

**T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KENTSEL DÖNÜŞÜM ATIKLARI İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ  
ZEMİNLERİN FLAC 2D İLE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mehmet Tahsin BİLGİÇLİ**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi İsa VURAL**

**Temmuz 2019**

T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KENTSEL DÖNÜŞÜM ATIKLARI İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ  
ZEMİNLERİN FLAC 2D İLE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ


Mehmet Tahsin BİLGİÇLİ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez.../.../2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Dr. Öğr. Üyesi  
Günay BEYHAN  
Jüri Başkanı

  
Dr. Öğr. Üyesi  
İsa VURAL  
Üye

  
Dr. Öğr. Üyesi  
Tahir AKGÜL  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mehmet Tahsin BİLGİÇLİ

.../.../2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi İsa VURAL'a ve çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen arkadaşım İnşaat Yüksek Mühendisi Ayşe SAÇAR'a teşekkür ederim.

Çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli eşim Asiye BİLGİÇLİ' ye ayrıca, eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen Annem, Babam ve tüm aile fertlerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

<b>TEŞEKKÜR.....</b>	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER. ....</b>	<b>iii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ.....</b>	<b>ix</b>
<b>TABLolar LİSTESİ.....</b>	<b>xi</b>
<b>ÖZET.....</b>	<b>xii</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>xiii</b>
<b>BÖLÜM 1.</b>	
<b>GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Çalışmanın Amacı.....	3
1.2. Kentsel Dönüşüm.....	3
<b>BÖLÜM 2.</b>	
<b>LİTERATÜR ÖZETİ.....</b>	<b>5</b>
2. Zeminde İyileştirme Metodları.....	5
2.1. İnşaat yıkıntı atıkları ile iyileştirme.....	5
2.1.1. İnşaat yıkıntı atık hiyerarşisi ve bertaraf usulleri.....	6
2.2. Kireçle Stabilizasyon.....	7
2.3. Bitümler İyileştirme.....	8
2.4. Çimento ile Stabilizasyon .....	9
2.5. Baca Külü Ve Kireç ile Stabilizasyon .....	9
2.6. Ucucu Kül Katkısı ile İyileştirme.....	9
2.6.1. Doğal puzzolanlar.....	10
2.6.2. Yapay puzzolanlar.....	10
2.7. Eski Araç Lastiği Kullanımı.....	10

2.7.1. Ömrünü tamamlamış lastiklerin sınıflandırılması.....	11
2.8. Çimneto ve Uçucu Kül Katkısı.....	11
2.9. Çimento ve Kireç Katkısı.....	12
2.10. Çelikhane Cürufu ile Stabilizasyon.....	12
2.11. Kazık Destekli Sistemler.....	13
2.11.1 Kazık çeşitleri.....	13
2.11.1.1. Ahşap kazıklar.....	13
2.11.1.2. Beton kazıklar.....	14
2.11.1.3. Betonarme kazıklar.....	14
2.11.1.3.1. Betonarme çakma kazıklar.....	14
2.11.1.3.2. Fore kazıklar.....	14
2.11.1.4. Çelik kazıklar.....	14
2.11.1.5. Kompozit kazıklar.....	14

### **BÖLÜM 3.**

#### **YAPI-ZEMİN MODELLERİNDE NÜMERİK ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI. 15**

3.1. Alt Sistem Yaklaşımı.....	15
3.2. Doğrudan Çözüm Yaklaşımı.....	16
3.3. Zemin Platformlarının Modelleme Şekilleri.....	17
3.3.1. Zemin idealleştirme yöntemleri.....	17
3.3.1.1. Sınır şartlarının sınır elemanlar yöntemi ile saptanması.....	18
3.3.1.2. Viskoz sınır şartları ile modelleme.....	19
3.4. Sonlu Farklar Metodu.....	20
3.4.1. Zaman adımı yöntemi.....	21
3.4.2. Lagrangian analizi .....	22
3.4.3. Alan denklikleri .....	22
3.4.4. Hareket ve eşitlikler .....	22
3.4.5. Temel ilişkiler .....	24
3.4.6. Sınır şartları .....	24
3.4.7. FLAC zemin modelleri .....	25
3.4.7.1. Elastik – İzotropik model .....	25
3.4.7.1.1. Poisson oranı .....	27

3.4.7.1.2. Young modülü .....	27
3.4.7.1.3. Bulk modülü .....	27
3.4.7.1.4. Makaslama (Shear) modülü .....	28
3.4.7.2. Mohr – Coulomb model .....	29
3.4.7.3. Finn – Byrne sıvılaşıma modeli .....	31
3.4.7.4. UBCSAND sıvılaşıma modeli .....	31

#### **BÖLÜM 4.**

<b>BÖLGENİN GENEL JEOLojİSİ.....</b>	<b>33</b>
4.1. Adapazarı Yer Altı Suyu .....	36

#### **BÖLÜM 5.**

<b>MODELİN OLUŞTURULMASI.....</b>	<b>39</b>
5.1. Numerik Model Oluşturulması.....	39
5.2. Modelleme Prosedürü .....	40
5.2.1. Modelin boyutlandırılması .....	41
5.2.2. Malzeme ve zemin özellikleri .....	41
5.3. Sınır Şartları.....	45
5.4. Lokal Sönüm ve Sönüm Oranı.....	46
5.5. Numerik Modelde Kullanılan Yük Değerleri.....	46

#### **BÖLÜM 6.**

<b>NUMERİK MODEL ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ</b>	<b>48</b>
6.1. Mevcut Zemin Tabakalarının Analizi.....	48
6.2. İnşaat Yıkıntı Atığı ile İyileştirilmiş Zemin Analizleri.....	51
6.3. Kazık Destekli Zemin Analizi.....	53
6.4. Sonuçların Doğrulanması.....	55
6.4.1. Oluşacak Oturma Miktarının Belirlenmesi.....	56
6.4.2. Mevcut Zemin için Elastik Oturma Miktarının Hesaplanması (Se).....	56
6.4.3. Mevcut Zemin için Konsolidasyon Oturmasının Miktarının Hesaplanması (Sc) .....	57

6.4.4. İnşaat Yıkıntı Atığı ile İyileştirilmiş Zemin Elastik Oturma Miktarının Hesaplanması (Se).....	60
6.4.5. İnşaat Yıkıntı Atığı ile İyileştirilmiş Zemin için Konsolidasyon Oturmasının Miktarının Hesaplanması (Sc) .....	61
6.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	62

## **BÖLÜM 7.**

<b>SONUÇLAR</b> .....	<b>64</b>
-----------------------	-----------

<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>66</b>
------------------------	-----------

<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>70</b>
-----------------------	-----------



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık Görevlileri Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Aliminyum Oksit
CaO	: Kalsium Oksit
CBR	: Kalifornia Taşıma Oranı
CH	: Yüksek Plastiseli Kil
CL	: Düşük Plastiseli Kil
cm	: Santi Metre
DSİ	: Devlet Su İşleri
DTA	: Differential Thermal Analysis
Fe	: Demir
FLAC	: Fast Lagrangian Analysis Of Continua
GB	: Güney Batı
GPa	: Giga Pascal
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İSTAÇ	: İstanbul Çevre Koruma ve Atık Maddeleri
K <sub>2</sub> O	: Potasyum Oksit
KAFZ	: Kuzey Anadolu Fay Zonu
KD	: Kuzey Doğu
KG	: Kilo Gram
KN	: Kilo Newton
m	: Metre
MgO	: Magnezyum Oksit
mm	: Mili Metre
MN	: Mega Newton
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü

Na <sub>2</sub> O	: Sodyum Oksit
OH	: Organik Kil
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	: Di Fosfor Penta Oksit
Pa	: Pascal
S	: Kükürt
SiO <sub>2</sub>	: Sülfür Oksit
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
TiO <sub>2</sub>	: Titanyum Di Oksit
TS	: Türkiye Standartları
YASS	: Yer Altı Su Seviyesi
XRD	: X Işını
%	: Yüzde

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1: Doğrudan çözüm yaklaşımında kullanılan yapı – zemin modeli.....	16
Şekil 3.2: Zemin sınır şartlarının sınır elemanlar yöntemiyle belirlenmesi.....	19
Şekil 3.3: Zemin sınırlarının viskoz elemanlarla idealleştirilmesi.....	20
Şekil 3.4: Flac programı ana hesaplama döngüsü.....	22
Şekil 3.5: Kuvvetin kütle üzerindeki etkisi ve ortaya çıkan ivme, hız ve yer değiştirme etkisi.....	23
Şekil 3.6: Flac elastik izotropik koordinat eksenleri.....	26
Şekil 3.7: Kayma modülünün ifadesi.....	28
Şekil 3.8: Flac mohr – coulumb yenileme kriteri.....	29
Şekil 3.9: Ubsand yenileme yüzeyi.....	32
Şekil 3.10: Plastik modül ve plastik şekil değiştirme ve ubcsand .....	32
Şekil 4.1: Adapazarı merkez jeoloji haritası .....	33
Şekil 4.2: a) Adapazarı şehrinin tipik kesiti b) Adapazarında ağır hasar alan bölgeden zemin kesiti.....	34
Şekil 4.3: Adapazarı ve çevresinin neo – tektonik haritası.....	36
Şekil 4.4: Adapazarı yass seviyeleri.....	37
Şekil 4.5: Adapazarı ve çevresinin jeomorfolojik yapısı.....	37
Şekil 4.6: Adapazarı' nın kd' de gb' ya doğru morfolojik görünümü.....	38
Şekil 4.7: Afet bölgesi ve yakın çevresinin aktif fay haritası.....	38
Şekil 5.1: Kara yolu dolgu analizi için flac modeli.....	41
Şekil 6.1: Numerik model ve okuma noktaları.....	48
Şekil 6.2: Mevcut zemin tabakaları kesiti ve okuma noktaları.....	49
Şekil 6.3: Dolgu üstü düşey yer değiştirme.....	49
Şekil 6.4: Dolgu altı düşey yer değiştirme.....	50
Şekil 6.5: Boşluk suyu basıncı.....	50

Şekil 6.6: İyileştirilmiş zemin kesiti.....	51
Şekil 6.7: İnşaat yıkıntı atıkları ile iyileştirilmiş zemin dolgu üstü düşey yer değiştirme.....	52
Şekil 6.8: İnşaat yıkıntı atıkları ile iyileştirilmiş zemin dolgu altı düşey yer değiştirme.....	52
Şekil 6.9: Yıkıntı atığı boşluk suyu basıncı.....	53
Şekil 6.10: Kazık desteklenen sistemin yarı kesit görünüşü.....	53
Şekil 6.11: Kazık destekli sistemde dolgu üstü oturma miktarı.....	54
Şekil 6.12: Kazık destekli sistemde dolgu altı oturma miktarı.....	54
Şekil 6.13: Kazık destekli kara yolu gözenek basıncı.....	55
Şekil 6.14: Uzun bir dolgu yükü altında düşey gerilmeleri veren tesir katsayıları	58
Şekil 6.15: Mevcut zemin ve iyileştirme yöntemine göre zemindeki maksimum oturma miktarları.....	63
Şekil 6.16: Mevcut zemin ve iyileştirme yöntemine göre zemindeki boşluk suyu basıncı.....	63

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1: Yıllar içinde İstanbul’ da oluşan harfiyat toprağı ve inşaat ve yıkıntı atık miktarları.....	6
Tablo 2.2: Ülkelere göre inşaat ve yıkıntı atığı miktarı.....	7
Tablo 2.3: Çelikhane cürufunun kimyasal özellikleri.....	12
Tablo 4.1: Adapazarı ve yakın çevresinde zamanla oluşan kayaçların jeolojik özellikleri.....	35
Tablo 5.1: Temel zemin özellikleri.....	42
Tablo 5.2: İnşaat yıkıntı atığı laboratuvar sonuçları.....	43
Tablo 5.3: Dolgu malzemelerinin özellikleri.....	44
Tablo 5.4: İşlenmiş kereste kazıkların özellikleri.....	44
Tablo 5.5: Ahşap kazık elemanların özellikler.....	45
Tablo 6.1: Temel zemin için etki faktörü ( $I_p$ ).....	57
Tablo 6.2: Farklı derinliklerde $I$ ve $\Delta\sigma_z$ değerleri.....	59
Tablo 6.3: Zeminlerin sıkışabilirlikleri, hacimsel sıkışma katsayısı ve poisson oranı.....	59
Tablo 6.4: Literatür yöntemi ve numerik model yer değıştirme miktarı.....	62

## KENTSEL DÖNÜŞÜM ATIKLARI İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN FLAC 2D İLE ANALİZİ

### ÖZET

Türkiye'de inşaat yıkıntı atıklarını, gece kondu alanları, depremde yıkılmış alanlar, dekoratif ve mimari yenilik amaçlı çalışmalar, ağır hasar görmüş binalardan kaynaklı atıklar oluşturmaktadır. İSTAC ve İBB' nin yaptığı çalışmalar sonucunda inşaat sektöründe kullanılacak malzeme miktarının ortalama %35'i kadar beton atık oluşması beklenmektedir. Gelişen nüfus şartları atık miktarını her geçen gün arttırmakta ve depolanması sonucu belirli çevresel etkileri beraberinde getiren inşaat yıkıntı atıklarının kullanılması için çalışmaların yapılmasını zorunlu hale getirmektedir. Atıkların kullanımı ile depolama ihtiyacı ortadan kalkacak ve depolama için ayrılacak sahalar başka amaçlar için kullanılabilir. Kullanımın artması sonucu atık malzemelerin oluşturduğu çevresel etkiler azalacaktır. Ayrıca bazı tükenmekte olan veya pahalı doğal malzemelerin yerine kullanılarak ekonomik ekosistem açısından avantajlı olacaktır. Bu çalışmada inşaat yıkıntı atıklarının yol inşaatı alt yapı iyileştirme çalışmalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Zemin özellikleri belirlenmiş bir yol güzergâhında zemin tabakaları ve parametreleri FLAC 2D ile modellenmiş, çıkan zemin oturma değerleri sonucu mevcut zeminin beklenen taşıma gücüne sahip olmadığı görülmüştür. Yüze yakın olan zayıf zemin alanı boşaltılarak yerine laboratuvar deneyleri sonucu zemin değerleri belirlenmiş inşaat yıkıntı atıklarının parametrelerinin FLAC 2D ile modellenmesi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda zemin oturma değerinde inşaat yıkıntı atıkları ile yapılan iyileştirmede % 84, kazık destekli sistemde ise % 95 iyileşme olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Zemin iyileştirme, inşaat yıkıntı atıkları, alt temel malzemesi, FLAC 2D

# **FLAC 2D ANALYSIS OF IMPROVED ROAD SUB-BASE WITH CONSTRUCTION WASTES**

## **SUMMARY**

The construction waste in Turkey are occur from residential areas, areas destroyed by earthquakes, works for decorative and architectural innovation and wastes from heavily damaged buildings. It is expected that 35% of the materials to be used in the construction sector will be occur concrete wastes as a result of the work done by ISTAC and IMM. Developing population conditions increase the amount of waste day by day and bring with it certain environmental impacts as a result of storage Thus, it makes it necessary to carry out works for the use of construction waste. With the use of wastes, the need for storage will be eliminated and the sites to be allocated for storage may be used for other purposes. The increase of use will reduce the environmental impacts of waste materials and also it would be advantageous for the economic ecosystem by replacing some of the depleted or expensive natural materials. In this present work, usability of construction demolition wastes in road construction infrastructure improvement studies was investigated. Soil layers and parameters were modeled with FLAC 2D on a road route with determined soil properties. The weak ground area near the surface was evacuated and the parameters of construction demolition wastes (construction demolition wastes) were determined by FLAC 2D. As a result of the analysis, it was determined that 84% improvement was achieved in the ground settlement value and 95% improvement in the pile-supported system.

**Keywords:** Soil improvement, construction demolition waste, sub-base material, FLAC 2D

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnşaat aslında doğaya uymaktır. Proje rotasında kazı, dolgu ve sanat yapıları olan beton veya taş imalatlar oluşturup rotamızın bir noktadan diğerine ulaşmasını sağlarız.

Dolgu ise rotamızın vazgeçilmez bir parçasıdır. Dolgu işlemleri, sulama kanalları, yol, baraj ve bina temellerinin altında kalan saha dolgularında yapılan işlemler sonucu oluşturulur.

Yol güzergâhının projelendirilmesi ve belirlenmesi sırasında zeminin altında yer alacak zayıf tabakaların iyileştirilmesi gerekir. Zeminlerin iyileştirilmesi için uygulanan tekniklere yol yapısının statik yükleri altında istenen performansı gösteremeyeceği anlaşılan zeminler de sık ihtiyaç duyulmaktadır.

İyileştirilecek zeminlerin;

Nitelik (OH – CH - CL)

Kalınlık

Zamanla oluşacak oturmaların özellikleri

Kayma dayanım parametrelerinin stabilite üzerindeki etkisi

Şişme potansiyeli belirlenmektedir.

Zemin yüzeyine yakın tabakaların yapı yüklerini, göçmeden veya aşırı oturmalar meydana gelmeden taşıyamadığı durumlarda dolgu ile zemini iyileştirmek tercih edilir. Proje sürecinde planlanan yolun proje aşamasında göçmeye karşı yeterli güvenlik önlemleri alınmalıdır. Ayrıca etki eden yüklerden kaynaklanan oturmaların kabul edilebilir bir değerde olması sağlanmalıdır. Dolgu malzemesinin yük taşımalarına göre sınıflandırılmalı, bu sınıflandırma içinde kapsamlı bir çalışma yapılmalıdır. Oluşabilecek yüklerin taşıma gücünün yetersizliğinin yanında birçok kez, sıkışma şartları uygun olmamasından dolayı zeminde farklı hareketlilik gözlenmektedir.



Bu hareketliliğin giderilmesi için yüzeyde bulunan zayıf tabakaların geçilmesi ile derinde bulunan taşıyıcı tabakalara ulaşılmakta ve dolgu uygulaması yapılmaktadır. Yol yapımından önce, bölgenin ekonomik ve sosyal durumu değerlendirilmeli ihtiyaç ve taleplere cevap verecek şekilde tasarlanmalıdır. Yol kullanıcıları düz, daha konforlu, kayma direnci yüksek, ulaşımı kolay, ulaşım maliyeti ve gürültü seviyesi düşük yollar talep etmektedir. Uygulayıcılar ise dayanımı yüksek, daha az bakım, deformasyon etkisine karşı dirençli, güvenilirliği yüksek trafik, daha uzun süreli hizmet veren yolları hedeflemektedir[1-48].

