



Araştırma Makalesi / Research Article

# Jeotermal Tesisler için Jeoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Sıvılaşma Sonrası Zemin Oturmalarının Değerlendirilmesi

Determination of Geotechnical Properties and Assessment of Post-Liquefaction Ground Settlement in Geothermal Facilities

# Sevinç ÜNSAL ORAL

Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Geliş (Received): 30/11/2024 / Düzeltme (Revised): 20/01/2025 / Kabul (Accepted): 30/04/2025

# ÖZ

Türkiye, geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla sınırlı olmasına rağmen, jeotermal enerji elde edilebilecek ekonomik potansiyele sahip bir ülkedir. En verimli jeotermal kuyular, geçirgen çatlak ağlarına sahip Tersiyer ve daha yaşlı volkanik formasyonlar icerisinde ver almaktadır. Jeotermal potansiyele sahip bu bölgelerde, enerji santralleri ver yer yüksek yeraltı suyu seviyesine sahip tarım arazilerinde konumlandırılmıştır. Bu sahalarda jeotermal kaynakların değerlendirilmesi ve işletilmesi sürecindeki temel risklerden biri bölgenin sismik tehlike düzeyidir. 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremler sonrası, Türkiye genelinde deprem riski farkındalığı önemli ölçüde artmıştır. Bu kapsamda, yeraltı suyu seviyesi genellikle yüksek olan jeotermal santral sahalarının deprem anındaki performansını değerlendirmeve yönelik bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Ege Bölgeşi'nde bulunan bir jeotermal enerji santrali sahasında, olası bir deprem durumuna ilişkin olarak sahanın jeolojik yapısı, tektonik özellikleri ve sismik tehlike düzeyi değerlendirilmiş, buna bağlı olarak zemin sıvılaşması analizleri yapılmıştır. Jeotermal sahalarda, özellikle geçirgenliği yüksek alüvyon zeminlerde, mevsimsel değişimlere ve deprem etkilerine bağlı olarak yeraltı suyu seviyesi ciddi oranda yükselebilmektedir. İşletme halinde olan jeotermal tesislerde, olası bir sıvılaşma durumunda alınması gereken önlemlerin ortaya koyulabilmesine yönelik olarak, sıvılaşma sonrası zemin oturmaları ampirik yöntemlerle hesaplanmıştır. Ayrıca farklı yeraltı suyu derinliklerine bağlı olarak değişen sıvılaşma sonrası oturma miktarlarının yapılar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma, jeotermal sahalarda deprem sonrası kesintisiz kullanım performansının, sahanın jeolojik özellikleri, yeraltı su seviyesi ve deprem risk düzeyine bağlı olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koyması bakımından önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerji santrali, Zemin sıvılaşması, Sıvılaşma sonrası oturma

## ABSTRACT

Turkey has economic potential from its geothermal resources, although they are more limited compared to conventional energy resources. The most productive geothermal wells are typically located within Tertiary and older volcanic formations characterized by permeable fracture geology. In regions with geothermal potential, energy facilities are often situated on agricultural land with high groundwater tables. One of the primary risks in exploring and operating geothermal resources in these areas is the seismic hazard level. Following the earthquakes in Kahramanmaraş on February 6, 2023, earthquake risk awareness has significantly increased throughout the country. In this context, the present study aims to evaluate the seismic performance of geothermal power plant sites,

particularly those with high groundwater levels. At a geothermal power plant site located in the Aegean region, the geological conditions, tectonic features, and seismic hazard level were assessed for a potential earthquake scenario. Based on these evaluations, soil liquefaction analyses were performed. In geothermal fields, especially those with highly permeable alluvial soils, groundwater levels can rise considerably due to seasonal variations and seismic activity. In operating geothermal facilities, potential ground settlement resulting from liquefaction was calculated using empirical methods to define necessary mitigation measures. Additionally, the effects of varying groundwater depths on structural performance were investigated. This study emphasizes the importance of evaluating the continuous operational performance of geothermal sites after an earthquake, based on geological characteristics, groundwater conditions, and seismic risk levels.

Keywords: Geothermal power plant, Soil liquefaction, Post liquefaction settlement

# GİRİŞ

Bugün, jeotermal enerji, ucuz, temiz, sürdürülebilir, yerli ve çok amaçlı kullanılabilir olma özellikleri nedeniyle enerji üretiminde tercih edilen bir seçenek haline gelmiştir. Enerjinin kalitesi ve sürekliliği oldukça önemlidir. Jeotermal enerji, güvenli ve sürekli enerji sağlama imkânı sunar. Hem günlük veya mevsimsel hava değişimlerinden hem de uluslararası emtia fiyatlarındaki öngörülemeyen dalgalanmalardan bağımsız olduğu için fosil yakıtlardan geçişte önemli bir rol oynamaktadır (Goldstein, 2018). Jeotermal kaynaklar halihazırda 90 ülkede ısı ve/veya elektrik için güvenilir bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır (Huttrer, 2020).

Dünya'nın iç ısısının büyük çoğunluğu, enerjinin şu anda çağdaş sondaj teknikleri kullanılarak çıkarılamadığı yeraltında (>5 km) depolanır (Goldstein, 2018). Ancak, hidrotermal konveksiyon akımları sırasında, sıcak su, jeotermal kuyular aracılığıyla sürdürülebilir çıkarıma izin verecek yeterli hızlarda doğal olarak geçirgen kayalardan ve yapılardan yukarı doğru akabilir (Axelsson, 2010).

Jeotermal kuyular için en uygun yerler, geçirgen yapılar boyunca bulunan ve aşağıdan yukarıya su geçişinin oluştuğu bölgelerdir. Magmatik ve magmatik olmayan ortamlarda karakteristik akışkan kimyasına sahip yüksek sıcaklıklı jeotermal sistemlerin kavramsal modelleri ve tipik jeolojik ortamları Şekil 1'de gösterilmektedir. İlgili şekilde görüldüğü üzere gerek volkanik sahalarda gerek magmatik olmayan jeolojik birimlerde su akışı, yüksek ısı akışlarına yol açar. Bu sahalarda faylanma yaygındır ve geçirgen faylar boyunca yeraltı suyunun akışı artar. Sıvı derinlikte ısınır ve yapısal süreksizlikler boyunca yüzeye yükselmeden önce geçirgen litolojiler boyunca yanal olarak da hareket edebilir. Üretim kuyularının, fay kesişimleri veya röle rampaları gibi elverişli yapısal ortamlara yerleştirildiği görülmektedir (Jolie vd., 2021).

