarcık (Mw 7.8) ve Kahramanmaraş-Elbistan (Mw 7.7) depremleri aynı gün içerisinde 9 saat ara ile gerçekleşmiş olup, bütün deprem bölgesinde olduğu gibi, gevşek güncel alüvyonal çökeller üzerinde kurulu olan Adıyaman Gölbaşı yerleşim alanı içerisindeki yapılaşma açısından da oldukça yıkıcı sonuçlar doğurmuştur. Bölgedeki en yoğun hasar göl kıyı şeridinin güneyi ile ilçe merkezinde geçen Balkar- Erkenek karayolu arasında gerçekleşmiştir.
- İlçedeki hasarların inşaat kalitesinden kaynaklanan binaların doğrudan yıkılması ile zemin sıvılaşması sonrası taşıma gücü kaybı ve sonrasında oluşan yanal yayılmadan kaynakladığı saptanmıştır. Çalışma alanındaki zemin sıvılaşma olgusu genel olarak kum kaynaması, deprem sonrası oluşan çatlaklardan zeminin yukarı doğru çıkarak sığ derinliklerde kalmasından kaynaklanan zemin deformasyonları şeklinde gözlenmiştir. Dinamik yükler altında zeminlerde gerçekleşen bu davranış değişikliği yapıların yan yatması, eğilmesi, batması ile yanal yayılmadan kaynaklanan kütle hareketleri ve göl kıyı çizgisi değişimi ile sonuçlanmıştır. Ancak, yapılan arazi gözlemlerinde, deprem sonrası Gölbaşı-Türkoğlu segmentinde oluşan yüzey kırıklarındaki atım değerlerinin yaklaşık 4 metre civarında olmasına karşın, kaya birimlerin üzerinde doğrudan inşa edilen ve çoğunlukla az katlı binalarda herhangi bir hasar tespit edilmemiştir.
- Çalışma sahasında yanal yayılmanın gerçekleştiği yerlerde deprem öncesi ve deprem sonrası uydu görüntülerini kullanarak, yatay yanal yer değiştirmenin
 - 2.8 m. ile 12.6 m. arasında değiştiği saptanmıştır. Yanal yayılma sonucu göl kıyı çizgisinde değişim, zeminde bloklar halinde yenilme ve göle yakın geçen tren raylarında önemi oranda hasar ve deformasyonlar meydana gelmiştir.
- Kum kaynamaları ve sıvılaşma kaynaklı deformasyonların gözlemlendiği farklı lokasyonlarda üç araştırma çukuru ile üç sondaj kuyusu (SK-1, SK-2 ve SK-5) ve yanal yayılmanın olduğu yerde ise bir sondaj kuyusu (SK-4) kuyusu açılmıştır. Ayrıca, sıvılaşma kaynaklı herhangi bir deformasyonun gözlenmediği yerde ise bölgede sıvılaşan ve sıvılaşmayan zeminlerin karşılaştırmak amacıyla bir adet sondaj (SK-3) gerçekleştirilmiştir. Bu sondaj kuyularında ve araştırma çukurlarında yeraltı su seviyesinin sıvılaşma için uygun koşulları sağlayacak şekilde 0.9 ile 2.3 m. arasında değiştiği saptanmıştır.
- Kum kaynamalarının gözlemlendiği Balkan otel yanında açılan SK-1 no.lu sondaj kuyusunun ilk 10 metresinde siltli kum (SM) daha sonra killi çakıl (GC) ve yüksek plastisiteli kil (CH) ile karşılaşmıştır. Kum kaynamaları, zemin deformasyonları, binalarda yan yatma ve batma gibi mühendislik sorunların yaşandığı Yeşilay sitesi içerisinde açılan SK-2 no.lu sondaj kuyusunda killi ve siltli kum (SC, SM) gibi zemin profili ile karşılaşmıştır. Ancak, deprem sonrası binalarda oturma ve yan yatma ile yol ve kaldırımlardaki yoğun deformasyonların kaydedildiği SK-5 no.lu sondaj kuyusunun tamamında ise düşük ve yüksek plastisiteli kil (CL ve CH) olarak sınıflandırılan zeminler tespit edilmiştir.

Sıvılaşma riskinin beklenmediği ancak düşük SPT-(N₁)₆₀ değerlerine sahip SK-5 no.lu lokasyonda gözlenen bu durumun, deprem sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının etkisiyle zeminin taşıma kapasitesinde meydana gelen azalmadan kaynaklandığı düşünülmüştür. Kum kaynamasının olduğu yerlerde açılan araştırma çukurundan alınan temsili örneklerin de killi kum (SC) olduğu belirlenmiştir.

- Yanal yayılmanın yaşandığı SK-4 no.lu sondaj kuyusunun ilk 13 metresinde yüksek plastisiteli kil (CH) ve daha sonra düşük plastisiteli kil (CL) tespit edilmiş olup, sıvılaşmaya yatkın herhangi bir zemin seviyesi saptanmamıştır. Söz konusu bu durum, oldukça düşük SPT-N darbe sayılarının da elde edildiği bu lokasyonda daha derinlerde bir sıvılaşmanın veya dinamik yükler altındaki zeminin makaslama dayanım parametrelerinde meydana gelen azalmadan kaynaklanan bir şev duraysızlığının olabileceğini göstermektedir.

- Kum kaynamasının gözleendiği noktalarda açılan araştırma çukurlarından alınan zeminlerin LL değerlerinin % 35 gibi değerlere ulaşmalarına rağmen, Kahramanmaraş depremleri sırasında önemli düzeyde sıvılaşma davranışı ve dayanım kaybına uğrayarak deformasyon gösterdiği belirlenmiştir. Aynı zemin sorunları yüksek kıvam limiti değerlerine sahip SK-1, SK-2, ve SK-5 no.lu sondaj kuyularının bulunduğu yerlerde de saptanmıştır.

- Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının (F_L) ve sıvılaşma potansiyeli indeksi (I_L) değerleri proje sahasındaki sondaj lokasyonları için gerçekleştirilmiştir. Ancak, bu analizlerde yanal yayılma ve sıvılaşmadan kaynaklı zemin deformasyonların gözleendiği SK-4 ve SK-5 no.lu sondaj lokasyonlarında sıvılaşma riski derecesi "çok düşük" elde edilmiştir.

Sıvılaşma ve sıvılaşma kaynaklı kütle hareketlerin gözleendiği bu lokasyonlarda elde edilen bu sonuçların, sıvılaşma analizlerinde kullanılan yöntemlerdeki belirsizlik ve sınırlamaların anlaşılması açısından yararlı olacağı değerlendirilmiştir.

KATKI BELIRTME

Bu çalışma Harun Ünal tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirilen yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- Akıl, B., 2006. Gölbaşı (Adıyaman) Beldesi İmar Planına Esas Jeoteknik Etüt Gerektiren Alanların (JEGA) Jeolojik Jeoteknik Etüt Raporu, İller Bankası Genel Müdürlüğü, Makine ve Sondaj Dairesi Başkanlığı, Jeoteknik Şube Müdürlüğü, Rapor No: İLB-I/02-007-002. 252 s.
- Akıl, B., Akpınar, K., Üçkardeşler, C., Araz, H., Sağlam, M., Ecemiş, B. ve Uran, Ş.B., 2008. Doğu Anadolu Fay Zonu üzerinde yer alan Gölbaşı (Adıyaman) yerleşim alanındaki zeminlerin jeoteknik özellikleri ve değerlendirilmesi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 51 (1), 43-57.
- Andrews, D.C.A., Martin, G.R., 2000. Criteria for liquefaction of silty soils, Proc. of the 12th World Conf. on Earthquake Engineering, Auckland, NZ. Paper 0312, 2000.
- Athanasopoulos, G.A., Kechagias, G.C., Zekkos, D., Batilas, A., Karatzia, X., Lyrantzaki, F., Platis, A., 2020. Lateral spreading of ports in the 2014 Cephalonia, Greece, earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 128, 105874. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.105874

- Bardet, J.P., Kapuskar, M., 1993. Liquefaction sand boils in San Francisco during 1989 Loma Prieta earthquake. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No. 3, 543-562. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:3(543)
- Bray, J.D., Sancio, R.B., Reimer, M.F., Durgunoglu, T., 2004. Liquefaction Susceptibility of Fine-grained Soils. *Proc. 11th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd Inter. Conf. on Earthquake Geotech. Engrg.*, Berkeley, CA, Jan. 7-9, Vol. 1, pp. 655-662.
- Christensen, S.A., 1993. Ormond earthquake liquefaction reconnaissance report. *Bulletin of The New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 26 (3), pp. 312-328. DOI: <https://doi.org/10.5459/bnzsee.26.3.312-328>
- Demirtaş, R., Yılmaz, R., 1996. Seismotectonics of Turkey, "Preliminary approach to earthquake forecasting based on long-term variations in seismic activity and present seismicity." *Publ. Of Ministry of Public Works and Settlement*, 95, June 1996, Ankara
- Elgamal, A.W., Adalier, K. ve Amer M., 1993. Liquefaction During the October 12, 1992 Egyptian Dahshure Earthquake. *Proceedings of Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, St. Louis, Missouri, June 1-4, Paper No. 14.18.
- Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R., Emoto, K., 1986. Study on liquefaction induced permanent ground displacements, *Association for the Development of Earthquake Prediction in Japan*, Tokyo.
- Herece, E., 2008. Doğu Anadolu Fay (DAF) Jeoloji Atlası 1/100.000 Ölçekli. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Yayınları.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S. ve Sato, H., 1982. Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods, *Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation*, pp. 1319-1330, Seattle (USA).
- Kramer, S.L., 2013. Lateral Spreading. In: Bobrowsky, P.T. (eds) *Encyclopedia of Natural Hazards. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_215.
- Menzer, P., 2009. Assessment of Liquefaction Susceptibility of Fine Grained Soils. *Middle East Technical University, Department of Civil Engineering*, 167 p.
- Numata, A., Mori S., 2004. Limits in the gradation curves of liquefiable soils. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 1190.
- PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center), 2013. Some Observations of Geotechnical Aspects of the February 28, 2001, Nisqually Earthquake in Olympia, South Seattle, and Tacoma, Washington. *Soil Liquefaction and Ground Failure*. Accessed December 9, 2013, <http://peer.berkeley.edu/publications/nisqually/geotech/liquefaction/distribution/>.
- Reitman, N.G., Briggs, R.W., Barnhart, W.D., Thompson Jobe, J.A., DuRoss, C.B., Hatem, A.E., Gold, R.D., Akçiz, S., Koehler, R.D., Mejstrik, J.D., Collett, C., 2023, Fault rupture mapping of the 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence from satellite data: U.S. Geological Survey data release, <https://doi.org/10.5066/P985I7U2>.

- Şanverdi, A., 1992. Gölbaşı (Adıyaman) İmar Planına Esas Jeolojik Etüt Raporu, İller Bankası 10. Bölge Müdürlüğü.
- Şanverdi, A., 2005. Gölbaşı (Adıyaman) İmar Planına Esas Jeolojik Etüt Raporu, İller Bankası 10. Bölge Müdürlüğü.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A., 1987. Türkiye'nin diri fayları ve depremsellikleri. MTA Rap. 8174, 394.
- Seed, H.B., 1968. The Fourth Terzaghi Lecture: Landslides During Earthquakes Due to Liquefaction. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol, 94, No, SM5, 1053-1122 pp.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., Arango, I., 1983. Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, No. GT3, pp 458-482.
- Seed, H. B., 1979. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 105, 201-255.
- Seed, H.B., De Alba, 1986. Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands, American Society for Precision Engineering Conference on Use of In-Situ Testing in Geotechnical Engineering, Spec. No. 6, New York (USA).
- Seed, H.B., Idriss, I.M., 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquake, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 134 pages.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. ve Chung, R.M., 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, pp. 1425–1445.
- Sonmez, H., Gokceoglu, C., 2005. A liquefaction severity index suggested for engineering practice, Environmental Geology, Vol.48, pp. 81-91.
- Tsuchida, H., 1970. Evaluation of liquefaction potential of sandy deposits and measures against liquefaction induced damage. Proceedings of the annual seminar of the Port and Harbour Research Institute, 1970, (3-1)-(3-33)(in Japanese).
- Wang, W. S., 1979. Some Findings in Soil Liquefaction. Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China.
- Yönlü, Ö., 2012. Doğu Anadolu fay Zonu'nun Gölbaşı (Adıyaman) ile Karataş (Adana) arasındaki kesiminin geç Kuvaterner aktivitesi. Doktora Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Eskişehir. 439s.
- Youd, T. L., Idriss, I.M., 2001. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, pp. 297–313.



Türkiye’de Deprem Oluş Düzenleri

Earthquake patterns in Türkiye

DOĞAN KALAFAT^{1*} 

¹ Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Geliş (received): 06 Eylül (September) 2023 Kabul (accepted): 15 Kasım (November) 2023

ÖZ

Depremler doğal olaylardır. Bu doğa olayını felakete dönüştüren ise toplumlardır. Depremleri tanımak, nasıl oluştukları ve oluş düzenleri hakkında bilgi sahibi olmak deprem tehlikesinin belirlenmesinde önemli parametrelerden birini oluşturmaktadır. Depremlerin düzeni (pattern-örüntü) hakkında bilgi sahibi olmak, deprem riskini azaltmaya yönelik çalışmalara önemli katkı sağlamaktadır. Her kırık zonunun veya parçasının deprem oluş şekli farklıdır ancak bu çok detaylı bir analiz ve sismolojik kayıtların yorumlanmasıyla mümkün olabilir. Bu bağlamda depremlerin oluş düzenleri hakkında bilgi sahibi olmak bize tektonik yapıların olası davranışları hakkında bir yol haritası sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Oluş düzeni, öncü şok, ana şok, artçı şok, deprem fırtınası, deprem dizisi

ABSTRACT

Earthquakes are natural events. It is the societies that turn this natural phenomenon into a disaster. Recognizing earthquakes, and having information about how they occur and their occurrence patterns constitute one of the important parameters in determining the earthquake hazard. Knowing the pattern of earthquakes makes an important contribution to the studies aimed at reducing earthquake risk. The earthquake occurrence pattern of each fracture zone or fragment is different, but this can only be possible with a very detailed analysis and interpretation of seismological records. In this context, knowing the occurrence patterns of earthquakes gives us a roadmap about the possible behavior of tectonic structures.

Keywords: Occurrence pattern, foreshock, mainshock, aftershock, earthquake swarm, earthquake series

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1356144>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: kalafato@boun.edu.tr

GİRİŞ

Deprem oluş düzenlerini belirlemeye yönelik çalışmalar, büyük ve tahripkâr depremlerden önce, yer ve zaman boyutunda deprem aktivitesinin ne tür ve nasıl bir gelişme

gösterdiğini konu alır. Bu yöndeki çalışmalar için çok uzun yıllardan beri veri birikimini kaynak olarak aldığından ya çok uzun süreli bir tarihsel deprem geçmişi olan Türkiye,

Japonya, Endonezya, Şili, Çin Halk Cumhuriyeti gibi ülkelerde, ya da yeterince deprem veri arşivi sağlayabilmiş ülkelerde daha kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Burada önemle vurgulanması gereken bir nokta, deprem oluş düzenleri ile bunların meydana geldiği yerlerin tektonik yapısı ve rejimi arasındaki ilişkidir. Genelde deprem oluş düzenlerinin küresel anlamda bugüne kadar izleri Kanamori (1981) ve Rikitake (1982) tarafından sınıflandırılmaya çalışılmıştır. Büyük sığ odaklı depremlerin, zaman boyutunda oluş düzenleri Mogi (1968) tarafından, Shimazaki ve Nakata (1980)' dan hareketle modellemeye ve örneklerle göstermeye çalışılmıştır. Aynı şekilde ülkemizde Kalafat (2014, 2017) tarafından yapılan çalışmalar da konuya dikkat çekilmiştir.

DEPREM OLUŞ DÜZENLERİ

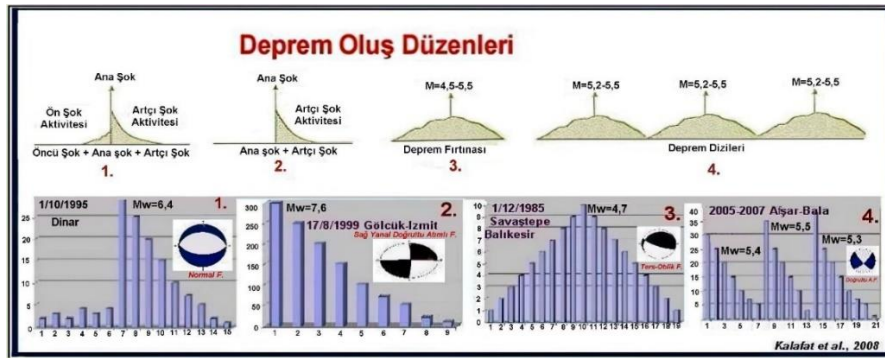
“Deprem Oluş Düzenleri (Earthquake Occurrence Patterns)” her bölgenin mevcut kabuk, kırık ve tektonik yapısına göre değişmektedir. Buna örnek olarak küresel çapta Japonya'nın Hokkaido adasının yakınlarında meydana gelen depremler, yine Japonya'da

meydana gelen 1965-1967 Matsushiro deprem fırtınası ve Portekiz'e bağlı Azor Takım adalarında Sao Jorge Adası 1964 Rosais Deprem serisi verilebilir. Özellikle ülkemizde 2000 yılından sonra aletsel donanım bakımından sismik ağların gelişmesine paralel olarak farklı tektonik yapılarda kaydedilen depremlerin özelliklerinin daha sağlıklı belirlenmesi ile her yörenin deprem oluş düzenleri hakkında değerli bilgiler edinilmeye başlanmıştır.

Ülkemizde 4 farklı deprem oluş düzeni vardır (Şekil 1).

Bunlar sırası ile;

1. Öncü şok (Foreshocks) + Ana şok (Mainshocks) + Artçı şok (Aftershocks)
2. Ana şok + Artçı şok (Mainshocks) + Artçı şok (Aftershocks)
3. Deprem Fırtınası (Earthquake Swarm)
4. Deprem Dizileri (Earthquake Sequences-Earthquake Series)



Şekil 1. Ülkemizdeki deprem oluş düzenleri (Kalafat ve diğ., 2008)

Figure 1. Earthquake occurrence patterns in our country (Kalafat et al., 2008)

Öncü şok, Ana şok, Artçı şok tanımları

Öncü Şok: Büyük bir deprem öncesi meydana gelen küçük ve ya orta büyüklükteki deprem serisidir.

Ana Şok: Kırık parçasının enerjisinin büyük ölçüde boşaldığı ve büyüklüğü genellikle $M_l > 5,0$

olan depremlerdir. Ülkemizde yaşanan ana şoklar genellikle $M_l > 6,0$ olup, deprem sonrası açığa çıkan enerjinin büyük çoğunluğu ana şok ile boşalır.

Artçı Şok: Ana şok sonrası enerjisini tam olarak boşaltamayan kırık parçasının, artçı şoklarla

kalan kısmın enerjisini tamamen boşalması sağlanır. Artçı şoklar genel olarak kırılan parçanın boyuna ve miktarına göre devam eder. Her ana şoktan sonra artçı şoklar meydana gelir. Ana şok sonrası meydana gelen en büyük artçı şok, genelde ana şoktan 1 birim aşağı olacak şekilde gerçekleşir. Ana şok sonrası gerçekleşen artçı şoklar günler, haftalar, aylar hatta yıllarca sürebilir, bu kırık parçasında kalan ve ana şok ile boşalmayan enerji, artçı şoklar ile süreci tamamlar, artçı şoklar ana şok ile yırtılan kırık parçalarının miktarına ve kırılan alanın tektonik yapısıyla ilgilidir. Büyük depremlerde ($M_w > 7,0$) genelde artçı şoklar bir yıldan fazla sürebilir. Artçı şoklar zamana bağlı olarak hem sıklıkları, hem de büyüklükleri azalarak uzun bir süre devam eder.

1. Öncü Şok+Ana Şok+Artçı Şok Oluş Düzeni

Bu tür deprem oluş düzeni genellikle Batı Anadolu'da kabuğun daha kırılğan olduğu, sıç odaklı ve normal kırılmaların bulunduğu tektonik yapılarda görülmektedir. Bu tür oluş düzeninde 1 hafta veya daha uzun süren önemli miktarda büyüklüğü $M_l > 4,0$ ve üzeri yoğun bir deprem etkinliği gözlenir. Ana şok öncesi kısa bir sakinlik süreci (kitlenme) oluşur ve bunun ardından Anaşok meydana gelir (Şekil 1).

Buna en güzel örnek ülkemizde 1 Ekim 1995 yılında meydana gelen Dinar Depremi ($M_w = 6,3$) verilebilir. Dinar depremi öncesi 26 Eylül tarihinde başlayan ön şok aktivitesi 30 Eylül tarihine kadar devam etmiş ve bu depremler halk arasında büyük paniğe ve huzursuzluğa neden olmuştur. Dolayısı ile bu depremler halkın büyük çoğunluğunun evlerine girmemesine neden olmuş ve 1 Ekim'de meydana gelen ana şokta can kaybının fazla olmamasını sağlamıştır. Kısaca ana şok öncesi önemli miktarda öncü şok meydana gelmiş ve kısa bir sakinlik (susunluk) dönemi sonrası ana şok ve ardından artçı şoklar meydana gelmiştir. Bu deprem genişleme (extensional) tektoniği ile ilgilidir ve normal kırılma ile meydana gelmiştir (Kalafat, 1997).

Diğer bir benzer örnek ise, 6 Nisan 2009 tarihinde İtalya'da meydana gelen L'Aquila Depremi ($M_w = 6,2$) örnek olarak verilebilir (L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 2009, <http://www.ingv.it>). Ön şok aktivitesi Aralık 2008'de başlamıştır ve uzun süre devam etmiştir. Son önemli öncü şok 30 Mart 2009 tarihinde meydana gelmiş ve 6 Nisan'da da ana şok meydana gelmiştir. Deprem doğu-batı genişleme tektoniği ile ilgilidir ve normal kırılma ile meydana gelmiştir (INGV, 2009 ; Kalafat ve diğ., 2011).

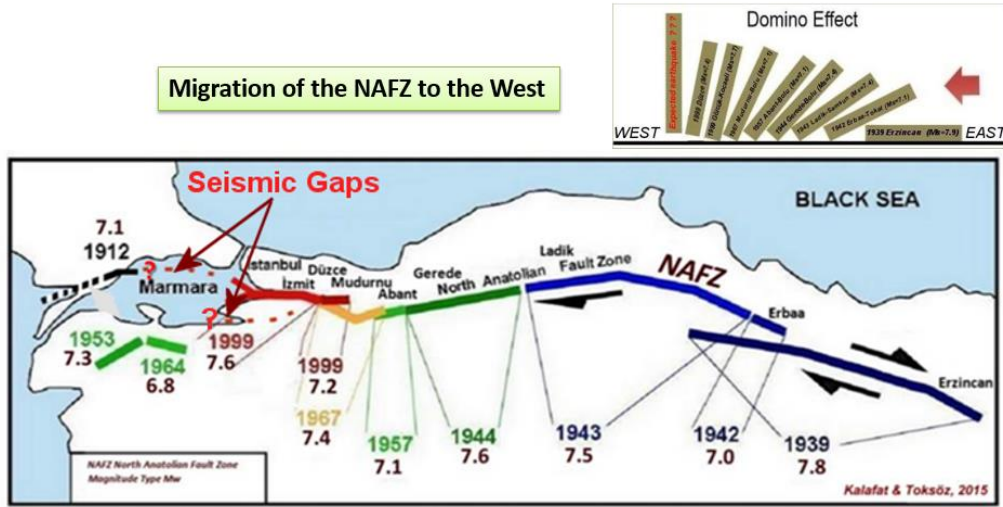
2. Ana Şok+Artçı Şok Oluş Düzeni

Bu oluş düzeni genelde ana kırık zonları üzerindeki kırık parçalarında (segment) meydana gelen bir oluş düzenidir (Şekil 1). Bunlara örnek olarak Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ: Kırık Kuşağı) ve Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerindeki ana kırık parçalarında meydana gelen büyük depremler verilebilir. Yakın tarihimizden bir örnek olarak da 1999 Gölcük-Doğu Marmara, Düzce depremleri ve 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-GD Anadolu Depremleri verilebilir (Şekil 2). Bu tür deprem oluş düzeninde, ana kırık parçaları uzun yıllar enerji (strain energy) biriktirir ve büyük depremler (ana şok) ile enerji boşalımı gerçekleşir.

Bunu takip eden zaman diliminde ise artçı şoklar meydana gelir. Artçı depremler ana depremin büyüklüğüne ve kırılan alanın boyutuna bağlı olarak günlerce, aylarca, hatta yıllarca sürebilir. Artçı depremler zamana bağlı olarak hem büyüklükleri, hem de sıklıkları azalarak devam eder (Şekil 3-4). Ana kırık zonlarında görülen bu tür deprem oluş düzeninde ilgili kırık zonunda uzun süre haberci veya öncül yığılmalar (hazırlık safhası) meydana gelir. Yani ana şok meydana gelmeden kırık zonunda uzun sürecek olan bir deprem etkinliği kısaca büyük deprem öncesi hazırlık safhası olur. Yani ana şoktan önce yaklaşık 10-15 yıl ilgili kırık parçasında önemli bir deprem aktivitesi gözlenir. Ve kırık parçası ana şok ile enerjisinin çok büyük bir kısmını boşaltır.

