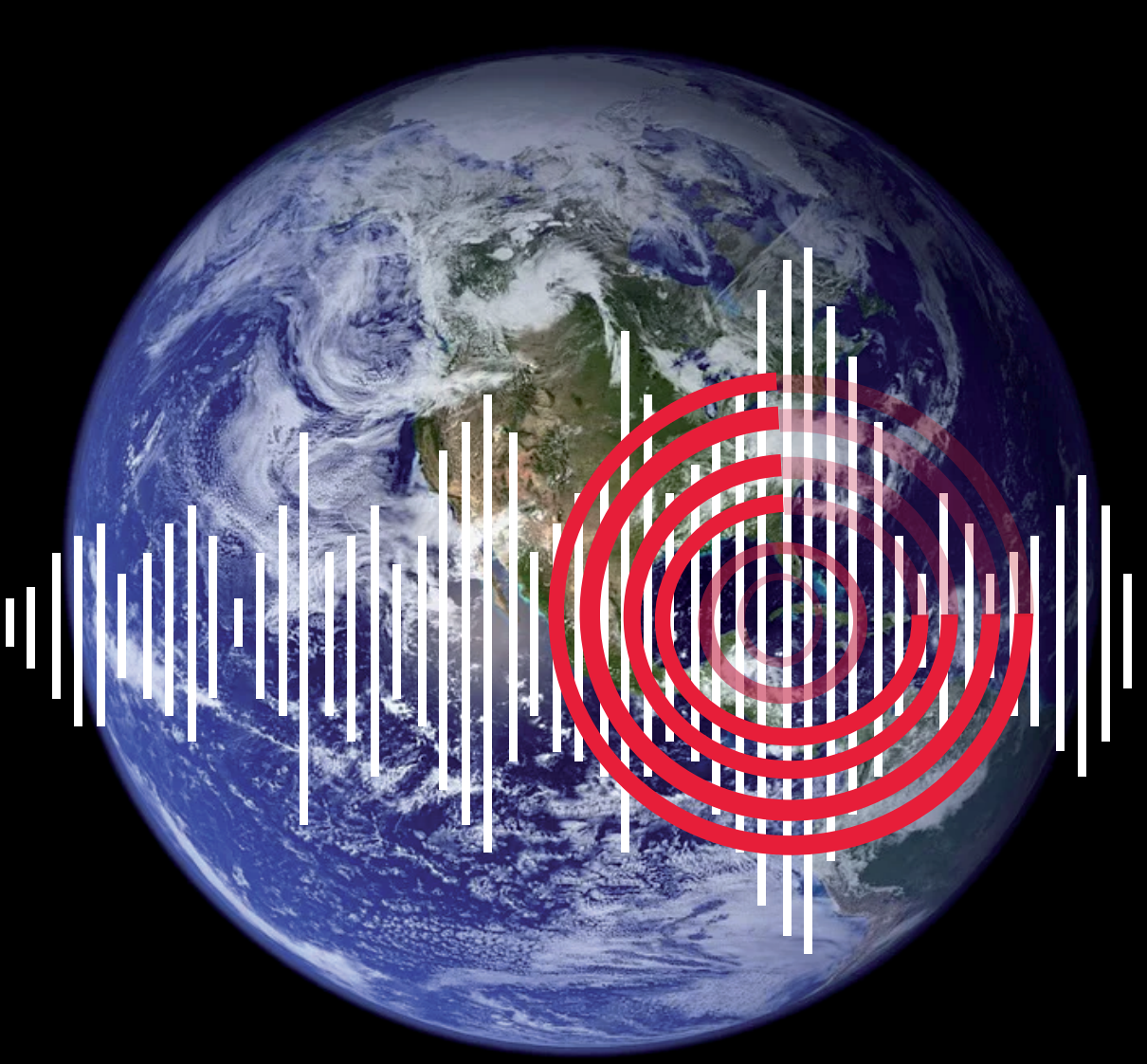


YERBİLİMLERİ PROBLEMLERİNE MODEL YAKLAŞIMLARI

EDİTÖR

Dr. Fatih SÜNBÜL

YAZARLAR

Doç. Dr. T. Fikret KURNAZ
Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER
Dr. Öğr. Üyesi Veli AKARSU
Arş. Gör. Dr. Emrah BUDAKOĞLU
Öğr. Gör. Hüseyin MUNGAN
Y. Müh. Shah Wali NAZARİ

İKSAD Publishing House

YERBİLİMLERİ PROBLEMLERİNE MODEL YAKLAŞIMLARI

Editör:

Dr. Fatih SÜNBÜL

Yazarlar:

Doç. Dr. T. Fikret KURNAZ
Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER
Dr. Öğr. Üyesi Veli AKARSU
Arş. Gör. Dr. Emrah BUDAKOĞLU
Öğr. Gör. Hüseyin MUNGAN
Y. Müh. Shah Wali NAZARİ

İKSAD
Publishing House

Copyright © 2020 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social
Researches Publications®
(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)
TURKEY TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2020©

ISBN: 978-625-7897-99-0
September / 2020
Ankara / Turkey

İÇİNDEKİLER

EDİTÖRDEN

ÖNSÖZ

Dr. Fatih SÜNBÜL……...1

BÖLÜM 1

YERSEL LAZER TARAMA TEKNOLOJİSİ İLE HEYELANLARIN İZLENMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Veli AKARSU, Y. Müh. Shah Wali NAZARİ……3

BÖLÜM 2

ZEMİNLERİN KOMPAKSİYON PARAMETRELERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANILARAK TAHMİNİ

Doç. Dr. T. Fikret KURNAZ……..37

BÖLÜM 3

DEPREM ARAŞTIRMALARINDA SONLU FAY ve DEPREM DALGA ŞEKLİ MODELLEMESİ

Arş. Gör. Dr. Emrah BUDAKOĞLU……..57

BÖLÜM 4

SAYISAL MODELLEME

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER…….95

BÖLÜM 5

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ: DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLARI

Öğr. Gör. Hüseyin MUNGAN……..125

ÖNSÖZ

Yer Bilimleri, içerisinde Coğrafya, Jeodezi, Jeoloji, Jeofizik, Geoteknik, Çevre, İnşaat ve Şehir Planlama gibi sistematik ve multi disipliner yaklaşımlar barındıran bir bilim dalıdır. İnsan yaşamı içerisinde karşılaştığı problemlerde, yer sisteminin bağımsız değişiminin ilişkisi sonucu ortaya çıkan karmaşık çevresel problemlerin çözümünde çok disiplinli yaklaşımlar her zaman daha etkili sonuçlar vermektedir. Bu sebeple, Yer Bilimleri kavramı Dünya sistemlerinin birbirleriyle ilişkisini araştırırken, dünyanın iç ve dış etkenlerle oluşturduğu afet tipi problemlere çözüm yolları aramaktadır. Günümüzde insan veya doğal kaynaklı oluşan bu problemler ve ilgili çözüm yolları arayışlarında farklı disipliner yaklaşımlarından söz edilebilmektedir.

Bu kitap Yer bilimleri problemlerine multi disipliner bir yaklaşım getirerek, bu alanda yapılan modelleme çalışmalarını kapsamaktadır. İlk olarak heyelanların izlenmesinde geomatik ve şehir planlama yaklaşımları tartışılmıştır. İkinci bölümde zeminden kaynaklanan problemlerin belirlenmesi ve buna bağlı zemin iyileştirilmesinde yapay sinir ağları teknolojisi örneği sunulmuştur. Üçüncü bölümde deprem araştırmalarında sonlu fay ve dalga modellemesi yaklaşımı irdelenmiştir. Dördüncü bölümde geoteknik çalışmalarda kullanılan sayısal modellerden sonlu eleman modeli ve arazi çalışması örneği sunulmuştur. Beşinci ve son bölümde ise zemin problemlerinde iyileştirme metodolojisi kullanılarak sayısal model analizi yapılmıştır.

Kitabın hazırlık süreçlerine büyük emekler veren, çok değerli tecrübe ve bilgi birikimlerini özenli ve nitelikli çalışmaları ile birleştirerek kitabın bilimsel oluşumuna katkı sağlayan yazarlara, yayınlanma sürecinde desteklerini gördüğümüz İbrahim Kaya Beyefendi olmak üzere, profesyonellikleri ile kitabı uluslararası akademik camiaya ulaştıran IKSAD Yayınevi'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Ulusal ve Uluslararası akademik camiaya faydalı olması dileğiyle…

Saygılarımla,

Dr. Fatih SÜNBÜL

BÖLÜM 1

YERSEL LAZER TARAMA TEKNOLOJİSİ İLE HEYELANLARIN İZLENMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Veli AKARSU[1]

Y. Müh. Shah Wali NAZARİ[2]

[1] Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama, Zonguldak, Türkiye. veli.akarsu@beun.edu.tr

[2] Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği, Zonguldak, Türkiye. eng10501@gmail.com

GİRİŞ

Lazer teknolojisi araştırmaları, günümüzden 60 yılı öncesine kadar geriye gitmektedir. Oysa ki, Yersel Lazer Tarama (YLT) teknolojisinin ölçme aracı olarak araştırma alanına girmesinin geçmişi ise son on yılda olanaklı olmuştur. Tek renklilik, iyi kolimasyon, yüksek güç, kısa atımlar veya lazer ışığının ayarlanmasının olası durumlar gibi lazer radyasyonunun belirli niteliklerinden dolayı, ölçme işlerinden kullanılmasının getirdiği teknolojik avantajları, daha yeni fark edildi. Hızlı ve minimum giderle, bütün obje hakkında eksiksiz 3 boyutlu (3B) geometrik ve görsel bilgiye ulaşmak, günümüz lazer tarama teknolojileri ile olanaklı hale gelmiştir. Optik mekanik bir alet olan yersel lazer tarayıcılar, YTL ile taranacak obje arasındaki ölçme mesafesine bağlı olarak, yatay ve düşey yönlerde yönlendirilmek suretiyle tarama yapar ve obje yüzeyinin milyonlarca noktadan oluşan detaylı 3B görüntüsünü elde eder (Karasaka, 2012). Örneğin geleneksel jeodezik ölçme yöntemleri veya Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK, Real Time Kinematic) ölçme sistemi veya ve Uydularla Konum Belirleme Sistemi (GNSS, Global Navigation Satellite System) gibi modern ölçümler ile bir objenin hızlı bir şekilde geometrik ve görsel bilgilerine ulaşmak için çok uygun değildirler.

Bu ölçme sistemleri ile sadece tek tek noktasal konum bilgileri üretilmektedir. Bu nedenle bu yöntemler genellikle yavaştır. Modern reflektörsüz Total Station (elektronik takeometreler) ve diğer gelişen teknolojilerde de nokta bazlı tarama fonksiyonları vardır. Fakat tarama süresinin uzun sürmesi, elde edilen nokta sayısının azlığı ve taranan

objenin gerçek modeline uygun noktalar kümesinin elde edilemeyişinden dolayı, yersel lazer tarama teknolojisini ön plana çıkarmıştır. Yersel Lazer Taraması (TLS - Terrestrial Laser Scanning) (YLT) tekniği ise 1990'lı yılların sonu ve 2000'li yılların başında bilimsel çalışmalarda ön plana çıkmıştır. Gelişen yersel lazer tarayıcılar teknolojisi, tarihi ve kültürel yapıların belgelenmesi ve 3B modellenmesinde oldukça popüler bir yöntem haline gelmiştir. Çok kısa bir zaman diliminde yersel lazer tarayıcılar kullanılarak, bir objeye ait binlerce noktanın 3B konum koordinatlarını belirlemek olanak haline gelmiştir.

Geçmişten günümüze, sosyal yaşamın olduğu alanlarda birçok problemin çözümü ve gerçek bir dünya modelinin yaratılması için, çalışmalar yapılmaktadır. Bu modellerin analizi için doğru, duyarlı ve yeni bilgilerin elde edilmesi gerekmektedir. Bu modellerden elde edilen veriler değerlendirilmekte ve objeler hakkında geometrik ve tematik bilgiler elde edilmektedir. Bugün Lazer Tarama Sistemleri, bu uygulamalar için dünyada ön plana çıkmaya ve hızla gelişmeye başlamıştır. Bu lazer sistemlerinden elde edilen bilgiler gerçek ile uyumludur. 3B geometrik ve görsel bilgiler, hızlı ve düşük maliyetle lazer tarama sistemleri ile elde edilmektedir. YTL teknolojisinde nesneye ait yansıma yoğunluğu verisi içeren, 3B nokta verisi olarak elde edilmektedir. Nokta bulutlarının kaydedilmesi, birleştirilmesi, inceltilmesi, nokta boşluklarının doldurulması, filtrelenmesi ile nesnelerin 3B modelleri elde edilmektedir.

Oluşturulan bu modeller üzerinden, mühendislik uygulamaları için gerekli her türlü veriye ulaşılabilmektedir.

Yersel tarayıcılarla elde edilen 3B bilgi, farklı disiplinler tarafından kullanılmaktadır. Günümüzde birçok mühendislik uygulamalarının yanı sıra, tarihi ve kültürel yapıların tarihi miras olarak korunmasına yönelik yapılacak röleve ve restorasyon çalışmaları vb. çalışma alanlarında kullanılmaktadır. Yersel uygulama alanları için lazer tarayıcı piyasası son yıllarda oldukça başarılı bir şekilde gelişmiştir ve lazer tarayıcılar, endüstriyel uygulamaların gereksinimlerini karşılayan ölçüm cihazları olarak görülmektedir. Şu anda çeşitli firmalar piyasaya ürün sunuyor. Bu ürünlerin direkt karşılaştırılması teknik özellikleri ve fiziksel ölçüm prensipleri farklı olduğundan zordur. Çoğu sistemler, lazer ışınını farklı yönlere yönlendiren ve her bir yön için en yakın nesneye olan mesafeyi ölçerek, boyutsal ölçüm sistemi ve mekanik yön saptırma sistemi ile kombine edilmiş bir yapıya sahiptir. Yersel lazer tarayıcılardaki son gelişmeler birçok uygulama alanları ve dolayısıyla lazer tarayıcılarına adaptasyonu artmaktadır.

Bilinen jeodezik ölçme aletleri (örneğin, Total Station, GNSS alıcıları) aksine, mevcut lazer tarayıcıların çoğunda doğruluk, çözünürlük ve performans açısından değerlendirilmeleri henüz tam olarak kanıtlanmamış olup, sadece birkaç sistem bağımsız kurumlar tarafından performans ve üretici spesifikasyonları onaylanmıştır. Henüz kapsamlı bir denetim ve kontrol prosedürü geliştirilmemiştir. Bu nedenle sadece bireysel testler, mevcut sistemlerin sonuçlarını göstermektedir. YLT, halihazırdaki haliyle, ticari cihaz geliştiricileri, Faro (https

://www.faro.com/), RIEGL (http://www.riegl .com/), Leica Geosystems (https ://leica -geosy stems .com/en-gb), Zoller ve Fröhlich (https ://www.zf-laser .com/) ve başkaları tarafından geliştirilmiştir. YLT'nin kabiliyeti, çok yönlü ve hatta hiper spektral lidar araçlarının araştırma öncülüğünde geliştirilmesiyle spektral alana da genişletildi (Danson vd., 2014; Hakala vd., 2012; Douglas vd., 2015).

Bu çalışmada ise esasen YTL'nin tasarımı, nokta bulutlarının oluşturulması yanında, yer bilimlerine ait problemlerin (heyelan probleminin izlenmesi) çözümünde kullanılması ve uygulama alanları irdelenecektir.

1. MATERYAL VE METOD

1.1. Yersel Lazer Tarayıcıların Sınıflandırılması

Doğrudan Yersel Lazer tarayıcıların sınıflandırılması zordur. Sınıflandırma yapmak için çeşitli olasılıklar vardır: Örneğin, ölçüm prensibi (üçgenleme, faz veya ışın gönderimi) veya teknik özelliklerine göre. Öncellikle, tüm uygulama alanları için tasarlanmış bir YTL aleti yoktur. Bazı tarayıcılar iç mekân (indoor) kullanım ve orta menzil (100m'ye kadar), bazıları ise dış mekan (outdoor) kullanım için (100m'ye kadar) ve bazıları ise yakın menzil (bir kaç metre'ye kadar) yüksek hassasiyetli yersel lazer tarayıcılarıdır. Uygulamaya bağlı olarak uygun lazer tarayıcı seçilmesi şarttır.

Yersel lazer tarayıcılar mesafe ölçüm prensibi ile kategorize edilebilir. Mesafe ölçüm sitemi, mesafe ölçümü hem mesafe menzili hem de

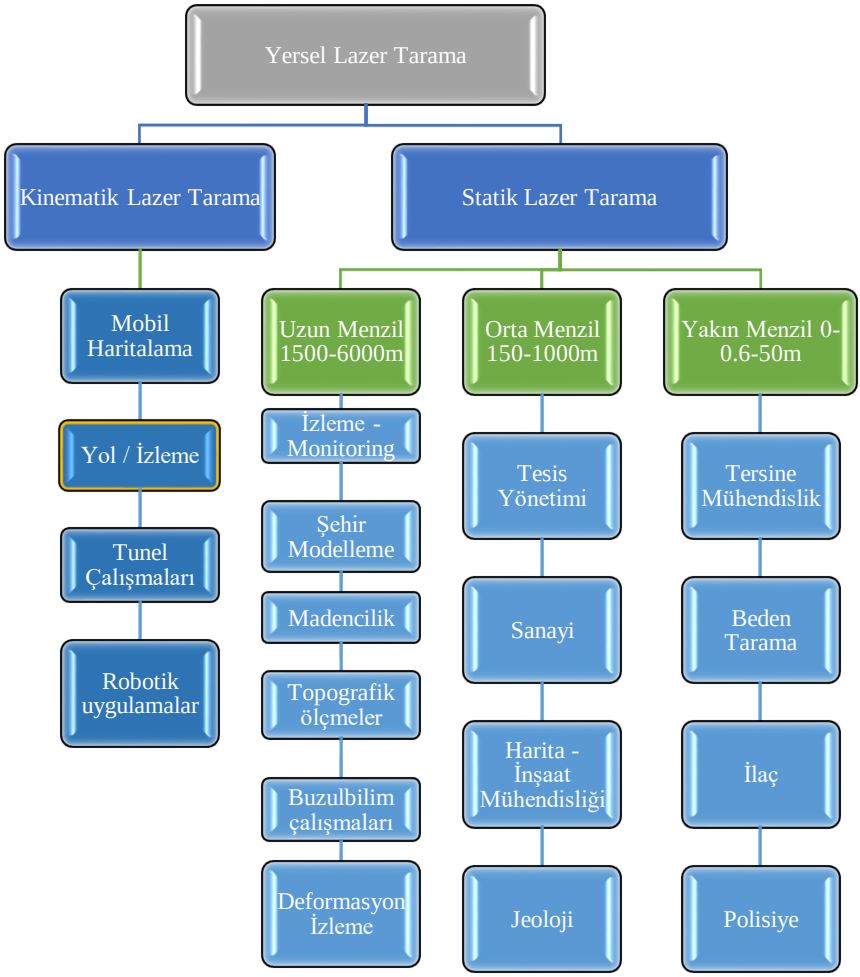
doğruluk sonucu ile ilişkilidir. Lazer tarayıcılarda mesafe ölçümü için 3 farklı teknoloji kullanılmaktadır:

a) En yaygın lazer ölçüm sistemi, uçuş zamanı prensibi sistemidir. Bu teknik yüzlerce metreye kadar kesin ve net mesafe ölçümü yapılmasını sağlar. Bu prensip uzun menzilli taramalarda da makul doğruluk sağlıyor.
b) Uçuş zamanı prensibi yanı sıra, faz ölçümü prensibi orta menzil ölçümler de diğer yaygın tekniği temsil etmektedir. Bu tekniğin ölçme menzili 100 metre ile sınırlı olup, ölçüm mesafesinin doğruluğu ise bir kaç milli metre (±mm) dir.
c) Belirtmek gerekir ki, birkaç metreye kadar ölçüm yapan yakın menzilli lazer tarayıcılar da mevcuttur. Fakat, endüstriyel uygulamalarda ve tersine mühendislikte (yapı işlemlerinin online izlemede) kullanılmaktadır. Kullanılan mesafe ölçüm prensibi, optik üçgenleme yöntemidir. Bu teknik mikrometre hassasiyetindedir.

1.2. Statik ve Kinematik Lazer Tarama

Diğer bir sınıflandırma ise, statik lazer taramalar, mobil lazer taramalar ve kinematik lazer taramalardır. Kinematik lazer taramalar ise arabalara, helikopterlere, uçaklara ve botlara monte ediliyor. Bu tip lazer taramalarda iz takibi Total Station, GNSS ve bazı sensörler ile beraber birleştiriliyorlar. Ayrıca mobil haritalama sistemleri, Ataletsel Seyrüsefer Sistemi (INS, Inertial Navigation System) veya ASS ve optik korelasyon temelli optik konumlandırma sitemleri ilave ediliyor (Corrsys). Aşağıdaki, Çizelge 1'de yersel ve kinematik ve statik lazer taramaların uygulama alanları, akış şeması şeklinde gösterilmiştir.

Çizelge 1. Yersel lazer kinematik ve statik tarama yöntemlerinin uygulama alanları (Karasaka, 2012).



1.3. Yersel Lazer Tarayıcı Bileşenleri

Bir yersel lazer tarayıcı sistemi, Şekil 1'de görülen bileşenlerden oluşur. Bunlar; a) Tarama ünitesi (tarayıcı), b) Güç kaynağı, c) Tripod ve d) Hedef topları, hedef kareleri.

Şekil 1. FARO FOCUS x330 (Resim, BEUN Geomatik Lab. 2019).

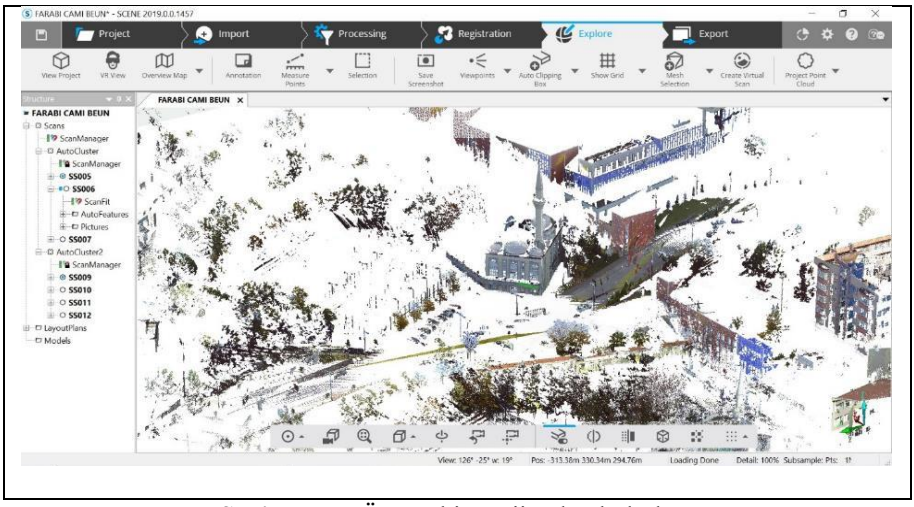
Tarayıcı ünitesi, boyut olarak bildiğimiz ölçü aletlerinden daha büyük bir yapıdadır. Bir Yersel Lazer Tarayıcının öz bileşeni tarama ünitesidir. Bu bileşen basitçe direkt 3 boyutlu veri yakalamak için kullanılan sistemdir. Bir lazer tarama ünitesi iki bileşenden meydana gelir (Wehr ve Lohr, 1999). Bunlar; a) Lazer telemetresi (Lazer uzunluk ölçme sistemi) ve b) Lazer ışın saptırma ünitesi (Optik mekaniksel tarayıcı)

1.4. Nokta Bulutu Oluşturma

Bir lazer tarayıcı motorize bir Total Station olarak tanımlanabilir. Taranan nesnenin yüzey verisini, 3B koordinat olarak elde etmektedir. Tarama işlemi otomatik ve sistematik olarak yapılmakta ve saniyede binlerce noktanın (x, y, z) koordinatlarına dönüştürmektedir.

Yersel lazer taramalarından elde edilen yüksek yoğunluklu noktalar kümesi, tarama süresince genellikle nokta bulutu olarak toplanır (Şekil 2-5) (Nazari, 2020). Toplanan bu nokta bulutu, taramayla eş zamanlı olarak, tarama programında görülebilmektedir (Mills ve Barber, 2003).

Şekil 2. ZBEÜ, Farabi camii.

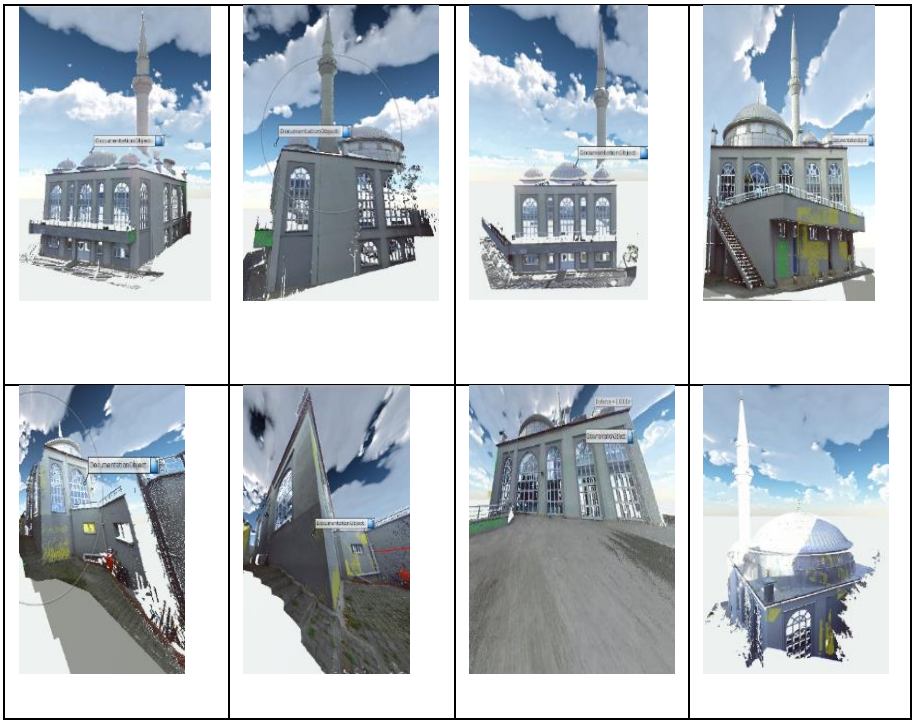


Şekil 3. ZBEÜ. Farabi camii nokta bulutları.

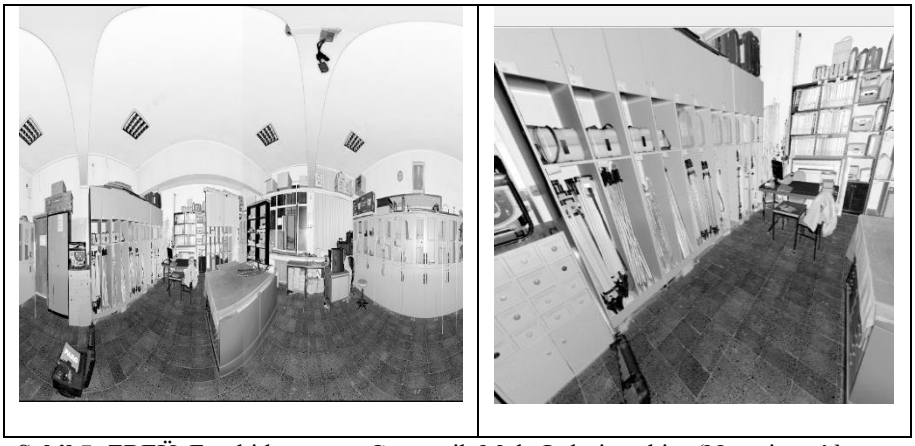
Manuel birleştirme aşamalarının görüntüleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Nokta bulutu, bir obje veya konumun mekânsal dağılımdaki genel referans sistemi içerisindeki (x, y, z) koordinatlarının toplamıdır. Bir nokta bulutunun içerdiği bilgiler şunlardır (Mettenleiter, 2000):

- **Metrik:** Obje geometrisini açıklar ve ortamdaki objeler arasındaki mekânsal ilişkileri gösterir.
- **Görsel veya tematik:** Her nokta için mesafe verisinin güvenilirliğini hesaplamak, obje yüzeyinin niteliklerini açıklamak için kullanılabilir. Ayrıca yoğunluk veya RGB (Kırmızı, yeşil, mavi) değeri gibi eklenmiş bilgiler vardır. Nokta bulutu oluşturulan veriden istenilen veya gerekli görülen kısımlardan plan, cephe görüntüleri oluşturulur.



Şekil 4. Maneul birleştirme için gereksiz nokta temizleme sonrası 8 oturumun bakış açıları



Şekil 5. ZBEÜ, Farabi kampüsü Geomatik Müh. Lab. iç çekim (Nazari ve Akarsu, 2019).

1.5. Yersel Lazer Tarayıcı Modelleri

1.5.1. Focus^{s} 350

FARO FocusS 350, küçük boyutu, ekstra hafif ağırlığı ve genişletilmiş tarama aralığı nedeniyle dış mekan uygulamaları için özel olarak tasarlanmıştır. FocusS 350, yağmurlu veya doğrudan güneş ışığına maruz kalınmış zorlu ortamlarda, dar iş sahalarında, tozlu veya nemli alanlarda bile tarama imkanlarını sağlar. Yerinde bir telafi aracı, yerinde veri kalitesi optimizasyonuna izin verir. Entegre GNSS alıcıları yardımıyla, kolay konumlandırmayı mümkün kılar. HDR görüntüleme ve HD fotoğraf çözünürlüğü, yüksek veri kalitesiyle gerçek detay tarama sonuçlarını sağlar (Şekil 6). Cihazın özellikleri ise; a) Mesafe hassasiyeti ± 1mm'ye kadar, b) 0.6 m'den 350m'ye kadar menzil, c) 165 mega piksele kadar HD fotoğraf bindirme.

Şekil 6. FOCUS^{S} 350 (URL 3).

RIEGL'in eşsiz Waveform-LiDAR teknolojisi, toz, pus, yağmur, bitki örtüsü vb. nedenlerden dolayı zayıf ve zorlu çoklu hedef durumlarında bile yüksek hız, uzun menzilli, yüksek hassasiyetli ölçümleri mümkün kılan üründür (Şekil 7). 1,2 MHz'e kadar yüksek lazer darbe tekrarlama oranı: 500.000 ölçüm / saniye'ye kadar yüksek hızlı veri toplama; Geniş görüş alanı, 100° x 360° ; 2500 m'ye kadar ölçme mesafesinde doğruluk ±5 mm olup; Yüksek doğruluk, ekonomik sayısallaştırma, çevrimiçi dalga biçimi işleme ve çoklu-zamanlı işleme dayalı yüksek hassasiyet aralıklı, veri toplama ve gerçek zamanlı olarak eşzamanlı coğrafi konumlandırma için yeni, yenilikçi işleme mimarisi; Otomatik on-boad kayıt; kullanımı kolay (örn. Kullanıcı dostu dokunmatik ekran arayüzü, tek dokunuşla çalışma, vb.), Wi-Fi ve 3G / 4G LTE üzerinden bulut bağlantısı, Çoklu hedef kabiliyeti, Opsiyonel tam dalga form verisi çıkışı, poz tahmini için oryantasyon sensörü, Uzaktan kumanda Entegre GNSS Alıcısı, RIEGL VMZ Mobil Lazer Haritalama Sistemi ile tamamen uyumludur.

Şekil 7. RIEGL VZ-2000i (URL 4).

1.5.2. Zoller + Fröhlich Z+F Imager® 5016

Z + F IMAGER® 5016, entegre bir HDR kamera, dahili aydınlatma ve otomatik, hedefsiz kayıt için açık / kapalı konumlandırma sistemi ile donatılmıştır - Z + F IMAGER® 5010X ve Z + F IMAGER®5010C. Kompakt ve hafif tasarımı en son lazer tarama teknolojisi ile birleştirerek kullanıcının yeni seviyelere ulaşmasını sağlar (Şekil 8). Bununla birlikte, tüm bileşenler daha da geliştirilmiş ve yeni tasarıma ayarlanmış, daha iyi tarama sonuçları ve daha verimli bir iş akışı ile sonuçlanmıştır. Cihaz özellikleri ise; a) Dalgaboyu [nm]=1500, b) Maks. Menzil [m]=365, Min. Menzil [m]=0.3, c) Çıkıştaki ışın çapı [mm]=3.5, d) ışın sapması [mrad]=0.3 ve e) Aralık belirsizliği (değişken kısım) [ppm]=10

ŞEKİL8. ZOLLER + FRÖHLİCH Z+F IMAGER® 5016 (URL 5).

1.5.3. Leica RTC360

Leica RTC360 lazer tarayıcı (Şekil 9), 3D gerçeklik çekimini her zamankinden daha hızlı hale getirir. Saniyede 2 milyon noktaya kadar ölçüm hızı ve gelişmiş, HDR görüntüleme sistemi ile renkli 3B nokta bulutlarının oluşturulmasını, 2 dakikadan daha kısa sürede tamamlayabilmektedir. Ayrıca, otomatik hedefsiz alan tescili (VIS teknolojisine dayanarak) ve siteden ofise kesintisiz, otomatik veri aktarımı, sahada harcanan süreyi kısaltır ve üretkenliği daha da artırır. Cihaz özellikleri ise; a) Görüş alanı 360 ° (yatay) / 300 ° (dikey), b) Ölçme Mesafesi 0.5 - 130 m, c) Ölçme hızı 2 000 000 pts / sec

Kamera 36 MP 3 kameralı, kalibre edilmiş 360 ° x 300 ° küresel görüntü için 432 MPx ham veri yakalar. İPad veya Android tabletler için mobil cihazlar Leica Cyclone FIELD 360 uygulaması: - Tarama fonksiyonlarının uzaktan kontrolü – 2B ve 3B veri görüntüleme -

Etiketleme - Taramaların otomatik hizalanması -Veri depolama Leica MS256, 256GB değiştirilebilir flash sürücü.