Jeotermal sistemlerin tipik jeolojik kompozisyonu ve faylanmalar göz önüne alındığında jeotermal enerji santrallerinin, boru hatları ve kuyu başlarının deprem durumundaki performansının incelenmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır. Jeotermal tesisler genellikle geniş bir alana yayılı olarak kurulmuş olup, kuyu başları boru hatları ile enerji santraline bağlanmaktadır. Bu bütünsel sistemde yapıların zemine aktardığı yükten bağımsız olarak deprem durumunda oluşacak deformasyonların etkisinin gerekli jeolojik araştırmalar ve jeoteknik hesaplarla ortaya koyulması ve gerekli önlemler alınarak sistemin tasarlanması üretim sürekliliği bakımından önemlidir.

### Araştırma Makalesi / Research Article



Şekil 1. Jeotermal sistemlerdeki üretim kuyularının tipik jeolojik bileşenleri (Jolie vd., 2021). *Figure 1. Typical geological composition of production wells in geothermal systems* (Jolie et al., 2021).

6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaras merkezli depremler sonrasında, ülke genelinde deprem riski farkındalığı artmış; bu doğrultuda, çalışmaya konu olan sahada deprem anındaki jeotermal santral performansı değerlendirilmiştir. Ege Bölgesi'nde ver alan bir jeotermal enerji santrali özelinde, santral sahasının jeolojik ve zemin kosulları detaylı olarak incelenmiş ve olası bir deprem durumundaki yapısal performansı belirlenmistir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, benzer jeolojik formasyonlara sahip diğer jeotermal sahalara yönelik genel bir değerlendirme yapılması ve bu alanda yeni bir bakış açısı sunulması amaçlanmıştır.

## ÇALIŞMA ALANININ JEOLOJİSİ Genel Jeoloji

Bu calısamaya örnek vaka olarak secilen santralin Jeotermal bulunduğu bölgenin genel jeolojik vapısı; temelde Paleozoik vaslı metamorfik şistler ile başlar. Gnays - mika şist - mermer- granit ve kuvars sist ardalanmasından olusan sistlerin üzerinde uyumsuz olarak oluşmuş, karasal fasiveste Neojen vaslı birimler ver alır. Neojen seri; kiltaşı - silttaşı - kumtaşı - konglomera ardalanması şeklinde devam eder. Bunların üzerine Kuvaterner yaslı alüvval zeminler uvumsuz olarak çökelmiştir. Batı Anadolu'nun en genç ve önemli yapısal elemanlarından biri olan Gediz Grabeni havzası, Kuvaterner döneminde dikkat çekici jeolojik ve jeomorfolojik asamaları olan bir evrim geçirmiştir (Hakyemez vd., 2013). Türkiye'nin batısında ver alan Gediz grabeni en belirgin ve gelismis

graben havzasına sahiptir (Ciftçi ve Bozkurt, 2008). İncelenen Jeotermal ruhsat alanlarının içerisinde bulunduğu Gediz Çöküntüsü, yaklaşık 200 km'ye ulaşan uzunluğu ile Ege Çöküntü Sistemi'nin en önemli havzalarından birini olusturur. Bölgede vüzevlenen kavaclar temel kayacları ve sedimanter örtü kayacları olmak üzere başlıca iki grupta toplanabilir. Bu iki kayaç grubu arasında ise, temel kayaçlarının dinamik metamorfizması sonucu olusan kataklastik kayaclar bulunmaktadır. Proje sahası ve çevresinin jeoloji haritası Şekil 2'de verilmektedir.

# Stratigrafi

Metamorfik Temel Kayaları (mr): İnceleme alanının güneyinde Bozdağ yükseltisini meydana getiren ve Menderes Masifi'ne ait olan metamorfik temel kayaları başlıca gnays, mikaşist, mermer, fillit, arduvaz ve kuvarsşistler ile yersel olarak bunları kesen granitlerden yapılıdır. Gnayslar ve bunlara eşlik eden yüksek dereceli metamorfitler, Menderes Masifi'nin çekirdek bölgesinde yayılım gösterirler. Buna karşın, mikaşist, mermer, fillit ve arduvaz gibi düşük dereceli metamorfik kayalar, daha çok masifin üst bölümünde yer alır.

Neojen Yaşlı Birimler: İnceleme alanının güneyinde yer alan ve büyük bölümü ile kaba kırıntılı tortullardan oluşan Neojen istifi, Yağmurlu (1987) tarafından alt ve üst kırıntılı birim olmak üzere iki farklı birime ayrılmış, Emre (1996), yöredeki Neojen istifi formasyon bazında değerlendirmiştir.

Acıdere Formasyonu (acd) (Alt kırıntılı birim-Üst Miyosen): Başlıca kırmızımsı çakıltaşı, bloktaşı ve az olarak kumtaşı ve çamurtaşı bileşenlerinden oluşan Geç Miyosen yaşlı kırıntılı birim, Çağatay ve Arda (1980) tarafından "şarabi renkli çakıltaşı", Yılmaz (1986) tarafından "alt fluviyal birim", Emre (1996) tarafından ise Acıdere Formasyonu olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. İnceleme alanı ve çevresi jeolojisi haritası (Hakyemez vd., 2013). Figure 2. Geology and tectonic setting of the research area and surroundings (Hakyemez et al., 2013).

Birimin altlayan metamorfik kavalar ile olan dokanağı çoğu yerde faylıdır. Faya yakın kesimlerde katmanların temele doğru eğimlenmesi (back-tilting) ile metamorfik kayalarda gözlenen düsük eğimli kavma vüzevleri, breslenmeler ve kataklastik kusaklar olağandır. Bu veriler Metamorfik temel kayaları ile Neojen yaşlı kırıntılı birimleri birbirinden ayıran fayın listrik şekilli normal fay olduğunu göstermesi bakımından önemlidir.

Göbekli Formasyonu(gbk) (Üst kırıntılı birim-Pliyosen): Büyük bölümü ile grimsi ve sarımsı olabilen çakıltaşı, bloktaşı, kumtaşı ve çamurtaşı bileşenlerinden oluşur. Çağatay ve Arda (1980) tarafından "grimsi-sarımsı çakıltaşı", Yılmaz (1986) tarafından "üst fluviyal birim", Emre (1996) tarafından ise Göbekli Formasyonu olarak tanımlanmıştır.