Ayrıca bu tür kırık zonları içinde kırılmayan parçalar olabilir ki bunlar sismik boşluk (seismic gap) veya sismik gedik olarak tanımlanırlar. Sismik boşluk bir seri büyük ve yıkıcı depremin oluşturduğu yırtılma zonları arasında kalan ve diğer bir büyük deprem tarafından doldurulabilen boşluklar olarak tanımlanırlar. Buna en iyi örnek ülkemizdeki iki büyük kırık zonu olan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) verilebilir. Her iki kırık zonunda da bir büyük deprem sonrası zon içerisinde bulunan kırık parçalarının birbirlerini tetiklemesi ve kırması söz konusu olur. Örneğin 1939 Erzincan Depremi sonrası KAFZ'nun bir domino taşı gibi zon içerisindeki parçaları kırarak (tetikleyerek) yarı sistematik olarak batıya göçü ve son olarak 1999 depremleri ile Marmara Denizi'ne kadar ulaşması tetiklenmiş depremlere (triggered earthquakes) güzel bir örnek oluşturmuştur

(Şekil 2). Şu an KAFZ'nun Marmara Denizi içinden geçen kuzey kolunda kırılmayan ve sismik boşluk olarak tanımlanan bir parçası (segment) olup, istatistiksel olarak 2090 yılına kadar %95 olasılıkla bu boşluğun kırılarak deprem serisinin (sequence) tamamlanacağını ifade edilmektedir (Kalafat, 2007; 2010; 2011; Kalafat ve diğ., 2007). Yine 1967 Adapazarı-Mudurnusuyu Vadisi Depremi sonrasında KAFZ'nun İznik Gölü'nün güneyinden Gemlik körfezine bağlanan güney kolu da sismik boşluk olarak tanımlanmıştır. Her iki kol da gelecekte büyük bir deprem üreterek sismik boşluğu dolduracaktır. Ancak hangi kolun önce kırılacağı bilinmemektedir. Aynı şekilde 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri de (1. Deprem Mw=7,7 ve 9 saatlik bir aradan sonra 2. Deprem Mw=7,6) tetiklenmiş depremlere güzel bir örnek olarak verilebilir.



Şekil 2. 1939'dan beri Kuzey Anadolu Fayı boyunca depremlerin batıya doğru göçü (Kalafat ve Toksöz, 2015; 2017)

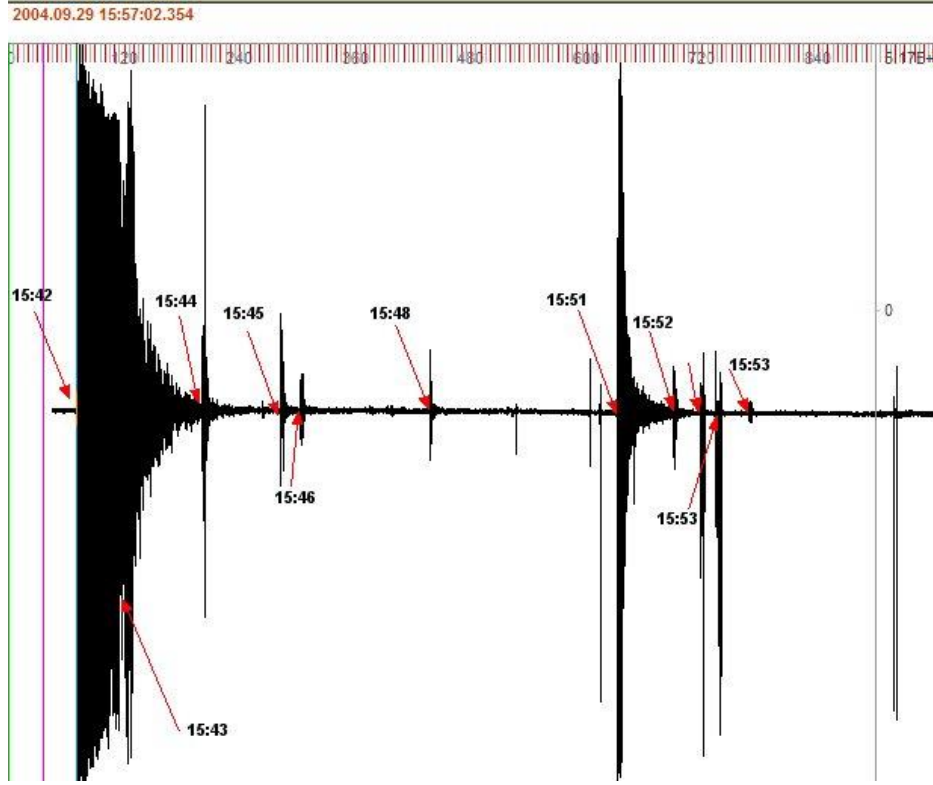
Figure 2. Westward migration of earthquakes since 1939 along the North Anatolian Fault (Kalafat and Toksöz, 2015; 2017)

Diğer bir konu ise bazı depremlerin farklı bir şekilde medyada yorumlanmasıdır. Örneğin 23 Kasım 2022 Sarıdere-Gölyaka (Düzce) Depremini bazı yerbilimciler 1999 Düzce

depreminin artçısı olarak yorumlamışlardır. Halbuki 23 Kasım 2022 Depremi Anaşok + Artçı şok düzeninde meydana gelmiş bir depremdir ve 12 Kasım 1999 Düzce Depremi'nin kesinlikle

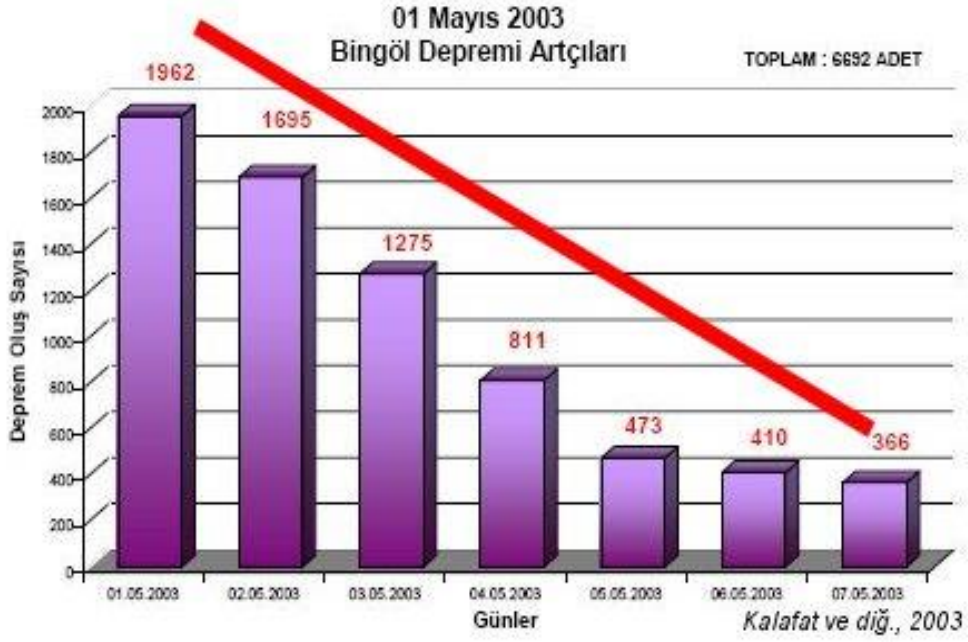
artçısı değildir. Deprem, bölgedeki ikincil aktif tali bir kırık zonunda meydana gelmiştir ve ana şoku takip eden süreç içerisinde kendi artçı depremleri ile zamana bağlı olarak hem sıklıkları hem de büyüklükleri azalarak devam etmiştir ve tek bir kırılma örneğini taşımaktadır (Şekil 5). Genel olarak çalışmada nitelendirilen kavramların yer bilimciler tam olarak bilinmemesi farklı yorumlara neden olmaktadır. Yaklaşık 23 yıl sonra bir artçı depremin olması söz konusu

olmadığı gibi, depremin dış merkezi bölgede çok fazla miktarda bulunan ikincil (tali) aktif fay zonlarının birinde meydana gelmiştir. Genel olarak ana artçılar Omori kanununa göre ve bugüne kadar meydana gelen Türkiye depremlerinde gözlemlendiği gibi ilk 1-2 gün içinde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla bu deprem bir artçı deprem olarak nitelendirilemez. Yaklaşık bir haftalık süreç içerisinde çözümü yapılan artçı deprem sayısı 485'i bulmuştur.



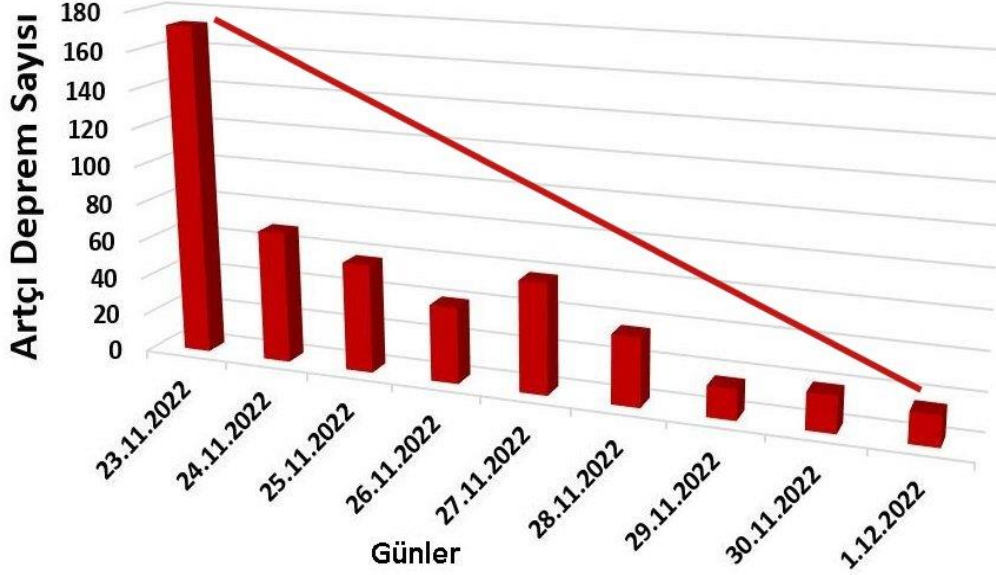
Şekil 3. Tek kırılma örneği (Anaşok + Artçı şoklar; Kalafat, 2000)

Figure 3. Example of a single rupture (Mainshock + Aftershocks; Kalafat, 2000)



Şekil 4. Artçı depremlerin zamana bağlı olarak azalımı (Kalafat ve diğ., 2003; Kalafat, 2019)

Figure 4. Time-dependent reduction of aftershocks (Kalafat et al., 2003; Kalafat, 2019)



Şekil 5. 23 Kasım 2022 Gölyaka-Düzce depreminin artçılarının zamana bağlı olarak dağılımı (Kalafat, 2023)

Figure 5. Distribution of aftershocks of the 23 November 2022 Gölyaka-Düzce earthquake according to time (Kalafat, 2023)

3- Deprem Fırtınası Oluş Düzeni

Deprem fırtınaları özellikle Batı Anadolu'da görülen bir deprem oluş düzenidir. Deprem Fırtınaları, Batı Anadolu'da kabuğun ince, çok kırılğan, ısı akısının yüksek olduğu, sığ odaklı depremlerin meydana geldiği ve çok parçalı kırıkların yoğun olduğu tektonik yapılarda meydana gelen bir deprem oluş düzenidir. Buna en güzel örnek ise Savaştepe-Balıkesir ve Kırkağaç Manisa depremleri verilebilir. Savaştepe depremleri bir fırtına karakterinde başlar, örneğin hafta başı günde 30-50 mikro deprem meydana gelir, bu depremlerden yalnızca birkaçı (büyüklüğü $M \geq 3,5$) yerel halk tarafından hissedilir, hafta ortası büyüklüğü genelde $M > 4,5$ ve üzeri orta büyüklükte bir deprem meydana gelir ve etkinlik hafta sonuna kadar azalarak devam eder. 2001 yılı Haziran ayında Savaştepe'de başlayan deprem etkinliği fırtına şeklinde devam etmiş, en yüksek magnitudü (büyüklüğü) deprem 22 Haziran'da ($M = 5,0$) olmuştur. Ekim ayı sonuna kadar bölgede 300 adet deprem meydana gelmiştir (Kalafat ve diğ., 2003). Deprem fırtınalarında zaman zaman gün içerisinde meydana gelen deprem sayısı 100-150 sayısını bulur, ancak bunların çok azı insanlar tarafından hafif bir şekilde hissedilir. Bu yüzden Savaştepe'de yaşayan yöre halkı çok fazla panik yapmaz ve günlük yaşantılarına devam eder. Yaklaşık 7-10 günlük bir süreden sonra ise etkinlik biter. Dolayısı ile Deprem Fırtınaları birkaç gün, bazen günlerce sürebilmektedir (Şekil 1). Diğer bir örnek ise Termal-Yalova Deprem fırtınasıdır. 2 Ağustos 2014 tarihinde Yalova-Termal ilçesinde büyüklüğü $M = 1,8$ olan depremlerle başlayan deprem fırtınası, 3 Ağustos 2014 tarihinde büyüklükleri $M = 1,3-3,1$ olan meydana gelen 18 deprem ile yoğun olarak devam etmiştir (Kalafat, 2014). Deprem fırtınası 4 Ağustos 2014 tarihinde gece yarısı büyüklüğü $M = 4,0$ deprem ile devam etmiştir. Deprem, Termal yerleşimi ve yakın çevresinde hissedilmiş ve vatandaşlar arasında paniğe neden olmuştur. Gün içerisinde 28 deprem meydana gelmiştir. Bölge genel olarak Batı Anadolu'nun genişleme rejiminin etkisi

altında bulunduğundan birçok irili-ufaklı diri kırık parçasını barındırmaktadır. Bu düzen içerisinde birçok mikro-deprem birkaç gün boyunca meydana gelebilmekte kırık parçalarının boyları, miktarları ve özelliklerine göre yaklaşık olarak $M > 4,0$ büyüklüğünde depremler üretebilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle bu depremlerin kendi aralarında artçı – öncü olarak sınıflandırmak doğru değildir. Üçüncü bir örnek 2019'da meydana gelen Kocaiskan-Kırkağaç Deprem fırtınasıdır. 12 Mayıs tarihinde başlayan mikro-deprem etkinliği en büyüğü $M = 4,5$ olan orta büyüklükte bir deprem ile devam etmiş ve deprem fırtınası ay sonuna kadar sürmüştür.

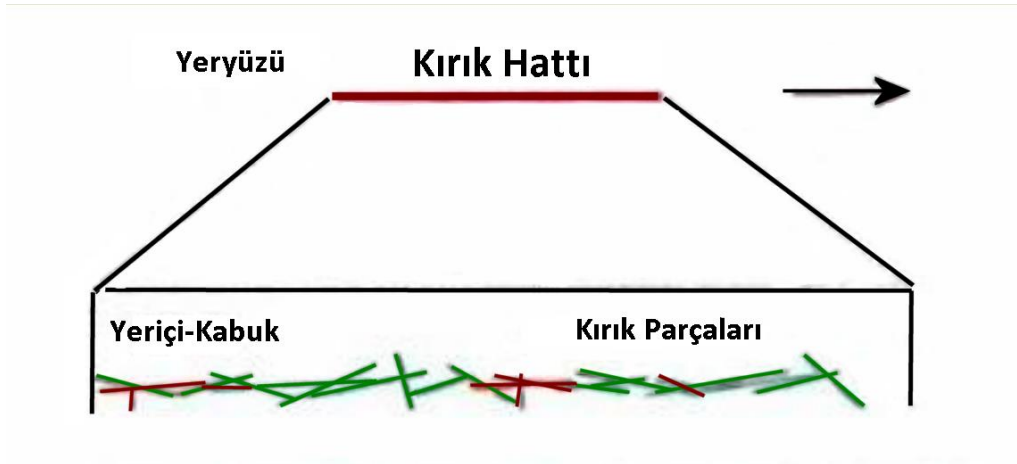
4- Deprem Dizileri (Earthquake Series-Sequences) Oluş Düzeni

Deprem dizileri genellikle içlerinde birçok diri kırık parçası barındıran ikincil (tali) kırık zonlarında görülen bir deprem oluş düzenidir ve ülkemizde son yıllarda değişik yörelerde bu tür deprem oluş düzeni görülmektedir. Genelde Deprem Dizileri içlerinde birden fazla deprem fırtınası barındıran bir oluş düzenidir ve özellikle ikincil aktif kırık zonlarında görülmektedir (Şekil 1). Bu tür kırık zonlarında çok fazla kırık parçası bulunmaktadır. Dolayısı ile deprem dizileri bu tür kırık zonlarında bulunan kırık parçalarının uzunluklarına ve miktarlarına bağlı olarak uzun süre devam edebilir. Bunlara en güzel örnek Batı Anadolu ve Orta Anadolu'daki ikincil aktif kırık zonları verilebilir. Deprem dizilerinin yoğun görüldüğü yerlere örnek olarak özellikle güney batı kıyılarımız, Denizli civarları, Midilli-Edremit-Karaburun açıkları, Oniki Adalar bölgesi ve Marmaris civarları verilebilir.

Bu tip oluş düzeninde meydana gelen depremler genelde sığ odaklı depremlerdir. İkincil aktif kırık zonlarında ve kabuk içerisindeki kırık parçaları birbirleri ile ilişki içerisinde. Zon içerisinde bir kırık parçasında meydana gelen bir ana şok sonrası, enerjinin bir kısmı yandaki komşu kırık parçasına transfer olur, böylece o parçaya enerji yüklenmesinden dolayı yeni bir kırılma kısa bir süre içerisinde meydana gelir, bu ardışık olarak zon içerisinde ne kadar parça varsa, zaman içerisinde tüm parçalar ard arada kırılarak

deprem dizisini (serisini) tamamlar (Şekil 1; Şekil 6). Deprem dizilerinde kırılan parçaların miktarı ve uzunluklarına bağlı olarak birçok ana şok ve onları takip eden her parçanın kırılmasından sonra onların artçı şokları meydana gelir. Ancak burada önemli olan bir parçanın artçı şokları devam ederken, yeni bir parça kırılır ve onun artçıları da devreye girer, bu o kırık zonu içinde ne kadar parça varsa bir domino taşı etkisi gibi art arda her biri kırılarak ana şokları ve onların artçı şoklarını içerir. Genel olarak ülkemizde meydana gelen Deprem dizilerinde (serilerinde) kırılan parça sayısı 4-6 arasında değişmektedir (Şekil 1).

Deprem dizilerine örnek olarak; 17-21 Ekim 2005 Sığacık Körfezi-Seferihisar (İzmir) deprem etkinliği verilebilir. Bölgede 17 Ekim 2005 tarihinde $M=5,7$ depremle başlayan etkinlik aynı gün büyüklüğü $M=5,9$ ile devam etmiş ve bu zaman diliminde yüzlerce hafif ve çok hafif şiddette depremler meydana gelmiştir. 21 Ekim günü büyüklüğü $M=5,9$ olan bir deprem daha olmuştur. 31 Ekim 2005 itibari ile bölgede toplam 3500 adet deprem meydana gelmiştir. Özellikle Karaburun civarındaki depremlerde deprem oluş düzeni "Deprem Dizileri" şeklinde meydana gelmektedir (Kalafat, 2005).



Şekil 6. Deprem dizilerine neden olan kırık parçalarının iki boyutlu görünümü (Kalafat, 2000)

Figure 6. Two-dimensional view of fracture segments that cause earthquake sequences (Kalafat, 2000)

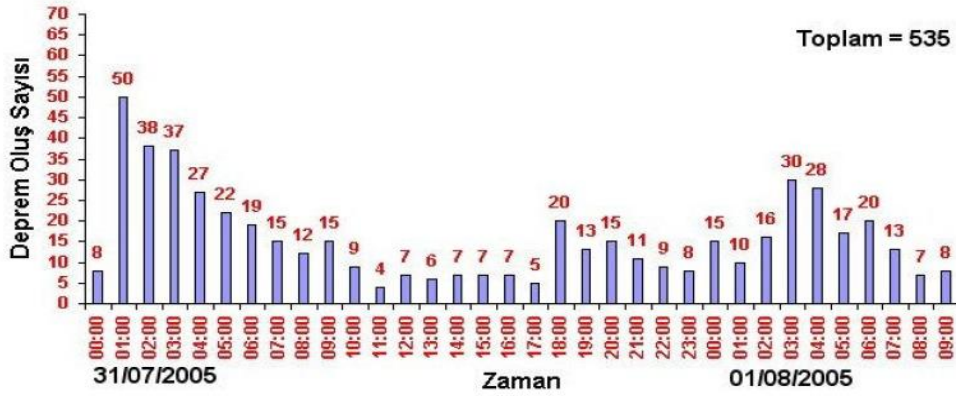
Diğer bir örnek 2005-2007 yılları arası meydana gelen Bala-Ankara Deprem Dizisi'dir. 31 Temmuz 2005'de $M=5,3$ ilk deprem meydana gelmiş, 20 Aralık 2007 tarihinde büyüklüğü $M=5,7$ olan depremle etkinlik devam etmiştir (Kalafat ve diğ., 2008). Bölge genel anlamda Anadolu Blok'unun iç deformasyon alanıdır ve aktif tali kırıklar mevcuttur. Ve bu kırıklar orta büyüklükte depremler üretmişlerdir. Bölgedeki deprem oluş düzeni Deprem Dizileri şeklindedir.

Deprem dizileri bölgede bulunan aktif kırıkların uzunluklarına ve miktarlarına bağlı olarak büyüklükleri genel olarak $M=4,7-5,7$ arasında depremler üretirler. Histogramdaki en küçük deprem $M=2,4$ olarak verilmiştir (Şekil 7). Çiftlikköy (Muğla) – Gökova Körfezi depremleri dizisi, 2004 yılı Temmuz ayı başlarında başlamıştır. Ancak depremlerdeki yoğun artış 2 Ağustos 2004 tarihinden itibaren görülmüştür. Bu süreç içerisinde depremlerin büyüklükleri

genelde $M=3,0 - 4,0$ arasında değişmiştir. 3 – 4 Ağustos 2004 tarihlerinde yerel saat ile 16:11 ($M=5,0$), 06:01 ($M=5,4$) ve 07:19'da ($M=5,0$) meydana gelen depremler bölgedeki deprem oluş düzeninin karakteristiği içerisinde meydana gelmiş bir aktivite olarak değerlendirilmiştir. 8 Ağustos 2004'e kadar bölgede kaydedilen deprem sayısı 1308'e ulaşmıştır. Depremin kaynağının bulunduğu bölge, Gökova Körfezi'ni

oluşturan ve genel uzanımı körfeze paralel olan normal kırıklar tarafından denetlenmektedir. Körfezin kuzey kolunu oluşturan doğu-batı gidişli normal kırıklar ile ilişkide bulunan ve kara içine doğru genel olarak KD-GB ve KB-GD gidişli normal, doğrultu atım bileşeni olan kırıklar mevcuttur. 3 – 4 Ağustos depremlerine neden olan bu kırık parçalarıdır.

Temmuz-Ağustos 2005 Afşar-Bala Deprem Dizisi



Şekil 7. 2005 Afşar-Bala (Ankara) Deprem Dizisinde depremlerin zamana göre dağılımı (Kalafat ve diğ., 2008)

Figure 7. Distribution of earthquakes by time in 2005 Afşar-Bala (Ankara) Earthquake Series (Kalafat et al., 2008)

Deprem Dizilerine Diğer Örnekler

1987 yılı Rodos-Marmaris Açıkları Deprem Dizisi: 1 Ocak'ta başlayan deprem etkinliği, uzun bir süre bölgede devam etmiş, yalnızca 1 ay içinde büyüklüğü $M=4,0 - 4,4$ arası 10 adet deprem meydana gelmiş olup, 4 Nisan'da $M=4,6$ ve 19 Haziran'da $M=5,0$ büyüklüğünde olan depremler Marmaris-Köyceğiz'de etkili olmuştur. Etkinlik, Kasım ayının sonlarına kadar devam etmiştir. Datça-Rodos-Marmaris üçgeninde, deprem etkinliği yıl sonuna kadar devam etmiş, bölgede yalnızca $M=4,0 - 5,1$ arası depremlerin sayısı 25'i bulmuştur (Kalafat ve diğ., 2003).

2003 yılı Denizli-Buldan Deprem Dizisi: 23 Temmuz'daki deprem ($M=5,2$) ile 26 Temmuz'daki depremler ($M=5,0$ ve $M=5,6$)

dizinin en önemli depremlerini oluşturmuştur. Yaklaşık 1 haftalık dönemde meydana gelen deprem sayısı 833 adettir. Yalnızca 23-29 Temmuz arası büyüklüğü $M \geq 4,0-4,9$ arası 8 adet deprem meydana gelmiştir (Kalafat, 2021).