Çözülmesi gereken zemin problemleri için uygulanan genel çözümler, dayanımı az olan zemin tabakasının kazım işlemleri ile kaldırılması ve yerine zemin dayanım özellikleri daha yüksek zeminlerin (çakıl, kırmataş vb.) değişik granülometrilere sıkıştırılarak serilmesidir. Bu işlemler uygulayıcılar için zaman ve maliyet açısından problemler oluşturmaktadır. Geoteknik mühendisliği, yüzey alanı ve kazı hacminin geniş olduğu yapılarda ki yüksek maliyet nedeni ile yeni yollar bulmaya yöneltmiştir. Alternatif malzemelerin zemin ile karıştırılması son zamanlarda uygulanan ve uygulanmasının avantaj oluşturduğu yöntemlerdendir[1,28,30,31,46,48].

Zemin iyileştirmede yöntemlerinde zaman içinde alternatif malzemeler ile çalışılmış ve birçok uygulamada bu yöntemler kullanılmıştır. Doğal yollar kullanılarak elde edildiği gibi sanayi ürünleri veya sanayi artığında olabilmektedir. Zeminlerde iyileştirme yöntemlerinin yapılma amaçları;

1. Zayıf zeminlerin mukavemetlerini artırmak
2. Toplam oturmanın azaltılması ve konsolidasyonun hızlanması sağlamak
3. Permeabiliteyi düşürmek ve geçirimsiz zemin oluşturmak
4. Dolgu ve şevlerin stabilitesini sağlamak
5. İstinat duvarlarını desteklemek
6. Sıvılaşmanın düşmesini sağlamak
7. Oluşabilecek doğal afetlere karşı önlem almak [2,24].

## **1.1. Çalışmanın Amacı**

Ciddileşen sorunların başında atık maddelerin tekrar kullanılması gelmektedir. Bertarafı sırasında atıkların doğuracağı çevresel etkilere dikkat edilmelidir.

Çevreden kaynaklı oluşan sınırlamalar gün geçtikçe artış göstermekte ve eski bertaraf yöntemleri için verilen izinlerin gittikçe azaldığı görülmektedir. Zaman geçtikçe geri dönüşümü sağlanamayan maddeler yol ve üstyapı inşaatlarında kullanılabilir önemli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir[2,5-10].

Atık malzemelerinin kullanılmasının avantajları olmaktadır. Depolama ihtiyacı ortadan kalkacak ve depolama için ayrılan sahalar başka amaçlar için kullanılabilir, atık malzemelerin kullanımının artması sonucu bu malzemeleri oluşturduğu çevresel etkiler azalacaktır, azalmakta olan veya pahalı doğal malzemelerin yerine kullanılarak ekonomik ekosistem açısından avantajlı olacaktır[2,3-13].

## **1.2. Kentsel Dönüşüm**

Dünya ve çevremizin yaşanabilir olması insan sağlığına etkisi ile ölçülebilir. Kentsel katı atıkların bertarafı dikkate alınması gereken önemli hususlardan biridir. Ekonomik büyüme ve göç ile dönüşen konut alanlarından kaynaklı ortaya çıkan atık miktarı artış göstermekte, gelişen teknolojiye bağlı olarak geri kazanımı da önem kazanmaktadır. Kentsel katı atıkların kullanımı ile enerji elde ederek ekonomik bir kazanç sağlanabilmektedir. Ülkemizde katı atıklardan enerji üretimi her ne kadar yeni bir gelişme olsada, İngiltere gibi gelişmiş ülkelerde 1900 yıllarda katı atıklardan enerji üretilmiştir. Bazı gelişmiş ülkelerde ise yatırım maliyetinin yüksek olması ve arazi dolgusu için yüksek miktarda araziye ihtiyaç duyulması nedenleriyle katı atıklardan enerji üretimi uzun yıllar tercih edilmemiştir. Yıllarca doğal kaynaklardan ucuz enerji üreterek ihtiyacın karşılanıyor olması, atık malzemelerin bertarafı için çalışma yapılmasını gerekli kılmamıştır. Günümüzde düzenli depolama, yakma, gazlaştırma, anaerobik çürütme, yöntemleri ile katı atıklar faydalı enerjiye dönüştürülmektedir [1-50].

Birleşmiş Milletler Çevre Programına göre (UNEP) katı atık, sahibinin istemediği, ihtiyacı olmadığı, kullanmadığı, arıtılması ve uzaklaştırılması gerekli maddelerdir.

Katı atıklar oluşum yerine göre sıralandırılmaktadır.

- Evsel katı atıklar
- Endüstriyel atıklar
- Tehlikeli atıklar
- Özel atıklar
- Tıbbi atıklar
- Tarımsal ve bahçe atıkları
- İnşaat artığı ve moloz atıkları

İnşaat artığı ve moloz atıklar inşaatın yapılması veya yıkılması sonucu ortaya çıkan katı atık malzemelerdir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Atık Yönetimi Başkanlığı tarafından; Kentsel Dönüşüm Kanunu ile birlikte geri kazanılacak malzeme miktarının da yıllık 6 milyon ton olacağı hesaplanmıştır [3,46,47,51].

TÜİK 2017 verilerine göre, 2000 yılı kentli nüfusun toplam nüfusa oranı %64.9 iken, 2008 yılında bu rakam yaklaşık %75'e yükselmiştir. 2016 yılına gelindiğinde ise %92'lere ulaştığı görülmektedir. Artan nüfus ile birlikte barınma ve diğer ihtiyaçlara bağlı olarak hızla büyüme gerçekleşmiş ve doğal yaşam alanları gün geçtikçe azalma göstermiştir. TÜİK 2017' de bir önceki yıl konut satış rakamları 1.341.453 adet olarak belirlenmiştir. 2016' da satılan konutların %47'si yeni yapımı tamamlanan yapılardır. Yapılan çalışmalar 1941-2007 yılları arasında karbon salınımına bağlı olarak dünyanın ortalama sıcaklık artış eğiliminde olduğu ve ülkemiz için ise 100 yıl süre zarfında 0,64°C sıcaklık artışı olacağı tahmin edilmektedir[1-20,51,52]. Tüm bu etkiler atık bertarafının önemini göstermektedir. Kentsel dönüşümle birlikte artış gösteren kentsel katı atıkların bir parçası inşaat yıkıntı atıklarının bertarafı için çalışmalar yapılmaya başlanmıştır[2,7,23,41].

## **BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ**

### **2. Zeminde İyileştirme Medotları**

Kullanıldığı yere ve bulunduğu bölge şartlarına göre literatürde kullanılan malzemeye bağlı olarak değişkenlik gösteren zemin iyileştirme yöntemleri bulunmaktadır.

#### **2.1. İnşaat yıkıntı atıkları ile iyileştirme**

Türkiye de gece kondu alanları, depremde yıkılmış alanlar ve ağır hasar görmüş binalardan kaynaklı kentsel dönüşüm yasası (6303 sayılı yasa) ile birlikte de mevcut yapıların yenilenmesi, buna ek olarak çeşitli mimari çalışmaların modernizasyonu vb. sebeplerden büyük miktarda İnşaat ve Yıkıntı atığı oluşmaktadır. Artış gösteren ve özellikle çevre kirliliği, görüntü kirliliği gibi kentlerin yaşam koşullarına zarar veren İnşaat atıkları probleme dönüşmüştür [1-50].

İnşaat alanlarında bu atıklar az miktarı kullanılmakta, yetersiz ve az olan bu kullanım açıkta kalan milyonlarca ton inşaat atığı depolama alanlarına yığılmaya çalışılmaktadır. Ancak büyük miktarlardaki bu yıkıntı atıkları fazlaca çevre zararlarına olanak sağlamaktadır[31].

İnşaat ve Yıkıntı atıkları istenilen kalite ve şartlarda yönetilememesi, gündelik hayatı ve çevre sağlığını etkisi altına almış ve kullanımı hakkında araştırma yapılmaya başlanmıştır[24,46].

Kullanılan düzensiz depolama yönteminin İnşaat ve yıkıntı atıklarının bertaraf edilebilmesinde yeterli ve sürdürülebilir yöntem olmadığı anlaşılmıştır. Şehir ve çevre kirliliğine neden olan inşaat atıklarının zemin iyileştirmelerinde kullanılabileceği tespit edilmiş gelişen teknolojinin de katkısı ile kullanım usulleri geliştirilmiştir[31].

### 2.1.1. İnşaat ve yıkıntı atık hiyerarşisi ve bertaraf usulleri

1. Atığı kaynağında azaltma
2. Yeniden kullanma
3. Geri dönüşümünü sağlama
4. Enerji kazanımı

Ülkemizde dâhil olduğu birçok ülkede yasal olarak zorunlu hale gelmiştir.

Tablo 2.1: İstanbul'da Oluşan Hafriyat Toprağı ve İnşaat ve Yıkıntı Atık Miktarları [31]

Yıl	İSTAÇ- miktarı (milyon ton)	Atık	İBB- miktarı (milyon ton)	Atık	İBB- miktarı (milyon m <sup>2</sup> )	Atık	İSTAÇ / İBB (ton / m <sup>3</sup> )	İBB /İBB (ton / m <sup>3</sup> )
2010	23.0	-	-	-	22.1	-	1.04	1.70
2011	28.0	-	47.7	-	28.0	-	0.99	1.70
2012	45.0	-	52.4	-	30.8	-	1.45	1.70
2013	62.0	-	65.5	-	38.5	-	1.61	1.70
2014	60.1	-	69.9	-	41.2	-	1.47	1.70
2015	70.0	-	74.9	-	44.1	-	1.59	1.70
2016	72.0	-	-	-	44.3	-	1.62	1.70
2017	83.4	-	-	-	53.2	-	1.56	-
2018	-	-	-	-	-	-	-	-
Ort.	-	-	-	-	-	-	1.61	1.70

İnşaat sektöründe kullanılan malzeme oranları düşünüldüğünde Türkiye'de ortalama %30-40 arasında beton atık oluşması beklenmektedir. Depolama maliyetlerinin düşük olması geri dönüşüm faaliyetleri ve atık hiyerarşisi uygulamasının yavaşlamasına sebep olduğu görülmektedir. Geri kazanım uygulamaları ekonomi ve çevresel etkenler göz önünde bulundurularak planlanmalı, İnşaat ve yıkıntı atıkları için belirli bir standart oluşturulmalıdır[1-31].

Tablo 2.2: Ülkelere Göre İnşaat ve Yıkıntı Atık Miktarı [31]

ÜLKE	İNŞAAT ATIĞI (MİLYON TON)	İNŞAAT ATIĞI (KG/KİŞİ/YIL)	GERİ (%)	DÖNÜŞÜM	YAKMA - DEPOLAMA (%)
ALMANYA	59	750	17		83
İNGİLTERE	30	530	45		55
FRANSA	24	420	15		85
İTALYA	20	330	9		91
İSPANYA	13	340	<5		<95
HOLLANDA	4	270	90		10
BELÇİKA	7	700	87		13
AVUSTURYA	5	650	41		59
PORTEKİZ	3	300	<5		<95
DANİMARKA	3	575	81		19
YUNANİSTAN	2	200	<5		<95
İSVİÇRE	2	240	21		79
FİNLANDİYA	1	200	45		55
İRLANDA	1	285	<5		<95
LÜKSEMBURG	0		n/a		n/a
A.T	180		38		72

## 2.2. Kireçle Stabilizasyon

Zeminlerin yer yer farklılık gösterdiği bilinmektedir. Agregaya serilerek çözüm aranmasına ve bu işlemin tekrar tekrar yapılmasına rağmen yolda yaşanan olumsuz şartlar devam etmektedir[1].

Agreganın yola serilme (agrega maliyeti, iş makineleri kirası, akaryakıt gideri) işlemi zemin iyileştirmesinde maliyeti arttırmaktadır. Alternatif olarak kullanılan kireç maliyet ve işçilikte daha olumlu şartlar sağlamaktadır[1].

Kil zemin üstünde yapılan iyileştirmelerde kireç kullanılması ile sağlam tabaka oluşturulabilmektedir, zeminin alt tabakasında bulunan zayıf killi malzeme yolun üst kısmına çıkabilmektedir. [1,28,31].

Zemin su tutma ve şişme özelliğini kaybetmekte ve daha sonrasında su ile temas gerçekleşse bile zemin kil davranışı göstermemektedir. Kireç stabilizasyonu bu tarz zeminlerde büyük avantaj sağlamaktadır[28].

Kireç ile yapılan iyileştirme işlemleri yağmurlu zamanlarda veya malzemenin optimum su muhtevasının fazla olduğu durumlarda uygulanması faydalı olmaktadır. Uygulama sırasında ilkel tarım aletlerinden yararlanılabilmesi ağır iş makinelerinin temin edilemeyeceği yerlerde de çalışmaların yürütülebilmesini sağlamaktadır. Klasik yöntemlere göre kireç ile zemin iyileştirilmesi % 35-40' lara varan ekonomi sağlanabilmektedir[31].

### **2.3. Bitümlü İyileştirme**

Literatürde birçok stabilizasyon metodu mevcuttur. Türkiye'de yaygın olarak mekanik stabilizasyon kullanılmaktadır. Miktar olarak fazlaca bulunan kireç ve çimento stabilizasyonunu tercih edilmekte ve karayollarımız da yer yer bu yöntemi kullanmaktadır[48].

Örneğin: Asfalt stabilizasyonu ile zeminin su tutması azaltılarak zemin daneleri birbirine bağlanması sağlanır. Zeminin su miktarı azaltılmış kohezyonu ve stabilitesi artırılmıştır.

Mukavemet, rijitlik, basınç dayanımı, geçirgenlik, drenaj ve donma hassasiyeti gibi özelliklerde artma, üstyapı kalınlığında ise azalma gözlenmektedir[48].

ABD'de Missouri, Güney Carolina, Iowa ve Nebraska'da 1925-1932 yılları arasında ilk defa Zeminde asfalt stabilizasyonu uygulanmıştır. Stabilizasyon çalışmaları sonucunda yol altyapısının likit asfaltlarla stabilize edildiklerinde sağlam bir temel meydana geldiği görülmüştür[12,15-48].

## **2.4. Çimento ile Stabilizasyon**

Üstyapının oturacağı zemin tabakalarında kalınlığın azaltılması maliyetleri düşürmek için farklı çalışmalar yapılmaktadır. Çimento ile zeminde yapılacak iyileştirme işlemlerinde uçucu külün kullanılabilmesi çimento miktarının en az % 8, tabaka kalınlığının ise 30 cm olması gerektiği literatür çalışmalarında belirlenmiştir[30].

Örneğin: Kullanımına göre düşük, orta ve yüksek trafik içeren yollarda yolun üstyapı maliyeti sırasıyla % 47, % 50 ve % 51 azalmaktadır. Bu azalma % 7 çimento stabilizasyonu ile sağlanmaktadır. Stabilize sonucunda % 3 CBR değerine sahip olan yol altyapısı % 50'den daha fazla bir değere çıkartılabilmektedir[3,30].

## **2.5. Baca Külü ve Kireç ile Stabilizasyon**

Termik santrallerin kapasitelerindeki gelişime bağlı olan uçucu kül miktarı her yıl artış göstermektedir. Bu artış yüksek miktarda uçucu külü, ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Uçucu kül miktarının artması ekolojik dengenin bozulması ve çevre problemlerinin artmasını gündeme getirmektedir. Dünya genelinde toplam uçucu kül miktarının yılda 600 milyon ton civarı olduğu bilinmektedir[20,50].

Atık miktarının artış göstermesiyle kullanımını sağlamak için belli başlı çalışmalar yapılmaktadır. Suyun farklı yüzdelerle alçı, kireç, termik santral uçucu külü vb. malzemeler ile karıştırılması ve doğal ortamda kurutulması sağlanarak dayanımın artması sağlanmıştır.

Alt yapı iyileştirme işlemlerinde kullanıldığı gibi farklı karışım oranları ile yapı malzemesi de elde edile bilmektedir[9,50].

## **2.6. Uçucu Kül Katkısı ile İyileştirme**

Uçucu külün çevreye verdiği zararlar yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir. Çevreye duyarlı ülkeler meydana çıkan uçucu külü % 95 değerlendirmektedir. Sanayi çalışmaları yoğun olan ABD, İngiltere, Çin vb. ülkeler uçucu kül miktarının % 30 - % 50 sini kullanmaktadır[7,49,50].

Ülkemizde kömür ile çalışan 16 adet termik santral vardır. Bu santrallerin oluşturduğu toplam miktarın yılda 16 milyon ton olduğu bilinmektedir[50].



Yalnız başına her hangi bir bağlayıcılığı bulunmayan uçucu kül aynı zamanda bağlayıcılık eşiği çok düşük puzzolonik bir maddedir. Uçucu kül sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleşebilmektedir. Bu etkileşim sonucu hidrolik bağlayıcılık özeliği kazanır. İçerik olarak silisli ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminli ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) malzemelerdir[4-50].

Puzzolonik maddeler uzun zamandır kullanılmaktadır. İlk olarak İtalya' nın Puzzoli kasabasında keşfedilmiştir. Camlaşmış volkan toprağı olup, günümüzde doğal puzzolanlar ve yapay puzzolanlar olarak incelenmektedir[49,50,51].

### **2.6.1. Doğal puzzolanlar**

1. Volkanik kökenli puzzolanlar
2. Isıl işlem görmüş killer

### **2.6.2. Yapay puzzolanlar**

1. Uçucu kül
2. Silis dumanı
3. Yüksek fırın cürufu
4. Pirinç kabuğu külü

Uçucu kül kullanıldığında zeminde mukavemeti, yapım hızını, taşıma gücünü arttırmakta; ek kazı ve dolgu maliyetlerini ve uygulanacak dolgu kalınlığı azaltmaktadır. Örnek olarak İngiltere' de bulunan Lancaster şehri ile Harrisburg kasabası arasında 2001 yılında uçucu kül, zemin iyileştirme uygulamasında kullanılmıştır[50].

## **2.7. Eski Araç Lastiği Kullanımı**

Amerika Birleşik Devletleri'nde 2001 yılında ülkede bulunan eski araç lastiklerinin % 77,6'sı farklı uygulamalarda kullanılmıştır. Kalan kısım lastikler yasadışı yollarla bütün halde gömülmüş veya yığın haline getirilmiştir. Beraberinde çevresel problemler oluşmaya başlamıştır. Başlıca çevresel etkileri sivrisinek, fare ve farklı kemirgenler için üreme alanları oluşması ve ciddi yangınların ortaya çıkmasıdır. İnşaat mühendisliği çalışmalarının da yer aldığı çeşitli alternatif yollar geliştirilmiştir[9].