Mevlütlü Formasyonu(met) (Pliyo-Kuvaterner): Mevlütlü formasyonu başlıca, kumtaşı ara katman ve ara katkıları içeren çakıltaşlarından yapılıdır. Ortaç - kötü katmanlı olan çakıltaşları, genellikle, iri çakıllı, az pekleşmiş ve az dayanımlıdır. Tane boyları, çok ince kumdan çok kaba kuma kadar değişen kumtaşı düzeylerinde, yer yer oluksal ve düzlemsel çapraz katmanlar gelişmiştir.

Asartepe Formasyonu(ast) (Pleistosen): Çakıltaşı, çakıllı kumtaşı, kumtaşı ve çamurtaşı ardalanmasından yapılıdır. Az pekleşmiş ve az dayanımlı olan bu düzeyler, ender olarak ince kireçtaşı mercekleri içerir. Tabanda baskın olan çakıltaşları, üst kesimlere doğru yerini kumtaşı ve çamurtaşlarına bırakır. Kumtaşları az dayanımlı, ince-orta ve kalın katmanlıdır. Kumtaşlarında oluksal ve düzlemsel çapraz katmanlanmalar, yük kalıpları, tane derecelenmesi, çakıltaşı kanal dolguları ve çamur topları gözlenir.

Güncel Alüvyonlar (Qal): Kuvaterner yaşlı alüvyonlar Graben havzasınde geniş yayılım

## Araştırma Makalesi / Research Article

gösterir. Yamaç molozları, büyük bölümü ile altta bulunan Neojen yaşlı kırıntılı tortulların veniden aşınıp işlenmesi ile oluşan zayıf pekleşmiş ve kötü boylanmalı çakıllı çamurtaşı, çamurtaşı ve çakıltaşı ara katkılarından oluşur. Yamac molozları ve bunlara eslik eden alüvval ve kolüvval olusuklar, altta bulunan Neojen yaşlı kırıntılı birimlere ait tabakaları aşınmalı uyumsuz bir dokanakla üstler. Yamaç molozu ve kolüvval oluşukların alttaki Neojen yaşlı kırıntılı birimler ile olan dokanak özellikleri, Gaffar Okkan ile Cukuroba Mahalleleri arasında daha önceden açılmış olan yarmalarda ve calisma alanında acılmış olan hendeklerde acık olarak gözlenir. Jeoloji haritasında görüldüğü gibi alüvyonlar, çalışma alanı içerisinde yer alan dere yatakları içinde ve Salihli ovasını meydana getiren düzlüklerde geniş yayılım gösterir. Alüvyonlar çoğunlukla pekleşmemiş çakıl kum ve çamurdan oluşur. Çalışma alanı içinde alüvyonları oluşturan bileşenler egemen olarak, güney bölgelerdeki Neojen yaşlı kırıntılı birimlerin yeniden aşınması ve işlenmesi sonucu oluşmuşlardır. İncelemem alanının ve cevresinin genellestirilmis stratigrafisi Sekil 3'te sunulmaktadır.

## Yapısal Jeoloji ve Aktif Tektonik

İnceleme alanı ve çevresi tektonik olarak oldukça karmaşıktır. Kuzeyde ve güneyde metamorfiklerle sınırlanmış olan çökelme ortamı kabaca doğu-batı yönünde uzanan bir çöküntü havzası niteliğindedir. Doğu-batı uzanımlı basamak faylarla meydana gelmiş bir graben oluşturmuştur. Ayrıca bu fay sisteminde aşağı yukarı dik doğu-batı doğrultulu kıvrılmalar, dolayısıyla çökel kayalarda bir takım antiknal ve senklinaller oluşmuştur.



Şekil 3. İnceleme alanı ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafisi (Yağmurlu, 1987'den değiştirilerek).

Figure 3. Generalized stratigraphy of the research area and surroundings (modified from Yagmurlu, 1986).

Bölgede Miyosen ile Paleozoik ve Pliyosen ile Paleozoik kontağı çok yerde faylıdır ve sıcak su kaynakları çoğunlukla bu faylarda bulunur. Bölge Hersinyen Orojenezi ile kıvrılarak deniz üstüne çıkmış, Pliyosen başlarına kadar su yüzünde kalmıştır. Pliyosen, deniz istilasından sonra Alp Orojenezi'nin vallak fazı ile bugünkü Gediz Grabeni oluşmuştur. Bu esnada kilometrelerce takip eden doğu-batı yönlü faylar oluşmuş, daha sonra da Pleistosen çökelleri tutturulmuş konglomeralar çökelmiş, saha en son şeklini pasadenik fazı ile kazanmıştır. Bölgede tektonik aktivite halen devam etmektedir. Doğu-batı yönlü faylar genellikle listrik, bunlara dik olan kabaca güney-kuzey yönlü faylar ise doğrultu atımlıdır (Demirtaş vd., 2013). Yine inceleme alanın yaklaşık 3 km güneybatısında, Manisa'dan başlayıp Denizli'ye kadar devam eden ve uzunluğu yaklaşık 140 km olan Gediz grabeni fayları devamlılık göstermektedir. Bu Grabende gözlenen normal faylar Holosen yaşlıdır. İnceleme alanının güneydoğusunda yaklaşık 33 km uzaklıkta Killik fayı bulunmaktadır. Killik fayının mesafesi 17 km dir. Killik fayı Holosen yaşlı normal faydır.