Bunun dışında özellikle (2009-2012) Simav-Kütahya'da ve 2017 yılında Ayvacık-Çanakkale'de meydana gelen depremler ülkemizde görülen "Deprem Dizileri"nin önemli örneklerini oluşturur. Bu depremler ile ilgili karşılaştırma Tablo 1'de verilmiştir. Her iki deprem dizisinde de ana şok sayısı 10-11 civarı olup, toplam artçı sayısı 4804-4860 arası olmuştur. Kırık parçalarının mekanizmaları KB-GD gidişli olup, normal kırılma karakteri taşıdıkları gözlenmiştir (Kalafat, 2017).

Tablo 1: Simav-Kütahya (2009-2012) ve Ayvacık-Çanakale (2017) Deprem Dizileri (Kalafat, 2017)**Table 1:** Simav-Kütahya (2009-2012) and Ayvacık-Çanakale (2017) Earthquake Sequences (Kalafat, 2017)

Bölge	Zaman Aralığı	Dizideki Ana Deprem Sayısı	Toplam Deprem Sayısı	Büyüklik Aralığı (M)	Odak Derinliği (km)	Fay Parçalarının Ana Doğrultusu	Artçı Depremlerin Ana Doğrultusu	Fay Parçalarının Mekanizması	Hâkim Gerilme Yönleri
Simav	2009 Şubat-2012 Mayıs	3 Adet Mw=5,1-5,8 4 Adet Mw=4,8-4,9	4804	1.0-5.9	8-9	KB-GD	KB-GD	Normal	K-G
Ayvacık	2017 Ocak-Nisan	4 Adet Mw=5,0-5,2 3 Adet Mw=4,8-4,9	4860	0.8-5.4	8-9	KB-GD	KB-GD	Normal	K-G

SONUÇLAR

Ulusal ölçekte deprem verilerinin artması ile birlikte ülkemizdeki tektonik yapıların deprem oluş düzenleri hakkında da değerli bilgiler edinilmeye başlanılmıştır. Deprem oluş düzenleri her bölgenin mevcut kabuk, kırık ve tektonik yapısına göre değişmektedir. Bu bağlamda ülkemizde 4 farklı deprem oluş düzeni gözlenmiştir. Bu bilgiler ışığında belirli bir yörede meydana gelen deprem süreçlerinin takibi,

yorumlanması bilimsel anlamda mümkün olmakta, topluma daha sağlıklı ve yanıltıcı olmayan bilgilerin verilmesine olanak sağlamaktadır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Boğaziçi Üniversitesi Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından (SRP/BAP projesi No.19846) desteklenmiştir. Boğaziçi Üniversitesi Araştırma Fonu Komisyonuna ve üyelerine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Kanamori, H., 1981. The Nature of Seismicity Patterns before Large Earthquakes, Earthquake Prediction I.R., Maurice Ewing Series 4, A.G.U., P. 1-19. Kalafat, D., 1997. 1 Ekim 1995 Dinar Depremi ve Saha gözlemleri, Deprem Araştırma Bülteni, Sayı 74, 95-113 (in Turkish).

Kalafat, D., 2000. Marmara Denizi ve Çevresinin Depremselliğine Bir Bakış, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Ulusal Jeofizik Toplantısı 2000,

Genişletilmiş Özetler Kitapçığı s. 128-132, 23-25 Kasım 2000, Ankara (in Turkish).

Kalafat, D., Öz, G., Kara, M., Kekovalı, K., Püskülcü, S., Güneş, Y., 2003. Türkiye ve Dolayları Deprem Kataloğu (1998-2002; M_z 4.0) An Earthquake Catalogue for Turkey and Surrounding Area, Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, Yayın No: 802, 135 s. (in Turkish).

Kalafat, D, Güneş, Y., Kekovalı, K., 2003. 27 Ocak Pülümür (Tunceli) ve 1 Mayıs 2003 Sancak (Bingöl) Depremleri (January 27, 2003 Pülümür-Tunceli and May 01, 2003 Sancak-Bingöl Earthquakes), TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası (UCEAT- The Geophysical Engineers of Turkey) Türkiye 15. Jeofizik Kurultayı ve Sergisi Bildiri

- Özetleri Kitabı (15th Geophysical Congress and Exhibition of Turkey Abstract Book) p.24-25, Dokuz Eylül Üniversitesi S.E. Merkezi Salonları (DESEM Congress Center), 20-24 Ekim 2003 (October 20-24, 2003, in Turkish).
- Kalafat, D., 2005. 17_21 Ekim 2005 Sigacık Seferihisar Depremleri, http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/Depremler/17_21Ekim2005_Sigacik_Seferihisar_Depremleri.pdf
- Kalafat, D., 2007. Doğa Marmara'yı depremlerle sınavacak mı?, Tekirdağ ve Çevresinin depremlerine toplu bir bakış, Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi TYSB ve TMMOB Jeofizik Müh. Odası Panel Kitapçığı s. 58-68, 17 Mayıs 2007, Tekirdağ.
- Kalafat, D., Kekovalı, K., Güneş, Y., Kara, M., 2007. İzlenen Marmara Denizi ve beklenen Marmara depremi, ATAG-11 Aktif Tektonik Araştırma Gurubu 11. Çalıştayı Bildiri Özleri Kitabı, s. 50, 8-9 Kasım 2007 TUBİTAK MAM Gebze, İstanbul.
- Kalafat, D., Kekovalı, K., Pınar, A., 2008. The 30 July 2005 (Mw=5.4), and the 20 – 26 December 2007 (Mw=5.5; Mw=5.3) Afşar-Bala (Ankara) Earthquakes Series in Central Turkey, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-09923, 2008, EGU General Assembly 2008, 13-18 April 2008, Vienna, Austria.
- Kalafat, D., Kekovalı, K., Deniz, P., Güneş, Y., Pınar, A., Horasan, G., 2008. 31 Temmuz 2005-1 Ağustos 2005 ve 20-27 Aralık 2007 Afşar-Bala (ANKARA) Deprem Dizisi : July 31, 2005 - August 1, 2005 and December 2007, 2007 Afşar-Bala (ANKARA) Earthquake Sequence, İstanbul Yerbilimleri Dergisi, C. 21, S. 2, SS. 47-60, Y. 2008, İstanbul.
- Kalafat, D., Kekovalı, K., Deniz, P., Güneş, Y., Pınar, A., Horasan, G., 2008. 31 Temmuz-1 Ağustos 2005 ve 20-27 Aralık 2007 Afşar-Bala (Ankara) Deprem Dizisi, DAYK2008, T.C. Sakarya Üniversitesi Doğal Afetler ve Yerbilimleri Kulübü, 1. Ulusal Doğal Afetler ve Yerbilimleri Sempozyumu, Bildiriler Kitabı (in Turkish), s. 21-30, 19-22 Mart 2008, Adapazarı.
- Kalafat, D., 2010. Kuzey Anadolu Fayı (KAF)"nın Marmara'daki Ayak İzleri, İstanbul'un Afetlerden Zarar Görebilirliği Sempozyumu (İZAS), Bildiri Özetleri Kitapçığı, s. 19, 04-05 Ekim 2010, İstanbul Üniversitesi.
- Kalafat, D., 2011. Marmara Bölgesi'nin Depremselliği ve Deprem Ağının Önemi, 1.Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (TDMSK), 11s., 1-14 Ekim 2011, ODTÜ-Ankara.
- Kalafat, D., Polat, R., Poyraz, S.A., Kekovalı, K., 2011. Birbirini Etkileyen (Tetikleyen) Depremlere Batı Anadolu'dan bir örnek : 19 Mayıs 2011 Simav Deprem Etkinliği, Aktif Tektonik Araştırma Grubu 15. Çalıştayı Bildiri Özleri Kitabı, s.54-55., 19-22 Ekim 2011, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Kalafat, D., 2014. Türkiye'de deprem oluş düzenlerine güncel 2 Örnek: 2-4 Ağustos 2014 Termal -Yalova ve 24 Ağustos 2014 Ağlasun-Burdur Deprem Etkinliği, Aktif Tektonik Araştırma Grubu ATAG 18. Toplantısı Bildiri Özleri Kitapçığı s.34, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi 5-7 Kasım 2014, Muğla.
- Kalafat, D., Toksöz, M.N., 2015. A Catalogue of Source Parameters of Moderate and Strong Earthquakes for Turkey and its Surrounding Area (1938-2015), 2015 AGU Fall Meeting, Abstract ID: 65134, S11A-2736.
- Kalafat D, Toksöz, M.N., 2017. An overview of the seismic activity and gaps in the Marmara Sea Area, JpGU AGU Joint Meeting 2017 Japan Geoscience Union, Presentation Number: SSS13-P12, 20-25 Mayıs 2017 Makuhari Messe International Conference Hall, Makuhari-Tokyo, Japan.
- Kalafat, D., 2017. Son yıllarda ülkemizde görülen deprem etkinliklerine örnekler: Simav-Kütahya (2009-2012) ve Ayvacık-Çanakkale (2017) deprem diziler (Examples

of earthquake events in our country in recent years: Simav-Kütahya (2009-2012) and Ayvacık-Çanakkale (2017) earthquake sequences), 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı 11-13 Ekim 2017 Anadolu Üniversitesi-Eskişehir.

Kalafat, D., 2019. 22 Mayıs 1971 ve 1 Mayıs 2003 Bingöl Depremleri - 22 May 1971 and 1 May 2003 Bingöl Earthquakes, Uluslararası katılımlı 72. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri ve Tam Metin Bildiriler Kitabı, with international participations 72nd Geological Congress of Turkey, The Proceedings and Abstract Book, s.597-599, 28 Ocak-1 Şubat 2019, ODTÜ, Ankara.

Kalafat, D., 2021. Current Seismotectonic Properties of Denizli and Its Near-Region (Western Turkey), FEB-Fresenius Environmental Bulletin, Volume 30-No.

04A/2021 pages 4457-4476, ISSN 1018-4619.

Kalafat, D., 2023. 23 Kasım 2023 Gölyaka-Düzce Depremi, Teknik Rapor (Yayınlanmamış).

Mogi, K., 1968. Sequential Occurrence of recent great earthquakes, J. Phys.Earth., 16, p. 30-36. INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 2009. The L'Aquila seismic sequence - April 2009, <http://portale.ingv.it/primo-piano-1/news-archive/2009-news/april-6-earthquake>.

Rikitake, T., 1982. Current Research in earthquake Prediction, DEPS 03, Capt., Reidel Pub. Co., Tokyo.

Shimazaki, K and Nakata, T., 1980. Time-predictable recurrence model for large earthquakes, Geophys., Res.Lett., 7, p.279-282.



Jeotermal Sahalarda Fayların Eğiminin Ve Permeabilite Kontrastının Sıcaklık Ve Akış Dağılımına Etkisinin Sayısal Modellenmesi

Numerical Simulation Of The Effects Of The Fault Dip Angle And Permeability Contrast On Heat Transfer And Fluid Flow In Geothermal Sites

BAHAR GÜVEM ¹, DENİZ ORTA ¹, ASİN ÜZÜM ¹, DİĞA DÜŞÜNÜR-DOĞAN ^{1*}

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Geliş (received): 03 Ocak (January) 2023 Kabul (accepted): 23 Kasım (November) 2023

ÖZ

Jeotermal sahalarda fayların ve çatlak sistemlerinin varlığı, jeotermal akışkanın ve sıcaklığın dolaşımını önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle yoğun faylanmanın olduğu sahalarda bu etki daha fazla ön plana çıkmaktadır. Önceki çalışmalar, fayların varlığının ve fay ile ortam arasındaki permeabilite farkının, akışkan hareketi üzerine olan etkilerini tartışmıştır. Bu etkinin anlaşılabilmesi için seçilebilecek yöntemlerin başında, pek çok fiziksel ve hidrolik parametreyi kapsayan sayısal modelleme çalışmaları gelmektedir. Bu çalışmada, fayların eğimlerinin ve fay zonunda permeabilite kontrastının neden olduğu sıcaklık dağılımı ve yeraltısuyu akış dağılımı farklı 2 boyutlu test modelleri oluşturularak incelenmiştir. Sayısal modelleme için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı olan ve sonlu hacimler prensibi ile çalışan ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. Test modellerinin sonuçları, fay açısı değişiminin, sıcaklık dağılımını ve hız vektörlerinin yönünü bir miktar etkilese de, esas belirleyici faktörün permeabilite kontrastı olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, yoğun faylanmanın olduğu jeotermal sahalarda, akışkanın olası yollarını kestirebilmek için bir ön çalışma olarak uygulanabilir ve geliştirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Fay, permeabilite, sıvı akışı, sayısal modelleme, ısı geçişi, jeotermal, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

ABSTRACT

The presence of faults/fractures in geothermal fields significantly affects fluid flow and temperature distribution. This effect is more dominant especially in areas with dense faulting. Previous studies discussed the effects of the faults and permeability contrast between faults and surrounding geological units on fluid flow. In order to investigate this phenomenon, numerical methods are unique since they include physical and hydraulic parameters of the medium. In this study, the temperature pattern and groundwater flow due to the dip angle of the fault and permeability contrast were explored by various 2-dimensional numerical test models. We used

finite volume-based Computational Fluid Dynamic (CFD) Software, ANSYS Fluent, for numerical modeling. The results of the numerical simulations indicate that, although the dip angle of the fault can slightly modify the fluid vectors and temperature distribution, the main determining factor is the permeability contrast. This study can be used and expanded as a preliminary study to predict the possible fluid paths, in extensively faulted geothermal fields.

Keywords: Fault, permeability, fluid flow, numerical modeling, heat transfer, geothermal, Computational Fluid Dynamics (CFD)

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1228841>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: dusunur@itu.edu.tr

GİRİŞ

Faylar ve çatlak sistemleri, yeraltında oluşan ısı transferi ve akışkan hareketini kontrol edebilecek ve yönlendirebilecek bir öneme sahip jeolojik yapılardır (Gudmundsson, 2000; McKenna ve Blackwell, 2004; Simms ve Garven, 2004; Cherubini vd., 2013; Loreto vd., 2019). Faylar, akışkanlar için bariyer ve/veya hidrolik kanal olarak davranabilirler (Yang vd., 1998; Sarkar vd., 2002; Yang vd., 2004; Magri vd., 2010). Bu sebeple yeraltındaki sıcaklık ve yeraltı suyu akışı hareketlerinin anlaşılabilmesi için fayların konumlarının ve davranışlarının bilinmesi önemlidir. Literatürde, fayların akışkan hareketi ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerinin araştırıldığı birçok jeofizik çalışma bulunmaktadır (Üner vd., 2019; Başokur vd., 2022). Bunların yanı sıra, son dönemlerde farklı sayısal yöntemlere dayanan modelleme çalışmaları da bulunmaktadır (örn: Magri vd., 2010; Taillefer vd., 2018; Loreto vd., 2019).

Sayısal modelleme çalışmaları, karmaşık yeraltı yapılarını, pek çok parametreyi dahil ederek temsil edebilme esnekliğine sahip yegane yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıvı akışı ve sıcaklık dağılımının belirlenmesi amacıyla üretilen tüm sayısal modellerde, çalışılan gözenekli ortamın geometrisi (örn: topoğrafya, fay zonlarının yerleri ve jeolojik

birimler) ve fiziksel/hidrolik özellikleri (örn: akışkanın yoğunluğu ve viskozitesi, jeolojik birimlerin permeabilite ve gözeneklilik değerleri) giriş parametreleri olarak kullanılmaktadır. Bu parametreler kullanılarak, farklı hidrojeofizik problemlere çözüm üreten çalışmalar literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalardan bazıları, geçirgen fay zonlarının sistemdeki ısı taşınımını nasıl tetiklediğini ve ısı dağılımına nasıl katkıda bulunduğunu araştırmıştır (Sorey, 1971; Forster ve Smith, 1989; Fairley ve Hinds, 2004; Simms ve Garven, 2004). Forster ve Smith (1989), fayın permeabilitesinin belli bir eşik değeri aştığında dolaşım hücreleri oluşturduğunu ve bunların ısı transferinde, ısı iletiminden baskın ve belirleyici olduğunu öne sürmüştür. L'opez ve Smith (1995), topoğrafyanın yeraltı suyu dinamiği üzerine etkisini araştırırken, aynı zamanda izotropik ve homojen ortamda bulunan yüksek eğim açısına sahip fayların, bölgesel ısı akışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma, fay derinliği, fay uzunluğu ve su tablası geometrisi gibi parametrelerin fay zonunda, sıvı sirkülasyonu ve ısı transferini önemli ölçüde belirlediğini göstermiştir. Çalışmanın sonuçları, permeabilitenin, fay zonuunun

termal ve hidrojeolojik özelliklerini tahmin etmede kılavuz görevi görebileceğini desteklemektedir. Yang vd. (1998, 2004) ise, fayların varlığının, sıvı akış modelleri üzerinde, ortamın fiziksel özelliklerinden daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir ve gerçekleştirdikleri sayısal modeller ile fay permeabilitesi, genişliği ve derinliğinin, havzalardaki akışkan hareketi ve sıcaklık desenleri üzerinde önemli bir role sahip olduğunu göstermişlerdir. Benzer şekilde, Simms ve Garven'in (2004) çalışmasında, fayların konveksiyon hücrelerinin boyutunu belirleyerek ve yerlerini sınırlayarak, akışkanın hızını, termal konveksiyon hücrelerinin konumunu, şeklini belirlemede güçlü bir etkiye sahip oldukları gösterilmektedir. Cherubini vd. (2013) ise 3-boyutlu gözenekli ortam modelleri ile, fayların akışkan sistemi ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Gudmundsson'a (2000) göre, fayın yeraltı suyu için akış yolu olarak davranabilmesi iki temel faktöre bağlıdır. Bunlardan ilki, fay zonunun permeabilite değerinin civar kayalara göre yüksek olmasıdır. İkincisi ise fay zonunun eğiminin yeraltı suyunun doğal akış yönüne paralel olmasıdır. Fay zonu, yeraltı suyunun akış yönüne dik olarak konumlanmaktaysa, fay ve onu çevreleyen jeolojik birimler arasındaki permeabilite farkının, yeraltı suyunun akışı üzerindeki etkisinin düşük olduğu gözlenmiştir. Tüm bu çalışmalar, sadece fayın permeabilite özelliklerinin değil aynı zamanda eğiminin de belirleyici faktör olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, fay eğiminin, permeabilite ve gözeneklilik değerlerinin, sıcaklık dağılımı ve sıvı akışı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla, sonlu hacimler tabanlı HAD yazılımı Ansys Fluent kullanılarak test modelleri üretilmiştir. Bu çalışma kapsamında üretilen modeller, fay eğiminin sıcaklık ve akış dağılımını bir miktar değiştirdiğini

ancak dağılımın nihai olarak permeabilite kontrastı tarafından belirlendiğini göstermektedir.

YÖNTEM

Üner ve Düşünür Doğan (2019) tarafından, yerbilimlerinde kullanılabilirliği karşılaştırmalı değerlendirme (benchmarking) yöntemiyle araştırılarak uygun bulunan Ansys Fluent yazılımı, yerbilimlerine ait farklı problemlerin çözümlerinde kullanılmaktadır. Jeofizik ve jeolojik problemlerin çözümüne uygun olan Ansys Fluent yazılımı, çatlaklı rezervuarlardaki sıvı akışının analiz edilmesi (Sarkar vd., 2002), çatlaklı yapılardaki sıcaklık akışının incelenmesi ve hidrolik karakterizasyonun yapılması (Sarkar vd., 2004), sıcaklık ve akışkan akış modelleri oluşturularak hidrotermal akış yönünü etkileyen faktörlerin araştırılması (Düşünür Doğan ve Üner, 2019; Erçetin ve Düşünür Doğan, 2021), fay varlığının ısı ve akışkan akışına etkilerinin hidrojeofizik modeller oluşturularak incelenmesi (Üner vd., 2019; Üner ve Düşünür Doğan, 2021; Şen ve Düşünür Doğan, 2021), gaz hidratların çözünme davranışının ve yayılımının zamana bağlı araştırılması (Düşünür Doğan vd., 2022) gibi pek çok yerbilimlerine ait problemlerinin çözümü sırasında kullanılmıştır.

Bu çalışmada, fayların eğimi, permeabilite ve gözeneklilik değerlerinin, sıcaklık dağılımı ve sıvı akışı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla sonlu hacimler tabanlı HAD yazılımı ANSYS Fluent kullanılarak test modelleri üretilmiştir. Üretilen modeller zamana bağlı olarak çözdürülmüştür. Kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerini eşzamanlı olarak çözen bu yazılımda, eşitlik (1)' de gösterilen Darcy kanunu geçerlidir.

$$u = -\frac{K}{\mu}(\nabla P - \rho_w g) \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de; u akış hızı (m/s), K ortamın geçirimsizliği (m^2), μ akışkanın dinamik viskozitesi (kg/m.s), P ortamdaki basınç (Pa), ρ_w akışkanın yoğunluğu (kg/m^3), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), ∇ laplace operatörüdür. Hesaplanan Darcy hızları, eşitlik (2)'de gösterilen süreklilik denklemini sağlamaktadır.

$$\nabla \cdot (\rho_w u) = 0 \quad (2)$$

Test modellerinde doğrusal (laminar) akış gösteren viskoz akışkan kullanılmış, eylemsizlik etkileri ihmal edilmiş ve akışkanın yoğunluğunun, eşitlik (3)'te gösterilen Boussinesq denklemine göre sıcaklık ile ilişkili olarak değişmekte olduğu kabul edilmiştir.

$$\rho_w = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (3)$$

Eşitlik (3)'te; ρ_0 akışkanın T_0 sıcaklığındaki yoğunluğu (kg/m^3), β ısıl genleşme katsayısıdır ($1/K$). Enerjinin korunumu denklemi, eşitlik (4)'te verildiği gibidir.

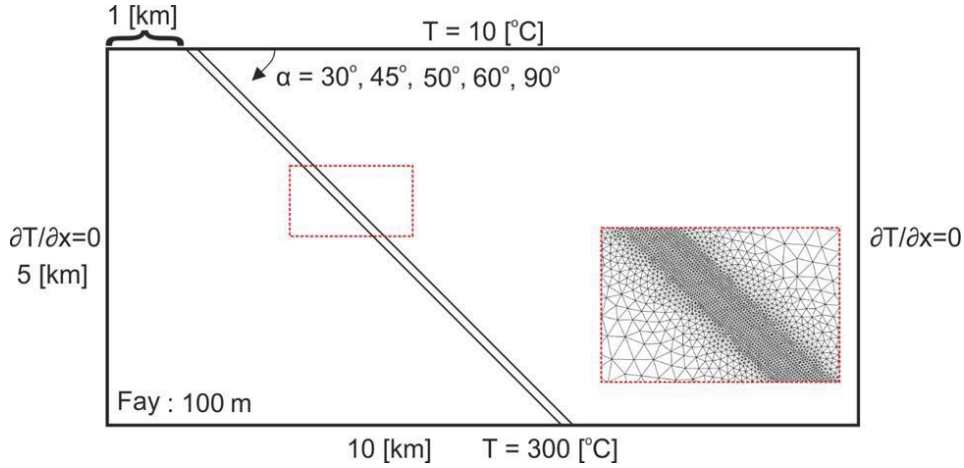
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (u \rho_w c_p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te; c_p gözenekli ortamın ısı kapasitesi (J/kg.K), λ doymuş gözenekli ortamın ısı iletkenlik kat sayısıdır (W/m.K).

Fayların eğimlerinin, civar kayalıklara göre bağlı permeabilite ve gözeneklilik değerlerinin, yeraltı suyu akışı ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerinin gözlemlenebilmesi için, ilk aşamada farklı eğimlere sahip faylar içeren 5 farklı model geometrisi oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra, fayların varlığının sisteme etkisinin kıyaslanabilmesi için model geometrisi diğerleri ile birebir aynı olan ancak "fay içermeyen" bir test model oluşturulmuştur. Şekil 1'de üretilen model geometrileri özetlenmektedir. Model geometrileri oluşturulduktan sonra, sistemin ayrıklaştırılması (meshing) için üçgen ağ elemanları kullanılmıştır (Şekil 1 iç şekil). Bu modeller, ANSYS Design Modeler programı kullanılarak oluşturulmuştur. Kullanılan üçgen

ağ hücreleri, fayların olduğu alanlarda daha küçük, faylardan uzaklaştıkça ise daha geniş olarak seçilmiştir. Çözümün stabilitesini sağlamak için optimum ağ geometrisi oluşturulmuştur.

