

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ALTINOVA MAHALLESİ SAHİLİNİN (AYVALIK, BALIKESİR)  
SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI**

**AYŞEGÜL KILIÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Şener CERYAN (Tez Danışmanı)**  
**Prof. Dr. Murat ERCANOĞLU**  
**Dr. Öğr. Üyesi Gökhan BÜYÜKKAHRAMAN**

**BALIKESİR, MAYIS -2025**

## ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Altınova Mahallesi Sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) Sıvılaşma Potansiyelinin Araştırılması**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
  - Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Ayşegül KILIÇ**

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi tarafından (2024/009) nolu proje ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

**ALTINOVA MAHALLESİ SAHİLİNİN (AYVALIK, BALIKESİR) SIVILAŞMA  
POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AYŞEGÜL KILIÇ  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ŞENER CERYAN)**

**BALIKESİR, MAYIS - 2025**

Bu tez çalışmasında, Balıkesir ili Ayvalık ilçesinde, Altınova Mahallesi sahilinin zemin sivilaşma potansiyelinin belirlenmesi ve bu potansiyelin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak haritalanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, sivilaşma olgusunun temel mekanizması, etkileyen parametreler ve yapılar üzerindeki olası etkileri ele alınmış; arazi deneylerinden elde edilen veriler ışığında farklı sivilaşma analiz yöntemleri değerlendirilmiştir.

Çalışmanın veri tabanı Balıkesir Büyükşehir Belediyesi arşivinden temin edilen Balıkesir ili Ayvalık ilçesi imar planına esas mikrobölgeleme etüt raporundan elde edilen 101 adet sondaj verisi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu veriler; SPT-N değerleri, zemin türü, yer altı su seviyesi ve konum bilgileri gibi parametreleri içermektedir. Veri tabanı, CBS ortamına aktarılmış ve analizler sonucunda sayısal yükseklik modeli, eş yükselti eğri haritası, yer altı su seviye haritası, eğim haritası, sivilaşma potansiyeli haritası, düzeltilmiş SPT-N değerinin farklı derinliklerdeki mekansal dağılımı ve sivilaşmaya karşı güvenlik sayısının farklı derinliklerde mekansal dağılımı üretilmiştir.

Sivilaşma potansiyeli analizlerinde, çalışma alanına maksimum 100 km uzaklıktaki fay zonlarının ya da fayların üreteceği en büyük deprem büyüklüğü, bu depremlerin çalışma alanında oluşturacağı maksimum yer ivmesi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre Havran-Balya fayının  $M_w=7.3$  büyüklüğünde deprem üreteceği ve bu depremin çalışma alanında  $0.1758g$  büyüklüğünde maksimum yer ivmesi oluşturacağı ön görülmüştür.

Sivilaşma potansiyeli haritasında, sondaj lokasyonlarındaki zemin profilleri için sivilaşma potansiyeli endeksi hesaplanmıştır. Bu harita incelendiğinde, çalışma alanının %11,8'inin sivilaşma potansiyeli olmadığı, %64,1'inin "düşük", %20,5'inin "orta" ve %3,6'sının "yüksek" sivilaşma potansiyeli sergilediği görülmektedir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Altınova, alüvyon, Ayvalık, CBS, deprem, sivilaşma, SPT-N

Bilim Kod / Kodları : 92011, 92022, 92002

Sayfa Sayısı : 54

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF LIQUEFACTION POTENTIAL OF ALTINOVA DISTRICT COAST (AYVALIK, BALIKESİR)**

**MSC THESIS**

**AYŞEGÜL KILIÇ**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**GEOLOGICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. ŞENER CERYAN )**

**BALIKESİR, MAY - 2025**

This study investigates the liquefaction potential of the coastal zone of the Altınova Neighborhood in Ayvalık district, Balıkesir province, and maps this potential using Geographic Information Systems (GIS). This research focuses on the fundamental mechanisms of soil liquefaction, its influencing parameters, and their potential impacts on structures. The analyses were conducted using borehole data obtained from the microzonation report prepared for the zoning plan of the region archived by the Balıkesir Metropolitan Municipality. A total of 101 borehole records, including parameters such as SPT-N values, soil types, groundwater levels, and geographic coordinates, were compiled and integrated into the GIS environment.

Various spatial analyses were performed, resulting in the generation of digital elevation models (DEM), contour maps, groundwater level maps, slope maps, liquefaction potential maps, spatial distribution maps of corrected SPT-N values, and safety factor maps at different depths. To assess seismic loading, the maximum earthquake magnitude and peak ground acceleration (PGA) likely to affect the study area were calculated based on nearby fault zones within a 100 km radius. The Havran-Balya fault was identified as the most critical source, with a potential magnitude of  $M_w=7.3$  and an estimated PGA of 0.1758 g in the target area.

In the liquefaction potential map, the liquefaction potential index was calculated for the soil profiles at borehole locations. Upon examination of this map, it was observed that 11.8% of the study area had no liquefaction potential. A total of 64.1% of the area exhibits a "low," 20.5% an "intermediate," and 3.6% a "high" liquefaction potential.

These findings contribute to a better understanding of local soil behavior under seismic loading and provide a valuable basis for earthquake-resistant urban planning and hazard mitigation strategies in the region.

**KEYWORDS:** Altınova, allüvial, Ayvalık, GIS, quake, liquefaction, SPT-N

Science Code / Codes : 92011, 92022, 92002

Page Number : 54

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı.....	1
1.2 Çalışma Alanının Tanıtımı.....	2
1.2.1 Coğrafi Konum ve Topoğrafya .....	2
1.2.2 Ulaşım, Yerleşim ve Ekonomi .....	2
1.2.3 Bitki Örtüsü ve İklim .....	3
1.3 Zemin Sıvılaşması Tanımı ve Oluşumu.....	3
1.4 Zemin Sıvılaşmasına Etki Eden Durumlar .....	8
1.4.1 Zemin Özellikleri .....	8
1.4.2 Yer altı Su Durumu .....	10
1.4.3 Jeolojik Koşullar .....	10
1.4.4 Yer Hareketleri.....	13
1.5 Sıvılaşma Analizlerine Genel Bakış .....	13
1.6 Önceki Çalışmalar.....	16
<b>2. YAPILAN ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>19</b>
2.1 Sondaj Logları ve Laboratuvar Deney Sonuçlarının Elde Edilmesi .....	19
2.2 Sayısal Yükseklik Modelinin Elde Edilişi .....	21
2.3 Senaryo Depreminin Oluşturulması.....	22
2.4 SPT-N Değerinin Düzeltilmesi .....	25
2.5 Zemin Tabakalarının Sıvılaşmaya Karşı Güvenlik Sayısının Bulunuşu.....	27
2.6 Zemin Profilinin Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi Değerlerinin Belirlenmesi.....	30
<b>3. BULGULAR</b> .....	<b>31</b>
3.1 Genel Jeoloji .....	31
3.2 Sıvılaşma Analizi İçin Senaryo Deprem .....	34
3.3 Topoğrafya ve Eğim .....	35
3.4 Yer altı Suyu Derinliği.....	37
3.5 Zemin Türü ve Zemin Sıklığı .....	38
3.6 Zemin Tabakalarının Sıvılaşmaya Karşı Güvenlik Sayısının Farklı Derinliklerde Mekansal Dağılımı .....	41
3.7 Altınova Sahilinin Sıvılaşma Potansiyeli Haritası .....	43
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>44</b>
<b>5. KAYNAKLAR (APA)</b> .....	<b>46</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>54</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1: Çalışma alanına ait yer bulduru haritası. ....	3
Şekil 1.2: Sıvılaşmanın süreci.....	4
Şekil 1.3: Kum kaynaması .....	6
Şekil 1.4: Akma göçmesi .....	6
Şekil 1.5: Yanal yayılma .....	7
Şekil 1.6: Zemin salınımı .....	7
Şekil 1.7: Zeminlerde taşıma gücü kaybı.....	7
Şekil 1.8: Zemin altındaki yapıların sıvılaşmadan etkilenmesi .....	8
Şekil 2.1: 67 Numaralı sondajın logu.....	20
Şekil 2.2: Bu çalışmada kullanılan tane boyu dağılımı deney sonuçlarına ait bir örnek ....	21
Şekil 2.3: Altınova sahiline (Ayvalık, Balıkesir) en fazla 100 km uzaklıktaki faylar .....	23
Şekil 3.1: Çalışma alanının genel jeoloji haritası.....	31
Şekil 3.2: Bazalt kayacının sahadaki görüntüsü.....	32
Şekil 3.3: Yoğun hidrotermal altere tüflerin sahadaki görüntüsü .....	33
Şekil 3.4: Yamaçtaki erozyona bağlı gelişen kütle hareketi ve rahmanlar aglomerası.....	34
Şekil 3.5: Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) sayısal yükseklik modeli .....	35
Şekil 3.6: Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) eğim haritası.....	36
Şekil 3.7: Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) yer altı suyu derinliği haritası .....	37
Şekil 3.8: Tane dağılımına bağlı olarak çizilen sıvılaşma potansiyeli seviyeleri .....	38
Şekil 3.9: Düzeltilmiş SPT-N değerinin $(N_1)_{60}$ farklı derinliklerde mekânsal dağılımı... ..	40
Şekil 3.10: Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının $(F_L)$ farklı derinliklerde mekânsal dağılımı.....	42
Şekil 3.11: Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) sıvılaşma potansiyeli haritası .....	43

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 1.1:</b> Rölatif sıklığa göre zemin sınıflandırması .....	10
<b>Tablo 1.2:</b> Deprem anında sıvılaşma ihtimali olan zeminlerin tahmini duyarlılıkları.....	12
<b>Tablo 1.3:</b> Deprem karakteristikleri modifiye mercalli şiddet derecesi ile arasındaki ilişkiler .....	13
<b>Tablo 2.1:</b> İnceleme alanına en fazla 100 km uzaklığındaki fay ve fay zonları ile bunların üretebileceği depremin büyüklük ve en büyük yer ivmesi değeri .....	24
<b>Tablo 2.2:</b> Düzeltilmiş SPT-N değerinin ((N1)60) belirlenebilmesi için düzeltme faktörlerinin seçimi.....	26
<b>Tablo 3.1:</b> Düzeltilmiş SPT-N değerine ((N1)60) göre göreceli sıklığın (Dr) sınıflandırılması .....	39

## SEMBOL LİSTESİ

<b>A</b>	: Yer İvmesi
<b>BPT</b>	: Backer Penetrasyon Testi
<b>CPT</b>	: Konik Penetrasyon Testi
<b>CR</b>	: Tij Boy Düzeltme Faktörü
<b>CRR</b>	: Tekrarlı Dayanım Oranı/Çevrimli Direnç Oranı
<b>CS</b>	: Numune Alma Metodu Düzeltme Faktörü
<b>CSR</b>	: Tekrarlı Gerilme Oranı
<b>CU</b>	: Uniformluluk Katsayısı
<b>DEM</b>	: Sayısal Yükseklik Modeli
<b>Dr</b>	: Rölatif Sıklık
<b>E</b>	: Boşluk Oranı
<b>F</b>	: Kuvvet
<b>FL</b>	: Güvenlik Sayısı
<b>Fs</b>	: Güvenlik Sayısı
<b>IS</b>	: Sıvılaşma Şiddeti İndeksi
<b>İTO</b>	: İnce Tane Oranı
<b>LL</b>	: Likit Limit
<b>LI</b>	: Sıvılaşma İndeksi
<b>M</b>	: Kütle
<b>MSF</b>	: Deprem Düzeltme Faktörü
<b>Mw</b>	: Deprem Momenti
<b>N</b>	: Ölçülen SPT Darbe Sayısı
<b>Re</b>	: Aktif Fayın İnceleme Alanına Uzaklığı
<b>SRL</b>	: Yüzey Kırığı Uzunlukları
<b>SPT</b>	: Standart Penetrasyon Testi
<b>Vs</b>	: Makaslama Dalgası Hızı
<b>Z</b>	: Tabaka Orta Noktası Derinliği
<b>W</b>	: Zeminin Su İçeriği

## **ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR**

Çalışmamın her aşamasında kıymetli katkılarını ve yol gösterici desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimlerinden faydalanmaktan büyük onur duyduğum değerli danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Şener CERYAN'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezin hazırlanmasında her zaman desteğini ve katkısını esirgemeyen; bilgisi, birikimi ve tecrübesiyle yol gösteren değerli hocam Arş. Gör. Dr. Samet BERBER'e gönülden teşekkür ederim.

Veri tabanının oluşturulmasında gerekli kaynaklara ulaşımımı sağlayan Balıkesir Büyükşehir Belediyesi'ne teşekkür ederim.

Tez sürecim boyunca bana her türlü desteği sağlayarak çalışma koşullarımı kolaylaştıran, tezimi hazırlamam için gerekli imkanları sunan personeli olduğum İller Bankası Bursa Bölge Müdürlüğü'ne ve tüm değerli çalışanlarına içtenlikle teşekkür ederim.

Savunma sürecime yönelik hazırlıklarında yapıcı desteği ve katkılarıyla yanımda olan yol arkadaşım Yusuf Muhammet YAVUZ'a kalpten bir teşekkürü borç bilirim.

Ve elbette... Hayatım boyunca en büyük desteğim olan, sabırları, sevgileri ve fedakarlıklarıyla her zaman arkamda duran sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

**Balıkesir, 2025**

**Ayşegül KILIÇ**

# 1. GİRİŞ

Doğa kaynaklı afet büyük oranda veya tamamen insanların kontrolü dışında gerçekleşen, mal ve can kaybına neden olabilen, büyük ölçekli bir tehlike ve olaydır (Wikipedia, 2022). Doğa kaynaklı afetler ikiye ayrılır. Bunlardan biri ‘jeolojik’ diğeri ise ‘meteorolojik’ olarak tanımlanır. Doğrudan kaynağını yerin derinliklerinden veya yer kabuğundan alan afetlere jeolojik doğal afetler, atmosferdeki doğa olayları sonucunda oluşan afetlere de meteorolojik doğal afet denir (Özpınar, 2019). Deprem, jeolojik doğal afetler arasında insan yaşamını en çok etkileyen olaydır. Türkiye, depremin en şiddetli örneğini 1939 yılında Erzincan’da ve 6 Şubat 2023’te Kahramanmaraş’ta yaşamıştır. Bu deprem binlerce insanın ölümüne sebep olmuştur.

Depremin yapının üzerinde hasar bırakıp insanların ölümüne veya yaralanmasına sebep olması yapının kalitesinin yanında zeminin özelliklerinden de kaynaklanmaktadır. Örneğin sıvılaşma, depremde yayılan makaslama dalgalarının etkisiyle doygun ve gevşek kumlu zeminlerin ani bir şekilde dayanım ve sertliğini kaybederek zeminin bir sıvı gibi davranış göstermesidir. Deprem anında gerçekleşen sıvılaşma nedeniyle oturmalar ötelenmeler, devrilmeler, yanal yayılma, şevlerde duraysızlık ve taşıma gücünün kaybı sıklıkla görülmektedir. Sıvılaşmanın insanın hayatına ve ekonomiye olumsuz etkisinden dolayı bu konular üzerine yapılan araştırmalar da her geçen gün artmakta ve gittikçe daha önemli hale gelmektedir.

## 1.1 Çalışmanın Amacı

Bu incelemede; Balıkesir ilinin Ayvalık İlçesine bağlı Altınova Mahallesi Sahilinin sıvılaşma potansiyeli olan alanlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Söz konusu alanda 2017 yılında yapılan 96 sondaja ait SPT sonuçları ve laboratuvar deney sonuçları toplanarak sıvılaşma analizi için hazırlanan Excel çalışma sayfasıyla sıvılaşma analizi yapılmış olup analizlerin sonucunda toplanan veriler ArcGIS’e aktarılmış, sahilin sayısal yükseklik modeli, eğim haritası, eş yükselti eğrileri, sıvılaşma potansiyeli, yer altı su seviye haritası ve her 4 metrede bir sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı, sıvılaşma olasılığı, N1(60) göreceli sıklık haritaları yapılmıştır.

## **1.2 Çalışma Alanının Tanıtımı**

### **1.2.1 Coğrafi Konum ve Topoğrafya**

Balıkesir, ülkemizin Kuzeybatı Anadolu kısmında yer almaktadır. Şehrin; batıdan Ege Denizi ve Çanakkale Boğazı'na, kuzeyden Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı'na kıyısı vardır. Bu nedenle stratejik bir kent konumundadır.

Altınova Mahallesi, Balıkesir ilinin Ayvalık ilçesine bağlı Ege Denizi kıyısında yer almaktadır. Mahallenin güneyinde Dikili (İzmir) ilçesi, kuzeyinde Ayvalık merkezi, batısında Ege Denizi, doğusunda ise Bergama (İzmir) ilçesi bulunmaktadır.

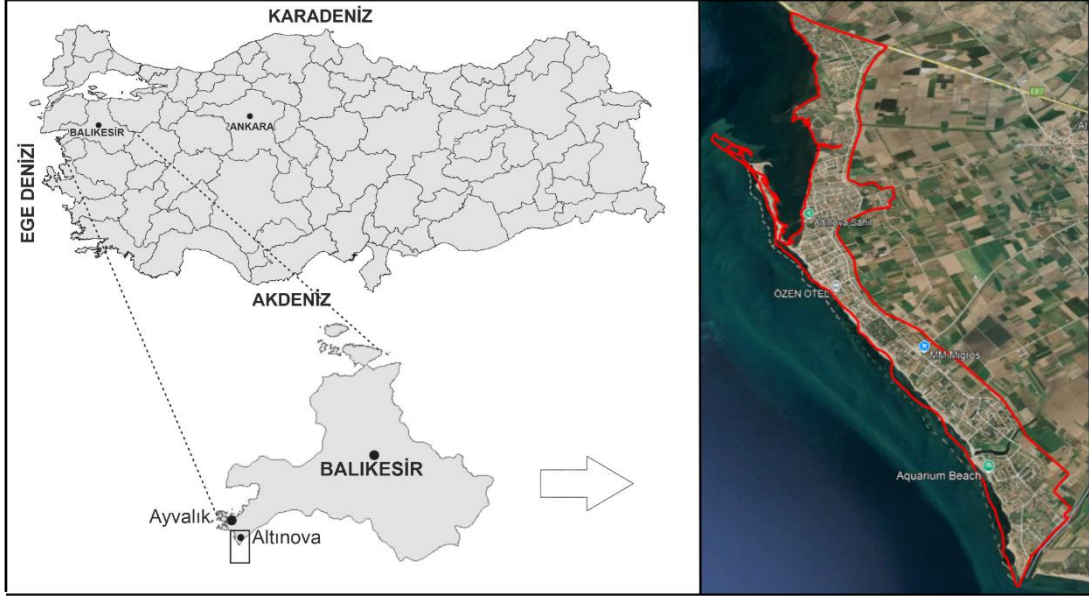
Altınova Mahallesi'nin topoğrafyası, kıyı şeridi boyunca uzanan düzlükler ve iç kesimlerde hafif engebeli arazilerden oluşur. Bölgedeki zeytinlikler ve tarım arazileri, mahallenin önemli coğrafi özelliklerindedir.

### **1.2.2 Ulaşım, Yerleşim ve Ekonomi**

Çalışma alanı; Balıkesir ili, Ayvalık ilçesi, Altınova Mahallesi sahilini kapsamaktadır (Şekil 1.1).

Balıkesir'in merkez dahil toplam 20 ilçesi vardır. İzmir-Çanakkale karayolu üzerinde bulunan Altınova, Balıkesir il merkezine yaklaşık 130 km uzaklıktadır. Bölgeye karayolu ile ulaşım oldukça kolaydır.