Bölgede bulunan sismik kaynaklar için analitik modellerin oluşturulmasında bölgenin sismotektonik yapısı üzerine literatürde yer alan çalışmalardan ve bölgedeki aletsel ve tarihsel dönemlere ait deprem kataloglarından faydalanılmıştır. Deprem tehlike hesapları için, Türkiye ve yakın çevresinde meydana gelen depremlerin derlendiği Kadirioğlu vd. (2018) calışmasında sunulan aletsel deprem kataloğu 2023 yılına kadar meydana gelen depremlerle güncellenerek kullanılmıştır. Aletsel dönemde kaydedilen depremler proje bölgesi civarında sismik hareketliliğin kayda değer olduğuna işaret etmektedir. Proje sahası, Türkiye'nin önemli sismik aktivitesinin gözlemlendiği Batı Anadolu Genişleme Bölgesinde yer almaktadır. Batı Anadolu Genişleme Bölgesi yaklaşık K-G yönlerinde yıllık 30-40 mm genişlemektedir (Oral vd., 1995; Le Pichon vd., 1995; Bozkurt, 2001). Bölgenin en belirgin sismotektonik yapıları, D-B yönlerinde (örn. Büyük Menderes, Gediz ve Denizli Grabenleri, Gökova Fay Zonu) uzanan kuvaterner basenler ve bu basenleri çevreleyen aktif yanal atımlı ve normal faylardır. Ege Bölgesindeki kıtasal genişlemenin sebebi ile ilgili cesitli modeller mevcuttur. Bu modeller arasında en çok kabul gören yaklaşım, Anadolu kıtasal bloğunun sağ atımlı Kuzey Anadolu Fay Zonu ve sol atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu sıkıştırması ile batı-güneybatı doğrultusunda Ege ve Kıbrıs yay sistemlerine doğru kaçmasıdır. (Dewey ve Şengör, 1979; Şengör vd., 1985). GPS verileri Batı Anadolu Genişleme Bölgesi'nin batıya saat yönünün tersi yönünde dönerek hareket ettiğini ortaya koymaktadır. Batı yönünde hareket orta Anadolu'da 20 mm/yıl iken Ege Yayına doğu 40 mm/yıl'a ulaşmaktadır (Barka ve Reilinger, 1997 ve Mueller vd., 1997).

Yakın zamanda yapılan çalışmalar, aralıklarla aktif olan İzmit-Balıkesir Transfer Zonu olarak adlandırılan bir transfer zonunun varlığına işaret etmektedir. Bahsedilen zonun, Kretase zamanında derin kıtasal transform fay zonu olarak Neojen zamanında ise transtansiyonel transfer fay olarak davranış gösterdiği düşünülmektedir Bu zonda yakın zamanda meydana gelen depremlerin odak mekanizmaları, K-B yönlerindeki genişleme sonucunda ortaya çıkan yanal atımlı fayların varlığına işaret etmektedir (Sözbilir vd., 2009). İzmit-Balıkesir Fay Zonu doğuya doğru Batı Anadolu Genişleme Bölgesi ve batıya doğru Kuzey Ege Bölgesi olarak adlandırılan iki farklı şekilde açılan bölgeyi ayırmaktadır (Ring vd., 1999). Doğudaki bölgede doğu batı doğrultusunda uzanan Büyük Menderes, Küçük Menderes ve Gediz Grabenleri hakimdir. Ege bölgesininbaşlıca neotektonik yapıları ve neotektonik bölgelerini gösteren sadeleştirilmiş tektonik harita ve Batı Anadolu'nun ana fay sistemini gösteren sadeleştirilmiş tektonik harita sırası Özkaymak v.d (2013)'de yer almakta olup Şekil 4'te sunulmaktadır.

## ZEMİN ARAŞTIRMALARI

Zemin araştırmaları kapsamında, sahada 3 farklı noktada toplam 6 serim olmak üzere MASW (Multi-channel Analysis Surface Waves / Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi) deneyi gerçekleştirilmiştir. Yeraltı tabakalarının kayma dalgası hızı ( $V_s$  hızı) değişimlerinin belirlenmesi, jeoteknik mühendisliği açısından büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda MASW yüzey dalgası yöntemi özellikle sismik kırılma yöntemi yerine Vs hızı profillerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4. Ege Bölgesi'nin basitleştirilmiş tektonik haritası ve batı anadolunun ana fay sistemini gösteren tektonik harita (Özkaymak vd., 2013).

Figure 4. Simplified tectonic map of the Aegean region and tectonic map showing the main fault systems in Western Anatolia (Özkaymak et al., 2013).

Özellikle yerleşim alanlarında çevresel gürültünün yüksek olduğu durumlarda, sismik kırılma yönteminin uygulanabilirliğinin sınırlı olması nedeni ile MASW yüzey dalgası yöntemi, güvenilir bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca MASW yüzey dalgası yönteminde sismik kırılma yöntemine benzer dizilim geometrisi kullanılarak sismik kayıtlar toplanabilmekte ve bu sayede daha büyük araştırma derinliklerine ulaşılabilmektedir. MASW yönteminin diğer avantajları arasında hızlı veri toplama, kolay veri işleme süreci ve düşük hız çözünürlüğü sorununu ortadan kaldırma kapasitesi de yer almaktadır.

MASW yüzey dalgası yöntemi ile elde edilen veriler doğrultusunda  $V_{s,30}$  değeri (zemin yüzeyinden itibaren ilk 30 metre için ortalama kayma dalgası hızı) sağlıklı bir şekilde hesaplanabilmektedir. Yapılan sismik çalışmalar sonucunda,  $V_{s,30}$  değeri 260 m/s ile 320 m/s arasında ölçülmüştür. Jeolojik araştırmalar ve  $V_{s,30}$  aralığı birlikte değerlendirildiğinde, saha Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) kapsamında ZD zemin sınıfında yer almakta olup, bu sınıf orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakalarını temsil etmektedir.

Santral sahasında yapılan jeolojik değerlendirmeler sonucunda, sıvılaşma potansiyelinin mevcut olabileceği öngörülerek zeminin daha ayrıntılı incelenmesi amacıyla 3 adet CPT (Konik Penetrasyon Deneyi) yapılmış ve 34 m derinliğe kadar zemin mukavemeti analiz edilmiştir Yapılan deney sonucu elde edilen koni direnci,  $q_t$  ve sürtünme oranı  $R_f$  değerleri Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Konik penetrasyon deneyi (CPT) sonuç grafikleri. *Figure 5. Cone penetration test (CPT)graphical results.* 

Elde edilen uç direnci ve sürtünme direnci verileri dikkate alınarak Robertson (2010) yaklaşımına göre detaylı zemin profili oluşturulmuş ve bu profile ilişkin zemin davranışı tipi (soil behaviour type/SBT) grafiği Şekil 6'da sunulmuştur. Robertson vd. (1986) tarafından geliştirilen ilk SBT çizelgesi, logaritmik ölçekte koni direnci,  $q_t$  (veya  $q_c$ ) ve doğal ölçekte sürtünme oranı,  $R_f$ 'ye dayanmaktaydı. Şekil 6'da yer alan güncel grafik, boyutsuz koni direnci  $(q_c/p_a)$  baz alınarak hazırlanmış  $R_f <%1$  olan bölümlerin ayrıntılı analizine olanak tanımak amacıyla logaritmik ölçekte düzenlenmiştir. Burada  $p_a$  atmosfer basıncı olup, 1 bar = 100 kPa = 0,1 MPa olarak alınmıştır.