### **2.7.1. Ömrünü tamamlayan lastiklerin sınıflandırılması**

1. Ağır olmamaları
2. Yanal kuvvetlere karşı dirençleri
3. Isı geçirgenliğinin az olması
4. Drene olabilmeleri [9].

Benzer atıkların kullanılabilmesi için teşvik oluşturulmaktadır. Ömrünü tamamlayan lastiklerin oluşturduğu yığınlar teşvikler sebebi ile ekonomik olmaktadır. Düşük maliyetli olması ve mühendisler için aranan özelliklere sahip bu malzemeler farklı uygulamalarda kullanılmıştır. Bu uygulamalar yapısal olmayan ses yalıtım duvarları, hafif dolgular, zayıf zeminlerin dolgusu, istinat duvarları geri dolgusu, sınır drenleri ve asfalt donma bariyerleri gibi uygulamalardır. Şerit haldeki lastiklerin zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde ve yol alt dolgu malzemesi olarak kullanıldığı birden fazla uygulama vardır[19,49].

Yıllardan beri ABD’ de ömrünü tamamlamış lastikler inşaat mühendisliği alanında kullanılmış ve mühendislik projelerinde başarı ile kullanılmıştır. Her hangi bir yakma işlemi yapılmadan atık lastikler 70 den fazla projede kullanılmıştır[11,49].

### **2.8. Çimento ve Uçucu Kül Katkısı**

Yapılan çalışmalarda kısa kürde temel tabakası malzemesi için çimento katkılı karışımların uygun olduğu belirlenmiştir. Çimneto katkılı karışımlarda uzun kür işleminin sonunda karışımların taşıma gücünde azalma olmuştur. Bu karışımların alt temel malzemesi olarak iyileştirme işlemlerinde kullanılabileceği belirlenmiştir [30].

Çimento ve uçucu kül puzzolanik bir maddedir. Puzzolanik maddelerle stabilize edilen zemin ile katkının karıştırılması ile elde edilen numuların kısa kür sonunda malzeme özelliklerinin doğru belirlenemediği bilinmektedir. 28 günlük CBR deneyi sonuçları doğru karışım oranı ile zeminde iyileştirme sağlanabileceğini göstermektedir[13].

## 2.9. Çimento ve Kireç Katkısı

Differential Thermal Analysis (DTA) ve X ışını (XRD) gibi laboratuvar deneyleri ile zeminlerin mineralojik ve fiziksel özellikleri belirlene bilmektedir. Zemin iyileştirme çalışmaları yapmak amaçlı Karadenizin doğu bölgesinden alınan zemin örneklerinde çalışmalar yapılmıştır[43].

Yapılan çalışmalarda düşük özgül ağırlığa sahip olduğu, ayrıca sıkıştırılabilir olduğu belirlenen bu maddeler dolgu zemini ve kireç ile optimum su içeriğinde homojen olarak karıştırıldığında yol alt kısmına uygulandığında zemin değerlerinde artış olmaktadır. Yapısından kaynaklı kendiliğinden sertleşen bu malzemeler belirli oranlarda kireç ile karıştırıldığında fayda sağladığı belirlenmiştir[19].

## 2.10. Çelikhane Cürufu ile Stabilizasyon

Çelikhane posası çelik imalatı sonucu çelik içerisindeki empuritelerin oksidasyonu sonucu oksit ve silikatların oluşturduğu karmaşık yapıdaki bir kimyasal oluşturmaktadır. Bu ürünler metalik içerikte olmadığı için yan ürün olarak karşılık bulmuştur. Çelik posası yapı olarak koyu gri renkte, kübik şekilli, yüzeyi pürüzlüdür. Yüksek fırın cürufu çelik posasından çok daha sert, daha sıkı ve yoğunluk olarak %20-25 daha büyüktür[20].

Tablo 2.3: Çelikhane Cürufunun Kimyasal Özellikleri [47]

ELEMENT	Fe	SiO <sub>2</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
	20,49	13,30	2,7	5,02	46,57	5,25	0,02	0,32	0,14	0,17	0,47

Demir çelik üretiminde ilk sırada olan ülkemizde çevresel faktörlerin dikkate alınmadığı bilinmektedir. Demir ve çelik imalatı sırasında oluşan atık malzemenin kullanım oranı çok düşüktür. Giderek büyüyen çelik sektöründe atık miktarı artmakta ve oluşan atık malzemelerin kullanımı önem kazanmaktadır. Yapılan çalışmalarda farklı karışım oranlarında kullanılan çelikhane cürufunun zeminin iyileştirme işlemlerinde ve yol alt dolgusu olarak kullanılabileceği belirlenmiştir [20].

## **2.11. Kazık Destekli Sistemler**

Üst yapıdan kaynaklı yükleri derin zemin tabakalarına taşıtmak amacı yapılan derin temel çeşitleridir.

Tasarım sırasında dikkat edilmesi gereken başlıca etkenler şunlardır,

1. Zemin profilinin belirlenmesi
2. Kazığın yükü taşıma şeklinin (uç veya sürtünme kazığı) belirlenmesi
3. Kullanılacak kazık malzemesi ve boyutu belirlenmeli (kompozit, ahşap, beton veya çelik).
4. Kazığın emniyetle katsayısının saptanması (kazık sayısının belirlenmesi)
5. Kazıkların ara mesafelerinin belirlenmesi (min. 2.5-3.0) D olmalıdır. (D=kazık çapı).
6. Temel planında kazıkların yerleştirilmesi.
7. Oluşturulan kazık grubunun taşıma gücü ve oturma değerinin hesaplanması.

### **2.11.1. Kazık çeşitleri**

Tercih edilen kazık sistemi malzeme cinsine göre sınıflandırılırlar. Genelde kazıklar, kompozit, ağaç, beton, çelik olmaktadır. Yer yer birlikte kullanıldığı durumlar da mevcuttur.

#### **2.11.1.1. Ahşap kazıklar**

Ahşap kazıklar yüzyıllardan beri kullanılmaktadır. Yapımı kolay ve ekonomiktir. Diğer kazık çeşitlerinden (beton veya çelik kazıklar) daha az yük taşımaktadır. Ahşap kazıklar uygulama sırasında deforme olabilmektedir. Bilinenim aksine su seviyesi altında ise, kimyasal madde ile (epoxy gibi) kaplanan ahşabın ömrü uzatılabilmektedir.

Doğası gereği su içinde ömrü uzayan ahşap kerestelerin kullanılmasında süre gelen uygulamalardandır. (sakarya beşköprü ayklarının alt kısmında kullanılan kereste kazıklar)

### **2.11.1.2. Beton kazıklar**

Zemine çakılan çelik boruların içine beton dökülmesi ve betonun piriz sürecinin sonunda çelik kalıpların geri alınması ile imal edilirler.

### **2.11.1.3. Betonarme kazıklar**

#### **2.11.1.3.1. Betonarme çakma kazıklar**

Fabrikada istenilen veya belirlenen ölçülerde hazırlanan kazıklar makine yardımı ile zemine çakılır. Yer altı sularının fazlaca etkin olduğu durumlarda tercih edilmektedir.

#### **2.11.1.3.2. Fore kazıklar**

TS 3168-EN 1536 Özel Jeoteknik Uygulamalar - Delme (Fore)kazıklar standartlarında belirlenen şekilde uygulanan betonarme kazıklardır.

#### **2.11.1.4. Çelik kazıklar**

I profil veya H profil veya boru kesiti şeklindeki kazıklar zemine çakılır. Boru kesitli kazıklar daha sonra betonla doldurulur.

#### **2.11.1.5. Kompozit kazıklar**

Hazır kazık grubunda olan kompozit kazıklar ahşap kazık kullanımının fayda sağlamayacağı sağlam zemin tabakasının derinde olduğu durumlarda tercih edilir.

## **BÖLÜM 3. YAPI - ZEMİN MODELLERİNDE NÜMERİK ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI**

Yapının oturmuş olduğu zemin özellikleri yapının davranışını doğrudan etkilemektedir. Zemin ile yapı ilişkisi incelenirken sisteme tesir eden dış etkinin türü dikkat edilmesi gereken öğelerdendir. Modelin statik veya dinamik bir dış etki altındaki durumu değişkenlik göstermektedir. Dinamik etki durumunda geometrik uygunluk ve denge koşullarına ilave olarak zemin ortamında sağlanması gereken başka bir koşulda zeminin radyasyon sönümü etkisidir. Araç hareketi, insan hareketi ve deprem titreşim kaynaklarındandır. Bu hareketlerin etkisiyle zemin ortamında yayılan dalgalar, zemin ortamının sosuzluğuna bağlı olarak radyasyona uğrar. Kaynağı dinamik dış etkiler olan enerjinin bir bölümü zeminin oluşturduğu ortamın geometrik özelliklerinin etkisi ile sönümlenmektedir. Bu durum zeminin geometrik özelliklerinin etkisi ile oluştuğu için geometrik sönüm olarak ta adlandırılmaktadır[6,25,47].

Yapı ile zeminin dış etkiler altındaki ortak hareketinde zemin ortamının altyapı ile birlikte analiz edilmesi gereklidir. Ortaya çıkan temel sorun zemin ortamının yapısal anlamda nasıl idealleştirileceğidir. Tercih edilen yöntemle bağlı olarak, yapı ile zemin etkileşiminin tanımlanması için Doğrudan Çözüm Yaklaşımı ve Alt Sistem yaklaşımı kullanılabilir[47].

### **3.1. Alt Sistem Yaklaşımı**

Sistem farklı özellikteki parçalardan oluşuyor ise sistem içindeki parçalar altsistem olarak isimlendirilir. Bütün sistemler belirli altsistemlerden oluşur ve her sistem daha büyük ve karmaşık bir sistemin altsistemi durumundadır. Zeminde altsistem yaklaşımı üst yapı ve zemin bölgelerini iki farklı sistem gibi değerlendirir [47].

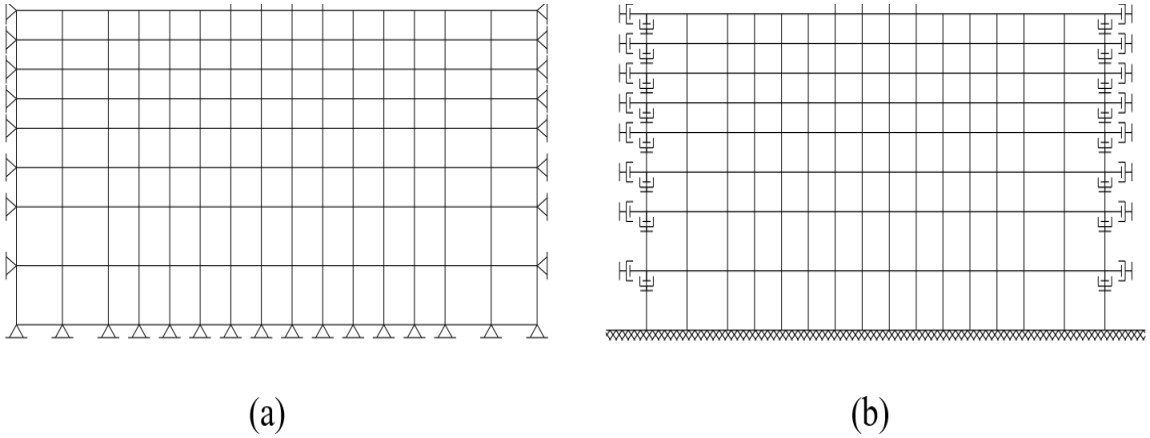
Bu farklı iki sistemde denge denklemleri ayrı ayrı ele alınır. Yazılan denge denklemleri ile sonradan yapı-zemin ara yüzeyindeki denge koşulları belirlenir.

Geometrik uygunluk şartların da denge koşulları gibi belirlenir. Daha sonra her iki koşulda dikkate alınarak birleştirilir.

Bu işlemler sonucunda temsil edilen zemin yalnızca yapı-zemin ara yüzeyinde sınırlı sayıdaki ayırık düğüm noktalarında oluşan bir alt sistem haline getirilir. Sonuç olarak zemin ortamı ideal hale getirilmiş olur[3].

### 3.2. Doğrudan Çözüm Yaklaşımı

Yapı sistemi gibi zemin ortamının da ayrıklaştırılması ile oluşturulur. Oluşan yapı-zemin modeli tanımlanan statik ve dinamik etkiler altında doğrudan analiz edilir. Statik ve dinamik yük altındaki zemin ortam sınırlarının belirlenmesinde iki farklı durum oluşmaktadır. Statik durumda zeminin sınırları, yer değiştirmeler gerekli miktarda küçük düğüm noktalarıyla tanımlanır. Basit mesnet koşullarının belirlenmesi ile zemin ortamı ideal şekline getirilir (Şekil 3.1.a). Radyasyon (geometrik) sönümünün etkisini zemin ne kadar büyütülürse büyütülün dinamik durumda sınırları basit mesnetli tanımlayamayız. Dinamik durumdan oluşan sebeplerden modellemede radyasyon koşulunu sağlayan mesnetler kullanılmalıdır(Şekil 3.1.b). Radyasyon koşulunu sağlayan mesnetler, sonlu elemanlarla modellenen zeminin dışa doğru yayılan dalgaların içeri doğru yansıtılıp sönümlenmesini sağlamaktadır[3].



Şekil 3.1: Doğrudan Çözüm Yaklaşımında Kullanılan Yapı-Zemin Modeli [47]

### 3.3. Zemin Platformlarının Modellenme Şekilleri

Zeminden kaynaklı problemler;

- Zeminin sınırsız olması
- Zeminin dinamik enerji içermesi
- Zemin sönümü
- Yapı - Zemin etkileşimi
- Zeminin doğrusal olmayan davranışı
- Zeminin süreksiz olması
- Yarı sonsuz olması
- Tabakalaşma ve tabaka farklılıkları
- Yer altı suyunun etkisi
- Zeminin çekme gerilmesi almayan bir malzeme olması

Bu etkilerin sebebi ile zemin problemlerinin çözümü zor ve karmaşık bir hal almaktadır. Ayrıca bu etkilerin tamamı zemin yapı etkileşim problemlerini alışılmış analiz problemlerinden farklı kılmaktadır.

Zeminin dinamik yapısının belirlenmesinde,

- Rijitlik
- Sönümü
- Zemin ortamında bulunan dalgaların yüzeyden yansıması sonucu geri dönmeyecek şekilde yayılıyor olması

Dikkate alınarak zemin modellemesi yapılmalıdır [3-47].

#### 3.3.1. Zemin idealleştirme yöntemleri

Yapılan idealleştirme çalışmalarında bazı faktörler öne çıkmaktadır. Kullandığımız yöntemlerde gerçeğe yakın bulguların belirlenmesi için zemin bölgesi sınır kesimlerinin yapıya uygun mesafede seçilmesi, çözülebilir olması için ise sonlu elemanlar bölgesinin çok büyük olmaması gereklidir [3].

Sonlu farklar veya sonlu elemanlar yöntemlerinde kesim sınırları ile sınırlanan zemin bölgesi modellendiğinde kapalı ortam içerisinde yayılan dalgaların sınırlara çarparak tekrar analiz ortamına döndüğü ve çözümü olumsuz etkilediği belirlenmiştir [47].



Sınır şartları belirlenerek geçirimsizliğin sağlanması şeklinde kesim sınırlarının düzenlenmesi yayılan dalgaların olumsuz etkilerinin engellenmesi için gereklidir.

Parametrik çalışmaların sonucunda, zemin eleman ağının, geometrik sönümün önemli olduğu belirlenmiştir. Zeminin sönümünün büyük olması ve yer hareketlerinin yüksek frekanslı olduğu özel durumlarda, yapı temel taban genişliğinin sağ ve sol bölgelerinde 10 katına kadar uzatılmasının yeterli olacağı belirtilmektedir.

Boyutu küçültülen bölgenin sınır şartlarının probleme etkisi daha büyük olmaktadır. Kaba ağı eleman modellerinin kullanılması eleman sayısının azalmasını sağlar. Sürekli ortam mekaniğinin elasto-dinamik problemlerinde dalga yayılımının incelendiği ortamın eleman örgüsünün dalgaların sınırlardan geri yansıyor bölgeye dönmesi açısından küçük tutulmaması gerekir [16,17,47].

Nümerik modelde kullanılan ağ örgüsünde elemanların boyutlarının kontrol edilmesi gereklidir. Boyutu en büyük elemanlar dalga yayılma hızı ve belirli bir frekans aralığı ile kontrolü sağlanabilmektedir. Ayırıklaştırdığımız bölgenin boyutlarını küçültmek için eleman sayısının azaltılması yeterlidir. Dalga boyu kısa olan frekanslar, bileşenleri ile geniş aralıklı düğümlerle modellenir. Bu modelleme yüksek frekans bileşenlerini filtreler. Modellemede dikkat edilmesi gereken bir hususta sonuçların tutarlılığıdır. Sonuçların tutarlılığının sağlanması için kurulan sayısal modelde bulunan eleman boyutlarının en kısa dalga boyunun onda birine eşit ya da daha büyük olmasına dikkat edilmesi gerekir[22].

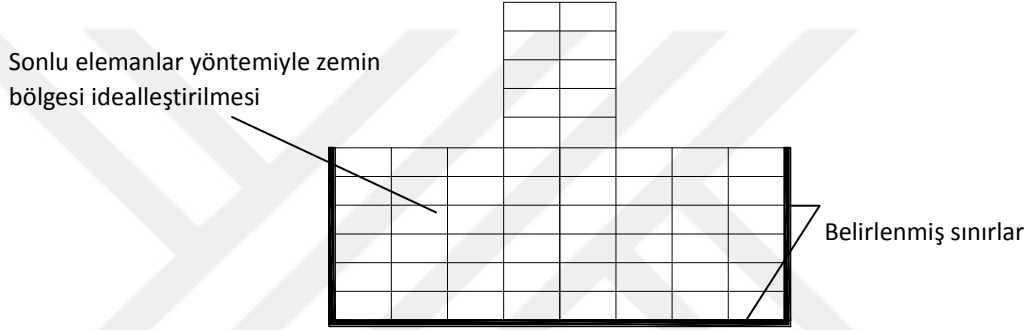
### **3.3.1.1. Sınır şartlarının sınır elemanlar yöntemiyle saptanması**

Kullanılan sayısal yöntem sonucunda da süreklilik gösteren sistemlerin ayırık bir sistem olarak ele alınması ve serbestlik derecesi artırılarak çözümün gerçeğe yakınlık derecesi çoğaltılabilir. Serbestlik derecesinin sonsuza yaklaştırılmasıyla matematiksel olarak kesin bir çözüm elde edilir. Sonsuz serbestlik dereceli ayırık bir modelin aynı sonsuz bir zemin bölgesi gibi sürekli bir ortama dönüştürülmesi mümkündür[47].