Şekil 1'de gösterilen model kutusu 10 km genişliğe, 5 km derinliğe sahiptir ve jeolojik birimi iki ana gövdeye ayıran bir faydan oluşur. Tüm sayısal modellerde, fay kalınlığı 50 metre olarak kabul edilmiştir ve farklı açılarla dalım yapan fay, model kutusunun sol üst köşesine 1 km mesafede yer almaktadır. Modelin yan duvarları, ısı ve madde geçişine izin verilmeyen, yalıtımlı duvarlardır. Alt ve üst duvarlar, izotermal dengededir, yani sıcaklık sabittir. Üst duvarın sıcaklık değeri $10^\circ C$ ve üst duvara uygulanan basınç 1 atmosferik basınca eşittir; alt duvarın sıcaklık değeri ise $300^\circ C$ olarak sabitlenmiştir. Tüm modellerde, model kutusu boyunca derinlere doğru, sıcaklık gradyanının doğrusal değiştiği kabul edilmiştir. Sabit sıcaklık sınır koşulu yerine ısı akısına bağlı sınır koşulu konulduğunda da niteliksel olarak farklı bir sonuç alınmamaktadır (Magri vd., 2010). Modeller tamamen suya doygundur ve üst duvardan akışkan girişine izin verilmemektedir. Zamana bağlı olarak çözülen modellerden çoğu belirli bir süre sonra kararlı hale geçmiş, bir kısmı da kararlı hale geçmemiştir. Kararlı hale geçmeyen modeller kıyaslanabilmek için eşit sürte boyunca oluşturulmuş ve sonuçları bu şekilde paylaşılmıştır. Fayların permeabilite değerlerinin çevre sedimanlardan daha yüksek olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Daha önce jeotermal sahalarda yapılan çalışmalar fayın permeabilite değerinin civar kayalıklardan daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır (örn: Randolph ve Johnson, 1989; Smith vd., 1990; Scholz, 1990; Caine vd., 1993; Antonellini ve Aydın, 1994; Forster vd., 1994; Simms ve Garven, 2004; Şen ve Düşünür Doğan, 2021). Sıvının sedimanlardan çok fay içinde hareket edeceği ve dolayısıyla ısı



Şekil 1. Çalışma kapsamında kullanılan, modellere ait geometrik bilgiler. Şekil içindeki kırmızı kesikli çizgilerle işaretlenmiş dikdörtgen alan yakınlaştırılmış ağ geometrisi bilgisini içermektedir.

Figure 1. Model geometry for numerical calculations. The rectangular area with red dashed lines (inset figure) contains the zoomed mesh geometry information.

transferinin fay ve fay çevresinde gerçekleşeceği öngörülmüştür. Bu nedenle ağ geometrisi oluşturulurken fay ve yakın çevresidaha küçük ağ elemanları kullanılarak ayrılaştırılmıştır (Şekil 1).

Fay zonundan uzaklaştıkça ağ elemanlarının boyutu büyümektedir. Bu sayede aynı zamanda sayısal çözümün stabilitesi ve hızı da optimumda sağlanmıştır. Modellere ait düğüm noktası ve üçgen eleman (hücre) sayıları Tablo 1'de verilmiştir.

Model geometrilerine sınır (sınır sıcaklık ve basınç koşulları) ve hücre koşulları (permeabilite, viskozite, vb.) uygulanarak farklı test modelleri üretilmiştir. Sıvı akışı ve sıcaklık dağılımı hesaplamalarında kullanılan ilgili parametreler Tablo 2'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

Tablo 1. Modellerin düğüm noktası ve üçgen eleman (hücre) sayıları.

Table 1. Number of nodes and triangular elements (cells) of the models.

Fay Eğimi (°)	Düğüm Noktası Sayısı	Üçgen Eleman Sayısı
30	22522	20560
45	17506	16064
50	16408	15057
60	14544	13330
90	13128	12032

Tablo 2. Akışkan ve ısı akışı hesaplamalarında kullanılan parametreler daha önceki çalışmalardan derlenmiştir (Düşünür Doğan ve Üner, 2019).

Table 2. The parameters used in the fluid and heat flow calculations derived from previous studies (Düşünür Doğan and Üner, 2019).

Parametre	Değer
Isı Kapasitesi (C_p)(J/kg.K)	4200
Isıl İletkenlik Katsayısı (λ)(W/m.K)	User-defined thermal cond. (UDF)
Dinamik Viskozite (μ)(kg/m.s)	$5 \cdot 10^{-5}$
Isıl Genleşme Katsayısı (β)(1/K)	$2.07 \cdot 10^{-4}$
Akışkanın Yoğunluğu (kg/m ³)	1000
Yerçekimi İvmesi (m/s ²)	9.8

Modellerde, gözenekli ortamların termal dengede olduğu kabul edilmiştir. Yani katı malzeme ile malzemenin gözenekleri arasında sıcaklık farkı yoktur ve aralarında ısı alışverişi gerçekleşmemektedir. Fayın etkisinin en net biçimde ortaya konulabilmesi için yeraltı modeli oldukça basitleştirilmiştir. Modellerde fay ve fayı çevreleyen jeolojik birim (sediman) olmak üzere iki farklı katı ortam tanımlanmıştır. Bu ortamların fiziksel ve termal özelliklerinin kendi içinde sabit ve homojen dağılım gösterdiği kabul edilmiştir. Çalışma kapsamında sıcak su tipi (hot water type system) jeotermal alan temsil edilmek istenmiş ve bu nedenle örtü kaya sistemde tanımlanmamıştır. Daha gerçekçi ve kompleks modeller için ilerleyen aşamalarda örtü kaya ve akifer de modele dahil edilmelidir. Sediman ve fay ortamları için tanımlanan parametreler Tablo 3'te verilmektedir. Fay permeabilite ve gözeneklilik parametreleri, test modellerinde değişken olarak kullanılan parametrelerdir ve bu değerler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Ortam parametreleri önceki modelleme çalışmalarına benzer şekilde seçilmiştir (McKenna ve Blackwell, 2004; Düşünür Doğan ve Üner, 2019).

Table 3. Medium parameters derived similar to previous modeling studies.

Ortam	Permeabilite (kx/kz)(m ²)	Gözeneklilik (ϕ)(1)	Isıl İletkenlik Katsayısı (λ)(W/m.K)	Yoğunluk (ρ)(kg/m ³)	Isı Kapasitesi (C_p)(J/kg.K)
Sediman	$1 \cdot 10^{-15}/1 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-15}/1 \cdot 10^{-15}$	1.25	2650	1000
Fay (Hasar Zonu)	Değişken	Değişken	1.25	2650	1000

TEST MODELLERİ

Bu çalışmada bir adet faysız ve 30 adet fay içeren test model üretilmiştir. İlk aşamada, faylı ve faysız modeller arasında kıyaslama yapabilmek için referans bir model olarak fay zonu içermeyen bir model tanımlanmıştır. Faysız modele tüm sistem için homojen bir permeabilite dağılımı atanmıştır ($k_x=k_z=1*10^{-15} \text{ m}^2$) (Şekil 2). Fay içeren modeller iki grup halinde üretilmiştir. Fay eğimi ve fay permeabilitesi bakımından karşılaştırmalı değerlendirme yapabilmek için 30° , 45° , 50° , 60° ve 90° eğime sahip modellerde, fay geçirimsizliğine 3 farklı değer atanmış, toplamda 15 test modeli oluşturulmuştur. Tüm modellerde faylar homojen ve izotropik kabul edilmiştir. Fay içerisindeki yatay ve düşey permeabilite değerleri birbirine eşittir. Ayrıca, tüm test gruplarında sedimanın yatay ve düşey permeabilite değerleri $1*10^{-15} \text{ m}^2$ olarak sabit tutulmuştur.

İlk grup modellerde, faya ait permeabilite değeri; Test A modellerinde $1*10^{-14} \text{ m}^2$, Test B modellerinde $5*10^{-14} \text{ m}^2$ ve Test C modellerinde $1*10^{-13} \text{ m}^2$ olarak atanmıştır. Test A, B ve C grubundaki modellerin tümünde fayın gözeneklilik değeri 0.1 olarak kabul edilmiştir (Tablo 4).

İkinci grup modellerde ise fayın değişen gözenekliliğinin etkilerinin anlaşılması hedeflenmiştir. Bu amaçla fay içi gözenekliliği 5 kat artırılmıştır. Bu kapsamda üretilen model sonuçları, gözeneklilik değişiminin, sıcaklık ve akış dağılımında önemli ölçüde değişikliğe yol açmadığını göstermektedir. Bu sebeple fay içi gözeneklilik değerine sahip modeller burada sunulmamıştır. Test modellerinde kullanılan parametreler Tablo 4'te listelenmektedir.

Tablo 4. Test modellerinde kullanılan fay eğimi, yatay (k_x) ve düşey (k_z) permeabilite, gözeneklilik değerleri.

Table 4. ault dip angle, horizontal (k_x) and vertical (k_z) permeabilities, porosity values used in the test models.

Modeller	Fay Eğimi ($^\circ$)	Fay Permeabilite (k_x/k_z)(m^2)	Fay Gözeneklilik (ϕ)(%)
Faysız Model	-	$1*10^{-15}/1*10^{-15}$	$1*10^{-1}$
Test A			
A-1	30	$1*10^{-14}/1*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
A-2	45	$1*10^{-14}/1*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
A-3	50	$1*10^{-14}/1*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
A-4	60	$1*10^{-14}/1*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
A-5	90	$1*10^{-14}/1*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
Test B			
B-1	30	$5*10^{-14}/5*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
B-2	45	$5*10^{-14}/5*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
B-3	50	$5*10^{-14}/5*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
B-4	60	$5*10^{-14}/5*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
B-5	90	$5*10^{-14}/5*10^{-14}$	$1*10^{-1}$
Test C			
C-1	30	$1*10^{-13}/1*10^{-13}$	$1*10^{-1}$
C-2	45	$1*10^{-13}/1*10^{-13}$	$1*10^{-1}$
C-3	50	$1*10^{-13}/1*10^{-13}$	$1*10^{-1}$
C-4	60	$1*10^{-13}/1*10^{-13}$	$1*10^{-1}$
C-5	90	$1*10^{-13}/1*10^{-13}$	$1*10^{-1}$

Sunulan tüm test model sonuçlarında, hesaplatılan eş sıcaklık eğrilerinin üzerine, akışkan akış vektörlerinin yönleri ve hızları çizdirilmiştir. Şekil 2'de fay zonu içermeyen modelin sıcaklık-akış dağılımı görülmektedir. Modelin ağ yapısında, fayın ve yakın civarının daha sık ayrıklaştırılması (mesh) sebebiyle bu bölgelerde daha sık sayısal hesaplama yapılmaktadır ve bu bölgelerdeki hız vektörleri belirginleşmektedir. Bu görüntünün model için elde edilen sıcaklık ve akış desenine bir etkisi yoktur.

Modelde akışkan hızları en fazla $2.7 \cdot 10^{-9}$ m/s değerine ulaşmaktadır. Model kutusunun alt duvarında ısınan akışkan ($300 \text{ }^\circ\text{C}$), geçirimsiz yan duvarlar ile karşılaşana kadar yatay yönde hareketini sürdürmüştü, ardından sıcaklığın etkisi ile yükselerek model yüzeyine kadar ilerlemiştir (Şekil 2). Yüzeyde soğuyan akışkan, artan yoğunluğunun etkisi ile modelin merkezinden aşağı yönlü harekete başlamıştır. Bu durum iki tane belirgin ve ters yönlü sirkülasyon hücresi oluşturmuştur. Daha önceki çalışmalar da benzer sirkülasyon hücrelerinin varlığını bildirmiştir (örn: Simms ve Garven, 2004; Parisio vd., 2019). Bu hücreler sıcaklık dağılımını şekillendirmiştir. Sağdaki hücre saat yönünün tersine doğru akış oluştururken, soldaki hücre ise saat yönünde akışa neden olmaktadır. Bu sayede modelin ortası soğurken, modelin köşelerinde yukarı yönlü akış sebebiyle sıcaklık yüzeye doğru taşınmaktadır.

Test A grubuna ait tüm modellerin sonuçları Şekil 3'te verilmektedir. Modelleme sonuçlarına göre Test A grubunun tümünde hesaplamalar yakınsamaktadır. Modellerde zamana bağlı olarak bir değişim izlenmemektedir (steady-state, kararlı durum).

SAYISAL MODELLER

Bunun en önemli sebebi, sistemin ortalama permeabilite değerinin düşük olmasıdır. Test A modelleri için maksimum akışkan hızlarının ($1.7 \cdot 10^{-8}$ m/s), herhangi bir fay içermeyen sisteme kıyasla ($2.7 \cdot 10^{-9}$ m/s) farklı eğimli modeller için 2-6 kat arttığı gözlenmiştir. Bunun esas nedeni, yüksek permeabiliteye sahip fayın, sistemin toplam Rayleigh sayısını artırıyor olmasıdır. Akışkan vektörlerinin yönü detaylı incelendiğinde, 30° (A-1) ve 60° 'lik (A-4) fay eğimi içeren modellerde, fay içerisindeki akışkanın yer içinde belirli bir derinliğe kadar (referans derinlik) akışkanı aşağı yönde taşıdığı görülmektedir. Referans derinliğin altında ise, fay boyunca ısınan akışkan yukarı yönlü taşınmaktadır. Örneğin, 30° fay eğimi içeren modelde soğuk akışkan yerin ~ 750 m derinliklerine kadar fay tarafından taşınmaktadır (yatay yönde 2.5 km). Bu referans derinliğin altında ise fay, model tabanından ısınan akışkanı yukarı doğru taşımaktadır. Referans derinlik değeri, 60° 'lik fay eğimi için 2.5 km (yatayda 2.5 km) olarak ölçülmüştür. Fay eğimi değiştikçe, buna bağlı olarak referans derinlik değerleri de değişmektedir. Bu bize fayın eğiminin özellikle yeryüzünden süzülen akışkanın inebileceği maksimum derinliği baskın bir şekilde denetleyebileceğini göstermektedir. 45° eğime sahip olan fayda akışkan modelin en derin noktasından yüzeye kadar yukarı yönde taşınırken, 50° ve 90° 'lik fay eğimi durumunda ise akışkan modelin en derin noktasına kadar aşağı yönlü taşınmaktadır. Sistemde akışkanın davranışını belirleyen ana kuvvetler, viskoz ve yüzdürücü (buoyancy forces) kuvvetlerdir. Sıcaklık ve permeabilite dağılımına bağlı olarak, modelin farklı bölgelerinde, bu iki kuvvetin bileşkesi

akışkanın yönünü denetlemektedir. Bu nedenle yüzdürücü kuvvetlerin baskın geldiği alanlarda akışkan yukarı yönlü hareket etmekteyken, gravite kuvvetler baskın olduğunda akışkan aşağı yönlü ilerlemektedir. Görüldüğü üzere (Tablo 4), test grupları arasında, fay ve civar jeolojik birimin permeabilite kontrastının en düşük olduğu modeller, A grubu modelleridir (permeabilite kontrastı = 10). Geçirimsizlik kontrastının düşük olması, civar kayalarda gerçekleşen doğal sirkülasyonun, fay içerisinde ilerleyen akışkanın akış yönünü etkileyebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum en açık şekilde, fay açısı 60° olan Model A-4'de gözlemlenmektedir. Bu modelde, fayın sığ kesimlerinde akışkan aşağı, derin kesimlerinde ise yukarı yönlü taşınmaktadır. Model kutusunun sol tarafında oluşan büyük sirkülasyon hücresi, fayın tümünü içine almaktadır ve fay içerisindeki akışkan yönleriyle örtüşen yönde dolaşım yapmaktadır. Sirkülasyon hücreleri, fayı aşağı yönlü beslediğinde akışkan da aşağı yönlü, yukarı yönlü beslediğinde akışkan da yukarı yönlü hareket etmektedir. Bu modelde gözlemlenen akışkan hareketi, civar kayalar ile fay arasındaki permeabilite kontrastının, akışkanın akış yönü üzerindeki önemini ortaya koymaktadır.

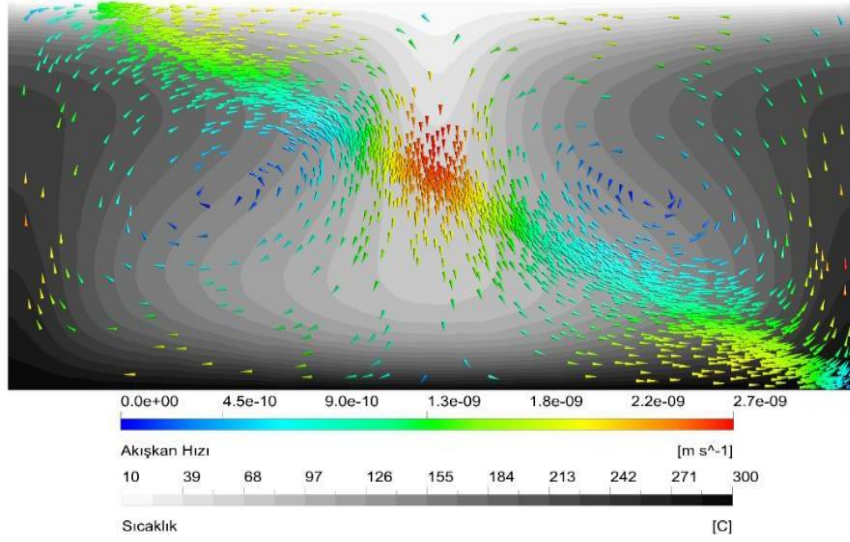
Şekil 4'te (convergence) Test B'ye ait sonuçlar sunulmuştur. A grubu modellerin aksine tüm B grubu modelleri kararlı duruma ulaşmamaktadır ve zamana bağlı değişim izlenmektedir. Bu model grubunda, ilk model grubundan farklı olarak fayın permeabilite değeri $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ seçilmiştir. Test B grubunda maksimum hızlar, tüm fay eğimleri için artmaktadır. Modellerdeki akışkan vektörlerinin yönü incelendiğinde, 30°'lik fay eğimi (B-1) durumu hariç, sıcak akışkanın, modelin tabanından yüzeye doğru yukarı yönlü taşındığı gözlemlenmektedir. 30°'lik fay eğimi durumunda ise Test A'ya benzer şekilde belirli referans derinliğine kadar (B-1 modeli için ~ 3.6

km derinlikte ve yatayda 7.3 km) soğuk akışkan aşağı yönde taşındığı izlenmiştir. Test A modellerine göre geçirimsizlik kontrastının 50 kat olduğu bu modellerde, çevre kayalarda görülen sirkülasyonun fay içindeki akış yönünü Test A modellerindeki kadar büyük ölçüde etkileyememektedir.

Şekil 5'te Test C'ye ait sonuçlar sunulmuştur. Bu gruptaki test modelleri kararlı halde değildir ve zamana bağlı çözülmüşlerdir. Bu grupta, fayın permeabilite değeri $1 \cdot 10^{-13}$ olarak seçilmiştir ve bu değer Test A ve Test B'ye kıyasla en yüksek permeabilite değeridir. Diğer test modellerine göre fayın permeabilite değerinin maksimum olmasından dolayı, en yüksek fay içi hız değerleri bu test modelinde elde edilmiştir. Akışkan vektörlerinin yönü incelendiğinde 30°, 60° ve 90°'lik fay eğimine sahip modellerde, ısınan akışkanın modelin derin bölgelerinden yukarı yönde taşındığı izlenmektedir. 45° ve 50°'lik fay eğimine sahip modellerde ise akışkan, modelin en derin noktasına doğru aşağı yönde taşınmaktadır. Modelin geneline bakıldığında yüksek permeabilite kontrastı, akışkan hareketinin baskın şekilde fay tarafından belirlenmesine sebep olmaktadır.

Tüm modellerin sıcaklık dağılımına bakıldığında, bu dağılımı belirleyen en önemli değişkenin akışkanın hızı ve akışkan vektörlerinin yönü olduğu açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Test modellerindeki en doğru sıcaklık deseni çıkarımları faya yakın bölgelerde yapılabilir. Faydan uzak bölgelerdeki sıcaklık deseni başlangıç modeline oldukça bağımlıdır.

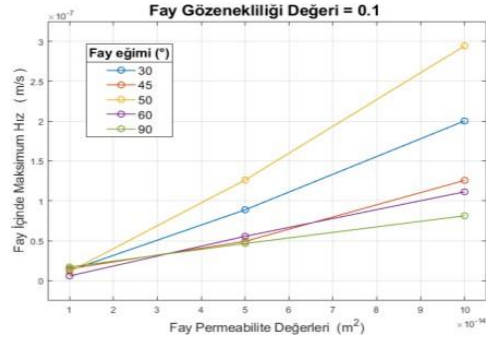
Yukarıda tartışıldığı gibi, ortaya çıkan sıcaklık deseni her ne kadar fayın eğimi kaynaklı oluşan hız vektörlerinin yönünden etkilense de aynı zamanda modelde değişen fay uzunluğu da bir parametre olarak değerlendirilmelidir. Fay uzunluğu arttıkça, sistemin ortalama permeabilite değeri artmaktadır ve bu da sistemin Rayleigh sayısını arttırmaktadır.



Şekil 2. Fay zonu içermeyen referans modeli.

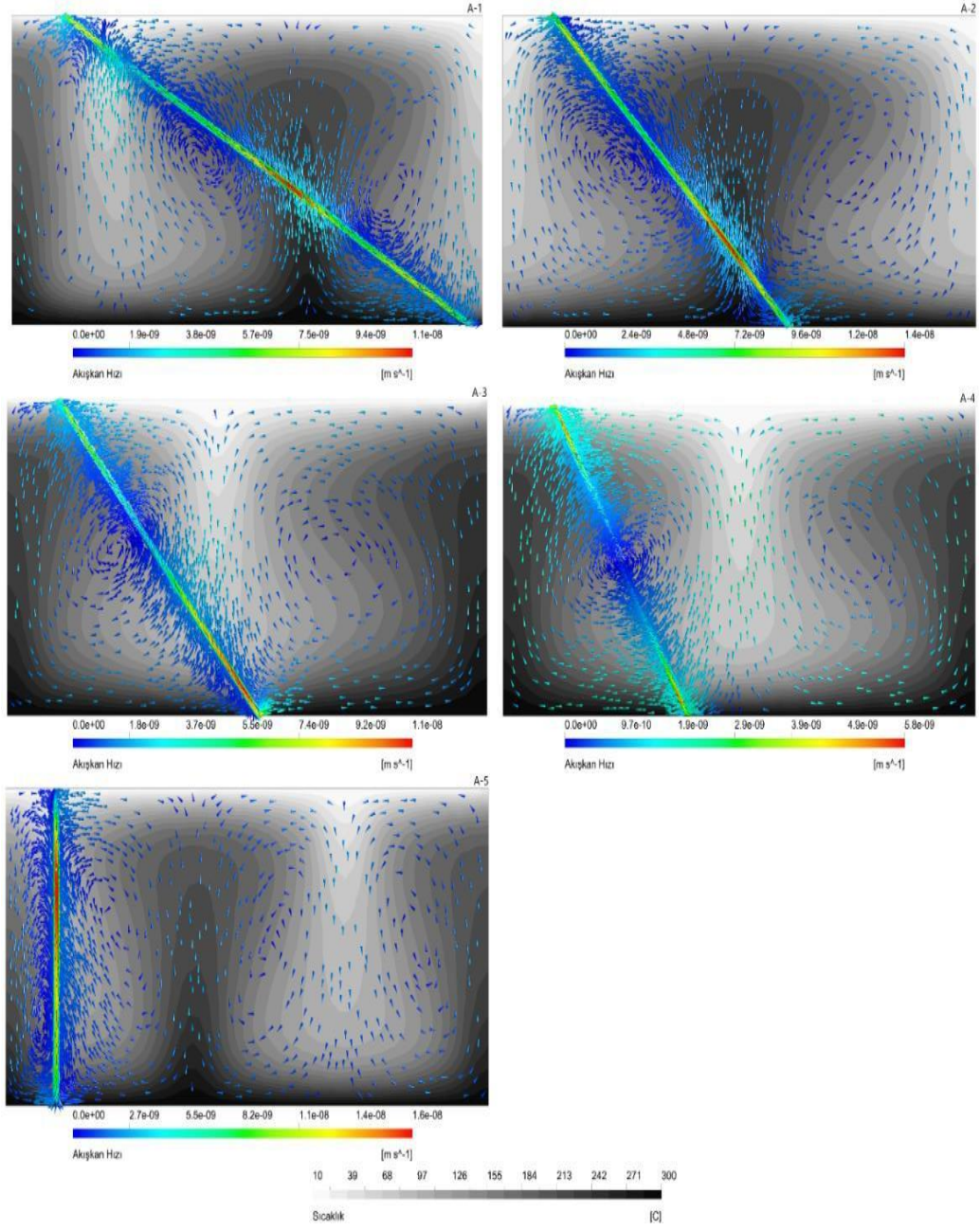
Figure 2. Reference model without fault zone.