Jefferies ve Davies (1993), bir Zemin Davranış Tipi Endeksi  $(I_c)$  tanımlayarak  $I_c$ 'nin esasen normalleştirilmiş grafikteki SBT



bölgelerini temsil edebilecek zemin tipinin sınırlarını oluşturan eş merkezli dairelerin yarıçapını temsil ettiğini belirtmiştir. Robertson ve Wride, (1998), I<sub>c</sub> tanımını Robertson (1990) q<sub>t</sub> – R<sub>f</sub> grafiğine uygulanacak şekilde değiştirmiştir. Normalleştirilmemiş SBT grafiği log ölçeklerinde sunulduğunda, sınırlar da esasen eş merkezli daireler olup normalleştirilmemiş bir Zemin Davranış Tipi Endeksi I<sub>SBT</sub> tanımlanmıştır. Şekil 6'da Robertson, (2010)'da tanımlanmış I<sub>SBT</sub> korelasyonu Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$I_{SBT} = \left[ \left( 3.47 - \log \left( \frac{q_c}{p_a} \right) \right)^2 + (\log R_f + 1.22)^2 \log \right]^{0.5}$$
(1)

q<sub>c</sub> = CPT koni direnci (veya düzeltilmiş koni direnci, qt)

 $R_f = s \ddot{u} t \ddot{u} nme \text{ or } an1 = (f_s/q_c) 100\%$  $f_s = CPT$  çeper sürtünmesi



Alan	Zemin Tipi
no	(Soil behaviour type/SBT)
1	Hassas ince daneli
2	Kil-Organik kil
3	Kil&siltli kil
4	Killi silt&siltli kil
5	Siltli kum&kumlu silt
6	Temiz kum&siltli kum
7	Sıkı kum&çakıllı kum
8	Sert kum&killi kum
9	Sert ince taneli zeminler(aşırı konsolide veya çimentolu)

Şekil 6. Boyutsuz koni direnci  $(q_c/p_a)$  ve sürtünme oranı  $(R_f)$  temel alınarak güncellenen normalleştirilmemiş zemin tipi grafiği (Robertson, 2010).

Figure 6. Updated non-normalized soil behaviour type chart based on dimensionless cone resistance  $(q_c/p_a)$  and friction ratio,  $R_f$  (Robertson, 2010).

CPT deney sonuçlarından Robertson (2010) çalışmasına göre elde edilen zemin tipi sınıflaması Şekil 7'de sunulmaktadır. Deney sonucuna göre sahada kum kil silt karmaşığı bir alüvyon tabaka mevcut olup ana kayaya ulaşılamamıştır. Yeraltı suyu seviyesi yüzeyden yaklaşık 5.0 m derinlikte ölçülmüştür.

### **DEPREM DURUMU**

Deprem tehlikesi hesaplamalarında zemin türünün temsil edilebilmesi amacıyla, zeminin üst 30 metresi için ortalama kayma dalga hızı ( $V_{s,30}$ ) 265 m/s olarak dikkate alınmıştır. Tesisin önemi ve deprem anında kesintisiz kullanım hedefi göz önünde bulundurularak, sahaya özel olasılıksal deprem tehlikesi analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analizler sonucunda elde edilen deprem ivmeleri esas alınmıştır. Sahaya özel analizler ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) deprem haritasına göre elde edilen maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri, farklı deprem seviyeleri için karşılaştırmalı olarak Çizelge 1'de sunulmuştur. 2018 öncesinde geçerli olan deprem haritasına göre, saha 1. derece deprem bölgesi olarak sınıflandırılmakta ve yapım aşamasındaki tasarımlarda PGA  $(A_0) = 0.4g$  değeri esas alınmaktaydı. Ancak bu ivme değerinin, Çizelge 1'de özetlenen güncel analiz sonuçlarına kıyasla düşük kaldığı tespit edilmiştir. Çalışılan örnekten açıkça görüldüğü üzere, TBDY (2018) öncesinde tasarlanan sahalar için deprem risk seviyesinin veniden değerlendirilmesi ve güncel deprem tehlike seviyeleri dikkate alınarak analizlerin tekrar yapılması gerekliliği ortaya konmaktadır.



Şekil 7. CPT sonuçlarına göre zemin profilleri. *Figure 7. Soil profile according to CPT.* 

Çizelge 1. Sał	naya özel çal	lışma (V <sub>s,30</sub> =	265 m/s) ve
TBDY (2018)	'den elde edi	len pik yer ivi	meleri.

Table 1. Peak ground accelerations obtained from the site-specific study ( $V_{s,30} = 265 \text{ m/s}$ ) and TBDY (2018).

Deprem Yer Hareketi Düzeyi (DD)	Sahaya Özel Çalışma PGA (g)	TBDY (2018) PGA (g)
DD-3	0.2423	0.2317
DD-2	0.5511	0.4710
DD-1	0.9557	0.8620

## ZEMİN SIVILAŞMASI ANALİZLERİ

Sıvılaşma analizleri, CPT deney verileri kullanılarak DD-1, DD-2 ve DD-3 deprem yer hareketi seviyeleri için gerçekleştirilmiştir. Sahaya özel deprem tehlike analizleri sonucunda, bahsedilen deprem yer hareketi seviyelerine karşılık gelen maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri sırası ile 0.955, 0.551 ve 0.242g olarak belirlenmiştir. Analizler CLiq v3.0, (Cliq v3.0, 2018) yazılımı kullanılarak yürütülmüş olup, değerlendirmelerde Boulanger ve Idriss (2014) ile Youd ve Idris (2001) yöntemleri temel alınmıştır.