Şekil 9. Leica RTC360 (URL 6).

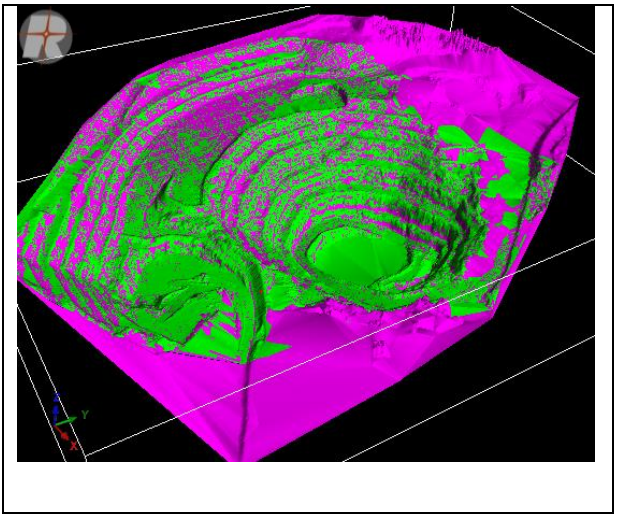
2. YERSEL LAZER TARAMA (YLT) YERBİLİMLERİNDE UYGULAMA ALANLARI

Yersel Lazer Tarama teknolojisinin yerbilimlerinde kullanılmasına ait bazı uygulama örnekleri aşağıda sıralanmıştır. Bir ülkenin altyapı tesislerinin belgelemesi. Demiryolu, yol şebekesi, tüneller, köprüler, enerji hatları gibi hasar görmüş alanların teşhisi için olağan araştırma gerektiren değerlendirme yöntemleri için bir temel sağlar. Bu şekilde gerekli onarımlar gecikmesiz tamamlanabilir.

2.1. YLT Madencilikte Kullanımı

Açık maden işletmelerinde aylık yapılan dekapaj (bitki örtü tabakası kazısı) ve kübaj (üretilen maden) miktarları üretiminin hesaplanıp karşılaştırma yapmada kullanılabilir.

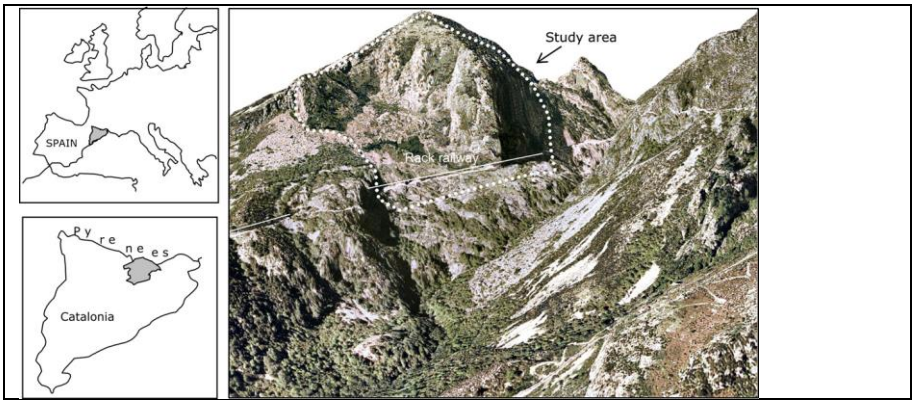
2011'de Doğu Afrika'da bulunan altın madenciliği Tanzanya'da, taramalarla konumlandırılma, filtrelenmesi ve analiz için kullanılmıştır (Boitt, 2011). Şekil 10'da alan, hacim hesaplamaları ve altı aylık bir süre için sonuçların analizi gösterilmiştir (Boitt, 2011).



Şekil 10. Maden yüzey birleştirmesi (2011 verisi (yeşil) ve 2010 (macenta) (Boitt, 2011).

2.2. YLT Kaya düşmesi incelemelerinde Kullanımı

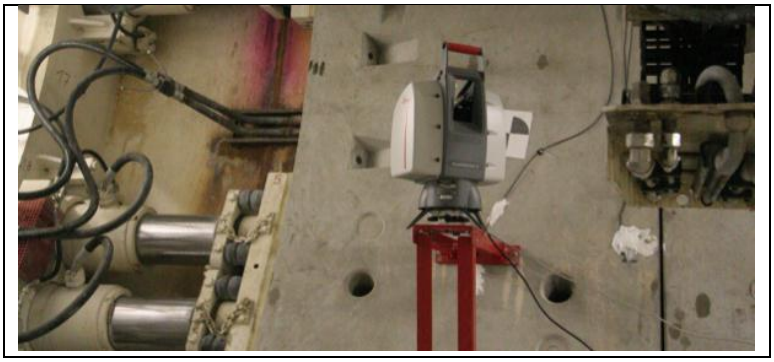
Bu çalışma örneği, kaya düşmesinin fazla yaşandığı İspanya'nın Vall de Núria vadisinde 300x500m alanda (Şekil 11), Uzun menzilli Optech Ilris3d YLT ile vadide oluşan kaya düşmesi fenomenini değerlendirmek ve önleyici ve düzeltici önlemleri uygulamak için yapılmıştır (Abellán vd., 2006).



Şekil 11. Vall de Núria'daki çalışma alanı, doğu pireneler, İspanya. Pilot alan noktalı çizgi ile çevrelenmiştir.

2.3. YTL Tünellerde Kullanımı

YLT, tünellerde inşaat ve onarım bakımda bir yöntem olarak kullanılmaktadır (Şekil 12). Yakın gelecekte, lazer tarama tünnellerde muhtemelen jeolojik ve jeodezik analizleri için standart araç olarak kullanılacaktır (Nuttens, 2010). YLT tünellerdeki uygulamaları, tünellerinin jeolojik özelliklerini belirlemek, kazı sırasında tünellerin geometrisini izlemek, deformasyon ölçümleri yapmak şeklinde sıralanabilir.

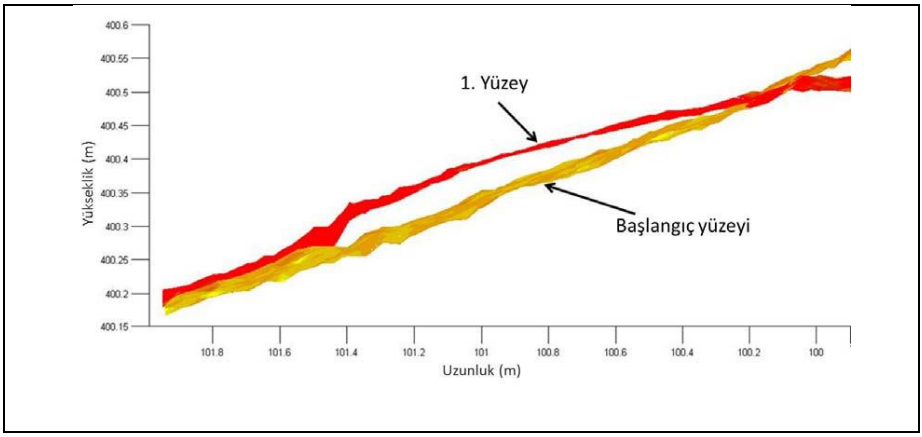


Şekil 12. YLT'nın beton tunnele montajı (Nuttens, 2010).

2.4. YLT Kıyı Çizgisi Değişimlerinin İzlenmesinde Kullanımı

Düzenli ve düzensiz deniz dalgaların etkisinde bulunan kıyı profillerinde meydana gelen değişimler birçok araştırmacı tarafından gerek deneysel, gerekse sayısal modellemeler yardımıyla uzun yıllar boyunca incelenmiştir. Arazi çalışmaları ve laboratuvar çalışmalarında yapılan ölçme yöntemlerinin net katı madde taşınma miktarını tam olarak belirlenmesinde yetersiz olduğu görülmektedir (Şeker vd., 2011).

Şeker vd. (2011) yürüttüğü bir deneysel çalışmada, dalga yüksekliği ve periyodu bilinen bir düzensiz dalga etkisi altında kıyı profilinin değişimi yersel lazer tarayıcı yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 13). İster geniş yüzeyler, isterse laboratuvar ortamındaki kısıtlı kıyı profillerinde dahi lazer tarayıcı gibi araçların geleneksel ölçüm yöntemleriyle kıyaslandığında çok daha hassas ve değişik yöntemlerle işlenebilir veri üretimine imkân sağladığı görülmüştür (Şeker vd., 2011).



Şekil 13. Kıyıda düzensiz dalga etkisinde meydana gelen değişim (Şeker vd., 2011).

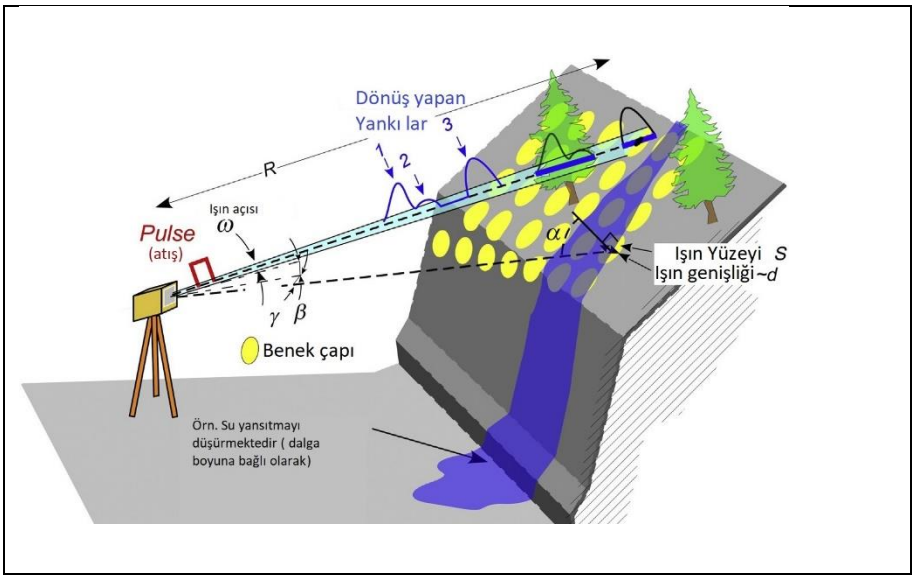
2.5. YLT Heyelanın Belirlenmesi ve İzleniminde Kullanımı

Heyelanlar, yer kütlesinin aşağıya doğru kaymasından kaynaklanan kalıcı doğal tehlikelerdir. Heyelanların, Yersel Lazer Tarama ile izlenmesi ilkesi, Şekil 14'de görülmektedir. Heyelanlar, yağış, yeraltı suyu dalgalanmaları, sismik aktiviteler, erozyon ve insan yapay faaliyetleri gibi çeşitli faktörler tarafından, eğimi dengesizleştiren geometrik veya yük değişikliğiyle tetiklenebilir (Fernandez Merodo vd. 2004).

Heyelanların insanlar ve çevre üzerinde doğrudan ve dolaylı etkileri vardır. Büyük heyelanlar meydana geldiğinde kayma yönünde bulunan her şeyi yok edebilir veya zarar verebilir (yani insanlar, yollar, evler). Ayrıca, bir heyelanın doğrudan etkisi genellikle heyelan sonrasında ortaya çıkar. Heyelanlar genellikle kent merkezlerini bağlamak için gerekli olan yollara zarar verir veya engeller. Bu da heyelandan etkilenen herkes için sıkıntı ve arızaya neden olur.

Heyelan izleme çalışmaları, GNSS ve Total Station ile de yapılmaktadır. Her ne kadar bu cihazlarla yüksek doğrulukta veri elde edilse bile, sadece nokta deformasyonu izlenebilir. Bu nedenle, bu nokta tabanlı cihazlar ile tüm heyelan alanını izlemek mümkün değildir. Yersel lazer tarama (YLT), bir bölgenin nokta bulutunu elde etme özelliğine sahiptir ve böylelikle bölgenin deformasyonunu analiz etme kabiliyeti vardır (Luo vd., 2017). Bu suretle, YLT birçok tehlike değerlendirme alanında yaygın olarak kullanılmaktadır; özellikle

heyelan izlemede ve şev bölgesinin ayrıntılı şekilde incelmesine olanak sağlıyor (Bitelli vd. 2004).



Şekil 14. Heyelanda yersel lazer tarama prensibi (Jaboyedoff vd. 2012).

Heyelanlarda ölçme planlaması; heyelanın meydana geldiği bölgede ki genel görünüm, sabit ve hareketli alanların tespit edilmesi, YLT cihazının iyi görüşüne sahip istasyon yerlerinin belirlenmesi gibi bir ön çalışmayı kapsamaktadır.

Arazi ölçmelerinden maksimum verim alınması için öncelikle eldeki lazer tarayıcının çalışmamın yapılacağı arazi için uygun olup olmadığı belirlenmelidir. Çünkü, bu bölge içinde lazer tarama menzillerine (mesafesine) uyabilecek lazer tarayıcının seçilmesi daha doğru olacaktır.

Heyelan izleme çalışmaları genellikle iki veya daha fazla çok-zamanlı (periyotlu) yapılmalıdır ve hareketlerin belirlenmesi için periyotlar arasındaki zamanın iyi ayarlanması oldukça önemlidir.

Ayrıca yer kontrol noktası olarak kullanılması planlanan noktaların yerlerinin iyi belirlenmesi, GNSS veya Total Station kullanarak Jeodezik koordinatlarının hesaplanması gerekir (Zeybek, 2013)

YLT ile heyelanların jeolojik yapısının belirlenmesi değerlendirmelerinde de başarıyla uygulanmıştır (Collins ve Stock, 2012). Lazer tarayıcıların ayrıca kıyı erozyonu ve uçurum çökmelerini izlemek için etkili bir yol olduğu kanıtlanmıştır (Olsen vd., 2009).

Heyelan ve deformasyon hareketlerinin izlenmesinde kullanılan YLT tekniğinin algoritmasının akış şeması Şekil 15'de verilmiştir.

Şekil 15. Heyelanların yersel lazer tarama teknikleri ile izlenmesinin akış şeması.

2.6. YLT ile Heyelan Uygulamalarının Sınıflandırılması

Heyelan araştırmaları 4 farklı alanda yapılmaktadır. Bu alanlar:

- Heyelan tipinin tespiti ve karakterize edile bilinmesi;
- Tehlikenin değerlendirilmesi ve duyarlılık haritalanması;
- Matematiksel modelleme;
- İzleme.

Çizelge 2'de ise YLT heyelan araştırmalarında kullanım alanları verilmiştir.

Tablo 2. Heyelan çalışmalarında YLT'nın farklı uygulama alanları (Jaboyedoff vd. 2012).

<table>
<tr><th></th><th>Heyelan</th><th>Kaya düşmesi</th><th>Birikmiş parçalar akımı</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Heyelan tespiti ve karakterizasyonu</td><td rowspan="2">Jeomorfik yüzeylerin haritalanması</td><td>Kaya yüzü görüntüleme ve karakterizasyonu</td><td>Mobilize edilebilir hacimlerin tespiti</td></tr>
<tr><td>Fasıla intibakı hesaplama</td><td>Hidromorfolojik karakterizasyonu</td></tr>
<tr><td>Tehlike değerlendirmesi ve duyarlılık haritalaması</td><td>Başlıca haritalamaya destek</td><td>Bazı duyarlılık ve tehlike haritalama girişimleri</td><td>Tehlike arz edecek bilgi içeren Jeomorfolojik yaklaşıma dayalı haritalama</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Modelleme</td><td>Klasik modelleme araçları büyük 3B bilgi yoğunluğunu işleyemez.</td><td rowspan="2">Yörünge modelleme için Yüksek Çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli(DEM)</td><td rowspan="2">Modelleme için bilgi</td></tr>
<tr><td>Yüksek Çözünürlüklü Sayısal Arazi Yükseklik Modeli (HRDEM), heyelan modellemesinde geometrik niteliğini geliştirerek daha doğru sonuç verir</td></tr>
<tr><td rowspan="3">İzleme</td><td rowspan="2">Yüzey değişimlerin izlenmesi</td><td>Yüzey yer değişimlerin izlenmesi</td><td>Tortu ve rüsup bütçesi</td></tr>
<tr><td>Arıza ve afet öncesi yer değişim (deplasman) tespiti</td><td rowspan="2">Kanaldaki morfolojik değişikliklerin izlenmesi</td></tr>
<tr><td>Hacimsal izleme</td><td>Kaya düşmesi faaliyeti ölçümü (hacimsal)</td></tr>
</table>

LIDAR, RADAR ve fotogrametri gibi uzaktan algılama tekniklerinin varlığından önce, heyelan izleme, tek noktalı ölçümler yapan GNSS veya Total Station ile yapılıyordu. Ancak heyelanların bütün olarak hareket etme kinematiğini ve oluşum mekanizmasını elde etmek büyük çaba gerektirir. Lazer tarama günümüzde heyelanların hareketinin izlemesinde yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Temel ilke, hem Havadan Lazer Tarama (HLT) - hem de Yersel Lazer Tarama ve Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) için aynıdır. En az iki periyot (HRDEM, High resolution digital elevation model) alım (ölçme) yapmayı gerektirir.

Yine de, izlemenin hem yüksek çözünürlük, hem de yüksek hassasiyetli veri setleri gerektirdiğinden, şimdiye kadar işlerin çoğu, YLT'den türetilen HRDEM'ler kullanmıştır. Sonuçlar, ya iki nokta (veya ortak alanlar) arasındaki vektörlerin değişimi veya iki veri seti ile noktalar arasındaki mesafenin değişiminin incelenmesi şeklinde (noktanın yüzey ile karşılaştırılması veya iki yüzey arasında en kısa mesafe (Hausdorff mesafesi) değerlendirilmektedir.

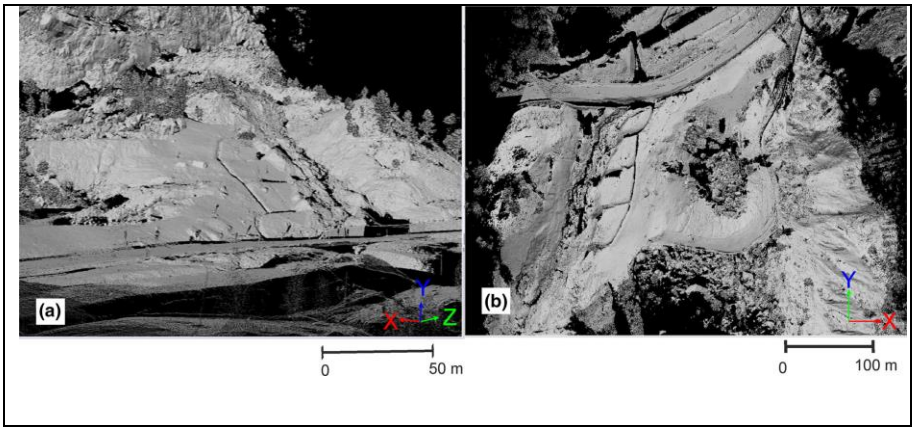
Bu fark hesaplaması, yani objedeki hacimsel değişim farkının hesaplanmasına izin vermesi düşüncesi, günümüzde farklı yazarlar tarafından tartışılmıştır (Bitelli vd. 2004; Chen vd. 2006; Corsini ve ark. 2007; Prokop ve Panholzer, 2009; Mueller ve Loew, 2009; Baldo vd., 2009).

YLT'nin avantajı diğer mevcut izleme teknikleri ile karşılaştırıldığında şunlardır:

- Yüksek uzamsal ölçüm çözünürlüğü, özellikle veri yoğunluğu az olan ve heyelan ölçümünde sınırlı kalan, GNSS ve Total Station gibi izleme teknikleriyle ile karşılaştırıldığında fark edilmektedir.
- Milimetre ve / veya santimetre boyutunda doğruluk ($\pm mm/cm$)
- Kolay kurulum ve veri edinebilme.

Heyelan izleme çalışmalarında, GNSS teknikleri ile son derece doğru sonuçlar elde edilmesine karşın, kütlesel heyelan hareketleri, heyelan deformasyon beklentisi olan (obje noktaları) noktaların kaybolmasına sebep olmalarından dolayı, heyelan izleme süreci kesintiye uğramaktadır (Şekil 16). YLT, teknikleri bu gibi durumlarda daha uygundurlar. Çünkü heyelan bölgesinin izlenmesi obje noktalarına bağlı değildir. Heyelan yüzeyinin tamamı noktalar bulutundan oluşmaktadır. En büyük avantajı ise, YLT ile heyelan yüzey alanı hızlı ve hassas şekilde tarama yapılabilmesidir.

Bu nedenle büyük kütlesel toprak kayması alanlarının geometrik özellikleri, yönü, hacmi ve diğer özelliklerinin belirlenmesinde en uygun yöntem, yersel lazer taramadır (Zeybek, 2011).



Şekil 16. 2011 Konya Taşkent Heyelanında nokta bulutundan,

a) perspektif görünüşü, b) üst'ten bakış görünüşü

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

Yersel lazer tarama teknolojisi hızla gelişen bir teknolojidir. En önemli özelliği çok kısa sürede, ekonomik olarak objenin gerçeğine yakın 3 boyutlu modelinin elde edebilmesi için nokta bulutları üretmesidir. Diğer 3 boyutlu modelleme teknikleri ile karşılaştırıldığında avantajları olduğu görülmektedir.

Tabiî ki bu sistemin de çözemediği sorunlar olması yanında, elde edilen ürünler de bazı hataları içerdiği söylenebilir.

Bu sorunlar diğer modelleme teknikleri yardımıyla ve gelişen lazer teknolojisi ile çözülmeye başlanmıştır. Tarayıcıların konum doğruluklarını iyileştirmek, hata kaynaklarını yok etmek üzere çalışmalar yapılmaktadır.

Kültürel ve tarihi mirasın kullanılmasında, inşaat sektöründe, mimarlık alanında, endüstriyel çalışmalarda, tünel ve yamaç şevlerinin deformasyon ölçmelerinde, büyük heyelanların hareketlerinin izlenmesi vb. birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Büyük kütlesel heyelanların yüzeysel ve/veya üç boyutlu izlenmesinde, YLT'nin kullanılmasının mümkün olduğu düşünülmektedir. Ülkemizde özellikle, yoğun yağış alan kara deniz bölgesinde heyelanlar yoğun şekilde oluşmaktadır. Ayrıca, büyük açık linyit işletmelerinde oluşan derin şevlerden kaynaklanan heyelanlar da söz konusudur.

Bu heyelanlar, sosyal ve ekonomik zararları yanında, can kayıplarına da sebep olmaktadır. Bu nedenle heyelanlar izlenip, elde edilen bulgular neticesinde önlemlerin alınması elzemdir.

YLT, meydana gelen birçok heyelan vakasında can ve mal kayıplarının önüne geçilmesinde hızlı, doğru ve maliyeti düşük sayılabilecek yeni bir tekniktir.

Bir heyelan hareketinin ayrıntılı bir açıklamasına ihtiyaç duyulduğunda, GNSS veya Total Station ile münferit noktalardan veri alma daha düşük doğruluk sağlar, ancak çok daha ayrıntılı bir sonuç elde etmek için YLT'yi kullanmak gerekir. YLT tüm alanın verisini elde ettiğinden model üzeri inceleme ve karşılaştırma olanağı sağlar.

YLT teknolojisi ile izleme, tüm heyelan bölgesi üzerindeki eğim hareketlerini tespit etmek için güçlü bir teknolojidir, ancak söz konusu heyelan bölgesi olunca alandaki verileri alırken bazı dikkatli önlemler alınmalıdır.

Jeodezik koordinat beklentisi gerektirmeyen durumlarda, heyelan bölgesine bağlantı noktaları veya hedef noktaları gerekmez, dolayısıyla veri birleştirme aşamasında benzer şekillerden ortak noktalar seçilerek, hedef tabanlı birleştirme gerçekleştirilebilir. Son model YLT cihazların üzerine GNSS sistemleri monte edebilme veya entegre GNSS özelliği olduğundan hedefte olan tehlike alanına girilmesi gerekmediğinden dolayı, bu özellik YLT avantajlarından biri olarak sıralanabilir. İki farklı zaman periyodun da YLT verisi karşılaştırması yapılırken, bazı yazılımların otomatik jeodezik şekil değişim yakalama teknolojisi kullanılarak, değişimler izlenilebilir (Örneğin, Faro Scene, 2019).

Tehlike arz edeceği düşünülen heyelan bölgeleri tespit ve YLT ile zaman aralıklı taramalar yapılarak, heyelan olasılığı yüksek bölgelerin jeomorfolojik yapısı ve YLT ile yüzey analizleri gerçekleştirilerek, erkenden önlemler alınabilmesi bakımında önerilir.

KAYNAKLAR

Abmayr T., Härtl F., Reinköster M., Fröhlich C. (2005), Terrestrial Laser Scanning– Applictions In Cultural Heritage Conservation And Civil Engineering.

Baldo M, Bicocchi C, Chiocchini U, Giordan D, Lollino G. (2009), LiDAR monitoring of mass wasting processes: The Radicofani landslide, Province of Siena, Central Italy. Geomorphology 105:193

Beraldin, J.A., Blais, F., Boulanger, P., Cournoyer, L., Domey, J., El-Hakim, S.F., Godin, G., Rioux, M., Taylor, J. (2000), Real World modelling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures. ISPRS Journal of Photogrametry and Remote Sensing 55, 230–250.

Bienert, S. Scheller, E. Keane, G. Mullooly , F. Mohan. (2006), Application Of Terrestrial Laser Scanners For The Determination Of Forest Inventory Parametrs.

Bitelli G, Dubbini M, Zanutta A (2004), Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques tomonitor landslide bodies. In: Proceedings of the XXth ISPRS congress, Istanbul, Turkey, Commission V, WG V/2

Bitelli G., Dubbini M., Zanutta A. (2004), Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 35 (B5)

Bitelli, G., Dubbini, M., Zanutta, A.(2004), Terrestrial Laser Scanning And Digital Photogrammetry Techniques To Monitor Landslide Bodies. Proceedings of the XXth ISPRS congress, Istanbul, Turkey. Commission V, WG V/2.

Chen RF, Chang KJ, Angelier J, Chan YC, Deffontaines B, Lee CT, Lin ML (2006), Topographical changes revealed by high-

resolution airborne LiDAR data: the 1999 Tsaoling landslide induced by the Chi-Chi earthquake.

Collins, B.D., Stock, G.M. (2012), Lidar-based rock-fall hazard characterization of cliffs. GeoCongress 2012, 3021–3030

Corsini A, Borgatti L, Coren F, Vellico M. (2007), Use of multitemporal airborne LiDAR surveys to analyse post-failure behaviour of earthslides. Can J Remote Sens 33(2)

Fernandez Merodo, J., Pastor, M., Mira, P., Tonni, L., Herreros, M., Gonzalez, E., Tamagnini, R. (2004), Modelling of diffuse failure mechanisms for catastrophic landslides. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 193

Fröhlich, C.; Mettenleiter, M. (2004), Terrestrial Laser Scanning – New Perspectives In 3D Surveying.

Gümüş, K., Erkaya, H. (2007), Mühendislik Uygulamalarında Kullanılan Yersel Lazer Ttarayıcı Sistemler, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara

Hancock, J., Langer, D., Hebert, M., Sullivan, R., Ingimarson, D., Hoffmann, E., Mettenleiter, M., Fröehlich, C. (1998), Active laser radar for high-performance measurements. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1465–1470.

Hunter, G., Pinkerton, H., Airey, R., Calvari, S. (2003), The application of a long-range laser scanner for monitoring volcanic activity on Mount Etna. Journal of Volcanology and Geothermal Research 123, 203–210.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellan, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A. (2012), Use of LiDAR in landslide investigations: a review. Nat. Hazards 61, 5–28.

Karagianni, A. (2017), Terrestrial Laser Scanning in Building Documentation, Doi: 10.13189/cea.2017.050603. 215-221.

Karasaka, L. (2012), Mobil Yersel Lazer Tarama Sistemlerinin Fotogrametrik Rölöve Projelerinde Kullanılabilirliği Üzerine Bir Çalışma, Doktora Tezi, SELÇUK Üniversitesi, Fen bilimler enstitüsü, Harita Mühendisliği anabilim dalı, Konya, 138 s.

Luo L., Ma W., Zhang Z. (2017), Freeze/thaw-induced deformation monitoring and assessment of the slope in permafrost based on terrestrial laser scanner and GNSS, Remote Sens. 9 (3)

Mark Kipkurwa Boitt. Application of the Terrestrial Laser Scanning System for Mining in East Africa.

Mueller R, Loew S. (2009), Predisposition and Cause of the Catastrophic Landslides of August 2005 in Brienz (Switzerland). Swiss J Geosci 102(2):331–344.

Nazari, S.W. (2020), Yersel Lazer Tarayıcılar: Geomatik Mühendisliğinde Uygulama Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 91s.

Olsen, M., Johnstone, E., Driscoll, N., Ashford, S., Duester, F. (2009), Terrestrial laser scanning of extended cliff sections in dynamic environments: a parameter analysis. J. Surv. Eng., ASCE 135 (4)

Prokop A, Panholzer H. (2009), Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. Nat Hazards Earth Syst Sci 9:1921–1928.

Rowlands, K.A., Jones, L.D., Whitworth, M. (2003), Landslide laser scanning: a new look at an old problem. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 36 (2), 155–157.

Sequeira, V., Fiocco, M., Bostrom, G., Gonçalves, J.G.M. (2003), 3D Verification of Plant Design, 25th ESARDA Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management, Stockholm, Sweden.

Singh, S., West, J. (1991), Cyclone: a laser scanner for mobile robot navigation. Carnegie Mellon University, Robotics Institute Technical Report, CMU-RI-TR-91-18

Şeker,D. Z., Köroğlu, Kabdaşlı, M. S., Karabörk, H., Göktepe, A. Ve Varol, E. (2011), Yersel Lazer Tarayıcıların Kıyılardaki Profil Değişimlerinin İzlenmesinde Kullanımı, 7. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, Tranzon

Wang, W., Zhao, W., Huang, L., Vimarlund, V., Zhiwei Wang. (2014), Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: a review. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English version), 1(5) : 325-337.

Watt, P.J. and DONOGHUE, D.N.M. (2005), Measuring forest structure with terrestrial laser scanning, International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, No. 7, 1437–1446

Zeybek, M. (2013), Heyelanların İzlenmesinde GNSS ve Yersel Lazer Tarama Tekniklerinin Birlikte Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Zeybek, M., Şanlıoğlu, İ. (2013), Accurate determination of the Taşkent (Konya, Turkey) landslide using a long-range terrestrial laser scanner . DOI 10.1007/s10064-014-0592-x. Received: 13 August 2013 / Accepted: 6 March 2014_ Springer

İnternet Kaynakları

URL1. http://www.ozrestorasyon.com

URL2. http://www.riegl.co.at

URL3.https://www.faro.com/products/construction-bim-cim/faro-focus/

URL4.http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/58/

URL5.https://www.zf-laser.com/Z-F-IMAGER-R-5016.184.0.html?&L=1

BÖLÜM 2

ZEMİNLERİN KOMPAKSİYON PARAMETRELERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANILARAK TAHMİNİ

Doç. Dr. T. Fikret KURNAZ[1]

[1] Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Mersin, Türkiye, fkurnaz@mersin.edu.tr

GİRİŞ

İlk çağlardan bu yana insanlar, binaların, ulaşım sistemlerinin, su toplama ve depolama yapılarının yapımında zeminleri yapı malzemesi olarak kullanmışlardır. Günümüzde zeminler, karayolları, havaalanları ve toprak barajlar gibi birçok inşaat mühendisliği projesinde doğrudan inşaat malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Söz konusu projelerde zeminlerin bir yapı malzemesi olarak kullanılması sırasında, uygun şekilde yerleştirilmesi ve sıkıştırılması önemlidir. Sıkıştırma, mekanik enerji uygulayarak zeminin yoğunluğunu arttırma ilkesine dayanan bir stabilizasyon yöntemidir. Sıkıştırmanın amacı, zemin kütlesinin mühendislik özelliklerini geliştirmektir. Sıkıştırma tekniğinin faydaları olarak, taşıma kapasitesinin arttırılması, geçirgenliğin azaltılması, yerleşme ve çökmenin azaltılması, sıvılaşma direncinin arttırılması gibi örnekler verilebilir.

Sıkıştırma tekniği, zemine sıkıştırıcı enerji uygulayarak zemindeki hava boşluklarını azaltmak, zeminin katı tanelerinin daha sıkı bir şekilde yeniden yerleşmesini sağlamak ve zeminin hacmini azaltarak yoğunluğu arttırmayı amaçlamaktadır. Sıkıştırılmış zeminin bir sonucu olarak, birim hacim ağırlığı artar ve buna bağlı olarak da zeminin mühendislik özellikleri iyileşir. Zemin tanelerinin birbirine yaklaşması ancak uygulanan statik veya dinamik yükler altında tanelerin birbirlerine göre hareket etmesine izin verilerek gerçekleştirilebilir. Zemindeki su içeriği arttıkça tanelerin hareketi kolaylaşır fakat birbirlerine yaklaşmaları zorlaşır. Zemin tamamen suya doygun olursa, taneler arasında gelişecek hidrostatik basınçtan ötürü kompaksiyon

mümkün olmayacaktır. Diğer taraftan, zemindeki su içeriği azaldıkça tanelerin hareketi ve birbirine yaklaşması kısıtlanır.