Kurulan modelde sistem sonsuz küçük bir eleman parçası gibi değerlendirilir. Bu modelin hareket denklemi kısmi diferansiyel denklem ile ifade edilir. Sınır elemanlar yönteminin çözümü için kullanılan diferansiyel denklemlerin analitik olarak çözümünün bilinmesi gerekir.

Bu yönteme ait çözüm, sürekli ortamlar mekaniği problemlerinin hareketi için yazılan diferansiyel denklem takımının sınır integral formülasyonuna dönüştürülmesi esasına dayanır[47].

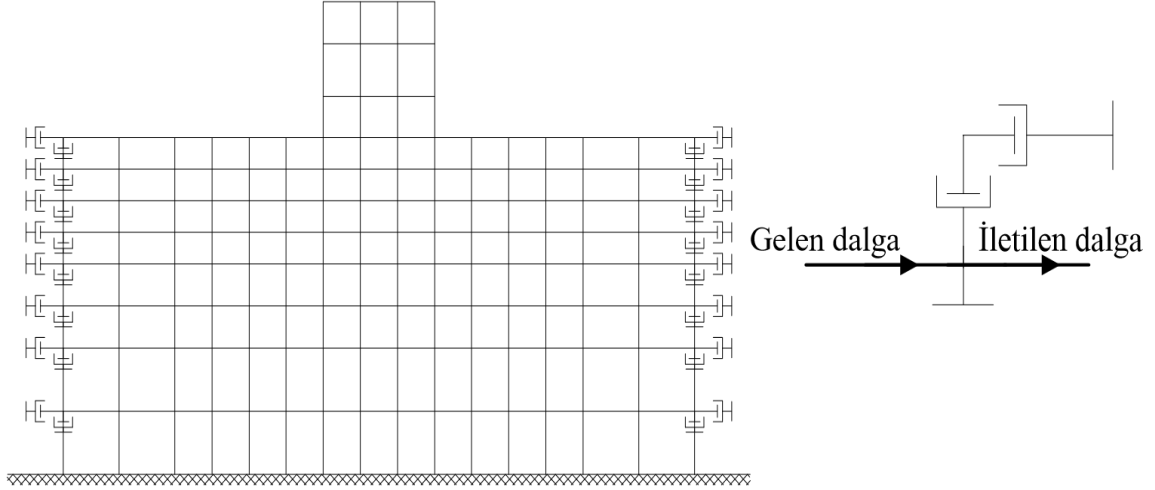
Yalnızca incelenecek bölgenin sınırlarında yapılacak ayrıklaşma lineer problemlerde yapılan çözümün bir derece indirgenmesi bilinmeyen sayısının azaltılmasını sağlayacaktır. Bilinmeyen sayısının azalması sonucu sınırdaki geometrik koşulun doğrudan sağlaması Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Sürekli ortamlar mekaniğinde bulunan dalga yayılış problemleri için uygun numerik çözümüm bulunması gereklidir. Sınır elemanlar yönteminin uygun bir çözüm olduğu görülmektedir[10].



Şekil 3.2: Zemin Sınır Şartlarının Sınır Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi [47]

### 3.3.1.2. Viskoz sınır şartlarıyla modelleme

Zemindeki geometrik sönüm şartını sağlayabilmek için zeminin sınırları eşdeğer statik yaylar ve sönümleyiciler ile idealleştirilmelidir. Bu sınır şartlarıyla titreşim kaynağından yayılan dalgaların sınırlarda yansıyor sisteme geri dönmesi engellenmiş ve zeminin sonsuzluğunun oluşturduğu geometrik sönüm ifade edilmiş olur şekil 3.3.



Şekil 3.3: Zemin Sınırlarının Viskoz Elemanlarla İdealleştirilmesi [47]

Kullanılan Sınır şartları sağlanırken zemin bölgesinin uygun elemanlara bölünmesi ve yapının zeminin kesim bölgesinden yeteri kadar uzaklıkta tutulması, viskoz sınır şartları kullanılırken dikkat edilmesi gereken koşullardır.

### 3.4. Sonlu Farklar Metodu

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) Lagrangian analizi yapan açık, sonlu farklar programıdır. En eski nümerik tekniklerden biri olan sonlu farklar metodu; başlangıç koşulları, sınır şartları vb. değerler verilerek farklı eşitlikler birleştirilerek çözümlendirilir [5].

Sonlu elemanlar ve sonlu farklar metodu nümerik model çalışmalarında kullanılırlar. Sonlu elemanlar metodu, sonlu farklar metodunun aksine her eleman boyunca, parametreler tarafından kontrol edilen belirli işlevler kullanarak değişiklik gösteren alan niceliklerinin temel gereksinimlerine sahiptir. Hataları azaltmak için bu parametrelerin formülde kullanılması gereklidir [5,37,47].

Çözüm için matematiksel eşitlikler üreten her iki yöntem için denklemler, farklı yöntemler ile elde edilse bile oluşan denklemlerin iki yöntem için de özdeş olduğu görülmektedir. Her iki yöntemin ortaya çıkardığı eşitlik aynıdır.

Belirli büyüklükte olan rijitlik eleman matrisleri sonlu farklar yöntemi ile çözümlenmemektedir. Bu matrisler sonlu elemanlar metodu ile her adımda sonlu fark denklemleri tekrar kullanılarak çözülebilmektedir.

Bu tarz problemlerin çözümünde sonlu elemanlar yönteminin kullanılması işlem yükünü azaltılmış ve zamanla sonlu farklar yönteminin yerini almasına olanak sağlamıştır. Kurulan denklemleri çözmek için açık bir yöntem kullanan FLAC, örtülü matris odaklı çözüm planlarını daha sık sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak sonuçlandırdığı görülür. İki metot arasında başka farklılıklar da vardır. Sonlu elemanlar metodu sonlu farklar metoduna göre daha fazla tercih edilmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sonlu farklar metodunun, dikdörtgen ağlar ile sınırlı olduğu söylenebilir bu gerçeği yansıtmamaktadır. Wilkins, herhangi bir şekildeki eleman için farklı denklemler türeten bir yöntem sunmuştur[47].

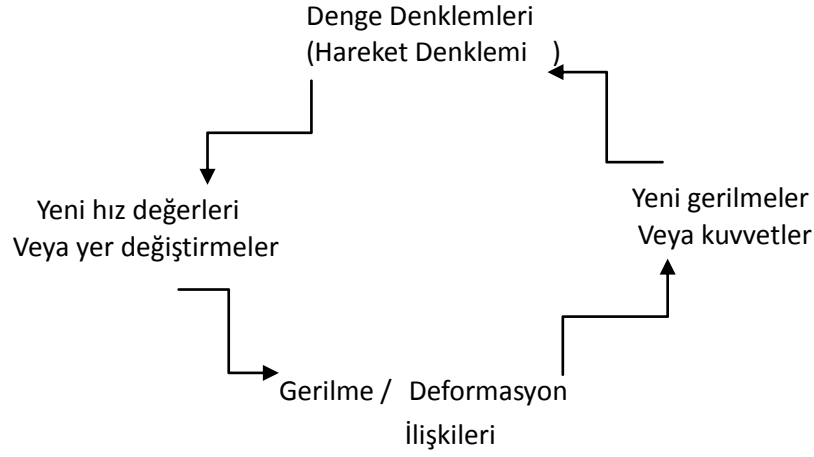
FLAC programında kullanılan bu yönteme göre elemanlar üçgen, dikdörtgen vb. herhangi bir şekilde olabilir. Bu elemanlar aynı sonlu elemanlar yönteminde olduğu gibi istenilen özelliklerde tanımlanabilir.

#### **3.4.1. Zaman adımı yöntemi**

Dinamik problemlerin çözümü için hareket denklemlerini içinde barındıran FLAC kararsız sistemleri kararlı hale getirerek çözümü sağlayabilmekte, ayrıca nonlineer malzemeler ile yapılan modellemelerde fiziksel istikrarsızlık durumu ve sistemin çökme olasılığı vardır.

Sistemdeki şekil deformasyonundan kaynaklı oluşan enerjiler kaynaktan uzaklaştıkça kinetik enerjiye dönüşür ve yayılırlar. Sadece çözüm veren kapalı kutu bir yazılım programı olmayan FLAC modelleri bu işlemi uygular[5-47].

FLAC gerilme ve kuvvetlerden yeni hız ve yer değiştirme değerlerini üretmek için ilk olarak hareket denklemleri kurulur, daha sonra elde edilen hız ve yer değiştirmelerin türevlerinden deformasyon oranları hesaplanır. Şekil 3.4' te FLAC programının genel hesaplama sıralanışı gösterilmektedir [5,17].



Şekil 3.4: FLAC Programı Ana Hesaplama Döngüsü. [47]

### 3.4.2. Lagrangian analizi

FLAC global rijitlik matrisine ihtiyaç duymamaktadır. Şekil değiştirmeler büyük olsa bile largestrain modunda her adım için koordinatları yenilenmesine gerek yoktur.

Artan yer değiştirmeler koordinatlara eklenir, böylece sonlu farklar örgüsü, malzeme davranışına göre deformasyona uğrar. Malzemenin bu davranışı sabit grid durumunda çalışan “Eularian” formülasyonun tersine oluşan bir durumdur. Oluşan bu durum “lagrangian” formülasyonu olarak adlandırılır [12,16].

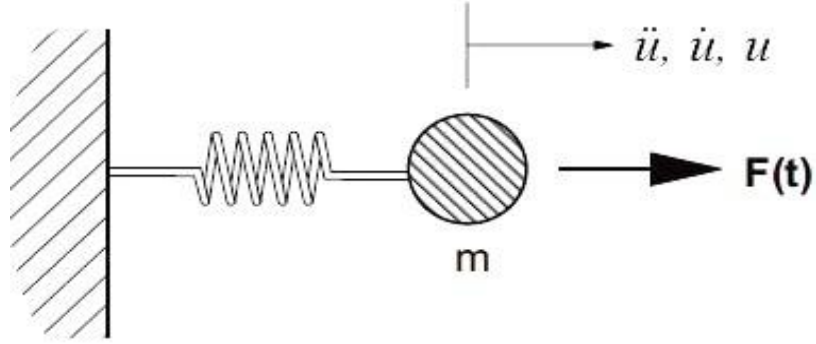
Aşamalardaki formülasyon küçük bir şekil değiştirme (small-strain) hesabıdır, milyonlarca adımın üzerine çıkılması büyük şekil değiştirmelere eşdeğerdir[16].

### 3.4.3. Alan denklileri

Isı transferi ve sıvı akış problemleri için hareket eşitlikleri ve temel ilişkilere dayalı çözümleri içeren FLAC katı cisimler, yapısındaki iletken ısı transferi için Fourier kanunlarını, geçirgen katı cisimlerdeki sıvı akışı için Darcy sınır şartları kanunlarını bulundurur [16].

### 3.4.4. Hareket ve eşitlikler

Hareket eşitlikleri bir kütle için ivmesini zamana bağlı olarak uygulanan kuvvet  $F$  ile ilişkilendirir. Şekil 3.5 de kuvvetin kütle üzerindeki etkisi ve ortaya çıkan ivme, hız ve yer değiştirme tanımlanmaktadır [16].



Şekil 3.5: Kuvvetin Kütle Üzerindeki Etkisi ve Ortaya Çıkan İvme, Hız ve Yer Değiştirme Etkisi [47]

Newton'un hareket kanuna göre;

$$m \frac{dv}{dt} \quad (3.1)$$

Burada;

$dv$ : hız

$dt$  : zaman

Birden fazla kuvvetin sisteme etki ettiği koşullarda statik eşitlik koşulu olan ivmenin sıfıra ulaştığı durum kullanılır.  $\sum F = 0$  Tüm kuvvetlerin toplamı sıfırdır. Bu kanun FLAC ile statik problemlerin çözümünde kullanılır[16].

Sürekli katı cisimler için genelleştirilmiş denklem aşağıdaki gibidir;

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} = \frac{d\sigma_{ii}}{dx_i} + \rho g_i \quad (3.2)$$

$\rho$ : Yoğunluk

$t$  : Zaman

$x_i$  : Koordinat vektörünün bileşenleri

$g_i$  : Yerçekimi ivmesinin bileşenleri

$\sigma_{ij}$  : Gerilme sensörünün bileşenleri.

### 3.4.5. Temel ilişkiler

Bir diğer temel eşitlikte, deforme olan cisimler için kullanılan gerilme/şekil değiştirme kanunudur. İlk olarak hızdan gerilme oranı elde edilir.

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.4)$$

$e_{ij}$ : şekil değiştirme oranı bileşenleri

$u_i$ : hız bileşenleri

Temel mekanik eşitlikler ise;

$$\sigma_{ij} = M(\sigma_{ij}, e_{ij}, K)$$

$M$ : temel kanunun fonksiyonel şekli

$K$ : history parametresidir

Temel kurallara göre izotropik elastik durumda en basit örnek;

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij} + \left( \delta_{ij} \left( K - \frac{2}{3} G \right) e_{kk} + 2G e_{ij} \right) \Delta t \quad (3.5)$$

$\delta_{ij}$ : Kronecker delta

$\Delta t$ : Zaman adımı

$G$ : Kayma modülü

$K$ : Bulk modülü

### 3.4.6. Sınır şartları

Yer değiştirme ve gerilme yer değiştirme değerlerinden her ikisi de FLAC programında katı cismin sınırına uygulanabilir. Yer değiştirmeler düğüm noktalarına verilen hız değerlerinden tanımlanmaktadır. Kuvvet değerleri formülü (3.6) türetilmektedir.

$$F_i = \sigma_{ij}^b n_j \Delta_s \quad (3.6)$$

$n_j$ : sınır elemanındaki dış normal vektör birimi

$\Delta_s$ : sınır elemanının uzunluğu

$\sigma_{ij}^b$ : elemandaki gerilme değerini ifade etmektedir.

### 3.4.7. FLAC Zemin modelleri

İçerisinde boş, elastik ve plastik model gruplarının düzenlenmesi ile oluşmuş on iki farklı model bulunduran FLAC zemin davranış özelliklerine göre nümerik modelleme yapılabilmesini sağlayan özel bir programdır [5].

#### 3.4.7.1. Elastik - İzotropik model

Kendi içinde homojen olmayan ve aynı zamanda süreksiz yapılar olan zemin, bu özelliklerinin tam olarak ifade edilmesinin zor olması sebebi ile çeşitli kabuller yapılması zorunludur. Yapılan çalışmalarda zemin modelleri bu kabuller eşliğinde kurulmaktadır.

Zemin her noktasında aynı özelliklere sahiptir ve lineer davranış sergileyen bir malzeme olarak kabul edilir. Zeminin elastisite teorisine göre davranış ortaya koyacağı kabul edilen bu kavrama elastik zemin kavramı denir. Bu çalışmada da ilk aşamalarda FLAC 2D elastik-izotropik model zemin teorisine bağlı çalışmalar yapılmıştır[16].

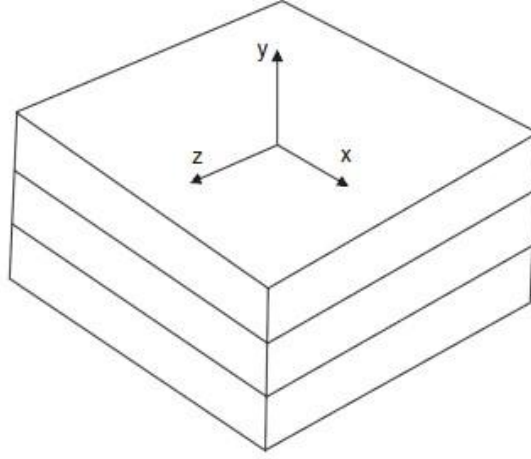
Elastik-izotropik teoriye göre zeminin davranışı, gerilme - şekil değiştirme ilişkisi altında incelenmiştir. Burada temel Hooke kanunları ve düzlem şekil değiştirme ilişkileri dikkate alınmaktadır. Elastik izotropik zemin modeline göre gerilme şekil değiştirme eşitlikleri ve kabuller aşağıdaki gibidir [5,16,27].

$$E_1 = E_3 \quad (E_x = E_z)$$

$$v_{13} = v_{31} \quad (v_{xz} = v_{zx})$$

$$v_{21} = v_{23} \quad (v_{yx} = v_{yz})$$





Şekil 3.6: FLAC Elastik İzotropik Koordinat Eksenleri. [47]

Buna göre elastik gerilme-şekil değiştirme ilişkileri aşağıdaki gibidir.

$$\Delta e_{11} = S_{11}\Delta\sigma_{11} + S_{12}\Delta\sigma_{22} + S_{13}\Delta\sigma_{33} + S_{16}\Delta\sigma_{12} \quad (3.7)$$

$$\Delta e_{22} = S_{12}\Delta\sigma_{11} + S_{22}\Delta\sigma_{22} + S_{23}\Delta\sigma_{33} + S_{26}\Delta\sigma_{12} \quad (3.8)$$

$$\Delta e_{33} = S_{13}\Delta\sigma_{11} + S_{23}\Delta\sigma_{22} + S_{33}\Delta\sigma_{33} + S_{36}\Delta\sigma_{12} \quad (3.9)$$

$$S_{11} = \frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} \quad (3.10)$$

$$S_{22} = \frac{\sin^4 \theta}{E_1} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\cos^4 \theta}{E_2} \quad (3.11)$$

E: Elastisite modülü

G: Kayma modülü

$\nu$  : Poisson oranıdır.

Elastik zemin teorisi için ilgili parametreler

1. Poisson oranı
2. Young modülü
3. Bulk modülü
4. Makaslama modülüdür.

#### **3.4.7.1.1. Poisson oranı**

Enine daralmanın, boyuna uzamaya oranına verilen isimdir. Geometrik şekil değiştirme olarak tanımlanan poisson oranı bir gerilme - deformasyon ölçüsü değildir. Zemin içerisinde bulunan boşluk ve çatlaklar bu oranını etkilemektedir. Poisson oranı 0,5 ile 0 arasında değişir. Elastik katılar için bu değer yaklaşık 0,25' tir. Dış etki sonucu oluşan sıkıştırma (Basınç) veya çekme kuvvetlerine bağlı olarak farklı deformasyon kuvveti işareti kullanılır [47].

#### **3.4.7.1.2. Elastisite (Young) modülü**

Dış kuvvet altındaki zeminin sıkışma ve genişleme kuvvetleri sebebi ile zeminde oluşan enine daralmanın boyuna uzamaya oranlanması sonucu elde edilir.

Çekme veya basınç gerilmesinin birim uzama ile arasındaki doğrusal ilişkinin formüller ile tanımlanmıştır [12].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.12)$$

$E$  : Elastisite modülü

$\sigma$  : Normal gerilme kayma modülü

$\varepsilon$  : Birim uzamadır.