Altınova'nın yerleşim yapısı, son yıllarda artan villa projeleriyle dikkat çekmektedir. Bölgenin büyük bir kısmı villalardan oluşurken, merkezde daha çok konutlar bulunmaktadır. Ekonomik açıdan Altınova, tarım ve turizm sektörleriyle öne çıkmaktadır. Bölgedeki zeytinlikler ve tarım arazileri, ekonominin temelini oluştururken, yaz aylarında artan turizm faaliyetleri de ekonomiye katkı sağlamaktadır.



**Şekil 1.1:** Çalışma alanına ait yer bulduru haritası

### 1.2.3 Bitki Örtüsü ve İklim

Balıkesir ili, Akdeniz iklimine sahiptir; kışları ılık ve yağışlı, yazları ise sıcak ve kurak geçer. Yazın sıcaklıklar ortalama 30°C civarındadır. Batıdan esen imbat rüzgarları sayesinde yazın serinlemektedir.

Balıkesir'in bitki örtüsü, Akdeniz iklimine özgü maki formasyonundan oluşur. Bu formasyon; zeytin ağaçları, defne, keçiboynuzu ve zakkum gibi bitki türlerini bünyesinde barındırır. Özellikle zeytin ağaçları, şehrin ekonomisinin ve doğal bitki örtüsünün önemli bir parçasıdır.

Bölgenin iklimi ve bitki örtüsü, tarım faaliyetleri için elverişli koşullar sunar. Zeytinlikler, Altınova'nın hem doğal güzelliklerini hem de ekonomik yapısını şekillendiren temel unsurlardandır.

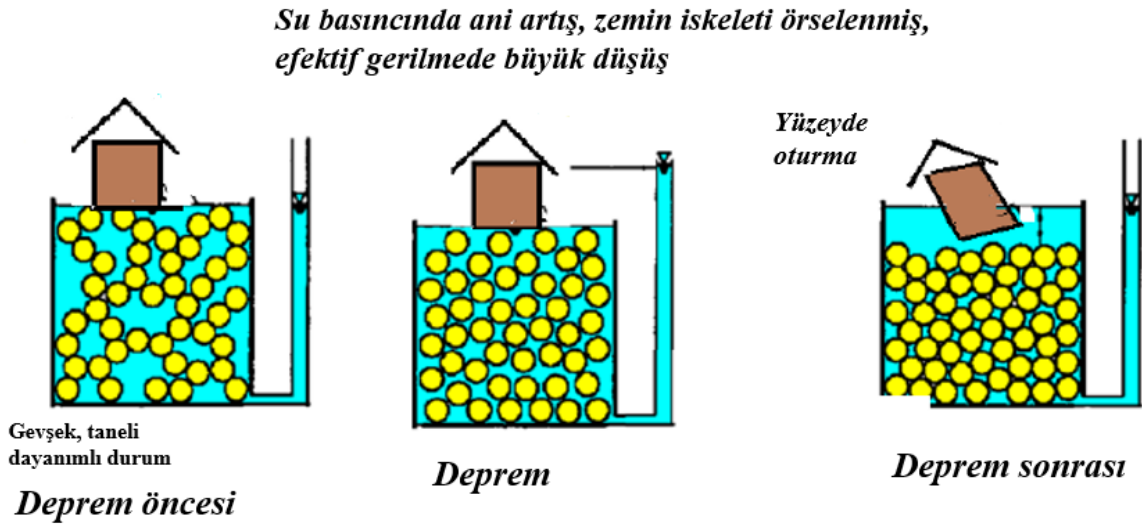
### 1.3 Zemin Sıvılaşması Tanımı ve Oluşumu

Zemin sıvılaşması, kuvvet uygulandığında zemindeki boşluk suyu basıncının artması sonucu zeminin makaslama dayanımının aniden ve ciddi şekilde düşmesi olarak tanımlanır (Castro vd., 1982).

Zeminde oluşan taşıma gücü kaybı, ilk olarak Hazen tarafından 1920 yılında sıvılaşabilir bir hal olarak tanımlanmış, sıvılaşma terimi ise bilimsel literatüre ilk defa Terzaghi tarafından 1925 yılında kazandırılmıştır. Terzaghi, "Sıvılaşmanın suya doymuş bir zeminin çökmesi sırasında, zemini bir araya getiren katı tanelerin ağırlığının zeminin çevresindeki suya

aktarılmasıyla gerçekleşir.” demiştir. Bu süreç neticesinde ise, zeminin fark etmeksizin bir derinliğinde hidrostatik su basıncının arttığı ve suya dalan zeminin birim kütlesine yakın bir seviyeye ulaştığı gözlemlenmiştir. (Castro, 1969).

Sıvılaşma, uygun koşullar olması durumunda deprem anında hasara sebep olan en önemli etkenlerden biridir. Deprem anında oluşan kayma dalgalarının sonucunda gerçekleşen tekrarlı gerilmeler; suya doymuş, gevşek kumlarda ve siltlerde taneler yaklaşarak sıkışır. Bu olay suyun bulunduğu ortamdan uzaklaştırılmasına izin vermeyecek şekilde hızlı ise veya tane boyu dağılımı suyun hızla uzaklaşmasına izin vermiyorsa; ortamdaki boşluk suyu basıncı yükselir. Bu su, basınç yükselmesi nedeniyle zeminde makaslama dayanımında ve sertliğinde azalma görülür. Böylece zemin sıvılaşmış olur (Şekil 1.2).



**Şekil 1.2: Sıvılaşmanın süreci**

Dünyada ve ülkemizde son 20 sene içinde gerçekleşen büyük depremler, yapısal hasarların oluşmasının azalması açısından zeminin deprem yükü altında davranışının iyi tarif edilmesinin önemini ve gerekliliğinin altını bir kez daha çizmiştir. Bu depremler gerçekleşirken düşük plastisiteli silt veya kumlarda sıvılaşma anında zeminin taşıma gücü veya dayanımı tamamıyla ortadan kalkmakta; kil ve gevşek plastik siltlerde taşıma gücü ciddi derecede azalmaktadır. Ek olarak da depremlerde kil ve yumuşak suya doygun siltlerin hüküm sürdüğü temelin altında bulunan zeminlerin statik taşıma gücünün düşmesi neticesinde makaslama dayanımının düşerek temel zemininin çökeceği hesaba katılmalıdır (Erken vd., 2004).

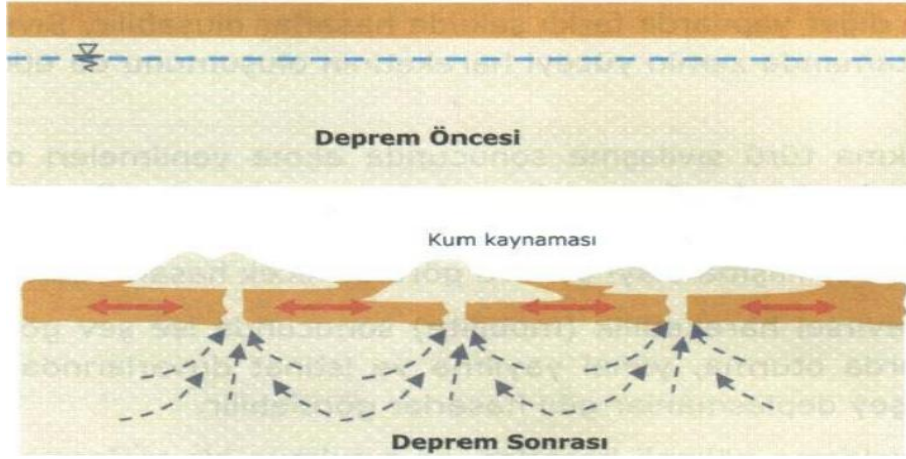
Sıvılaşma, suya doymuş kohezyonsuz ve gevşek zeminlerde ortaya çıkar. Sıvılaşmanın genellikle gerçekleştiği zeminler şunlardır:

- İri kum ve suya doymuş siltli kum zeminlerde suyun doğal ve yapay yöntemlerle uzaklaştırılması durumu verimsiz ise,
- Zeminin ortalama tane çapı  $D_{50}=0,02 - 1,00$  mm arasında artı olarak da kil oranı ( $d \leq 0,005$  mm) %10'un altındaysa,
- Üniformaluk katsayısının değeri  $<10$  ise,
- Göreceli sıkılığın değeri  $<75$  olması durumunda, zeminin sıvılaşma ihtimali fazladır (Şişman, 2006).

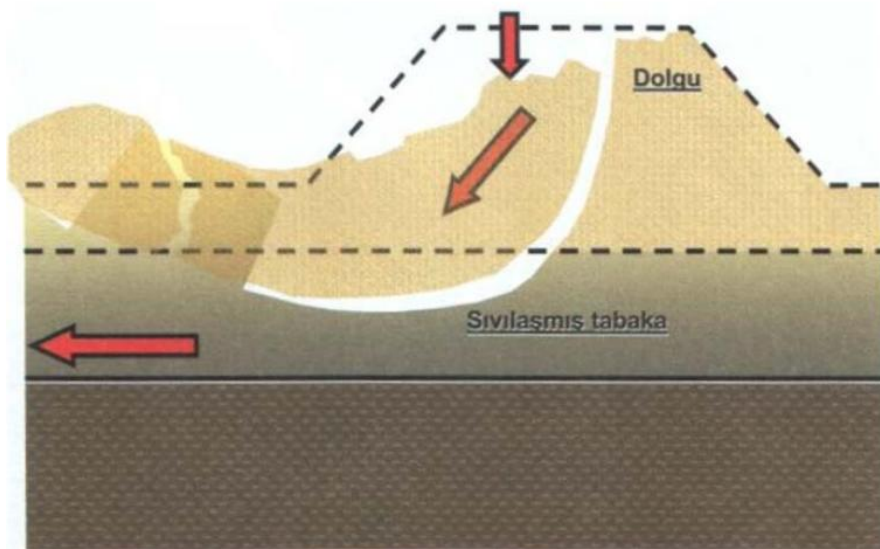
Sıvılaşma sonucunda oluşan zemin deformasyonları; boru hatlarında ve yapılarda hasarların oluşmasına sebep olur. Sıvılaşmanın neden olduğu deformasyonlar aşağıda verilmiştir.

- Kum Kaynaması: Efektif gerilmenin depremin oluşması sırasında zemin taneleri üstündeki değeri azalır, negatif veya sıfır olur. Bu durumun sonucunda da, zemin mekaniğinde "hızlı koşul" diye adlandırılan durum gerçekleşir. Zemin taneleri arasındaki boşluk suyu yukarıya doğru hareketiyle birlikte zemin tanelerini de beraberinde yukarı taşır. Bu taneler suyla beraber yüzeye çıkarsa, kum kaynamaları meydana gelir, ardından da kum konileri oluşur (Şekil 1.3) (Sönmez, 2011).
- Akma Göçmesi: Sıvılaşma nedeniyle oluşan en tehlikeli göçme türlerinden biridir. Ani bir şekilde ortaya çıkar ve hızla gelişir. Genellikle  $3^\circ$ 'den fazla eğime sahip zeminlerde meydana gelir. Geniş bir zemin kütlelerinin şev boyunca aşağı doğru hareketini kapsar (Şekil 1.4) (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).
- Yanal Yayılma: Genellikle  $3^\circ$ 'den düşük yamaçlarda veya su kütlelerinin yanındaki düzlüklerde oluşur. Yanal yayılmalar, altındaki zeminin sıvılaşmasını ve yüzeysel sediman bloklarının yatay yönde yer değiştirmesini içerir (Şekil 1.5) (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).
- Zemin Salınımı: Eğimin neredeyse olmadığı topoğrafik düzlüklerde, sıvılaşan zemin üzerinde sıvılaşmamış tabakanın bloklara ayrılıp ileri ve geri yönlerde hareketiyle oluşan bir zemin deformasyonudur (Şekil 1.6) (Sönmez, 2006).
- Zemin Taşıma Gücü: Sıvılaşma anında tanımında da söylendiği gibi makaslama dayanımı şiddetle düşer ve sonucunda da yapı temellerinin altında kalan derinliklerin makaslama dayanımının yitirmesine sebep olabileceği durumu vardır. Bunun sonucunda zeminin üzerindeki yapılar döner, batır, devrilir ve yan yatar. (Şekil 1.7)

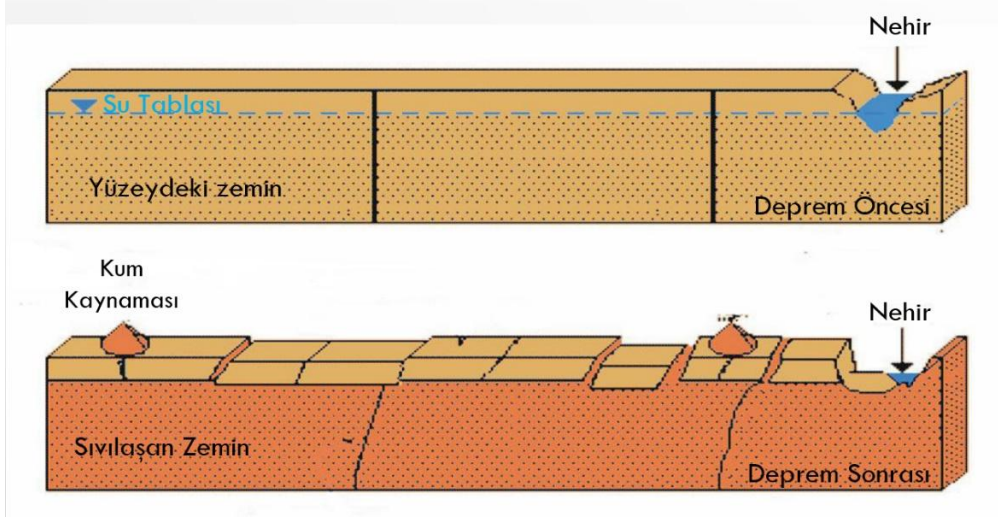
- Gömülü Hafif Yapıların Yükselmesi: Sıvılaşma anında kaldırma kuvveti sayesinde, tank, kontrol bacası, boruların olduğu hatlar vb. hafif kütleli yapılar zeminin üstüne çıkar (Şekil 1.8) (Sönmez, 2011).
- Zemin Oturması: Kohezyonsuz ve suya doymuş zeminler de deprem ile statığın sebep olduğu tekrarlı kayma yükü altında zeminin sıkılaştığı görülür. (Sönmez, 2011)



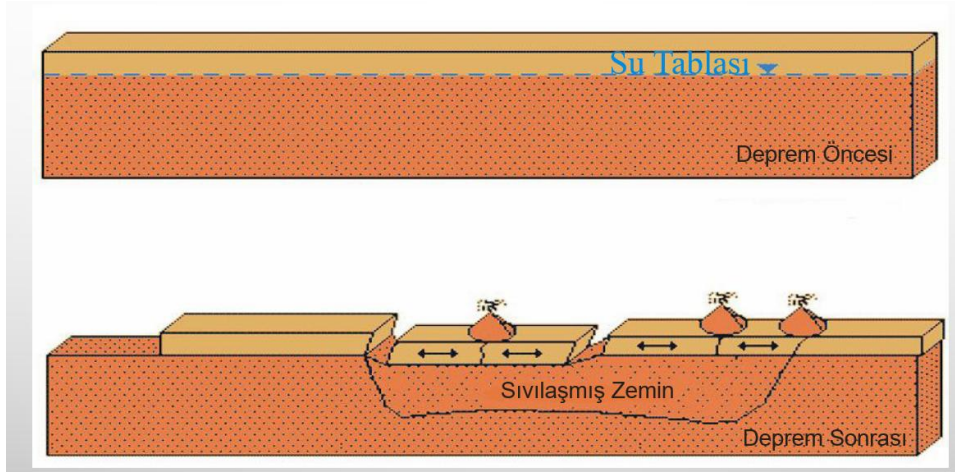
Şekil 1.3: Kum kaynaması (Mollamahmutoğlu, 2006)



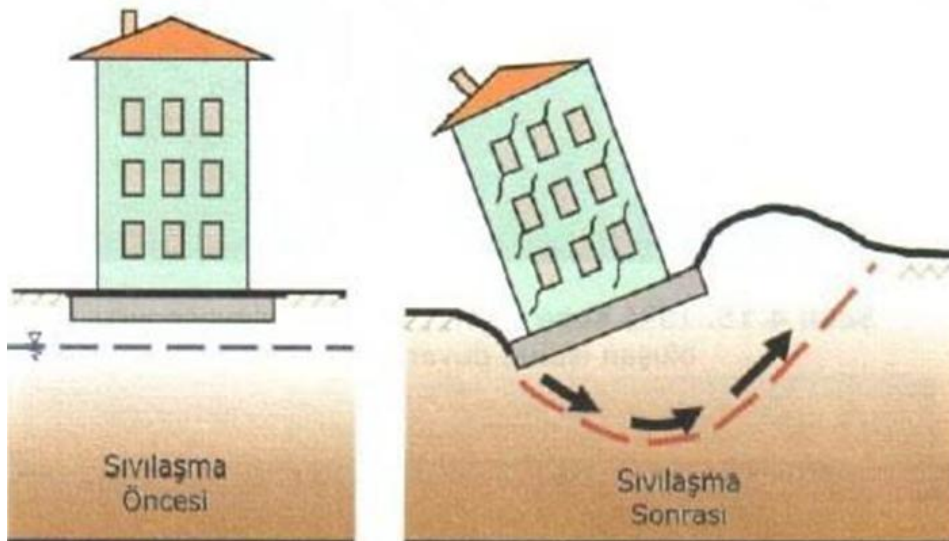
Şekil 1.4: Akma göçmesi (Mollamahmutoğlu, 2006)



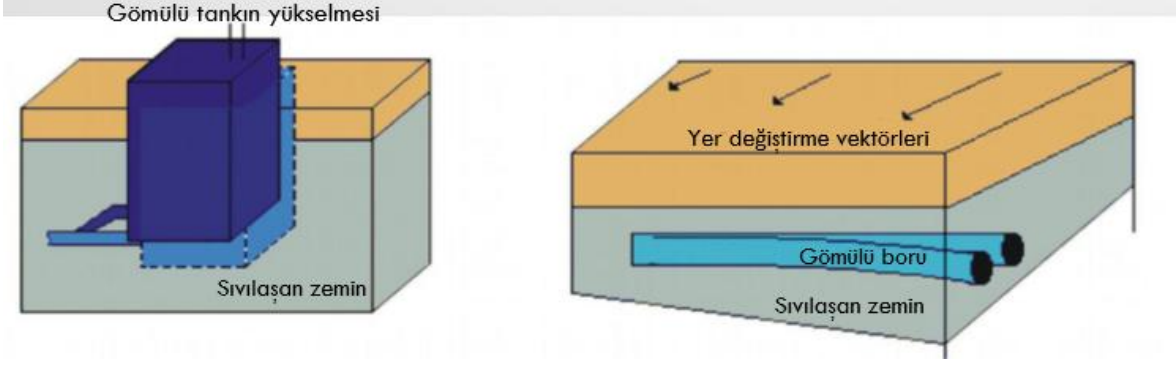
Şekil 1.5: Yanal yayılma (Mollamahmutolu, 2006)



Şekil 1.6: Zemin salınımı (Sönmez, 2011)



Şekil 1.7: Zeminlerde taşıma gücü kaybı (Mollamahmutolu, 2006)



**Şekil 1.8:** Zemin altındaki yapıların sıvılaşmadan etkilenmesi (Sönmez, 2006)

#### 1.4 Zemin Sıvılaşmasına Etki Eden Durumlar

Sıvılaşma durumunun gerçekleşebilmesi için çeşitli jeoteknik ve jeolojik faktörlerin bir araya gelmesi gerekmektedir. Sıvılaşma için gerekli koşullar; depremin merkezi, büyüklüğü ve süresi, zeminin türü ve göreceli sıkılığı, SPT-N değeri, tane boyu dağılımı ve şekli, yer altı su seviyesi, jeolojik koşulların sıvılaşmaya etkisi gibi unsurlardır.