Yaz aylarında sahada gerçekleştirilen ölcümlerde. geçirgenliği vüksek alüvvon zeminlerde yeraltı suyu seviyesinin yüzeyden yaklaşık 5.0 m derinliklerde ve değişken sevivelerde bulunduğu gözlemlenmiştir. Zeminlerin yüksek geçirgenliğe sahip yapısı, mevsimsel değişimlere bağlı olarak özellikle kış aylarında yeraltı suyu seviyesinde yükselme olasılığına işaret etmektedir. Buna ek olarak, deprem sırasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı artışı da yeraltı suyu seviyesinde gecici vükselmelere neden olabilmektedir. Bu nedenle, sıvılaşma analizlerinde yeraltı suyu koşullarının bu olasılıklar göz önünde değerlendirilmesi bulundurularak gerektiği sonucuna varılmıştır. CPT deney sonuclarına dayanarak, her bir deprem yer hareketi seviyesi için elde edilen PGA değerleri ile sahada zemin sıvılaşması analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalarda esas alınan CPT verileri ile hesaplamalar sonucunda elde edilen cevrimsel kayma dayanımı oranı (CRR) ve çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) değerlerinin derinliğe bağlı değişim grafikleri DD-1, DD-2 ve DD-3 deprem seviyeleri için elde edilmiştir. Sivilaşma analizlerine göre en kritik olarak elde edilen DD-1 deprem seviyesi sivilaşma analizi sonuçlarına Şekil 8'de yer verilmiştir. İlgili grafiklerde derinliğe göre güvenlik faktörünü gösteren eğrilerde kırmızı renk ile gösterilen alanlar sıvılaşma seviyelerini temsil etmektedir. Hesaplama sonuçlarına göre sahada her bir CPT (Konik Penetrasyon Testi) kuyusunda, kumlu zemin sevivelerinde 15 ile 20 m derinliklere kadar ver ver sıvılaşma riski tespit edilmiştir. i) CPT-1 kuyusunda, sıvılaşma 1.4-6.5m, 9.0-10.6m ve 13.0-20.0m derinlik aralıklarında gözlemlenmiştir. ii) CPT-2 kuyusunda, sıvılaşma 1.0-2.45m, 5.5-8.0m, 10.0-12.5m ve 15-17.0m derinliklerde tespit edilmiştir. iii) CPT-3 kuvusunda ise 2.2-3.5m, 4.3-6.5m, 8.0-11.0m ve 12.3-15.0m aralığında sıvılaşma meydana geldiği belirlenmiştir.

# SIVILAŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

İsletme halinde olan enerji santrali yer tesislerinde, yanlızca yer zemin sıvılaşmasının tespit edilmiş olması yeterli görülmemelidir. Bu asamada sıvılaşmadan kaynaklanan oturma potansiyelinin incelenmesiyle, sahadaki yapılar açısından asıl riskin detaylı olarak ortaya konulması amaçlanmaktadır.

#### 58 Jeotermal Tesisler için Jeoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Sıvılaşma Sonrası Zemin Oturmalarının Değerlendirilmesi

Ünsal Oral



Şekil 8. CPT sonuçlarına göre sıvılaşmaya tespit edilen derinlikler. Şekil 8. *Liquefaction depths according to CPT results*.

#### Sıvılaşma Sonrası Oturma

CPT verileri kullanılarak serbest saha için oturma tahmini yapılırken, kuvvetli yer hareketi etkisinde zeminlerin daha sıkı duruma geçmesinden dolayı oluşan hacimsel oturmaların olarak hesaplanmasında, ilk Ishihara ve Yoshemine (1992) tarafından önerilen ancak Zhang vd., (2002) tarafından güncellenen yöntem kullanılmıştır. Ishiara ve Yoshimine (1992) kumun rölatif sıkılığı, oluşan maksimum kayma şekil değiştirmesi ve sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının dikkate alındığı, sıvılaşma sonrasi hacimsel sıkısma miktarını elde etmeye yarayan bir abak oluşturmuştur. Bu araştırmacılar tarafından geliştirilen abaklar kullanılarak sıvılaşabilir bir tabakada meydana gelecek oturmaları hesaplamak mümkün olmaktadır. Zhang vd. (2002) ise sıvılaşmayı takip eden oturmaları düzeltilmiş CPT uç direnci ile bağıntılı grafikler oluşturmuştur. Bu metoda göre zemin profilinin yüzeyden ilk 20 metresi detaylı olarak tabakalara ayrılmakta; her birinin normalize edilmiş temiz kum eşdeğer uç dirençleri ( $q_{c1N}$ )<sub>CS</sub> hesaplanmakta ve sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının ( $F_{sL}$ ) 1.0'den küçük olduğu tabakalarda sıvılaşma sonrası hacimsel birim deformasyon ( $\varepsilon_{vi}$ ) bulunmaktadır. Hacimsel oturma ( $S_v$ ) ise Eşitlik (2)'de verilen formül ile tahmin edilmektedir.

$$S_{v} = \sum_{i=1}^{j} \varepsilon_{vi} \Delta z_{i}$$
<sup>(2)</sup>

burada, i sayısı her bir tabakanın sıvılaşma sonrası hacimsel birim deformasyonunu gösterirken  $\Delta z_i$  ise ilgili tabakanın kalınlığını belirtmektedir. Toplam tabaka sayısı ise j ile tanımlanmaktadır. Zhang vd. (2002)'de birimsel hacim deformasyonu, koni penetrasyon uç direncine bağlı olarak Şekil 9'da verilen grafik ile hesaplanmaktadır. Bu ampirik yöntemle yapılan sıvılaşma sonrası oturma hesaplarında sahada sıvılaşma tespit edilen kumlu seviyelerin temiz kum olduğu varsayımı yapılmıştır.



Şekil 9. Sıvılaşma sonrası zeminde hacimsel birim deformasyon ile eşdeğer CPT uç direnci arasındaki ilişki (Zhang vd., 2002).

Figure 9. Relationship between post-liquefaction volumetric strain and equivalent CPT tip resistance (Zhang et al., 2002).

Sıvılaşma sonrası oturma analizleri, 3 farklı veraltı suvu seviyesi icin hesaplanmıs ve su seviyesinin sıvılaşmadan kaynaklanan oturma miktarları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Olası bir deprem durumunda, sıvılaşma sonrası oturma değerleri; DD-1, DD-2 ve DD-3 deprem yer hareketi düzeyleri ile su tablasının yüzeyden 1.0, 3.0 ve 5.0m derinlikte bulunduğu koşullar için Zhang vd. (2002) vöntemine davalı olarak CLiq v3.0, (CLiq v3.0, 2018) yazılımı kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tartısma bölümünde değerlendirilmistir. Deprem sırasında sıvılaşmaya bağlı olarak, yapı yükü etkisiyle oluşan zımbalama türü oturmalar ise ilgili yazılımda Bray ve Macedo (2017) tarafından önerilen yöntemle dikkate alınmaktadır.