#### **3.4.7.1.3. Bulk modülü**

Hacim değişikliğine karşı malzemenin mukavemetinin ölçüsüdür. Literatürde hidrostatik basınç altında kalan bir kayaçtaki gerilme - deformasyon ölçüsü olarak açıklanmıştır [12].

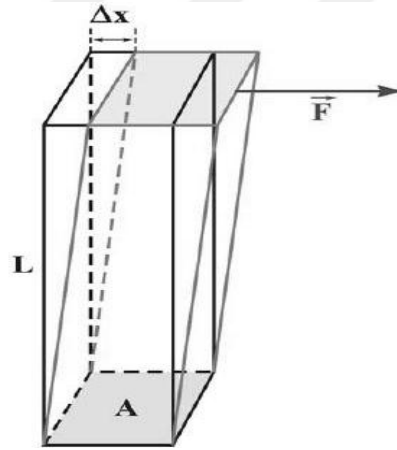
$$K = - V \frac{\partial P}{\partial V} \quad (3.13)$$

$P$  : Basınç

$V$  : Hacimdir.

#### 3.4.7.1.4. Shear (Makaslama) modülü

Makaslama yer değiştiren yüzeye teğet kuvvete denir. Bu kuvvet etkisi altında oluşan Gerilme-Deformasyon oranı ölçüsüdür. Her hangi bir hacim değişikliği olmadan meydana gelen yer değiştirmeler makaslama deformasyonunu ifade eder. Sıvı maddelerin makaslamaya karşı her hangi bir mukavemeti olmadığından sıvılar için makaslama değeri sıfırdır [47].



şekil 3.7: Kayma Modülünün İfadesi [47]

$$G = \frac{F/A}{\Delta x/L} = \frac{FL}{A\Delta x} \quad (3.14)$$

$F$ : Kuvvet

$A$ : Alan

$\Delta x$ : Deformasyon'dur.

### 3.4.7.2. Mohr-Coulomb modeli

FLAC bu modelde  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  asal gerilmeleri kullanmaktadır. Asal gerilmeler ve asal yönler gerilme tensörlerine göre değerlendirilmektedir.

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (3.15)$$

Asal şekil değiştirme artışları  $\Delta e_1, \Delta e_2, \Delta e_3$  aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır;

$$\Delta e_i = \Delta e_i^e + \Delta e_i^p \quad (3.16)$$

Burada e ve p sırasıyla elastik ve plastik kısımları ifade etmektedir. Temel Hooke kanununa göre asal gerilme ve şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

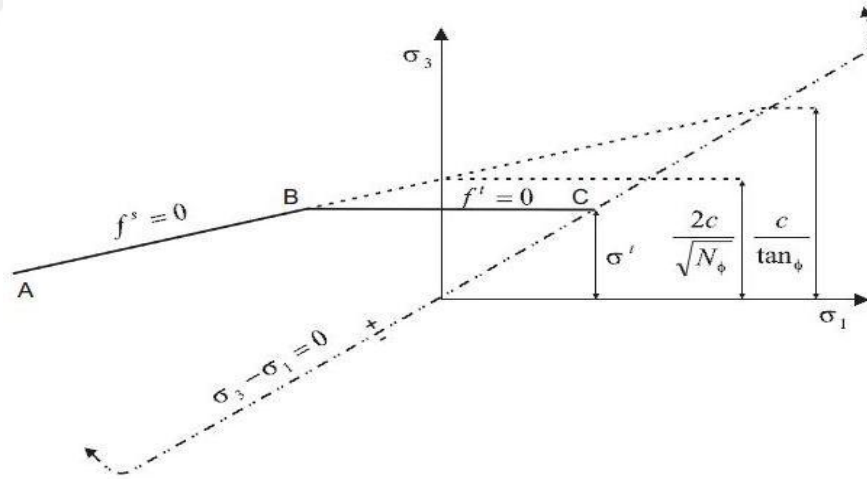
$$\Delta \sigma_1 = \alpha_1 \Delta e_1^e + \alpha_2 (\Delta e_2^e + \Delta e_3^e) \quad (3.17)$$

$$\Delta \sigma_2 = \alpha_1 \Delta e_2^e + \alpha_2 (\Delta e_1^e + \Delta e_3^e) \quad (3.18)$$

$$\Delta \sigma_3 = \alpha_1 \Delta e_3^e + \alpha_2 (\Delta e_1^e + \Delta e_2^e) \quad (3.19)$$

$$\alpha_1 = K + 4G/3$$

$$\alpha_2 = K - 2G/3 \text{ tür.}$$



Şekil 3.8: FLAC Mohr-Coulomb Yenilme Kriteri [47]

Şekil 3.8' de Mohr-Coulomb kriterinde A-B noktaları arası yenilme zarfını ifade etmektedir.

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_0 + 2c \sqrt{N_0} \quad (3.20)$$

B-C noktaları arasında gerilme yenilmesinin fonksiyonu da;

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3 \quad (3.21)$$

Burada  $\emptyset$  içsel sürtünme açısı, c kohezyonu,  $\sigma^t$  gerilme dayanımıdır.

$$N_{\emptyset} = \frac{1 + \sin \emptyset}{1 - \sin \emptyset} \quad (3.22)$$

### 3.4.7.3. Finn-Byrne sıvılaşma modeli

FLAC Byrne tarafından geliştirilmiş olan boşluk suyu basıncı artışı modelini dinamik opsiyon modelinde kapsamaktadır. Dinamik kayma birim deformasyonu miktarını hacimsel birim deformasyonlarla ilişkilendirerek dinamik yükleme sırasında oluşan hacimsel birim deformasyonları, boşluk suyu basıncının değeri bu model ile hesaplanabilmektedir. Böylelikle deprem sırasında boşluk suyu basıncı ve sıvılaşma problemleri modellenabilmektedir. Bu prensibe göre Byrne hacimsel deformasyon ile gerilme şekil değiştirme arasında SPT ye bağlı bir formül geliştirmiştir [47].

$$\frac{\Delta \varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp(-C_2 \left( \frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma} \right))$$

$\varepsilon_{vd}$  : Hacimsel deformasyon

$$C_1 = 7600(D_r)^{-2,5} \text{ veya } C_1 = 8,7(N_1)_{60}^{-1,25} \quad (3.24)$$

$$C_2 = 0,4 / C_1 \quad (3.25)$$

### 3.4.7.4. UBCSAND Sıvılaşma modeli

FLAC boşluk suyu basıncındaki artışı dinamik opsiyon çalışma modelindeki gerilme–deformasyon analizleri yaparak hesaplayacak kapsamdadır. Bu model ilk olarak Kanada sıvılaşma deneylerinin (Canadian Liquefaction Experiment – CANLEX) tahminde kullanılmıştır[36].

İlk sürümü 2002 yılında UBCSAND 904 olarak geliştirilerek sunulmuştur. Zeminin yük artışları altındaki davranışını tahmin eden model, boşluk suyu basıncının tepkisi hacimsel deformasyon ve zemin iskeletinin davranışıyla beraber ifade edilmektedir.

UBCSAND model elastik bileşenleri kayma modülü  $G^e$  ve Bulk modülü  $B^e$  olmak üzere;

$$G^e = K_G^e P_a \left( \frac{\sigma'}{P_{a_a}} \right)^{ne} \quad (3.26)$$

$K_G^e$ : Yoğunluğa bağlı kayma modülüdür, gevşek kumlarda 500 ile başlayan değer sıkı kumlarda 2000' e ulaşır

$P_a$ : Atmosfer basıncı

$\sigma'$  : Eşit yükleme düzleminde ortalama efektif gerilme  $(\sigma_x' + \sigma_y')/2$

UBCSAND model plastik bileşeni kayma şekil değiştirme  $d\gamma^p$  olmak üzere, kayma gerilmesi oranı ile ilişkilidir ( $d\eta$ );

$$d\gamma^p = \frac{1}{G^p/\sigma'} d\eta$$

$G_p$ : Plastik kayma modülüdür.

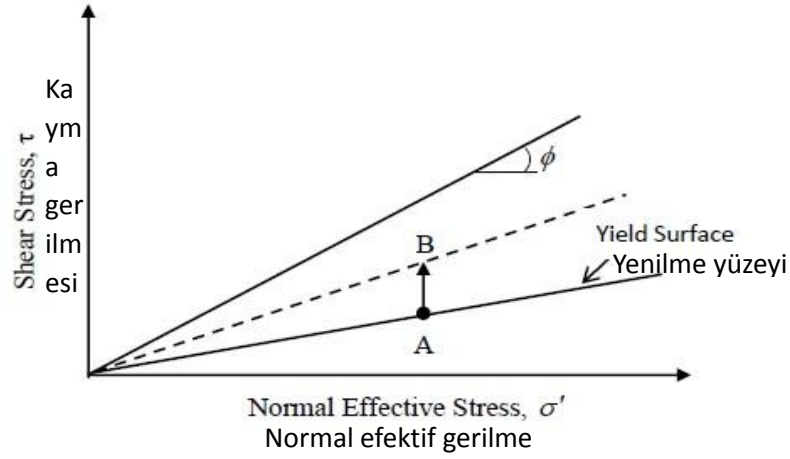
$$G_p = G_i^p \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_f} R_f \right)^2 \quad (3.27)$$

$G_i^p$  : Gerilme oranının en düşük olduğu seviyede plastik modül

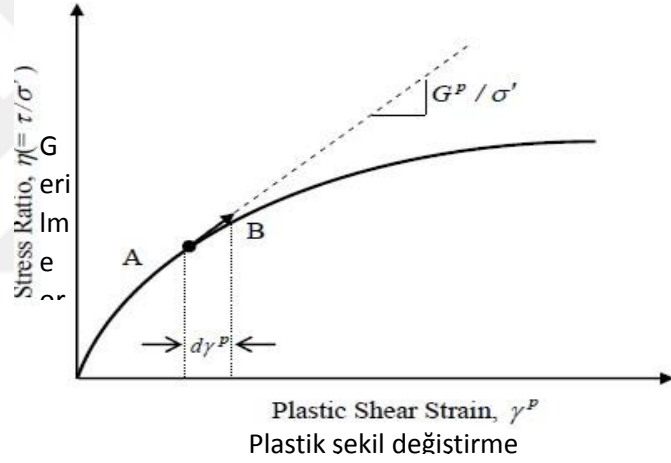
$\eta_f$  : Yenilme anındaki gerilme oranı ( $\sin \theta_f$ )

$\theta_f$  : Pik içsel sürtünme açısı

$R_f$  : Yenilme oranı (genellikle 0, ve 0,98 arasında değişir)



Şekil 3.9: UBCSAND Yenilme Yüzeyi [47]



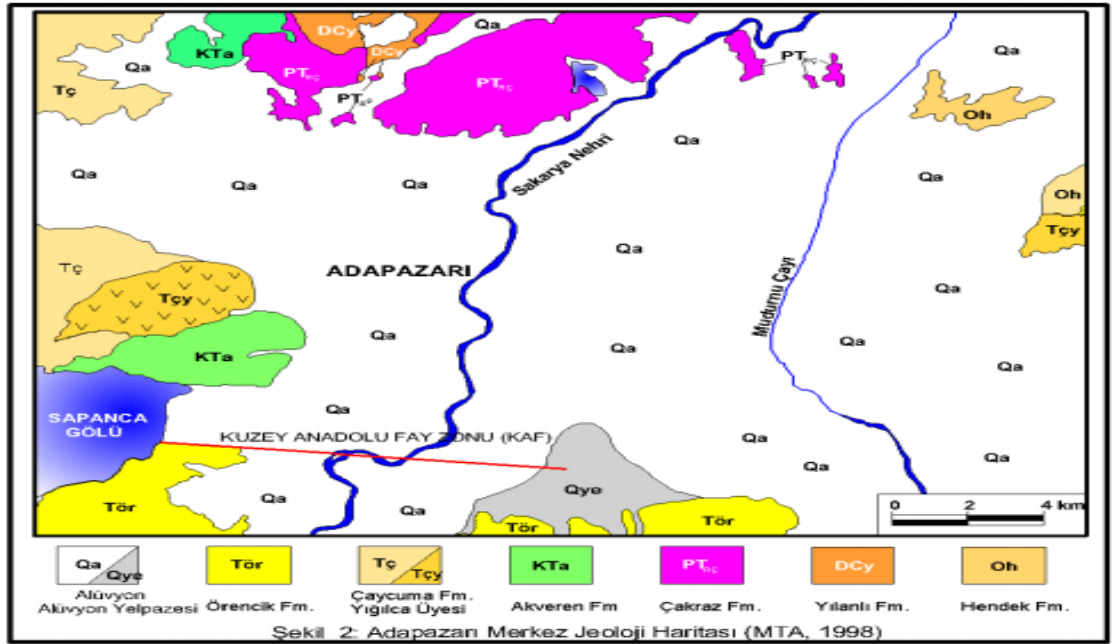
Şekil 3.10: Plastik Modül ve Plastik Şekil Değişirme ve UBCSAND [47]

Zemin ortamı alt ve üst yapı ile birlikte şekil değiştirebilen sistemler olarak dışarıdan gelen statik ve dinamik yükler etkisi altında iken birlikte davranış göstermektedir. Anlaşılacağı üzere zemin bölgesinde alt ve üst yapı sistemin bir parçası kabul edilmelidir. Bir bütün olarak tanımlanmalı ve beraber analiz edilmelidir [2,21,33].

Zeminin yarı sonsuz ortamında kaybolan ve sisteme yayılan enerjiyi tanımlamak için bölgenin sınırlarına eşdeğer, geometrik sönüm (Radyasyon sönüm) adı verilen ve malzeme sönümü ile ilgisi bulunmayan, dalga yansımalarını engelleyen bir sönüm mekanizması olan viskoz sönümleyiciler kullanılmıştır [33,47].

## BÖLÜM 4. BÖLGENİN GENEL JEOLJİSİ

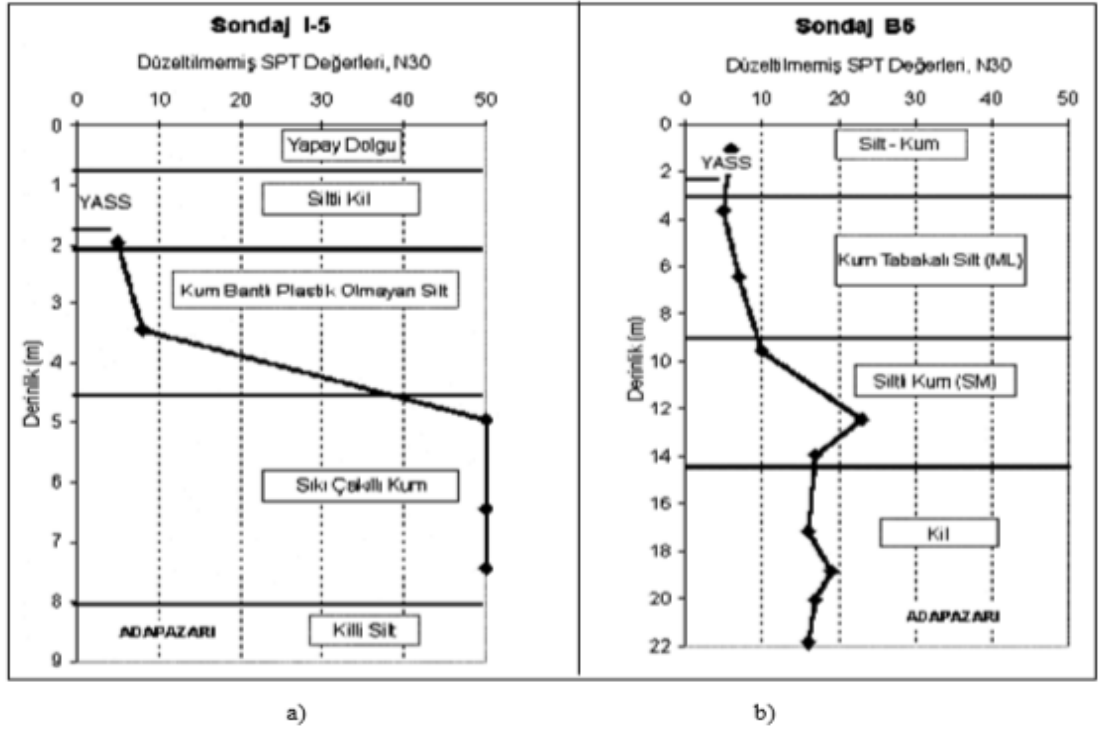
Bölgeyi Adapazarı, Akyazı, Hendek ovalarını oluşturan geniş yaşlı alüvyonlar (kuvarter) oluşturmaktadır. Sakarya ve Mudurnu nehirlerinin taşıdığı alüvyonları çakıl, kum, kil ve silt oluşturmaktadır. Bu geniş alanı oluşturan alüvyonlar Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) boyunca ve bölgenin güneyindeki tepelerden taşınmıştır. Ağırlık olan zemin çakıl-kum-siltten oluşmaktadır. Bu tabakalar düşük plastisiteli kil ve silt içerirler[25].



Şekil 4.1: Adapazarı Merkez Jeoloji Haritası [23]

Adapazarı ilçesi Sakarya havzası içerisinde bulunmaktadır. Alüvyonlu tabaka kalınlığı 3 m'den başlayıp ilçenin çeşitli yerlerinde 15 m'yi aşan bu havzayı Sakarya Nehri ve Çark Suyu jeolojik süreç içerisinde oluşturmuştur. Gerçekleşen deprem sonrasında parsel parsel sondaj yapılması zorunlu hale getirilmiştir. Bu zorunluk sayesinde bölgenin çoğu bölgesinde sondajlar yapılmıştır[25,47].