##### 1.4.1 Zemin Özellikleri

Zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı, zemin nitelikleri bakımından; tane boyu dağılımı, tanelerin şekli, zemin türü, rölatif sıkılık/göreceli yoğunluk ve boşluk oranı gibi faktörlere bağlıdır (Ulusay, 2010).

Sıvılaşmaya çok duyarlı zeminler, plastik özellik göstermeyen yani kohezyonsuz zeminlerdir. Kohezyonsuz zeminlerin gösterdiği sıvılaşmaya karşı direnç düşükten yükseğe doğru sırasıyla; temiz kumlar, plastik içermeyen siltli kumlar, plastik içermeyen siltler ve çakıllar şeklinde sıralanabilir.

Seed vd. tarafından 1983 yılında laboratuvar deneyleri ile saha gözlemlerine dayanarak, kohezyonlu zeminlerin çoğunluğunun deprem sırasında sıvılaşmayacağı gösterilmiştir. İlk olarak Seed ve Idriss tarafından 1982 yılında ortaya konulan daha sonra da Youd ve Gilstrap tarafından 1999 yılında geliştirilen kriterlere göre, ince taneli zeminlerin (plastik siltlerin) sıvılaşabilmesi için aşağıda belirtilen üç koşulun hepsinin sağlanması gerekmektedir.

- 0.005 mm'den daha küçük parçacıkların zemindeki kuru ağırlık oranı %15'den küçük olmalıdır (0.005 mm'den geçen yüzde <15).
- Likit limit değeri 35'den küçüktür (LL <35).

- Zeminin su içeriği (W) likit limitin 0.9'undan büyük olmalıdır ( $w > 0.9(LL)$ ).

Bu bahsedilen 3 kriter gerçekleşmediğinde ince taneli zeminlerde çoğunlukla sıvılaşma potansiyeli gerçekleşmediği düşünülmektedir. (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

Yuvarlaklığı yüksek olan zeminler, köşeli veya daha az yuvarlak tanelere sahip zeminlere kıyasla, tanelerinin daha kolay sıkışabilmesi nedeniyle daha yüksek sıvılaşma potansiyeline sahiptir.

Gerilme etkisinde olan, sıkı kumlar boşluk yüzdesini artırarak tane boyutlarını büyütürken, gevşek kumlar boşluk yüzdesini azaltarak tane boyutlarını küçültür. Ancak böyle bir süreçte iki zemin türünün de toplam hacminde herhangi değişiklik meydana gelmez. Casagrande, 1936 yılında bu durumu kritik boşluk oranı (ECR) adıyla tanımlamıştır. Sıvılaşma ihtimali az olan zeminlerde, kritik boşluk yüzdesi boşluk yüzdesinden daha küçüktür. Öte yandan, boşluk yüzdesi kritik boşluk yüzdesinden büyük olan ve drenaj olanağı bulunmayan sıkı olmayan kumlarda tekrarlayan makaslama hareketleri sonucunda sıvılaşma ihtimali artar.

Zeminlerin sıklık durumunu belirlemede ve zemin davranışlarını analiz etmede önemli bir kavram da rölatif sıklıktır. Deprem sırasında sıvılaşan sıkı olmayan zemin sıkı halde bulunduğu sıvılaşmayabilir. Bu sebeple, benzer türdeki sıkı olmayan ve sıkı zeminlerin ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, Seed ve Idriss (1971) tarafından zeminler göreceli sıklık açısından Tablo 1.1'de gösterildiği şekilde sınıflandırmıştır. Rölatif sıklık denklemi ise 1.1'de verilmiştir.

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_n}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1.1)$$

Denklemden;

$D_r$  : Rölatif sıklık

$e_{\max}$ : Zeminin maksimum gevşek haldeki boşluk oranı

$e_{\min}$ : Zeminin rölatif sıklığının belirlendiği boşluk oranı

$e_n$ : Zeminin maksimum sıkı haldeki boşluk oranı

**Tablo 1.1:** Rölatif sıklık açısından zeminlerin sınıflandırması (Seed ve Idriss, 1971)

Göreceli Sıklık (Dr) %	Tanım
0-15	Çok gevşek
15-35	Gevşek
35-65	Orta sıkı
65-85	Sıkı
85-100	Çok Sıkı

#### 1.4.2 Yer altı Su Durumu

Sıvılaşma suya doymuş zeminlerde meydana gelmektedir. Bu sebeple yer altı suyunun derinliği sıvılaşma duyarlılığını etkilemektedir. Yer altı suyunun derinliği arttıkça sıvılaşmaya olan duyarlılık azalır. Sıvılaşma duyarlılığının en fazla gözlemlendiği kısımlar yer altı suyunun zeminden birkaç metre derinde olduğu kısımlardır. Yer altı su seviyesinin ciddi ölçüde düşüp yükseldiği alanlarda sıvılaşma tehlikesi de artar veya azalır.

Sıvılaşmanın oluşumuyla alakalı kontroller, efektif düşey gerilmenin etkisi altındadır. Geçmişten bugüne dek rapor edilen sıvılaşma olaylarına bakıldığında 15 metrenin altında bir derinlikte olan sıvılaşma rapor edilmemiştir (Derinöz, 2004). Bu durumda, bu derinlikte gerçekleşen sıvılaşmanın etkilerinin yüzeye ulaşmadığını veya belli derinliğin altında sıvılaşmanın oluşmadığını göstermektedir.

#### 1.4.3 Jeolojik Koşullar

Jeolojik süreçlerin türü zeminlerin oluşum şekline göre belirlenir ve önemli bir etkiye sahiptir. Sıvılaşma, her koşulda ve zeminde ortaya çıkan bir hareket olmadığından, belli jeolojik ortamlar ve hidrojeolojik şartlardan kaynaklı gerçekleşir.

Göl ve nehirlerde meydana gelen alüvyal (ya da flüviyal) dolgular, aşınma (erozyon) ya da yıkıntı süreçleri ile oluşan dolgular ve rüzgarın etkisiyle taşınarak biriken dolgular gibi suya doymuş zemin tabakaları, sıvılaşmaya karşı oldukça hassas özellikler gösterir (Kramer, 1996). Tablo 1.2'de belirtildiği gibi sıvılaşma için elverişli ortamları gevşek ve genç olan çökeller sunar. Holosen dönemi, yani son 10.000 yıl içinde oluşan taşkın ovası, akarsu, delta ve kıyı alanlarındaki çökelti de sıvılaşma riskine yatkındır (Erinç, 2000) (Şekil 3.7). Bunlara ek olarak, mühendislik uygulamalarında ortaya çıkan zemin çökelti ile hidrolik dolgu yöntemleriyle elde edilen dolgu malzemeleri de sıvılaşma riski taşıyan malzemelerdir. Yol ve baraj inşaatları sırasında yeterince sıkıştırılmamış dolgu malzemeleri de sıvılaşma potansiyeline sahiptir.

Sıvılaşma potansiyeli, zeminin jeoteknik özellikleri ile topoğrafik yapısıyla doğrudan bağlantılıdır ve bölgedeki mevcut depremsellikten etkilenmez. Sıvılaşma duyarlılığını belirleyen faktörler arasında birimin yaşı, çökelme şartları, yer altı su seviyesinin derinliği, jeolojik geçmişi, tane boyu dağılımı, tane yoğunluğu, bulunduğu derinlik ve arazi eğimi yer almaktadır (Siyahi vd., 2003).

**Tablo 1.2:** Deprem anında sıvılaşma ihtimali olan zeminlerin tahmini duyarlılıkları (Youd ve Hoose, 1977; Youd ve Perkins, 1978)

Zemin Tipi	Zemindeki Kohezyonsuz Bileşenin Genel Dağılımı	Zeminlerin >500 yıl	Doygun Sıvılaşma Holosen	Olduklarında Duyarlılıkları Pleistosen	Yaşlarına Göre Pleistosen öncesi
<b>Kıtasal Bölge</b>					
Nehir Yatağı	Bölgesel değ.	Çok yüksek	Yüksek	Düşük	Çok düşük
Sel Ovaları	Bölgesel değ.	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Alüvyon Ova ve Yel pazesi	Yaygın	Orta	Düşük	Düşük	Çok düşük
Deniz Taraçası ve Ovası	Yaygın		Düşük		Çok düşük
Delta ve Delta Yel pazesi	Yaygın	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Gölsel	Değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Kolüvyon	Değişken	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Talus	Yaygın		Düşük		Çok düşük
Kum	Yaygın	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Tepecikleri	Yaygın	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Lös	Değişken	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Bilinmiyor
Buzul Etkisi	Değişken	Düşük	Düşük	Çok düşük	Çok düşük
Tüf	Seyrek	Düşük	Düşük	Çok düşük	Çok düşük
Tempra	Yaygın	Yüksek	Yüksek		
Yerinde Oluşan Zemin	Seyrek	Düşük	Düşük	Çok düşük	Çok düşük
Sebka	Bölgesel değ.	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
<b>Kıyasal Bölge</b>					
Delta	Yaygın	Çok yüksek	Yüksek	Düşük	Çok düşük
Esturin	Bölgesel değ.	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Kumsal Yüksek Dalga Enerji	Yaygın	Orta	Düşük	Çok düşük	Çok düşük
Kumsal Düşük Dalga Enerji	Yaygın	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Gölsel	Bölgesel değ.	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
Sahil	Bölgesel değ.	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük
<b>Yapay Bölge</b>					
Sıkıştırılmamış Bölge	Değişken	Çok düşük			
Sıkıştırılmış Bölge	Değişken	Düşük			

#### 1.4.4 Yer Hareketleri

Zeminin hacimsel küçülmesine, aşırı boşluk suyu basıncının büyümesine sebep olduğu kayma deformasyonları; kütle hareketinin sarsıntı süresi ve ivmesi gibi özellikleri belirlemektedir. Sıvılaşmanın oldukça yaygın sebebi deprem sırasında ortaya çıkan sismik enerjidir. Sarsıntı süresi ve deprem şiddeti yükselirken, sıvılaşmanın potansiyeli de yükselmektedir. Fazla şiddetli depremler daha uzun süreli yer sarsıntısı ve yüksek yer ivmesi üretmektedir (Tablo 3.3) (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

Sıvılaşma olayının başlaması için gerekli enerji, kütle hareketlerinden kaynaklı olduğundan, deprem merkezinin sıvılaşma ihtimali taşıyan yerlere uzaklığı önemli bir faktördür (Ündül ve Gürpınar, 2003).

**Tablo 1.3:** Deprem Karakteristikleri Modifiye Mercalli Şiddet Derecesi ile Arasındaki İlişkiler (Yeats vd., 1997; Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

Yerel Büyüklük (M <sub>L</sub> )	Fay yırtılması yakınındaki tipik maks yatay yer ivmesi (a <sub>maks</sub> )	Fay yırtılması yakınındaki tipik deprem süresi	Fay yırtılması yakınındaki tipik Modifiye Mercalli Şiddet derecesi
≤ 2	-	-	I – II
3	-	-	III
4	-	-	IV – V
5	0.09g	2s	VI – VII
6	0.22g	12s	VII – VIII
7	0.37g	24s	IX – X
≥ 8	≥ 0.50g	≥ 34s	XI – XII

#### 1.5 Sıvılaşma Analizlerine Genel Bakış

Sıvılaşma neticesinde zemin makaslama dayanımını kaybeder ve zemin içinde ya da üzerinde bulunan yapılar zarar görmektedir. Bu tür hasarların önlenmesi veya etkilerinin azaltılması için sıvılaşma ihtimali olan zeminlerin daha önceden tayin edilmesi büyük önem taşır. Bu sebeple, sıvılaşma kavramının ortaya çıkışından itibaren birçok araştırmacı tarafından ilgiyle incelenmiş ve türlü çalışmalar yapılarak çok sayıda yöntem üretilmiştir. Sıvılaşma analizine dair ilk araştırmalar, laboratuvarda farklı deney yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fakat, laboratuvar koşullarının saha ortamına tam olarak uyarlanmasında yaşanan zorluklar nedeniyle, sahada yapılan deneyler temel alınarak sıvılaşma analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler doğrultusunda sıvılaşma potansiyeli taşıyan zemin koşullarını belirlemek için arazi şartları incelenir ve arazi ile laboratuvar deneylerinden faydalanılır.

Jeofizik verilere dayalı hesaplamalar çoğunlukla depremin yaratacağı ivme üstüne yoğunlaşırken, jeoteknik verilerden kaynaklı hesaplamalarda genellikle tane boyutları ile içsel gerilmeler dikkate alınmaktadır. Saha deneyleri kullanılarak yapılan sıvılaşma analizlerinde, deprem anında zeminin sıvılaşmaya karşı gösterdiği direnç ile maruz kaldığı çevrimsel kayma gerilmeleri hesaplanmaktadır. Kohezyonsuz zeminlerde, uygulanan gerilme oranının zemin dayanımını aşması durumunda sıvılaşma meydana gelir. Bu nedenle, sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde çevrimsel gerilme oranı (CSR) ve çevrimsel direnç oranı (CRR) kıyaslanarak güvenlik katsayısı değerlendirilir. Sıvılaşma ihtimalinin tayin edilmesi , çoğul bir değerlendirmeden yani 1. dereceden ayrıntılı bir değerlendirmeye yani 3. dereceye kadar üç etapta ele alınmaktadır (Ulusay, 2010). Ulusay tarafından 2010 yılında TCEGE (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999)'a dayanarak bu aşamalarda izlenmesi gereken yöntemler şöyledir:

1. Aşama değerlendirme yöntemi:

Jeolojik ölçütleri ya da jeomorfolojik ölçütleri baz alan genel kavramlarla ilgilidir. Amaç jeolojik ve/veya jeomorfolojik özelliklere göre sıvılaşmaya duyarlı ve duyarsız alanları ayırt ederek daha detaylı incelenmesi gereken alanları belirlemektir. Ayrıca, daha önce sıvılaşmanın meydana geldiği bölgeler haritalarda gösterilebilirse, değerlendirme açısından çok faydalı olmaktadır. Bunun yanı sıra da, mevcut kayıtlar doğrultusunda çalışma sahasının deprem etkinliği veriliyor ise, tahmini yapılan edilen depremlerin büyüklüğü ve çalışma sahasının olası depremlerin kaynaklarına uzaklığı dikkate alınarak, sıvılaşmanın gelişebileceği bölgeler tahmin edilebilir (Ulusay, 2010).

2. Aşama değerlendirme yöntemi:

İlk aşama değerlendirme yönteminde görüldüğü gibi, jeolojik veya jeomorfolojik ölçütlerle zemin nitelikleri arasında doğrudan veya dolaylı bir ilişki bulunmadığından, bu aşamada oluşturulan sıvılaşma potansiyeli haritaları yetersiz olup tanımlayıcı bilgi sunamamaktadır. Bu sebeple 2. aşama değerlendirmelerinde:

- a) Jeolojik ve jeomorfolojik niteliklerin daha ayrıntılı belirlenmesi amacıyla hava fotoğraflarının kullanılması,
- b) Sıvılaşmaya duyarlı birimlerin arazi çalışmaları ile tespit edilerek sınıflandırılması,
- c) Taşkın sonrası çekilmiş hava fotoğraflarının analiz edilerek taşkın alanları ve sediman birikimlerinin tayin edilmesi ve
- d) Daha önceden gerçekleşen depremler nedeniyle ortaya çıkan sıvılaşmalar hakkında orada yaşayan halktan bilgi toplanması önerilmektedir (Ulusay, 2010).

Bunlara ek olarak, ikinci aşama değerlendirmelerinde, aşağıda sıralanan jeolojik ve jeomorfolojik ölçütlerin dikkate alınması tavsiye edilir (Ulusay, 2010).

Sıvılaşmanın belirli bir bölgede meydana gelip gelmeyeceğini değerlendirmek için kullanılan ölçütler dört ana gruba ayrılabilir (Ulusay, 2010):

- Jeolojik Ölçütler: Taneler arasındaki bağlanma yani çimentolanma seviyesinin düşük olduğu Holosen/genç yaşlı zeminlerin sıvılaşma ihtimali daha fazladır.
- Jeomorfolojik Ölçütler: Bu ölçütte sıvılaşmanın meydana gelebileceği yerler belirlenirken jeomorfolojik unsurlar dikkate alınmaktadır (Iwasaki vd., 1982). Bunlar; güncel akarsu yatakları, eski akarsu yatakları ile ovalar, kum barları, yelpazeler, plajlar, taşkın düzlükleri, düzlük alanlar, eğimli topoğrafyalar ve dağlık bölgelerdir.
- Zemin Kompozisyonu: Sıvılaşmaya karşı hassas olan zeminler arasında temiz kumlu zeminler, siltli kumlar, üniform olmayan zeminler ve yuvarlak tanelerden oluşan zeminler bulunmaktadır.
- Ampirik Sıvılaşma Analizi Ölçütleri: Zeminin dayanımını belirlemeye yönelik bu yöntemde, tekrarlı dayanım oranı (CRR) ile depremin belirli bir noktadaki tekrarlı gerilim oranına (CSR) oranlanmasıyla ulaşılan güvenlik katsayısı temel alınarak bir değerlendirme yapılmaktadır.

### 3. Aşama değerlendirme yöntemi:

Önceki iki aşamada kullanılan yöntemler, yalnızca jeolojik ve jeomorfolojik faktörleri dikkate alırken, deprem ve zemin özelliklerini yeterince göz önünde bulundurmamaktadır. Bu nedenle, bu yaklaşımlar sıvılaşmanın ayrıntılı değerlendirilmesi, mühendislik tasarımlarının geliştirilmesi ve zemin iyileştirme süreçlerine yönelik doğru yönlendirmeler yapılabilmesi açısından yetersiz kalmaktadır (Ulusay, 2010). Bu bağlamda, sıvılaşma potansiyelinin en güvenilir şekilde belirlenebilmesi için hem zeminin hem de depremin özelliklerini birlikte ele alan görgül çözümlene tekniklerinin ya da dinamik laboratuvar deney sonuçlarına dayalı analizlerin kullanılması önem arz etmektedir. Bu yöntemler genel olarak iki ana grupta toplanabilir. İlk yöntem, arazi gözlemleriyle zemin davranışını çeşitli indeks deney sonuçlarıyla karşılaştıran görgül ilişkilere dayanırken; ikinci yöntem ise, örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneylerine dayanmaktadır (Ulusay, 2010).

a) Arazi penetrasyon testlerine dayalı ampirik yaklaşımlar, standart penetrasyon deneyi (SPT) ya da konik penetrasyon deneyi (CPT) verilerinden yola çıkarak tekrarlı gerilme oranının tahmin edildiği yöntemlerdir.

- b) Makaslama dalgası hızına bağlı yöntemler, yer altı zeminlerinin tekrarlı yüklemelere karşı dayanımını belirlemek için kayma dalgası hızını esas alarak tekrarlı gerilme oranını belirler.
- c) Çakıl içeren zeminler için ise, Becker penetrasyon deneyi (BPT) sonuçları kullanılarak tekrarlı gerilme oranı tahmin edilmektedir.
- d) Laboratuvar ortamında, örselenmemiş zemin örnekleri üzerinde yapılan dinamik üç eksenli deneyler, zeminin tekrarlı yüklemelere karşı davranışını analiz etmek için kullanılan bir başka önemli yöntemdir.