Bu durumda, en iyi kompaksiyon, sadece zeminde yeterli su olduğunda (ne çok az, ne de çok fazla) elde edilir. Zeminde en iyi sıkıştırmanın elde edildiği bu su içeriğine optimum su içeriği (w_{opt}) denir. Zemin, optimum su içeriğiyle sıkıştırıldığında ise maksimum kuru birim hacim ağırlığına (γ_{kmax}) ulaşılır. Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı, laboratuvarda Standart Proktor (SP) ve Modifiye Proktor (MP) testleri ile belirlenebilen zeminlerin kompaksiyon davranışını temsil eden iki önemli parametredir (Proctor, 1933). Bu iki parametre, karayolları, demiryolları ve toprak barajları gibi mühendislik yapıları için kaçınılmaz olan sıkıştırılmış dolgularda önemli bir role sahiptir. Bununla birlikte, bu iki parametrenin belirlenmesi için gerekli laboratuvar testleri, zaman alıcı ve zahmetli bir sürece sahiptir. Bu nedenle, birçok bilim insanı ve araştırmacı, regresyon analizine dayalı ampirik korelasyonlarla zeminlerin indeks özelliklerini kompaksiyon parametrelerini belirlemede kullanmışlardır (Jeng ve Strohm, 1976; Wang ve Huang, 1984; AI-Khafaji, 1993; Blotz vd., 1998; Engin, 2003; Sridharan ve Nagaraj, 2005; Olmez, 2007; Sivrikaya, 2008; Gunaydin, 2009; Sivrikaya vd., 2013). Bu korelasyon bağıntılarının kullanımı ile ilgili en önemli problem, korelasyonların genellikle belirli bir lokasyon veya aynı jeolojik kökene sahip zeminler için geliştirilmesidir.

Son zamanlarda, farklı yapay zeka teknikleri, geoteknik mühendisliğindeki karmaşık sorunların çözümünde popüler hale

gelmiştir (Nejad vd., 2009; Abdalla vd., 2015; Sulewska, 2011; Chik vd., 2014; Oh ve Pradhan, 2011; Jalalifara vd., 2011; Padmini vd., 2008; Levasseur vd., 2008; Samui, 2008). Benzer şekilde, zeminlerin kompaksiyon parametreleri farklı yapay zeka teknikleri ile tahmin edilmeye çalışılmıştır (Najjar vd. 1996; Abdel-Rahman 2008; Sinha ve Wang 2008; Gunaydin 2009; Isik ve Ozden, 2013; Tenpel ve Kaur, 2015; Suman vd., 2016).

Bu çalışmada, zeminlerin kompaksiyon parametrelerini tahmin etmek için farklı eğitim algoritmalarına dayanan birçok farklı yapay sinir ağı (YSA) modeli kullanılmıştır. Geliştirilen modellerde zeminlerin indeks özelliklerinden likit limit (LL), plastik limit (PL), çakıl yüzdesi (GC), kum yüzdesi (SC) ve ince tane yüzdesi (FC) değişken olarak seçilmiştir.

1. VERİ SETİ

Bu çalışmada kullanılan veri seti 451 adet zemin örneğinin indeks ve Standart Proktor (SP) test sonuçlarından oluşmaktadır. Veri setinin bir kısmı Türkiye'nin farklı yerlerinde bulunan zemin mekaniği laboratuvarlarından, geri kalan kısmı ise yayınlanmış çalışmalardan temin edilmiştir (Günaydın, 2009; Ölmez, 2007). Veri seti, zemin örneklerine ait likit limit (LL), plastik limit (PL), çakıl yüzdesi (GC), kum yüzdesi (SC) ince tane yüzdesi (FC) ve kompaksiyon parametreleri olan optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) verilerinden oluşmaktadır. Veri setindeki zemin örnekleri hem ince taneli hem de kaba taneli toplam on sekiz farklı zemin türü (CH, CI, CL, GC, GM, GP, GP-GC, GP-GM, GW, GW-GC,

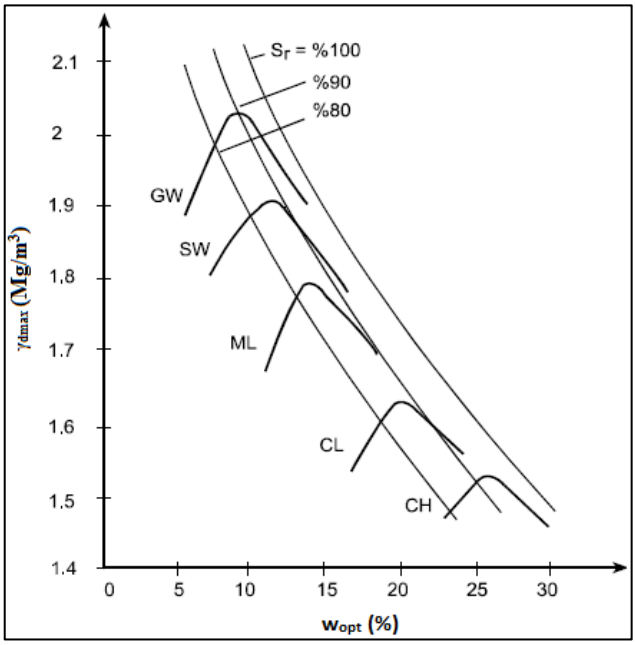
GW-GM, MH, MI, ML, SC, SP, SP-SC, SW-SC) olarak sınıflandırılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

İLK HARF	TANIM	İKİNCİ HARF	TANIM
G	Çakıl	**W**	İyi Derecelenmiş
S	Kum	**P**	Kötü Derecelenmiş
C	Kil	**H**	Yüksek Plastiseli
M	Silt	**L**	Düşük Plastiseli
O	Organik		

***GW:** İyi Derecelenmiş Çakıl, **SP:** Kötü Derecelenmiş Kum, **GW-GM:** İyi Derecelenmiş Çakıl-Siltli Çakıl, **SP-SC:** Kötü Derecelenmiş Kum – Killi Kum, **CH:**Yüksek Plastiseli Kil

Zemin türü, zemin kompaksiyonunu etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Genel olarak iri taneli zeminlerde düşük su içeriği-yüksek kuru birim hacim ağırlık değerleri elde edilir.

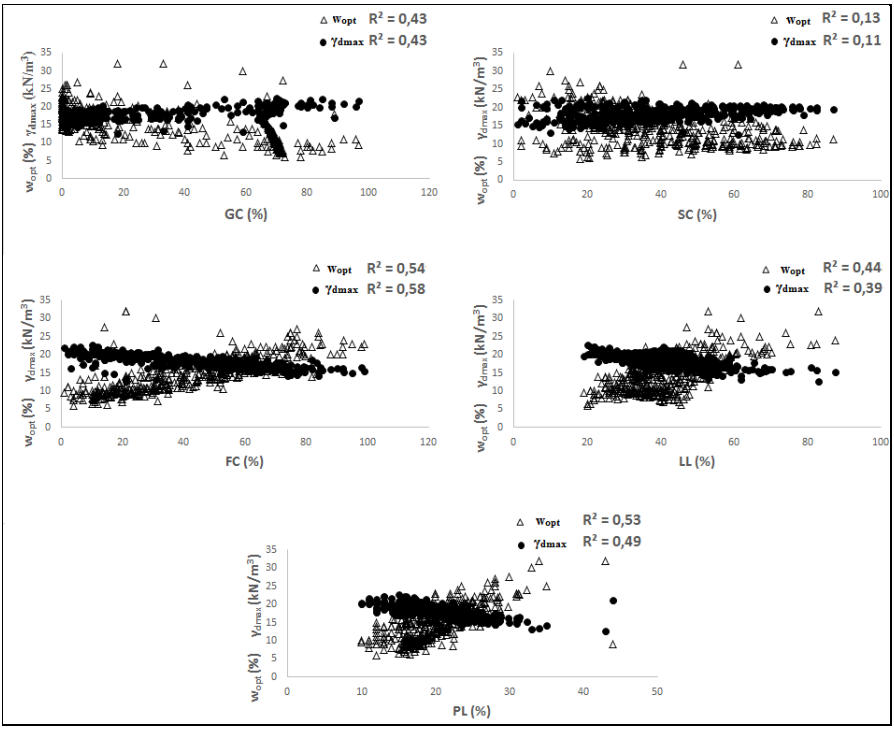


Şekil 1. Farklı zemin türleri için w_{opt} - γ_{kmax} eğrileri (Önalp, 1997)

İyi derecelenmiş bir zemin, kötü derecelenmiş bir zemine göre daha yüksek bir γ_{kmax} değerine sahiptir. Zemindeki ince malzeme miktarı arttıkça γ_{kmax} azalır. Kohezyonlu zeminlerin kompaksiyonu, ince malzemenin plastiklik özelliklerinden doğrudan etkilenir. LL ve PI arttıkça γ_{kmax} azalır. Çeşitli zemin türleri için ortalama kompaksiyon eğrileri Şekil 1'de gösterilmektedir. Veri setindeki zemin örneklerinin indeks ve kompaksiyon özelliklerine ait istatiksel tanımlamalar Tablo 2'de, indeks ve kompaksiyon parametreleri arasındaki ilişkiler ise Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 2. İndeks ve kompaksiyon parametreleri ile ilgili tanımlayıcı istatistikler

	LL (%)	PL (%)	GC (%)	SC (%)	FC (%)	w_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m^3)
Min	19	10	0	1	1	6	12.70
Max	87.50	44	97	87.20	99	32	22.60
Ort	41.13	20.04	20.57	38.79	40.65	14.40	18.37
Std. Sap.	11.04	4.68	22.31	17.69	22.44	4.76	1.79



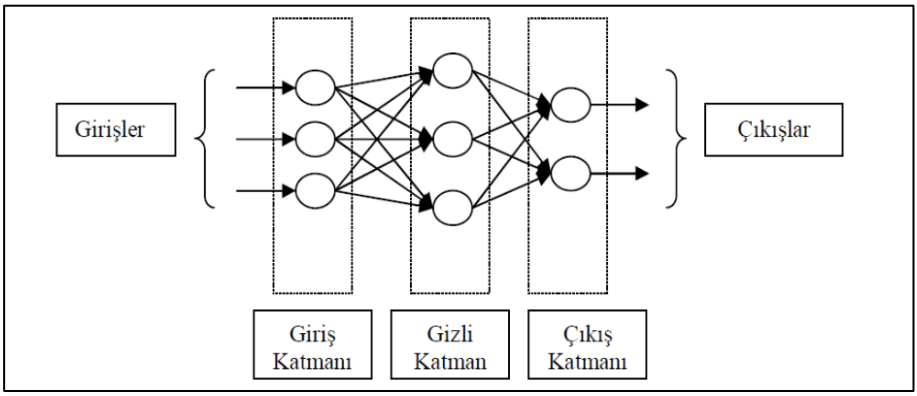
Şekil 2. Bu çalışmada indeks ve kompaksiyon parametreleri arasındaki ilişkiler

2. YÖNTEM

Son on yılda, geoteknik mühendisliğindeki neredeyse tüm karmaşık problemler için birçok yapak zeka yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmaların çoğu farklı ağ mimarilerine sahip YSA modellerine dayanmaktadır. Bu çalışmada, zor ve zahmetli laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık gibi kompaksiyon parametrelerinin, farklı YSA modelleri ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. YSA modellerinde, başta Levenberg-Marquardt (LM) ve Bayesian Regularization Neural Network (BRNN) gibi farklı eğitim algoritmaları kullanılmıştır.

2.1. Yapay Sinir Ağları (YSA)

YSA, basit bilgi işlem birimlerinden oluşan ve bu birimleri paralel çalıştırabilen bir bilgi işlem sistemidir. YSA'da ana amaç, girdi vektörü ve çıktı arasındaki ilişkiyi modellemektir. YSA, bir veri kümesinin örnekleri üzerinde eğitildikten sonra farklı girdilere sahip çıktıları tahmin eder. YSA, nöron adı verilen birbirine bağlı çok sayıda bilgi işlem biriminden oluşur. YSA'nın mimarisi, nöronları birbirine bağlayan ağırlıklara ve aktivasyon fonksiyonlarına bağlıdır. Tipik bir YSA'da ileri ve geri besleme olarak iki tane bağlantı mimarisi vardır. İleri besleme mimarisi, YSA katmanları arasındaki bağlantıların bir sonraki katmana ilerlediği mimarilerdir. Geri besleme mimarisi ise çıktıdan gelen giriş nöronları ile geriye doğru bir bağlantıya sahiptir. YSA, tek katmanlı veya çok katmanlı olabilir. Genel olarak, ileri beslemeli YSA mimarileri, giriş, gizli ve çıktı olmak üzere üç katmandan oluşur (Şekil 3).



Şekil 3. Yapay sinir ağı yapısı

Yapay bir sinir hücresinin matematiksel ifadesi şu şekilde ifade edilebilir:

$$y_i = F(G(x)) = F(\sum_{i=1}^{n} w_{ij} x_j - Q_i);\ x_i = (x_1, x_2, ...x_n) \quad (1)$$

Burada, $x=\{x_1,x_2,x_3....x_n\}$ işlenecek giriş değişkenleri, $w=\{w_{00},w_{01},...w_{ij}\}$ sinir hücresine gelen bilginin önemini ve hücre üzerindeki etkisini gösteren ağırlıklardır. Ağırlıkların değerleri öğrenme süresince değişebilir. Q_i eşik değeri, $F(.)$ aktivasyon fonksiyonu, $G(.)$ ise girdi işleyip çıktı üreten fonksiyondur. Uygulamada genellikle kullanılan sigmoid, tangential sigmoid, sin, radial basis gibi aktivasyon fonksiyonları vardır (Hsu vd., 1995; Govindaraju ve Rao, 2000; Mandic ve Chambers, 2001; Oztemel, 2003). Bir YSA'daki tüm hücreler aynı veya farklı aktivasyon fonksiyonuna sahip olabilir. Kullanıcının denemeleri sonucunda hangi aktivasyon fonksiyonunun kullanılacağına karar verilir.

2.2. Performans Ölçütleri

Bu çalışmada YSA modellerinin performansını test etmek için ortalama mutlak hata (MAE) ve korelasyon belirleme katsayısı (R) gibi istatistiksel ölçütler kullanılmıştır. Bu ölçütler aşağıdaki denklemlerle tanımlanır;

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\hat{Y}_i - Y_i\right| \quad (2)$$

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Y_i-\bar{Y})^2 - \sum_{i=1}^{N}((\hat{Y}_i-Y_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(Y_i-\bar{Y})^2}} \quad (3)$$

Burada Y_i, optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık parametrelerinin gerçek değerleridir. $\bar{Y}$, bu parametrelerin ortalama değeridir; $\hat{Y}_i$ tahmin edilen optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri; N ise toplam gözlem sayısıdır. MAE pozitif değerdir ve bu istatistiğin olabildiğince küçük olması beklenmektedir. Sıfıra yakın değerler modellerin gerçeğe yakın tahmin ettiğini gösterir. R ölçütü, gerçek ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi belirtir. Modelin başarısı için R katsayıları 1'e yakın olmalıdır.

3. UYGULAMA

Bu çalışmada, zeminlerin kompaksiyon parametreleri olan optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) farklı YSA modelleri kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. YSA modellerinde zeminlerin index özellikleri giriş parametresi olarak kullanılırken, w_{opt} ve γ_{kmax} ise çıkış parametresi olarak kullanılmıştır. Giriş ve çıkış değişkenlerine aşağıdaki denklemde verilen minimum - maksimum dönüşümü ile normalleştirme uygulanmıştır;

$$A_{normalized} = \frac{A_{actual} - A_{min}}{A_{max} - A_{min}} \tag{4}$$

Burada, $A_{normalized}$, A değerinin normalize edilmiş halidir. A_{actual}, değişkenin gerçek değeri, A_{max} ve A_{min} ise değişkenlerdeki en büyük ve en küçük değerlerdir. Değişkenler normalleştirildikten sonra modellere sunulmakta ve öğrenme süreci YSA modellerinde gerçekleştirilmektedir.

3.1. YSA Uygulama Sonuçları

Genel olarak YSA uygulamalarında, mevcut veri seti, eğitim ve test setleri olmak üzere iki altkümeye bölünmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada geliştirilen YSA modellerinde de bir eğitim ve test seti bulunmaktadır. 451 adet verinin rastgele seçilmiş %70'i eğitim, %30'u ise test seti olarak YSA modellerinde kullanılmıştır. Geliştirilen YSA modellerinin performansı korelasyon katsayısı (R) ve ortalama mutlak hata (MAE) ile değerlendirilmiştir.

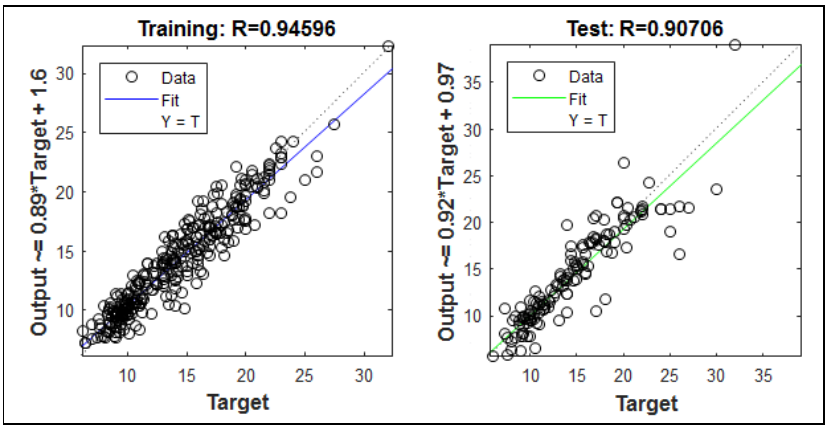
Optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) parametrelerini tahmin etmek için, YSA modellerinde Levenberge Marquardt (LM), Scaled Conjugate Gradient Algorithm (SCG) ve Bayesian Reguzilation (BR) gibi üç farklı eğitim algoritması kullanılmıştır. w_{opt} ve γ_{kmax} parametreleri için elde edilen sonuçlar Tablo 3 ve 4'de verilmiştir. Ayrıca, modellere ait tahmin edilen ve ölçülen değerler arasındaki regresyon grafikleri Şekil 4 ve 5'de verilmektedir.

Tablo 3. Optimum su içeriği (w_{opt}) için YSA modellerinin tahmin performansı.

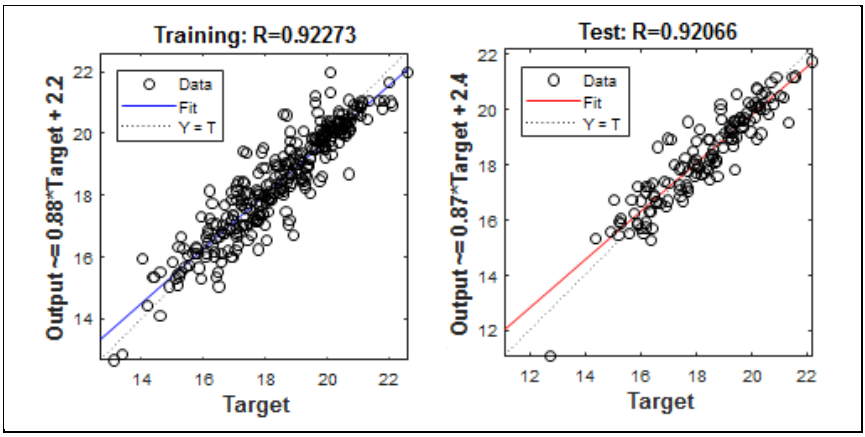
YSA Modeli	Eğitim		Test	
	MAE	R	MAE	R
LM	0.2639	0.9426	0.4218	0.8977
BR	0.2202	0.9459	0.5063	0.9070
SCG	0.6684	0.8387	1.0177	0.7765

Tablo 4. Maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) için YSA modellerinin tahmin performansı.

YSA Modeli	Eğitim		Test	
	MAE	R	MAE	R
LM	0.4601	0.9227	0.5804	0.9206
BR	0.3788	0.9355	0.6708	0.9016
SCG	0.6783	0.8912	0.6233	0.8815



Şekil 4. Optimum su içeriği (w_{opt}) için gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki karşılaştırma.



Şekil 5. Maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) için gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki karşılaştırma

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı YSA algoritmaları kullanılarak zeminlerin kompaksiyon parametreleri olarak bilinen maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) için tahmin modelleri geliştirilmiştir. Çalışma için sıkıştırılmış zeminlere ait toplam 451 deney verisi (indeks ve Standart Proktor) kullanılmıştır. Modellerde kullanılan girdiler, zemin numunelerine ait likit limit, plastik limit, çakıl yüzdesi, kum yüzdesi ve ince tane yüzdesi olarak seçilmiştir. Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık parametreleri ise çıkış parametreleri olarak seçilmiş ve her modelde gerçek değerlere mümkün olduğunca yakın tahmin edilmeye çalışılmıştır.

YSA modellerinde Levenberge Marquardt, Scaled Conjugate Gradient, Bayesian Reguzilation gibi farklı eğitim algoritmaları kullanılarak w_{opt} ve γ_{kmax} için en iyi tahmin performansını elde etmek adına birçok denemede bulunulmuştur. YSA modelleri içinde optimum su içeriğini (w_{opt}) tahmin etmede en başarılı olanı R = 0.9070 ve MAE = 0.5063 performansı ile BR algoritması olmuştur. Maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) parametresinin tahmininde ise LM algoritması R = 0.9206 ve MAE = 0.5004 performansı ile en başarılı olarak bulunmuştur. Genel olarak değerlendirildiğinde, geoteknik mühendisliğinde daha önce pek çok karmaşık problemin çözümünde başarılı sonuçlara ulaşan YSA modelleri, bu çalışmada zeminlerin kompaksiyon parametrelerinin tahmininde de başarısını göstermiştir.

KAYNAKÇA

Abdalla, J. A., Attom, M. F., Hawileh, R. (2015). Prediction of minimum factor of safety against slope failure in clayey soils using artificial neural network, Environmental Earth Sciences, Volume 73, Issue 9, pp 5463–5477.

Abdel-Rahman, A. H. (2008). Predicting compaction of cohesionless soils using ANN, In: Proceedings of the institution of civil engineers ground improvement, Vol 161, pp 3–8.

Al-Khafaji, A. N. (1993). Estimation of soil compaction parameters by means of Atterberg limits, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 26(4), 359–368.

Blotz, L. R., Benson, C. H., Boutwell, G. P. (1998). Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental, 124(9), 907-912.

Chik, Z., Aljanabi, Q. A., Kasa, A., Taha, M. R. (2014). Tenfold cross validation artificial neural network modeling of the settlement behavior of a stone column under a highway embankment, Arabian Journal of Geosciences, Vol. 7 (11), 4877-4887.

Engin, H. (2003). A laboratory investigation on the correlations of standard and modified compaction test values, Master’s thesis, Dokuz Eylul University.

Govindaraju, R. S., Rao, A.R. (2000). Artificial Neural Networks in Hydrology, Kluwer: The Netherlands.

Gunaydın, O. (2009). Estimation of soil compaction parameters by using statistical analyses and artificial neural networks, Environmental Geology, 57, 203–215.

Hsu, K., Gupta, H. V., Sorooshian, S. (1995). Artificial neural network modelling of the rainfall runoff process, Water Res. Research, 31, 2517-2530.

Isik, F., Ozden, G. (2013). Estimating compaction parameters of fine- and coarse-grained soils by means of artificial neural networks. Environ Earth Sci., 69, 2287–2297.

Jalalifara, H., Mojedifar, S., Sahebi, A. A., Nezamabadi-pour, H. (2011). Application of the adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of a rock engineering classification system, Computers and Geotechnics, Volume 38, Issue 6, pp 783-790.

Jeng, Y. S., Strohm, W. E. (1976). Prediction of the shear strength and compaction characteristics of compacted fine-grained cohesive soils, Final report, U.S. Army engineer Waterways Experiment Station, Soils and Pavement Laboratory, Vicksburg.

Levasseur, S., Malecot, Y., Boulon, M., Flavigny, E. (2008). Soil parameter identification using a genetic algorithm, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.; 32, 189–213.

Mandic, D. P., Chambers, J. A. (2001). Recurrent Neural Networks for Prediction - Learning Algorithms, Architectures and Stability, John Wiley & Sons Ltd.

Najjar, Y. M., Basheer, I. A. (1996). Utilizing computational neural networks for evaluating the permeability of compacted clay liners, Geotech Geol Eng 14, 193–212.

Nejad, F. P., Jaksa, M. B., Kakhi, M., McCabe, B. A. (2009). Prediction of pile settlement using artificial neural networks based on standard penetration test data, Computers and Geotechnics, Volume 36, Issue 7, pp 1125-1133.

Oh, H. J., Pradhan, B. (2011). Application of a neuro-fuzzy model to landslide-susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area, Computers & Geosciences, Volume 37, Issue 9, pp 1264-1276.

Ölmez, A. (2007). Regresyon yaklaşımlarla kompaksiyon parametrelerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Türkiye.

Önalp. A. (1997). Geoteknik Bilgisi ve Zemin Mekaniği, Sakarya Üniversitesi Yayınları, No: 27, Sakarya, Türkiye.

Öztemel, E. (2003). Yapay Sinir Ağları. Papatya Yayınları, İstanbul, Türkiye.

Padmini, D., Ilamparuthi, K., Sudheer, K. P. (2008). Ultimate bearing capacity prediction of shallow foundations on cohesionless soils using neurofuzzy models, Computers and Geotechnics, Volume 35, Issue 1, pp 33-46.

Proctor, R. R. (1933). Fundamental principles of soil compaction, Engineering News Record, 111, 245–248.

Samui, P. (2008). Support vector machine applied to settlement of shallow foundations on cohesionless soils, Computers and Geotechnics, Volume 35, Issue 3, pp 419-427.

Sinha, S. K., Wang, M. C. (2008). Artificial neural network prediction models for soil compaction and permeability, Geotech. Geol. Eng., 26, 47–64.

Sivrikaya, A. (2008). Models of compacted fine-grained soils used as mineral liner for solid waste, Environ. Geol., 53, 1585-1595.

Sivrikaya, A., Kayadelen, C., Cecen, E. (2013). Prediction of the compaction parameters for coarse-grained soils with fines content by MLR and GEP, Acta Geotechnica Slovenica, 2013/2.

Sridharan, A., Nagaraj, H. B. (2005). Plastic limit and compaction characteristics of fine-grained soils, Ground Improvement, 9(1), 17-22.

Sulewska, M. J. (2011). Applying artificial neural networks for analysis of geotechnical problems, Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, Vol. 18: 231–241.

Suman, S., Mahamaya, M., Das, S. K. (2016). Prediction of Maximum Dry Density and Unconfined Compressive Strength of Cement Stabilised Soil Using Artificial Intelligence Techniques. Int. J. of Geosynth. and Ground Eng., 2, 11.

Tenpe1, A., Kaur, S. (2015). Artificial Neural Network Modeling for Predicting Compaction Parameters based on Index Properties of Soil, International Journal of Science and Research (IJSR), Volume 4, Issue 7.

Wang, M. C., Huang, C. C. (1984). Soil compaction and permeability prediction models, J. Environ. Engrg., ASCE, Vol 110 (6), 1063-1083.

BÖLÜM 3

DEPREM ARAŞTIRMALARINDA SONLU FAY ve DEPREM DALGA ŞEKLİ MODELLEMESİ

Arş. Gör. Dr. Emrah BUDAKOĞLU[1]

[1] Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye. ebudakoglu@sakarya.eu.tr

GİRİŞ

Depremler eski çağlardan beri meydana gelen ve insanoğluna ciddi derecede zararlar veren doğa olaylarından biridir. Bu nedenle depremlerin detaylı bir şekilde araştırılması her dönemde ihtiyaç duyulan ve merak uyandıran bir konu olmuştur. Özellikle Türkiye'de son yıllarda meydana gelen şiddetli depremler ciddi mal ve can kayıplarına neden olması münasebetiyle deprem oluş süreçlerinin araştırılması ve sonrasında ortaya çıkabilecek zararların en aza indirgenmesinin çok önemli olduğu açık bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Bir deprem sonrası oluşan sismik dalgaların kayıt edilme işlemleri teknolojinin gelişmesiyle ivme kazanmış ve bunun neticesinde araştırmacılar tarafından detaylı çalışmalar ortaya konulmuştur. Bu çalışmalar büyük bir çoğunluğunu depremlerin kaynak özelliklerinin incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Basit tanımıyla bir depreme neden olan kaynak olarak faylar gösterilebilir ve bu faylar üzerinde meydana gelen kırılmalar depremlere neden olurlar. Bu bağlamda kırılmaların yani depreme neden olan kaynağın özelliklerinin ortaya çıkarılması depreme hangi süreçlerin neden olduğu ve bu süreçlerin nasıl geliştiği sorularının cevaplarının bulunmasında önemli katkılar sağlarlar. Bu aşamada ihtiyaç duyulan en önemli araç, deprem kayıtları yani sismogramlardır. Sismogramlar deprem anında kırılma süreçlerini adeta birebir yansıtan sinyallerden oluşur. Örneğin depremlerin büyük veya küçük olması sismogramların genliklerini ve kayıt uzunluklarını doğru orantılı olarak etkiler. Aynı zamanda frekans içerikleri de kırılma yüzeylerinde bulunan pürüzler (asperity) ile değişmektedir. Birden

fazla kırılmanın gerçekleşmesi gibi deprem oluşumu sonucundaki sismogramlarda ise farklı zamanlarda farklı sismik enerji varışlarının gözlemlenmesi beklenebilmektedir.

Depremin hasar verme potansiyeli ile doğrudan ilişkili olan pürüz (asperity) bölgeleri fay düzlemi üzerinde yer değiştirme miktarının göreceli olarak fazla olduğu yerlere denmektedir. Pürüz bölgeleri sonlu fay analizleri yapılarak araştırılabilmektedir (Wald, 1992). Hartzell ve Heaton (1983) yaptıkları detaylı çalışmalarla uzak alan (telesismik) deprem kayıtları kullanarak fay düzlemi üzerindeki yer değiştirmenin uzaysal dağılımını belirlemişlerdir. Daha sonra birçok araştırmacı teknoloji ve sismik kayıtçı ağlarının gelişmesi ile kolayca elde edilen telesismik deprem kayıtları ile kısa zaman içerisinde birçok olayı incelemiş ve sonlu fay analizleri yapmışlardır (Mendoza ve Hartzell, 1988; Mendoza, 1996; Abercrombie vd., 2001, Utkucu, 2002; Tan ve Taymaz, 2006, Budakoğlu, 2017). Sonlu fay analizleri aynı zamanda GPS (Global Positioning System/Küresel Konumlandırma Sistemi), InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar/Interferometrik Sentetik Açıklıklı Radar), Trilateration Leveling (Triletarasyon Yöntemi) ve kuvvetli yer hareketi verilerinin birlikte kullanılmasıyla da yapılabilir (Klotz vd., 1999; Wright vd., 1999; Wald ve Heaton, 1994; Wald, 1996; Konca vd., 2010). Sonlu fay analizleri sayesinde depremlerin kırılma evrimi, kayma miktarları, sismik boşluk bölgeleri, deprem etkileşimleri hakkında detaylı bilgiler ede edilebilir.

1. SONLU FAY DALGA ŞEKLİ MODELLEMESİ

Lay ve Wallace (1995) tarafından yapılan araştırmalar sismogramların sadece kaynak özelliklerinden etkilenen zaman serileri olmadıkları ortaya konmuştur. Kırılmanın özellikleri kontrol eden diğer unsurlar yol etkisi (path effect-deprem kaynağı ile kayıt istasyonu arasındaki yol) ve depremi kaydeden alet etkisidir. Böylece sismogramların modellenmesinde üç filtre bulunmaktadır:

$$W(t)=u(t)*Q(t)*I(t) \qquad (1)$$

Denklemde "*" simgesi konvolüsyonu, W(t) yapay (hesaplanan) sismogramı, u(t) deprem kaynağındaki yer değiştirmeyi, Q(t) yol etkisini ve I(t) ise alet etkisini temsil etmektedir. Bu etkilerden en karmaşık olanı Q(t)'dir. Yapılan bilimsel çalışmalar u(t) ve Q(t) olarak ifade edilen iki etkinin modellenmesine olanak sağlamıştır. I(t) ise günümüz teknolojisinde üretilen cihazlar için iyi bilinen bir özelliktir. Eğer bu parametreler bilinirse matematiksel modellemelerle yapay sismogramlar oluşturulabilir. Matematiksel modellemeler sonucu hesaplanan kuramsal (yapay) dalga şekilleri ile gerçek deprem kayıtlarının karşılaştırılması sonucu modellemenin doğruluğu kontrol edilir ve kırılma süreci hakkında detaylı bilgiler elde edilir. Sismolojide yapay ve gözlenmiş dalga şekillerinin karşılaştırılması işlemine deprem dalga şekli modellemesi (waveform modelling) denmektedir.

Hartzell (1978) tarafından dalga şekli modellemesinde gözlenmiş dalga şekillerinin Green's fonksiyonlarının kullanımı önerilmiştir. Green's fonksiyonlarının yapay olarak hesaplanması yerine, analizi yapılan

büyük bir depremin yakınında ve hemen hemen aynı mekanizmaya sahip depremin kaydı Green's fonksiyonu olarak kullanılır (Udias, 1999). Green's fonksiyonları genellikle yapay olarak hesaplanmakta ve elestodinamik kavramı içerisinde zaman ve uzay anlamında impulsif rastgele yönelimdeki bir birim kuvveti karşılayan yerdeğiştirmeleri temsil etmektedir (Aki ve Richards, 1980; Udias ve Buforn, 1996; Udias, 1999).