Şekil 4.2: A) Adapazarı Şehrinin Tipik Kesiti B) Adapazarı'nda Ağır Hasar Alan Bölgeden Zemin Kesiti [24]

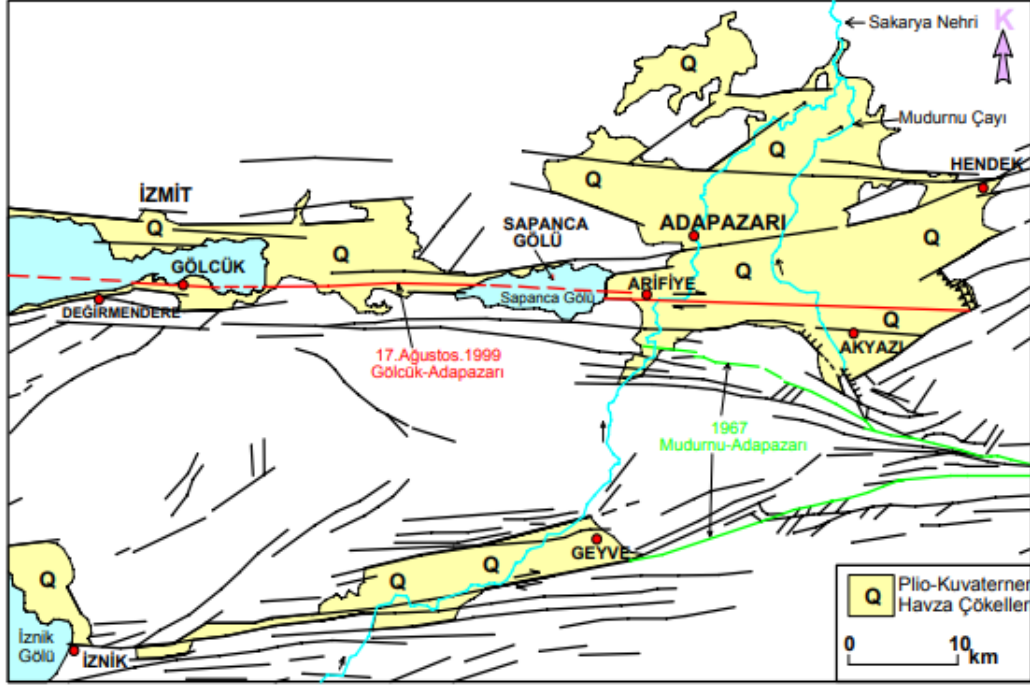
Bölgede farklı yoğunluklarda siltli kum ve çakıldan oluşan zemin egemen görülmektedir. Havzada ki alüvyon kalınlığı kenarlardan ortaya doğru arttığı bilinmektedir. DSİ (Devlet Su İşleri) tarafından kent merkezinin kuzeydoğusunda 303 m derinlikte sondaj çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda ana kayaya ulaşamadığı belirtilmiştir. Aynı bölgede Komazawa ve diğ. (2001) jeofizik çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda 1000 m kalınlığında alüvyon zemin olduğunu ifade etmişlerdir. Güney kısmında bulunan Sakarya ve Mudurnu nehirlerinin oluşturduğu zemin tabakaları gevşek çakıllardan oluşmaktadır. Havzanın doğu kenarını çakıllı zemin bölümler, orta kısmını mudurnu ve sakarya nehirleri etkisi ile çok görümlü tabakalar (fasiyes), oluşturmaktadır. Bu çakıl tabakalar havzayı kenardan besleyen alüvyon yelpazelerine aittir. Fasiyes havzanın oluşum süresi boyunca gerçekleşen farklı yatak oluşumlarının doğal sonucudur. Bölgede yüzey tabakası oluşum sırasına göre Tablo 4.1'de listelenmiştir[25,42].

Tablo 4.1: Adapazarı ve Yakın Çevresinde Zamanla Oluşan Kayaçların Jeolojik Özellikleri[25]

Formasyon	Simge	Yaş	Kalınlık	Litoloji ve Renk	Oluşum Ortamı	Tabakalama	Yüzeyleme
Hendek Formasyonu	Oh	Alt Ordavisiyen	1500 - 2000	Griimsi Sarı-Yeşil Renkli Şeyl Ve Kumtaşı Ardalanmalı, Griimsi Yeşil-Mor Renkli Kumtaşı Arakatkılı Şeyl	Sığ Deniz	Orta, Kalın	Adapazarı Kuzeydoğusu, Çamdağı
Yılanlı Formasyonu	Dey	Orta ve Üst Ordavisiyen – Alt Karbonifer	10 - 60	Açık-Koyu Gri,Siyah Yer Yer Beyaz Renkli Rekrystalize Kireçtaşı,Dolomitik Kireçtaşı,Dolomit	Sığ Deniz - Şelf	İnce, Orta Kalın	Adapazarı Kuzeyi, Kuzeydoğusu
Çakraz Formasyonu	Ptç	Permiyan Triyas	1500	Gri Dolomit,Şeyl,Kırmızı Kumtaşı,Rekrystalize Kireçtaşı,Gereçli Çakıltaşı Çamurtaşı	Karasal	İnce, Kalın	Adapazarı Kuzeyi, Taş Kısığı Mevkii
Akveren Formasyonu	Kta	Meastrihtiyen (Üst Kretase) – Alt Eosen	.....	Sarı ,Beyaz,Griimsi Yeşil Yer Yer Kırmızı Renkli Killi Kireçtaşı,Marn,Kıltaşı,Çakıltaşı,Resifal Kireçtaşı, Ve Volkanitler (Andezit,Bazalt)	.....	İnce, Orta, Kalın	Adapazarı Kenti Güneyi ve Güney batı Kenarı
Çaycuma Formasyonu	Tç	Alt – Orta Eosen	.....	Sarı ,Gri,Griimsi Yeşil Renkli Mika Pullu Kumtaşı Çamurtaşı,Marn,Çakıltaşı,Nu mmulitli Kırıntılı Kireçtaşı	Yamaç ve Sığ Deniz Ortamı	İnce Orta Yer Yer Kalın Katmanlı	Adapazarı Batısı
Yığılca Üyesi	Tçy	Alt – Orta Eosen	.....	Koyu Gri ,Kahverengimsi Gri,Kırmızısı Gri Renkli Piroklastik Kayalar,Andezit, Ve Bazalt	.....	Orta, Kalın	Adapazarı Batı – Güney Batısı
Örencik Formasyonu	Tör	Pliyosen - Miyosen	.....	Kırmızı,Sarımsı Kırmızı,Kahverengi Renkli Çakıltaşı Kumtaşı,Çamurtaşı Ve Kıltaşı	Akarsu, Selleme ve Alüvyol Yelpazesi	Orta, Kalın	Adapazarı Güneyindeki Yüksek Dağlara Kuzey Etekleri

Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), yaklaşık 1500 km uzunluğundadır. Bu fay zonu Dünyadaki aktif fay kuşaklarından bir tanesidir.

Kalın alüvyon tabakaların oluşturduğu zayıf zemin üzerinde yer alan Adapazarı geçmişte şiddetli depremler sonucu büyük hasar görmüş bir ovadır. Bunun yanı sıra zemin koşulları sebebi ile yer hareketi sırasında zeminde sıvılaşma ve büyütme açısından çok fazla potansiyel içermektedir[25].



Şekil 4.3: Adapazarı ve Çevresinin Neo-Tektonik Haritası[25].

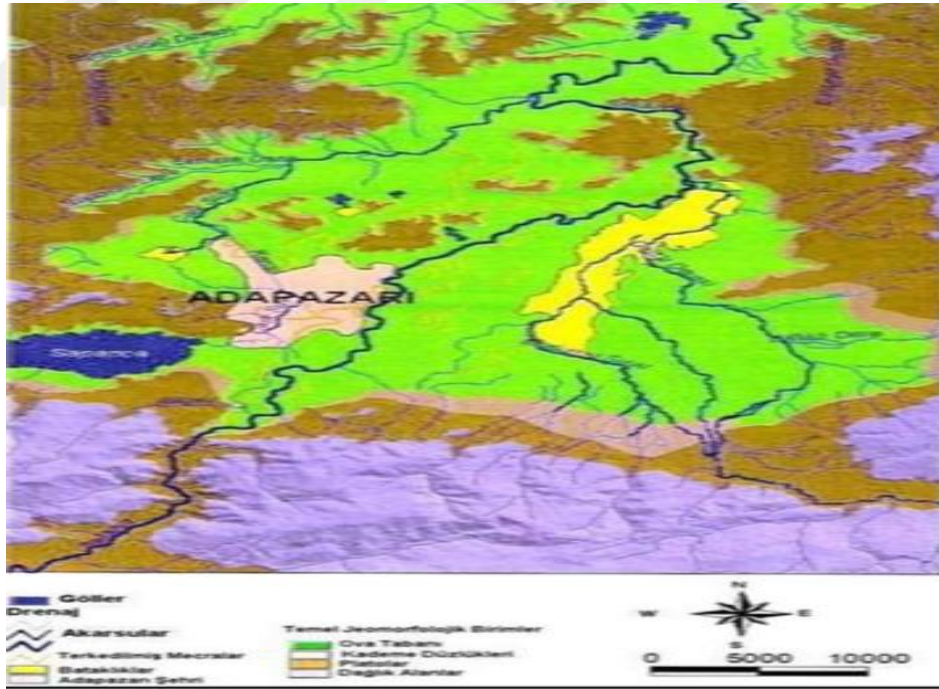
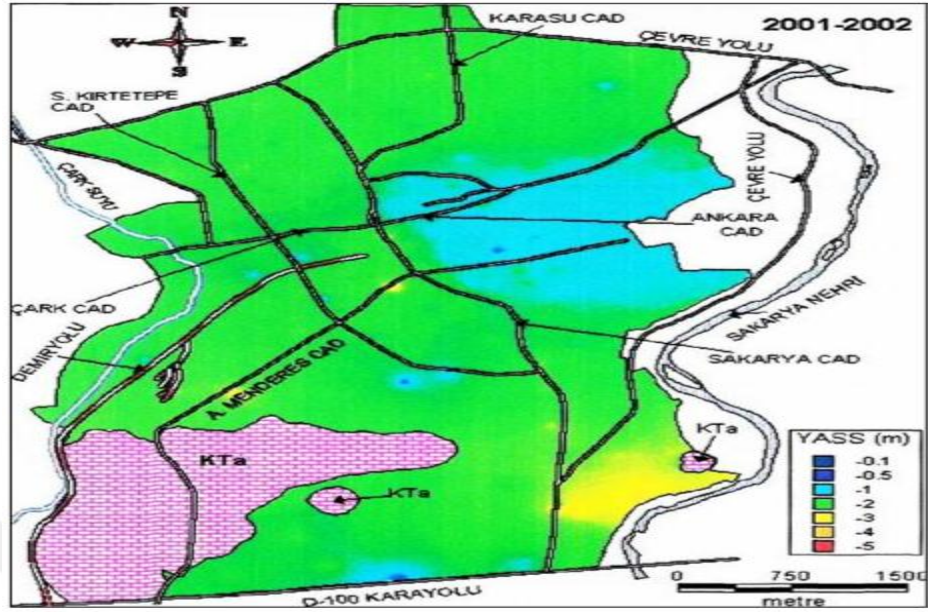
#### 4.1. Adapazarı Yeraltı Suyu

Adapazarı yer altı su seviyesi (YASS) yüzeeye yakındır. Bölge Bölge 1 ile 2 m arasında değişen seviyelerde bulunmaktadır. Aşırı yağış ve Mart aylarında eriyen karlar sonucu YASS yüzeeye kadar çıkmaktadır. 1999 yılı öncesi için 60 sondajdan ölçülen ortalama YASS 1,56 metre iken Temmuz aylarında ise 2,77 metreye kadar düşmektedir. 2000 yılında ise 488 sondaj verisinden elde edilen YASS ortalaması 1,05'e kadar yükselmiştir.

2000 yılı içinde ortalama su seviyesinin en yüksek olduğu ay 0,48 metre ile Mart ayı, en düşük su seviyesi 1,37 metre ile Eylül ve Aralık ayıdır.

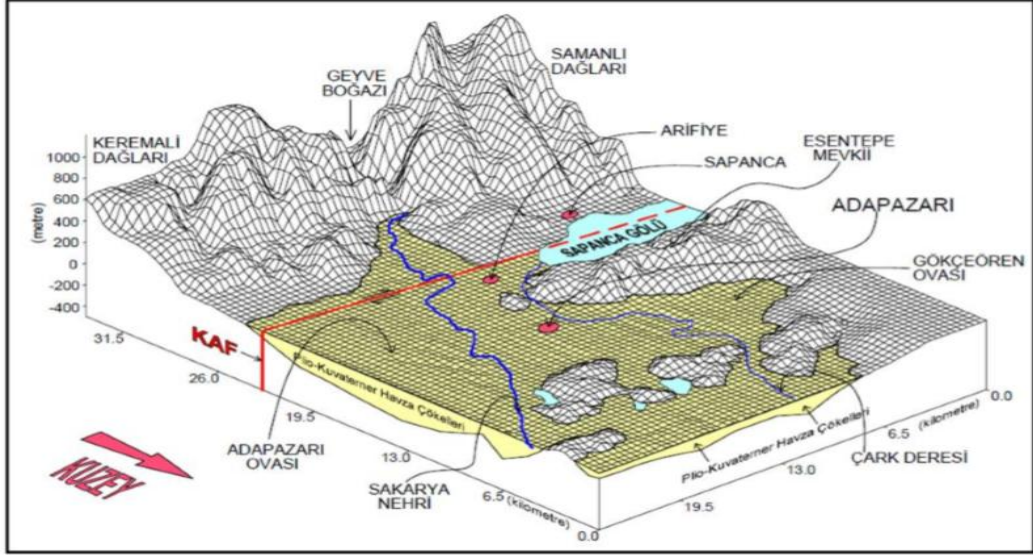
2001 yılında ortalama 1,79 metre ve Ağustos ayında minimum 2,20 metre görülmüştür. 2002 yılında ise ortalama 1,88 metre ve bu yıla ait minimum seviye 2,62 metre olarak yine Ağustos ayındadır[6,24,42].

Şekil 4.4’ de 2001–2002 yıllarına ait yer altı su seviyeleri verilmiştir. Bu haritalarda yeşil kısımlar yaklaşık 2,0 metre derinliği göstermektedir.



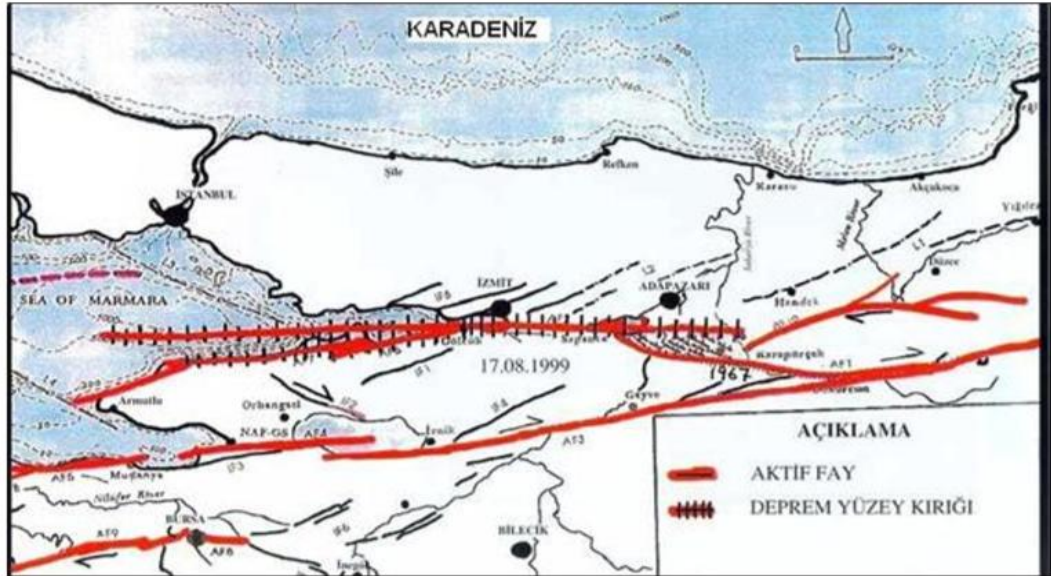
Düz bir saha görünümü ihtiva eden Adapazarı, kurulmuş olduğu şehir merkezinin deniz seviyesinden yüksekliği büyük bir bölümde 31 m civarındadır [45].

Bu yükseklik Kuzey-Doğu istikametinde % 0,5 Kuzey-Batı istikametinde % 2'lik bir eğimle azalma gösterir. Şehirleşmenin yüksek olduğu yerlere bakıldığında bu düzlüğün batıda Serdivan ve GB' da Erenler mevkieinde bir miktar bozulduğu görülmektedir[39].



Şekil 4.6: Adapazarının KD'dan GB'ya Doğru Morfolojik Görünümü [39]

Bölgede MTA Genel Müdürlüğü uzmanlarının afet bölgesinde 1997 yılında gerçekleştirdikleri araştırmalar ile belirlenen aktif faylar gösterilmektedir.



Şekil 4.7: Afet Bölgesi ve Yakın Çevresinin Aktif Fay Haritası [39]

## BÖLÜM 5. MODELİN OLUŞTURULMASI

### 5.1. Nümerik Model Oluşturulması

Yumuşak temel malzemeleri üzerinde yapılan otoyol zeminlerinde iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Aşırı yükleme deformasyon potansiyelinin azaltılmasında etkilidir, ayrıca inşaat yüklemesinden sonra temel malzemelerinin zamanla zayıflama potansiyelinin de ortadan kaldırılması için zemin iyileştirme yapılması önem taşır.

Bu çalışmada, yumuşak kil üzerine inşa edilme aşamasındaki bir karayolunun ilk inşaat aşamasında karayolu dolgusunu desteklemek için farklı iyileştirme yöntemlerinin etkisi belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır [1-51].

Saha şartlarının sağlanmasının mümkün olmaması sebebiyle oluşabilecek problemlerin çözümü için FLAC 2D programı kullanılarak nümerik model yaklaşımları kullanılabilir. Birçok mekanik probleme çözüm sağlayan FLAC aslında zemin mekaniği problemleri için tasarlanmıştır. FLAC 2D İki boyutlu sonlu farklar metodu kullanılarak tasarlanan zemin modellerinde, sınır şartlarının belirlenmesi ve dış kuvvetlerin tanımlanması ile doğrusal veya doğrusal olmayan gerilme-birim deformasyon kuralına göre zemin davranışlarını hesaplar. Dış kuvvet altında oluşan birim deformasyon ve malzemenin yapısından kaynaklı plastik davranışlar Lagrange yöntemi ile hassas bir biçimde hesaplanıp modellenmektedir [1,51].

FLAC dinamik analiz modeli içerisinde

Zaman alanında,

1. İki boyutlu düzlem deformasyonu
2. Eksenel simetrik geometrik model dinamik analizleri
3. Yapısal elemanların modele eklenmesi ile yapı zemin etkileşimi

4. Yeraltı suyu akımı modeli ile birleştirilerek dinamik yüklemeler etkisiyle sıvılaşma (boşluk suyu) basıncı artışı
5. Sönüm oranlarının kayma birim deformasyonları ile artışı
6. Kayma rijitliğinin kayma birim deformasyonları ile azalışı
7. Kayma birim deformasyonu miktarını hacimsel birim deformasyonlarla ilişkilendirerek dinamik yükleme sırasında oluşan hacimsel birim deformasyonları (Byrne Modeli).
8. Hacimsel birim deformasyon değerlerinden boşluk suyu basınçlarını hesaplaya bilmektedir.