## 1.6 Önceki Çalışmalar

Iwasaki vd. (1982) tarafından sıvılaştırmanın yer yüzeyindeki hasar verici etkisinin değerlendirilmesinde ilk yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımda ilk 20 m derinliğe kadar yer alan zemin tabakalarının kalınlığı, bu tabakaların yüzeye yakınlığı ve l'den küçük olan sıvılaştırmaya karşı güvenlik sayısı dikkate alınmıştır.

Sönmez (2003) çalışmasında Iwasaki vd. tarafından 1982 yılında verilen Sıvılaştırma Potansiyeli İndeksi hesaplanmasında ve sınıflandırılmasında bazı sınırlamalar olduğunu ortaya koymuştur. Yazar, sıvılaştırılabilirlik sınıflandırmasına 'sıvılaştırılmaz' ve 'orta' olmak üzere iki yeni kategori eklemiştir; ayrıca, marjinal sıvılaştırılabilir/sıvılaştıramaz ayrımında  $F_L = 1.2$  eşik değerini dikkate alarak bir revizyon yapmıştır.

Akgün A (2007) çalışmasına göre Altınova mahallesi (Ayvalık) ve yakın çevresinde en altta gölgesel kireçtaşı, marn, kumtaşı ve tüften oluşan Soma Formasyonu bu formasyonun üstünde bazalt, andezit ve bazaltik andezitten oluşan Yuntdağ formasyonu bulunmuştur. Her iki Formasyonda da Üst Miyosen-Pliyosen yaşındadır. En üstte ise Kuvaterner yaşlı alüvyon yer almıştır.

Esin ve Ceryan (2015) Burhaniye yerleşim alanının (Balıkesir) standart penetrasyon deneyi (SPT) verilerini kullanarak sıvılaştırma potansiyeli haritasını üretmişlerdir. Üretilen bu haritaya göre Burhaniye yerleşim bölgesinin yaklaşık %48'i "çok yüksek", %42'si "yüksek", %7'si "orta" ve %3'ü "düşük" sıvılaştırma potansiyeli vardır. Yazarlar söz konusu yerleşim alanındaki sahaların kullanımını değerlendirirken ve bu yerleşim alanında mekânsal planlama yapılırken çalışmalarında üretilen sıvılaştırma potansiyeli haritasının bir altlık teşkil edeceğini belirtmişlerdir.

Sözbilir vd. (2016) tarafından Edremit Fay Zonu' nun Altınoluk segmenti üzerine açılan Narlı hendeğinde 3 adet paleo-deprem belirlenmiştir. Bu çalışmalara göre 1. deprem MÖ-13178 yılından önce gerçekleşmiştir. 2. deprem MÖ-3880 yılları ile MS-80 yılları arasında olmuştur. Sonuncu deprem ise 1944 depremi olarak belirlenmiştir. Altınoluk segmenti üstünde gerçekleşen 1944 depremi  $M_w=6.8$  moment büyüklüğünde ve 35-37 km uzunluğunda yüzey kırığına sahip bir depreme sebep olmuştur. Son depremden bu yana geçen zaman 71 yıldır. Narlı hendeğindeki bilgilere göre, Edremit Fayı'nın düzenli bir deprem tekrarlama dönemi yoktur. 1944 yılında kırılan fayın, daha önceden olan olaylar ile meydana gelen kırıktan faydalandığı gözlenmiştir.

Sözbilir vd. (2016b) gerçekleştirdikleri paleo-sismolojik araştırmalar kapsamında, Havran–Balya Fayı'nın Ovacık segmentinde açılan Ovacık1 ve Ovacık2 hendekleri, MÖ 13.630±150 tarihinden sonra yüzey kırığı oluşturan dört ayrı deprem olayına işaret ettiğini tespit etmişlerdir. Bu bulgular, Ovacık segmentinin aktif bir fay olduğunu, ancak yaklaşık 721 yıldır herhangi bir deprem üretmediğini göstermiştir. Balıkesir Fayı'na ait Gökçeyazı segmentinde inceledikleri Güngörmez ve Dede hendekleri ise, bu segmentin tarih öncesi dönemde yüzey kırığı oluşturan depremler geçirdiğini, ancak milattan sonra herhangi bir kırılma yaşanmadığını ortaya koymuştur. Segmentin ortalama deprem tekrarlanma aralığının 1000 yıl olduğu, son 2000 yıl içerisinde ise büyük bir deprem üretmediğini öne sürmüşlerdir. Kepsut segmenti üzerinde yapılan Ayşebacı hendeğini incelediklerinde, milattan sonra döneme ait üç büyük deprem olayına dair kanıtlar sunmuştur. Bu olaylardan en sonuncusunu, 1897 Balıkesir depremi ile ilişkilendirmişlerdir. Yaklaşık 1000 yıllık bir tekrarlanma periyoduna sahip olan bu segment, son 118 yıldır önemli bir sismik aktivite göstermemiştir.

Ceryan ve Ceryan (2021) Kuzey Anadolu Fay Zonu' nun güney kısmı ve Havran-Balıkesir Fay Zonu' nun etkisi altında olan ve Edremit Fay Zonunun geçtiği Altınoluk-Güre (Edremit-Balıkesir, Türkiye) arasındaki yerleşim alanı için sıvılaşma potansiyelini ve faylardan uzaklığı birlikte dikkate alarak mikro-bölgeleme çalışması yapmışlardır. Bu çalışmaya göre, söz konusu alanda, fay kırılması ve sıvılaşma nedeniyle güçlü sismik sarsıntıdan kaynaklanan arazi hasarının meydana gelmesini beklemişlerdir. Bunu göz önünde bulundurarak, bu çalışmada yeni bir indeks olan Arazi Hasar Endeksi tanımlamış ve çalışma alanının mikrobölgelemesini bu indeks kullanarak oluşturulmuşlardır. Bu çalışmada yapılan mikrobölgelemenin amacı, sıvılaşma ve yüzey fay kırılması açısından aktif faylardan

kaynaklanan tehlikeyi tanımak ve planlamacılara farklı bina tipleri ve bina kullanımları için riski nasıl azaltacakları konusunda rehberlik sağlamaktır.

Ceryan vd. (2023) Akçay (Edremit, Balıkesir) ve çevresinin topoğrafyasını, yer altı su tablasının derinliğini ve zemin özelliklerini sıvılaşmaya yatkınlık açısından incelemişlerdir. Ayrıca, zemin katmanları için sıvılaşmaya karşı emniyet faktörlerini SPT-N değerlerine dayalı basit prosedür kullanarak belirlemişlerdir. Elde edilen FL değerleri dikkate alınarak sondaj lokasyonundaki zemin profilinin sıvılaşma potansiyeli indeksi ve sıvılaşma şiddet indeksini hesaplamış, daha sonra bu indekslerin mekansal dağılımlarını elde etmişlerdir. Elde edilen haritaya göre çalışma alanının %5,8'i düşük sıvılaşma potansiyeline, %10,7'si orta sıvılaşma potansiyeline, %18,3'ü yüksek sıvılaşma potansiyeline ve %53,8'i çok yüksek sıvılaşma potansiyeline sahip olmuştur.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1 Sondaj Logları ve Laboratuvar Deney Sonuçlarının Elde Edilmesi**

Bu çalışmada kullanılan SPT-N değerleri, yer altı su seviyesi ve elek analizi sonuçları Analiz Mühendislik İnşaat Sondajcılık Madencilik Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi tarafından 2017 yılında Balıkesir Büyükşehir Belediyesi için yapılan “Balıkesir İli Ayvalık İlçesi 3125.83 Hektarlık Alanın İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporu’nda verilen 96 adet sondaj logu ve bu sondajlara ait laboratuvar deney sonuçlarından alınmıştır, Şekil 2.1’de bu çalışmada kullanılan sondaj loglarından biri verilmiştir. Şekil 2.2’de ise bir adet tane boyu dağılımı deney sonucu verilmiştir.



## DANE BOYU DAĞILIMI ( ELEK ANALİZİ ) DENEY SONUÇLARI

Grain-Size Analysis Test Results

Rev. no : 00 Form No:GR-4003

Müşteri Adı  
Customer's Name  
ANALİZ MÜH.İNŞ.SON.MAD.SAN.VE TİC.LTD.ŞTİ.

Num.Alındığı Yer :  
Project Location  
Balıkesir İli, Ayvalık İlçesi, 3125.83 Hektarlık Alanın  
Mikrobölgeleme Etüt Raporu

Sondaj-Num. No  
Drilling Sample No  
SK-405

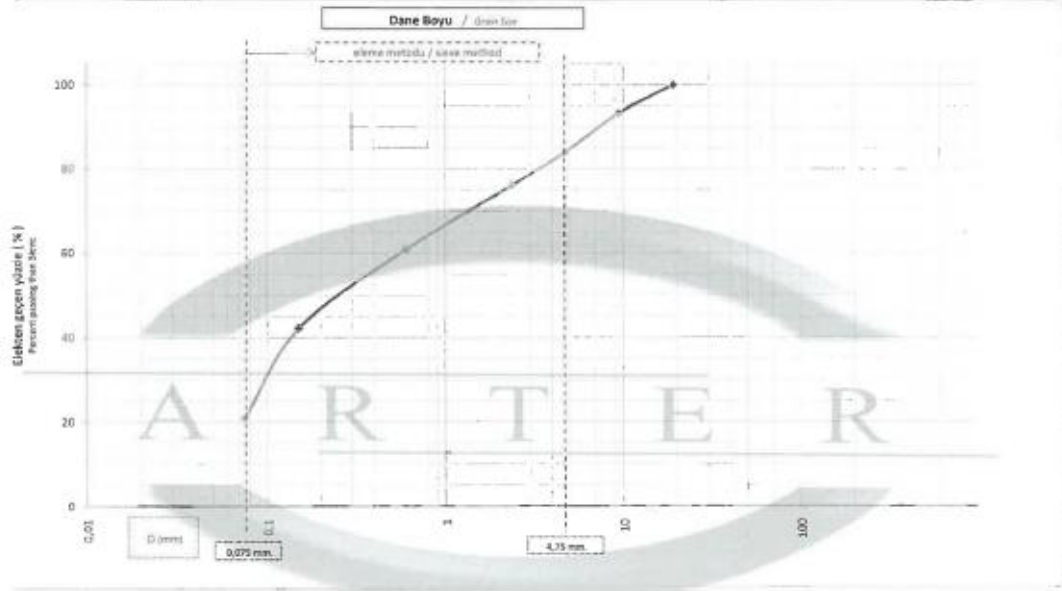
Derinlik (m)  
Depth  
4,50-4,95

Rapor No/Bak rap.no  
Report no  
3477real

Mun Kabul Tarihi  
Date of Samp. Accept  
07.03.2017

Deney Tarihi  
Date of Test  
20.03.2017

Deney Rapor Tarihi  
Date of Test Result  
20.06.2017



İlke No / 50µm	Elek Çapı (mm.) Üstü ölçümler	Geçen % yüzde
3 in.	75	100.00
2 in.	50	100.00
1.18 in.	30.5	100.00
1 in.	25	100.00
3/8 in.	19	100.00
3/16 in.	9.5	90.02
No 4	4.75	83.97
No 8	2.36	75.97
No 30	0.600	60.74
No 100	0.150	42.11
No 200	0.075	20.91

D10 (mm.)	0,00
D30 (mm.)	0,10
D60 (mm.)	0,57

Uniformluk Katsayısı Coefficient of Uniformity (Cu)	#SAYI/01
Süreklilik Katsayısı Coefficient of Gradation (Cc)	#SAYI/01

ÇAKIL / Gravel (%)	16,03
KUM / Sand (%)	63,06
SİLT+KİL/siltClay (%)	20,91

Şekil 2.2: Bu çalışmada kullanılan tane boyu dağılımı deney sonuçlarına ait bir örnek

## 2.2 Sayısal Yükseklik Modelinin Elde Edilişi

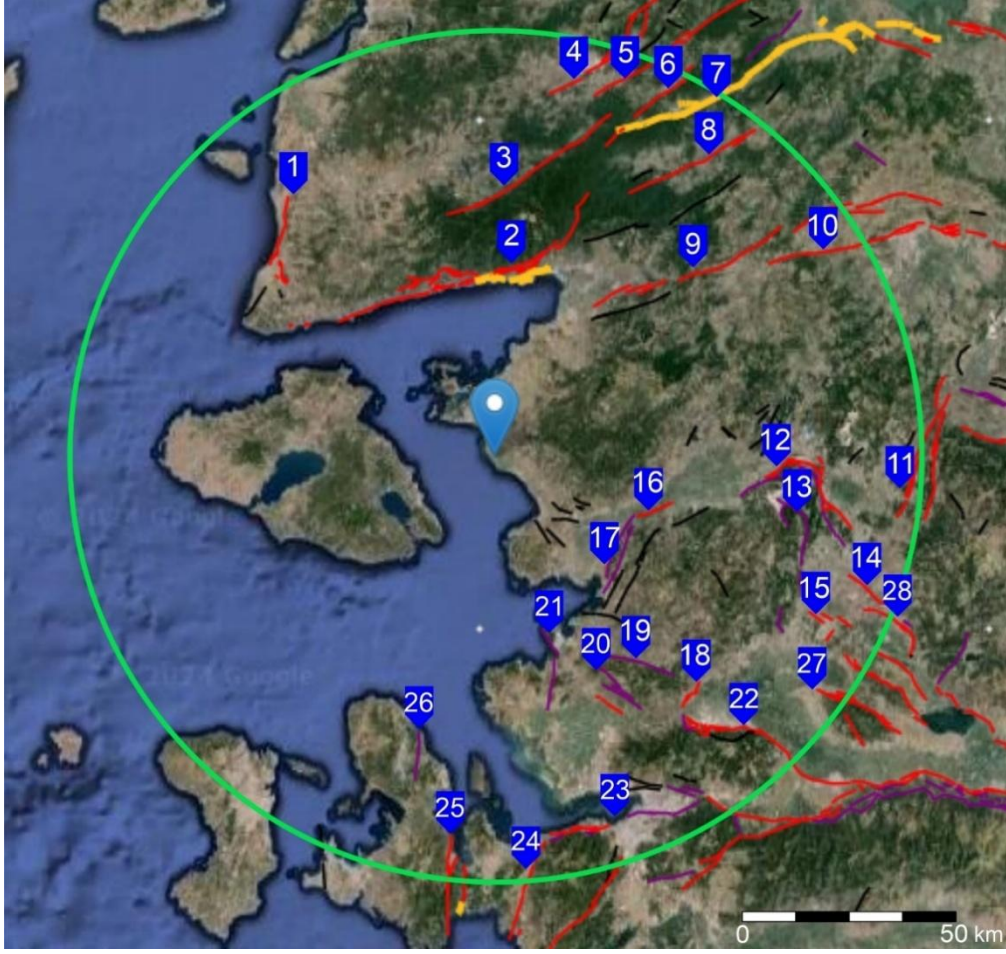
Ayvalık ilçesi (Balıkesir) Altınova mahallesinin sayısal yükseklik modeli (SYM) ASF (Alaska Satellite Facility) Search sitesinden indirilmiştir. Çalışma alanının eş yükselti eğrileri ve eğim haritası bu sayısal yükseklik modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Eş yükselti eğrilerinin ve eğim haritasının elde edilmesinde ve bu çalışmada yapılan mekânsal analizlerde Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Laboratuvarında lisanslı kurulu olan ArcGIS (V. 10.3) programı kullanılmıştır.

### 2.3. Senaryo Depreminin Oluşturulması

Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının belirlenmesi için en büyük yer ivmesine ihtiyaç vardır. Bu nedenle çalışma alanını içine alan bölgenin sismotektonik özellikleri göz önünde bulundurularak, sıvılaşma analizi için senaryo depremler deterministik olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, öncelikle çalışma alanının merkezinden en fazla 100 km uzaklıkta bulunan aktif fay ve fay zonları belirlenmiştir (şekil 2.3). Daha sonra, yüzey kırılma uzunluklarına bağlı olarak bir fay tarafından retilbilecek en büyük olası depremi moment ( $M_w$ ) cinsinden tahmin etmek için kullanılan Eşitlik (Well ve Coppersmith 1994) yardımıyla söz konusu fayların/fay zonlarının üretebileceği en büyük deprem büyüklüğü bulunmuştur (Eşitlik 2.1).

$$M_w = 5.08 + 1.16 \log(SRL) \quad (2.1)$$

Bu çalışmada, yüzey kırığı uzunlukları (SRL, km), Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan MTA Yerbilimleri izim Editörü web uygulamasından (MTA 2018) alınmıştır.



**Şekil 2.3:** Altınova sahiline (Ayvalık, Balıkesir) en fazla 100 km uzaklıktaki faylar (Fay numaraları Tablo 2.1’de açıklanmıştır)

**Tablo 2.1** İnceleme alanına en fazla 100 km uzaklığındaki fay ve fay zonları ile bunların üretebileceği depremlerin büyüklük ve en büyük yer ivmesi değerleri

No	Fay/ Fayzonu	Segment	Fay izi uzunluğu SRL (km)	Merkeze uzaklık, Re(km)	Deprem büyüklüğü Mw	En büyük yer ivmesi $a_{max}(g)$
1	Kestanbol fayı		21.8	65.56	6.63	0.0657
2	Edremit fay zonu		71.7	42.22	7.23	0.1689
3	Evciler fayı		46.4	58.68	7.01	0.1006
4	Biga-Çan fay zonu	Çan	19.9	86.52	6.59	0.0402
5	Sarıköy fayı		66.6	88.20	7.2	0.0603
6	Bekten fayı		16.2	87.17	6.48	0.0368
7	Yenice-Gönen fayı		88.1	78.03	7.34	0.0834
8	Pazarköy fayı		34.5	70.13	6.86	0.0703
9	Havran-Balya fayı		85.3	43.31	7.32	0.1758
10	Balıkesir fayı	Gökçeyazı	39.2	79.84	6.93	0.0596
11	Gelenbe fay zonu	Batı	36.5	98.72	6.89	0.0385
12	Soma-Kırkağaç fay zonu		31.7	64.30	6.82	0.0774
13	Soma-Kırkağaç fay zonu		39.3	69.07	6.93	0.0755
14	Gediz Graben fay sistemi	Akhisar fayı	11.9	88.79	6.33	0.0317
15	Gediz graben fay sistemi	Ozanca fayı	4.9	82.66	5.88	0.0262
16	Bergama fayı		9.3	36.08	6.20	0.0915
17	Zeytindağ fay zonu		17.3	33.67	6.52	0.1210
18	Gediz graben fay sistemi	Muradiye fayı	7.8	72.46	6.11	0.0388
19	Güzelhisar fayı		23	53.67	6.66	0.0868
20	Menemen fay zonu		8	56.31	6.13	0.0557
21	Yenifoça fayı		21	41.87	6.61	0.1086

**Tablo 2.1:** (devam)

No	Fay/ Fayzonu	Segment	Fay izi uzunluğu SRL (km)	Merkeze uzaklık, Re(km)	Deprem büyüklüğü Mw	En büyük yer ivmesi $a_{max}(g)$
22	Gülbahçe fay zonu		24.58	91.04	6.69	0.0394
23	Seferihisar fayı		25.97	92.40	6.72	0.0390
24	Gediz graben fay sistemi	Manisa fayı	46.3	77.44	7.01	0.0668
25	İzmir fayı		34.58	91.37		0.0443
26	Mordoğan fayı		24.48	95.30	6.69	0.0358
27	Gediz Graben fay sistemi	Halitpaşa fayı	24.48	95.30	6.69	0.0358
28	Gediz graben fay sistemi	Akselendi fayı	19.64	95.58	6.58	0.0329

Senaryo depremin oluşturulmasının en son aşamasında, çalışma alanını etkileyecek fayların/fay zonlarının üretebileceği en büyük depremlerin çalışma alanında oluşturacağı en büyük yer ivmesi bulunmuştur (Tablo 2.1). Literatürde en büyük yer ivmesini bulabilmek için verilen çok sayıda azalım ilişkisi vardır. Bu çalışmada en büyük yer ivmesini ( $a_{max}$ ) belirleyebilmek için Ulusay vd. (2004) tarafından verilen aşağıdaki Eşitlik 2.2 kullanılmıştır.

$$a_{max} = 2.18e^{0.0218(33.3M_w - R_e + 7.8427S_A + 18.9282S_B)} \quad (2.2)$$

Eşitlikte, kaya için  $S_A = 0$ ,  $S_B = 0$ , zemin için  $S_A = 1$ ,  $S_B = 0$  ve gevşek zemin için  $S_A = 0$ ,  $S_B = 1$ ,  $R_e$  aktif fayın inceleme alanına en yakın mesafesidir.  $R_e$  değerleri MTA (2018)'den alınmıştır.