#### TARTIŞMA

Bu bölümde, yeraltı suyu derinliklerinin maksimum yer ivmesine bağlı olarak sıvılaşma sonrası hesaplanan oturma değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sıvılaşma sonrası ortalama oturma değerlerinin, maksimum yer ivmesindeki değişime göre gösterimi Şekil 10'da sunulmaktadır.

Şekil 10'da elde edilen sonuçlara göre, yeraltı suyu seviyesinin yüzeyden 5.0 m derinlikte olduğu durumda sıvılasma sonrası hesaplanan oturma değerleri; i) DD-1 deprem seviyesi (PGA=0.95 g) için 20 cm, ii) DD-2 deprem seviyesi (PGA=0.55g) için 17 cm, iii) DD-3 deprem sevivesi (PGA= 0.24g) icin 10 cm elde edilmistir. 2018 öncesi gecerli olan deprem haritasına göre 1. derece deprem bölgesi olarak tanımlanan bu sahada, yapım aşamasındaki tasarımlarda esas alınan PGA = 0.4g değerine göre sıvılasma sonrası oturma 15 cm olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, yeraltı suyu seviyesinin yüzeyden 3.0 m ve 1.0 m derinlikte olduğu durumlarda DD-1 (PGA=0.95g) ve DD-2 (PGA=0.55g) deprem seviyelerinde, sıvılaşma sonrası oturmalar 22 cm ile 27 cm aralığında hesaplanmıştır. DD-3 (PGA=0.24g) için veraltı suyu seviyesi 3.0m derinlikteyken oturma 15 cm iken, 1.0m derinlikte bu değer 21 cm'ye çıkmaktadır. Şekil 10'da sunulan bu veriler, zemin oturmalarının yeraltı suyu seviyesi ile deprem tasarım ivmesine bağlı olarak yapı performansını etkileyebilecek düzeyde değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Bu çalışma kapsamında, radye temeller için kesintisiz kullanım oturma limiti 10 cm, onarılabilir hasar limiti maksimum 20 cm olarak değerlendirilmiştir. Sıvılaşma sonrası oturmanın 20 cm'yi aşması durumunda, yapısal kalıcı deformasyonların oluşacağı öngörülmektedir. Temellerin tekil temel olması halinde ise kabul

edilebilir oturma limitleri çok daha düşüktür. Bu doğrultuda inceleme alanında ölçülen 5.0m yeraltı suyu seviyesine göre DD-3 deprem seviyesinde yapılar kesintisiz kullanılabilir, DD-2 ve DD-1 deprem seviyelerinde ise onarılabilir hasarların oluşabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ancak, yeraltı suyu seviyesinin yükselmesi durumunda, onarılabilir hasar sınırlarının aşılabileceği ve daha ciddi deformasyon risklerinin ortaya çıkabileceği vurgulanmıştır.

# SONUÇ VE ÖNERİLER

6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremler sonrası kesintisiz kullanım ve/veya onarılabilir hasar hedefleyen jeotermal enerji santrallerinin deprem riski farkındalığını arttırmak amacıyla, benzer özellikteki sahalar için vaka örneği üzerinden genel bir sonuca varılmıştır.

Olası bir depremde sıvılaşma sonrası oturma değerleri DD-1, DD-2 ve DD-3 deprem seviyeleri ile su tablasının yüzeyden 1.0 m, 3.0 m ve 5.0 m derinlikte bulunduğu durumlar icin ayrı ayrı hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Şekil 10'da verilen deformasyon limitleri, öngörü mahiyetinde ve örnek olarak sunulmaktadır. Çalışmanın amacı, örnek bir saha üzerinden uygulanabilir bir çalışma yönteminin ortaya konulmasıdır. Yapıların temel tipine göre kesintisiz kullanım ve onarılabilir hasar limitleri öngörülmüs ve bu doğrultuda sıvılasmanın performansına etkisi vorumlanmıştır. vapi İncelenen vaka örneğinden elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, yeraltı suyu derinliği ile deprem risk seviyesinin, sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası zemin oturması üzerinde önemli ve değişken bir etkiye sahip olduğu ortaya koyulmuştur.



Şekil 10. PGA'e göre sıvılaşma sonrası oturma miktarları. Figure 10. Post liquefaction settlement according to PGA.

#### KAYNAKLAR

- Axelsson, G. (2010). Sustainable geothermal utilization – case histories; definitions; research issues and modelling. Geothermics 39, 283–291. doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.08.001
- Barka, A., & Reilinger, R. (1997). Active tectonics of the Eastern Mediterranean region: Deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. Annali di Geofisica, 40(3). doi.org/10.4401/ ag-3892Bayless, J., ve Somerville, P., (2013). Bayless-Somerville Directivity Model, Chapter 3 of PEER Report No. 2013/09, P. Spudich (Editor), Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA. doi.org/10.4401/ ag-3892
- Boulanger R., Idriss I. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Report UCD/ CGM- 14/01. doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001388
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Turkey-a synthesis. Geodynamica Acta 14, 3-30. doi.org/ 10.1080/09853111.2001.11432432
- Bray D, Macedo J. (2017). 6th Ishihara lecture: Simplified procedure for estimating liquefaction induced building settlement. Soil Dynamics and Earthquake Engineering (102) 215-231. doi. org/10.1016/j.soildyn.2017.08.026
- Cliq v.3.5. Software (2018). Liquefaction Assessment Software from CPTU Measurement. Geologismiki, Greece. Erişim adresi:www. geologismiki.gr
- Çağatay, A, ve Arda, Ö. (1980). Altın içerikli Manisa Salihli Şart konglomeralarının ağır mineralleri: Jeoloji Müh. Bülteni, 10, 49-65. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/jmd/ issue/28159/297653#article\_cite
- Çiftçi, N.B., and Bozkurt, E. (2008). Pattern of normal faulting in the Gediz Graben, SW Turkey. Tectonophysics, Sedimentary Geology, 473(1-2): 234-260. doi.org/10.1016/j.tecto.2008.05.036
- Demirtaş, R., Özdemir, A., Arabacı, F., Şahin, B. (2013). Salihli-Bozdağ (Manisa, İzmir), 3305436-3305437-3305469 No"lu Jeotermal Ruhsat Alanları Jeolojik Etüt Raporu. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/ publication/331811569