Dinamik yük etkisi altındaki zeminde oluşan boşluk suyu basıncı ve sıvılaşma problemleri FLAC ile gerçek davranışına en yakın şekilde modellenmektedir. Çalışmalarımızda nümerik analiz aşamaları FLAC 2D ile modellenmiştir.

Zayıf zemin üzerine yapılacak bir kara yolu alt yapısının desteklenmesi için farklı yöntemler için modellenmiş, zemin özellikleri tanımlanmış, modellerin statik ve dinamik analizleri yapılmıştır.

Çalışmamızda statik ve dinamik analizler

1. Temel zemin koşullarında
2. İnşaat yıkıntı atıkları ile iyileştirilmiş zemin
3. Kazık destekli zemin

Modelleri oluşturulmuştur [1-51].

## **5.2. Modelleme Prosedürü**

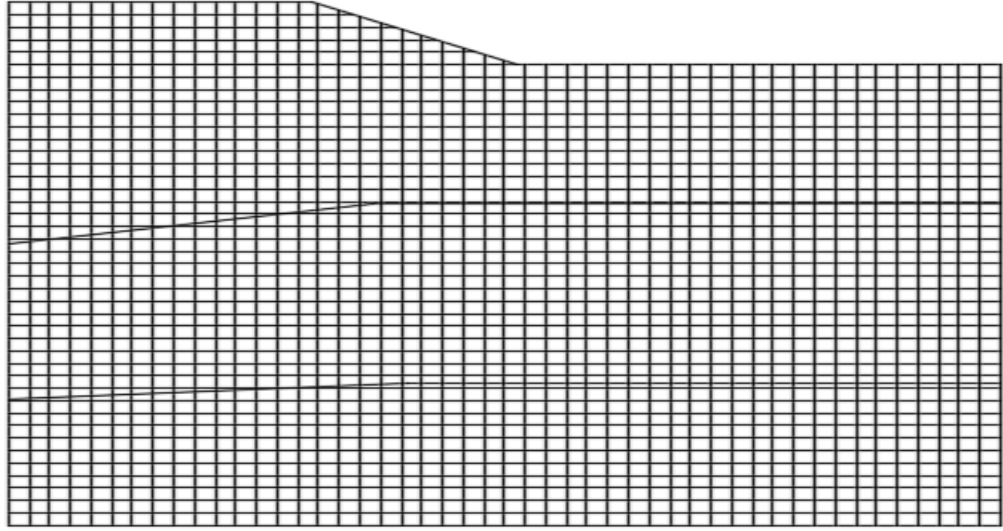
Bu çalışma nümerik model kurularak iyileştirilen bir zeminin oturma miktarlarını karşılaştırmak amacı ile parametrik çalışan bir sistem olarak modellenmiş ve doğrudan dolgunun altındaki yüzey boyunca dikey yer değiştirmeler izlenmiştir.

Modelimiz FLAC'ın grafik arayüzü kullanılarak oluşturulmuştur. Matematiksel modellemenin en önemli şartlarından biri boyutlandırma [5,16,17].

Çalışmamızdaki model iki blok şeklinde kazı eğimini, kazı ve temel malzeme sınırları tanımlanarak oluşturulmuştur.

### 5.2.1. Modelin boyutlandırılması

Modelin boyutlarının büyük olması gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. Modelin büyük olması durumunda analizlerin uzun sürmesi vb. olumsuzluklar sebebi ile efektif sonuç alınamamaktadır. Küçük modellerde ise sınır şartlarından kaynaklanan dalga yansımaları problem oluşturmaktadır. Bu sebeple yapılan çalışmada en uygun modelin seçilmesi önemlidir. Literatürde yapılan çalışmalar neticesinde model 30x30 m boyutlarında tercih edilmiştir. Kazı eğimini, kazı ve temel malzeme sınırlarının tanımlanması ile oluşturulan modelde yol alt dolgusu 3m yüksekliğinde ve yolun yarı genişliği 12 m belirlenmiştir. Elde edilen model Şekil 5.1 de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Karayolu Dolgu Analizi İçin FLAC Modeli

### 5.2.2. Malzeme ve zemin özellikleri

Nümerik modelde farklı malzemeler ve bunların ilişkili özellikleri tanımlanabilmektedir. Zemin özelliklerinin belirlenmesinde sondaj verileri ve laboratuvar test sonuçları kullanılmıştır. Nümerik model ile yapılan çalışmada model ilk olarak tabakalı zemin şeklinde modellenmiştir.



Daha sonra inşaat yıkıntı atığı ve ahşap kazık destekli genel zemin özellikleri belirlenerek analizlerin yapılması planlanmıştır. Temel zemin formasyonu için yapılan ön çalışmalarda kullanılan zemin özellikleri Tablo 5.1’de listelenmiştir.

Tablo 5.1 Temel Zemin Özellikleri[17]

	Yüksek plastiseli kil	Düşük Plastiseli kil	Siltli kum
Doygun birim ağırlık (N/m <sup>3</sup> )	11,100	13,560	18,840
Porosity (%)	90	80	30
Kuru birim hacim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	231	582	1620
Elastisite (Young) modülü (MPa)	0,3	0,5	15,0
Poisson oranı	0,49	0,45	0,3
Sıkışmazlık (Bulk) modulus (MPa)	5,0	1,67	12,5
Kayma modülü (MPa)	0,1	0,17	5,77
Kohezyon (Pa)	3500	5000	0
Sürtünme açısı (derece)	0	0	32
Genişleme açısı (derece)	0	0	0
Yatay geçirgenlik (m/gün)	0,003	0,0003	2,4
Dikey geçirgenlik (m/gün)	0,001	0,0001	0,8

Literatürde yapılan çalışmalarda inşaat yıkıntı atığı için belirlenen değerler tablo 5.2 de verilmiştir.

Tablo 5.2: İnşaat Yıkıntı Atığı Laboratuvar Sonuçları [24].

CBR (%)	41,69
Pentasyon (mm)	7,2
Yük (kg)	1250
$W_{ort}$ (%)	8,7
$\rho_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,2

Zeminin sahip olduğu diğer özellikler aşağıdaki genel eşitlikler ile hesaplanmaktadır

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5.1)$$

Burada

G: Shear modülü

E :Young (elastisite) modülü

$\nu$  : poisson oranı

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5.2)$$

K: Bulk modülü

E: Young (elastisite) modülü

$\nu$  poisson oranı

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5.3)$$

$\sigma$  : Gerilme

P: Kuvvet

A: Alan

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (5.4)$$

$\varepsilon$  : Birim deformasyon

$\Delta L$ : Boy değişimi

L: Boy

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5.5)$$

İnşaat yıkıntı atıkları ve alt yapı dolgu malzemesinin özellikleri tablo 5.3' te verilmiştir. İşlem görmüş kereste kazıkların özellikleri ise tablo 5.4 ve 5.5' te verilmiştir.

Tablo 5.3: Dolgu Malzemelerinin Özellikleri

	Yol alt dolgusu	İnşaat yıkıntı atığı
Kuru birim hacim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	1920	1960
Porosity (%)	30	-
Young modülü (MPa)	10,0	111,141
Poisson oranı	0,3	0
Bulk modulus (MPa)	8,33	138,926
Kayma modülü (MPa)	3,85	24,161
Kohezyon (Pa)	2400	49,000
Sürtünme açısı (derece)	30	-
Yatay geçirgenlik (m/gün)	1,2	1,2
Düşey geçirgenlik (m/gün)	0,4	0,4

Tablo 5.4: İşlenmiş Kereste Kazıkların Özellikleri [17].

Elastisite modülü (GPa)	10,0
Kazık taşıma kapasitesi (kN)	250,0
Kazık uzunlukları (m)	12,8
Ortalama kazık çapı (m)	0,3048

Tablo 5.5: Ahşap Kazık Elemanların Özellikler [17].

	Orta Bölümler	Üst ve alt bölüm
Young modülü (GPa)	10,0	10,0
Yarıçap (m)	0,1524	0,1524
Çevre (m)	0,976	0,976
Aralık (m)	2,5	2,5
Yay makaslama direnci (GN/m/m)	0,0	1,0
Yay makaslama kohezyonu (MN/m)	0,0	2,5
Yay makaslama açısı (derece)	0,0	0,0
Normal yay makaslama direnci (GN/m/m)	0,0	0,0
Normal yay kohezyonu (N/m)	0,0	0,0,
Normal yay makaslama açısı (derece)	0,0	0,0

### 5.3. Sınır Şartları

Zeminin sönümleme özelliğinden dolayı büyük boyutlu model ile çalışılması sınır şartlarından kaynaklı oluşabilecek problemleri engellemektedir. Büyük model sistemlerin çözümü zaman almakta ve nümerik çalışma şartlarını zorlaştırmaktadır. Nümerik modelleme ile yapılan çalışmalarda sınır şartlarındaki problemleri engellemenin çözümü sağlanmalıdır. Bu problemlerin engellenmesi için FLAC 2D' nin içerdiği sönümleyici sınır şartları kullanılabilir. Bu sınır şartlara viskoz sınır şartları denir. Sağlanacak şartlar için Lysmer ve Kuhlemeyer önerdiği farklı formülasyonlar vardır. Litaretürdeki çalışmalar dinamik analizlerde serbest alan (Free-Field) yansımaların engellenebileceğini göstermektedir. Gerekli mesafenin bırakılması sonucunda yansımaların engellenmesi öngörülmüştür. Yaptığımız modelde zeminin devamlılığının sağlanabilmesi ve sınırlarda dalga yansımalarının önlenmesi için serbest alan (Free-Field) sınır koşulları kullanılmıştır [47].

#### **5.4. Local Sönüm ve Sönüm Oranı**

Zeminlere etkiyen yükleri gruplandırmak mümkündür. Malzemenin özelliğine ve dış etkiye bağlı olarak, gerilme-şekil değiştirme ve dayanım özellikleri olarak inceleyebiliriz.

FLAC 2D üç ayrı sönüm modülü içermektedir.

##### **1. Local sönüm,**

Eşdeğer statik analiz için geliştirilmiş olan dinamik ve karakteristik simülasyonlarda da kullanılmaktadır. Ayrıca sönüm modülü kütle düğüm noktalarında kütlelerin korunumu kanununa uygun olarak eklenir ve çıkarılır.

##### **2. Rayleigh sönümü,**

Bu sönüm zeminin kritik sönüm değeri ve zemin doğal frekansını ifade eden iki parametre ile kontrol edilmektedir. Zeminin davranışına bağlı olarak FLAC 2D ile yapılan analizlerde sönüm oranına ait parametreler güncellenerek değişmektedir. Çalışmamızda gerçekleştirilen zemin analizlerinde sönüm oranı olarak rayleigh modülü kullanılmıştır.

##### **3. Histeritik sönüm,**

Doğrusal kapsamlı lineer olmayan modellerde tamamlayıcı bir ek olarak kullanılır. Dalga yayılımlarını hesaplamak için zeminlerin sismik analizlerinde kullanılan bu yöntemde sönüm oranı-şekil değiştirme ilişkisi nümerik modele uygulanır [8,16,17,47].

#### **5.5. Nümerik Modelde Kullanılan Yük Değerleri**

Esnek üst yapının trafik yükünü oturmalar ve çatlama olmadan taşıması için projelendirilme sırasında dikkat edilmesi gereken faktörler başlıca sıralanmaktadır.

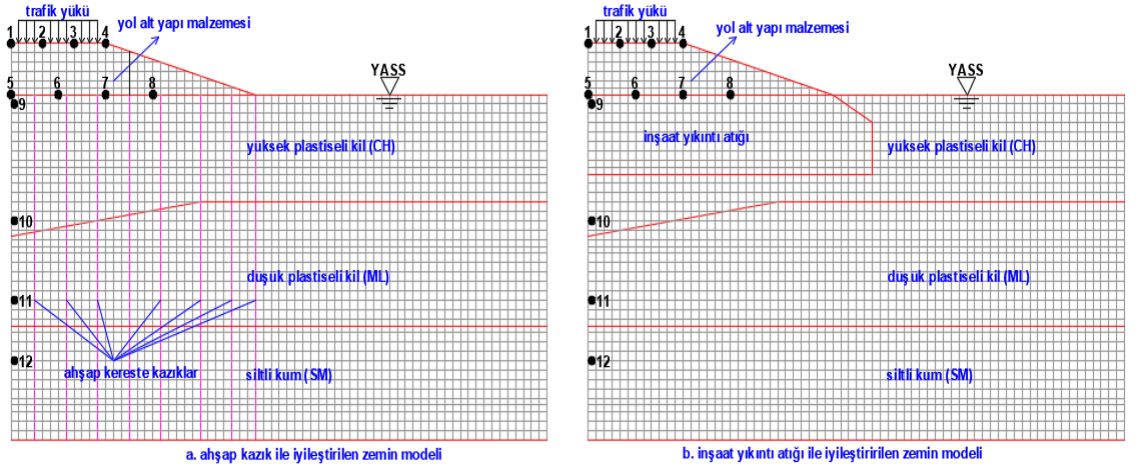
- Toplam kalınlığının belirlenmesi
- Tabakaların tek tek kalınlıklarının hesaplanması
- Kullanılacak malzemelerin özelliklerinin saptanması
- Trafik hacmi
- Dingil yükü
- Dingil yüklerinin tekrarlanma sayısı

- Taban zemininin taşıma gücü ve suya hassasiyeti
- Üstyapının alttemel, temel ve kaplama tabakalarında kullanılan çeşitli malzemelerin mekanik özellikleri
- Yolun hizmet kalitesi
- Yolun ekonomik hizmet süresi
- Yolun yapıldığı yerin iklimi ve diğer bölgesel koşulları

Bu çalışmada malzeme özellikleri, zemin tabaka yüklerine ilave olarak 11.500 Pa trafik yükü eklenmiştir. Yer altı su yoğunluğu  $1000 \text{ kg/m}^3$  yer altı suyu kütle modülü 10000 Pa olarak alınmıştır. Ahşap kazıkların ağırlıkları ihmal edilmiştir. Siltli kum tabakasında kazıkların nihai yapışma mukavemeti 250 kN' luk ek taşıma kapasitesi oluşturmaktadır. Ayrıca kazıkların üst, orta ve alt bölgelerinde 210 kN' luk eksenel yük yüklenmektedir.

## BÖLÜM 6. NUMERİK MODEL ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada dikey yer değiştirmeler ve boşluksuyu basınçları model üzerinde belirlenen koordinatları temsil eden noktalarda okunmaktadır (şekil 6.1). Dolgu üstü boyunca, 1-2-3-4 numaralı ve dolgu tabanı boyunca 5-6-7-8 numaralı noktalarda düşey yer değiştirmeler, 9-10-11-12 numaralı noktalarda ise boşluk suyu basıncı yol inşaatı boyunca izlenmiştir.

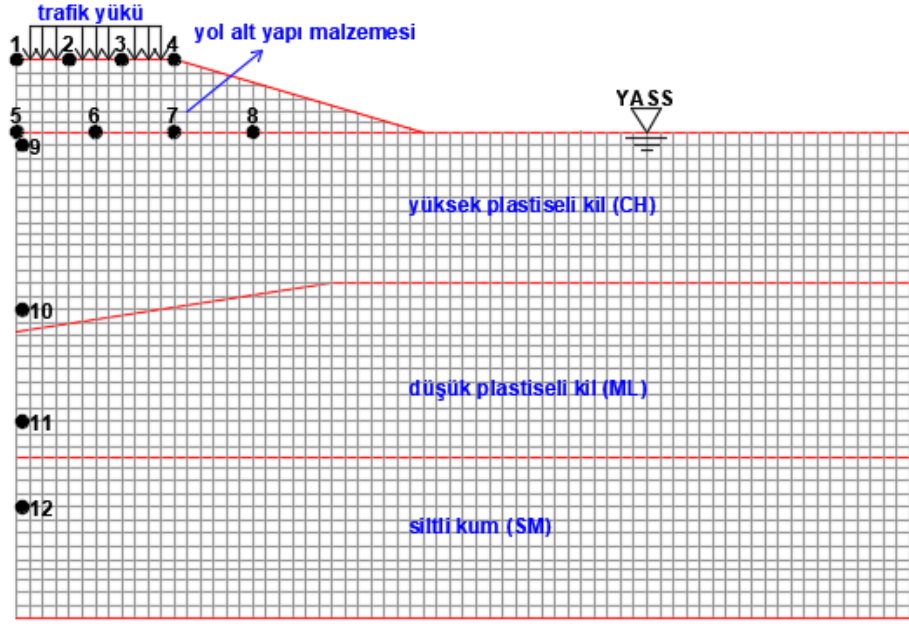


Şekil 6.1: Numerik Model ve Okuma Noktaları

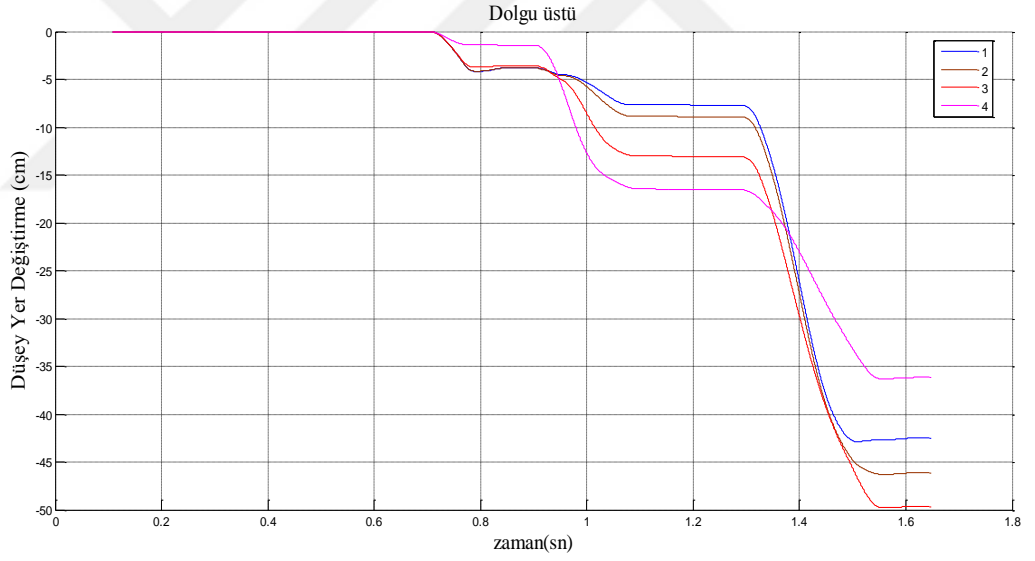
### 6.1. Mevcut Zemin Tabakalarının Analizi

Mevcut zemin tabaka katmanları şekil 6.2 gösterilmektedir. Yapılan önceki çalışmalar göstermektedir ki zayıf zemin koşullarında istenmeyen zemin deformasyonları görülmektedir[14,16,46].