Modeller arasındaki fay uzunluğu farkı çok fazla olmasa da, sonuçlar üzerindeki olası etkisini göz önünde bulundurmak gerekebilir. Şekil 6, 6 fay içinde ölçülen en yüksek hızların fay permeabilitesine bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. Farklı eğime sahip fayların bulunduğu modellerin tamamında, fayın permeabilite değeri arttıkça, fay içinde ölçülen en yüksek hız değerlerinin de arttığı görülmektedir. En düşük permeabiliteye sahip modellerde (Test A), fayın açısına bağlı olmaksızın, sistemde oluşan en büyük hız değerleri tüm modeller için birbirine oldukça yakındır (Şekil 6). Fayın permeabilitesi arttıkça, modellerde hesaplanan hız değerleri giderek neredeyse lineer olarak artmaktadır ancak bu artış fay açısından bağımsız olarak izlenmektedir (Şekil 6).



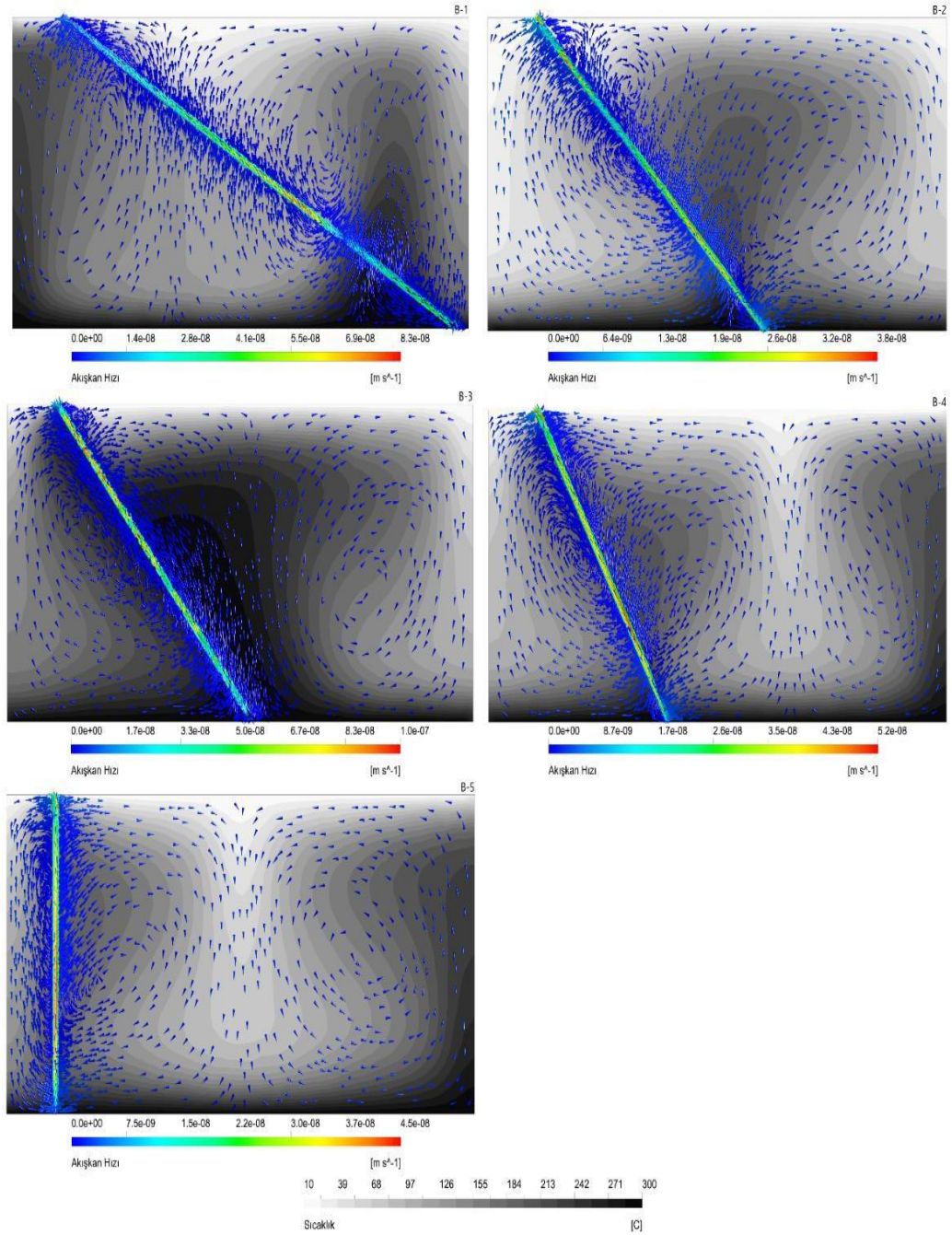
Şekil 6. Farklı fay eğimi değerlerindeki, farklı permeabilite değerlerine karşılık gelen fay içindeki maksimum hız grafiği. Grafikte, fay gözenekliliği 0.1 olan modellerin sonuçları kullanılmıştır.

Figure 6. Maximum velocity in the fault corresponding to different permeability values at different fault dip angle values. The results of models with a fault porosity of 0.1 are used in the plots.



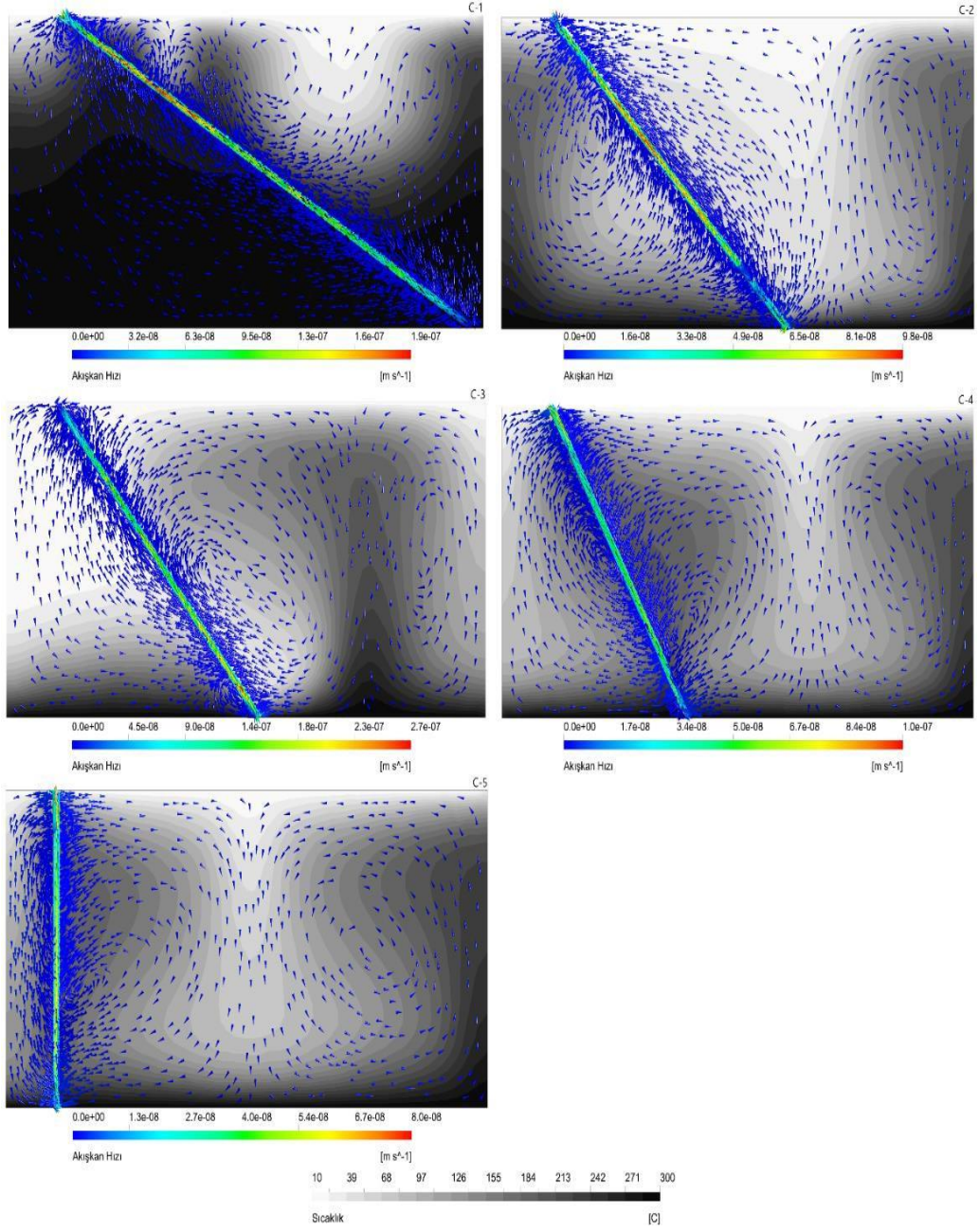
Şekil 3. Test A modelleri. Sırasıyla 30°, 45°, 50°, 60°, 90° fay eğimlerinde $1 \cdot 10^{-14}$ fay permeabilite değerlerinde üretilen modeller.

Figure 3. Models of Test A. Models which fault dip angles are 30°, 45°, 50°, 60°, 90°, produced with fault permeability values of $1 \cdot 10^{-14}$.



Şekil 4. Test B modelleri. Sırasıyla 30°, 45°, 50°, 60°, 90° fay eğimlerinde $5 \cdot 10^{-14}$ fay permeabilite değerlerinde üretilen modeller.

Figure 4. Models of Test B. Models which fault dip angles are 30°, 45°, 50°, 60°, 90°, produced with fault permeability values of $5 \cdot 10^{-14}$.



Şekil 5. Test C modelleri. Sırasıyla 30°, 45°, 50°, 60°, 90° fay eğimlerinde $1 \cdot 10^{-13}$ fay permeabilite değerlerinde üretilen modeller.

Figure 5. Models of Test C. Models which fault dip angles are 30°, 45°, 50°, 60°, 90°, produced with fault permeability values of $1 \cdot 10^{-13}$.

SONUÇLAR

Özellikle yoğun faylanmaların bulunduğu jeotermal sahalar modellenirken, bölgedeki fayların mekansal dağılımının yanı sıra, eğim ve permeabilite değerleri de mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışma genişletilerek ve araştırılmak istenilen bölgenin jeolojisine uyarlanarak, farklı sahalar için de kullanılabilir. Bu araştırmanın, yerbilimleri kapsamında yapılacak sayısal sıcaklık ve akış modellemesi çalışmalarına katkı sağlaması muhtemeldir. Bu ve benzeri modelleme çalışmaları özellikle jeotermal sahalarda üretim başlamadan önce olası kuyu yerlerinin belirlenmesinde öncü yöntemler olarak geliştirilebilir ve değerlendirilebilir. Çalışma kapsamında üretilen tüm sayısal modellere bakıldığında aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Fayın eğimi, sıcaklık dağılımını etkilediği, esas belirleyici faktör, fay ve civar kayaç arasındaki permeabilite kontrastıdır.
- Permeabilite değeri arttıkça, modeldeki en yüksek hız değerleri de neredeyse lineer olarak artmaktadır.
- Permeabilite kontrastı arttıkça, fay içerisindeki yüksek hızlar baskın hale gelmekte ve modelin diğer kısımlarından ayrılmaktadır. Aynı zamanda kontrast azaldıkça, yatay yönde hızların arttığı ve fay içindeki akışkanın civar kayaçları daha fazla beslediği görülmektedir. Diğer bir deyişle yüksek permeabiliteye sahip faylar, sistemdeki akışkanın hareketini baskın bir biçimde etkiler ve çevre kayaçlardaki akışkan hızını azaltır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü desteği ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanmış olduğumuz modellerin, ilk oluşturulmasında

emeği olan Rahmetli Yük. Müh. Serkan Üner'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Antonellini, M., & Aydin, A., 1994. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: Petrophysical properties: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 78, p. 355–377. DOI: 10.1306/bdff90aa-1718-11d7-8645000102c1865d
- Başokur, A. T., Koçyiğit, A., Hacıoğlu, Ö., Arslan, H. İ., & Meqbel, N., 2022. Magnetotelluric imaging of the shallow-seated magma reservoir beneath the Karadağ stratovolcano, Central Anatolia, Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 427, 107567. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2022.107567
- Caine, J. S., Forster, C. B., and Evans, J. P., 1993. A classification scheme for permeability structures in fault zones. Eos (Transactions, American Geophysical Union), v. 74, p. 677.
- Cherubini, Y., Cacace, M., Blöcher, G., & Scheck-Wenderoth, M., 2013. Impact of single inclined faults on the fluid flow and heat transport: Results from 3-D finite element simulations. Environmental Earth Sciences, 70(8), 3603–3618. DOI: 10.1007/s12665-012-2212-z
- Düşünür Dogan, D. , Ocakoğlu Gökaşan, N., Tinivella, U. ,Giustiniani, M, Turkdogan, S., Arık, S. & Altan, Z., 2022. Modeling the time-dependent dissolution of Gas Hydrates in the South Shetland Islands, Antarctica.
- Düşünür Doğan, D., & Üner, S., 2019. Numerical simulation of groundwater flow

- and temperature distribution in Aegean Coast of Turkey. *Journal of Earth System Science*, 128(6), 1-12. DOI: 10.1007/s12040-019-1183-9
- Erçetin, E., & Doğan, D., 2021. Deniz Tabanı Batımetrisinin Hidrotermal Dolaşım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması: Lucky Strike Örneği . *İstanbul Yerbilimleri Dergisi* , 2021 (1) , 1-10.
- Fairley, J. P., & Hinds, J. J., 2004. Rapid transport pathways for geothermal fluids in an active great basin fault zone. *Geology*, 32(9), 825. DOI: 10.1130/G20617.1
- Forster, C. B., Goddard, J. V., & Evans, J. P., 1994. Permeability structure of a thrust fault, in *The mechanical involvement of fluids in faulting: U.S. Geological Survey Open-File Report 94-228*, p. 216–223
- Forster, C., & Smith L., 1989. The influence of groundwater flow on thermal regimes in mountainous terrain, a model study. *Journal of Geophysical Research*, 94, 9439–51. DOI: 10.1029/JB094iB07p09439
- Gudmundsson, A., 2000. Active fault zones and groundwater flow. *Geophysical Research Letters*, 27(18), 2993–2996. DOI: 10.1029/1999GL011266
- López, D. L., & Smith, L., 1995. Fluid flow in fault zones: Analysis of the interplay of convective circulation and topographically driven groundwater flow. *Water Resources Research*, 31(6), 1489–1503. DOI: 10.1029/95WR00422
- Loreto, M. F., Düşünür-Doğan, D., Üner, S., İşcan-Alp, Y., Ocakoğlu, N., Cocchi, L., Muccini, F., Giordano, P., & Ligi, M., 2019. Fault-controlled deep hydrothermal flow in a back-arc tectonic setting, Se Tyrrhenian sea. *Scientific Reports*, 9(1). DOI: 10.1038/s41598-019-53696-z
- Magri, F., Akar, T., Gemici, U., & Pekdeğer, A., 2010. Deep geothermal groundwater flow in the Seferihisar-Balçova area, Turkey: results from transient numerical simulations of coupled fluid flow and heat transport processes. *Geofluids*, 10(3), 388–405. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2009.00267.x
- McKenna, J. R., & Blackwell, D. D., 2004. Numerical modeling of transient Basin and Range extensional geothermal systems. *Geothermics*, 33(4), 457–476. DOI: 10.1016/j.geothermics.2003.10.001
- McKibbin, R., 1986. Heat transfer in a vertically-layered porous medium heated from below. *Transport in Porous Media*, 1(4). DOI: 10.1007/BF00208043
- Moreno, D., Lopez-Sanchez, J., Blessent, D., & Raymond, J., 2018. Fault characterization and heat-transfer modeling to the northwest of Nevado del Ruiz Volcano. *Journal of South American Earth Sciences*, 88, 50–63. DOI: 10.1016/j.jsames.2018.08.008
- Parisio, F., Vilarrasa, V., Wang, W., Kolditz, O., & Nagel, T., 2019. The risks of long-term re-injection in supercritical geothermal systems. *Nature communications*, 10(1), 4391. DOI: 10.1038/s41467-019-12146-0
- Randolph, L., & Johnson, B., 1989. Influence of faults of moderate displacement on groundwater flow in the Hickory sandstone aquifer in central Texas. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 21, p. 242. DOI: 10.1306/703ca257-1707-11d7-8645000102c1865d
- Sarkar, S., Toksöz, M. N. & Burns, D. R., 2002. Fluid flow simulation in fractured reservoirs. Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory. DOI:
- Sarkar, S., Toksöz, M. N. & Burns, D. R., 2004. Fluid flow modeling in fractures.

- Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory.
- Scholz, C. H., 1990. The mechanics of earthquakes and faulting: Cambridge, Cambridge University Press, 439 s.
- Simms, M. A., & Garven, G., 2004. Thermal convection in faulted extensional sedimentary basins: Theoretical results from finite-element modeling. *Geofluids*, 4(2), 109–130. DOI: 10.1111/j.1468-8115.2004.00069.x
- Smith, L., Forster, C. B., & Evans, J. P., 1990. Interaction between fault zones, fluid flow, and heat transfer at the basin scale. *Hydrogeology of permeability environments*, International Association of Hydrogeologists, v. 2, p. 41–67.
- Sorey M., 1971. Measurement of vertical groundwater velocity from temperature profiles in wells. *Water Resources Research*, 7, 963–70. DOI: 10.1029/WR007i004p00963
- Şen, E., & Doğan, D., 2021. Finite volume modeling of bathymetry and fault-controlled fluid circulation in the Sea of Marmara. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(5), 628-638. DOI : 10.3906/yer-2101-20
- Taillefer, A., Guillou-Frottier, L., Soliva, R., Magri, F., Lopez, S., Courrioux, G., Millot, R., Ladouche, B., & Le Goff, E., 2018. Topographic and faults control of hydrothermal circulation along dormant faults in an orogen. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. DOI: 10.1029/2018GC007965
- Üner, S., & Dogan, D. D., 2021. An integrated geophysical, hydrological, thermal approach to finite volume modelling of fault-controlled geothermal fluid circulation in Gediz Graben. *Geothermics*, 90, 102004. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.102004
- Üner, S., Ağaçoğuz, G. Ö., & Düşünür Doğan, D., 2019. Hydrogeophysical modelling of Hisarcik (Kütahya) geothermal field, western Turkey. *Geophysical Prospecting*, 67(8), 2176-2195. DOI: doi.org/10.1111/1365-2478.12826
- Yang, J., Large, R. R., & Bull, S. W., 2004. Factors controlling free thermal convection in faults in sedimentary basins: Implications for the formation of zinc-lead mineral deposits. *Geofluids*, 4(3), 237–247. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2004.00084.x
- Yang, J., Latychev, K., & Edwards, R. N., 1998. Numerical computation of hydrothermal fluid circulation in Fractured Earth structures. *Geophysical Journal International*, 135(2), 627–649. DOI: 10.1046/j.1365-246X.1998.00669.x



Basit Kayan Ortalama (SMA) ve Ağırlıklı Kayan Ortalama'nın (WMA) Sismik Yansıma Verisi Üzerinde Uygulanması

The Application Of The Simple Moving Average (SMA) And The Weighted Moving Average (WMA) In Seismic Reflection Data

ORHAN GÜRELİ^{1*} 

¹ Arar Petrol AŞ. Dumluca Sk. No:19, Beysukent, Ankara, Türkiye

Geliş (received): 25 Mayıs (May) 2023 Kabul (accepted): 28 Kasım (November) 2023

Öz

Basit Kayan Ortalama (SMA) ve Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) sayısal istatistik işlemlerinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, ileriye dönük hesaplamalar ve tahminleri optimize etmek amacı ile birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle İstatistikte, Mühendislikte ve Jeofizikte bu metotlar yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemler sismik veri işlem aşamasında "trace mix" ve "trace weighted mix" isimleriyle sismik veriye uygulanır. Bu uygulama ile sismikte Sinyal/Gürültü oranının artması ve verinin kalitesinin daha iyi olması sağlanır. Konvansiyonel sismik yansıma yönteminde, bir atış noktasında 2, 3 veya 4 sweep ile veri toplanır. Bu sweep'ler bazen aynı yerde bazen de move-up olarak adlandırılan yöntemde her sweep farklı noktada yapılır. Genellikle de sahada sismik veri toplama çalışmalarında move-up olacak şekilde veri toplanır. Bu çalışma, sismik yansıma yöntemi ile sahada toplanmış arazi kayıtları üzerinde Basit Kayan Ortalama (SMA) ve Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemlerinin uygulamasını içermektedir. Sahadaki veriler, 5 metre aralıklarla 1 sweep ile toplanmış ve sonrasında SMA ve WMA yöntemleri kullanılarak veri kalitesinin artmasına olanak sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar bu makalede dataylı olarak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ağırlıklı kayan ortalama (WMA), basit kayan ortalama (SMA), düşey toplama, sismik

ABSTRACT

The Simple Moving Average (SMA) and the Weighted Moving Average (WMA) are widely used in numerical statistics. These methods are used in many areas to optimize forward calculations and forecasts. These methods are widely used especially in Statistics, Engineering and Geophysics. In the seismic data processing stage, it is used with the names "trace mix" and "trace weighted mix" to increase the Signal/Noise ratio and improve the quality of the data. In the conventional seismic reflection method, data is acquired with 2, 3 or 4 sweeps at a shot point. These sweeps are generated in the same location and sometimes at a different location, called move-up method. Generally, data is acquired in a move-up manner in data acquisition studies in the field. This study includes the application of The Simple Moving Average (SMA) and the Weighted Moving Average (WMA) methods on field records acquired by seismic reflection method. The seismic reflection data in the field were acquired with 1 sweep on each 5 meters, and then The Simple Moving Average (SMA) and

the Weighted Moving Average (WMA) methods were used to increase the data quality. The results are shown in this study.

Keywords: Simple moving average (SMA), weighted moving average (WMA), vertical stack, seismic

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1302163>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: ogureli@arar.com.tr

GİRİŞ

Kayan ortalama yöntemleri, Jeofizik uygulamalarında kullanılması yanında ekonomi, borsa ve meteoroloji gibi istatistik verilerinin tahmin edilmesinde de çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kayan ortalama yöntemleri, ekonomik verilerin ön kestiriminde sıklıkla kullanılan tekniklerden bir tanesidir. Piyasa eğiliminin tahmin edilmesinde Basit Kayan Ortalama (SMA), Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) gibi birçok yöntem kullanılır. Bu yöntemler, özellikle bireysel yatırımcıların yatırımlarını yönlendirmelerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Kayan ortalama yöntemleri ile ele alınan veride meydana gelen kısa dönemli dalgalanmalardan etkilenmeyerek uzun dönemde meydana gelebilecek trendin öngörülmesi amaçlanmaktadır. Ticari amaçlı farklı dönemlere ait iki kayan ortalamayı karşılaştırarak yatırımcıların karar vermesini kolaylaştırır, bu şekilde yatırımcılar fiyatların oynaklığını analiz ederek fiyat eğilimini tahmin edebilirler. Kayan ortalama sonuçlarına göre şirket değerlerinin artması veya azalması tespit edilmeye çalışılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Wang, 2014; Kılıç ve Sözen, 2020; Oyewola, 2021; Alaca ve Guran, 2022).

Kayan ortalama yöntemleri, teknolojinin gelişmesiyle birlikte bilgisayar destekli ve ticaret yazılım programları dünya çapında profesyonel yatırımcılar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde finansal piyasalarda çok sayıda otomatik yatırım yazılım programları bulunmaktadır. Basit Kayan Ortalama (SMA), Ağırlıklı Kayan

Ortalama (WMA) gibi yöntemler ile borsa piyasa endeks bileşenleri üzerindeki sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Borsada yatırım getirisi, ticaret sisteminin karlılığını ölçmek için kullanılır. Önerilen ticaret sistemi, tüm kayan ortalamalarda çalıştırılır. Borsa hisse senedi bileşenleri ve sonuçta ortaya çıkan yatırım getirisi değerlerinin ortalaması alınarak, gözlemlenen hareketli ortalamaların her biri için genel sonuçlar elde edilir. (Rakicevic, 2014).

Bu yöntemler aynı zamanda istatistik çalışmalarda da kullanılmaktadır. Örneğin, hava tahmin işlemlerinde, şirketlerin kar-zarar tespit etmede kullanılmaktadır. Tahmin işlemlerine yönelik çalışmalarda, mevcut veriler kullanılarak amaç doğrultusunda ön bir çıkarım yapmak için kullanılır. Amaç ileriye doğru bir simülasyon yapmaktır. Aynı zamanda bir yuvarlatma işlemi olarak çalışır. Böylece ortalamanın çok dışında olanlar ortalamaya çekilir. İleriye dönük simülasyonlarda ortalaması alınmış veri kullanılması durumunda doğru bir sonuca ulaşmak daha doğru olur (Taghipour, 2020).

Düzenli (kaynağa bağımlı) ve düzensiz (rastgele) gürültülerin elimine edilmesi sismik veri işleme ve yorumlamada önemli bir adımdır (Yılmaz, 2001). Sismik verilerin sinyal-gürültü oranını ve sismik kesitlerin kalitesini iyileştirmek için sismik yorumlamadan önce düzensiz gürültüler azaltılmalıdır (Saad ve Chen, 2020). Sismik verilerdeki rastgele gürültüyü azaltmak için zaman-uzaklık (t-x) ve frekans-uzaklık (f-x) domeninde kayan ortalama yöntemine dayalı metodlar

geliştirilmiştir (Abma and Claerbout, 1995; Liu, 2012; Naghizadeh and Sacchi, 2012; Al-Heety and Thabit, 2022).