Dalga şekli modellemesi yapılacak olan depremler için istasyon dış merkez uzaklıkları genel olarak $30^{\circ} \leq \Delta \leq 90^{\circ}$ arasında değişmektedir (Udias, 1999). Bu durumun çeşitli sebepleri vardır. Dış merkez uzaklığı 30°'den daha az olan istasyonların uzak alan (telesismik) kayıtlarında bölgedeki kabuk yapısındaki değişimler nedeniyle kabuk-manto arasında kırılan-yansıyan fazlar yorumlama zorlukları ortaya çıkarmaktadır. 90°'den daha uzak istasyonlar için ise P ve S fazları çekirdek fazları ile karışmaktadır. Bir başka dikkat edilmesi gereken husus ise dalga şekli modellemesi yapılırken kaynak zaman fonksiyonu ve ilgili depremin odak derinliği seçimidir. Örneğin odak derinliğin fazla ve kaynak zaman fonksiyonun kısa seçildiği bir durumdaki modelleme ile odak derinliğinin yüzeye yakın (sığ) ve kaynak zaman fonksiyonun uzun olduğu modelleme sonuçları birbirine oldukça benzeyebilir (Lay ve Wallace, 1995). Bu durum önemli bir hatayı da beraberinde getirmektedir. Bu problem günümüzde gelişen geniş-bant istasyonlar ve iyi bir azimutal dağılıma sahip istasyonların verisinin kullanılmaya başlanmasıyla halledilebilmiştir. Herhangi bir yüzey boyunca yerdeğiştirme ve gerilmede görülen süreksizliklere

dislokasyon denir. Green's fonksiyonlarının türevleri ($G_{nk,l}$) cinsinden ortamdaki herhangi bir nokta için [$u_n(x_s,t)$] temsil fonksiyonu kullanılarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir (Aki ve Richards, 1980; Udias, 1999).

$$u_n(x_s,t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{\Sigma} \Delta u_i(\xi_S,\tau) C_{ijkl} G_{nk,l}(x_s,t;\xi_s,\tau) n_j(\xi_S) dS \qquad (2)$$

Eşitlikte bahsi geçen nj Σ yüzeyi boyunca her noktaya normal birim vektördür ve C_{ijkl} ortamda bulunan elastik sabitleri temsil etmektedir. Tüm bunların sonucunda bir sismik kaynak Σ yüzeyi üzerinde kayma vektörü Δu ile belirtilen yerdeğiştirmede süreksizlikle ifade edilmektedir. Buradaki Δu bir fay üzerindeki iki düzlemin birbirlerine göre göreceli hareketini temsil etmektedir. Yukarıda verilen denklem (2)'de sadece doğrultusu belirli olan tek kuvvet için çözüm vermektedir. Birim iğnecik kuvvet tarafından j doğrultusunda ortaya çıkan u_{ij} yerdeğiştirmesi şu şekilde yazılabilir.

$$u_{ij} = \frac{1}{4\pi\rho}\left[\begin{array}{l} \frac{1}{r^3}(3\gamma_i\gamma_j - \delta_{ij})\int_{r/\alpha}^{r/\beta} \tau\delta(t-\tau)d\tau + \frac{1}{r\alpha^2}\gamma_i\gamma_j\delta\left(t-\frac{r}{\alpha}\right) - \\ \frac{1}{r\beta^2}(\gamma_i\gamma_j - \delta_{ij})\delta\left(t-\frac{r}{\beta}\right) \end{array}\right] \qquad (3)$$

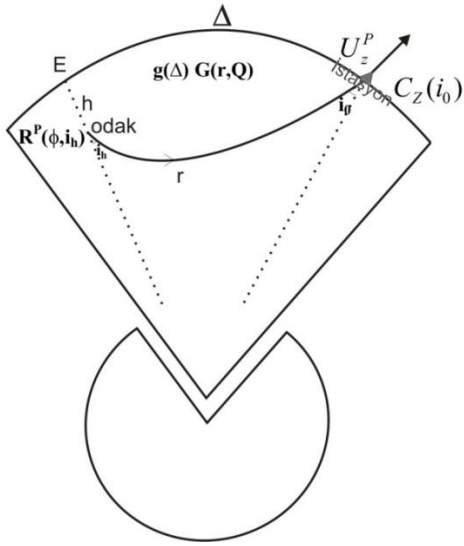
Denklem genel olarak P (α) ve S (β) dalga hızlarına sahip bir ortamda bulunan yer değiştirmelerin Green's fonksiyonları kullanılarak tanımlanmasıdır. Burada *j* mevcut olan kuvvetin yönünü ifade etmektedir. Kaynak bölgesinden başlayıp gözlem noktasına olan

doğrunun doğrultu kosinüslerini ($\gamma_i = (x_i/r)=\partial r/\partial x_i$) γ simgesi, uzaklığı ise r temsil etmektedir. Denklemin uzaklıkla azalma oranına uzak yada yakın alan durumlarını ifade eder. Denklem son iki terimi 1/r ile azaldığından kaynak bölgesinden uzakta bulunan yer değiştirmeleri, $1/r^3$ ile azalan terim (daha hızlı bir azalma var) kaynağın yakınında bulunan (yakın alan) yer değiştirmelerine daha duyarlıdır (Udias, 1999). Bu nedenden ötürü uzak alan kayıtları kullanılarak yapılan çalışmalarda denklemde bulunan son iki terim kullanılır (Utkucu, 2002).

Uzak-alan yayılımında P dalgalarının düşey bileşeni, denklem (3)'de bulunan parametreler uyarınca bir nokta kaynak için yeryüzündeki bir kayıt noktasındaki formülüzasyonu aşağıdaki şekilde yazılabilir (Aki ve Richards, 1980; Udias ve Boforn, 1996; Udias, 1999).

$$U_z^P = \frac{M_0 f(t - r/\alpha)}{4\pi\rho\alpha^3 r} R^P(\phi,\delta,\lambda,i_h) g(\Delta) C_Z(i_0) \qquad (4)$$

Eşitlikte, $f(t-r/\alpha)$ kaynak zaman fonksiyonuna, M_0 sismik momente, ρ yoğunluk, i_h ışının odağı terkediş açısına, α P dalgası hızına, $R^P(\phi,\delta,\lambda,i_h)$ P dalgası yayınım örüntüsüne (radiation pattern), i_0 ışının istasyona geliş açısına, $g(\Delta)$ dalga cephesinin geometrik yayılımına, Δ episantr uzaklığına, $C_Z(i_0)$ yerin serbest yüzeyinin dalga genliği etkisine karşılık gelmektedir (Udias, 1999) (Şekil 1).



Şekil 1: P dalgası ışın yörüngesi ve modellemede kullanılan simgeler (Udias, 1999)

Buradan yola çıkarak uzak-alan nokta kaynak yerdeğiştirmesi olayının SH dalgaları için olan ve β 'nın S dalgası hızını, R^{SH} $(\phi,\delta,\lambda,i_h)$ SH dalgası yayınım örüntüsünü temsil ettiği formülüzasyon aşağıdaki şekildedir.

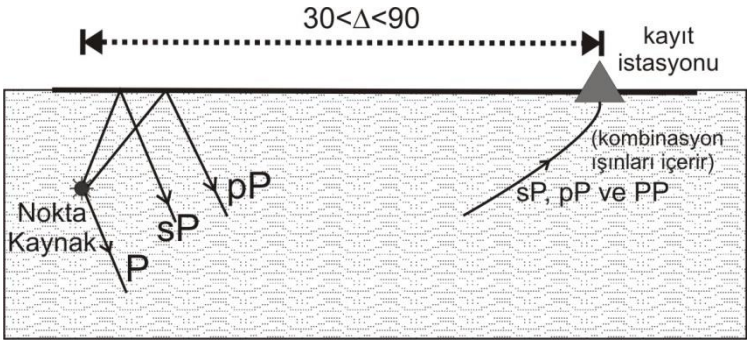
$$U^{SH} = \frac{M_0 f(t - r/\beta)}{4\pi\rho\beta^3 r} R^{SH}(\phi,\delta,\lambda,i_h) g(\Delta) C_Z(i_0) \tag{5}$$

Aynı şekilde P, SV ve SH dalgaları için yayınım örüntülerini içeren formüller denklem (6), (7) ve (8)'de ayrı ayrı verilmiştir (Lay ve Wallace, 1995). Eşitlikte bulunan ϕ, $\phi = \phi_f - \phi_s$ (ϕ_f fayın azimutu, ϕ_s istasyonun) formülü ile verilebilir. Aynı zamanda δ, fayın eğimini ve λ ise kayma vektörü (rake) açısına karşılık ile temsil edilmiştir.

$$R^P = \cos\lambda \sin\delta \sin^2 i_h \sin 2\phi - \cos\lambda \cos\delta \sin 2i_h \cos\phi + \sin\lambda \sin 2\delta(\cos^2 i_h - \sin^2 i_h \sin^2\phi) + \sin\lambda \cos 2\delta \sin 2i_h \sin\phi \quad (6)$$

$$R^{SV} = \sin\lambda \cos 2\delta \cos 2i_h \sin\phi - \cos\lambda \cos\delta \cos 2i_h \cos 2\phi + 1/2\cos\lambda \sin\delta \sin 2i_h \sin 2\phi - 1/2 \sin\lambda \sin 2\delta \sin 2i_h (1+\sin^2\phi) \quad (7)$$

$$R^{SH} = \cos\lambda \cos\delta \cos i_h \sin\phi + \cos\lambda \sin\delta \sin i_h \cos 2\phi + \sin\lambda \cos 2\delta \cos i_h \cos\phi - 1/2 \sin\lambda \sin 2\delta \sin i_h \sin 2\phi \quad (8)$$



Şekil 2: Odaktan çıkıp istasyona ulaşan dalgaların şematik gösterimi (Langston ve Helmberger, 1975)

Şekil 2'de h kadar derin bir odaktan çıkıp istasyonda kaydedilen dalgalar gösterilmektedir. P dalgası doğrudan gelen dalgaları ifade eder. pP ve sP ise dalgaları yüzeyden yansıyıp gelen derinlik fazlarıdır. Bu durumda (4) denklemi P, pP ve sP dalga fazlarının toplamı cinsinden denklem (7) ile ifade edilebilir (Langston ve Helmberger, 1975; Helmberger, 1983; Udias, 1999).

$$u_z^p(t) = \frac{M_0}{4\pi\rho_h\alpha_h^3 r} g(\Delta)G(r,Q)C_z(i_0)\begin{bmatrix} R^P(\phi,i_h)f(t-t_p)+ \\ R^P(\phi,\pi-i_h)V_{pP}f(t-t_P-\Delta t_{pP} \\ +R^S(\phi,\pi-j_h)V_{sP}f(t-t_P-\Delta t_{sP}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Eşitlik dikkatli bir şekilde incelendiğinde köşeli parantez içine alınan kısımda üç farklı toplam gözükmektedir. Bunlarda ilk olanı P dalgasına, ikincisi pP fazına ve sonuncusu da sP fazına karşılık gelmektedir.

Eşitlikte normalize edilmiş P ve SV dalgaları yayınım örüntüleri sırasıyla R^P ve R^S ile ifade edilmiştir. pP ve sP fazları için odağı terkediş açısı sırasıyla π-i_h ve π-j_h olarak kabul edilirse snell yasası uyarınca Sin j_h=(β_h/α_h)sin i_h olur. pP ve sP dalga fazları için serbest yüzeyde yansıyan dalgaların yansıma sabitleri V_{pP} ve V_{sP} ile temsil edilmiştir. t_P=r/α'ya eşittir. Burada t_P, P dalgasının varış zamanıdır. Δt_{pP} pP dalgalarının ve Δt_{sP} ise sP dalgalarının doğrudan gelen P dalgasına (t_P'ye göre) gecikme zamanlarıdır. Δt_{pP} ve Δt_{sP} ' ye ait bağıntılar aşağıdaki gibidir (Udias, 1999).

$$t_{pP} = t_P + \frac{2h\cos i_h}{\alpha_h} \quad (10)$$

$$t_{sP} = t_P + h\left(\frac{\cos j_h}{\beta_h} + \frac{\cos i_h}{\alpha_h}\right) \quad (11)$$

P, pP ve sP dalga fazı toplamına karşılık gelen P dalgası teorik yerdeğiştirmeleri ($U^P{}_z$) her bir istasyon için yukarıdaki eşitlikler göz önünde tutularak hesaplanabilir. Daha sonra bulunan teorik

yerdeğiştirmeler gözlenmiş sismogramlarla kıyaslanmadan evvel alet tepkisi *I(t)* ve sönüm faktörü *Q(t)* ile konvole edilerek bu etkiler içerilmelidir. Bu çalışmada alet tepkisi gözlenmiş dalga şekillerinden giderilmiştir.

Sönüm dalga şekli modellemesi çalışmalarında önemli bir yer tutar. Yerin iç bölgeleri tam elastik değildir. Bunun sonucu olarak da dalgalar sönüme uğrarlar. Cisim dalgalarının modellenmesinde konvolüsyon işlemi ile sönüm etkisi giderilmeye çalışılır (Lay ve Wallace, 1995; Hartzell vd., 1991; Mendoza vd., 1994). Konvolüsyona tabi tutulan parametre sönüm operatörü olan t^*'dir. t^*, t^*=t/Q formülü ile elde edilir. Burada t dalga yayılma zamanını, Q ise kalite faktörünü temsil etmektedir. Q parametresi yer içinde derinliğin (ve frekansın) bir fonksiyonu olarak değişir. En düşük Q değerlerine (en fazla sönüm) üst manto içinde karşılaşılmaktadır. t^* bir yol (path) integrali olarak formül ile ifade edilebilir.

$$t^* = \int_{yol} \frac{dt}{Q} = \sum_{i=1}^{N} \frac{t_i}{Q_i} \qquad (12)$$

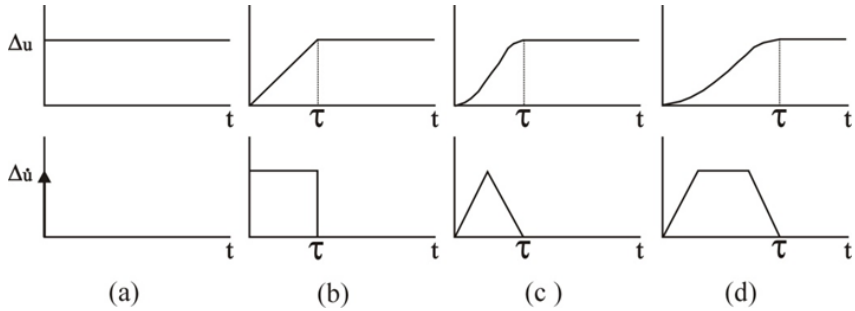
Burada i indisi tabaka sayısını belirtmektedir. 1 sn büyük periyotlu cisim dalgaları söz konusu olduğunda $30^\circ<\Delta<90^\circ$ arası telesismik uzaklıklarda t^* sönüm operatörü yaklaşık sabittir. Yine bu aralıkta P dalgaları için $t^*\approx1$ ve S dalgaları için de $t^*\approx4$ değerlerini almaktadır. t^* parametresini de içeren sönüm denklemi aşağıda ifade edimiştir (Lay ve Wallace, 1995; Udias, 1999).

$$A=A_0e^{-\pi ft^*} \quad (13)$$

Denklem (13) incelendiğinde, S dalgalarının P dalgalarına göre çok daha hızlı sönümlendiği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle P dalgaları kırılmanın ayrıntısına çok daha fazla duyarlıdır. t^* sönüm operatörü değeri yüzeydeki bir kaynak için 0.1-5 Hz frekans aralığında P dalgaları için 1-0.5 Hz aralığında bulunmaktadır (Choy ve Cormier, 1986). S dalgaları için ise bu değerden aynı frekans aralığında 4.5 kat daha büyük bir değer almaktadır.

Kaynak zaman fonksiyonu sismik dalga şekli modellemesi yapılırken dikkatle seçilmesi gereken önemli bir unsurdur. *f(t)* olarak bilinen kaynak zaman fonksiyonu (source time function), kaymanın (Δu) zaman bağımlı olduğunu ifade etmektedir. Yapılan çalışmalar (Aki ve Richards, 1980; Udias, 1999) yerdeğiştirmenin kayma yerine kayma hızına ($\Delta\hat{u}(t)$) bağımlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum kaynağın sadece hareket durumundayken enerji yaydığını ve sabit durumdayken herhangi bir enerji çıkışının bulunmadığına işaret etmektedir. Böylece kaynak zaman fonksiyonunun kayma hızının zaman bağımlılığını ifade ettiğini açıkça söyleyebiliriz. Şekil 3.'de çalışmalarda karşımıza çıkan ve sıklıkla kullanılan kaynak zaman fonksiyonları ve bunların türevleri görülmektedir. Tüm fonksiyonlarda kayma t=0 anında başlamakta ve Δu'ya (en büyük değere) ulaştıktan sonra sabit kalmakta olduğu yani fayın eski durumuna dönmediği kabulü yapılmıştır. Şekil 3(a)'da Δu(t) basamak-fonksiyonu (step

function) şeklinde olarak gözükmektedir. t=0'da kayma anlık olarak en büyük değerine ulaşmakta ve kayma hızı impulsifdir. Şekil 3(b)'de Δu(t), t=0'dan t=τ'ya kadar doğrusal olarak yükselmektedir. τ anında en büyük değerine ulaşmaktadır. Burada artık yükselim zamanı (rise-time) τ adında kaynağa ait yeni bir parametre ortaya çıkmaktadır. Yükselim-zamanı (τ) kaymanın en büyük değerine ulaşması için geçen süre olarak ifade edilebilir. Şekil 3(c)'de gerçeğe daha yakın bir kaynak zaman fonksiyonu ortaya konulmuştur. Kaynak-zaman fonksiyonun belirttiği kırılma olayı τ/2 gibi eşit bir yükselime (rise) ve düşüme (fall) sahiptir. Yine kayma hızı sıfırdan başlar ve en büyük değerine yükselmektedir. t=τ'da tekrar sıfıra doğru inişe geçmektedir. Son olarak Şekil 3(d)'de kayma hızı en büyük değerine ulaştıktan sonra bu konumunu belli bir süre sürdüren ve ardından tekrar sıfıra azalan bir yamuk (trapezoid) kaynak zaman fonksiyonu gösterilmektedir. Burada kaynak sürecinin uzatıldığı bir durum söz konusudur.



Şekil 3: Kayma (Δu) ve kayma hızı ($\Delta\hat{u}(t)$) arasındaki çeşitli kaynak-zaman fonksiyonları üzerindeki zaman bağımlı ilişki a) impulsif, b) "τ" süreli dikdörtgen, c) "τ" süreli ikizkenar üçgen ve d) "τ" süreli yamuk kaynak zaman fonksiyonları. Ayrıntı için metne bakınız (Udias, 1999)

Bilindiği üzere depremleri oluşturan kaynak süreci oldukça karmaşıktır. Bu durumda az önce bahsi geçen tüm kaynak zaman fonksiyonları deprem kaynağının tanımlanmasında basit kalabilir. Çözüm olarak üçgen ve/veya yamuk kaynak zaman fonksiyonlarının toplamından oluşan bir birleşim deprem kaynağını tanımlama da yeterli bir yaklaşım olabilecektir.

2. SONLU FAY ANALİZİ

Bir deprem, çok genel bir tanımla fay parçaları (sub-faults) olarak isimlendirilen birçok düzensiz fakat ölçekli olan kırılmaların meydana gelmesiyle oluşur. Depremlerin kaynağı, olayın kinematiği incelendiğinde fay düzlemi üzerindeki yer değiştirmelerin (kayma) dağılımı olarak kabul edilebilir. Fay düzlemi üzerindeki her bir küçük fay parçası bir öncekinden belirli bir süre ve miktarda hareket etmektedir. Böylece tüm fay alanındaki kırılma evrimi tasvir edilmeye çalışılır. Depremlere neden olan faylanma alanının küçük fay parçalarına bölünmesi bilinmeyen sayısının fazlalaşmasına ve bunun sonucunda da ters çözüm işleminin duyarsızlaşmasına sebep olmaktadır. Bu gibi durumlardan kaçınmak ve problemin doğrusal hale getirilebilmesi için çeşitli araştırmacılar (Hartzell ve Heaton, 1983; Takeo, 1992 ve Yoshida, 1992) tarafından bazı kabuller yapılarak ters çözüm işlemleri yapılmıştır. Hartzell ve Heaton (1983), kırılmanın odaktan başladığını ve dairesel bir zaman penceresinde aynı hızda ilerlediği kabulünü yapmışlardır. Takeo (1992) ve Yoshida (1992) ise ters çözümün duraylı bir hale gelebilmesi için çeşitli sınırlandırmalar ve yuvarlatmaların yanında her bir fay parçası için miktarı (L) ve yarı

genişliği (τ) önceden belirlenmiş ikizkenar üçgenlerin bir araya gelmesiyle oluşan ve çoklu zaman penceresi ters çözümü olarak adlandırılan kaynak zaman fonksiyonu tanımlamışlardır. Bu yaklaşımın en önemli avantajı kaynak zaman fonksiyonu tipinin önceden belirlenmesi ve her hücre için sabit bir değer kabul edilmesi durumunu ortadan kaldırmasıdır.

Kayma dağılımlarının (yer değiştirmelerin) belirlenmesi için faya ait doğrultu, eğim, kayma açısı ve derinlik parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametrelerden faya ait doğrultu ve eğim açıları sabit tutulurken kayma açısı ister sabit tutulur veya isteğe göre de $\pm 45^{\circ}$ içinde serbest bırakılabilir. Kayma açısının serbest bırakılması, modelleme esnasında bilinmeyen sayısının fazlalaşmasına ve dolayısıyla ters çözümün yapılamaması gibi durumlara yol açabilir. Bu nedenle değişken kayma açısı seçeneği ile modelleme yapılacağı durumlarda bu hususun varlığı bilinerek hareket edilmesi gerekmektedir.

2.1. Çalışmada Kullanılan Sonlu Fay Ters Çözüm Yöntemi

Tez çalışmasında kullanılan ters çözüm tekniği Hartzell ve Heaton (1983), Kikuchi ve Kanamori (1991), Yoshida (1992), Yoshida vd. (1996), Ide ve Takeo (1997) gibi çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiş yöntemleri temel almaktadır. Ayrıca çalışmada Yagi ve Kikuchi (2000), Yagi (2004), Yagi vd. (2004) tarafından geliştirilmiş cisim dalgası ters çözüm programı kullanılmıştır.

Ters çözümde tüm faylanma alanına ait kırılma davranışının belirlenmesi için fay alanı her bir parçası kaynak olarak düşünülen küçük fay parçalarına ayrılır. Her bir fay parçası nokta kaynak olarak düşünülerek kırılmanın davranışı belirlenmeye çalışılır. Tüm bu bilgiler doğrultusunda faylanma alanı XX ve YY genişliğinde MxN adet fay parçasına bölünmüştür (Şekil 4). Her bir fay parçası üzerindeki kırılmanın zaman içerisindeki değişimi (kaynak zaman fonksiyonu), τ yarı genişliğinde, L adet ikiz kenar üçgen ile tanımlanmıştır. Kayma vektörü faylanma alanını oluşturan herbir fay parçası üzerinde isteğe göre sabit ya da değişken alınabilir. Değişken olarak alınması durumunda her bir vektörün bileşkesi hesaplanır ve bu bileşkelerin değişimi ile fay parçasının kayma vektörü elde edilir. Bahsi geçen parametreler ile j istasyonundaki dalga şekli

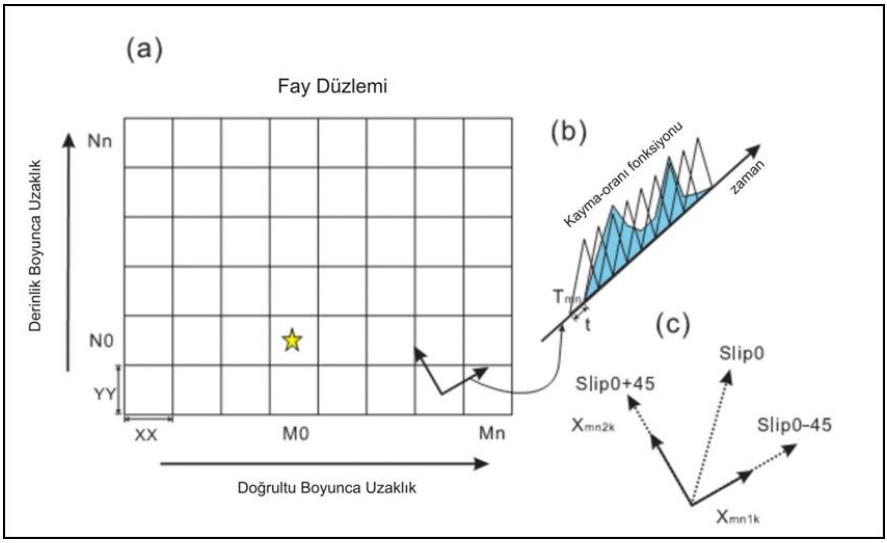
$$W_j^{obs}(t_i) = \sum_{mnlk} X_{mnlk}\, g_{mnkj}(t_i - (l-1)\tau - T_{mn}) + e \qquad (14)$$

ile tanımlanır. Burada $X_{mnlk,}$ *l*-inci zaman adımında *mn*' inci fay parçasındaki *k*'ncı kayma vektörü bileşeni; $g_{mnkj}(t)$, Green fonksiyonu (birim kaymalı *mn* fay parçasındaki bir nokta kaynaktan gelen başlangıç dalgası); $T_{mn,}$ fay parçasındaki kaynak zaman fonksiyonu başlangıç zamanı; *e*, varsayılan Gaussian hata bileşeni şeklinde açıklanabilir. Telesimik kayıtların modellenebilmesi için kullanılan Green fonksiyonu Kikuchi ve Kanamori (1991) metoduna göre hesaplanmıştır. Yukarıda eşitlik (14)'de verilen denklem vektörel şekilde yazılmak istenirse

$$y=Ax + e \tag{15}$$

halinde yazılabilir. Burada A, jakobiyen matrisidir (veri sayısı × model parametre sayısı boyutunda). Veriler için değişinti kavramı (σ_j) genel anlamda en büyük dalga genliğinin (DG_{maks}) %10'u kadar tercih edilir ve istasyon ağırlandırmaları $1/(DG_{maks} \times \sigma_j)$ şeklinde olur.

Deprem oluşumundaki kırılmanın ayrıntılı bir şekilde ortaya koyulabilmesi için faylanma alanı daha küçük fay parçalarına bölünebilir ve her bir fay parçasına ait kaynak zaman fonksiyonundaki ikizkenar üçgenlerden oluşan eleman sayısı çoğaltılabilir. Kayma açısının sabit tutulması sonucu $M \times N \times L$ adet bilinmeyen ortaya çıkar. Değişken tutulması durumunda ise $M \times N \times L \times 2$ bilinmeyen ortaya çıkacaktır. Görüldüğü gibi bilinmeyen sayısı fazlalaşmaktadır ve bu nedenle ters çözüm duraylılığını yitirebilir. Bu gibi sorunların önüne geçebilmek amacıyla zaman ve uzay ortamında düzgünleştirme (smoothness) işlemi uygulanabilir.



Şekil 4: Kaynak parametrizasyonunu ifade eden temsili şema (Yagi vd., 2004; Yagi, 2004). a) Fay düzlemi, fay parçalarına bölünmüştür. b) Mn. fay parçası için moment fonksiyonunun parametresi. Tmn maksimum kırılma hızı tarafından belirlenen herbir fay parçasındaki kaynak zaman fonksiyonunun başlangıç zamanını verir. c) Kayma vektörünün bileşenlerini gösterir

Örneğin, Hartzell ve Heaton (1983), faylanma alanını daha küçük parçalara ayırarak düzgünleştirme oranını arttırılmasının daha doğru bir yaklaşım olduğunu savunmuşlardır. Zaman ortamındaki düzgüneştirme işlemi

$$0 = X_{mnk(l-1)} - 2X_{mnkl} + X_{mnk(l-1)} + e_t , \quad 2 \leq l \leq L-1 \qquad (16)$$

şeklinde yazılabilir. Burada *e* Gaussian hata birimidir ve vektörel anlamada aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$0 = Tx + e_t \qquad (17)$$

Uzay ortamı için Laplace sonlu farklar operatörü kullanılarak

$$0 = \sum_{l}\left[X_{(m-1)nkl} + X_{(m+1)nkl} + X_{m(n-1)kl} + X_{m(n+1)kl} - 4X_{mnkl}\right] + e_d \quad (18)$$

şeklinde yazılabilir. Burada e_d Gaussian hata birimidir ve vektörel anlamada basit bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$0 = Dx + e_d \quad (19)$$

Eğer kırık yüzeye ulaşıyorsa, yüzeye en yakın konumdaki faylar için

$$0 = \sum_{l}\left[X_{(m-1)nkl} + X_{(m+1)nkl} + X_{m(n-1)kl} - 3\,X_{mnkl}\right] + e_d, \quad n=N \quad (20)$$

işlemi uygulanır. Tüm bunların yanında kayma açılarının başlangıç seviyelerinde olması için yumuşaklaştırma işleminin uygulanması gerekmektedir. Bu sebeple kayma açışı için,

$$0 = X_{m1l} - X_{mn2l} + e_v \quad (21)$$

Burada e_v Gaussian hata birimidir. Bu, aşağıdaki basit vektör biçiminde yeniden yazılabilir.

$$0 = Vx + e_v \quad (22)$$

Gözlenmiş veriler ve yumuşaklaştırma operatörleri kullanılarak rezidüellerin karelerinin (S_w) en aza indirgeyecek model parametreleri vektörel anlamda aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$S_w = (x, \beta_t, \beta_d, \beta_v) = \|y - Ax\|^2 + \beta_t^2 \|Tx\|^2 + \beta_d^2 \|Dx\|^2 + \beta_v^2 \|Vx\|^2 \quad (23)$$

Eşitlikte verilen β_t, β_d, β_v sırasıyla kaynak zaman fonksiyonu, kayma dağılımı ve her bir fay parçasındaki kayma açısı değeri için yumuşatma operatörlerinin göreceli ağırlıklarının tersini ifade etmektedir. β'nın yüksek değerde olması kaynak zaman fonksiyonunu ve kayma dağılımını daha fazla yuvarlatma etkisine sahip iken, kayma açısının ise başlangıç seviyelerindeki değerlerine yakın olmasını sağlar.

Ters çözüm işleminde negatif olmayan en küçük kareler yaklaşım (nonnegative least sequares, NNLS) metodu kullanılmaktadır. Bunun sebebi fay düzlemi üzerindeki kayma dağılımının hesaplanması aşamasında kullanılan parametrelerin hiçbir tanesinin değeri negatif (ters yönde) olmamalıdır. Kayma dağılımı değerinin negatif değer alması bahsi geçen fay parçasında meydana gelen kırılmanın ters yönde gerçekleştiği anlamını taşımaktadır ki bu durum fiziksel olarak mantıklı değildir. Bunun yanında kırılmanın sürecide geriye doğru işleyemez. Bu gibi fiziksel olarak imkanı bulunmayan durumlar ters çözümde duraysızlığa neden olmaktadır.

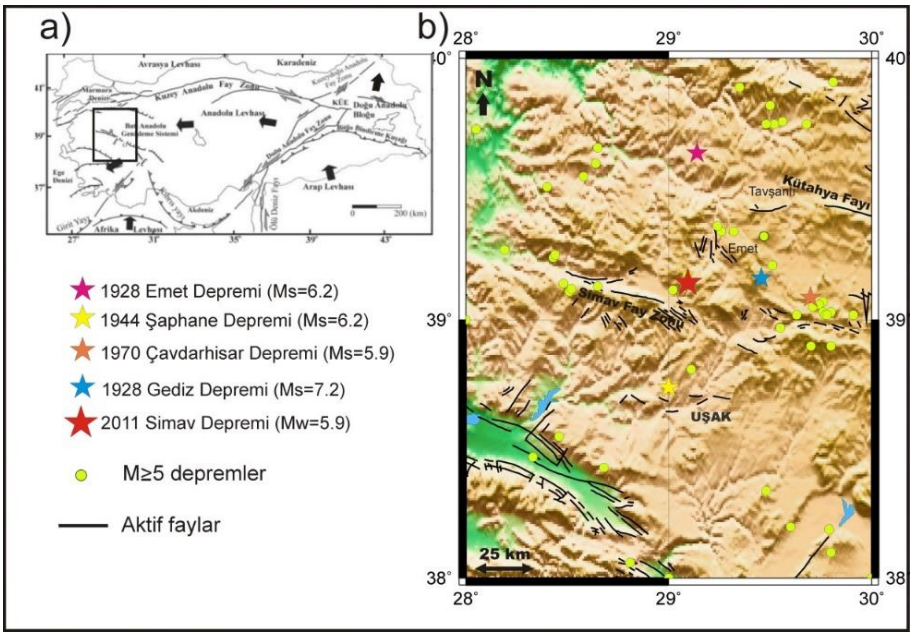
3. 19 MAYIS 2011 SİMAV DEPREMİ (M_W=5.9) SONLU FAY ANALİZİ

Türkiye Alp Himalaya deprem oluşum kuşağı içerisinde bulunmasında dolayı deprem olma potansiyeli çok yüksek bir ülkedir. Afrika ve Arabistan levhalarının kuzeye hareketi ve Avrasya Levhası ile çarpışması sonucu Anadolu plakasının saatin tersi yönünde batıya kaçmasına neden olmaktadır (Şekil 5a). Bu tektonik hareketler neticesinde Batı Anadolu'da birbirine paralel uzanımlı çok sayıda faylar oluşmaktadır.