- Dewey, J. F., & Şengör, A. M. C. (1979). Aegean and surrounding regions: Complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. Bulletin of the Geological Society of America, 90(1). doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90<84:AASRCM>2.0.CO;2
- Emre, T. (1996). Gediz grabenin jeolojisi ve tektoniği. Turkish Journal of Earth Sciences. 5, 171-186. doi.org/10.55730/1300-0985.1737
- Goldstein, B. (2018). IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Ch. 4. A. MIT Press. Erişim adresi: www.ipcc.ch
- Hakyemez H.Y, Göktaş F., Erkal T. (2013). Gediz Grabeninin Kuvaterner Jeolojisi ve Evrimi. Türkiye Jeoloji Bülteni 56-2, 1-26. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjb/ issue/28126/298799
- Huttrer, G.W. (2020). Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report. Proceedings of the World Geothermal Congress. Erişim adresi: geothermie-schweiz.ch
- Ishihara K, Yoshimine M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes". Soils and Foundations, 32(1), 173-188. doi.org/10.3208/ sandf1972.32.173
- Jefferies, M.G., and Davies, M.P. (1993). Use of CPTU to estimate equivalent SPT N60. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 16(4): 458-468. doi. org/10.1520/GTJ10286J
- Jolie, E., Faulds J., Scott S., Chambefort I. Axelsson G., Carlos L., Negrin G., Regenspurg S., Ziegler M., Ayling B., Richer A. and Zemedkun M. T. (2021). Geological controls on geothermal resources for power generation. Nature Reviews Earth & Environment 2 324-339. doi. org/10.1038/s43017-021-00154-y
- Kadirioğlu, F. Tuba, Kartal, R. F., Kılıç, T., Kalafat, D., Duman, T. Y., Eroğlu Azak, T., Özalp, S., ve Emre, Ö. (2018). An improved earthquake catalogue ( $M \ge 4.0$ ) for Turkey and its near vicinity (1900–2012). Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), 3317–3338. doi.org/10.1007/ s10518-016-0064-8.
- Le Pichon, X., Chamot-Rooke, C., Lallemant, S., Noomen, R., Veis, G. (1995). Geodetic

determination of the kinematics of Central Greece with respect to Europe: implications for Eastern Mediterranean tectonics. Journal of Geophysical Research 100, 12675–12690. doi. org/10.1029/95JB00317

- Mueller, S., Kahle, H.-G., Barka, A. (1997). Platetectonic situation in the Anatolian–Aegean region. In: Schinder, Pfister (Eds.), Active Tectonics of NW Anatolia—The Marmara-Poly Project. VdF Hochschulverlag, Zürich, pp.13– 28. Erişim adresi: https://engineering.purdue.edu
- Oral, M.B., Reilinger, R.E., Toksöz, M.N., Kong, R.W., Barka, A.A., Kınık, I., Lenk, O. (1995). Global positioning system offers evidence of plate motions in eastern Mediterranean. EOS Transactions 76 (9). doi.org/10.1029/ eo076i002p00009-01
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H. ve Uzel B. (2013). NeogeneQuaternary evolution of the Manisa Basin: Evidence for variation in the stress pattern of the İzmir-Balıkesir Transfer Zone, western Anatolia. Journal of Geodynamics Special issue: Tethyan Evolution, Anatolia, 65, 117-135. doi. org/10.1016/j.jog.2012.06.004
- Ring, U., Laws, S., & Bernet, M. (1999). Structural analysis of a complex nappe sequence and late-orogenic basins from the Aegean Island of Samos, Greece. Journal of Structural Geology, 21(11). doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00108
- Robertson. P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and Greig, J. (1986). Use of Piezometer Cone data. In-Situ'86 Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering, GSP 6, ASCE, Reston, VA, Specialty Publication, SM 92, pp 1263-1280. Erişim Adresi: www.researchgate.net/ publication/285689813\_Use\_of\_Piezometer\_ Cone\_Data
- Robertson, P.K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 27(1): 151-158. doi.org/10.1139/t90-014
- Robertson, P.K. and Wride, C.E. (1998) Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test. Canadian Geotechnical Journal, 35, 442-459. doi.org/10.1139/t98-017
- Robertson, P.K. (2010). Soil Behaviour Type from the CPT: An Update. 2nd International Symposium

on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, Vol. 2, 575-583. Erişim Adresi:\_\_www.cptrobertson.com

- Sözbilir, H., Sümer, Ö., Uzel, B., Ersoy, Y., Erkül, F., Inci, U., Helvacı, C., Özkaymak, Ç. (2009). 17-20 Ekim 2005- Sığacık Körfezi (Izmir) depremlerinin sismik jeomorfolojisi ve bölgedeki gerilme alanları ile ilişkisi, Batı Anadolu. Türkiye Jeoloji Bülteni, 52, 217–238. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjb/ issue/28366/301607
- Şengör, A.M.C., Görür, N. and Saroğlu, F. (1985). "Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In: Biddle, K., Christie-Blick, N. (Eds.), Strike-slip Faulting and Basin Formation", Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 37, Tulsa, OK. doi.org/10.2110/pec.85.37.0211
- TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. Erişim adres: https://tdth. afad.gov.tr
- Yağmurlu, F. (1987). Salihli güneyinde üste doğru kabalaşan Neojen yaşlı alüvyonel yelpaze çökelleri ve Gediz Grabeni'nin tektonosedimanter gelişimi, Türkiye Jeoloji Bülteni, 30, 33-40. Erişim Adresi: www.jmo.org.tr
- Yılmaz, H. (1986). Yeşilyurt (Alaşehir) sahasındaki uranyum belirtilerinin kökeni ve bunların depolanma sonrası aberasyonlarla tarihi: Türkiye Jeol, Kur. Bülteni. 294, 43-53. Erişim Adresi: www.jmo.org.tr
- 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 and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 4, April, 2001. doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817)
- Zhang, G., Robertson, P.K., and Brachman, R.W.I. (2002). Estimating Liquefaction-induced Ground Settlements from CPT for Level Ground. Can. Geotech J., 39, 1168–1180. doi.org/10.1139/t02-047