Sismik veri işleme, genellikle deneyimli ve yetkin jeofizikçilerin yorumlarıyla birleştirilerek uygulanan ardışık cebirsel, istatistiksel ve sinyal işleme aşamaları gerektirir. Bu sismik veri işleme aşamaları; geometrik yayılım düzeltmesi, statik düzeltme, frekans/dalga boyu filtreleme, hız analizi, ters evrişim, yığma öncesi ve sonrası sinyal gürültü oranını artırıcı işlemleri ("mix" işlemleri gibi), zaman/derinlik geçişi vb.'yi içerir (Yılmaz, 2001).

Sismik veriler genellikle sismik gürültü içerir ve sinyal-gürültü oranını (S/N) artırmak için bu gürültünün kaldırılması gerekir (Liu and Chen, 2013; Siahisar, 2017). Sismik araştırmalardaki gürültü, özellikle çeşitli nedenlerden dolayı kaydedilen sismik sinyallerin yorumlanamayan veya istenmeyen bir kısmını ifade eder. Gürültü azaltmada ilk adım, gürültünün kaynaklarını ve fiziksel özelliklerini tanımlamak için sismik verileri analiz etmektir; gürültüler genellikle iki gruba ayrılır: ilki kaynağa bağımlı gürültüler (Yüzey gürültüleri, Baş dalgalar, Tekrarlı yansımalar vb.), ikincisi ise düzensiz gürültülerdir (örn. Araç gürültüsü, rüzgar, deprem vs) (Carolyn, 2010). Çoğu düzensiz gürültü olarak bilinen bu gürültüler, sismik verinin kalitesini bozar. Sismik kesitlerin Jeolojik yorumlanmasında hatalara sebep olabilir.(Chen ve Fomel, 2015).

SMA ve WMA yöntemleri de sismik veri işlemede rastgele gürültülerin bastırılması amacıyla t-x domeninde "trace mix" ve "trace weighted mix" adıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Promax,1999).

SMA ve WMA yöntemleri, CDP yığma işleminden sonra farklı sismik izlerin ortalaması alınarak düzensiz gürültüler bastırılmış ve genlikleri güçlendirilmiş olup yeni sismik izler

ve izlerin oluşturduğu kesitler elde edilir (Haldorsen and Farmer, 1989).

Bu çalışmada SMA ve WMA yöntemleri yukarıda verilen uygulama alanlarının dışında farklı bir şekilde kullanılmıştır.

Konvansiyonel sismik veri toplama yönteminde, alıcı aralığı 20-25 m seçilirken atış aralığı ise genellikle seçilen alıcı aralığının bir veya iki katı seçilir. Bu seçilen aralıklarda 3, 4, 5 veya 6 sweep ayrı ayrı yapılarak test edilir ve seçilen sweep sayısı ile veri toplama yapılır. Aynı atış noktasında sweep sayısı kadar atış yapılır ve kayıt edilir. Bu atışlar arazide iki türlü yapılır. Atışlar seçilen sweep sayısı kadar aynı noktada yapılırsa No-move-up, her sweep fatlı noktalarda yapılırsa Move-up tekniği denir. Daha sonra bu kayıtlar üst üste (Veritcal stack) toplanır. Böylece her atış noktasında bu işlem yapılarak profil boyunca devam edilir. Move-up mesafesi atış aralığının sweep sayısına bölümü ile bulunur. Örneğin 20 m atış aralığı olan bir profilde 4 sweep yapılırsa, move-up mesafesi 5 m olur. Yani sahada her 5 m'de 1 sweep yapılmış olur. 5 m aralıklarla yapılan 4 atış toplanır ve tek bir atış kaydı elde edilir. Daha sonra yine 5 m aralıklarla 4 sweep yapılır, yine toplanır ve yeni bir kayıt elde edilir. Toplanarak elde edilen bu iki kaydın arası atış aralığına eşit 20 m olur.

Bu çalışmada ise sahadaki 5'er metre aralıklarla kaydedilen her bir kayıt, atış kaydı olarak kabul edilir ve diske atış olarak yazılır. Sahada herhangi bir üst üste (Vertical stack) toplama işlemi yapılmaz. Arazide 1 sweep ile ve 5 m aralıklarla toplanmış verilere hem Basit Kayan Ortalama (SMA) hem de Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) işlemi uygulanır. Böylece sahada 1 sweep ile veri toplanmış olmasına rağmen, ön bir veri işlem ile sweep sayısı 3'e, 5'e veya daha fazla bir sweep sayısına dönüştürülür. Bu işlemin sonucunda, profil boyunca 5'er metre aralıklarla, 3 sweep'li, 5

sweep'li veya daha fazla sweep'li veri toplanmış gibi olur.

Bu amaçla, Libya Sirte baseninde test amaçlı bir profil üzerinde veri toplama çalışması yapıldı. Bu çalışmada Libya çölünde yapılan test profilinin verisi kullanılmıştır.

ÇALIŞMA SAHASININ JEOLJİSİ

Bu çalışmada kullanılan sismik test verisi Libya-Sirte baseni üzerindedir. Sirte Baseni, Libya'nın en genç tortul havzalarından biridir ve Libya'nın orta kuzeyinde 600.000 km²'lik bir alanı kaplamaktadır. Kuzey Afrika kıta kenarı boyunca yer alır, Akdeniz kıyısı boyunca Sirte Körfezi ile sınırlanır ve 26 derece kuzey enlemin güneyine kadar uzanır. Bu havza, batıda Hun Grabeni'nden başlayıp doğuda Sirenayka Platformu'na kadar uzanan ve doğu-batı yönünde 600 km boyunca bir dizi kuzeybatı yönlü platform ve grabenlerden oluşur. Güneyde Tibisti Masifi, batıda Al Qarqaf Yükselişi, Ghadamis ve Murzuq havzaları ile sınırlanmıştır. Sirte havzasının topoğrafyası, Dahra platformunda deniz seviyesinden 330 m yükseklikten Agedebia Çukuru'nun kuzeyinde deniz seviyesinin -27.5 m altına kadar değişkendir. En düşük kısım, Sirte Körfezi yakınında kıyı şeridinde yakın bir yerde bulunur ve Abadi (2002) tarafından en son aşama (49 Ma-mevcut) için hesaplanan tektonik çökme ile çakışır. Mesozoyik ve Kainozoyik yaşta (98.9 Ma-0Ma) Sirte havzasının doğu kesiminde havzanın en derin yerinde (Agedabia çukuru) 7 km'den fazla sediman kalınlığı bulunur (Elakkari, 2005).

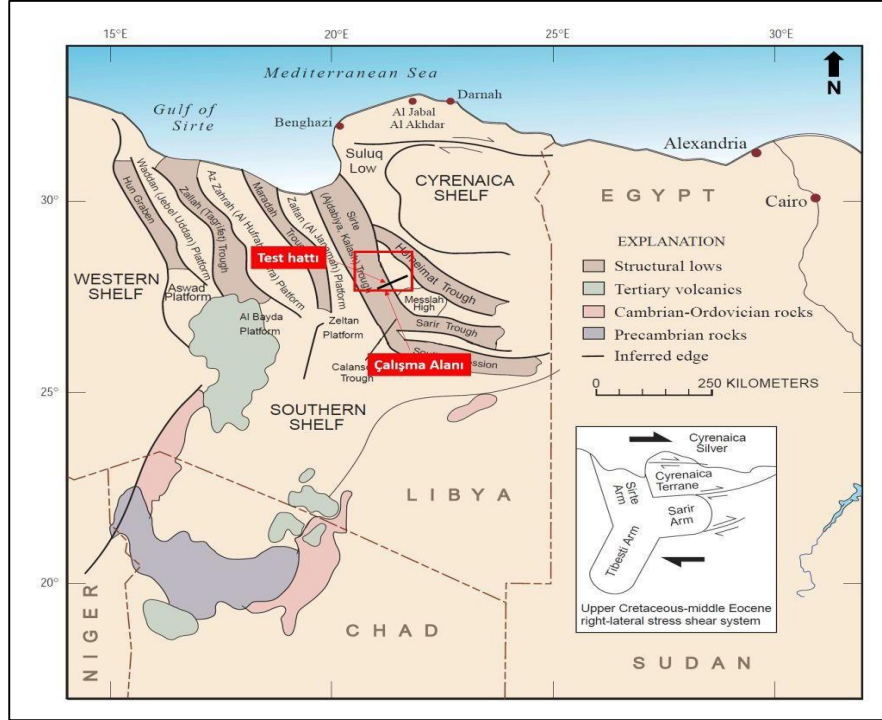
Sirte Baseni ve çevresi, bir kıta açılma (genişleme) alanının holotipi olarak kabul edilir ve Tetis açılma sisteminin bir parçası olarak anılır (Futyay ve Jawzi, 1996; Guiraud ve Bosworth, 1997). Bölgenin yapısal zayıflığı, bir

dizi proto-kitasal parçayı erken bir Gondwanaland'da konsolide eden Pan Afrika orojenezi ile başlayan geç Prekambriyen döneminden kaynaklanan birbirini izleyen yükselme ve çökme dönemleriyle örneklendirilir (Kroner, 1993).

Geç Kretase riftleşme olayı, doğuya doğru kademeli olarak aşağı doğru düşen bir dizi kuzeybatı yönlü horst ve graben oluşumu ile karakterize edilir. Sirte Çukuru (Ajdabiya Çukuru, Ebu Attifel Graben, Hameitat, Kalash veya Sirt Çukuru veya Grabeni olarak da bilinir) (Finetti, 1982; Montgomery, 1994; Hallett ve El Ghoul, 1996; Roohi, 1996a, b; Mansour ve Magairhy, 1996) havzanın en derin bölümünü temsil eder (Şekil 1).

Sirte Havzası, Sirte eyaletinin doğu kesimindeki Sarir Kumtaşı'nın (Nubian Kumtaşı eşdeğeri) eş-rift kırıntıları, Orta ve Geç Jura ve Erken Kretase döneminde Sarir kolunda doğu-batı uzanımlı bir dizi horst ve graben içinde ve bunlar boyunca biriktirir. (Şekil 1). Bu çökme dönemini, Geç Kretase'de başlayan ve Erken Kretase'ye uzanan bir dizi kuzeybatı-güneydoğu yönlü horst ve grabenlerin (Sirte kolu) oluşumuyla sonuçlanan üçlü bir kavşağın kuzeydoğu kolu boyunca riftleşme izlemiştir.

Sirte Havzasında, Sirte-Zelten Toplam Petrol Sistemi olarak adlandırılan, büyük bir petrol toplama sistemi vardır. Toplam petrol sistemi, Magoon ve Dow (1994)'un belirttiği gibi ana kaynak kayanın Rakb Grubu'nun Üst Kretase yaşlı (Senoniyen/ Kampaniyen) Sirte Şeyli olduğu kabul edilmiştir. Ancak bazı yazarlar, Tagrifet Kireçtaşı (Koniasiyen/ Santoniyen) ile ayrılmış bir Üst Sirte Şeylini (Kampaniyen) ve Aşağı Sirte Şeylini (Turoniyen) kaynak kaya olarak kabul etmişlerdir (Mansour ve Magairhy, 1996; Ahlbrandt, 2001).



Şekil 1. Sirte Havzası'nın yapısal unsurları. Bireysel horstlar ve grabenler birden fazla isme sahiptir. Örneğin, Sirte (Sirt) Çukuru, belirtildiği gibi Kalash veya Ajdabiya Çukuru olarak da bilinir (Ahlbrandt, 2001'den değiştirildi). Oklar faylardaki göreceli hareketin yönünü gösterir.

Figure 1. Structural elements of Sirte Basin. Individual horsts and grabens possess multiple names. For example, the Sirte (Sirt) Trough is also known as the Kalash or Ajdabiya Trough, as noted (modified from Ahlbrandt, 2001). Barbs show direction of relative movement on faults

YÖNTEM

Kayan ortalama (Moving Average - MA)

Kayan ortalama (MA) yöntemi, belirli bir veri dizisinin içinde belirli bir aralıkta verinin ortalamasını veren sayısal tabanlı bir işlemdir. Temel olarak, Kayan Ortalamalar verileri yorumlamaya çalışırken gürültüyü bastırır ve verileri yuvarlatır. Kayan Ortalama yöntemi veride bir yumuşatma/yuvarlatma yaptığından verinin yüksek frekanslı kısmını törpülemiş

olur. Böylece veri alçak geçiren bir süzgeçten geçirilmiş gibi olur.

Bu çalışma da, Sirte baseninde toplanmış sismik veriye Basit Kayan Ortalama (SMA) ve Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemi uygulanmış ve sonuçları gösterilmiştir.

Ortalama alma işlemi uygulandığında, verinin başında ve sonunda bir miktar veri kaybı olur. Bu kayıp operatör uzunluğuna bağlı olup, verinin başında ve sonunda operatör uzunluğunun bir fazlasının yarısının bir eksiği kadar olur.

Basit kayan ortalama (Simple Moving Average - SMA)

Basit kayan ortalama, bir veri dizisi içerisinde belirli bir aralıkta seçilen veri dizisini toplayıp ortalamasını hesaplayan bir yöntemdir.

Basit Kayan Ortalama (SMA), ağırlık katsayıları eşit olan bir Kayan Ortalama şeklinde tarif edilebilir. Bu yöntemde, veri serisindeki her bir veri eşit öneme sahip ve eşit ağırlıkta olduğu

anlamına gelir. Bir seride seçilen veriler toplanır, toplanan değer eleman sayısına bölünür ve orta noktaya atanır, daha sonra bir birim kaydırılır ve aynı işlemler tekrar edilir. Bu işlem tüm profil boyunca yapıldıktan sonra elde edilen veri, SMA uygulanmış veri olarak kaydedilir. Elde edilen veri daha sonra prosesin giriş verisi olur. Böylece yüksek frekanslı veriler törpülenir ve alçak geçiren süzgeç ile filtrelenmiş olur (Box, 1970; Stewart, 1985; Haldorsen and Farmer, 1989; Moles, 1997; Promax, 1999; Rakicevic, 2014; Wang, 2014; Yang, 2018; Bağcı, 2020).

Veri serisi;

$$A = a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, \dots, a_n \quad (1)$$

n: eleman sayısı

şeklinde ve kayan ortalama operatörü m (tek sayı) ise;

Kayan ortalama sonrası veri serisi B aşağıdaki gibi olacaktır.

$$B_{\frac{m+1}{2}} = \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{m} \quad (2)$$

Örnek Hesaplama:

A: Veri değerleri: 5, 7, 6, 11, 5, 9, 5 ; n=7 (3)

Basit kayan ortalama (SMA) operatörü m=5 olsun. Buna göre;

Birinci SMA değeri:

$$B_{(5+1)/2} = B_3 = \frac{5+7+6+11+5}{5} = 6,8,$$

İkinci SMA değeri:

$$B_4 = \frac{7+6+11+5+9}{5} = 7,6,$$

Üçüncü SMA değeri:

$$B_5 = \frac{6+11+5+9+5}{5} = 7,2 \text{ olur. Böylece;}$$

B: Basit kayan ortalama sonrası veri serisi:

$$6,8, 7,6, 7,2 \quad (4)$$

olmaktadır.

Ağırlıklı kayan ortalama (Weighted Moving Average - WMA)

Ağırlıklı kayan ortalama (WMA), Basit kayan ortalama'ya – (SMA) benzemektedir. Ancak WMA'da orta noktaya daha yakın veri noktalarının önemi daha fazladır, uzak noktaların önemi ise daha azdır. Kayan ortalama içindeki noktaların herbiri, farklı ağırlık katsayısı ile çarpılarak toplanır ve ortalaması hesaplanır. Daha sonra, tüm hesaplamalar SMA uygulamasına benzer bir şekilde yapılır (Hunter 1986; Lowry, 1986; Moles, 1997; Wang, 2014; Promax, 1999;).

$$B_{\frac{m+1}{2}} = \sum_{i=1}^m w_i a_i \quad (5)$$

burada

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (6)$$

dir. Yani WMA'da işleme giren tüm katsayıların toplamı 1'e eşittir.

Örnek Hesaplama:

A: Veri değerleri: 5, 7, 6, 11, 5, 9, 5 ;

n=7

Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) operatörü m=5, Ağırlık katsayıları da 1,2,3,2,1 ve toplamı 9 olsun. Buna göre;

Birinci WMA değeri:

$$B_{(5+1)/2} = B_3 = \frac{1*5+2*7+3*6+2*11+1*5}{9} = 7,1,$$

İkinci WMA değeri:

$$B_4 = \frac{1*7+2*6+3*11+2*5+1*9}{9} = 7,9,$$

veri işlem yazılımı ile proses edildi. Sahadan gelen arazi ham kayıtları önce ThrustLine proses programına yüklendi. Geometri işlemleri tamamlandıktan sonra ön analizler yapıldı ve bir proses iş akışı çıkarıldı. Daha sonra tüm test çalışmaları için bu iş akışı uygulandı. Sahada toplanmış arazi verisi, Çizelge 2'de verilen proses iş akışına göre Yığma öncesi zamanda göç işlemi (PreStack Time Migration- PSTM) seviyesinde proses edildi (Yılmaz, 1987).

SİSMİK VERİ UYGULAMASI

Sahada Çizelge 1'de verilen parametrelere göre iki boyutlu veri toplama çalışması yapılmıştır. Bir profil boyunca 5m atış - alıcı aralığı ve 1200 canlı kanal olacak şekilde simetrik split spread tekniği ile 4608 farklı noktada atış yapılmış ve 4610 alıcı noktadan ise kayıt alınmıştır. Tüm atışların sweep parametreleri; 4 vibratör, lineer sweep, 6 – 96 Hz, 8 sn sweep boyunda olup 1 sweep ile kaydedilmiştir.

Konvensiyonel veri toplama tekniği

Konvensiyonel veri toplama tekniğinde bir atış noktasında seçilen sweep sayısı kadar sweep üretilir ve kroskorelasyon yapılmadan hafızaya kaydedilir. Hafızaya kaydedilen kroskorelasyon yapılmamış ham veri üst üste toplanır ve kroskorelasyon işlemi ile atış kaydı elde edilir. Daha sonra bir sonraki atış noktasına geçilir ve tüm işlemler tekrar edilir. Bu teknikte sweep sayısı, 2, 4 veya 6 sweep ve atış aralığı da 10m, 20m veya 25m olabilir. Genelde atış aralığı arttıkça sweep sayısı da artar. Nedeni ise atış aralığının artmasına bağlı olarak katlama sayısı azalır, dolayısıyla sismik kalite düşmeye başlar. Bu düşmeyi gidermek ve daha kaliteli veri toplamak için sweep sayısı artırılır.

Karşılaştırmak amacıyla bu çalışmada, atış aralığı 10 m ve sweep sayısı 2 olacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun için atışlar ikişer ikişer

toplanarak yeni atış seti çıkarılmıştır. Bu atış setleri konvensiyonel yöntemle toplanmış atış verisi olarak kabul edilmiştir ve kıyaslamalarda bu atışlar kullanılmıştır (Şekil 3).

Çizelge 1. Test hattının atış ve kayıt parametreleri

Table 1. Shot and receiver parameters of test line

Atış ve Kayıt Parametreleri	
Canlı kanal sayısı	1200
Kaynak	Vibratör
Spread	Symmetric split-spread without gap
Atış aralığı (SI)	5 m
Alıcı aralığı (GI)	5 m
Jeofon sayısı/nokta	12 jeofon bunch şeklinde
Yakın ofset	2.5 m
Maksimum ofset	2997.5 m
Fold sayısı	600
Örnekleme aralığı	2 ms
Kayıt uzunluğu	4 sec
Sweep sinyali	Lineer 6 – 96 Hz
Sweep uzunluğu	8 s
Sweep sayısı/ VP	1
Vibro sayısı	4
Toplam alıcı sayısı	4610
Toplam atış sayısı	4608
Profil yükseklik aralığı	290-345 m

Test çalışması için sahada toplanan veriye Basit Kayan Ortalama (SMA) ve Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) uygulamasının yapılış şekli ile ilgili bilgi Şekil-4'te verilmiştir. Sahada 1 sweep ile toplanan verilerin Kayan Ortalama teknikleri ile sweep sayısını artırmak mümkündür. Amaç sweep sayısı artarken atış aralığının artmamasıdır. Yani düşük atış aralığı ile çok daha fazla sweep sayılı kayıt elde etmek mümkündür. Yine sahada 1 sweep ile veri toplandıktan sonra değişik eleman sayılı

($m=3,5,7,9, \dots$) SMA ve WMA işlemi yapmak mümkündür. Bu çalışmada konvensiyonel yöntemle toplanmış veri ile karşılaştırmak için $m=5$ ve $m=9$ elemanlı SMA ve WMA yapılmıştır.

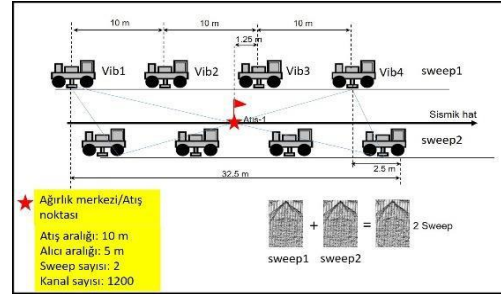
Çizelge 2. Veri işlem iş akışı

Table 2. Data processing work flow

Temel veri işlem iş akışı
Read SegY or SegD data
SMA and WMA process
First break picking and tomo-static calculation
Bad shot & Traces editing
True amplitude recovery, Surface consist amplitude recovery
Surface consist deconvolution
Velocity analysis 1
NMO-I
Stack-1
Residual static 1
Stack-2
Velocity analysis 2
NMO-II
Stack-3
Residual static 2
Final Stack-4
Filter, AGC, Signal enhancement after post stack
PreStack Time Migration (PSTM) and Velocity analysis
PSTM Stack, Signal enhancement

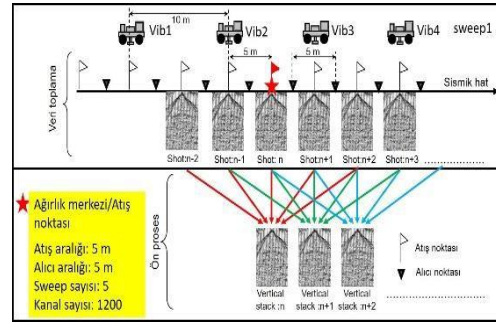
Basit kayan ortalama (Simple Moving Average - SMA)

Şekil 5'te, 5 elemanlı bir SMA'nın nasıl yapıldığı gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi 5 elemanlı bir sabit kayan ortalamanın uygulama şekli, 5 adet sıralı atışların üst üste toplanması ile olmaktadır. 5 adet atışların aynı kanallarındaki veriler üst üste toplanır ve 5'e bölünür. Bu işlem sonucunda yeni bir atış elde edilir. Elde edilen bu atış orta noktaya atanır.



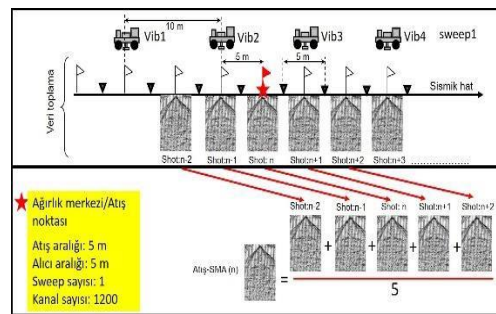
Şekil 3. Konvensiyonel yöntem için veri toplama parametreleri ve şeması

Figure 3. Data acquisition parameters and diagram for the conventional method



Şekil 4. Test için sahada Veri toplama tekniği ve Basit Değişken Ortalama (SMA) ve Ağırlıklı Değişken Ortalama (WMA) uygulaması

Figure 4. The technical of Data acquisition in the field for test and the Simple Floating Mean (SMA) and Weighted Floating Mean (WMA) application



Şekil 5. Basit Kayan Ortalama (SMA) yönteminin veriye uygulama şeklinin görünüşü

Figure 5. The appearance of the application of the Simple Moving Average (SMA) method to the data

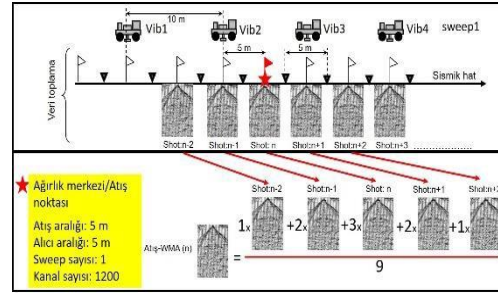
Sonra bir kaydırılarak, yine 5 atış alınır ve üst üste toplanır. Bu süreç tamamlandığında, yeni atışlar hep 5 sweepli olacak, fakat atış aralığı yine sabit kalacaktır. Ayrıca bu yöntemle SMA elemanı değiştiğinde, seçilen sayı kadar sweep sayılı atışlar elde edilmiş olacaktır. Karşılaştırmak amacıyla $m=5$ ve $m=9$ elemanlı yapılmıştır.