Batı Anadolu'nu en önemli aktif tektonik yapılarından biri Simav Fay Zonu (SFZ)'dur. 19 Mayıs 2011 Simav depremi dış merkezi bu fay zonuna rastlamaktadır (Şekil 5b). SFZ, Simav Grabeni olarak bilinen Batı Anadolu iç kısmında bir çöküntü alanı oluşturmaktadır. SFZ, 220 km uzunlukta BKB-DGD yönelimli ve 5 alt fay segmentinden oluşan (Sındırgı, Simav, Şaphane, Banaz ve Sincanlı) sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay zonudur (Emre ve Duman, 2011; Zülfikar vd., 2011, Emre vd., 2012, Budakoğlu ve Utkucu, 2013).

19 Mayıs 2011 Simav Depremi (M_w=5.9) yerel saat ile 23:00'de yer kabuğunun 8 km derinliğinde meydana gelmiştir. Depremin dış merkez koordinatları 39.152^{o}K - 29.088^{o}D'dur. Farklı sismoloji merkez ve araştırmacıların bu deprem için verdiği kaynak parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Elde edilen kaynak mekanizması çözümleri genel olarak 2011 Simav depremi için küçük bir doğrultu atım bileşeni olan baskın normal faylanma önermektedir (Budakoğlu ve Utkucu, 2013).

Depremin meydana geldiği Kütahya ve civarı geçmiş dönemlerde şiddeti depremlere maruz kalmış ve mal ve can kayıpları yaşanmıştır. Bu depremlerden bazıları 1928 Emet Depremi (M_s=6.2), 1944 Şaphane Depremi (M_s=6.2), 1970 Gediz Depremi (M_s=7.2) ve 1970 Çavdarhisar (M_s=5.9) depremleridir (Şekil 5b).



Şekil 5: a) Türkiye ve yakın çevresinin tektonik unsurlarını gösteren harita (Barka ve Kandisky-Cade, 1988). b) Kütahya-Simav ve çevresinin tektonik unsurları ve aletsel dönemde (1900'den sonra) meydana gelen Mw≥ 5.0 depremlerin lokasyonları. Depremler KRDAE-BDTİM (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü-Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi)'den alınmıştır. Aktif faylar Şaroğlu vd. (1992)' den derlenmiştir (Budakoğlu ve Utkucu, 2013).

Tablo 1. 19 Mayıs 2011 Simav depreminin farklı sismoloji merkez ve araştırmacıların elde edilen kaynak parametreleri.

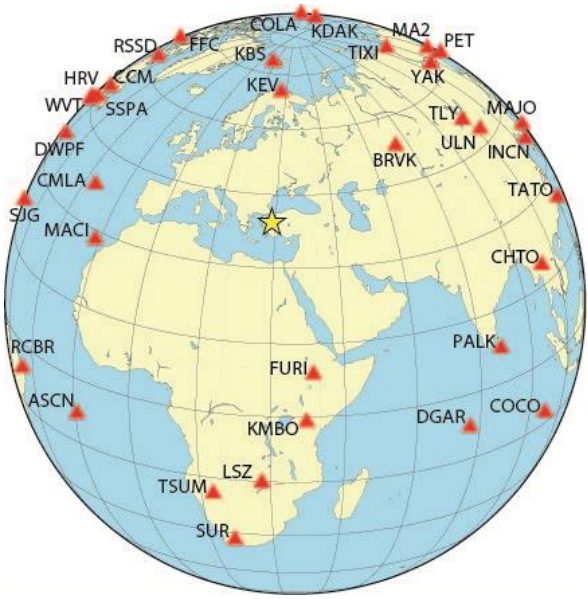
	KRDAE		**DDB**		**USGS**		**HARV**		**Budakoğlu ve Utkucu (2013)***	
	DD1	**DD2**	**DD1**	**DD2**	**DD1**	**DD2**	**DD1**	**DD2**	**DD1**	**DD2**
Doğrultu (°)	290	89	315	116	275	111	286	98	84	301
Eğim (°)	52	41	56	36	37	54	46	44	43	53
Kayma Açısı (°)	-74	-109	-79	-105	-102	-80	-85	96	-119	66
M_o (x10 ^{24}dyne-cm) Magnitüd (M_w)	3.81 5.9		3.9 5.8		6.7 5.8		8.7 5.9		7.7 5.9	
Enlem (°)	39.152		39.133		39.114		39.080		-	
Boylam (°)	29.088		29.082		29.124		29.110		-	
Derinlik (km)	7.6		6.0		15.0		12.1		8.0	

* Kaynak parametreleri nokta kaynak ters çözüm yöntemi ile bulunmuştur.
KRDAE: Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü; USGS: Amerikan Jeolojik Araştırmalar Kurumu; DDB: Deprem Dairesi Başkanlığı; HARV: Harvard GCMT; NOA: Atina Ulusal Gözlemevi

3.1. Kullanılan Veri

11 Mayıs 2011 Simav depreminin sonlu fay modellemesi için telesismik uzaklıklarda kaydedilmiş 33 P ve 9 SH dalga şekli kullanılmıştır. Modellemede kullanılan uzak alan geniş-band veriler internet aracılığıyla IRIS (http://ds.iris.edu/wilber3/find_event)'den elde edilmiştir. Veriye 0.01-1.0 Hz aralığında bant-geçişli filtre uygulanmış ve 0.5 s aralıklarla yeniden örneklenmiştir. Depremin kırılma özelliklerinin ortaya çıkarılması için depremin büyüklüğü göz önüne alınarak P ve SH dalga şekilleri kayıt uzunluğu 30 sn olarak

tercih edilmiştir. Sonlu fay modellemesinde kullanılan istasyonlara ait azimutal dağılımlar Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6: 19 Mayıs 2011 Simav depremi sonlu-fay dalga şekli ters çözümünde kullanılan telesismik istasyonların azimutal dağılımı. Yıldız depremin dış merkezini göstermektedir

3.2. Sonlu Fay Model Parametrizasyonu

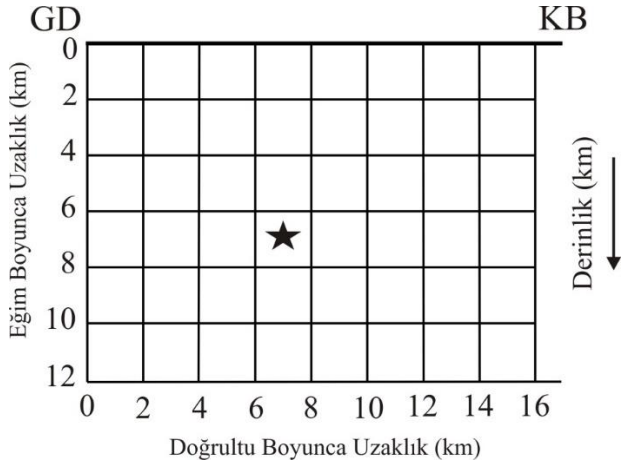
Sonlu fay deprem dalga şekli modellemesi için Yagi and Kikuchi (2000), Yagi (2004), Yagi vd. (2004) tarafından geliştirilmiş bir ters çözüm programı kullanılmıştır. Model fay düzleminin tanımlanmasında Budakoğlu ve Utkucu (2013) tarafından verilmiş mekanizma çözümünden elde edilen doğrultu (84°), eğim (43°) ve rake (-119°) açıları kullanılmıştır. 39.152^{o}K – 29.088^{o}D koordinatları ve 8 km derinlik parametreleri Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü-

Bölgesel Deprem ve Tsunami İzleme Merkezi (KRDAE-BDTİM) kataloglarından elde edilerek modellemede depremin odak lokasyonu bilgileri olarak tanımlanmıştır. 16 km x 12 km boyutlarındaki bir model fay düzlemi kırılma alanının temsili için kullanılmıştır. Model fay düzlemi doğrultu boyunca 2 km, eğim boyunca 2 km boyutlarında 48 fay parçasına (doğrultu boyunca 8 ve eğim boyunca 6 fay parçası) bölünmüştür (Şekil 7). Deprem odağının model fayın derinlik kenarlarına uzaklıkları yapılacak ters çözüm denemeleri ile belirlemeye çalışılacaktır.

Depremin modellenmesinde kırılma hızı (*Vr*) 3 km/sn tercih edilmiştir. Tüm fay parçaları kayma yükselim zamanı eşit yükselim ve düşümlü, 1.0 sn süreli birbiriyle örtüşen 6 üçgen zaman-fonksiyonu ile temsil edilmiştir. En uygun sonuçların elde edilmesi için çok sayıda ters çözüm denemesi yapılmıştır. Sonlu fay dalga şekli ters çözüm için Tablo 2'de verilen kabuksal hız modeli kullanılmıştır.

Tablo 2. 19 Mayıs 2011 Simav depremi sonlu-fay analizinde kullanılan kabuksal hız modeli (Tezel vd., 2010).

Kalınlık (km)	**V_p(km/sn)**	**V_s(km/sn)**	**ρ (gr/cm^3)**
2.0	2.59	1.50	2.66
10.0	4.85	2.80	2.75
17.0	5.89	3.40	2.80
5.0	6.41	3.70	2.88
0.0	7.97	4.60	3.00

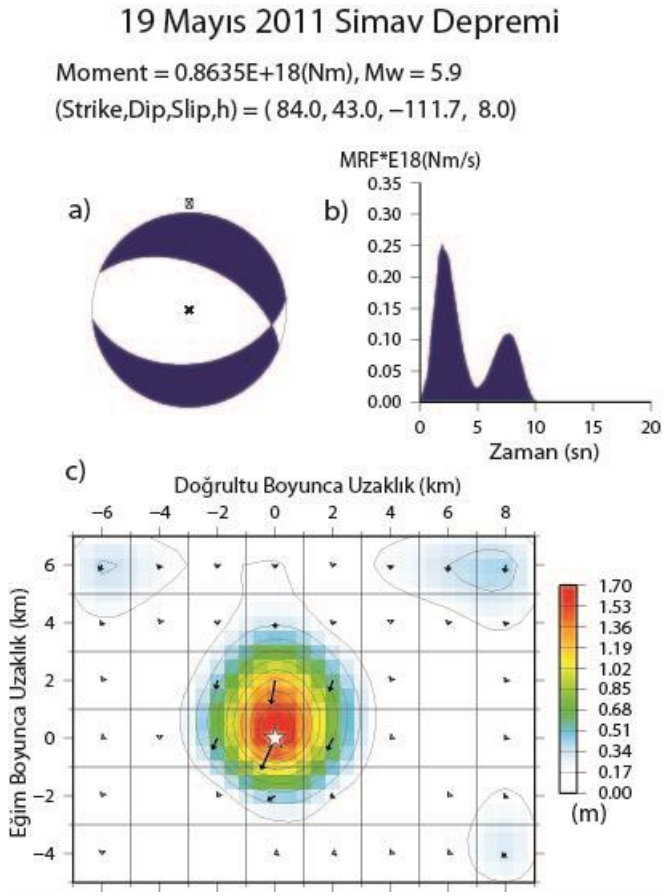


Şekil 7: 19 Mayıs 2011 Simav depreminin ters çözümü için kullanılan sonlu-fay modeli. Modelde fay düzlemi doğrultu ve eğim boyunca 2 km aralıklarla toplam 48 adet fay parçasına bölünmüştür. Model üzerinde bulunan yıldız depremin odağını temsil etmektedir. Gösterimdeki odağın üst, GD ve KB kenarlara olan uzaklıkları (sırasıyla 7, 7 km ve 9 km) ters çözüm denemeleri sonucunda elde edilmiştir.

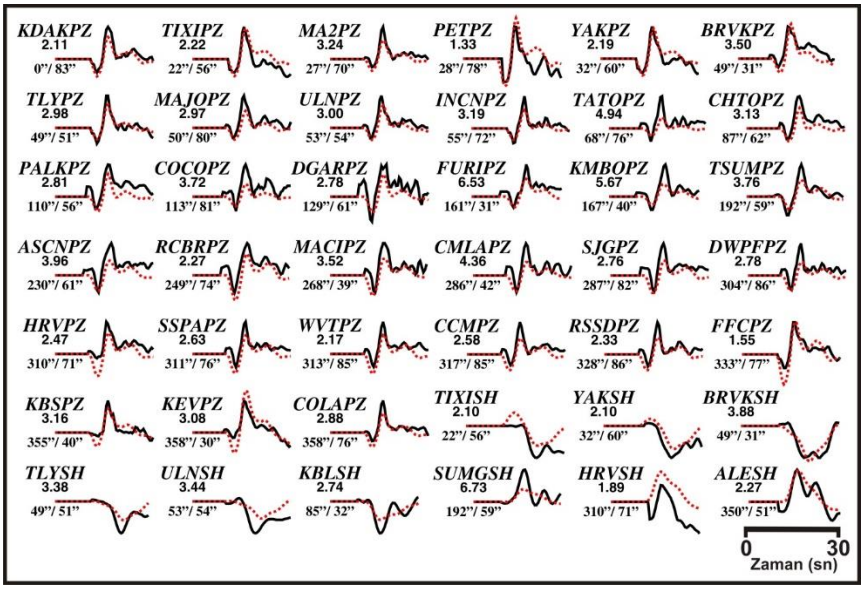
3.3. Modelleme Sonuçları ve Tartışma

19 Mayıs 2011 Simav depreminin sonlu fay dalga şekli modellemesi esnasında çok sayıda denem yapılarak en uygun çözüm bulunmaya çalışılmıştır. Yapılan denemeler depremin dalga şekilleri tek sonlu fay analizi ile tatmin edici bir şekilde modellenebildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar neticesinde sonlu fay modellemesi sonucu elde edilen kayma dağılım modeli Şekil 8'de ve hesaplanan dalga şekilleri ile gözlenmiş dalga şekillerinin karşılaştırması Şekil 9'da verilmiştir. Sonlu fay dağılım modeli 8.635 x10^{17} Nm'lik (M_W=5.9) bir sismik momente karşılık gelmektedir. Değişken kayma açısı varsayımı ile yapılan modelleme sonucunda kayma açısı -111.7^{o} bulunmuştur. Aynı zamanda en büyük kayma değeri 1.7 m olarak elde edilmiştir. Moment

boşalım fonksiyonu incelendiğinde kırılmanın yaklaşık olarak 10 sn sürdüğü gözlemlenmektedir.



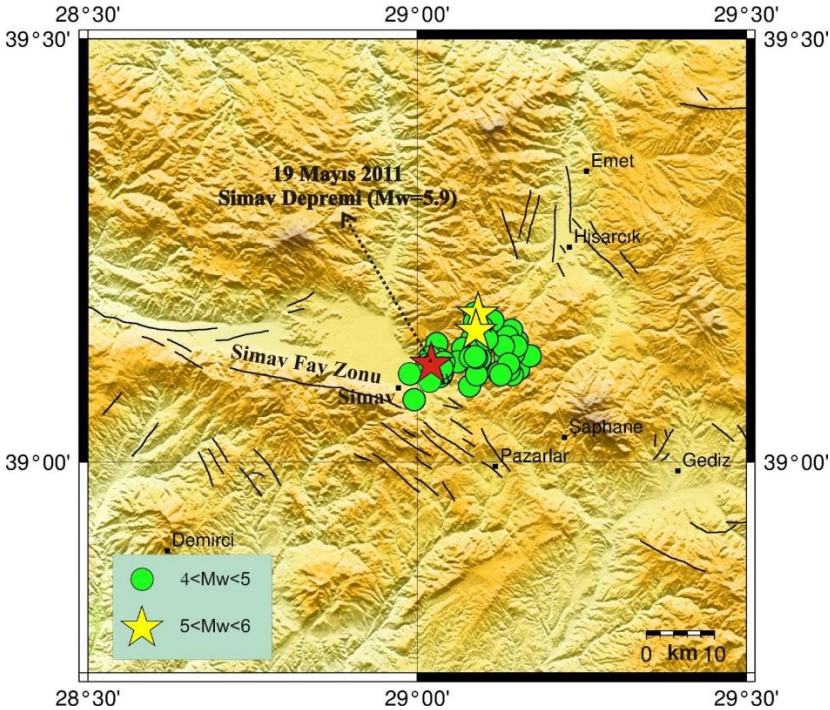
Şekil 8: a) 19 Mayıs 2011 Simav depremi için elde edilen odak mekanizma çözümü, b) moment boşalım (serbestleme) fonksiyonu ve c) kayma dağılım modeli. Bu çözüm en uygun denemenin sonucundan elde edilmiştir.



Şekil 9: 19 Mayıs 2011 Simav depremi için hesaplanan (yapay) dalga şekilleri (kırmızı) ile gözlenen (siyah) dalga şekillerinin karşılaştırılması. İstasyon ismi altındaki rakamlar mikron cinsinden pikten pike dalga genliklerini ve onların altındaki rakamlarda sırasıyla istasyon azimut ve uzaklıklarını göstermektedir.

Ters çözüm sonucu elde edilen kayma dağılım modeli incelendiğinde faylanma alanının ortası ve deprem odağının merkezine yerleşmiş 1.7 m'lik kayma değeriyle kendini gösteren kabaca dairesel şekilli bir pürüzün yenilmesi ile deprem kırılmasının gerçekleştiği gözükmektedir. Bu pürüz yaklaşık olarak 6x7 km^2'lik bir alanı kaplamaktadır. Her ne kadar moment boşalım fonksiyonu depremin iki alt olay ile gerçekleştiğini önerse de kayma dağılımı incelendiğinde depremin odağa yerleşmiş tek bir pürüzün kırılması ile gerçekleştiği açıkça gözlemlenmektedir. Faylanma alanı köşelerinde kendini gösteren küçük kayma değerli pürüzler modellemeden kaynaklanan yapay (artifical) etkiler olarak yorumlanmıştır. Bu yapay pürüzler Moment boşalım fonksiyonunda ikinci bir alt olay gerçekleşmiş gibi

göstermektedir. Kayma vektörleri incelendiğinde 19 Mayıs 2011 Simav depreminin üzerinde meydana geldiği Simav Fay Zonu'nun karakteristiği olan baskın normal faylanma karakteristiğini destekler şekilde geliştiğini önermektedir.



Şekil 10: 19 Mayıs 2011 Simav depremi sonrası meydana gelen diğer bazı önemli depremlerin dış merkez dağılım haritası.

19 Mayıs 2011 Simav Depremi üzerinde meydana geldiği Simav Fay Zonu ve Batı Anadolu'daki tektonik rejimin aktifliğini bir kez daha gözler önüne sermiştir. Bölgede bundan önce de şiddetli depremlere sahne olmuş ve bundan sonra da olacağı kaçınılmaz bir gerçektir. Nitekim Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü-Bölgesel Deprem ve Tsunami İzleme Merkezi (KRDAE-BDTİM) kataloglarına

göre çalışmamıza konu olan 19 Mayıs 2011 Simav depreminden Haziran 2020 yılına kadar aynı bölgede $3 \leq M_w < 4$ arası 926 adet, $4 \leq M_w < 5$ arası 50 adet ve $5 \leq M_w < 6$ arası 2 adet deprem meydana gelmiştir (Şekil 10). Bu veriler bölgedeki fayların dirliğinin bir kanıtı olarak yorumlanmaktadır. Bu doğrultuda Simav Fay Zonu'nun deprem üretme potansiyeli nedeniyle bölge için yapılacak sismik tehlike çalışmaları oldukça önem arz etmektedir.

4. SONUÇLAR

Türkiye'nin üzerinde bulunduğu coğrafya tektonik açıdan oldukça aktif ve her an büyük bir depremin meydana gelme potansiyeline sahip bir özelliktedir. Bu nedenle sismolojik açıdan her türlü çalışma coğrafyamız için çok büyük önem arz etmektedir. Sismolojik çalışmaların gelişimi ise teknolojinin gelişmesi ile doğru orantılı olarak sismik ağların artması ve daha kaliteli ve detay özelliklere sahip verilerin el ede edilmesi ile olmuştur. Bu bağlamda deprem analizleri iyi derecede yapılabilir ve deprem oluşum süreçleri hakkında detaylı bilgiler elde edilebilmiştir. Sadece deprem oluşum süreçleri hakkında değil sonraki aşamalarda tehlike ve risk analizlerinin bu imkanlar dahilinde yapılmasının deprem bölgeleri için büyük önemi vardır. Bu sayede can ve mal kayıpları ciddi derecede önlenebilir ve ülkeler büyük maddi manevi problemleri önleme şansına sahiptirler.

Bu çalışmada sismoloji çalışmalarının önemli konularından olan sonlu fay deprem dalga şekli modellemesi üzerinde durulmuş ve konu ile ilgili 19 Mayıs 2011 Simav depreminin sonlu fay özellikleri elde

edilmeye çalışılmıştır. Bölge ve Türkiye için oldukça önem arz eden bu ve benzer tarzdaki sismoloji çalışmalarının devamı büyük faydalar getireceği aşikârdır.

KAYNAKÇA

Abercrombie, R. E., Antolik, M., Felzer, K., and Ekström, G. (2001). The 1994 Java tsunami earthquake: Slip over a subducting seamount. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 106(B4), 6595-6607.

Aki, K. and Richards, P. G. (1980). Quantative seismology: Theory and methods. Freeman and Company, 2.

Barka, A.A and Kandisky-Cade, K., (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on Earthquake activity, Tectonics, 7, 663-684.

Budakoğlu, E., (2017). Güney Pasifik Okyanusu Bismark Levhalarındaki Büyük Depremlerin Kırılma Ve Gerilme Analizleri Ve Anadolu Jeodinamiği İle Karşılaştırılması, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Budakoğlu, E. ve Utkucu, M., (2013). 19 Mayıs 2011 Simav Depreminin Uzak-Alan Kayıtlarıyla İncelenmesi, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27 Eylül, MKÜ – Hatay.

Choy, G. L., and Cormier, V. F. (1986). Direct measurement of the mantle attenuation operator from broadband P and S waveforms. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 91(B7), 7326-7342.

Emre, Ö.,ve Duman, T.Y., (2011). 19 Mayıs 2011 Kütahya (Simav) Depremi (Mw=5.8) Ön Değerlendirmesi, Jeolojik Etüdler Dairesi, MTA, Ankara, Türkiye.

Emre, Ö.,ve Duman, T.Y., Özalp, S. ve Doğan, A., (2012). Simav fayı ve 19 Mayıs 2011 Simav Depremi (Mw=5.8), 65.TürkiyeJeolojiKurultayı, MTA, Ankara, Türkiye.

Hartzell, S.H., (1978). Earthquake aftershocks as Green's functions, Geophys. Res. Lett., Vol. 5, No. 1, 1-4.

Hartzell, S. H., & Heaton, T. H. (1983). Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 73(6A), 1553-1583.

Hartzell, S.H., Stewart, G.S. And Mendoza, C., (1991). Comparison of L1 and L2 norms in a teleseismic waveform inversion for the slip history of the Loma Prieta, California, earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 81, No. 5, pp. 1518- 1539.

Helmberger, D. V. (1983). Theory and application of synthetic seismograms, in. Earthquakes: observation theory and interpretation, 174-222.

Ide, S. and M. Takeo, (1997). Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis, J. Geophys. Res., 102, 27379-27391.

Incorporated Research Institutions for Seismology web sayfası (http://www.iris.washington.edu), 2020.

Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü-Bölgesel Deprem ve Tsunami İzleme Merkezi (KRDAE-BDTİM) (http://www.koeri.boun.edu.tr/), 2020.

Kikuchi, M. and Kanamori, H. (1991). Inversion of complex body wave-III, Bull. Seism. Soc. Am., 81, 2335-2350.

Klotz, J., Angermann, D., Michel, G. W., Porth, R., Reigber, C., Reinking, J., ... & Barriga, R. (1999). GPS-derived deformation of the Central Andes including the 1995 Antofagasta M w= 8.0 Earthquake. In Seismogenic and Tsunamigenic Processes in Shallow Subduction Zones (pp. 709-730). Birkhäuser, Basel.

Konca, A. O., Leprince, S., Avouac, J. P., & Helmberger, D. V., (2010). Rupture process of the 1999 Mw 7.1 Duzce earthquake from joint analysis of SPOT, GPS, InSAR, strong-motion, and teleseismic data: a supershear rupture with variable rupture velocity. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(1), 267-288.

Langston, C.A. And Helmberger, D.V., (1975). A Procedure for Modeling Dislocation Sources, Geophys. J. R. Astr. Soc., 42, 117-130.

Lay, T. And Wallace, T.C., (1995). Modern Global Seismology, Academic Press, San Diago, California, ISBN-13: 978-0-12-732870-6.

Mendoza, C. And Hartzell, S.H., (1988). Inversion For Slip Distribution Using Teleseismic P Waveforms: North Palm Springs, Borah Peak, And Michoacan Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 78, No. 3, Pp. 1092-1111.

Mendoza, C., Hartzell, S. And Monfret, T., (1994). Wide-band analysis of the 3 March 1985 central Chile earthquake: Overall source process and rupture history, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 84, No. 2, pp. 269-283.

Mendoza, C. (1996). Rapid derivation of rupture history for large earthquakes. Seismological Research Letters, 67(6), 19-26.

Şaroglu, F.,Ö . Emre, and I. Kuşçu, (1992). Türkiye diri fay haritasi, Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Turkey.

Takeo, M. (1992). The rupture process of the 1989 offshore Ito earthquakes preceding a submarine volcanic eruption. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B5), 6613-6627.

Tezel, T., Shibutani, T., & Kaypak, B. (2010). Crustal structure variation in western Turkey inferred from the receiver function analysis. Tectonophysics, 492(1-4), 240-252.

Udias, A. And Buforn, E. (1996). Source mechanism of earthquakes from Seismic waves, Third Workshop on 3D modelling of Seismic waves generation propagation and their inversion, Trieate, Italy.

Udias, A., (1999). Principles of Seismology, Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0-521 62434-7.

Utkucu, M., (2002). Anadolu depremlerinde kırılma sürecinin sonlu fay modelleri ile incelenmesi, Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Wald, D. J. (1992). Strong motion and broadband teleseismic analysis of the 1991 Sierra Madre, California, earthquake. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B7), 11033-11046.

Wald D.J. and Heaton, T.H., (1994). Spatial And Temporal Distribution Of Slip For The 1992 Landers, California, Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 84, No. 3, Pp. 668-691.

Wald, D. J. (1996). Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data. Journal of Physics of the Earth, 44(5), 489-503.

Wright, T.J., Parsons, B.E., Jackson, J.A., Haynes, M., Fıeldıng, E.J., England, P.C., Clarke, P.J., (1999). Source Parameters Of The 1 October 1999 Dinar (Turkey) Earthquake From Sar İnterferometry And Seismic Bodywave Modelling, Earth And Planetary Science Letters, 172, 23-37.

Yagi, Y., & Kikuchi, M. (2000). Source rupture process of the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999, obtained by joint inversion of near-field data and teleseismic data. Geophysical Research Letters, 27(13), 1969-1972.

Yagi, Y. (2004). Source rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake determined by joint inversion of teleseismic body wave and strong ground motion data. Earth, planets and space, 56(3), 311-316.

Yagi, Y., Mikumo, T., Pacheco, J., and Reyes, G. (2004). Source rupture process of the Tecomán, Colima, Mexico earthquake of 22 January 2003, determined by joint inversion of teleseismic body-wave and near-source data. Bulletin of the Seismological Society of America, 94(5), 1795-1807.

Yoshida, S. (1992). Waveform inversion for rupture process using a non-flat seafloor model: application to 1986 Andreanof Islands and 1985 Chile earthquake, Tectonophysics, 211, 45-59.

Yoshida, S., Kokhetsu, K., Shıbazakı, B., Sagıya, T., Kato, T. And Yoshıda, Y. (1996). Joint Inversion Of Near- And Far-Field Waveforms And Geodetic Data For Rupture Process Of The 1995 Kobe Earthquake, J. Phys. Earth, 44, 437-454.

Zülfikar, C., Kamer, Y. veVuran, E., (2011). 19 Mayıs 2011 Kütahya-Simav Depremi, Kandilli Rasathanesive Deprem Araştırma Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi, Haziran, 2011 İstanbul.

BÖLÜM 4

SAYISAL MODELLEME

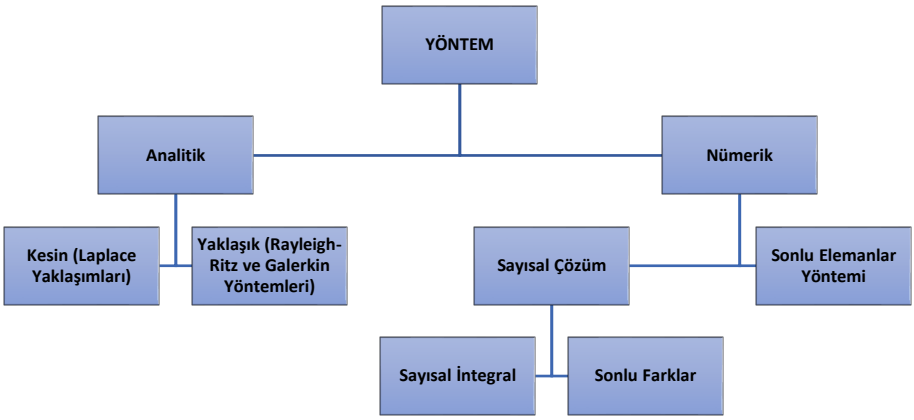
Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER[1]

[1] Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Türkiye. absunbul@beun.edu.tr

GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, ampirik bağıntıların kullanılması ile yapılan analizlerin sonuçları genelde çok yaklaşık olabilirken; bazen de gerçek değerden çok uzak değerde sonuçlar verebilir. Modellerin geoteknik problem analizinde aynı anda birçok özellik göz önünde bulundurulamaz. Bu nedenle jeolojik ortamlar bir sürekli ortam gibi düşünülerek, çeşitli etkiler (yükleme, sızıntı, konsolidasyon vb.) karşısında davranışı fiziksel bir temele dayanan teoriler ileri sürülmüştür. Geliştirilen bu teoriler genelde matematiksel olarak diferansiyel denklemlerden meydana geldiğinden kapalı çözümlere ulaşmak için bir takım basit kabuller yapmak gerekmektedir. Bu yaklaşım çoğu pratik durumlar için yeterli çözümü sağlamasına karşın jeolojik ortamların homojen olmayan yapısı, non-lineer malzeme davranışı, ortamın geometrisi, ortam içindeki süreksizlikler, malzeme özelliklerinin zaman ve ortamla değişimi vb. karmaşık özellikler nedeniyle problemin gerçekçi çözümlere ulaşmasına olanak vermemektedir. Bu nedenle geoteknik problemlerin analizinde adı geçen faktörlerin birçoğunu aynı anda göz önüne alan nümerik yöntemler geliştirilmiş olup bunların çoğu yukarıda sözü edilen teorilerin matematiksel ifadesi, diferansiyel denklemlerin çözümünde nümerik analiz yöntemlerinin uygulanmasıdır (Wood, 2004). Nümerik analiz yöntemlerinin gelişmesi ve birçok özelliği aynı anda göz önüne alabilmesi bilgisayarların gelişmesine bağlı olmuştur. Geoteknik problemlerin çözümünde kullanılan Desai ve Abel (1972) tarafından verilen nümerik analiz yöntemleri zemin yapı etkileşiminde gerilme dalgalarının yayınımını zemin ve kayalarda sızma problemini ve bunun

gibi diğer problemlere göre denge denkleminin çözümleri bulunmuştur (Şekil 1). Adı geçen yöntemlerden Sonlu Elemanlar yöntemi gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon analizinde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir.



Şekil 1. Nümerik analiz yöntemleri (Değiştirilmiş Abel ve Desai, 1972)

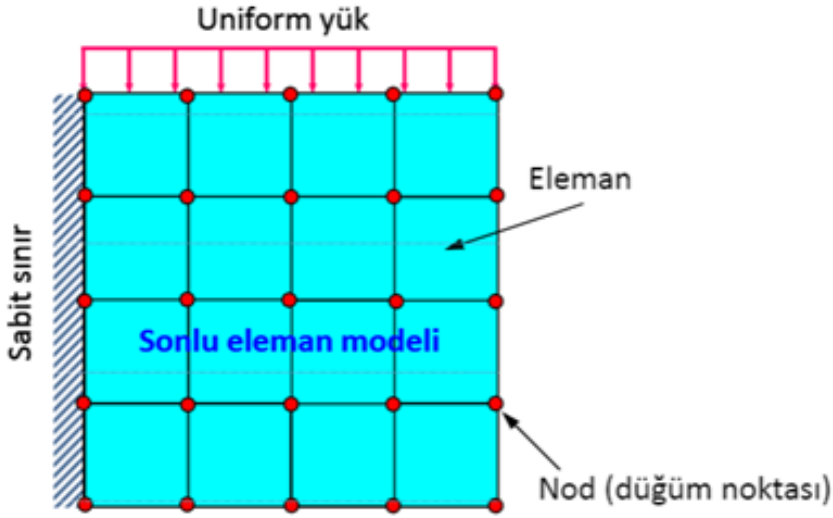
Analizlerde, toplam gerilme izini elastik analizle, boşluk suyu basıncının veya efektif gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin elasto-plastik analizle tahmin edilmesi yönteminde analizler iki bölüme ayrılarak basitleştirilmekte ve gerçek çözümden uzaklaşılmaktadır. Ancak gerçeğe yakın çözümler, gelişmiş bünye eşitlikleri kullanılarak, bilgisayarlarla yapılan nümerik analiz yöntemleri ile elde edilebilmektedir. Model analizler ile zemin-kazık-yapı etkileşimi daha gerçekçi modellenerek, öngörülen riskler en aza indirilerek yapım aşamaları gerçekleştirilir.