#### 2.4. SPT-N Değerlerinin Düzeltilmesi

SPT-N değeri zeminin göreceli sıklığını ifade ettiğinden dolayı söz konusu değere bağlı sıvılaşma analizleri geliştirilmiştir. Arazide ölçülen SPT-N değeri tij uzunluğu, örnekleme türü, kuyu çapı, çekiç türü (enerji oranı), örtü yükü basıncı ve zemindeki ince tane oranına karşı duyarlıdır. Bu nedenle sıvılaşma analizlerinde söz konusu bu faktörler dikkate alınarak

düzeltilmiş SPT-N değeri kullanılmaktadır. Tij uzunluğu faktörü ( $C_R$ ), örnekleme türü faktörü ( $C_S$ ), kuyu çapı faktörü ( $C_B$ ), çekiç türü (enerji oranı) faktörü ( $C_E$ ) ve örtü yüküne ( $C_N$ ) göre düzeltilmiş SPT-N değeri ( $(N_1)_{60}$ ) aşağıda verilen Eşitlik 2.3 (Youd vd., 2001) ile bulunmaktadır.  $(N_1)_{60}$  değeri temiz kumlar (ince tane içermeyen kumlar) için hesaplanmaktadır.

$$(N_1)_{60} = C_R C_S C_B C_E C_N \quad (2.3)$$

$(N_1)_{60}$ 'ın belirlenmesi için düzeltme katsayılarının seçimi Robertson ve Wride 1998 tarafından verilen tablodan yapılmaktadır (Tablo 2.2).

**Tablo 2.2:** Düzeltilmiş SPT-N değerinin  $(N_1)_{60}$  belirlenebilmesi için düzeltme faktörlerinin seçimi (Robertson ve Wride 1998)

Faktör	Ekipman Değişkeni	Sembol	Düzeltilme
Örtü Yükü Basıncı		$C_N$	$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^{0.5}$ (Liao ve Whitman 1986) $C_N \leq 2.00$ $P_a = 100$ Kpa ya da 1 atm $\sigma'_v =$ Efektif düşey gerilme
Enerji Oranı	Donut türü çekiç Safety türü çekiç Automatic-Trip Donut türü çekiç	$C_E$	0.5 – 1.0 0.7 – 1.2 0.8 – 1.3
Kuyu Çapı	1) 65 mm ve 115 mm 2) 150 mm 3) 200 mm	$C_B$	1.00 1.05 1.15
Tij Uzunluğu	1) 3m ve 4m 2) 4m ve 6m 3) 6m ve 10m 4) 10m ve 30m 5) > 30m	$C_R$	0.75 0.85 0.95 1.00 >1.00
Örnekleme Türü	Standart örnekleyici	$C_S$	1.0
	İç gömlek kullanmadan		1.1-1.3

İnce tane oranına (İTO) göre düzeltilmiş SPT-N değeri aşağıdaki eşitliklerden (Eşitlik 2.4) (Youd vd. 2001) bulunmaktadır.

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta (N_1)_{60} \quad (2.4)$$

$$\alpha = 0 \quad \text{ITO} \leq \%5 \quad (2.4a)$$

$$\alpha = \exp \left( 1.76 - \left( \frac{190}{\text{ITO}^2} \right) \right) \quad \%5 < \text{ITO} \leq \%35 \quad (2.4b)$$

$$\alpha = 5.0 \quad \text{ITO} > \%35 \quad (2.4c)$$

$$\beta = 1 \quad \text{ITO} \leq \%5 \quad (2.4d)$$

$$\beta = \left( 0.99 + \frac{\text{ITO}^{1.5}}{1000} \right) \quad \%5 < \text{ITO} \leq 35 \quad (2.4e)$$

$$\beta = 1.2 \quad \text{ITO} > \%35 \quad (2.4f)$$

## 2.5 Zemin Tabakalarının Sıvılaşmaya Karşı Güvenlik Sayısının Bulunuşu

Seed ve Idriss (1971) tarafından tanımlanan basitleştirilmiş prosedür, zemin tabakasının sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde pratikte yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Daha sonra, basitleştirilmiş prosedür güncellenen verilere dayalı olarak iyileştirilmiştir (Seed, 1979; Seed vd., 1985; Youd vd., 2001; Cetin vd., 2002, 2004; Idriss ve Boulanger, 2004, 2008, 2010; Boulanger ve Idriss, 2012, Cetin vd., 2018). Zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının ( $F_L$ ) hesaplanmasında temel olarak iki parametre dikkate alınır: (1) deprem olayının zemine verdiği tekrarlı yükleme oranının ifade eden tekrarlı gerilme oranı (CSR) ve (2) zemin tabakasının sıvılaşma tetiklemesine karşı dayanımını ifade eden tekrarlı dayanım oranı (CRR) (Eşitlik 2.5)  $F_L \leq 1$  ise zemin sıvılaşmaya eğilimlidir ve  $F_L > 1$  ise zemin sıvılaşmaya karşı dirençlidir.

$$F_L = \frac{CRR_{M=7.5}}{CSR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm}} \quad (2.5)$$

Seed ve Idriss (1967), zemin profilindeki belirli bir derinlikteki tekrarlı gerilme oranını (CSR), maksimum döngüsel kesme gerilme oranının %65'ine eşit temsili bir değer olarak ifade etmişlerdir (Eşitlik 2.6a). Seed ve Idriss (1971) ve Seed vd. (1975) tarafından önerilen basitleştirilmiş yöntemde de, düzgün tekrarlı kesme gerilmesini (CSR'yi) elde etmek için başlangıç formülü etkili örtü yükü gerilmesi kullanılarak normalleştirilmiştir (Eşitlik 2.6b). Daha sonra, belli büyüklükteki depremler için düzeltilmiş CSR değerlerini elde etmek için, Seed ve Idriss (1967) tarafından verilen formül, deprem büyüklüğüne göre değiştirilmiştir.

Ayrıca, zeminin sıvılaşma potansiyelinin çevresel gerilmeye bağlı olduğu dikkate alınarak, Seed vd. (1983) örtü yükü gerilme düzeltme faktörünü önermişlerdir. Sonuç olarak CSR değeri  $M_w=7.5$ 'den örtü yükü basınçları 1 atm'den farklı durumlar için düzeltilmiş duruma gelmiştir (Eşitlik 2.6c) (Youd vd. 2001).

$$CSR_{\sigma'_v} = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} \quad (2.6a)$$

$$CSR_{\sigma'_v} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (2.6b)$$

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \frac{1}{MSF} \frac{1}{K_\sigma} \quad (2.6c)$$

Burada,  $CSR_{M,\sigma'_v}$  özgün deprem büyüklüğü ve arazideki efektif gerilme için bulunan tekrarlı gerilme oranı,  $\tau_{max}$  en büyük kesme gerilmesi,  $\sigma_v$  toplam düşey gerilme,  $\sigma'_v$  efektif düşey gerilme,  $r_d$  kesme gerilmesi azaltma faktörü,  $a_{max}$  gal cinsinden en büyük yatay yer ivmesi,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $M_w$  deprem büyüklüğü ölçekleme faktörü ve  $K_\sigma$  efektif örtü yükü için düzeltme faktörüdür.

Literatürde, zemin profilindeki esneklik düzeltmesini sağlayan kayma gerilimi azaltma faktörü ile ilgili birkaç ampirik ilişki verilmiştir (Seed ve Idriss 1971; Imai vd. 1981; Seed vd. 1984; Seed vd. 1985; Liao ve Whitman 1986; Golesorkhi 1989; Idriss 1999; Cetin vd. 2004; Kishida vd. 2009; Cetin vd. 2018b). Bu çalışmada Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen ve Liao ve Whitman (1986) tarafından yaklaşık olarak hesaplamaya dönüştürülen ilişki (Eşitlik 2.7) kullanılmıştır Eşitlik 2.7'de  $z$  metre cinsinden yer yüzeyinden itibaren derinliği göstermektedir.

$$r_d = \frac{(1.00 - 0.4113z^{0.5} + 0.0452z + 0.001753z^{1.5})}{(1.00 + 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2)} \quad (2.7)$$

Literatürde, MSF için çeşitli ilişkiler verilmiştir (Seed ve Idriss, 1982; Ambraseys, 1988; Arango, 1996; Youd ve Noble, 1997; Youd vd. 1997; Andrus ve Stokoe, 1997; Idriss, 1998,1999; Youd vd.2001; Boulanger ve Idriss 2015). Bu çalışmada Idriss (1999) tarafından geliştirilen revize edilmiş büyüklük ölçekleme faktörü (Eşitlik 2.8) kullanılmıştır.

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (2.8)$$

$K_\sigma$  teriminin hesaplanmasında Hynes ve Olsen (1999) tarafından verilen formül (Eşitlik 2.9) kullanılmıştır.

$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{f-1} \leq 1 \quad (2.9)$$

Burada  $P_a$  1 atm basınçtır (101 kPa)  $\sigma'_v$  düşey efektif gerilmedir.

Bu çalışmada  $f$  nin bulunmasında Montgomery vd. (2012) tarafından önerilen doğrusal ilişki kullanılmıştır (Eşitlik 2.10 ve 2.11).  $C_d$  değeri 46 olarak alınmıştır (Idriss ve Boulanger 2008).  $D_R$  göreceli sıkılık,  $(N_1)_{60CS}$  ise ince tane oranına göre düzeltilmiş SPT-N değeridir.

$$f = 1 - \left(\frac{D_R}{2}\right) \quad 0.6 \leq f \leq 0.8 \quad (2.10)$$

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60CS}}{C_d}} \quad (2.11)$$

Literatürde, zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı dayanım kapasitesi olan tekrarlı dayanım oranını (CRR) elde etmek için jeoteknik ve jeofizik deneyler de dahil olmak üzere çok sayıda arazi deneyi kullanılmıştır. Bunlar standart penetrasyon testi (SPT), konik penetrasyon testi (CPT), Becker penetrasyon testi (BPT), dilatometre testi (DT) ve mikrotremördür (Seed ve Idriss 1967, 1971; Dobry vd.1981; Seed vd.1984; Robertson ve Campanella 1985; Seed ve De Alba 1986; Stokoe vd. 1988; Tokimatsu ve Uchida 1990; Stark ve Olson 1995; Olsen 1997; Robertson ve Wride 1998; Andrus vd. 1999 ve Andrus ve Stokoe 2000, Andrus vd.2004; Uyanık ve Taktak 2009; Beroya vd. 2009; Setiawan 2011; Ghafghazi vd. 2017). Bu çalışmada,  $M = 7,5$  büyüklüğündeki depremler için CRR değeri, aşağıdaki ifade kullanılarak  $(N_1)_{60CS}$ 'ye (ince tane oranına göre düzeltilmiş SPT-N değerine) göre hesaplanmıştır (Youd vd. 2001) (Eşitlik 2.12).

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60CS}} + \frac{(N_1)_{60CS}}{135} + \frac{50}{(10(N_1)_{60CS} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (2.12)$$

## 2.6. Zemin Profilinin Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi Değerlerinin Belirlenmesi

Sıvılaşmanın yer yüzeyindeki hasar verici etkisinin değerlendirilmesinde ilk yaklaşım Iwasaki vd., (1982) tarafından önerilmiştir. Bu teoremden yüzeyden 20 metre derine kadar

yer alan zemin tabakalarının kalınlığı, bu tabakaların yüzeye yakınlığı ve 1'den küçük olan sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı dikkate alınmıştır. Söz konusu çalışmada verilen Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi, ( $L_I$ ) zemin profilinin sıvılaşma potansiyellerini vermekte olup aşağıdaki formüllerle elde edilmektedir (Eşitlik 2.13 ve 2.14). Iwasaki vd. (1982)  $L_I$  değerlerine dayanarak sıvılaşmanın şiddetini çok düşük ( $L_I = 0$ ), düşük ( $0 < L_I \leq 5$ ), yüksek ( $5 < L_I \leq 15$ ) ve çok yüksek ( $L_I > 15$ ) olarak sınıflandırmışlardır.

$$L_I = \int_{z=0}^{z=20} W(z)F(z)dz \quad (2.13)$$

$$F_L < 1.0 \text{ için } F(z) = 1 - F_L \quad F_L \geq 1.0 \text{ için } F(z) = 0 \quad (2.13a)$$

$$z \leq 20m \text{ için } W(z) = 10 - 0.5z \quad z > 20m \text{ için } W(z) = 0 \quad (2.13b)$$

Sönmez (2003)  $L_I$  hesaplanmasında ve sınıflandırılmasında bazı sınırlamalar olduğunu ortaya koymuştur. Sönmez (2003) sınıflandırmaya "sıvılaşdırılmaz" ve "orta" kategorileri ekleyerek ve marjinal olarak sıvılaşabilir ve sıvılaşamaz sınırının  $F_L = 1.2$  eşik değerini dikkate alarak değişiklik yapmıştır. Bu sınır Iwasaki vd. (1982)'de  $F_L < 1$ 'dir. Söz konusu yazar sıvılaşma şiddetini "sıvılaşma yok" ( $L_I=0$ ), "düşük" ( $0 < L_I \leq 2$ ), "orta" ( $2 < L_I \leq 5$ ), "yüksek" ( $5 < L_I \leq 35$ ) ve "çok yüksek" ( $L_I > 35$ ) olarak sınıflandırmıştır. Sönmez (2003) tarafından yapılan çalışmada,  $F_L$  değerinin 0.95-1.2 aralığında olması durumunda söz konusu eşik değeri dikkate alınarak  $F(z)$  grafiği oluşturulmuştur (Eşitlik 2.14).

$$F_L \leq 0.95 \text{ için } F(z) = 1 - F_L \quad (2.14a)$$

$$0.95 < F_L \leq 1.2 \text{ için } F(z) = 2 \times 10^6 e^{-18.427F_L} \quad (2.14b)$$

$$F_L < 1.2 \text{ için } F(z) = 0 \quad (2.14c)$$

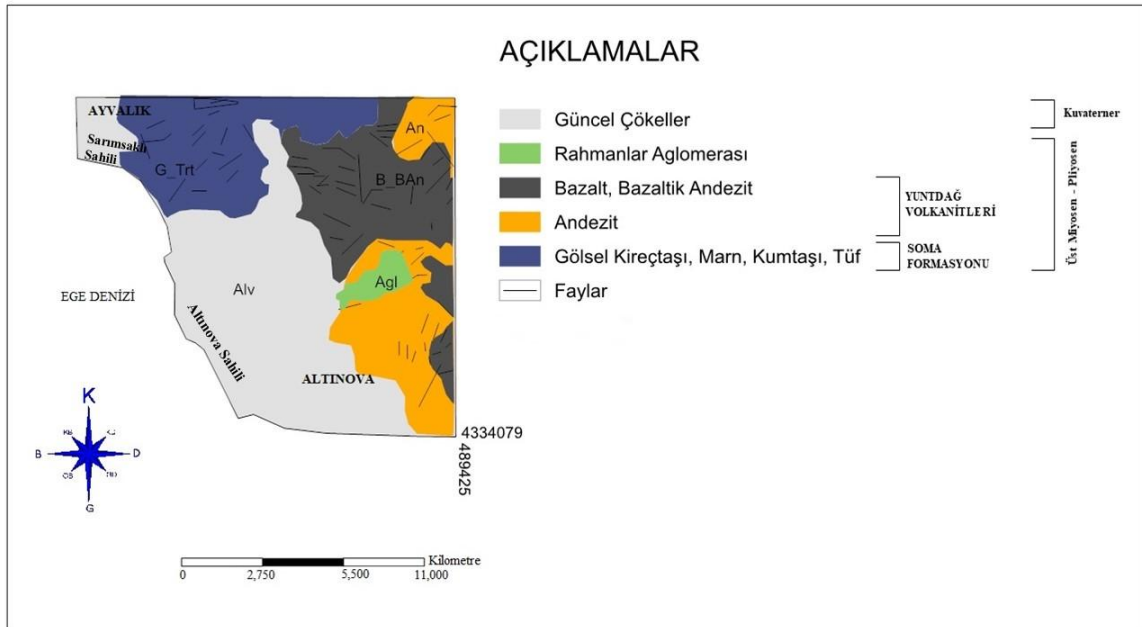
Bu çalışmada Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi'nin ( $L_I$ ) hesaplanmasında ve sınıflandırılmasında Sönmez (2003) yaklaşımı alınmıştır.

### 3. BULGULAR

#### 3.1 Genel Jeoloji

Çalışma sahasında yaşlıdan gence doğru sırasıyla Yuntdağ volkanitleri, Soma Formasyonu, Rahmanlar Aglomerası ve alüvyon birimleri tanımlanmıştır (Akgün, 2007). Bu jeolojik birimlerin alandaki yayılımları ile birbirleriyle olan stratigrafik ilişkileri 1/25.000 ölçekli jeoloji haritası üzerinde detaylı biçimde sunulmuştur (Şekil 3.1).

Yuntdağ volkanitleri; andezit, silisleşmiş tuf, tuf, aglomera, lahar ve daha az oranda bazalt bileşenlerinden oluşmaktadır (Akyürek ve Soysal, 1981). Saha genelinde bu volkanik kayalar, litolojik özelliklerine bağlı olarak andezit ve bazalt olmak üzere iki ayrı birim şeklinde haritalanmıştır (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1:** Çalışma alanının genel jeoloji haritası (Akyürek, 1989'dan değiştirilerek hazırlanmıştır.)

Andezitler, inceleme alanında genel olarak grimsi bordo, sarımsı gri ve gri tonlarında gözlemlenmektedir. Bozunmaya uğramış yüzeylerde ise sarımsı kahverengi renk hakim olurken, yüzeysel alterasyonların etkisiyle demir oksit oluşumuna bağlı olarak kırmızımsı kahverengi ile sarı kahverengi tonlar da ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, yer yer bazaltik andezit türlerinin de bulunduğu belirlenmiştir (Akgün, 2007).

Bazaltlar, arazide koyu renkli andezitlerle benzer görünüme sahip olmaları nedeniyle yer yer belirgin şekilde ayırt edilememektedir. Ancak, Alibey Adası ile Ayvalık ilçesinin

kuzeydoğusunda sütunsal yapıları ve koyu siyah renkleriyle kolaylıkla tanımlanabilmektedir. Madra Vadisi'nin kuzey kesiminde yüzeylenen bazaltlar ise akma düzlemleri boyunca gelişmiş, koyu gri renkte ve masif bir yapı sergilemektedir. Bu kayalarda, andezitlerde olduğu gibi fiziksel ayrışma süreçleri oldukça etkindir. Sahada iyi gelişmiş küresel bozunma formlarına sıkça rastlanmaktadır (Şekil 3.2).