Ağırlıklı kayan ortalama (Weighted Moving Average - WMA)

Şekil 6'da, 5 elemanlı bir WMA'nın nasıl yapıldığı gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi 5 elemanlı bir ağırlıklı kayan ortalamanın uygulama şekli, 5 adet sıralı atışların farklı katsayılarla çarpılması ve üst üste toplanması ile yapılmıştır. 5 adet atışların aynı kanallardaki veriler önceden belirlenen katsayılar ile çarpıldı ve üst üste toplandı ve katsayıların toplamına bölünerek yeni bir atış elde edildi. Daha sonra bir kaydırılarak, yine 5 atış alındı ve aynı işlemler yapılarak yeni atışlar elde edildi. Bu süreç tamamlandığında, yeni atışlar hep 5 sweepli oldu, fakat katsayıları farklı olduğu için, ortadaki atışa yakın atışların etkinliği daha fazla, uzak atışların etkinliği ise daha az olmuştur. Yine bu işlemin sonucunda yeni elde edilen atışların aralığı yine sabit kalmıştır. Ayrıca bu yöntemle WMA elemanı değiştiğinde, seçilen sayı kadar sweepli atışlar elde edilmiş olmaktadır (Şekil 6). Bu çalışma için karşılaştırma yapmak amacıyla $m=5$ ve $m=9$ elemanlı uygulama yapılmıştır.

Şekil 7'de 2 sweep ile kaydedilmiş konvansiyonel bir atış kaydı görülmektedir. Ayrıca aynı kaydın Frekans-Dalga sayısı (FK) ortamında görünüşü de yer almaktadır. Atış kaydı zaman ve FK ortamında incelendiğinde yüksek frekanslı gürültüler göze çarpmaktadır. Bu gürültülerin bastırılıp, sinyallerin güçlendirilmesi için Basit Kayan Ortalama (SMA) ve Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) işlemleri yapılmıştır. Bu iki yöntem, eleman sayısı

$m=5$ ve $m=9$ olacak şekilde kayan ortalama yöntemleri ayrı ayrı denenmiş ve sonuçları konvansiyonel yöntemle toplanmış veri ile karşılaştırılmıştır.

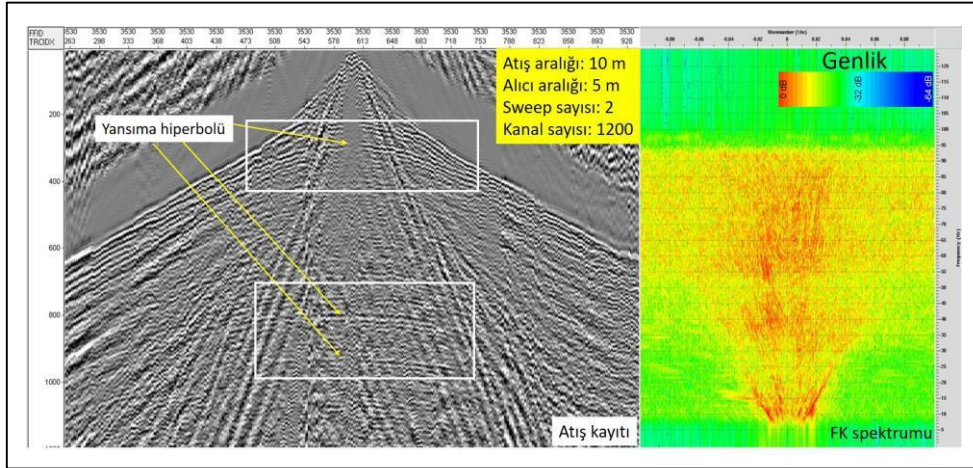


Şekil 6. Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yönteminin veriye uygulama şeklinin görünüşü

Figure 6. The appearance of the application of the Weighted Moving Average (WMA) method to the data

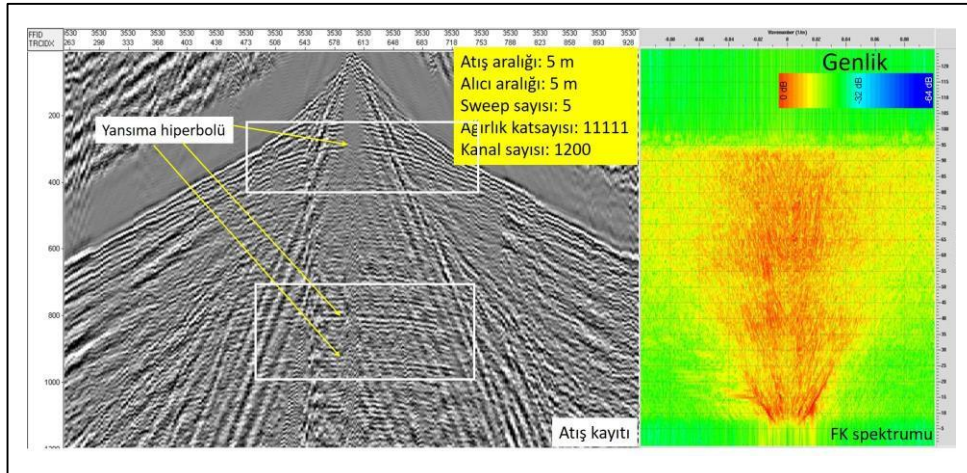
Şekil 8'de sahada toplanmış veriden $m=5$ 'li Basit Kayan Ortalama (SMA) yöntemiyle elde edilmiş bir kayıt ve FK spektrumu görülmektedir. Şekil 8, Şekil 7'deki atış ve FK spektrumları ile karşılaştırıldığında, sinyallerin genliklerinin arttığı ve gürültülerinin azaldığı hem atışta hem de FK spektrumlarında görülmektedir. Kayıtlarda görülen yansıma hiperbollerini de daha belirgin olmuştur (Beyaz dikdörtgen içi).

Şekil 9'da sahada toplanmış veriden $m=5$ 'li Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemiyle elde edilmiş bir kayıt ve FK spektrumu görülmektedir. Şekil 9, Şekil 7 ve Şekil 8 ile karşılaştırıldığında, atış kaydı üzerindeki yansıma hiperbollerini daha da belirgin (Beyaz dikdörtgen içi) ve yüksek frekanslı gürültülerin daha da fazla elimine olduğu FK spektrumunda görülmektedir. Bu işlem ile Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yönteminden elde edilen sonuçlar ile Basit Kayan Ortalama (SMA) ve konvansiyonel yöntemle elde edilen sonuçlar



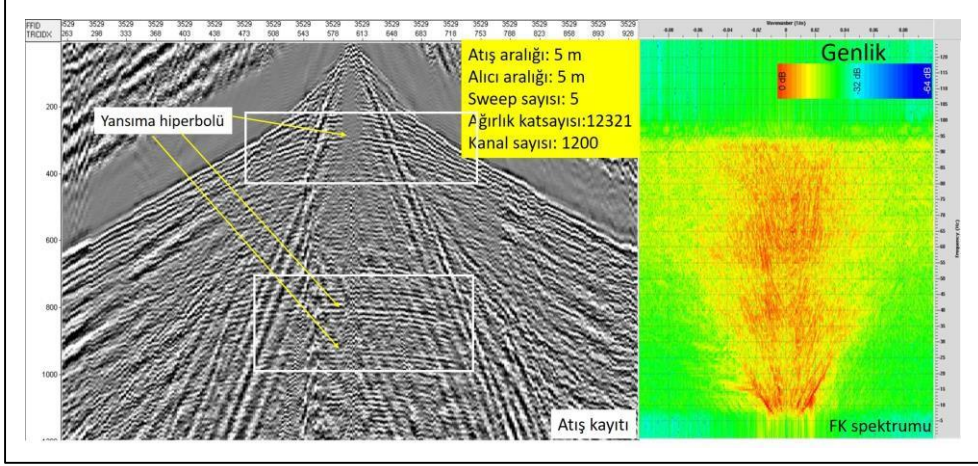
Şekil 7. Konvensiyonel veri toplama yöntemi ile toplanmış atış örneği ve FK spektrumu

Figure 7. A view of conventional shot and its FK spectrum



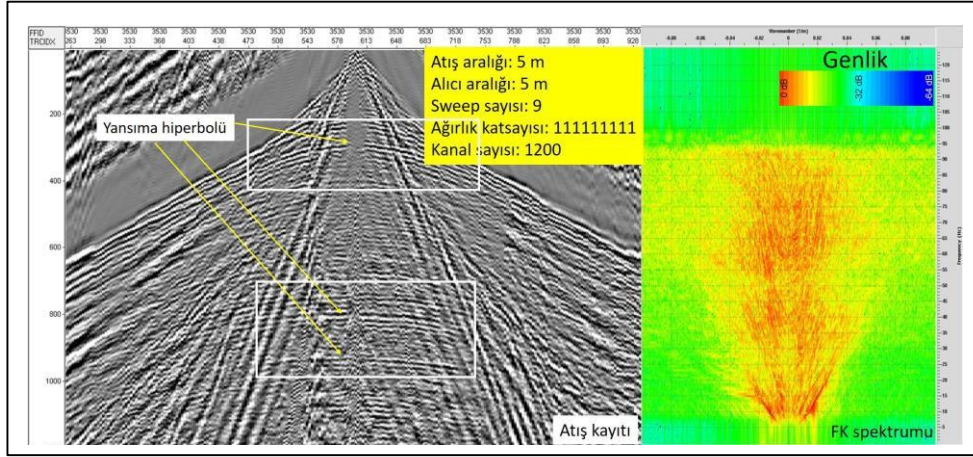
Şekil 8. Sahada toplanmış veriden $m=5$ 'li Basit Kayan Ortalama (SMA) yöntemiyle üretilmiş atış örneği ve FK spektrumu

Figure 8. A view of generated shot by the Simple Floating Mean (SMA)($m=5$) and its FK spectrum



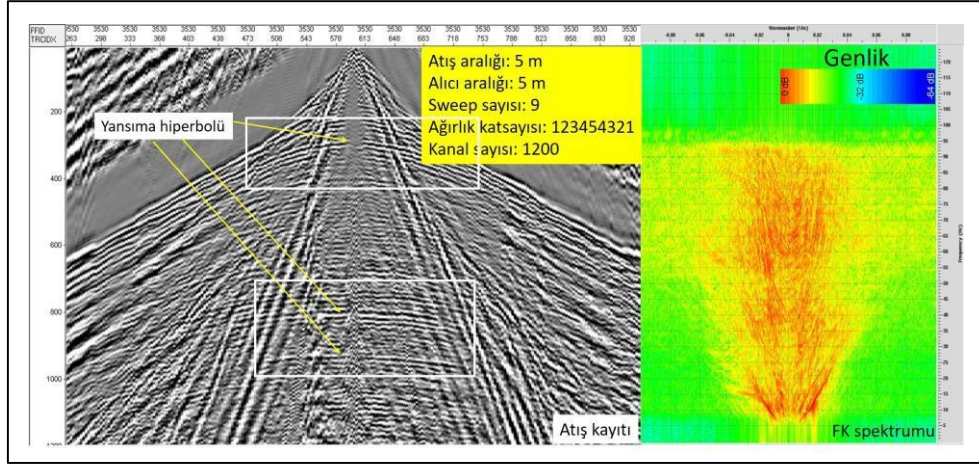
Şekil 9. Sahada toplanmış veriden $m=5$ 'li Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemiyle üretilmiş atış örneği ve FK spektrumu

Figure 9. A view of generated shot by the Weighted Floating Mean (WMA)($m=5$) and its FK spectrum



Şekil 10. Sahada toplanmış veriden $m=9$ 'lu Basit Kayan Ortalama (SMA) yöntemiyle üretilmiş atış örneği ve FK spektrumu

Figure 10. A view of generated shot by the Simple Floating Mean (SMA)($m=9$) and its FK spectrum



Şekil 11. Sahada toplanmış veriden $m=9$ 'lu Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemiyle üretilmiş atış örneği ve FK spektrumu

Figure 11. A view of generated shot by the Weighted Floating Mean (WMA)($m=9$) and its FK spectrum

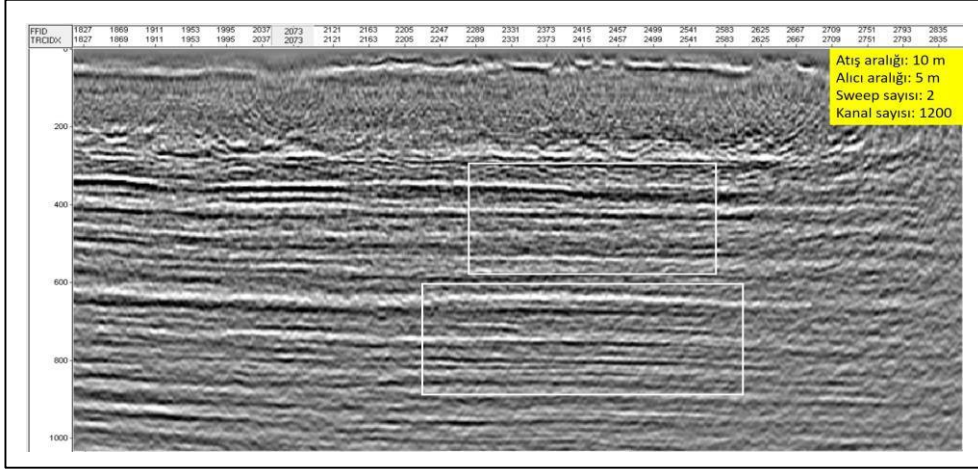
kıyaslandığında WMA'nın daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Böylece yüksek frekanslı gürültüler daha fazla elimine olmuştur. Şekil 13'teki FK spektrumu incelendiğinde kırmızı bölgelerin ortaya toplandığı, diğer bölgeler ise kırmızıdan sarıya ve yeşile doğru değiştiği görülmektedir. Yani yansıma verisinin (kırmızı bölgeler) daha da güçlendiği ve diğer bölgelerin (kırmızıdan sarıya ve yeşile doğru değişen bölgeler) ise daha da zayıfladığı anlamına gelmektedir.

Şekil 10'da sahada toplanmış veriden $m=9$ 'lu Basit Kayan Ortalama (SMA) yöntemiyle üretilmiş atış örneği ve FK spektrumu görülmektedir. Şekil 10, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9 ile karşılaştırıldığında, yansıma hiperbollerini çok daha belirgin ve yüksek frekanslı gürültüler çok daha fazla elimine olmuştur. Kayan ortalamaya giren veri sayısının artmasıyla yansıma hiperbollerini çok daha fazla belirgin hale gelmiştir (Beyaz dikdörtgen içi). Bunun ile birlikte FK spektrumunda da değişiklik

olmuştur. Kırmızı bölgeler daha daralmış ve artmış, sarı bölgeler yeşile doğru kaymıştır. Yani hiperbollerinin genliği artmış, yüksek frekanslı gürültüler azalmıştır.

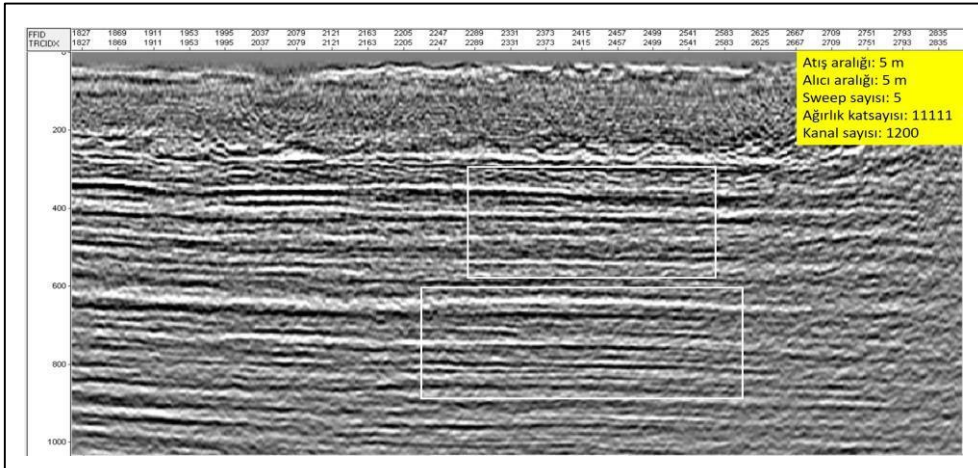
Şekil 11'de sahada toplanmış veriden $m=9$ 'lu Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemiyle üretilmiş atış örneği ve FK spektrumu görülmektedir. Şekil 11, Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10 ile karşılaştırıldığında, yansıma hiperbollerini daha da belirgin ve yüksek frekanslı gürültülerin daha da fazla elimine olduğu görülmektedir. Yansıma hiperbollerini (Beyaz dikdörtgen içi) daha da belirgin hale gelmiştir. Gürültüleri bastırılmış ve yansıma hiperbollerini daha da görünür hale gelmiştir.

Yöntemler atış ortamında incelendiklerinde, Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemi konvansiyonel yöntemle göre daha kalitelidir, yani verinin kalitesi artmıştır. Bu sonuç atışlardaki yansıma hiperbollerinin daha belirgin olmasından anlaşılmaktadır.



Şekil 12. Konvensiyonel yöntemle toplanmış veriden elde edilmiş PSTM kesiti

Figure 12. PSTM section obtained from conventional data



Şekil 13. Sahada toplanmış veriden Basit Kayan Ortalama (SMA) yöntemiyle üretilmiş veriden elde edilmiş PSTM kesiti

Figure 13. PSTM section obtained from the Simple Floating Mean (SMA) ($m=5$) data

Konvensiyonel yöntemle toplanmış veri ile birlikte bu çalışmada elde edilen SMA ve WMA verisinin prosesleri yapılmıştır. Prosesler aynı veri işlem aşamalarından (Çizelge 2) geçirilmiş ve aynı parametrelerle yapılmıştır. Günümüzde sismik verinin daha doğru ve daha kaliteli yorumu için veri asgari Yığıma öncesi göç işlemi (Pre-Stack Time Migration – PSTM) seviyesinde proses edilir. Genel olarak PSTM seviyesinde proses edilmiş verinin yorumu jeolojik olarak daha doğru ve jeolojiyle daha uyumlu olmaktadır. Şekil 12'den Şekil 16'ya kadar PSTM seviyesinde proses edilmiş sismik kesitler görülmektedir. Veri işlem aşamaları hep aynı olup sadece giriş verileri farklıdır. Giriş verileri yukarıda farklı eleman sayılı ($m=5$ ve $m=9$) SMA ve WMA yöntemiyle elde edilmiş verilerdir.

Şekil 12'de, Şekil 7'deki veri ile proses edilmiş PSTM kesiti görülmektedir. SMA ve WMA yöntemiyle elde edilen kesitler bu kesit ile kıyaslanacaktır. Bu kesit konvensiyonel yöntemle sahada 2 sweep ile toplanmış veriden elde edilmiştir. Kesitte seviyeler daha zayıf ve kalite düşüktür (Beyaz dikdörtgen içi). Bu yöntemlerin amacı bu düşük kaliteyi artırmaktır.

Şekil 13'de, Şekil 8'deki veri ile proses edilmiş PSTM kesiti görülmektedir. Bu kesit $m=5$ elemanlı SMA kesitidir. Yani bu yöntemle $m=5$ sweepli bir kesit olmuştur. Şekil 12 ile karşılaştırıldığında bir miktar kalitede artış olmuştur. Yorumlanacak seviyeler biraz daha belirgin hale gelmiştir (Beyaz dikdörtgen içi).

Şekil 14'de, Şekil 9'daki veri ile proses edilmiş PSTM kesiti görülmektedir. Bu kesit $m=5$ elemanlı WMA kesitidir. Yani bu yöntemle $m=5$ sweepli bir kesit olmuştur. Şekil 12 ve Şekil 13 ile karşılaştırıldığında bir miktar daha kalitede artış olmuştur. Yorumlanacak seviyeler biraz daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 13 ile

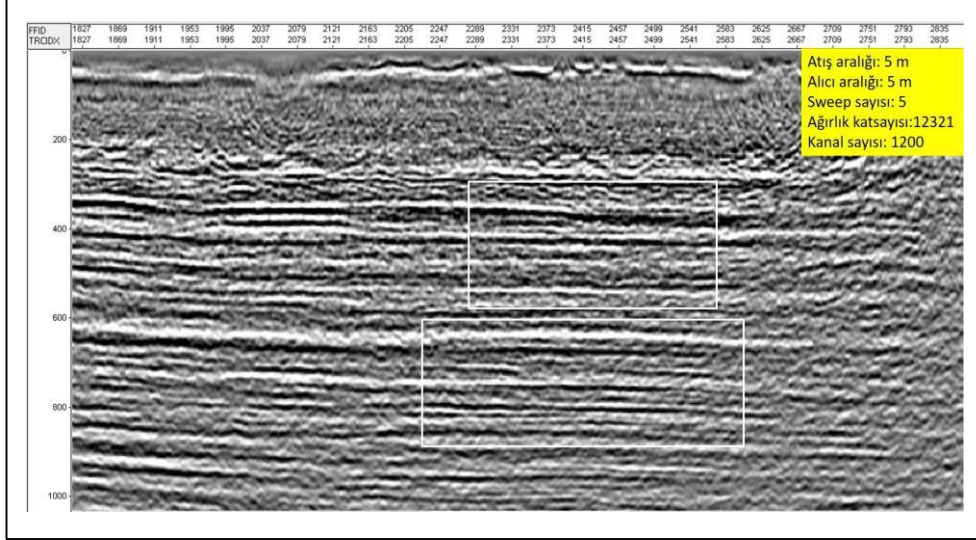
incelendiğinde de kalitede bir miktar artış olmuştur (Beyaz dikdörtgen içi).

Şekil 15'de, Şekil 10'daki veri ile proses edilmiş PSTM kesiti görülmektedir. Bu kesit $m=9$ elemanlı SMA kesitidir. Yani bu yöntemle $m=9$ sweep'li bir kesit olmuştur. Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14 ile karşılaştırıldığında kalitede bir miktar daha artış olmuştur. Yorumlanacak seviyeler daha da belirgin hale gelmiştir. Şekil 14 ile incelendiğinde de kalitede daha da artış olmuştur (Beyaz dikdörtgen içi).

Şekil 16'da, Şekil 11'deki veri ile proses edilmiş PSTM kesiti görülmektedir. Bu kesit $m=9$ elemanlı WMA kesitidir. Yani bu yöntemle $m=9$ sweep'li bir kesit olmuştur. Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15 ile karşılaştırıldığında kalitede çok daha fazla artış olmuştur. Yorumlanacak seviyeler çok daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 15 ile de karşılaştırıldığında kalitede çok daha fazla artış olmuştur (Beyaz dikdörtgen içi).

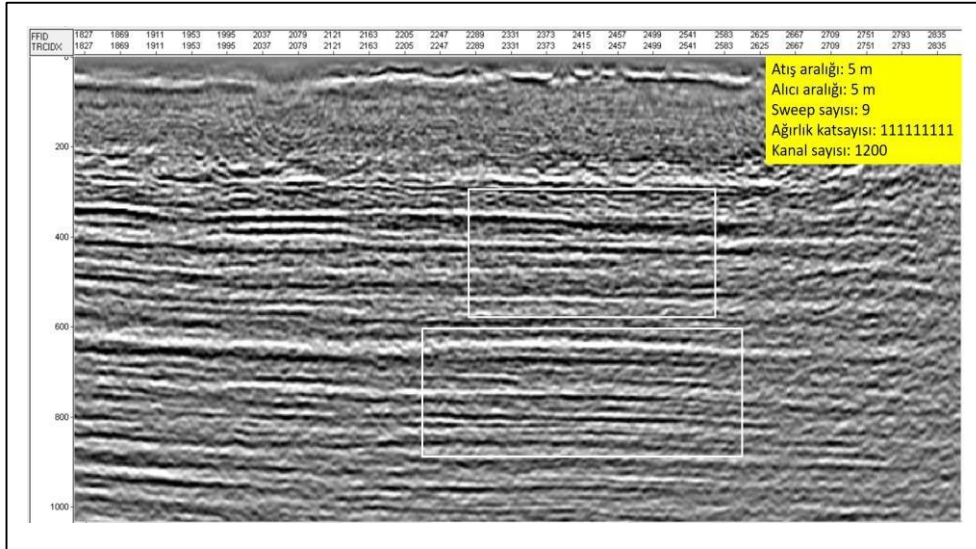
Şekil 17a'da Konvensiyonel veri toplama yöntemi ile toplanmış atışın (Şekil 7'deki atış) sinyal ve gürültü spektrumu ve Şekil 17b'de ise $m=9$ elemanlı Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemiyle üretilmiş atışın (Şekil 11'deki atış) sinyal ve gürültü spektrumu görülmektedir.

Öncelikle sinyal spektrumları incelendiğinde büyük ölçüde sinyalin frekans içeriği aynıdır. Yani WMA yöntemi sinyalin frekans içeriğini bozmamıştır. Sadece ground-roll denilen serbest yüzey gürültüleri güçlendirmiştir. Ground-roll yüzey gürültüsü ile birlikte düşük frekanslı sinyallerin de güçlendiği görülmektedir. Gürültü spektrumları incelendiğinde ground-roll gürültülerin dışındaki tüm rastgele gürültülerin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bu azalma 5 dB ile 8 dB arasındadır. SMA'da da sonuçlar buna benzer, fakat fark biraz daha azdır.