Bu çalışmada, derin temel delme kazıklar modellenerek, temel altında, zemin parametre değişkenlerine bağlı olarak, oturma etkisi incelenmiştir. Derin temellerin kullanıldığı ve ilgili zemin veya kazık boyutlarının farklılık gösterdiği literatürdeki çalışmalara destek olmak ve vaka analizlerinden elde edilen sonuçlarla uyumu belirlemek adına sayısal model çalışması yapılmıştır.

1. SONLU ELEMANLAR ÇÖZÜMÜ

Sonlu elemanlar nümerik analiz yöntemi, Zienkiewicz (1977), tarafından, matematiksel ifadelerle tanımlanan sürekli problemlerin genel çözüm yöntemi olarak tanımlanmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi şeklinde olmak üzere sayısal yöntemlerin genelde mühendislik problemlerine ve özelde geoteknik problemlerine uygulanması üzerine yazılmış çok sayıda yayın bulunmaktadır (Zienkiewicz, 1977; Cai ve Ugai, 2000; Chen vd., 2014; Savage vd., 2000; Griffiths ve Lane, 1999; Brinkgreve vd., 2007). Geoteknik problemler için matematiksel ifadeler; su akışı (boşluk suyu basıncını içeren problemler) ve denge eşitlikleri, sınır durumları ve deformasyonların uygunluğu ve gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi tanımlayan eşitliklerdir. Başka bir değişle; sonlu elemanlar yöntemi, diferansiyel denklemlerin çözümü için sürekli bir ortamı, problemin karakterine uygun sonlu elemanlara ayırarak, elde edilen elemanlar üzerinde iç ve dış kuvvetlerin enerjisinin minimum olması esasına dayanan sayısal bir çözüm yöntemidir. Bunun nedeni, karmaşık sınır koşulları ve nonlineer malzeme davranışı homojen olmayan malzemeler gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde sistematik bir programlamaya müsaade etmesidir.

Karmaşık sınır koşullarına sahip, düzgün olmayan geometriye sahip, zamana bağlı ve özdeğer problemlerine, lineer ve lineer olmayan problemlere uygulanabilir. Buna göre değişik ve karmaşık geometriye sahip sistemler, çok sayıda basit geometriye sahip parçacığa bölünerek bu parçacıkların ayrı ayrı çözülmesi ile analiz edilir (Şekil 2). Bu sistemlerin parçalara bölünmesi ile elde edilen her bir parçacık eleman olarak isimlendirilmektedir ve her biri için matris çözümü gerçekleştirilir (Sert, 2003).



Şekil 2. Sonlu elemanlar gösterimi (Brinkgreve, 2004).

Sonlu elemanların oluşturduğu sistemin sınır koşulları, yükleri ve sisteme ait özellikleri göz önüne alınır, eleman sayısı yani parçaların küçüklüğü çözümün hassaslığını belirler. Başka bir değişle sürekli sistemin tipik bölgelerinde eleman boyutları küçültülerek o bölgenin daha ayrıntılı incelenmesi mümkün olmaktadır. Bu yöntemin diğer bir

avantajı ise sınır koşullarının problemin çözüm sırasına göre en son adımda hesaplara dahil edilmesidir. Böylece çeşitli sınır koşulları probleme uygulanırken başlangıçtaki yoğun hesapların tekrarına gerek kalmamaktadır.

Geoteknik mühendisliği problemlerinde yapılan sonlu elemanlar analizlerinde problemin türüne göre analiz sonuçları olarak gerilmeler, yer ve şekil değiştirmeler, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akım miktarı hızı ve akım potansiyeli gibi bilinmeyenler elde edilebilir. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı doğrusal olmadığından zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışının incelendiği sonlu elemanlar analizlerinde zeminin doğrusal olmayan gerilme şekil değiştirme davranışının sayısal olarak modellenmesi gerekmektedir. Analitik çözüm yöntemleri yukarıda belirtilen çözümlerin tamamını tek bir çözümde ele alamadıkları için sadece göçme ile ilgili fikri verebilmektedirler. Sonlu elemanlar yönteminde gerçeğe uygun zemin profilleri tanımlanabilmekte ve tüm dış yapı ve yükleme etkileri hesaplarda dikkate alınmaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasına 1966 yılında başlanmıştır. Bu amaçla dolguda gerilmeleri, yanal ve düşey hareketleri belirlemek ve yeraltında kayada kazı yapılması uygulamalarında kullanmış ve geçen 40 yıllık zaman süresince teoride ve pratikte birçok avantajlar sağlanmıştır (Ling vd.,2014; Savage vd. 2000; Griffiths ve Lane, 1999). Çoğu geoteknik sonlu eleman analizleri gerçek yapımı modelleyecek şekilde adım adım (aşamalı yükleme, aşamalı kazı) yapılmaktadır. Birinci adımda; analizlerde dolgu

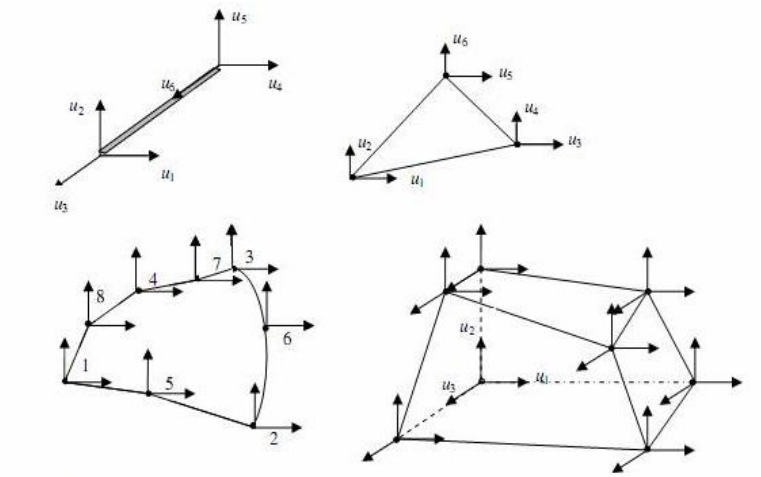
yerleştirilmesi veya kaldırılması durumunda, geometri her bir adımda değişmektedir. Geometrideki değişim sonlu elemanlar ağına eleman ekleyerek veya kaldırılarak modellenebilmektedir. Diğer adımda; zemin kütlesi içinde gerilmelerin değişimi sonucu her bir yükleme kademesinde zemin özellikleri değişmektedir. Geoteknik mühendisliği problemlerinde sonlu elemanlar analizleri sonucunda gerilmeler, yanal ve düşey hareketler, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı vb. belirlenebilmektedir. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı non-lineer olduğundan geoteknik mühendisliği sonlu eleman analizlerinde bu davranışın modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, yapımdan önceki başlangıç gerilme durumu, zeminin non-lineer gerilme-şekil değiştirme, mukavemet özellikleri, yükleme aşamaları arasındaki bekleme süreleri analizlerde gerçek duruma yakın olarak belirlenmelidir (Brinkgreve vd. 2007).

1.1. Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Elaman Tipi ve Gerilme Noktaları

Sonlu elemanlar yöntemi, diferansiyel denklemlerle ifade edilen mühendislik problemlerinin analizi için geliştirilen nümerik bir çözüm yöntemidir. Sürekli bir ortam sonlu elemanlara bölünerek denklemler bir eleman için yazılır ve bütünleşmiş edilerek sistem denklemleri elde edilir. Sonuçta sürekli bir ortam için göz önüne alınan diferansiyel denklem lineer bir denklem takımına indirgenir. Sonlu elemanlar

yöntemi karmaşık diferansiyel denklemleri bilgisayarın çözebileceği matris forma getirip çözen bir yöntemdir.

Sonlu elemanlar yönteminde eleman seçimi ve eleman tipleri için karşılaşılan probleme uygun eleman tipleri, belirlenen esas (birincil) bilinmeyene göre bir boyutlu, iki boyutlu ya da üç boyutlu elemanlar ve eğri yüzeyler için eğrisel elemanlardır. Eleman seçiminde önemli olan, gerekli serbestlik derecesini sağlamaktır. Bir boyutlu eleman seçimi konsolidasyon problemlerinde kullanılmaktadır (Şekil 3).



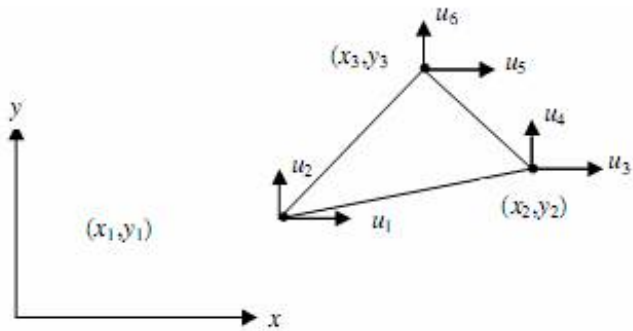
Şekil 3. Sonlu elemanlar yönteminde eleman tipleri

Yaklaşım Modeli (şekil fonksiyonu) Bu adımda bilinmeyenlerin ortamda dağılımını veren bir şekil fonksiyonu seçilir. Eleman düğüm noktaları, eleman bölgesinde bilinmeyen büyüklüğün (örneğin yer değiştirme) dağılım eklini tanımlamak üzere matematiksel bir fonksiyon yazmak için stratejik noktalar sağlar. Polinomlar veya seriler

bu amaçla kullanılabilir: u=düğüm noktası bilinmeyenleri (veya serbestlik derecesi)

u = N1 u1 + N2 u2 + N3 u3 + …….+ Nm um (1)

Çözüm yalnız düğüm noktaları için gerçekleştirilir. Şekil fonksiyonu çözüm ortamında bilinmeyenler yanında ortam geometrisini (genel koordinatlar) de ifade etmekte kullanılabilir. Buna izoparametrik yaklaşım denmektedir. İzoparametrik yaklaşım, bilgisayar kapasitesi bakımından yer ve zaman kaybını önleyen bir yaklaşım türüdür (Şekil 4).



Şekil 4. Sonlu elemanlar yönteminde elemanların yer değiştirme fonksiyonları

Yer değiştirmeler; Düzlem şekil değiştirme hali üç düğüm noktalı üçgen eleman için deplasman fonksiyonu gibidir.

$$u(x,y) = \left(N^e a^e\right) \quad u = \begin{matrix} u_x \\ u_y \end{matrix} \quad N = \begin{pmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{pmatrix} \qquad (2)$$

Şekil değiştirmeler; Sonlu elemanlar modelinde seçilen elemanların şekil değiştirmeleri eşitlikler ve matrisler yardımıyla elde edilmektedir.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \qquad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}$$

$$\varepsilon = Bu^e$$

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \tag{3}$$

Malzeme bünye davranışı (gerilme-şekil değiştirme ilişkisi) ; Sonlu elemanlar yönteminde ideal malzeme lineer elastik, homojen ve izotroptur. Bu kabuller doğrultusunda malzeme bünye davranışı ifade edilebilir:

$$\sigma = D\varepsilon \quad D = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{pmatrix} \tag{4}$$

Eleman denklemi; Minimum enerji prensibi kabulü ile gerilmeler, şekil değiştirmeler olarak ifade edilebilir. Uygunluk prensibinin göz önüne alınması ile de şekil değiştirmeler, sınır koşulları olarak ifade edilebilir. Yayılı yükler, enterpolasyon yapılarak düğüm noktalarına indirgenir. Burada p, eleman üstündeki yayılı yükün düğüm noktasına indirgenmiş hali olan düğüm yüklerini gösteren yük vektörüdür.

Eleman rijitlik matrisi eşitlikteki gibi ifade edilmektedir.

$$K^e = \int B^T DBdv \qquad K^e u^e = p^e \qquad p^e = \begin{pmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \\ p_{2x} \\ p_{2y} \\ p_{3x} \\ p_{3y} \end{pmatrix} \qquad (5)$$

Sistem denklemi, Eleman denklemleri birleştirilerek sistem denklemleri elde edilir. Eleman rijitlik matrisinin birleştirilmesi ile global rijitlik matrisi elde edilir.

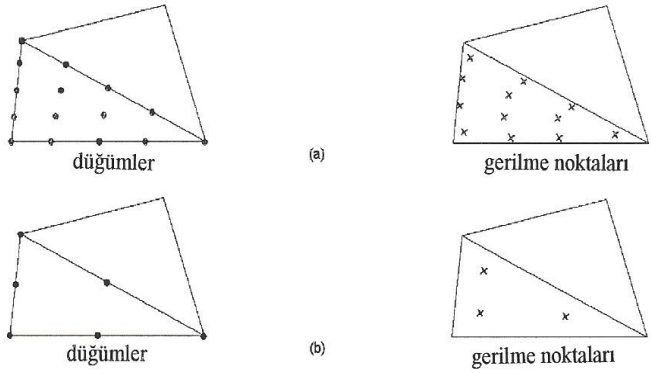
KU=P (6)

Sınır koşulları; Sistem rijitlik matrisi singülerdir (determinant=0). Çözümün gerçekleşebilmesi için sınır koşullarının uygulanması gerekmektedir. Sınır koşulları esas bilinmeyenler cinsinden (esas veya zorlanmış) olması yanında ikincil bilinmeyenler (doğal) cinsinden de olabilir. Sınır koşulları uygulanmış sistem denklemleri uygun bir denklem takımı çözüm yöntemi ile çözülür, birincil (esas) bilinmeyenler bulunur. Denklem takımı çözüm yöntemi hız, stabilite ve bellek açısından önemlidir.

Birincil bilinmeyenlerden ikincil bilinmeyenler hesaplanır. Sonlu elemanla çözümü gerçekleştiğinde çok sayıda veri elde olunur. Bu bilgiler bilgisayarda depolanabilir veya kayda yazılabilir. Çözülen problemin boyutuna göre elde edilen tüm bilinmeyenlerin yazdırılması uygun olmaz. Bunu için veriyi uygun şekilde ilerleyerek çözüm ortamında kritik noktalarda grafik ve çizelgeler elde etmemizi sağlayan

bilgisayar yazılımları gerçekleştirilmelidir. Bu yazılıma post processor (grafik işlemci) denir.

Eleman tipleri; Sonlu elemanlar yönteminde iki çeşit eleman tipi vardır, 6 düğümlü üçgen elemanlar ve 15 düğümlü üçgen elemanlar. 6 düğümlü ve 15 düğümlü üçgen elemanları performans açısından da kıyaslayacak olursak, ikisinde de yaklaşık eşit miktarda düğüm ve gerilme noktaları oluşacaktır. Ancak, 15 düğümlü elemanlar göçme yüklerinin hesaplanmasında %10 daha doğru çözüme ulaşılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde oluşturulan geometri bazı kabullere göre idealize edilmektedir. Bunlar düzlem şekil değiştirme ve aksi simetrikliktir (Şekil 5).

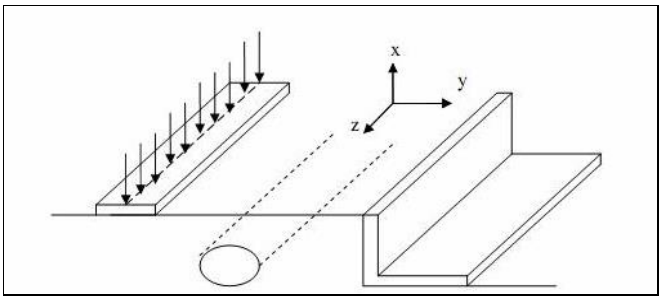


Şekil 5. Kullanılan elemanlar, düğüm noktaları ve gerilme noktaları

Düzlem şekil değiştirme; Sonlu elemanlar yönteminde yük altındaki elemanların düzlemsel olarak şekil değiştirmeleri şekildeki gibidir. Eşitliği de şekil değiştirme matrisini vermektedir (Şekil 6).

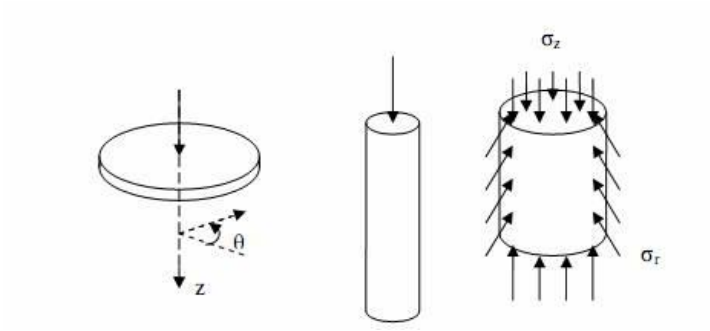
$$\varepsilon_{zz} = 0; \gamma_{yz} = 0; \gamma_{xz} = 0 \tag{7}$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xy} \\ \Delta\tau_{xz} \\ \Delta\tau_{zy} \end{Bmatrix} \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{44} \\ D_{51} & D_{52} & D_{54} \\ D_{61} & D_{62} & D_{64} \end{pmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\gamma_{xy} \end{Bmatrix} \tag{8}$$



Şekil 6. Sonlu elemanlar yönteminde seçilen geometrinin düzlem şekil değiştirmesi

Aksi simetrik; Dairesel kesitli geometrilerde uygulanması gereken model aksi simetrik modeldir. Şekildeki geoteknik uygulamalarda karşılaşılabilecek dairesel kesitli yapı elemanları göstermektedir (Şekil 7).



Dairesel temel Kazık Üç eksenli numune

Şekil 7. Sonlu elemanlar yönteminde seçilen geometrinin Aksi simetrik; dairesel kesitli yapı elemanları

Aksi simetrik geometrilerdeki şekil değiştirmeler teoride (a) eşitliğindeki gibi belirlenmektedir. Analizlerde kullanılan programında ise diğer (b) eşitliği dikkate alınmaktadır.

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_x}{\partial r}; \varepsilon_z = \frac{\partial u_y}{\partial z}; \varepsilon_{\theta r} = \frac{u_x}{r}; \gamma_{rz} = \frac{\partial u_y}{\partial r} + \frac{\partial u_x}{\partial z}; \gamma_{r\theta} = \gamma_{z\theta} = 0;$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{u_x}{r} = 0; \gamma_{xz} = 0; \gamma_{yz} = 0; \tag{9}$$

2. MODEL ANALİZ

Geoteknik mühendislik projelerinde, özellikle de deformasyon ve stabilite analizleri için geliştirilmiş bir sonlu eleman paketi olan Plaxis' in gelişimi ilk olarak 1987'de Delft Teknik Üniversitesinde başlamıştır (Brinkgreve vd. 2007). Plaxis2D iki boyutlu deformasyon analizi ve geoteknik mühendisliği stabilite analizlerinde sonlu elemanlar ile çözüm üretir. Program kapsamında nonlineer simülasyonla

oluşturulmuş modellerin zamana dayalı ve anizotrop davranışları zemin ve kayaları birleştirir. Zemindeki hidrostatik ve hidrostatik olmayan boşluk basınçlarıyla da ilişkilendirir.

Zeminler ile diğer geleneksel mühendislik malzemelerinin davranış mekanizması arasındaki en önemli fark zeminlerin üç fazlı (katı daneler-boşluk suyu-boşluklardaki gaz) bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Bu üç fazın farklı davranmasından dolayı, zemin davranışının modellenmesi oldukça karmaşıktır. Eğer zemin tamamen suya doygunsa, efektif gerilmelere göre yapılan analizler oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Suya doygun kohezyonlu zeminler drenajsız koşullarda dolgu yükü ile yüklendiklerinde meydana gelen gerilme artışı başlangıçta zemin daneleri arasındaki su tarafından taşınmakta, oluşan boşluk suyu basıncı zamanla sönümlenerek uygulanan ilave gerilmeler zemin daneleri tarafından taşınmaktadır. Boşluklardaki suyun sönümlenmesi Darcy Yasası'na uymakta ve danelerin deformasyonu efektif gerilmeler tarafından kontrol edilmektedir Tek boyutlu davranış için efektif gerilme formülasyonu tarafından incelenmiş, daha sonra Terzaghi'nin teorisi üç boyutlu durum için genişletilmiştir (Terzaghi, 1943; 1945; Biot, 1955).

Jeolojik ortamın sınır koşullarının ve ortamın davranışının karmaşık olması (elasto-plastik malzeme davranışı) ve bu davranışın zamana bağlı olarak değişmesi (konsolidasyon) nedeniyle, temel zemininin gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon davranışı birlikte analiz edilmelidir. Bu analizlerde yük artışından dolayı oluşan gerilmeler altındaki elastik ve plastik şekil değiştirmeler hesaplanabilmekte, ayrıca

gerilmelerdeki zamana bağlı değişim sonucu meydana gelen konsolidasyon oturmaları hesaplanabilmektedir. Diğer bir deyişle, başlangıçtaki drenajsız şartlar ile zamana bağlı olarak değişen gerilme durumu (fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ve efektif gerilmedeki artış) drenajlı koşullarda birlikte analiz edilebilmektedir.

Zemin malzemesi yük altında doğrusal olmayan gerilme şekil değiştirme davranışı göstermekte olduğundan bünye davranışını ifade etmek için Hook Yasası'ndan daha karmaşık bünye bağıntılarına ihtiyaç vardır. Zemin malzemesinin çok küçük gerilme seviyelerinde plastik (kalıcı) şekil değiştirmeye maruz kaldığı bilindiğinden zemin malzemesinin yük altında şekil değiştirme davranışını gerçeğe yakın modellemek için elastoplastik bünye modellerinin kullanılması gerekmektedir. Zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışını ifade eden çok sayıda bünye modeli geliştirilmiştir, bunların önemli bir kısmı çok sayıda ve belirlenemeyen malzeme parametrelerine ihtiyaç duyduğundan kullanımları yaygınlaşmamaktadır. Zemin malzemesi için geliştirilmiş bir bünye modelinin kabul görmesi için basit, bilinen ve az sayıda malzeme parametresini kullanarak gerçeğe yakın sonuçlar vermesi istenir. Plaxis programında zemin malzemesinin doğrusal olmayan gerilme şekil değiştirme davranışını modellemek için geliştirilmiş elasto-plastik bünye modelleri mevcuttur. (Plaxis Manual 7.2, 2000).

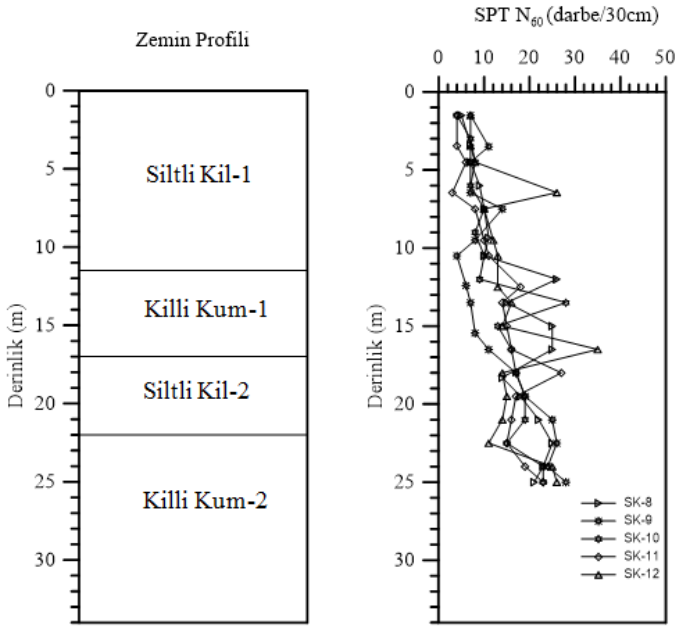
3. UYGULAMA ÖRNEĞİ: DERİN TEMEL OTURMA DAVRANIŞINDA ETKİN PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Taşıma gücünün yetersiz olduğu durumlarda ve aşırı oturmanın görüldüğü zemin ortamlarında, öncelikle zemin iyileştirme yöntemleri önerilmektedir. Zemin iyileştirme yöntemlerinin yetersiz kaldığı durumda yapı yükleri daha derindeki sağlam zeminlere derin temel, kazıklı temel sistemleri ile iletilmektedir. Bu çalışmada, derin temel delme kazıklar modellenerek, temel altında, zemin parametre değişkenlerine bağlı olarak, oturma etkisi incelenmiştir. Tasarım sonlu elemanlar programı olan PLAXIS (2D) 2016 yazılımıyla yapılarak oturma davranışına etki eden zemin parametresinin tayini sonuçlarda gösterilmiştir. İnceleme alanı projesinde 4 farklı zemin tabakasından oluşmaktadır. İmal edilen derin temel sistemi 60 cm çapındaki delme kazıklar ile temel altına 1.7 m x 1.7 m mesafeli olarak kare yerleşim planına göre, şaft uzunluğu 17 m olacak şekilde uygulanmıştır. Zemin tabakaları ve SPT-N Sayıları (Mungan, 2016), malzeme özellikleri Tablo 1.' de verilmiştir (Şekil 8).

Tablo 1. Zemin Parametreleri (Mungan, 2016)

Zemin	Kalınlık (m)	ρ (kN/m^3)	ρ_{sat} (kN/m^3)	E (kPa)	c_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ (°)	ν	ν_u	k (m/gün)
Siltli Kil-1	11,5	18	19	2773	40	-	0	-	0.5	10^{-5}
Killi Kum-1	5,5	19	20	16800	-	-	35	0.3	-	1
Siltli Kil-2	5	18	19	6240	90	-	0	-	0.5	10^{-5}
Killi Kum-2	12	19	20	20000	-	10	33	0.35	-	1

Sayısal modelde; sınır koşullar yatay düzlemde, mimimum (x_{min}) 0 m, maksimum (x_{max}) 77 m, düşey düzlemde ise mimimum (y_{min}) 0 m, maksimum (y_{max}) 34 m, alınmıştır. Proje verilerinde, delme kazıklar üstüne oturacak olan yayılı temelin boyutları, B = 17 m ve L = 19 m olup yayılı temel kalınlığı 60 cm dir..

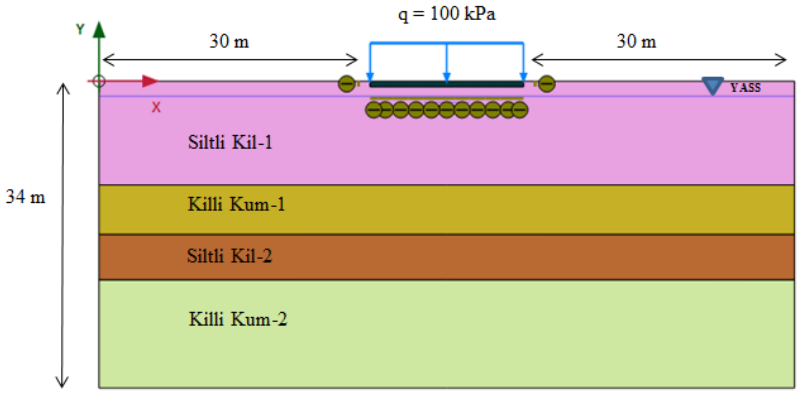


Şekil 8. Zemin Tabakaları ve SPT-N Sayıları (Mungan, 2016)

Üst yapıdan zemine gelen maksimum gerilme 100 kPa dır (Şekil 9). Yeraltı su seviyesi (YASS) zemin yüzeyinden itibaren 1.7 m derinliktedir.

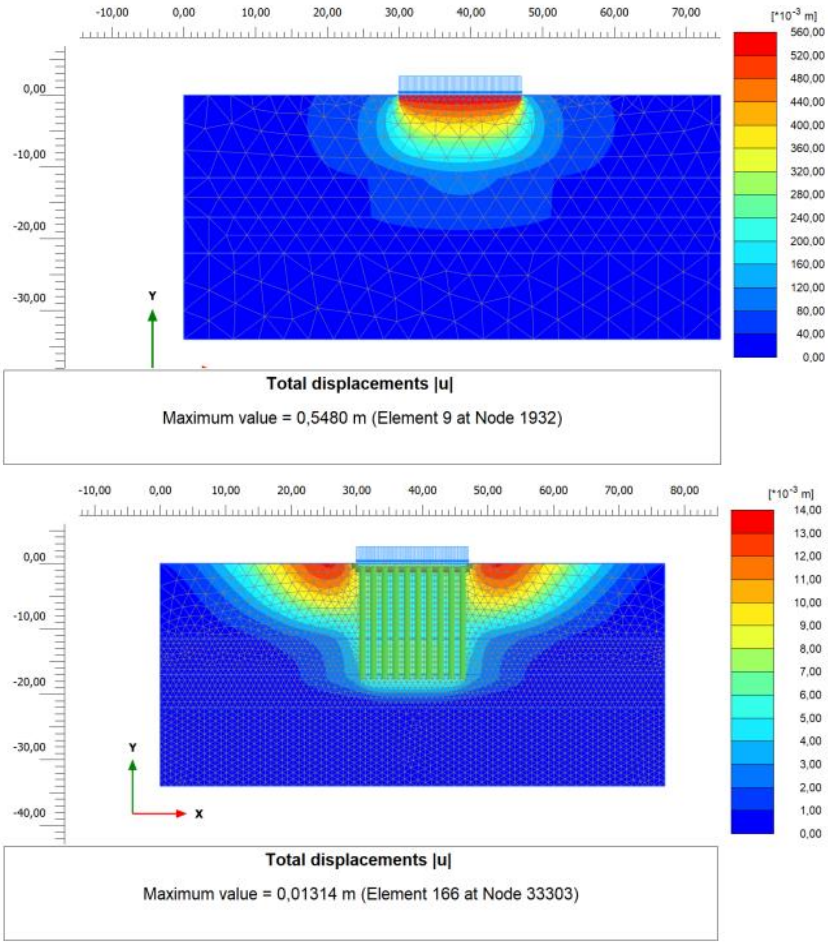
Çalışma alanında elde edilen arazi ve yapısal durumu yansıtan parametreler ile sayısal model Plaxis 2016 programında

oluşturulmuştur. İncelenecek bölgedeki boyutlar gerçek arazideki göre; modelde düzlemsel şekil değiştirme esası, 15 düğüm noktalı üçgensel elemanlarla temsil edilmiştir. Sonlu eleman çözümünde gerilmelerin yüksek olduğu yerlerde elemanların sıkılaştırılması ile sonuçlar daha gerçekçi olarak elde edilirken, ağın kenar ve köşelerine doğru ise elemanların büyütülmesi ile büyük hacimli problemlerde eleman sayısının gereğinden fazla olması önlenmekte ve çözümde zamandan tasarruf sağlanmaktadır. Modelin sınır koşulları standart sınır koşulları kabul edilmiştir.



Şekil 9. Zemin Tabakaları ve SPT-N Sayıları (Mungan, 2016)

Çalışmada, düzlem deformasyon (*Plane Strain*) modeli kullanılarak analizler yapılmıştır. Analizlerde zeminin, gerilme deformasyon davranışını hiperbol olarak tanımlayıp, 3 farklı elastisite modülünü esas aldığından dolayı ve zeminin elastoplastik özelliğini daha iyi ifade etmesinden ötürü pekleşen zemin modeli, (*Hardening Soil*) esas alınarak tüm analizler drenajlı duruma göre yapılmıştır (Sert, 2003).



Şekil 9. SEM analiz sonuçları (Mungan, 2016)

Yayılı temel altında, ilk durumda uzun dönem oturma analizleri yapılmış olup Şekil 9a'da sayısal modelde toplamda 54.80 cm oturma görülmektedir. Yayılı temel altına delme kazıklar imal edilerek, yayılı temel altında Şekil 9b' de görüldüğü gibi 1.3 cm oturma elde edilmiştir.

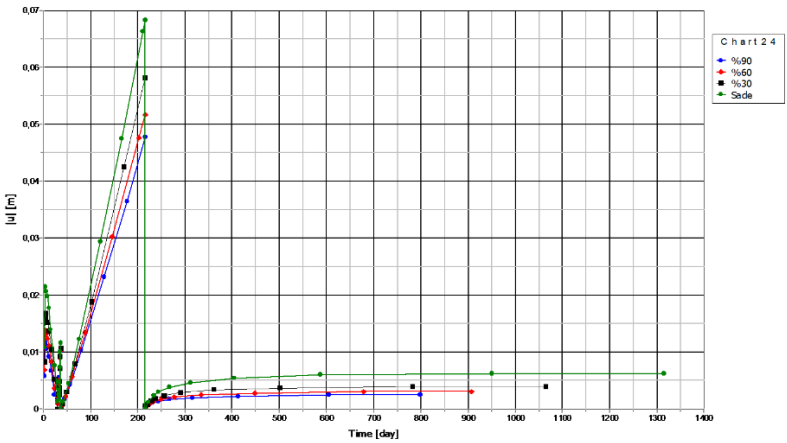
Oturma davranışına etki eden parametreleri belirleyebilmek için, kazık içinde kalan siltli kil-1, killi kum-1 ve siltli kil-2 zemin tabakalarındaki, Elastisite modülü (E), Kohezyon (c) ve Sürtünme Açısı (ϕ) mukavemet

parametreleri, sırasıyla, %30 - %60 ve % 90 oranında arttırılarak analizler tekrarlanmıştır.

Elastisite modülü tüm zemin tabakaları için %30 arttırıldığında, ilk inşaat kademesinde 216 günde, toplamda 5.8 cm oturma görülmektedir. Daha sonra, oturmalar sıfırlanarak, üst yapı inşaatı sonrasındaki oturma değerlerine bakıldığında, 0.4 cm oturma görülmektedir.