**Şekil 3.2:** Bazalt kayacının sahadaki görüntüsü (Koordinat: 486230/4343560) (Akgün, 2007)

Tüf birimleri, ağırlıklı olarak Ayvalık çevresi ile Alibey Adası dolaylarında yüzeylenmektedir. Renkleri sarı, sarı-kahverengi ve beyaz tonlarında değişiklik göstermektedir. Bölgede gözlenen mineralizasyon süreçlerine bağlı olarak, hidrotermal sıvıların etkisiyle bu tüflerde belirgin düzeyde hidrotermal alterasyon izleri gözlemlenmektedir (Akgün, 2007) (Şekil 3.3).



**Şekil 3.3:** İleri derecede ayrılmış tüflerin sahadaki görüntüsü (Akgün,2007)

Soma Formasyonu; marn, silttaşı, killi kireçtaşı, tüfit ve kumtaşı litolojilerinin araldanmasından ya da bu birimlerden bir ya da birkaçının baskın olduğu seviyelerden meydana gelmektedir. Renkleri genel olarak beyaz, sarı, gri ve boz tonlarındadır. Tabakalanma kalınlığı değişken olup, kalın, orta ve ince bantlar halinde gelişmiştir. Bu birimler çoğunlukla yatay ya da yataya yakın konumda tabakalanmış olsa da, tektonik sıkışmanın etkisiyle bazı kesimlerde yatık ya da devrik kıvrım yapılarına rastlanmaktadır. Killi ve karbonatlı seviyelerde zaman zaman laminalı yapılar da gözlemlenmektedir. Formasyon bünyesinde yer yer kömür damarları ile bitümlü şeyl seviyeleri de bulunmaktadır. Soma Formasyonu, jeoteknik açıdan değerlendirildiğinde, orta ila düşük dayanımlı birimlerden oluşmaktadır (Akgün, 2007).

Soma Formasyonu, Ballica Formasyonu ile geçişli bir dokuda gelişirken, Rahmanlar Aglomerası ile karma (girik) bir ilişki göstermektedir. Formasyon, yer yer Dededağ Bazaltı tarafından kesilmekte ve üzerini örtecek şekilde örtülmektedir. Yapılan stratigrafik ve paleontolojik değerlendirmelere göre bu birimin yaşı Üst Miyosen ile Pliyosen aralığına tarihlendirilmiştir (Akyürek, 1989).

Çalışma alanında Altınova'nın güneydoğusunda belirlenmiştir. Rahmanlar aglomerası, tüf ile çimentolanmış yuvarlak ve yarı köşeli andezit çakıllarından oluşur. Rahmanlar Aglomerası içerisinde, yer yer ince tüfit ve silttaşı düzeyleri gözlemlenmektedir (Şekil 3.4). Bu birim, çalışma alanında hem Yuntadağ volkanitleri hem de Soma Formasyonu ile karma

(girik) kantağa sahip olması nedeniyle, stratigrafik olarak Üst Miyosen–Pliyosen yaş aralığında değerlendirilmiştir (Akyürek, 1989).



**şekil 3.4:** Rahmanlar aglomerasının arazide görünümü (Akgün, 2004)

Alüvyonlar inceleme alanında Altınova ve Ayvalık'ın güneyinde görülür. Genellikle silt, kil ve kum bileşenlerinden oluşan alüvyon içerisinde dasit, andezit, granodiyorit ve riyolit çakıllarına da rastlanmaktadır. Alüvyonun ortalama kalınlığı, Altınova'da 100 metre; Ayvalık'ta 15-30 metre arasında değişmektedir. Bu alanlar tarım konusunda verimli topraklara sahiptir ve yer altı suyu bakımından akifer özelliği taşımaktadır (D.S.İ, 1990).

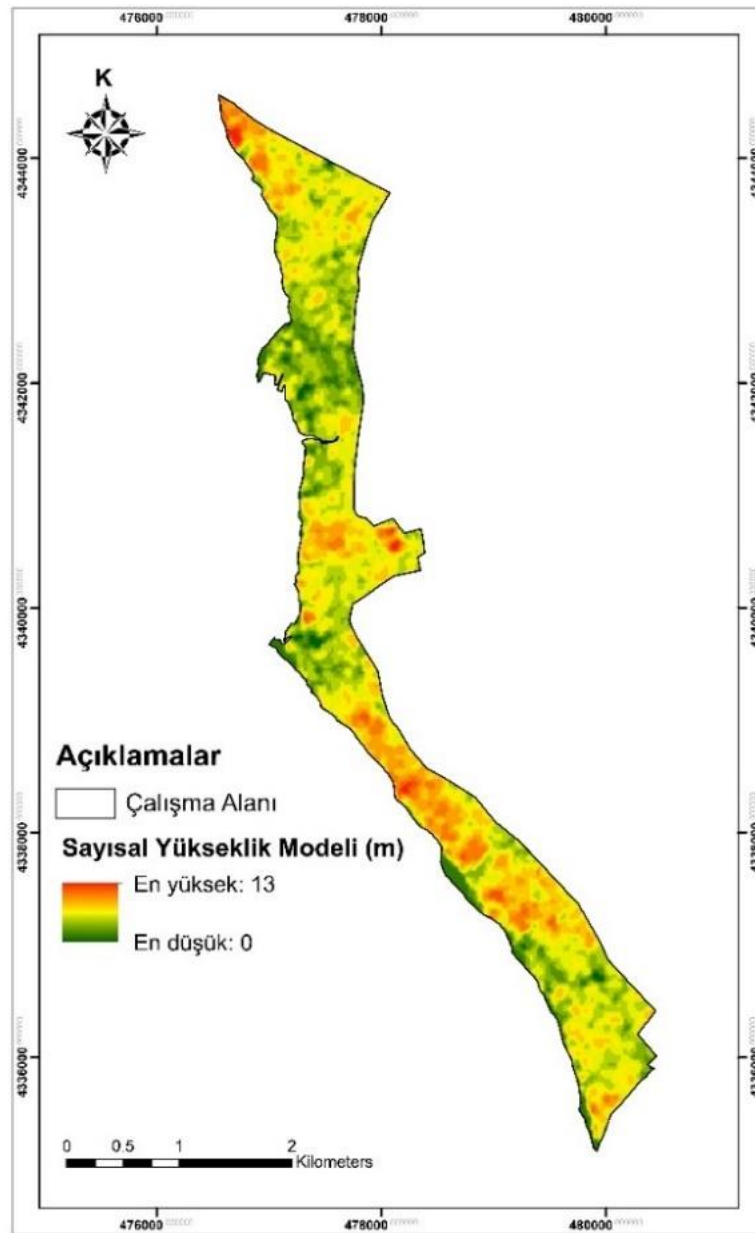
### **3.2 Sıvılaşma Analizi İçin Senaryo Deprem**

Zemin seviyelerinin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının belirlenebilmesi için en büyük yer ivmesine ihtiyaç vardır (Eşitlik 2.6c). İnceleme alanına maksimum 100 km uzaklıktaki fayların/fay zonlarının (şekil 2.3) üreteceği en büyük deprem büyüklüğü ve bu depremlerin inceleme alanında oluşturacağı maksimum yer ivmesi Eşitlik 2.1 ve 2.2 ile hesaplanmıştır (Tablo 2.1). Tablo 2.1 incelendiğinde olası senaryolar arasında en tehlikeli senaryonun Havran-Balya fayına bağlı olarak gerçekleşeceği görölmektedir. Yapılan hesaplamalara göre Havran-Balya fayının  $M_w=7.32$  büyüklüğünde deprem üreteceği ve bu depremin inceleme

alanında 0.1758 g büyüklüğünde maksimum yer ivmesi oluşturacağı görülmüştür (Tablo 2.1). Bu nedenle zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı hesaplanırken en büyük yer ivmesi  $a_{max}=0.1758$  g olarak alınmıştır.

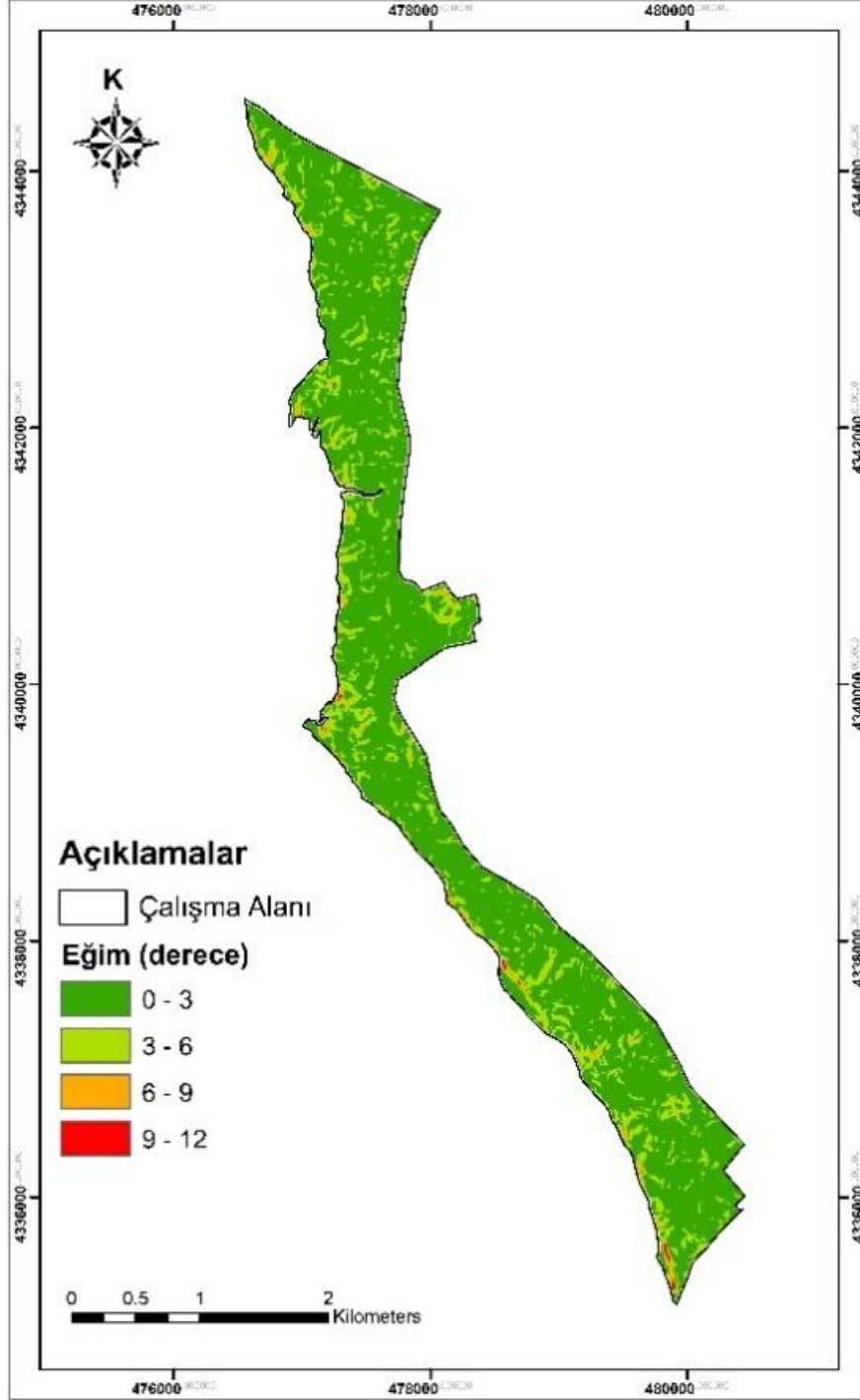
### 3.3 Topoğrafya ve Eğim

İnceleme alanının sayısal yükseklik modeli (DEM) Şekil 3.5a'da, DEM'den üretilen eş yükselti eğrilerinin bulunduğu harita (topografik harita) Şekil 3.5b'de verilmiştir. Çalışma alanında en düşük seviye 0 m, en yüksek seviye 13 m'dir. İnceleme alanında deniz kıyısı 0 m kota sahip olup, topoğrafya düzensiz olarak değişmektedir.



Şekil 3.5: Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) sayısal yükseklik modeli

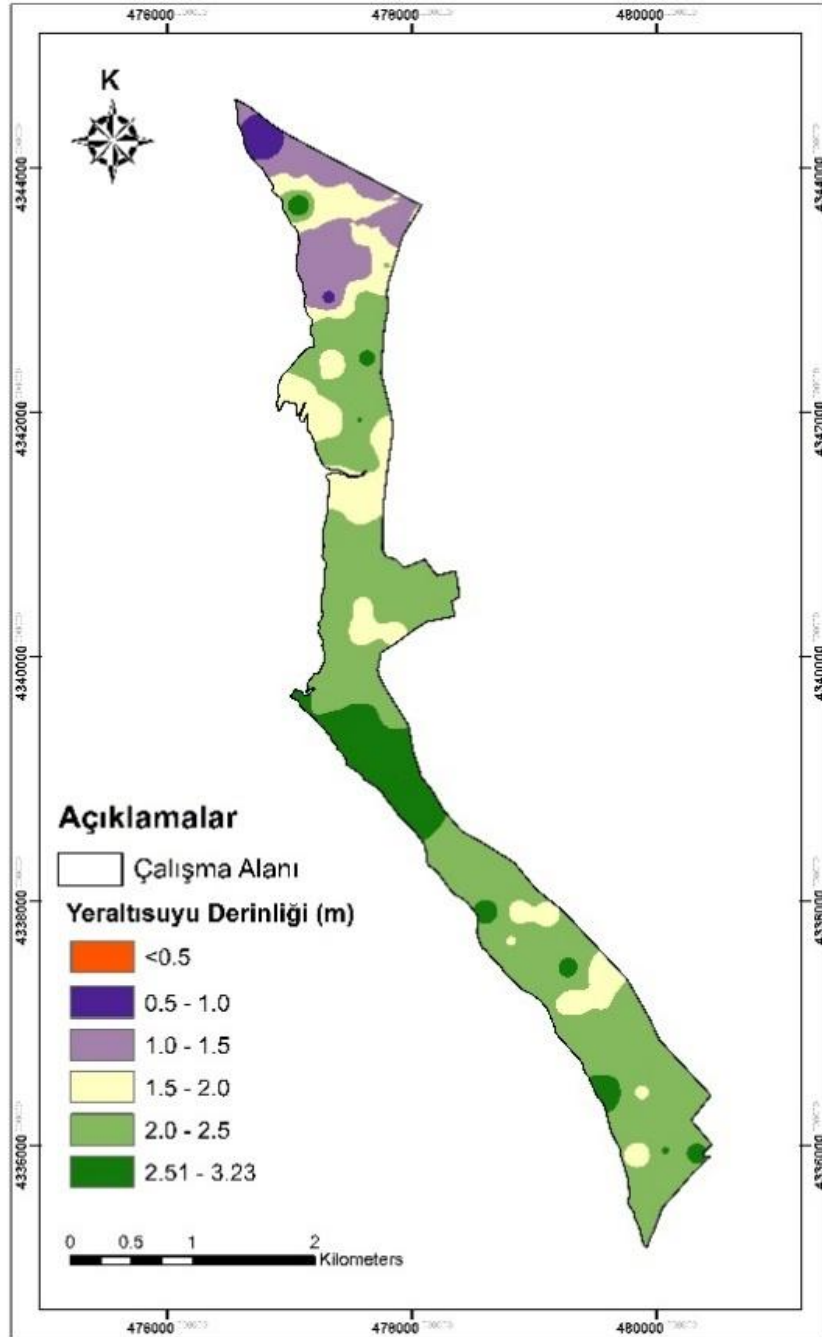
Eğim haritası DEM'den üretilmiştir (Şekil 3.6). İnceleme alanının eğimi 0 ile 12 derece arasında değişmektedir (Şekil 3.6). İnceleme alanının % 82.1'i 3 dereceden küçük, % 16.6'sı 3 ile 6 derece arasında, % 1.2'si 6 ile 9 derece arasında ve % 0.1'i 9 ile 12 derece arasında eğime sahiptir.



Şekil 3.6: Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) eğim haritası

### 3.4 Yer altı Suyu Derinliği

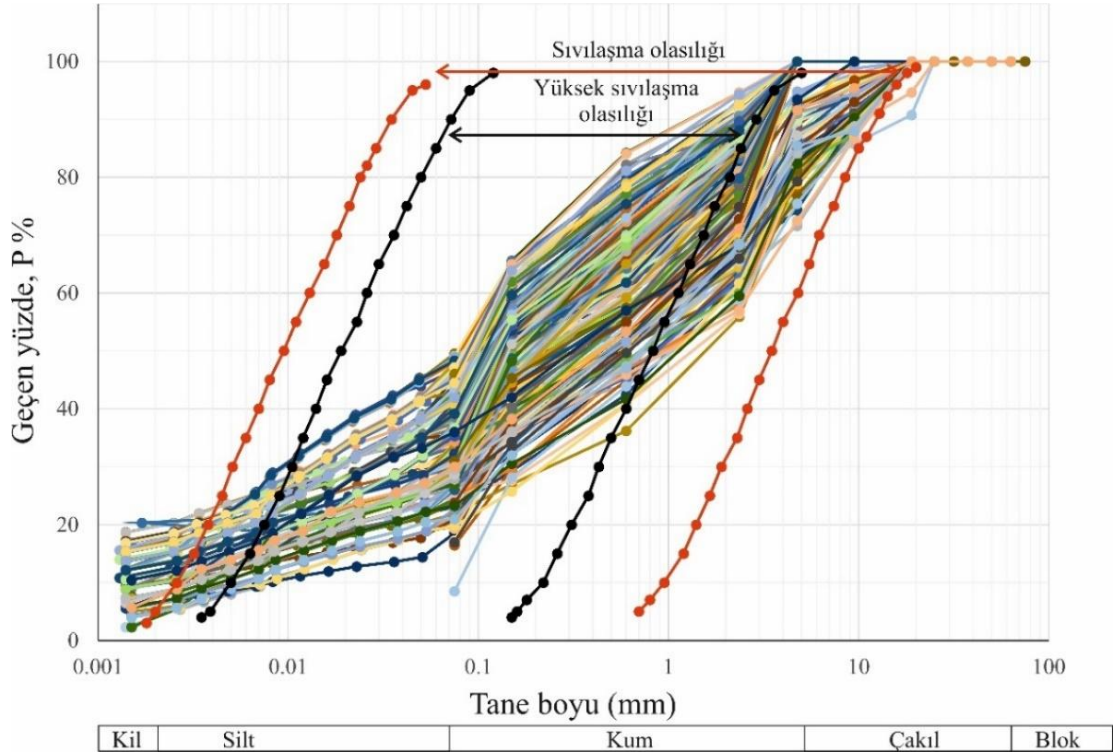
İnceleme alanında yer altı suyu derinliği 0.5m ile 3.23 m arasında değişmektedir (Şekil 3.3). Yer altı suyu derinliği inceleme alanının % 1.6'sında 0.5 ile 1.0 m arasında, % 10.6'sında 1.0 ile 1.5 m arasında, % 19.0'da 1.5 ile 2.0 m arasında, % 52.7'sinde 2.0 ile 2.5 m arasında ve % 11.1'in de 2.5 ile 3.23 m arasında değişmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) yer altı suyu derinliği haritası