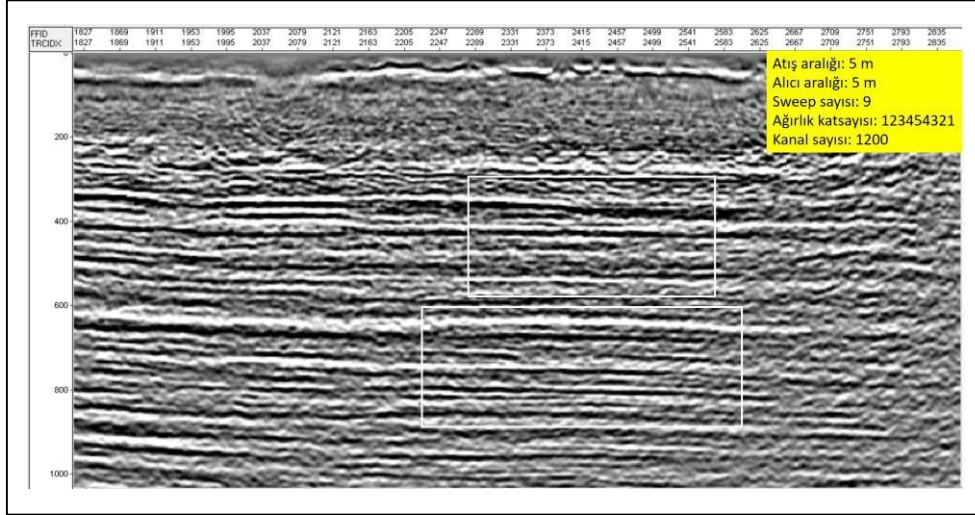
Şekil 14. Sahada toplanmış veriden Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemiyle üretilmiş veriden elde edilmiş PSTM kesiti

Figure 14. PSTM section obtained from the Weighted Floating Mean (WMA) ($m=5$) data



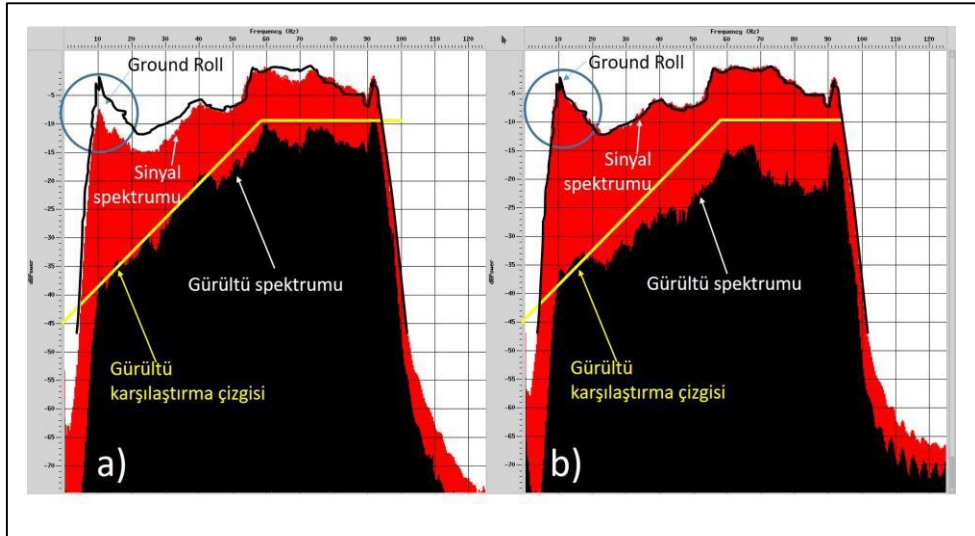
Şekil 15. Sahada toplanmış veriden Basit Kayan Ortalama (SMA) yöntemiyle üretilmiş veriden elde edilmiş PSTM kesiti

Figure 15. PSTM section obtained from the Simple Floating Mean (SMA) ($m=9$) data



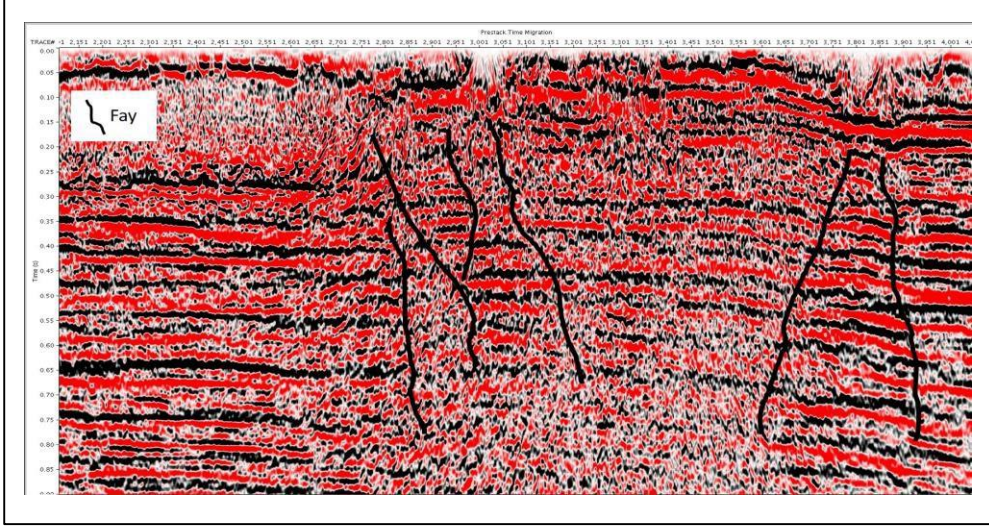
Şekil 16. Sahada toplanmış veriden Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemiyle üretilmiş veriden elde edilmiş PSTM kesiti

Figure 16. PSTM section obtained from the Weighted Floating Mean (WMA) ($m=9$) data



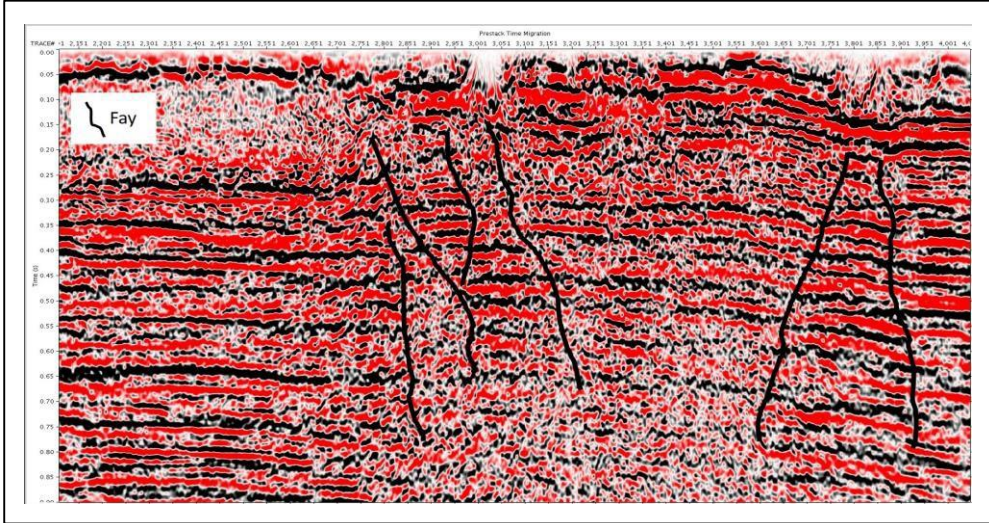
Şekil 17. a) Konvansiyonel veri toplama yöntemi ile toplanmış atışın (Şekil 11'deki atış) sinyal ve gürültü spektrumu, b) Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemiyle üretilmiş atışın (Şekil 15'deki atış) sinyal ve gürültü spektrumu

Figure 17. a) The signal and noise spectrum of the shot (shot in Figure 11) acquired with the conventional data acquisition method, b) The signal and noise spectrum of the shot (shot in Figure 15) produced by the Weighted Moving Average (WMA) method



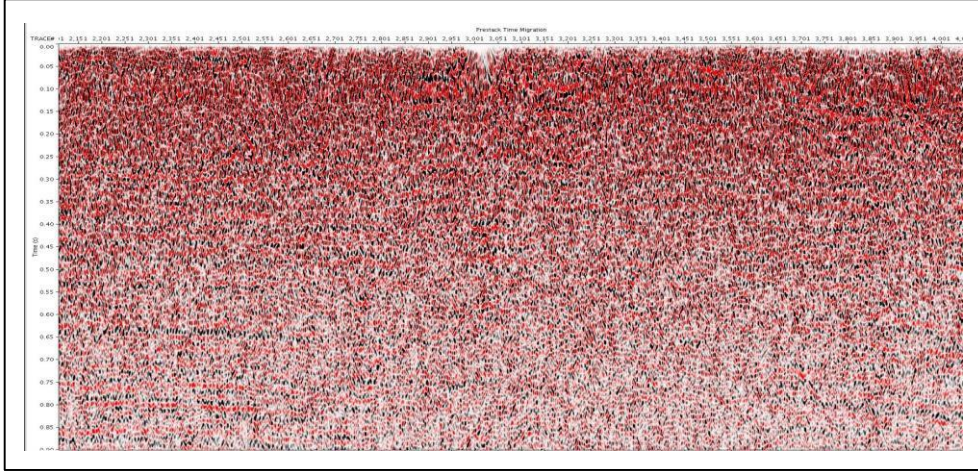
Şekil 18. Konvansiyonel yöntemle toplanmış veriden elde edilmiş PSTM kesiti

Figure 18. PSTM section obtained from conventional data



Şekil 19. Sahada toplanmış veriden $m=9$ elemanlı Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemiyle üretilmiş veriden elde edilmiş PSTM kesiti

Figure 19. PSTM section obtained from the Weighted Floating Mean (WMA) ($m=9$) data



Şekil 20. Şekil 18 ve Şekil 19'un farkı

Figure 20. Difference between Figure 18 and Figure 19

Ayrıca yöntemler faylı ve eğimli bölgede de denenmiştir. Şekil 18'de faylı ve eğimli bölgede konvansiyonel yöntemle toplanmış veriden elde edilmiş PSTM kesiti ve Şekil 19'da ise sahada toplanmış 1 sweepli veri kullanılarak WMA yöntemiyle (m=9 elemanlı) üretilmiş veriden elde edilmiş PSTM kesiti görülmektedir. Kesitler incelendiğinde WMA'lı kesit faylı, eğimli kısımlarda da daha iyi olduğu görülmektedir. Şekil 20'de ise yukardaki kesitlerin farkı görülmektedir. Şekil 20'de görüldüğü gibi büyük oranda yüksek frekanslı rastgele gürültüler elimine edilmiştir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Sismikte verilerin rakamsal büyüklüğünden ziyade birbirleriyle olan oransal büyüklükleri önemlidir. Bu oransal büyüklük ilişkisi desibel (dB) olarak incelenir. Aralarındaki oran arttıkça kalite de belirli bir oranda artmaktadır. Örneğin FK spektrumlarında genlikler kırmızı ile yeşil olarak karşılaştırıldığında aralarında -24 dB fark vardır. Yani kırmızı renkli olan 0 dB olup

genlik değişmiyor demektir. Buna karşılık yeşil renkli alanda genlikler -24 dB demektir. Bu

durumda genlikler kırmızı bölgedeki genliklere (örneğin 100 birim) göre kıyaslandığında yeşil bölgedeki genlikler 6.25 birime düşmüş demektir. Sonuç olarak genlikler % 93.75 azalmış demektir.

Konvansiyonel sismik veri toplama yönteminde, sahada atışlar aynı atış noktasında birden çok sweep ile yapılabilmektedir. Sweep sayısı atış aralığına bağlı olarak belirlenir. Atış aralığının artması durumunda katlama sayısı azalmakta, bunun sonucunda sismik kalite düşmektedir. Bu kalitedeki düşmeyi gidermek için sweep sayısı artırılmaktadır. 1980'li-1990'lı yıllarda atış aralığı 50 m seçilirdi, buna bağlı olarak sweep sayısı 6 veya 8 olurdu. Son zamanlarda sahada atış aralığı 20m veya 25m olarak seçilmektedir. Buna karşılık sweep sayısı 2 veya 4 sweep seçilmektedir. Ayrıca atış noktasında her bir sweep bir defa kullanılmaktadır.

- Bu çalışmada görüldüğü gibi her bir sweep

ayrı ayrı kayıt edilmiştir. Bir profil üzerinde daha küçük aralıklarla (bu profilde 5 m) kayıt edilen 1 sweepli kayıtlar, farklı sayılarda (tek sayı) toplanarak çok sweep'li yeni kayıtlar elde edilmiştir. Bu toplama işlemi 5 ve 9 elemanlı Basit Kayan Ortalama (SMA) ve Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) ile yapılmıştır. Buna karşılık atış aralığı yine ilk seçilen parametredeki gibi 5 m dir. SMA ve WMA yöntemiyle 5m atış aralıkları ile 5 ve 9 sweep'li kayıtlar elde edilmiş oldu. Yine bu kayıtlardan kesitler elde edildi ve karşılaştırıldı.

- Elde edilen atışlarda ve kesitlerde kalitenin arttığı ve yüksek frekanslı gürültülerin azaldığı görülmüştür. Bu yöntem ile veride sinyal/gürültü oranında bir artış olduğu analizlerde görülmüştür. m=9 elemanlı WMA verisinin FK spektrumu incelendiğinde yansımanın olduğu orta kısımlarda renkler daha da kırmızıya kaymış, yani yansımanın genlikleri artmıştır. Buna karşılık gürültünün olduğu bölgelerde renkler sarıdan yeşile doğru kaymış, yani gürültü seviyelerinde azalma olmuştur. En belirgin değişim bu veride olmuştur.

- Basit Kayan Ortalama (SMA) ve Ağırlıklı Kayan Ortalama (WMA) yöntemiyle elde edilen yeni atışlar ile konvansiyonel yöntemle elde edilen atışlar kıyaslandığında kalitenin arttığı görülmektedir. Kayan ortalamaya giren eleman sayısı artıkça da kalitede bir artış olmaktadır. İstenilen sweep sayısı kadar sweep sayısını artırma işlemi ofiste veri-işlem uygulamalarıyla birlikte rahatlıkla yapılabilir. Bu yöntem sahada ilave bir iş olmadan ve maliyeti artırmadan istenilen sweep sayısı kadar veri toplama imkanı vermektedir.

- Atış-alıcı aralığının ve SMA-WMA yöntemi için uygun atış sayısı seçilmesi (m=5, 7, 9 gibi) durumunda eğimli ve faylı bölgelerde de kalite artmaktadır.

- SMA ve WMA yönteminde kaynağa bağımlı ground-roll gibi yüzey gürültülerinde bir

miktar artış olmaktadır. Ground-roll gibi yüzey gürültülerinin bir miktar artmasına rağmen yansıma verilerindeki genlik artışı çok daha baskındır. Bu durum sismik kesitlerdeki kalite artışından anlaşılmaktadır. Genliklerdeki bu değişim hem FK spektrumlarında hemde genlik spektrumlarında da görülmektedir. Yöntemin dezavantajı ground-roll gibi kaynağa bağlı yüzey gürültülerinin genliklerinde artış olmasıdır. Fakat bu gürültüler veri işlem aşamasında veri işlem teknikleri ile yok edilebilmektedir. Ayrıca atış-alıcı ve/veya SMA - WMA yöntemi için uygun atış sayısı seçilmemesi durumunda eğimli ve faylı bölgelerde de sismik kalite bozulabilir. Ortalama alma işlemlerinde, profilin başında ve sonunda bir miktar atış kaybı olmaktadır. Yüzlerce, binlerce atış içinde beş on atış kaydının eksik olması sonucu çok fazla etkilemez.

Konvansiyonel ile WMA yönteminden elde edilen kesitler (Şekil 18, Şekil 19) karşılaştırıldığında, sinyal / gürültü oranı artmış ve veri kalitesi daha iyi seviye gelmiştir. Buna karşılık kesitlerdeki yansıma seviyelerindeki gelişme biraz daha az olmuştur.

KATKI BELİRTME

Eleştirileri ile bu çalışmanın gelişimine katkı sağlayan hakemlere teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Abadi, A.M., 2002. Tectonics of the Sirt basin. PhD Dissertation. Vrije Universiteit (Amsterdam), ITC (Enschede): 187 pp.
- Abma R., Claerbout J., 1995. Lateral prediction for noise attenuation by tx and fx techniques. Geophysics. 60 (6):1887–1896. doi:10.1190/1.1443920.
- Ahlbrandt, T.S., 2001. The Sirte Basin Province of Libya—Sirte-Zelten total petroleum system. U.S. Geological Survey Bulletin 2202–F.

- Alaca, M., ve Guran, A., 2022. COVID-19 salgını sürecinde duygu skorlarının ve teknik indikatörlerin kullanılmasıyla bist 100 endeksi trend tahmini, *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, Cilt: 15, Sayı: 4.
- Al-Heety, A.J.R., and Thabit, H.A., 2022. Random and coherent noise attenuation for 2D land seismic reflection line acquired in Iraq, *NRIAG Journal Of Astronomy And Geophysics*, VOL. 11, NO. 1, 337–354, <https://doi.org/10.1080/20909977.2022.2118982>.
- Bağcı, B., 2020. Hareketli ortalamalar ve üssel düzeltme yöntemlerinin tahmin gücünün artırılması: Türkiye'de döviz kuru tahmini, *Turkuaz Uluslararası Sosyo-Ekonomik Stratejik Araştırmalar Dergisi*, Cilt :2, Sayı : 2.
- Box, G. E., and Pierce, D. A., 1970. Distribution of residual autocorrelations in autoregressive-integrated moving average time series models. *Journal of the American Statistical Association*, 65(332), 1509-1526.
- Carolyn D., 2010. Seismic processing – noise attenuation techniques for relative amplitude processing, (technical articles), *Petroleum Africa Magazine*, pp. 47–49.
- Chen Y., Fomel S., 2015. Random noise attenuation using local signal-and-noise orthogonalization. *Geophysics*. 80 (6):WD1–WD9. doi:10.1190/geo2014-0227.1.
- Elakkari, T.S., 2005. Structural configuration of the Sirt basin. *Geological Resources Management and Environmental Geology (GRMEG)*. Master Thesis: 58 pp.
- Finetti, I., 1982. Structure, stratigraphy and evolution of central Mediterranean: *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, v. 24, no. 96, p. 247–312.
- Futyan, A., and Jawzi, A.H., 1996. The hydrocarbon habitat of the oil and gas fields of North Africa with emphasis on the Sirt Basin, in Salem, M.J., El-Hawat, A.S., and Sbeta, A.M., eds., *The geology of Sirt Basin: Amsterdam, Elsevier*, v. II, p. 287–308.
- Guiraud, R., and Bosworth, W., 1997. Senonian basin inversion and rejuvenation of rifting in Africa and Arabia—Synthesis and implication to plate-scale tectonics: *Tectonophysics*, v. 282, p. 39–82.
- Gürel, O., Sefunç, A., Basar, H.,S., Akdeniz, A., and Kayıran, T., 2000. Variation of amplitude with sweep parameters, *TURKIOG*, İstanbul.
- Haldorsen, J.B.U., and Farmer, P.A., 1989. Suppression of high-energy noise using an alternative stacking procedure, 1989, *Geophysics*, 54, No. 2, 181-190.
- Hallett, D., and El Ghouli, A., 1996. Oil and gas potential of the deep trough areas in the Sirt Basin, Libya, in Salem, M.J., El-Hawat, A.S., and Sbeta, A.M., eds., *The geology of Sirt Basin: Amsterdam, Elsevier*, v. II, p. 455–484.
- Hunter, J. S., 1986. The exponentially weighted moving average. *Journal of quality technology*, 18(4), 203-210.
- Kılıç, S.S., ve Sözen, A., 2020. Forex piyasalarında kullanılan hareketli ortalama göstergesinin uzman danışman olarak enerji ve maden ürünleri ile yapılan işlemlerde kullanımı. *Politeknik Dergisi*.
- Kroner, A., 1993. The Pan-African belt of northeastern and eastern Africa, Madagascar, southern India, Sri Lanka and east Antarctica; Terrane amalgamation during formation of the Gondwana Supercontinent, in Thorwiehe, U., and Schandelmeier, H., eds., *Geoscience*

- research in Northeast Africa: Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema, p. 3–9.
- Liu G., Chen X., Du J., and Wu K., 2012. Random noise attenuation using fx regularized nonstationary autoregression. *Geophysics*.77(2):V61–V69. doi:10.1190/geo2011-0117.1.
- Liu G., and Chen X., 2013. Noncausal f–x–y regularized nonstationary prediction filtering for random noise attenuation on 3D seismic data. *J Appl Geophys*. 93:60–66. doi:10. 1016/j.jappgeo.2013.03.007.
- Lowry, C.A., Woodall, W.H., Champ, C. W., and Rigdon, S.E., 1992. A multivariate exponentially weighted moving average control chart. *Technometrics*, 34(1), 46-53.
- Magoon, L.B., and Dow, W.G., 1994. The petroleum system—From source to trap: American Association of Petroleum Geologists Memoir 60, p. 3–23.
- Mansour, A.T., and Magairhy, I.A., 1996. Petroleum geology and stratigraphy of the southeastern part of the Sirt Basin, Libya, in Salem, M.J., El-Hawat, A.S., and Sbeta, A.M., eds., *The geology of Sirt Basin*: Amsterdam, Elsevier, v. II, p. 485–528.
- Moles, P., and Terry, N., 1997. *The Handbook of International Financial Terms*, Oxford University Press, 684 pages.
- Montgomery, S., 1994. Sirte Basin, North-Central Libya, prospects for the future: *Petroleum Frontiers*, Petroleum Information Corporation, v. 11, no. 1, 94 p.
- Naghizadeh M., and Sacchi M.D., 2012. Multicomponent seismic random noise attenuation via vector autoregressive operators. *Geophysics*. 77(2):V91–V99. doi:10.1190/geo2011-0198.1.
- Oyewola, D.O., Dada, E.G., Ngozi, N.J., Emmanuel, D.E., 2021. Predicting COVID-19 impact on demand and supply of cryptocurrency using machine learning, *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers* 9(3): 052-066.
- Promax User Manual, 1999. Promax 3D Seismic Processing and Analysis, Landmark Graphics Corporation press.
- Rakicevic, A., Koncarevic, R., and Petrovic, B., 2014. Comparison of moving averages for trading trends: the case of the belgrade stock exchange, XIV International Symposium New Business Models And Sustainable Competitiveness Symposium Proceedings-SYMORG-2014, Zlatibor-Serbia.
- Roohi, M., 1996a. A geological view of source-reservoir relationships in the western Sirt Basin, in Salem, M.J., El-Hawat, A.S., and Sbeta, A.M., eds., *The geology of Sirt Basin*: Amsterdam, Elsevier, v. II, p. 323–336.
- Roohi, M., 1996b. Geological history and hydrocarbon migration pattern of the central Az Zahrah–Al Hufrah Platform, in Salem, M.J., El-Hawat, A.S., and Sbeta, A.M., eds., *The geology of Sirt Basin*: Amsterdam, Elsevier, v. II, p. 435–454.
- Saad O.M., and Chen Y., 2020. Deep denoising autoencoder for seismic random noise attenuation. *Geophysics*. 85(4): V367–V376. doi:10.1190/geo2019-0468.1.
- Sakallıoğlu, Y., Gürel, O. ve Başar, H.S., 2012. *Vibrosismik kitabı*. Altan Matbaacılık AŞ, Ankara.
- Siahsar M.A.N., Gholtashi S., Kahoo AR., Chen W., and Chen Y., 2017. Data-driven multitask sparse dictionary learning for noise attenuation of 3D seismic data. *Geophysics*.82(6):V385–V396. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0084.1>.

- Stewart, R., 1985. Median Filtering: Review and a new F/K analogue design, *Journal of Canadian Society of Exploration Geophysics*, Vol.21, No.1, P. 54-63.
- Taghipour, A., 2020. Demand forecasting and order planning in supply chains and humanitarian logistics, IGI Global, ISBN:9781799838067, 1799838064, E-book, 313 pages.
- Wang, L., An, H., Xia, X., Liu, X., Sun, X., and Huang, X., 2014. Generating moving average trading rules on the oil futures market with genetic algorithms, *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, Volume, Article ID 101808, 10 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2014/101808>.
- Yang, H., Pan, Z., Tao, Q., and Qiu, J., 2018. Online learning for vector autoregressive moving-average time series prediction. *Neurocomputing*, 315, 9-17.
- Yilmaz, O., 1987. *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists (SEG) Investigations in Geophysics No. (2).
- Yilmaz O., 2001. *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Investigate Geophys Soc Explor Geophys (SEG). 2065 pages. doi:10.1190/1.9781560801580.