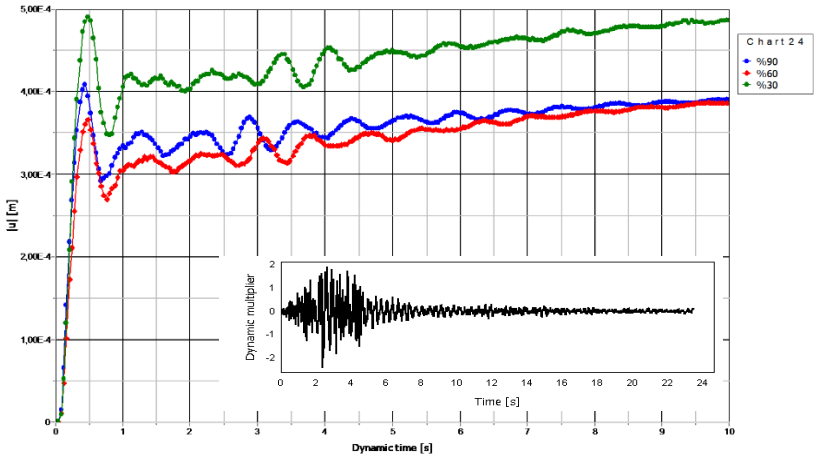
Elastisite modülü tüm zemin tabakaları için %60 arttırıldığında, ilk inşaat kademesinde 216 günde, toplamda 5.2 cm oturma görülmektedir. Daha sonra, oturmalar sıfırlanarak, üst yapı inşaatı sonrasındaki oturma değerlerine bakıldığında, 0.3 cm oturma görülmektedir.

Elastisite modülü tüm zemin tabakaları için %90 arttırıldığında, ilk inşaat kademesinde 216 günde, toplamda 4.8 cm oturma görülmektedir. Daha sonra, oturmalar sıfırlanarak, üst yapı inşaatı sonrasındaki oturma değerlerine bakıldığında, 0.2 cm oturma görülmektedir (Şekil 10).



Şekil 10. Elastisite Modülü değişimi etkisi; oturma sonuçları

Dinamik durumda, 28.02.1990 tarihinde meydana gelen M_w 5.4 Upland deprem verileri kullanılarak 10 saniye boyunca yapıya etki ettirilerek, dinamik durumda temelin ortasından alınan noktada değişim değerleri okunmuştur (Şekil 11) .

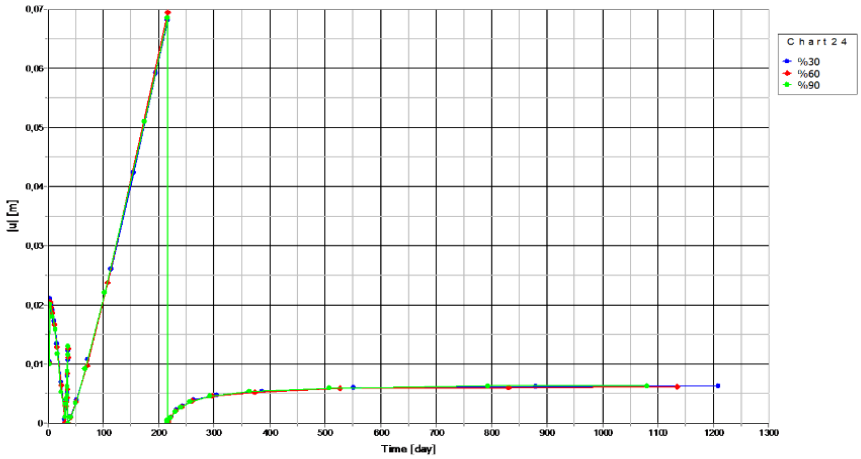


Şekil 11. Elastisite Modülü Dinamik Oturma Sonuçları

Kohezyon tüm zemin tabakaları için %30 arttırıldığında, ilk inşaat kademesinde 216 günde, toplamda 6.8 cm oturma görülmektedir. Daha sonra, oturmalar sıfırlanarak, üst yapı inşaatı sonrasındaki oturma değerlerine bakıldığında, 0.6 cm oturma görülmektedir, %60 arttırıldığında, ilk inşaat kademesinde 216 günde, toplamda 7 cm oturma görülmektedir. Daha sonra, oturmalar sıfırlanarak, üst yapı inşaatı sonrasındaki oturma değerlerine bakıldığında, 0.6 cm oturma görülmektedir.

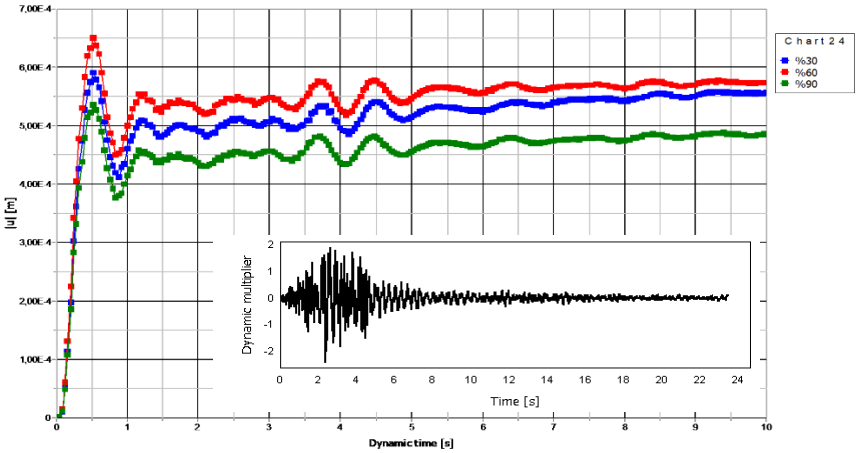
Kohezyon tüm zemin tabakaları için %90 arttırıldığında, ilk inşaat kademesinde 216 günde, toplamda 6.8 cm oturma görülmektedir. Daha

sonra, oturmalar sıfırlanarak, üst yapı inşaatı sonrasındaki oturma değerlerine bakıldığında, 0.6 cm oturma görülmektedir. (Şekil 12) .



Şekil 12. Kohezyon Oturma Sonuçları

Dinamik durumda, 1990 Upland depremi verileri kullanılarak 10 saniye boyunca yapıya etki ettirilmiştir. (Şekil 13).

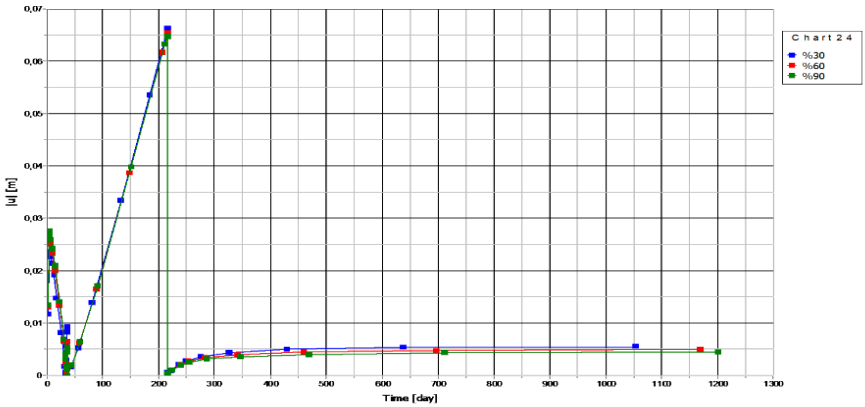


Şekil 13. Kohezyon Dinamik Oturma Sonuçları

Sürtünme açısı tüm zemin tabakaları için %30 arttırıldığında, ilk inşaat kademesinde 216 günde, toplamda 6.6 cm oturma görülmektedir. Daha sonra, oturmalar sıfırlanarak, üst yapı inşaatı sonrasındaki oturma değerlerine bakıldığında, 0.5 cm oturma görülmektedir (Şekil 14) .

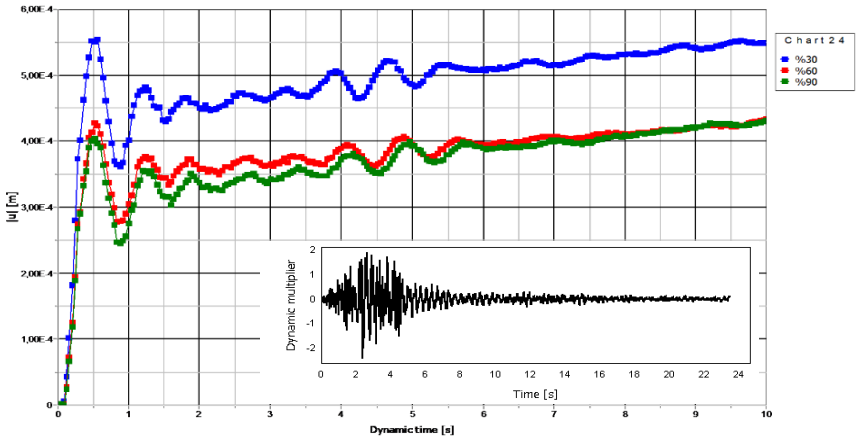
Sürtünme açısı tüm zemin tabakaları için %60 arttırıldığında, ilk inşaat kademesinde 216 günde, toplamda 6.5 cm oturma görülmektedir. Daha sonra, oturmalar sıfırlanarak, üst yapı inşaatı sonrasındaki oturma değerlerine bakıldığında, 0.5 cm oturma görülmektedir.

Sürtünme açısı tüm zemin tabakaları için %90 arttırıldığında, ilk inşaat kademesinde 216 günde, toplamda 6.5 cm oturma görülmektedir. Daha sonra, oturmalar sıfırlanarak, üst yapı inşaatı sonrasındaki oturma değerlerine bakıldığında, 0.5 cm oturma görülmektedir.



Şekil 14. Sürtünme Açısı Oturma Sonuçları

Dinamik durumda, M_w 5.4 , 28.02.1990 tarihinde olan Upland deprem verileri kullanılarak 10 saniye boyunca yapıya etki ettirilmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. Sürtünme Açısı Dinamik Oturma Sonuçları

4. SONUÇ

Bu çalışma model analizlerde hassaslık değerlendirmesi yapıldığında; zeminlerin Elastisite Modülü (E), Kohezyon (c) ve Sürtünme Açısı (ϕ) değerleri %30, %60 ve %90 oranında artırılarak, oturma davranışına hangi parametrenin en etkili olduğu belirtilmiştir.

Yapılan analizlerde, statik durumda, Elastisite modülü %30 artırımdan, %90 artırıma gidilince, %17 oranında iyileşme göstermiştir. Kohezyon değerinde ve sürtünme açısı değerlerinde, %30 artırımdan, %90 artırıma gidilince, %0.02 ve %0.015 değerlerinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Dinamik durumda ise yine toplam oturma değerleri

incelendiğinde, en iyi performansı Elastisite Modülü artırımlı model vermiştir.

Yapılan analizler sonucunda Elastisite Modülü (E), Kohezyon (c) ve Sürtünme Açısı (ϕ) değerleri arasında oturma davranışına etki eden en önemli parametrenin Elastisite Modülü (E) olduğu görülmektedir.

Analizlerde, Elastisite Modülü (E), Kohezyon (c) ve Sürtünme Açısı (ϕ) değerlerinden ayrı olarak ayrıca zeminin diğer parametrelerine bakılarak ve bu değerlerin sayıları çoğaltılarak, ayrıca genel anlamda değerlendirme yapılmalı, bu parametrelerin etkilerine bağlı olarak ayrıca olasılıksal değerlendirmelerin yapılması da önerilmektedir. Analizlerde beklenilen oturma durumlarının uyumluluğu, arazideki gerçek verilerle kıyaslanmalıdır.

KAYNAKLAR

Biot M. A. (1955) Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid , J . Appl . Phys , 26 , 182 – 185 .

Brinkgreve R.B.J, Broere W, Waterman D. (2007) PLAXIS 2D Dynamic Modüle 2007; Manual Delft University of Technology, Delft.

Cai F, Ugai K. (2000) Numerical analysis of the stability of a landslide reinforced with piles. Soils and Foundations, 40, (1), 73–84.10.3208/sandf.40.73.

Chen T. C., Lin M., Wang K. L. (2014) Landslide seismic signal recognition and mobility for an earthquake-induced rockslide in Tsaoling, Taiwan. Eng; Geol 171:31–44.

Griffiths, Lane D.V. Griffiths, P.A. Lane (1999) Slope stability analysis by finite elements Geotechnique 1999; pp. 387-403.

Abel J. F., Desai, C., S (1972) Comparison of finite elements for plate bending, Journal of the Structural Division, 1972 - cedb.asce.org.

Ling H, Ling HI. Kawabata T. (2014) Revisiting Nigawa landslide of the 1995 Kobe earthquake; Geotechnique 64:400–404.

Mungan H. (2016) Ground improvement with aggregate piers, Istanbul Kultur University, Institute of Science and Technology.

PLAXIS, (2002) User Manual. 2D, (Edited by Brinkgreeve, R.J.B.), Delft University of Technology& PLAXIS, 2002; The Netherlands.

Sert, S. (2003), “Alüviyal Ortamda Kazıklı Yayılı Temellerin Üç Boyutlu Analizi”, Sakarya Üniversitesi FBE, Doktora Tezi.

Savage WZ, Baum RL, Morrissey MM, Arndt BPi (2000) Finite-element analysis of the Woodway landslide; Washington. U.S. Geological Survey Bulletin 2180.

Terzaghi (1945): Stress conditions for the failure of saturated concrete and rock. Proc. ASTM 45. [11] GB

Terzaghi, K. (1943) Theoretical soil mechanics. Wiley, New York.

Wood, D. (2004). Geotechnical Modelling, ISBN: 9780419237303, Taylor and Francis Group, USA.

Zienkiewicz O. C. (1977) The finite element method. Maidenhead, England; McGraw-Hill.

BÖLÜM 5

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ: DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLARI

Öğr. Gör. Hüseyin MUNGAN[1]

[1] Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak MYO, İnşaat Bölümü, Türkiye. hmungan@beun.edu.tr

GİRİŞ

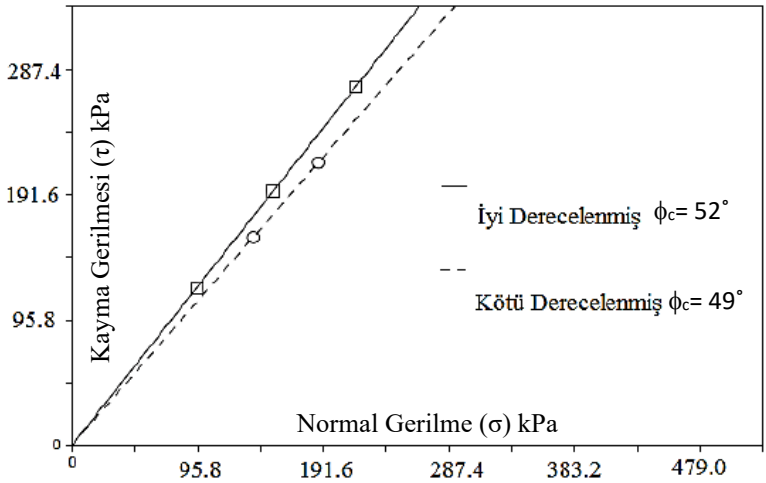
Darbeli kırmataş kolon (DKK) yöntemi Amerika'da 1980' li yıllarda Dr. Fox tarafından geliştirilen, Türkiye' de ise son 10 yıl içerisinde kullanılması yaygınlaşan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Diğer taş kolon yapım yöntemlerinden farklı olarak, granüler malzeme vurularak sıkıştırılır ve rijit bir kolon elde edilir. Bu yöntemde zemin ortamının taşıma gücünü artırarak, oturmaların azaltılması, deprem sırasında sıvılaşma riskinin azaltılması, dren gibi çalışarak konsolidasyon süresinin kısaltılması, yamaç ve şevlerde stabilitenin sağlanması, yüzeysel temellerin desteklenmesinde, döşeme plaklarının desteklenmesinde, dolguların, duvarların ve tankların stabilite çözümlerinde kullanılırlar. DKK, yöntemlerinden günümüzde en çok olarak kullanılan yöntemler, Geopier® ve Impact® DKK yöntemleridir. Diğer yöntemler DKK Kuyu yöntemi ve Rampact® yöntemleridir.

İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın amacı; aşırı oturmaların görüldüğü zemin ortamlarında darbeli kırmataş kolonların göstereceği performansların incelenmesidir. Zeminde rijitliği artırmak için yapılan darbeli kırmataş kolonlar, toplam ve farklı oturmaları azaltmaktadır.

Bu çalışmada, Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak, DKK' lar modellenerek, DKK'lı ve DKK'sız ortamda oturma miktarları karşılaştırılarak sonuçlar incelenmiştir.

1. KAYMA DİRENCİ AÇISI

DKK elemanlarının granüler malzemesinin (kırmataşlar) kayma direnci açısı değişimini Fox ve Cowell, (1998) 30 inch (76,2 cm) çapındaki DKK kolonunda, laboratuvar ortamında kesme deneyinde değişimini incelemişlerdir. Şekil 1'de görülmek üzere kırmataşların kötü ve iyi derecelenmesine göre kayma direnci açılarının değişimi 49-52˚ arasında değişmektedir.



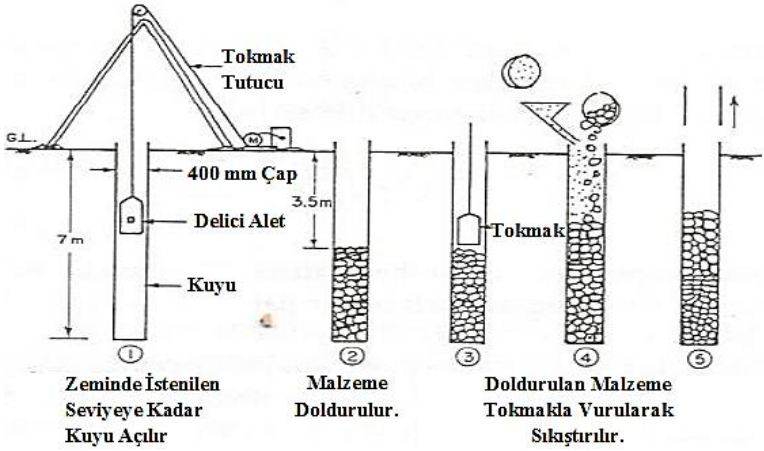
Şekil 1. DKK 'larda Kayma Direnci Açısı Değişimi (Fox ve Cowell, 1998)

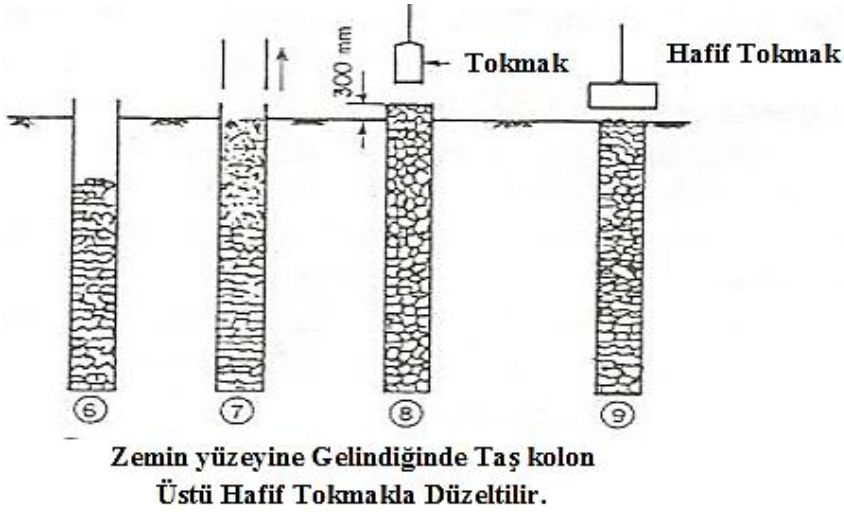
White, (2001) Iowa Üniversitesinde DKK 'ların kayma direnci açısını üç eksenli basınç deneyinde incelemiştir. Sıkıştırılan kırmataşlar üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyine kayma direnci açısını 51˚ olarak bulmuştur. Sıkıştırma sırasında yüksek enerjiler ele edildiği için ve yanal gerilmeler artığından dolayı kayma direnci açısı yüksek bulunmuştur.

2. DKK YAPIM YÖNTEMLERİ

2.1. DKK Kuyu Yöntemi

Bu yöntem Datye ve Nagaraju, (1975) tarafından geliştirilmiş olup, açılan kuyuya kırmataşlar konulup, 15-20 kN ağırlığındaki bir tokmağın, 1-1,5 m yüksekten kırmataşlara vurularak, sıkıştıran yöntemdir (Şekil 2). Bu yöntem titreşimli ittirme ve titreşimli sıkıştırma yöntemlerine göre daha ekonomik ve daha yüksek taşıma kapasitesi sunmaktadır. Ancak bu yöntem kuyu derinliğinin 12-15 m' den fazla olduğu zaman çok yavaş olup ekonomik çözümler vermemektedir.





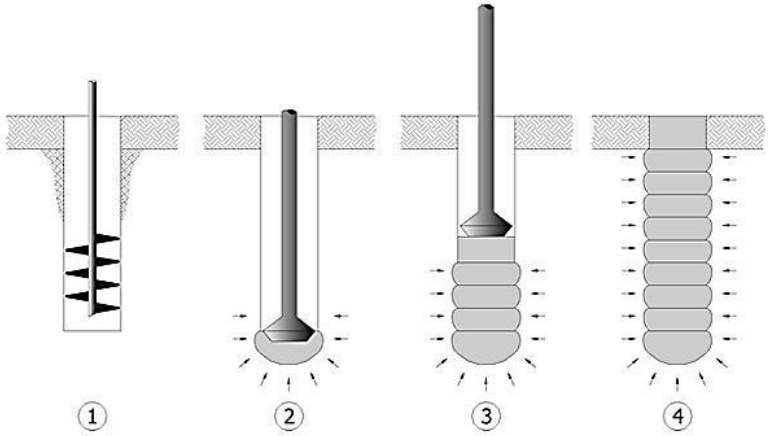
Şekil 2. DKK Kuyu Yöntemi (Datye ve Nagaraju, 1975)

2.2. Geopier® Yöntemi (GP3)

Geopier® yöntemi Şekil 3' te görülmek üzere, muhafaza borusu (a), burgu makinası (b), yükleyici (c) ve tokmak olmak üzere 4 ekipmandan oluşmaktadır. Bu yöntem elverişsiz zemin koşullarının olduğu iyileştirmeye uygun, yumuşak, katı killi ve siltli zeminler, gevşek ve sıkı kumlu zeminler ve organik siltli turba zeminlerde özellikle mevcut zeminin kazılıp yerine daha iyi zemin dolgularının yapılabileceği durumlar için uygun yöntemdir.

Şekil 3. Geopier Sistemi Ekipmanları

Geopier® yönteminde Şekil 4'te görülmek üzere, zeminde istenilen derinliğe kadar 76 cm delgi ile sondaj açılır (1), iyi derecelenmiş 5-15 cm dane boyutlu 46 cm kalınlığında granüler malzeme yerleştirilip (2), bir plaka ile vurularak, (3) kademeli olarak 30 cm kalınlığında oluşacak şekilde zemin yüzeyine kadar tabakalarla sıkıştırılır.(4) Kolon boyları 2-8 m arasında değişmekte olup, 8.5 m' ye kadar kolon boyları yapılmaktadır. Kırmataş malzemesi olarak, geri dönüşümlü beton agregaları kullanılabilmektedir. Orta yumuşaklıkta zeminlerde granüler malzeme olarak kumda kullanılabilmektedir. Ortamda taşıma gücünü 480 kPa'a kadar artırabilmektedir. Günde ortalama 30-50 kolon yapılabilmektedir. Sıkıştırmadan dolayı kolon çevresinde yanal gerilmeleri artırır.



Şekil 4. Geopier® Yöntemi

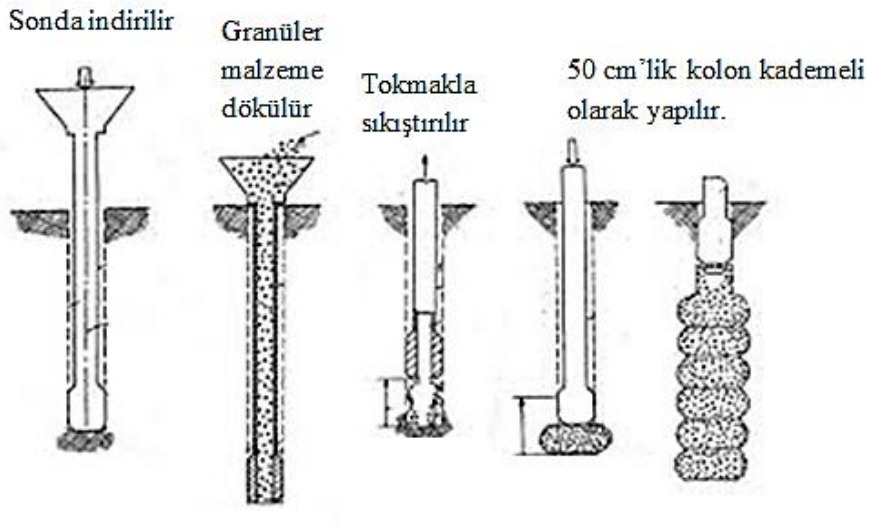
2.3. Impact® Yöntemi

Impact® yöntemi Şekil 5'te verildiği gibi (a) Impact makinesi, (b) yükleyici hazne (c) ve (d) mandrel olmak üzere 4 ekipmandan oluşmaktadır. Bu yöntem elverişsiz zemin koşullarının olduğu iyileştirmeye uygun, yumuşak, katı killi ve siltli zeminler, gevşek ve sıkı kumlu zeminler ve organik siltli turba zeminlerde özellikle mevcut zeminin kazılıp yerine daha iyi zemin dolgularının yapılabileceği durumlar için uygun yöntemdir.

Şekil 5. Impact® Sistemi

Geopier® yönteminden sonra geliştirilen Impact® yönteminde zemine 36 cm çaplı mandrel istenilen derinliğe indirilerek, içine iyi derecelenmiş doğal kırmataşlar doldurulur, daha sonra mandrel 1 m yukarı kaldırılır 67 cm aşağıya indirilerek, tokmakla kırmataşlar sıkıştırılır. Sıkıştırma sonucunda 36 cm olan çap değeri 50 cm olarak 33 cm' lik tabaka kalınlığı elde edilir. Kademeli olarak bu işlem zemin yüzeyine kadar devam eder, her kademede 50 cm'lik kolon çapları ve 33 cm'lik tabaka kalınlığı oluşur (Şekil 6). Çok yumuşak killi zeminlerde granüler malzeme arasına betonda enjekte edilebilir. Bu yöntemde kullanılan kırmataş malzemelerinin boyutları minimum 13 mm maksimum 38 mm arasında değişmektedir. Kolon boyutları minimum 3 m, maksimum 18 m' ye kadar olabilmektedir. Yapım

sırasında, muhafaza borusu gerektirmeyen bir yöntem olup, yeraltı su seviyesinin altındaki bölgelerde de uygulanabilmektedir. Günde ortalama 40-100 kolon yapılabilmektedir. Hızlı yapılan bu yöntem derin temel sistemlerine göre %20-50 daha ekonomiktir.



Şekil 6. Impact® Yöntemi

Tablo 1.' de örnek bir projede Delme Kazık, Jet Grout ve Impact® DKK yöntemleri kıyaslanmıştır. Kıyaslanma sonucunda Impact® DKK sistemlerinin diğer yöntemlerle aynı tasarım yükünde, daha az zamanda imal edilip daha ekonomik sonuçlar verdiği görülmektedir.

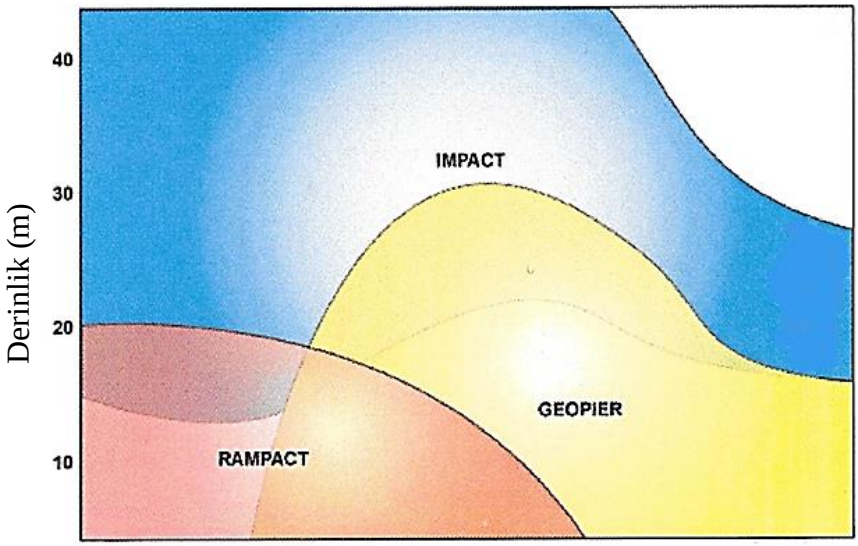
Tablo 1. Impact® DKK, Delme Kazık ve Jet Grout Yöntemlerinin Örnek Bir Projede Kıyaslanması (Geopier Foundation Company)

	Delme Kazık	**Jet Grout**	**Impact® DKK**
Çap (cm)	80	60	50
Boy (m)	36	30	14
Tekil Elemanın Emniyetli Taşıma Yükü	100 ton	36 ton	22 ton
Tasarım Gerilmesi	10 t/m^2	10 t/m^2	10 t/m^2
Oturma Miktarı	5-10 mm	3-4 cm	5-6 cm
Karelaj (m)	3,2 x 3,2	1,9 x 1,9	1,5 x 1,5
Kullanılan Malzeme	Beton ve Çelik	Çimento	Kırmataş
Proje Süresi	50 gün	40 gün	30 gün
Toplam Metraj	3600 metre	8400 metre	6300 metre
Proje Bedeli	% 100	% 52	% 36

2.4. Rampact® Yöntemi

Rampact® sistemi Türkiye'de henüz kullanılmamakla birlikte, diğer yöntemlere göre daha kısa kolonlar elde edilen yöntemdir. Günde ortalama 40-60 kolon yapılabilmektedir. Kolon boyları 8 m' ye kadar olabilmektedir. Mandrel 4-7 m derinliğe kadar, zemine indirildikten sonra, mandrele yukarıdan kırmataş malzemeleri dökülerek, mandrel yukarıya doğru çekildikten sonra, granüler malzeme yukarıya doğru çekilerek, kuyu içine dolan granüler malzemeler bir tokmakla sıkıştırılarak DKK elde edilir. Kolon etrafında yanal gerilmeleri artırır, sığ temel altına ve döşeme plak temellerinin altına uygun olarak yapılmaktadır.

Şekil 7' de görüldüğü gibi, Geopier®, Impact® ve Rampact® DKK yöntemlerinin zemin cinslerine göre uygulanabilirliği görülmektedir.



Şekil 7. DKK Yöntemlerinin Zemin Tipine Göre Uygulanabilirliği (Geopier Technical Workshop, 2014).

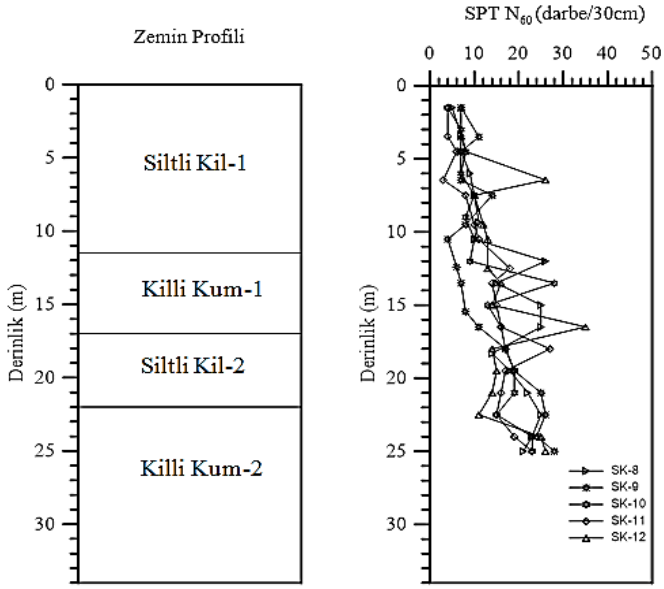
3. MODELLEME

Bu bölümde Jeotermal Enerji Santrali projesinde yapılmış olan grup halindeki DKK'ların Plaxis 2D sonlu elemanlar programında farklı yöntemlerle modellemesi yapılarak DKK'lı ve DKK'sız ortamda yayılı temel altındaki oturmaları karşılaştırılmıştır.

3.1. Proje Özellikleri

Jeotermal Enerji Santrali projesinde Şekil 8' de görüldüğü gibi 4 farklı zemin tabakası görülmektedir. Impact® yöntemine göre imal edilen 50 cm çapındaki DKK' lar temel altına 1,7 m x 1,7 m mesafeli olarak

kare yerleşim planına göre, şaft uzunluğu 17 m olacak şekilde zemine uygulanmıştır. DKK ve zemin özellikleri Tablo 2.' de verilmiştir.