### 3.5 Zemin Türü ve Zemin Sıklığı

İnceleme alanındaki yayılım gösteren alüvyon zeminin elek analizi sonuçlarına göre söz konusu alüvyon iki tür zeminden oluşmaktadır; Killi siltli kum ve az çakıl (çakıl %5 -10, kum %51-56, silt %19-21 ve kil %18-20) ve çakıllı kum ve az silt (çakıl %15-24, kum %56-61, silt %13-14 ve kil %6-11). Tane boyu dağılımı dikkate alındığında söz konusu iki tür zemin de sıvılaşması olası zeminler grubuna girmektedir (Şekil 3.9)



Şekil 3.8: Tane dağılımına bağlı olarak çizilen sıvılaşma potansiyeli seviyeleri (Tsuchida (1970)) ve çalışma alanındaki alüvyon zemine ait tane dağılım eğrileri

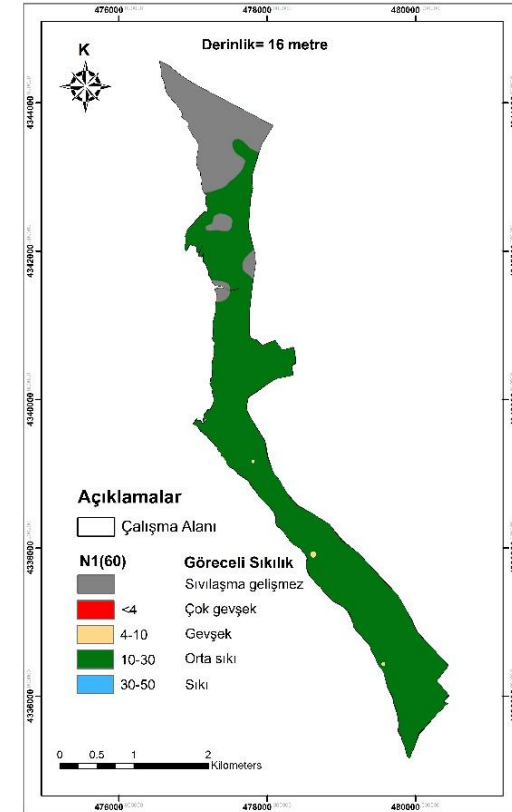
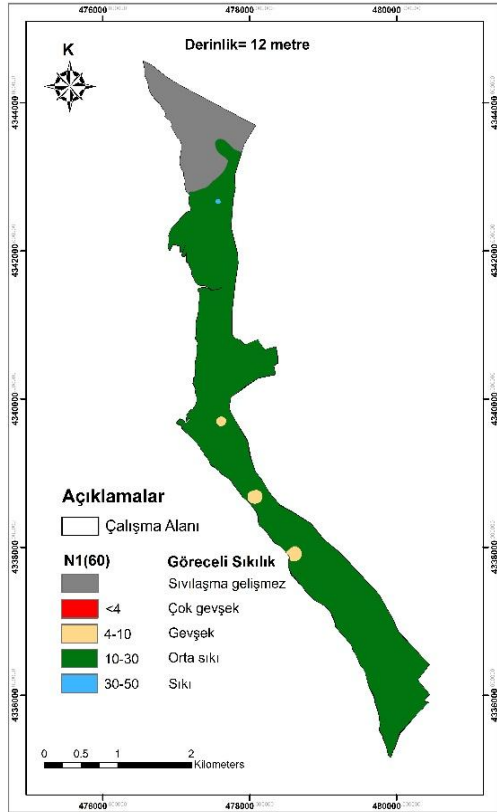
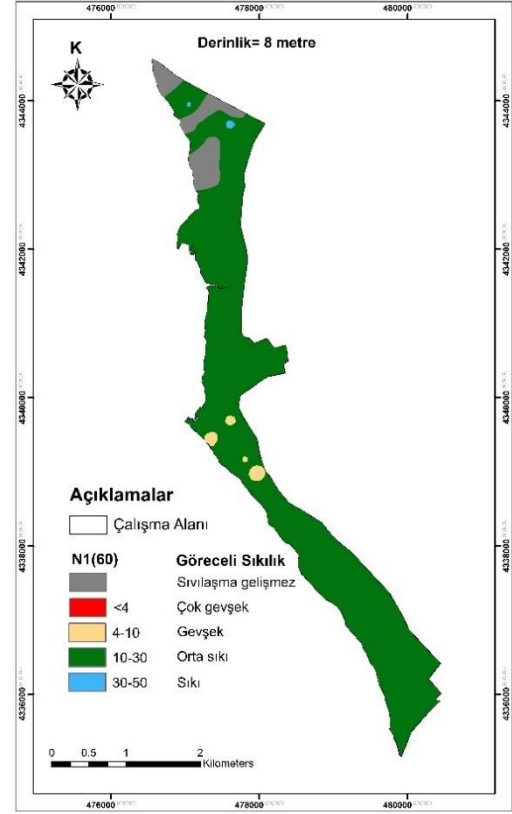
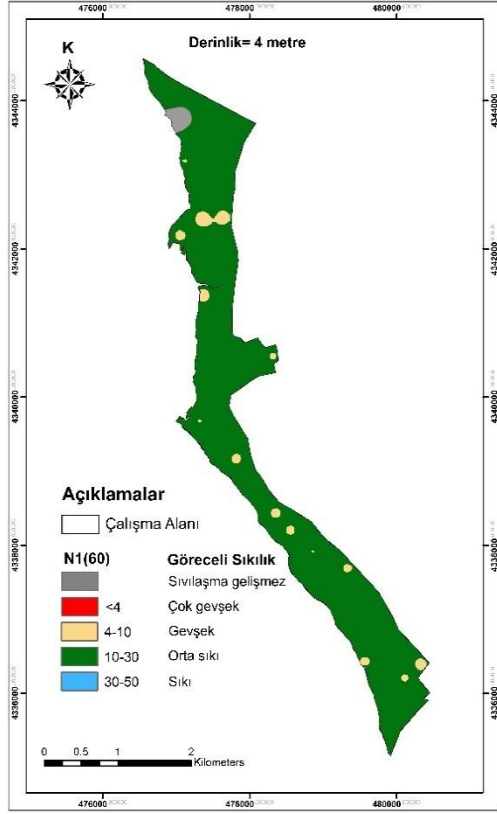
Sıvılaşmanın gelişiminde zeminin göreceli sıklığı da önemlidir. Sıvılaşma gevşek zeminlerde gelişmektedir. Zeminin göreceli sıklığı arttıkça sıvılaşmanın gelişme olasılığı da düşme eğilimine girmektedir. Bu nedenlerle farklı derinliklerdeki (4, 8, 12 ve 16 m ) zemin tabakalarının düzeltilmiş SPT- N değerinin  $((N_1)_{60})$  değerinin mekânsal değişimi incelenmiştir (Şekil 3.9). Bu inceleme amacıyla oluşturulan haritalarda zeminlerin  $(N_1)_{60}$  değerine göre göreceli sıklığının (Dr) sınıflandırılması için Duncan ve Buchignani (1976) sınıflaması esas alınmıştır (Tablo 3.1)

**Tablo 3.1:** Düzeltilmiş SPT-N değerine  $((N_1)_{60})$  göre göreceli sıklığın (Dr) sınıflandırılması (Duncan ve Buchignani 1976)

$(N_1)_{60}$	Sıklık Durumu	Dr (%)
0-4	Çok gevşek	0-15
4-10	Gevşek	15-35
10-30	Orta sıkı	35-65
30-50	Sıkı	65-85
>50	Çok sıkı	85-100

Düzeltilmiş SPT-N değerinin  $((N_1)_{60})$  ve sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının farklı derinliklerde mekânsal dağılımını gösteren haritalarda kaya birimlerinin yayılım gösterdiği alanlar “Sıvılaşma gelişmez” olarak tanımlanmıştır. Bu haritalarda 4 m derinlikte inceleme alanının %1.3’ünde, 8 m derinlikte % 7.7’sinde, 12 m derinlikte % 16.9’unda ve 16 m derinlikte % 19.2’sinde sıvılaşmanın gelişmeyeceği görülmektedir (Şekil 3.9 ve 3.10).

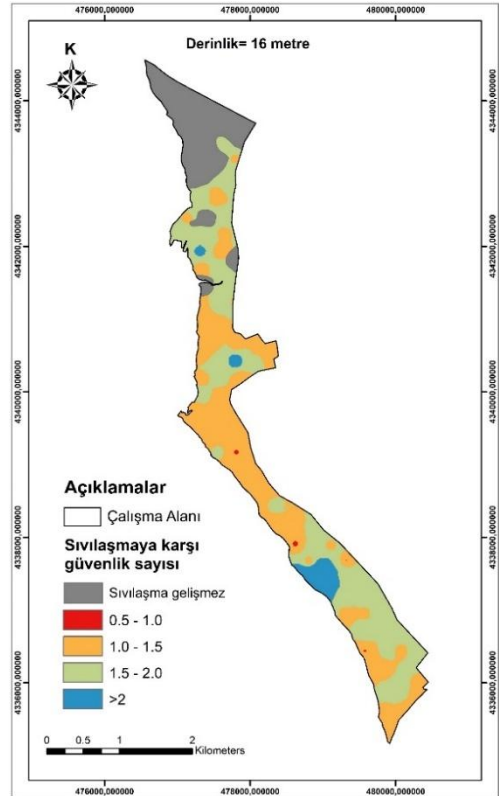
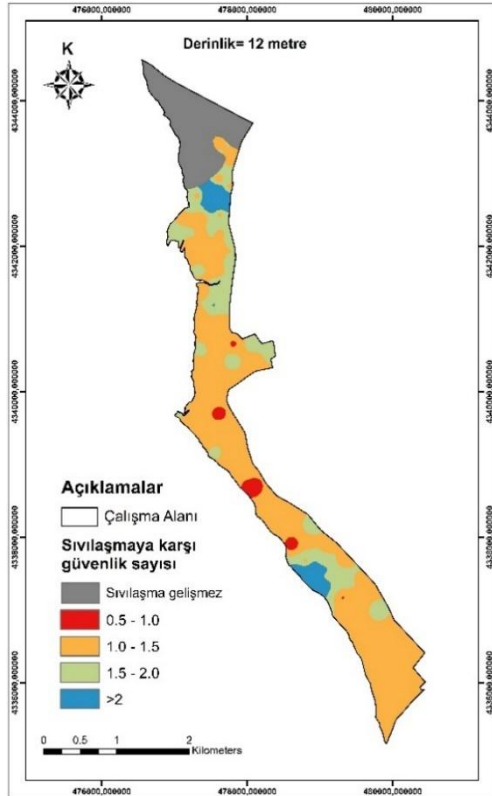
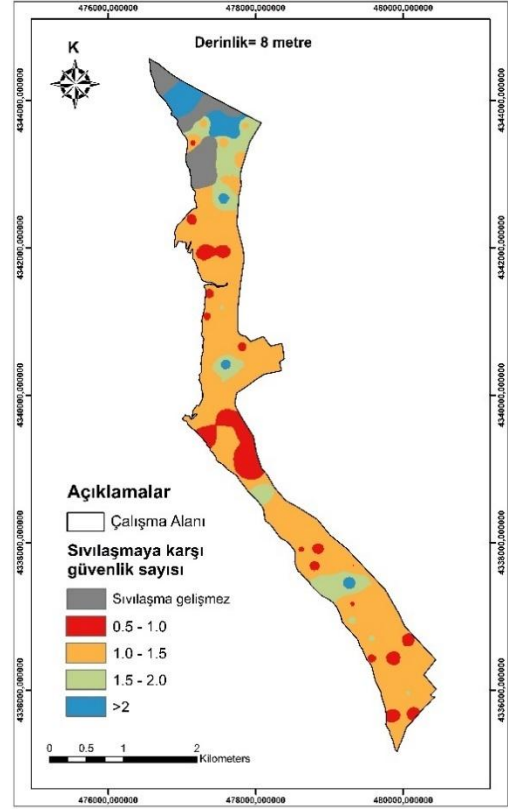
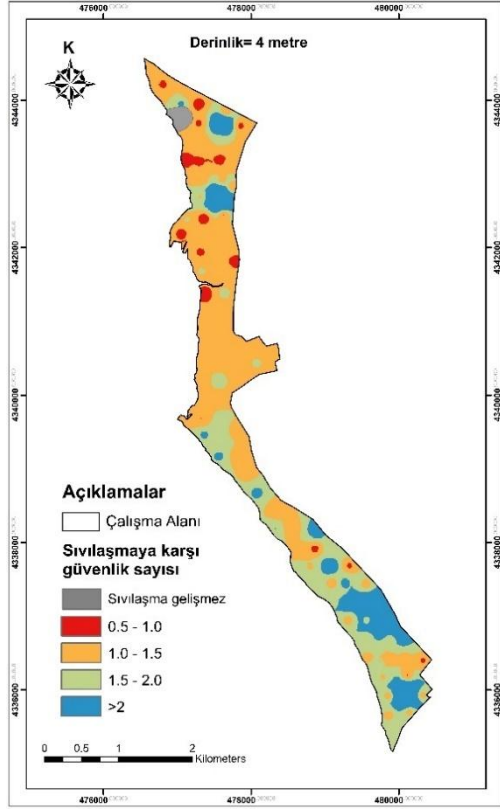
Farklı derinlikte zeminin göreceli sıklığının mekânsal dağılımının gösterildiği haritalarda “Çok gevşek” ve “Çok sıkı” tür zeminlerin yer almadığı görülmektedir. 4 m derinlikte inceleme alanının %3.4’ünde “gevşek”, %95.3’ünde “orta sıkı” ve % 0.0’ında “sıkı” zeminler, 8 m derinlikte inceleme alanının %1.3’ünde “gevşek”, %90.8’inde “orta sıkı” ve % 0.2’sinde “sıkı” zeminler, 12 m derinlikte inceleme alanının %1.2’sinde “gevşek”, %81.8’inde “orta sıkı” ve % 0.1’inde “sıkı” zeminler ve 16 m derinlikte inceleme alanının %0.1’inde “gevşek”, %98.7’sinde “orta sıkı” ve % 0.0’ında “sıkı” zeminler dağılım göstermektedir (Şekil 3.9).



**Şekil 3.9:** Düzeltilmiş SPT-N değerinin ( $(N_1)_{60}$ ) farklı derinliklerde mekânsal dağılımı

### **3.6 Zemin Tabakalarının Sıvılaşmaya Karşı Güvenlik Sayısının Farklı Derinliklerde Mekânsal Dağılımı**

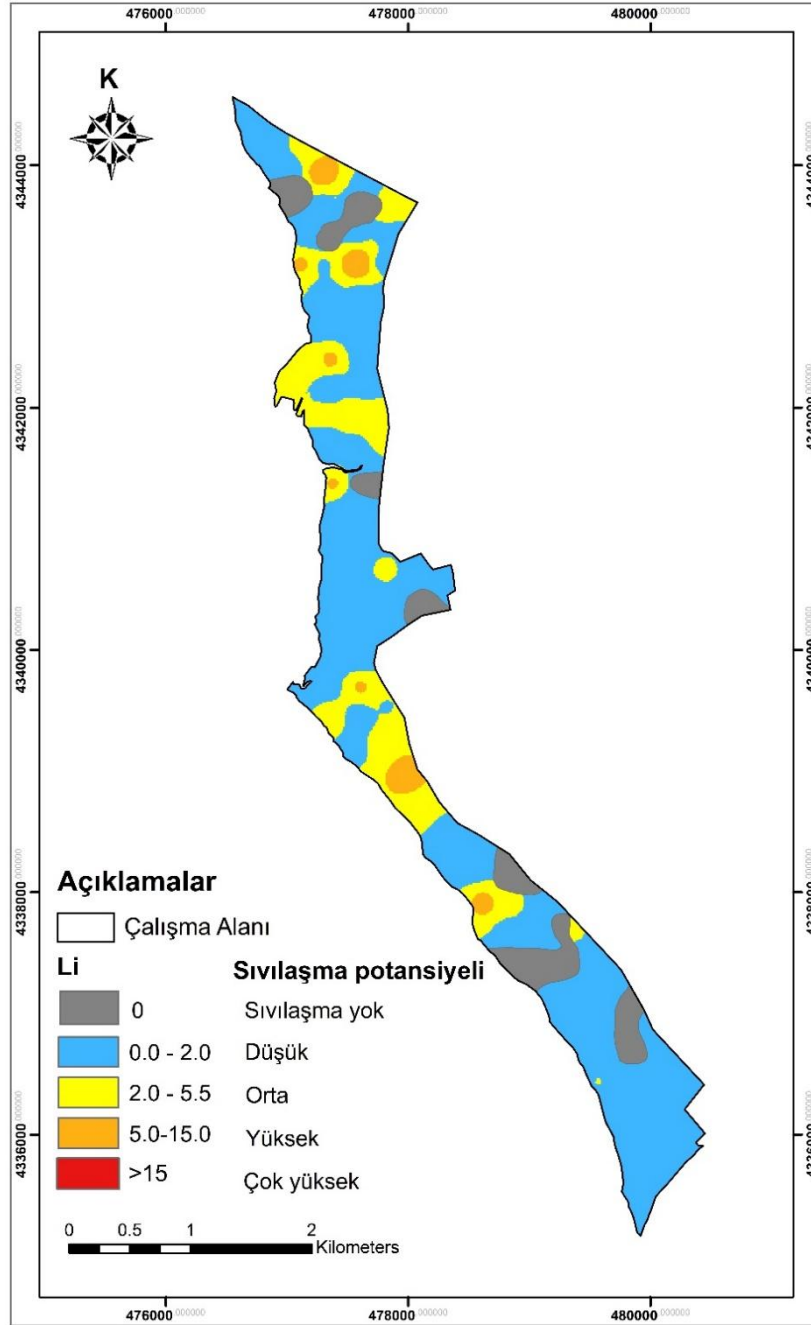
Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının farklı derinliklerdeki mekânsal dağılımını gösteren haritalar incelediğinde; 4 m derinlikte inceleme alanının % 3.7'sinde  $F_L$ 'nin 0.5-1.0 arasında, % 54.1'inde  $F_L$ 'nin 1.0-1.5 arasında, % 26.5'inde  $F_L$ 'nin 1.5-2.0 arasında değiştiği, % 14.4'ünde  $F_L$ 'nin 2.0'dan büyük olduğu; 8 m derinlikte inceleme alanının % 9.6'sında  $F_L$ 'nin 0.5-1.0 arasında, % 65'inde  $F_L$ 'nin 1.0-1.5 arasında, % 11.9'unda  $F_L$ 'nin 1.5-2.0 arasında değiştiği, % 5.8'inde  $F_L$ 'nin 2.0'dan büyük olduğu görülmüştür. 12 m derinlikte inceleme alanının % 1.9'unda  $F_L$  0.5-1.0 arasında, % 62.2'sinde  $F_L$  1.0-1.5 arasında, % 14.3'ünde  $F_L$  1.5-2.0 arasında değişmekte ve % 4.8'inde ise  $F_L > 2.0$ 'dır. 16 m derinlikte inceleme alanının % 0.1'inde  $F_L$  0.5-1.0 arasında, % 41.7'sinde  $F_L$  1.0-1.5 arasında, % 35'inde  $F_L$  1.5-2.0 arasında değişmekte ve % 4'ünde ise  $F_L > 2.0$ 'dır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: Sivilaşmaya karşı güvenlik sayısının ( $F_L$ ) farklı derinliklerde mekânsal dağılımı

### 3.7 Altınova Sahilinin Sıvılaşma Potansiyeli Haritası

Altınova sahilinde (Ayvalık, Balıkesir) sondaj yapılmış yerdeki zemin profilleri için hesaplanmış Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi'nin mekânsal dağılımı aşağıda verilmiştir. Bu harita incelendiğinde, inceleme alanının %11.8'inde sıvılaşma olmayacağı görülmektedir. İnceleme alanında inceleme alanının %64.1'i “düşük”, %20.5'i “orta”, %3.6'sı “yüksek” sıvılaşma potansiyeline sahiptir. İnceleme alanında “çok yüksek” sıvılaşma potansiyeli olan alan bulunmamaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) sıvılaşma potansiyeli haritası

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada çalışma sahası olan Ayvalık ilçesi (Balıkesir) Altınova Mahallesi'nin sahil kısmının sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Çalışma sahası 6.32 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kapsamaktadır.

Çalışma sahası aletsel dönemde önemli mal ve can kayıplarına neden olan Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun ait güney kolunda yer alan Havran-Balıkesir fay zonuna ve Edremit fay zonuna yakın konumdadır. Altınova sahilinin Edremit fay zonuna uzaklığı 42.2 km, Havran-Balıkesir Fay zonuna uzaklığı 43.1 km'dir. Ayrıca Zeytindağ fay zonunun inceleme alanına uzaklığı 33.6 km, Bergama fayının uzaklığı da 36 km'dir.

Bu çalışmada, çalışma bölgesine maksimum 100 km uzaklıktaki faylar esas alınarak oluşturulan senaryo depremlere göre, zemin sıvılaşması açısından en tehlikeli depremi Havran-Balıkesir fay zonuna bağlı Havran-Balya fayının üreteceği, söz konusu bu depremin Mw=7.32 büyüklüğünde olacağı ve inceleme bölgesinde 0.1758 g büyüklüğünde maksimum yer ivmesi oluşturacağı belirlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı hesaplanırken en büyük yer ivmesi  $a_{max}=0.1758$  g olarak alınmıştır.

İnceleme alanı olan Altınova sahilinde (Ayvalık, Balıkesir) alüvyon zemin yayılım göstermektedir. Elek analizi sonuçlarına göre söz konusu alüvyon killi siltli kum ve az çakıl ve çakıllı kum ve az silt türü zeminlerden oluşmaktadır. Her iki zemin türü de sıvılaşması olası zeminlerdir.

İnceleme alanında yer altı suyu derinliği sıvılaşmanın gelişebileceği derecede düşüktür. Yer altı suyu derinliği çalışma alanının %1.6'sında 0.5 ile 1.0 m arasında, % 10.6'sında 1.0 ile 1.5 m arasında, % 19.0'da 1.5 ile 2.0 m arasında, % 52.7'sinde 2.0 ile 2.5 m arasında ve % 11.1'in de 2.5 ile 3.23 m arasında değişmektedir.

Bu çalışmada inceleme alanında yer alan 96 sondajın bulunduğu noktadaki zemin profillerinin sıvılaşma potansiyeli indeksi ( $L_1$ ) hesaplanmış ve  $L_1$ 'nin mekânsal dağılımı bulunmuştur. Bu sıvılaşma potansiyeli indeksi haritasına göre inceleme alanının %11.8'inde sıvılaşma olmayacağı görülmektedir. İnceleme alanının %64.1'i "düşük", %20.5'i "orta",

%3.6'sı "yüksek" sıvılaşma potansiyeline sahiptir. İnceleme alanında "çok yüksek" sıvılaşma potansiyeli olan alan bulunmamaktadır.

İnceleme alanı olan Altınova Mahallesi sahilinde (Ayvalık, Balıkesir) toplam 4723 tane bina bulunmaktadır. Bina bilgisi Open Street Map sitesinden alınmıştır. 4723 binadan 584'ü sıvılaşma olmayacak alanda, 3034'ü düşük sıvılaşma potansiyelli alanda, 909'u orta sıvılaşma potansiyelli alanda ve 196'sı yüksek sıvılaşma potansiyelli alanda bulunmaktadır. Bu çalışmada üretilen sıvılaşma potansiyeli haritası inceleme alanının mekânsal planlamasında bir altlık olarak kullanılabilir. İnceleme alanında orta ve yüksek sıvılaşma potansiyeline sahip alanlarda bina yapılmamalı mevcut binalar boşaltılmalı veya zemin iyileştirilmesi yapılmalıdır. Düşük sıvılaşma potansiyeline sahip alanlarda zemin iyileştirilmesi yapıldıktan sonra bina yapımına izin verilmelidir.

## 5. KAYNAKLAR

- Akgün, A.** (2007). Ayvalık (Balıkesir) ve yakın çevresinin erozyon ve heyelan duyarlılığının coğrafi bilgi sistemleri tabanlı incelenmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Akyürek, B. ve Soysal, Y.** (1978). Kırkağaç-Soma (Manisa) Savaştepe-Korucu- Ayvalık (Balıkesir)-Bergama (İzmir) civarının jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Enst. Rap., 6432 (yayımlanmamış).
- Akyürek, B. ve Soysal, Y.** (1981). Biga yarımadası güneyinin (Savaştepe-Kırkağaç-Bergama- Ayvalık) temel jeolojik özellikleri. *M.T.A. Dergisi*, 95-96, 1-13.
- Akyürek, B.** (1989). 1:100.000 Ölçekli Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi: Ayvalık G 3 Paftası. M.T.A. Genel Müd. Yayınları, Ankara.
- Ambraseys, N.** (1988). Engineering seismology. *Earthquake Engrg. and Struct. Dynamics*, 17, 1–105.
- Analiz Mühendislik İnşaat Sondajcılık Madencilik Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, (2017). Balıkesir İli Ayvalık İlçesi 3125.83 Hektarlık Alanın İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporu, İstanbul.
- Andrus, R.D. and Stokoe, K.H.** (1997). Liquefaction resistance based on shear wave velocity. *NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Technical Report NCEER*. 97, 0022.
- Andrus, R.D., Stokoe, K.H., and Chung, R.M.** (1999). Draft guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and simplified procedure, NISTIR 6277. Natl Inst Stand Technol, Gaithersburg.
- Andrus, R.D. and Stokoe, K.H.** (2000). Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE*. 126(11), 1015–1025.
- Andrus, R.D., Piratheepan, P., Ellis, E., Zhang, J., and Juang, CH.** (2004). Comparing liquefaction evaluation methods using penetration-Vs relationships. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 24(9–10), 713–721.
- Arango, I.** (1996). Magnitude scaling factors for soil liquefaction evaluations. *J Geotech Eng*, 122(11), 929-936.
- Beroya, M.A.A., Aydin, A., Tiglaio, R., and Lasala, M.** (2009). Use of microtremor in liquefaction hazard mapping. *Engineering Geology*, 107 140–15.

- Boulanger, R.W. and Idriss, I.M.** (2012). Probabilistic standard penetration test–based liquefaction–triggering procedure. *J Geotech Geoenviron*, 138(10), 1185–95.
- Boulanger, R.W. and Idriss, I.M.** (2015). Magnitude scaling factors in liquefaction triggering procedures. *Soil Dyn Earthq Eng*, 79(B), 296-303.
- Castro, G.** (1969). Liquefaction of Sands. Ph.D. Thesis. Harvard University, Pierce Hall, Cambridge.
- Castro, G., Poulos, S.J., France, J.W., and Enos, J.L.** (1982). Liquefaction induced by cyclic loading. Report Submitted to the National Science Found. Washington D.C.
- Ceryan, S. ve Ceryan, N.** (2021). A new index for microzonation of earthquake prone settlement area by considering liquefaction potential and fault avoidance zone: an example case from. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, Edremit (Balıkesir, Turkey), 1-21.
- Ceryan, S., Pijush, S., Samed, O.S., Berber, S., Tudes, G.S., Elci, H., and Ceryan, N.** (2023). Soil Liquefaction susceptibility of Akcay Residential Area (Biga Peninsula, Turkey) Close to North Anatolian Fault Zone. *Journal of Mining and Environment*, 14(4), 1141-1153.
- Cetin, K.O., Der Kiureghian, A., and Seed, R.B.** (2002). Probabilistic Models for the Initiation of Seismic Soil Liquefaction. *Structural Safety*, 24, 67-82.
- Cetin, K.O., Seed, R.B., Der Kiureghian, K., Tokimatsu, L.F., Harder, Jr., R.E., Kayen, R.E., and Moss, S.** (2004). Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *J Geotech Geoenviron Eng*, 130(12), 1314–1340.
- Cetin, K.O., Seed, R.B., Kayen, R.E., Moss, R.E.S., Bilge, H.T., Ilgaz, M., and Chowdhury, K.** (2018a). SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction triggering hazard. *Soil Dyn Earthq Eng*.
- Cetin, K.O., Seed, R.B., Kayen, E.K., Moss, R.E.S., Bilge, H.T., Ilgaz, M., and Chowdhury, K.** (2018b). Examination of differences between three SPT-based seismic soil liquefaction triggering relationships. *Soil Dyn Earthq Eng*, 113, 75–86.
- Chen, C.J. and Juang, C.H.** (2000). Calibration of SPT- and CPT-based liquefaction evaluation methods. In: Mayne PW, Hryciw R (eds) *Innovations and applications in geotechnical site characterization*, Vol. 97. Geotechnical Special Publication, ASCE, Reston, 49–64.

- Derinöz, N.** (2004). Hakkari barajı ve HES projesi zemin sıvılaşma riskinin belirlenmesi. Türkiye mühendislik haberleri, 431, Ankara, 33-38.
- Dobry, R., Stokoe, K.H., Ladd, R.S., et al.** (1981). Liquefaction susceptibility from S-wave velocity, In: Proceedings of the ASCE national convention. In situ tests to evaluate liquefaction susceptibility, ASCE, New York.
- D.S.İ.** (1990). Ayvalık ve Altınova (Balıkesir) Ovalarının Hidrolojisi Raporu. 1-22 (yayımlanmamış).
- Duncan, J.M. and Buchignani, A.L.,** (1976). An Engineering Manual for Settlement Studies. Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Erken, A., Özey, R., Kaya, Z., Ülker, M.B., and Elibol, B.** (2004). Depremler sırasında zeminlerin sıvılaşması ve taşıma gücü kayıpları. Türkiye mühendislik haberleri, 431, 20-26.
- Esin, G. ve Ceryan, S.** (2015). Burhaniye Balıkesir yerleşim alanının sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi. Yerbilimleri, 36(2), 81-96.
- Ghafghazi, M., DeJon, J.T., Sturm, A.P., and Temple, C.E.** (2017). Temple instrumented becker penetration Test. II: iBPT-SPT correlation for characterization and liquefaction assessment of gravelly soils. J Geotech Geoenviron Eng, 1-35.
- Golesorkhi, R.** (1989). Factors influencing the computational determination of earthquake-induced shear stresses in sandy soils [Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of doctor of philosophy]. University of California at Berkeley.
- Hynes, M.E. and Olsen, R.S.** (1999). Influence of confining stress on liquefaction resistance. Proc., Int. Workshop on Phys. And Mech. Of Soil Liquefaction, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 145-152.
- Idriss, I.M.** (1998). Evaluation of liquefaction potential. Consequences and Mitigation--An Update," Presentation notes for Geotechnical Society Meeting, Vancouver, Canada.
- Idriss, I.M.** (1999). An update of the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential. Presentation notes for Transportation Research Board Workshop on New Approaches to Liquefaction Analysis, Washington, D.C.
- Idriss, I.M. and Boulanger, R.W.** (2004). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes In: Doolin D, editor. Proceedings of 11th international conference on soil dynamics and earthquake engineering

- and 3rd International conference on earthquake geotechnical engineering, 1. Stallion Press 1, 32–56.
- Idriss, I.M. and Boulanger, R.W.** (2008). Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Idriss, I.M. and Boulanger, R.W.** (2010). SPT-Based liquefaction triggering procedures. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, 259.
- Imai, T., Tonouchi, K., and Kanemori, T.** (1981). The simple evaluation method of shear stress generated by earthquakes in soil ground. *Bur Pract Geol Investig*, 3, 39–58.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., and Sato, H.** (1982). Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. 3rd International Earthquake Microzonation Conf, 1319–1330.
- Juang, C.H., Yuan, H., Lee, D.H., and Lin, P.S.** (2003). A simplified CPT-based method for evaluating liquefaction potential of soils. *J Geotech Geoenviron Eng*, 129 (1), 66– 80.
- Kishida, T., Boulanger, R.W., Abrahamson, N.A., Driller, M.W., and Wehling, T.M.** (2009). Seismic response of levees in Sacramento-San Joaquin Delta. *Earthquake Spectra*, 25(3), 557-582.
- Lee, D.H., Ku, C.S., and Yuan, H.** (2003). A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin. *Taiwan Eng Geol*. 71:97, 117.
- Liao, S. and Whitman, R.V.** (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. *J Geotech Eng*, 112(3), 373–7.
- Marcuson, W.F., III.** (1978). Definition of terms related to liquefaction. *J. Geotech. Engrg. ASCE*, 104 (9), 1197-1200.
- Mollamahmutoğlu, M. ve Babuçcu, F.** (2006). Zeminlerde sıvılaşma analiz ve iyileştirme yöntemleri. *Gazi Kitapevi*, Ankara, 29-98.
- Montgomery, J., Boulanger, R.W., and Harder, L.F.** (2012). Examination of the  $K_{\sigma}$  overburden correction factor on liquefaction resistance. Report No. UCD/CGM-12-02, Center for Geotechnical Modeling Department of Civil and Environmental Engineering University of California, Davis, California,42.
- M.T.A.,** (2018). Maden Tektik ve Arama Genel Müdürlüğü diri fay haritası. Erişim adresi: <https://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>.
- Olsen, R.S.** (1997). Cyclic liquefaction based on the cone pen-etrometer test. In: Youd TL, Idriss I M (eds) National center for earthquake engineering research, Proceedings

of the NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils, Tech. Rep. NCEER-97-0022, Buffalo, 225–276.

- Özaydın, K.** (2007). Zeminlerde sıvılaşma. Altıncı ulusal deprem mühendisliği konferansı, İstanbul.
- Özpinar, O.** (2019). Aydın ili, efeler ilçesi, oyaemir mahallesinin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Robertson, P.K. and Campanella, R.G.** (1985). Liquefaction potential of sands using the CPT. *J Geotech Eng* 111, 384–403.
- Robertson, P.K. and Wride, C.E.** (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Can Geotech J*, 35(3),442–459.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M.** (1967). Analysis of liquefaction: Niigata earthquake. *Proc., ASCE*, 93(SM3),83-108.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M.** (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE* 97 (SM9, Proc. Paper 8371), 1249-1273.
- Seed, H., Bolton, K.M., and Clarence, K.C.** (1975). Influence of seismic history on the liquefaction characteristics of sands. *Earthquake Engineering Research, Center, University of California, Berkeley*, 75-25.
- Seed, H.B.** (1979). Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. *J. Geotechnical Eng. Div, ASCE* 105(GT2), 201–55.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M.** (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, *Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA*, 134.
- Seed, H.B., Idriss, I.M., and Arango, I.** (1983). Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *J Geotech Eng Div, 10.1061/ (ASCE)0733-9410(1983)109:3(458)*, 458–482
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Jr, and Chung, R.** (1984). The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. UCB/EERC-84/15*, 50.
- Seed, H.B. and De Alba, P.** (1986). Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands, use of in situ tests in geotechnical engineering, *Geotechnical Special Publication 6, ASCE*.

- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Jr., and Chung, R.** (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations, *J Geotech Eng* 111(12),1425-1445.
- Setiawan, B.** (2011). Assessing liquefaction potential of soils utilising in-situ testing. Master of Engineering Science Thesis, School of Civil, Environmental and Mining Engineering, University of Adelaide.
- Shepard, D.** (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In *Proceedings of the 23rd ACM National Conference*, 517–524.
- Sonmez, H.** (2003). Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area. *Environ Geol*, Inegol, Turkey, 44(7),862–871.
- Sonmez, H. ve Gokceoglu, C.** (2005). A liquefaction severity index suggested for engineering practice. *Environ Geol*, 48(1),81–91.
- Sönmez, B.** (2006). Kocaeli körfezi güney kıyısındaki sıvılaşma potansiyelinin ve kapak zemini kalınlığının yüzey deformasyonlarına etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Türkiye.
- Sönmez, H.** (2011). Zemin sıvılaşması. Jeoteknik eğitim kurs notu, 1-12.
- Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Uzel, B., Sümer, Ö., Eski, S. ve Tepe, Ç.** (2016). Paleoseismology of the Havran-Balıkesir Fault Zone: Evidence for past earthquakes in the strike- slip-dominated contractional deformation along the southern branches of the North Anatolian fault in northwest Turkey. *Geodinamica Acta*, 28(4), 254–272.
- Sözbilir, H., Sümer, Ö., Özkaymak, Ç., Uzel, B., Güler, T. ve Eski, S.** (2016a). Kinematic analysis and paleoseismology of the Edremit Fault Zone: evidence for past earthquakes in the southern branch of the North Anatolian Fault Zone, Biga Peninsula, NW Turkey. *Geodinamica Acta*, 28(4): 273–294.
- Stark, T.D. and Olson, S.M.** (1995). Liquefaction resistance using CPT and field case histories. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(12).
- Stokoe, L.H., Roesset, J.M., Biershwale, J.G., and Aouad, M.** (1988). Liquefaction potential of sands from shear wave velocity. In: *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, vol. III, 213–218.
- Şişman, E.** (2006). Fethiye yerleşim alanındaki zeminlerin SPT ve kayma dalga hızı verileri ile sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Tokimatsu, K. and Uchida, A.** (1990). Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity. *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 30, 2:33-42.
- Tsuchida, H.** (1970). Prediction and countermeasure against liquefaction in sand deposits Sem. Of the Port and Harbor Research Institute.
- Ulusay, R., Tuncay, E., Sonmez, H. ve Gökçeoglu, C.** (2004). An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. *Engineering Geology*, 74(3/4),265- 291.
- Uyanık, O. and Taktak, A.G.** (2009). A new method for liquefaction analysis from shear wave velocity and predominant resonance period. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13-1 74-81.
- Ulusay, R.** (2010). Uygulamalı jeoteknik bilgiler (5). Türkiye Mühendis Mimarlar Odası Birliği Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 38.
- Ündül, Ö. ve Gürpınar, O.** (2003). Çokal vadisindeki (Gelibolu) alüvyal zeminlerin sıvılaşma potansiyeli. İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, *Yerbilimleri Dergisi*, 16, 67-80.
- Wang, J.G.Z.Q. and Law, K.T.** (1994). Siting in earthquake zones. Rotterdam, Balkema, 102-115.
- Wells, D. and Coppersmith, K.** (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974-1002.
- Youd ,T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Jr., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., and Stokoe, K.H.** (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEERINSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *J Geotech Geoenviron Eng*, 127(10), 817-833.
- Youd, T.L. and Noble, S.K.** (1997). Liquefaction criteria based on statistical and probabilistic analyses. *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, December , 31, 201-205.
- Youd, T.L., Willey, P.S., and Gilstrap, S.D.** (1997). Liquefaction hazard screening for Utah highway bridges.: Fnl Rprt, UDOT Task Order 7RE0383 SPR-0012(018), Cntrct No. 93-8476, and FHWA (NCEER) Proj DTFH61-92-C-00106, Task 106-F-6.1.

Wikipedia, 2022. Doğa kaynaklı afet tanımı. Erişim adresi: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Doğal\\_afet](https://tr.wikipedia.org/wiki/Doğal_afet)

# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ayşegül KILIÇ

Doğum tarihi ve yeri : 20.11.1997 Bala

e-posta : ayseguulkilic@gmail.com

## Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Jeoloji Mühendisliği	2025
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi/Jeoloji Mühendisliği	2019
Lise	Halide Edip Lisesi	2015