Şekil 8. Zemin Tabakaları ve SPT-N Sayıları

Tablo 2. Jeotermal Enerji Santrali Projesi Zemin ve DKK Özellikleri

Zemin	Kalınlık (m)	ρ (kN/m³)	ρ_{sat} (kN/m³)	E_u (kPa)	E (kPa)	c_u (kPa)	c′ (kPa)	ϕ(°)	ν	ν_u	k (m/gün)
Siltli Kil-1	11,5	18	19	-	2773	40	-	0	-	0,5	10^{-5}
Killi Kum-1	5,5	19	20	-	16800	-	-	35	0,3	-	1
Siltli Kil-2	5	18	19	-	6240	90	-	0	-	0,5	10^{-5}
Killi Kum-2	12	19	20	-	20000	-	10	33	0,35	-	1
DKK	17	22	-	-	165000	-	0	45	0,25	-	-

Burada, E_u: Drenajsız elastisite modülü, ν_u: Drenajsız durumda poisson oranı, k: Geçirimlilik katsayısı'DIR. Proje verilerinde, DKK üstüne oturacak olan yayılı temelin boyutları, B = 17 m ve L = 19 m olup yayılı temel kalınlığı 60 cm dir. Üst yapıdan zemine gelen maksimum gerilme 100 kPa dır. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden itibaren 1,7 m derinliktedir.

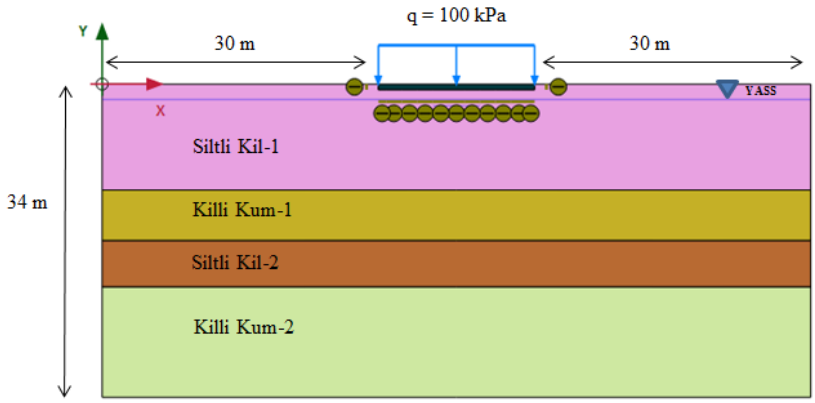
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Çalışmada, düzlem deformasyon (*Plane Strain*) modeli kullanılarak analizler yapılmıştır. Analizlerde zeminin, gerilme deformasyon davranışını hiperbol olarak tanımlayıp, 3 farklı elastisite modülünü esas aldığından dolayı ve zeminin elastoplastik özelliğini daha iyi ifade etmesinden ötürü pekleşen zemin modeli, (*Hardening Soil*) esas alınarak tüm analizler drenajlı duruma göre yapılmıştır. Şekil 9' da görülmek üzere, sınır koşullar yatay düzlemde, mimimum (x_{min}) 0 m, maksimum (x_{max}) 77 m, düşey düzlemde ise mimimum (y_{min}) 0 m, maksimum (y_{max}) 34 m, alınmıştır. Analiz yapılırken 3 farklı yöntem esas alınarak yayılı temeldeki toplam oturmalar karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler, DKK'sız ortamda temeldeki oturmalar, DKK ile oluşan kompozit zemin modeline göre temeldeki oturmalar ve DKK' lı ortamda temeldeki oturmalar olmak üzere üç farklı analiz sonuçları irdelenmiştir.

Şekil 9. Plaxis 2D Programında Zemin Tabakalarının Modellenmesi

3.3. DKK'sız Ortamda Temeldeki Oturmalar

DKK' sız ortamda analiz yapılırken, sınır koşullar alınarak Şekil 10'da görüldüğü gibi 17 m genişliğinde ve 60 cm kalınlığında yayılı temel zemin modelinin ortasına, sağ ve soldan 30 m açıklık kalacak şekilde, 100 kPa yayılı yük etkitilmiştir. Temel ile zemin arasına arayüz bölgesi (*interface*) tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri ve yayılı temel parametreleri Tablo 3.' te ve Tablo 4.' te verilmiştir.



Şekil 10. Yayılı Temelin Modellenmesi

Proje verilerinde, bazı zeminlerin drenajlı parametreleri bulunmadığından, analizlerde Siltli Kil-1 ve Siltli Kil-2 zemin tabakaları için kayma direnci değerleri (τ), Tablo 1.' deki drenajsız kayma direncine eşit alınarak, Siltli Kil-1 için 40 kPa ve Siltli Kil-2 için 90 kPa alınmıştır. Bu değerlerle birlikte Siltli Kil-1 ve Siltli Kil-2 zeminlerinin tabaka ortalarına kadar efektif gerilme değerleri alınarak, denklem (1)' deki kayma direnci ifadesine göre efektif kohezyon değerleri bulunmuştur.

$$\tau = c' + \sigma_0' \tan\phi' \qquad (1)$$

Siltli Kil-1 için, $\phi' = 25^\circ$ kabul edilirse, $40 = c' + 64 \tan 25$, $c' = 10$ kPa olur.

Siltli Kil-2 için, $\phi' = 20^\circ$ kabul edilirse, $90 = c' + 182 \tan 20$, $c' = 23$ kPa olur.

Tablo 3. Analizlerde Kullanılan Zemin Parametreleri

	Siltli Kil-1	**Kili Kum-1**	**Siltli Kil-2**	**Killi Kum-2**
Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin
Drenaj Durumu	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
ρ (kN/m^3)	18	19	18	19
ρ_{sat} (kN/m^3)	19	20	19	20
E_{50} (kPa)	2773	16800	6240	20000
E_{oed} (kPa)	2773	16800	6240	20000
E_{ur} (kPa)	8319	50400	18720	60000
ν'_{ur}	0,2	0,2	0,2	0,2
c' (kPa)	10	5	23	10
ϕ' (°)	25	35	20	33
ψ (°)	0	5	0	3

Tablo 4. Analizde Kullanılan Yayılı Temel Özellikleri

Malzeme	Malzeme Modeli	Drenaj Durumu	ρ (kN/m^3)	E (GPa)	ν
Yayılı Temel	Lineer Elastik	Geçirimsiz	24	30	0,2

Burada,

E_{50} : Kiriş modülü,

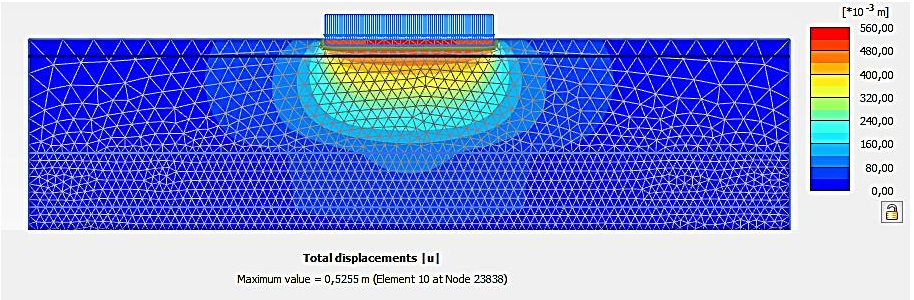
E_{oed} : Ödometre modülü,

E_{ur} : Yükleme boşalma modülü,

ν'_{ur} : Yükleme boşalma poison oranı,

ψ : Kabarma açısı,

Kademeli olarak modellenen yayılı temelde, 100 kPa yayılı yük altında Şekil 11' de görüldüğü gibi toplamda 52,55 cm oturma görülmüştür.



Şekil 11. DKK'sız Ortamda Yayılı Temeldeki Toplam Oturma

Şekil 16'da görüldüğü gibi DKK'sız ortamda konsolidasyon oturması yaklaşık olarak 6500 gün sürmektedir. Üst yapı inşaatının tamamlanması 186 gün sürmektedir. Bu süre içinde yayılı temel 25,17 cm oturma yapmaktadır. Üst yapı inşaatı bittikten sonra temelde 27,38 cm oturma görülmektedir.

3.4. Kompozit Zemin Ortamında Temeldeki Oturmalar

Kompozit zemin ortamında, Şekil 12' de görüldüğü gibi temel altındaki DKK'ların belli sınırlar içerisinde etkidiği bölgede zeminin ve DKK' nın parametrelerini birlikte kapsayan iyileştirilmiş kompozit zemin bölgesi tanımlanmıştır. İyileştirilmiş kompozit zemin bölgesindeki elastisite modülü, kohezyon ve kayma direnci açısı alan oranına göre, denklem 2, 3 ve 4' teki gibi bulunarak kompozit zemin parametreleri elde edilerek Tablo 5.' te gösterilmiştir. Siltli Kil-1, Kili

Kum- 1, Siltli Kil- 2 ve Killi Kum- 2 değerleri Tablo 3.' e göre alınmıştır.

$$Ra = \frac{A_g}{s^2} = \frac{\pi(0,5/2)^2}{1,7^2} = 0,068$$

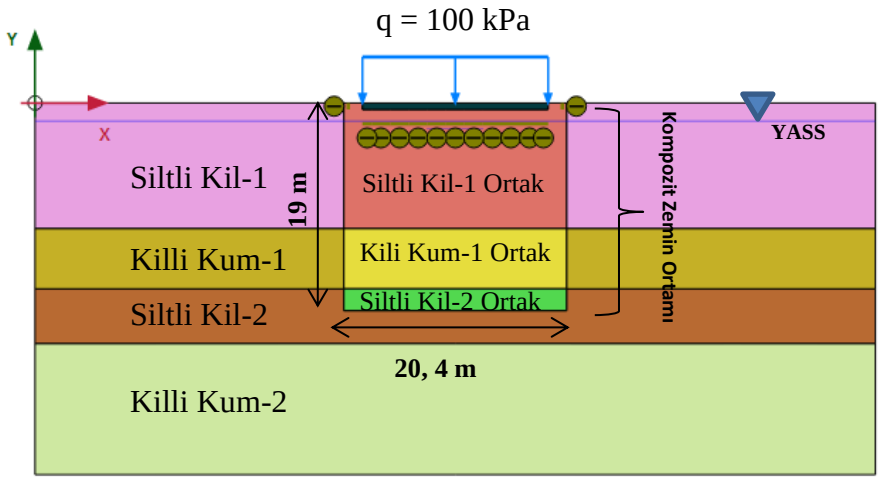
olarak elde edilir.

Burada,

A_g : DKK taban alanı,

s : DKK arasındaki mesafe,

dir.



Şekil 12. Kompozit Zemin Ortamı

Tablo 5. Kompozit Ortamda Zemin Parametreleri

	Siltli Kil-1 Ortak	**Kili Kum-1 Ortak**	**Siltli Kil-2 Ortak**
Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin
Drenaj Durumu	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
ρ (kN/m^3)	18	19	18
ρ_{sat} (kN/m^3)	19	20	19
$E_{comp\,50}$ (kPa)	13800	26880	17040
$E_{comp\,oed}$ (kPa)	13800	26880	17040
$E_{comp\,ur}$ (kPa)	41410	80630	51110
ν'_{ur}	0,2	0,2	0,2
c'_{comp} (kPa)	10	5	22
ϕ'_{comp} (°)	26	35,6	22
ψ (°)	0	5	0

$$E_{comp} = (1 - Ra)E_{zemin} + Ra\ E_{DKK} \tag{2}$$

$$c'_{comp} = (1 - Ra)c_{zemin} + Ra\ c_{DKK} \tag{3}$$

$$\phi'_{comp} = (1 - Ra)\phi_{zemin} + Ra\ \phi_{DKK} \tag{4}$$

Burada,

E_{comp} : DKK ve zemini kapsayan bölgenin ortak elastisite modülü,

c'_{comp} : DKK ve zemini kapsayan bölgenin ortak kohezyonu,

ϕ'_{comp} : DKK ve zemini kapsayan bölgenin ortak kayma direnci açısı,

Ra : Alan oranı,

Siltli Kil-1 Ortak için,

$$E_{comp} = (1-Ra)E_{zemin} + Ra\ E_{DKK} = (1-0,068)x2773 + 0,068\ x165000 = 13800\ kPa\ olur.$$

$$c'_{comp} = (1-Ra)c_{zemin} + Ra\ c_{DKK} = (1-0,068)x10 + 0,068\ x5 = 10\ kPa\ olur.$$

$$\phi'_{comp} = (1-Ra)\phi_{zemin} + Ra\ \phi_{DKK} = (1-0,068)x25 + 0,068\ x45 = 26^{\circ}\ olur.$$

Killi Kum-1 Ortak için,

$$E_{comp} = (1-Ra)E_{zemin} + Ra\ E_{DKK} = (1-0,068)x16800 + 0,068\ x165000 = 26800\ kPa\ olur.$$

$$c'_{comp} = (1-Ra)c_{zemin} + Ra\ c_{DKK} = (1-0,068)x5 + 0,068\ x5 = 5\ kPa\ olur.$$

$$\phi'_{comp} = (1-Ra)\phi_{zemin} + Ra\ \phi_{DKK} = (1-0,068)x35 + 0,068\ x45 = 35,6^{\circ}\ olur.$$

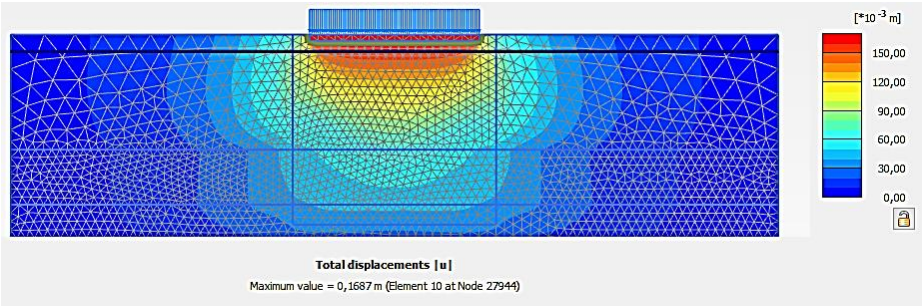
Siltli Kil-2 Ortak için,

$$E_{comp} = (1-Ra)E_{zemin} + Ra\ E_{DKK} = (1-0,068)x6240 + 0,068\ x165000 = 17040\ kPa\ olur.$$

$$c'_{comp} = (1-Ra)c_{zemin} + Ra\ c_{DKK} = (1-0,068)x23 + 0,068\ x5 = 22\ kPa\ olur.$$

$$\phi'_{comp} = (1-Ra)\phi_{zemin} + Ra\ \phi_{DKK} = (1-0,068)x20 + 0,068\ x45 = 22^{\circ}\ olur.$$

Kademeli olarak modellenen yayılı temelde, 100 kPa yayılı yük altında Şekil 13'te görüldüğü gibi toplamda 16,87 cm oturma görülmüştür.

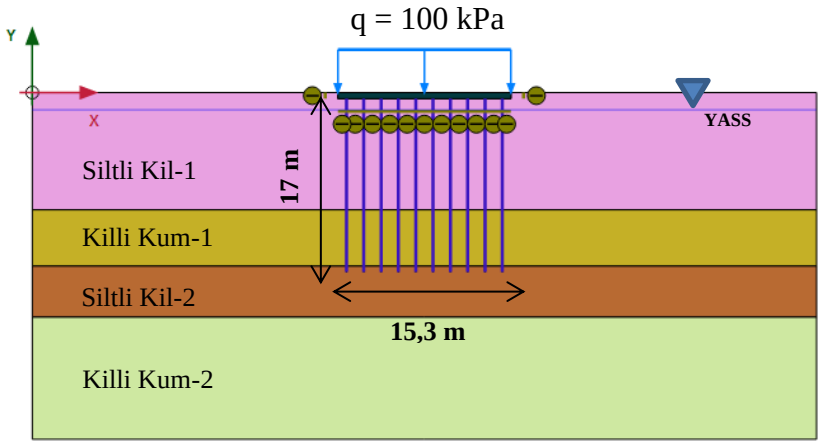


Şekil 13. Kompozit Ortamda Yayılı Temeldeki Oturma

Şekil 16' da görüldüğü gibi kompozit ortamda konsolidasyon oturması yaklaşık olarak 1500 gün sürmektedir. DKK' ların yapılması ve üst yapı inşaatının tamamlanması 216 gün sürmektedir. Bu süre zarfında yayılı temel 12,4 cm oturma yapmaktadır. Üst yapı inşaatı bittikten sonra temelde 4,47 cm oturma görülmektedir.

3.5. DKK' lı Ortamda Temeldeki Oturmalar

Bu yöntemde Şekil 14' te görüldüğü gibi yayılı temel altına 1,7 m aralıklarla 17 m uzunluğunda, DKK' lar tanımlanmıştır. Plaxis 2D programında kazıklar arasında mesafe tanımlaması yapılabilen *embedded beam row* özelliği kullanılarak, Tablo 6.' daki parametreler tanımlanmıştır. Siltli Kil-1, Killi Kum-1, Siltli Kil-2 ve Killi Kum-2 zemin parametreleri Tablo 3.' teki gibi alınmıştır.



Şekil 14. DKK' lı Modelleme

DKK uç direnci ve sürtünme direnci değerleri, drenajsız durum için, sürtünme direnci (fs), drenajsız kayma direncine eşit alınarak, uç direnci (Q_g), hesaplanarak Tablo 6.'da gösterilmiştir.

Siltli Kil-1 bölgesinde ilk aşamada drenajsız kayma direnci 40 kPa olduğundan üst bölgede sürtünme direnci 40 kPa alınmıştır. Siltli Kil-2 bölgesinde ise, drenajsız kayma direnci 90 kPa olduğundan, alt bölgede sürtünme direnci 90 kPa alınmıştır. Ortalama olarak sürtünme direnci,

$$fs = (40+90)/2 = 65 \text{ kPa},$$

birim genişlik için 65 kN/m alınmıştır.

Uç direnci,

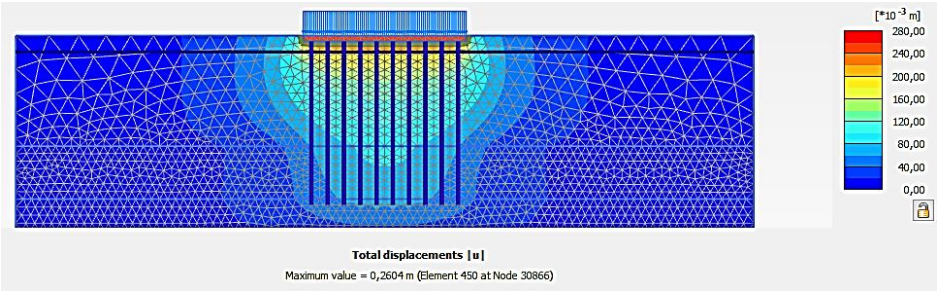
$$Q_g = 9\ c_u\ A_g = 9 \text{ x } 90 \text{ x } \pi(0,5/2)^2 = 160 \text{ kN}$$

elde edilir.

Tablo 6. DKK Parametreleri

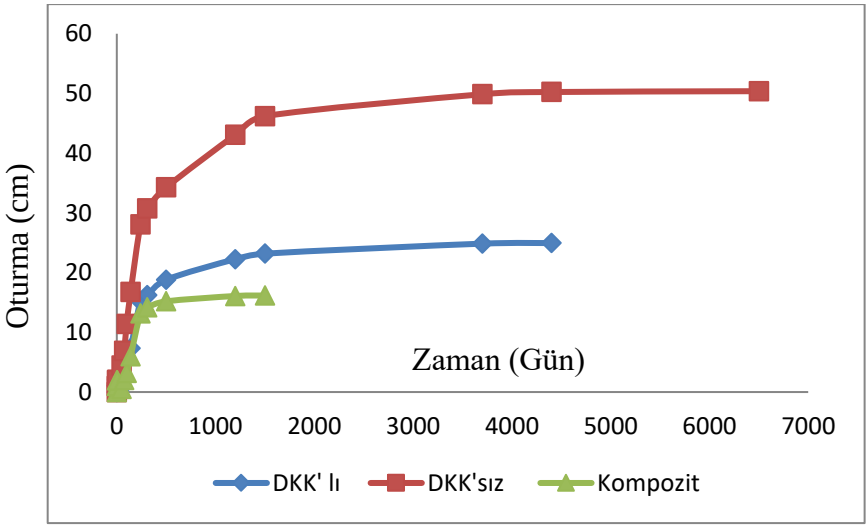
Malzeme	E (MPa)	ρ (kN/m^3)	Çap (m)	Sürtünme Direnci fs (kN/m)	Uç Direncib Q_g (kN)
DKK	165	22	0,5	65	160

Kademeli olarak modellenen yayılı temelde, 100 kPa yayılı yük altında Şekil 15' te görüldüğü gibi toplamda 26,04 cm oturma görülmüştür.



Şekil 15. DKK' lı Ortamda Yayılı Temeldeki Oturma

Şekil 16' da görüldüğü gibi DKK' lı ortamda konsolidasyon oturması yaklaşık olarak 4400 gün sürmektedir. DKK' ların yapılması ve üst yapı inşaatının tamamlanması 216 gün sürmektedir. Bu süre zarfında yayılı temelde 14,5 cm oturma görülmektedir. Üst yapı inşaatı bittikten sonra temelde 11,54 cm oturma görülmektedir.



Şekil 16. Oturmaların Karşılaştırılması

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Plaxis 2D sonlu elemanlar programında darbeli kırmataş kolonların grup halinde modellenmesi üzerinde ve uygulamadan örnek verilerek zeminde göstereceği performanslar irdelenmiştir. DKK' lar yetersiz taşıma gücünün olduğu ve aşırı oturmaların görüldüğü zeminlere uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, grup halindeki Impact® DKK' ların araziye en yakın şekilde modellenmesi yapılarak 3 farklı durum üzerinde çalışılmıştır.

İlk modelde yayılı temelin DKK' sız ortamda drenajlı durumda (uzun vadede) yapacağı toplam oturma analiz edilmiştir. Analiz yapılırken kademeli olarak yayılı temel tanımlanıp, üst yapıdan 100 kPa yayılı yük zemine etkiletilerek, toplamda 52,55 cm konsolidasyon oturması

saptanmıştır. Bu durum oturma açısından zemin ortamının çok elverişsiz olduğunu göstermektedir.

İkinci modelde, kompozit zemin modeli esas alınarak, DKK' ların temel altında etkilediği bölge sınırları içerisinde, zemin ve DKK parametrelerini kapsayan ortak elastisite modülü, kohezyon ve kayma direnci açısı değerleri tanımlanmıştır. Analiz yapılırken önce temel kazısının yapılması tanımlanarak, DKK' ların etkidiği bölgede ortak kompozit bölge oluşturulmuştur. Yayılı temel tanımlanıp, üst yapıdan 100 kPa yayılı yük zemine etkiletilerek, analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda yayılı temelde toplam 16,87 cm oturma görülmüştür. İlk modele göre toplam oturmalar, %68 oranında azalmıştır. Ortam rijitliğinin artmasından ötürü, konsolidasyon oturmalarının %73' ü üst yapı inşaatı yapılırken gerçekleşmiş ve konsolidasyon süresi %76 oranında azalmıştır.

Üçüncü modelde DKK' lar 1,7 m aralıklarla kare yerleşim planına uygun olarak temel altına 17 m uzunluğunda olacak şekilde tanımlanmıştır. Analiz yapılırken önce temel kazısının yapılması tanımlanarak, DKK' lar 1,7 m aralıklarla temel altına tanımlamıştır. DKK' lar tanımlandıktan sonra DKK' ların üstüne yayılı temel tanımlanmıştır. Son aşamada 100 kPa üst yapı yükü zemine etkiletilerek, analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda yayılı temelde toplamda 26,04 cm oturma görülmüştür. İlk modele göre toplam oturmalar, %50 oranında azalmıştır. Ortam rijitliğinin artmasından ötürü konsolidasyon oturmalarının %55' i üst yapı inşaatı yapılırken gerçekleşmiş ve konsolidasyon süresi %32 oranında azalmıştır.

İkinci ve üçüncü model sonuçları analizlerde ele alınan zemin parametrelerinin farklı olmasından dolayı oturma açısından farklı sonuçlar göstermektedir. İkinci modelde kompozit zemin modeli esas alındığından ortak zemin parametreleri (E, c ve ϕ), tanımlanarak, üçüncü modelin zemin parametrelerinden daha yüksektir. Bu sebepten ötürü ikinci modelde oturmalar daha az bulunmuştur. Analiz sonuçlarına göre DKK' lar aşırı oturmaların olası görüldüğü zemin ortamlarında bu oturmaları azaltmaktadır.

Darbeli kırmataş kolonların, tasarımı yapılırken zemin ortamında yapacağı oturma miktarı konusunda, tasarım ve gerçek arazideki göstereceği performansların uyuşması, tasarımda bulunan oturmaların arazideki gerçek oturmaların karşılaştırılması yapılmalıdır. Tasarım yapılırken beklenilen durumların arazideki uyumluluğu kontrol edilmelidir.

KAYNAKLAR

Aboshi, H. and Suematsu, N., (1985) “Sand Compaction Pile Method’’ state-of-the-art paper. Proceedings of 3rd International Geotechnical Seminar on Soil Improvement Methods, Nanyang Technological Institute, Singapore.

Alonso, J. A. and Jimenez, R., (2011) “ Reliability Analysis of Stone Columns for Ground Improvement’’, GeoRisk ASCE

Bae, W.S., Shin, B.W. and An, B.C., (2002) ‘‘Behaviors of Foundation System Improved with Stone Columns’’ , Kitakyushu, Japan.

Barksdale, R. D. and Bachus, R. C., (1983) “Design and Consruction of Stone Columns’’, vol.1.Report no. FHWA/RD-83/026, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Bargado, D. T., Anderson, L. R., Muira, N., and Balasubramaniam, A. S., (1996) “Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments’’. ASCE, 427.

Bergado, D. T., Alfaro, M. C., Chai, J. C. ve Balasubramaiami, A. S., (1994) “Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment” Balkema, Rotterdam, pp. 57 – 97.

Brauns, J. (1978). “Initial Bearing Capacity of Stone Columns and Sand Piles.” Vol. I, Proc., Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques in Engineering Practice, New South Wales Institute of Technology, Sydney, Australia, pp.497-512.

Carvajal, E., Vukotić, G., Castro, J. and Wehr, W., (2013) “Comparison Between Theoretical Procedures and Field Test Results For The Evaluation Of Installation Effects Of Vibro-Stone Columns’’, Taylor and Francais Group, London, ISBN 978-1-138-00041-4

Çekinmez Z. ve Erol O., (2015) “Yüzer Tip Taş Kolonlarda Oturma Azaltım Oranı Üzerine Deneysel Bir Çalışma’’, 6. Geoteknik Sempozyumu 26-27 Kasım 2015, Çukurova Üniversitesi, Adana

Choobbasti, A. J., Zahmatkesh A. and Noorzad R., (2011) “Performance of Stone Columns in Soft Clay: Numerical Evaluation’’, Geotech Geol. Eng. 29:675-684 DOI 10.1007/s10706-011-9409-x

Datye, K.R. and Nagaraju S.S., (1975) “Installation and Testing of Rammed Stone Columns’’, Proceedings of the Indian Geotechnical Society Specialty Session, 5th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangalore, India, 101–104.

Durgunoğlu, H.T., Kulaç, F., İkiz, S. ve Karadayılar, T., (1992) “Taş Kolonlar ile Zemin Islahı Üzerine Bir Uygulama’’, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi, İTÜ

Düzceer, R. ve Gökalp A., (2002) “Akaryakıt Tank Temellerinin Taş Kolonlarla İyileştirilmesi’’, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, 21-22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

Fox, N. S. and Cowell, M.J., (1998) “Geopier Foundation ans Soil Reinforcement Manuel’’, Geopier Foundation Company Inc. Scootsadale. A.Z.

Fox, N. S. and Edil, T.B., M.J., (2000) “Case Histories of Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement Construction over Peat and Highly Organic Soils’’, Soft Ground Stabilization, pp. 146-157

Greenwood DA, Kirsch, K., (1983) “Specialist Ground Treatment by Vibratory and Dynamics methods’’. In: Proceedings, International Conference on Piling and Ground Treatment, Thomas Telford, London, pp 17–45

Greenwood, D. A., and Thompson, G. H., (1984) “Ground Stabilization, Deep Compaction and Grouting ’’ . ICE Works Construction Guides , Thomas Telford Ltd. London

Geopier Foundation Co. Inc Technical Bulletin

Geopier Technical Workshop, April 3-5 2014, Phoneix, Arizona

Handy, R L., (2001). Personal communication. March 1, 2001. Hsu, C. L. (2000). “Uplift Capacity of Geopier Foundations.” MS thesis. University of Utah.

Hughes, J.M.O. and Withers, N.J., (1974) “Reinforcing Of Soft Cohesive Soils With Stone

Columns’’, Ground Engineering, Vol. 7, No. 3, pp 42-49.

Hughes, J.M.O., Withers, N.J. and Greenwood, D.A., (1975) “Afield Trial Of The Reinforcing Effect Of a Stone Column In Soil’’ , Geotechnique, 25(1), pp.31-44

Indian Standarts (IS 15284). “Design And Construction For Ground Improvement Guidelines Part 1 Stone Columns’’, 2003

Jeludin, N. M., Sivakumar, V., O’Kelly, B. C. and Mackinnon, Pa. A., (2015) “Experimental Observations of Settlement of Footings Supported on Soft Clay Reinforced with Granular Columns: Laboratory Model Study’’, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001377. © 2015 American Society of Civil Engineers.

Kosho, A., (2000) “Ground Improvement Using the Vibro-Stone Column Technique’’, ALTEA & Geostudio2000, Rr. Maliq Muco L. 6, Durres, Albania

Kurt, E., (2011) “Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Elemanlarına ait Yükleme Testlerinin Sayısal Analizi ve Sonuçlarının Karşılaştırılması’’, Yüsek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Lawton, E.C. and Fox, N. S., (1994). “Settlement of Structures Supported on Marginal Old Inadequate Soils Stiffened with Short Aggregate Piers’’ In-situ Deep Soil Improvement, Proc. ASCE National Convention, Atlanta, Georgia, 121-132

Madhav, M.R., (2007) “Granular Piles-Construction, Design and Behaviour’’, Sri Lankan Geotechnical Society with International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering under the ISSMGE Touring Lecture Programme 17th & 18th December 2007 at Hotel Galadari.

Madhav, M.R. and Vitkar, P.P., (1978) “ Strip Footing on Weak Clay Stabilized with a Granular Trench or Pile’’Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(4): 605-609, 10.1139/t78-066.

Mitchell, J. K. and Huber, T. R., (1985) “Performance Of a Stone Column Foundation ’’ , Journal of Geotechnical Engineering, Vol.Ill, No. 2, February, 1985

Mitchell, J.K., (1982) “Soil improvement-State-of-the-Art, Proceedings’’, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE, Stockholm, June, Vol. 4., pp. 509 565.

Mitchell, J.K., and Katti, R.K., (1981) “Soil Improvement-State-of-the-Art Report’’,Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, pp.261-31

Moseley, M. P., and Kirsch, K., (2004) “Ground Improvement, 2nd Edition, SponPress,Taylor and Francis Group, London and New York.

Munfakh, G.A., (1984) “ Soil Reinorcement by Stone Columns-Varied Case Applications’’, Int. Cnf. On Insitu Soil and Rock Reinforcement, Paris , pp:157-162

Önalp, A. ve Sert S., Geoteknik Bilgisi III , Birsen Yayınevi 2010

Poorooshasb H. B. and Meyerhof, G. G., (1997) “Analysis of Behavior of Stone Columns and Lime Columns’’ , Computers and Geotechnics, Vol. 20, No. 1, pp. 47-70

Priebe, H. J., (1978), “Abschaetzung des Scherwiderstandes eines durch Stopfverdichtung verbesserten Baugrundes,” Die Bautechnik, (55), 8, 281-284.

Priebe H.J., (1995) “The Design of Vibro Replacement’’, Ground Enginnering, pp:31-37

Selçuk, L., (2009) “Zemin Sıvılaşmasına Karşı Optimum Taş Kolon Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi’’, Ankara Üniversitesi Doktora Tezi, Ankara

Tan, S., Ng, K. and Sun, J., (2014) “Column Group Analyses for Stone Column Reinforced Foundation From Soil Behaviour

Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering ’’, pp.597-608,doi: 10.1061/9780784413265.048

Van Impe, W.F, De Beer, E., (1983). “Improvement of Settlement Behavior of Soft Layers by Means of Stone Columns”, Proceedings of 8th ECSMFE, Helsinki

Van Impe, W.F. and Madhav, M.R., (1992) “Analysis and Settlement of Dilating Stone Column Reinforced Soil’’, Austrian Geotechnical Journal, 137: 114-121

Vesic, A.S., (1972) “Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass’’, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.98(SM3), pp.365-290

White, D.J., (2001) “Personal Communication. September 13

White, D. J., Wissmann K. J., Barnes A. G. and Gaul A. J., (2002) “Embankment Support: A Comparison of Stone Column and Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement.” Presented at Transportation Research Board, 81st Annual Meeting, Washington, D.C., January 13-17.

Wissmann, K. J., (1999) “Bearing Capacity of Geopier-Supported Foundation Systems’’ , Technical Bulletin No.2, Geopier Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.

Wissmann, K. J., FitzPatrick, B.T. and White, D. J., (2002) ”Improving Global Stability and Controlling Settlement with

Geopier Soil Reşnforcing Elements'', Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement Techniques, Kuala Lumpur, Malaysia

Wissmann, K. J., Fox, N. S. and Martin, P., (2000) "Rammed Aggregate Piers Defeat 75-Foot Long Driven Piles'', Proceedings, Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Faciliti es, ASCE Special Publication, No.194, Amherts, Massachusetts

Wood, D. M., Hu, W. and Nash, F. T., (2000) "Group Effects In Stone Column Foundations: Model Tests'' , Géotechnique 50, No. 6, 689-698

Zhang, L., Zhao, M., Shi, C. and Zhao H., (2013) "Settlement Calculation of Composite Foundation Reinforced with Stone Columns'', International Journal Of Geomechanics ASCE, 13: pp.248-256.

ISBN: 978-625-7897-99-0