Bu çalışmada ilk olarak mevcut saha şartları modellenmiş ve yapılan analizler sonucunda dolgunun altındaki maksimum dikey yer değiştirme miktarı 57 cm görülmüştür. Dikey yer değiştirmelerin gözlemlendiği noktalardaki yer değiştirmeler şekil 6.3 ve 6.4' te gösterilmiştir.

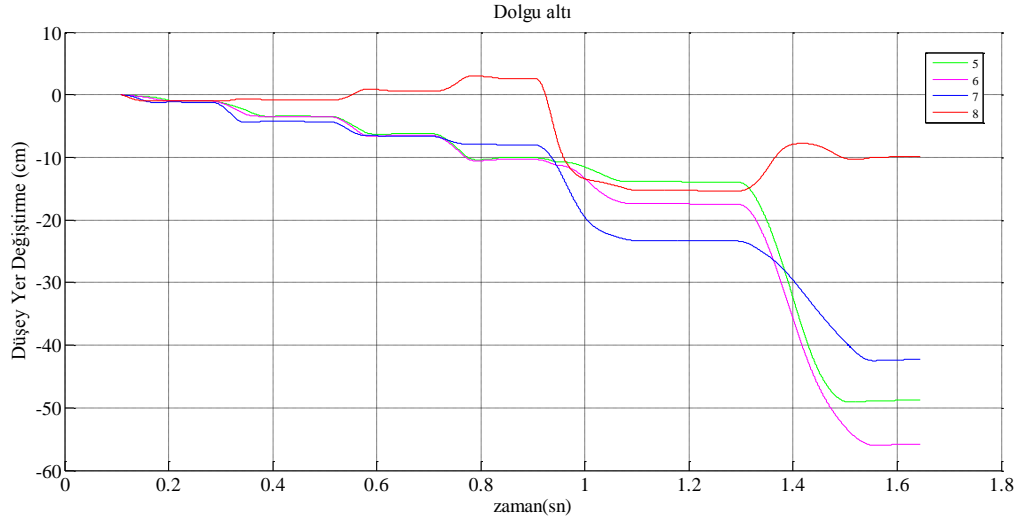


Şekil 6.2: Mevcut Zemin Tabakaları Kesiti ve Okuma Noktları



Şekil 6.3: Dolgu üstü Düşey Yer Değişirme

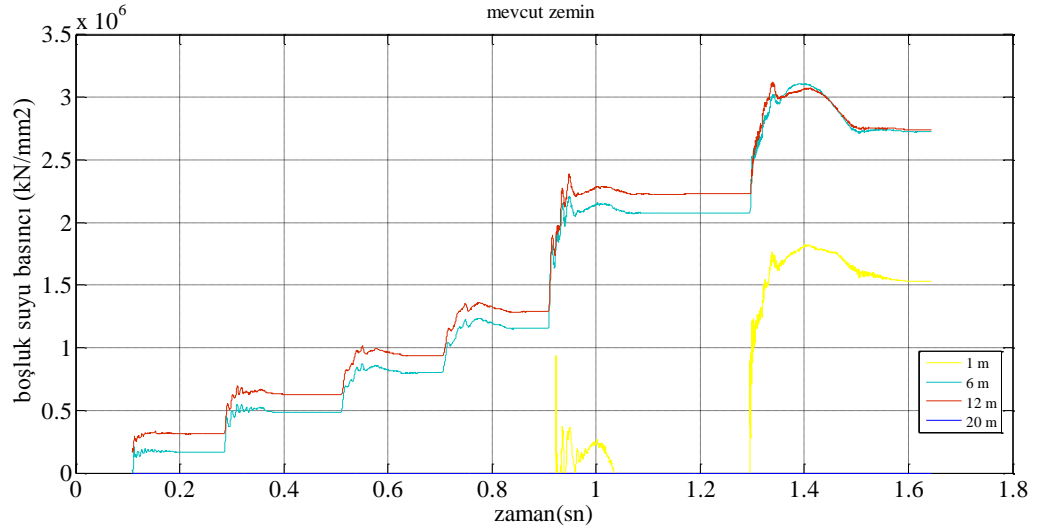




Şekil 6.4: Dolgu Altı Düşey Yer Değişirme

Zemindeki oturma miktarına boşluk suyu basıncının etkisi vardır. Boşluk suyu basıncına, dış yük altındaki zeminde bulunan yer altı suyunun zemin içerisindeki boşluklarda oluşturduğu zemin direnç kaybı diyebiliriz. Zemindeki oturma miktarının fazla olması CH ve ML tabakalarındaki boşluk suyu basıncı ile ilişkilidir[14,20,32].

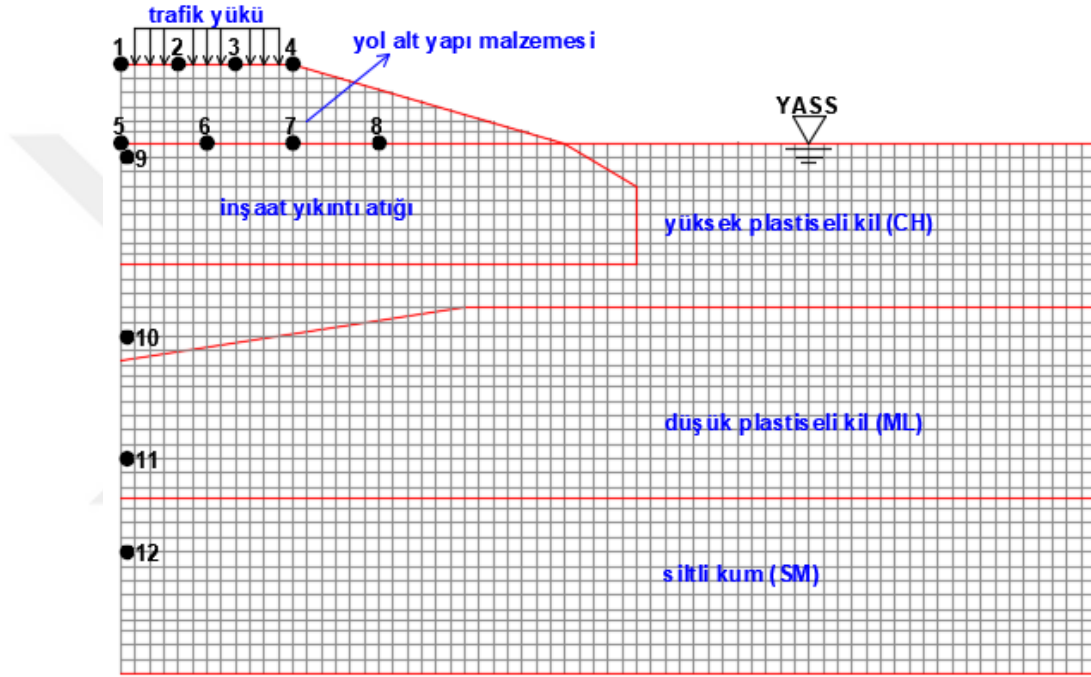
FLAC analizi sonucunda belirlenen boşluk suyu basınç değerleri şekil 6.5' te gösterilmektedir.



Şekil 6.5: Boşluk Suyu Basıncı

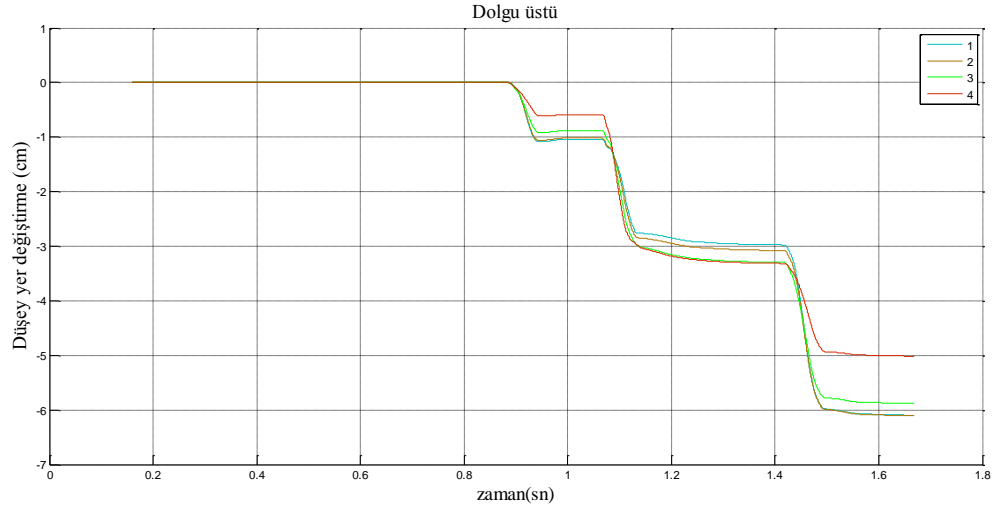
## 6.2. İnşaat Yıkıntı Atığı ile İyileştirilmiş Zemin Analizleri

Yumuşak kil tabakalarındaki oturma problemlerini çözmek ve gevşek kumlarda sıvılaşma riskini azaltmak için iyileştirme yöntemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada yol dolgusunun alt kısmındaki yüksek plastiseli kil (CH) tabakası kaldırılmış taşıma gücü daha fazla olan yıkıntı atıkları ile iyileştirme işlemi yapılmıştır (şekil 6.6). Literatürde yıkıntı atıklarının da içeriğinde bulunduran zemin örnekleri ile yapılan çalışmalarda iyileşme sağlandığı görülmüştür[1,2,17,39].

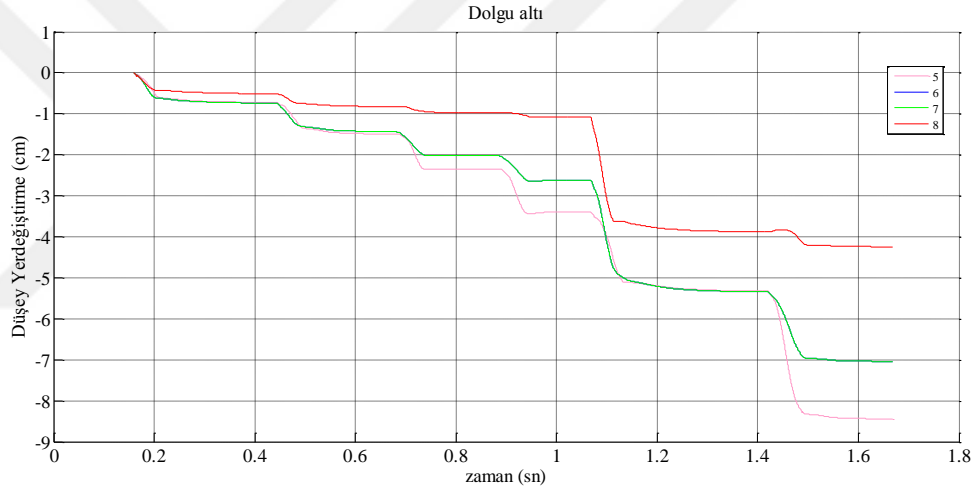


Şekil 6.6: İyileştirilmiş Zemin Kesiti

FLAC sonlu farklar metodu ile kurulan modelde yapılan analiz sonucu yol alt dolgusundaki dikey yerdeğiştirme miktarında azalma görülmüştür (şekil 6.7 ve şekil 6.8). Maksimum yer değiştirme dolgu altında 9 cm gözlemlenmiştir.

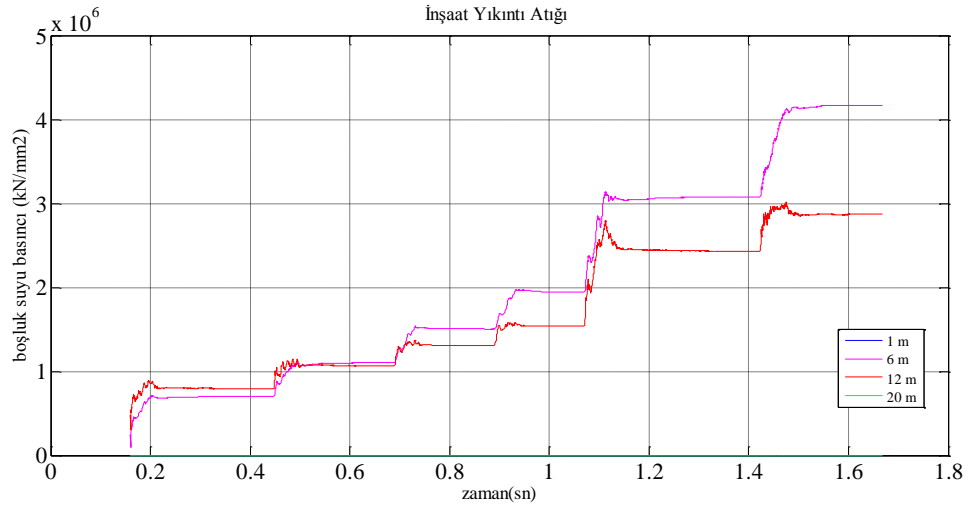


Şekil 6.7: İnşaat Yıkıntı Atıkları ile İyileştirilmiş Zemin Dolgu Üstü Düşey Yer Değiştirme



6.8: İnşaat Yıkıntı Atıkları ile İyileştirilmiş Zemin Dolgu Altı Düşey Yer Değiştirme

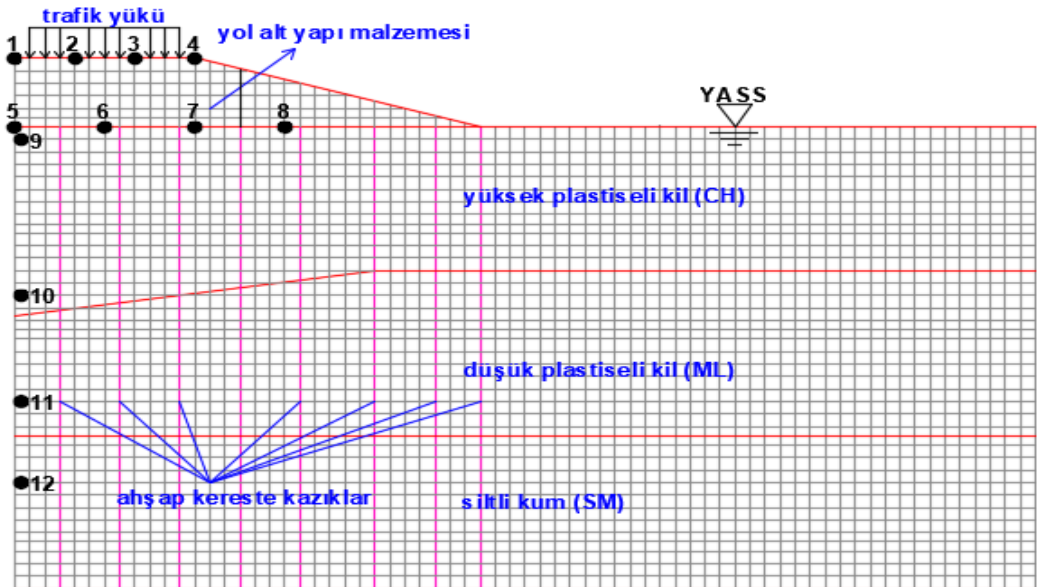
İnşaat yıkıntı atıkları ile iyileştirilen zemindeki boşluk suyu basınç değerleri Şekil 6.9' da verilmiştir. Dinamik yük etkisi altında yer altı suyu zemin içindeki boşluklardan uzaklaşmamaktadır. Yük altında artan zeminin boşluk suyu basıncı zemin tanelerinin sürtünmeyle taşıyacakları yükü sıfıra düşmektedir. Bu da temel altındaki zeminin mukavemetini azaltmakta ve oturma miktarlarında artış gözlenmektedir. Bu artışa zıt olarak zeminde oturma miktarında azalma olmuştur.



Şekil 6.9: Yıkıntı Atığı Boşluk Suyu Basıncı

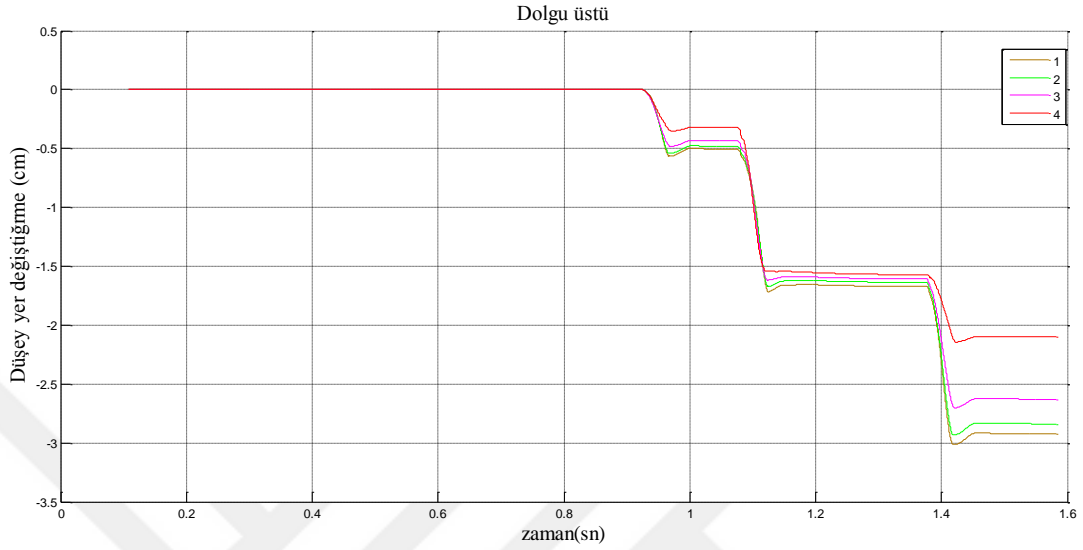
### 6.3. Kazık Destekli Zemin Analizi

Kazık destekli sistemler ile zemin iyileştirme eski medeniyetlerden beri kullanılmaktadır. Bu çalışmada yol alt dolgusuna ahşap kazıklar yardımı ile zemin desteği sağlanmıştır. Kazık destekli sistemlerde kazıkların konumu ve boyutları önemlidir (Tablo 5.4). Numerik modelde ahşap kazıklardan 250 kN' luk bir taşıma kapasitesi sağlamak için 2.5 m aralıkta aksel olarak kazıklar yerleştirilmiştir (şekil 6.10).

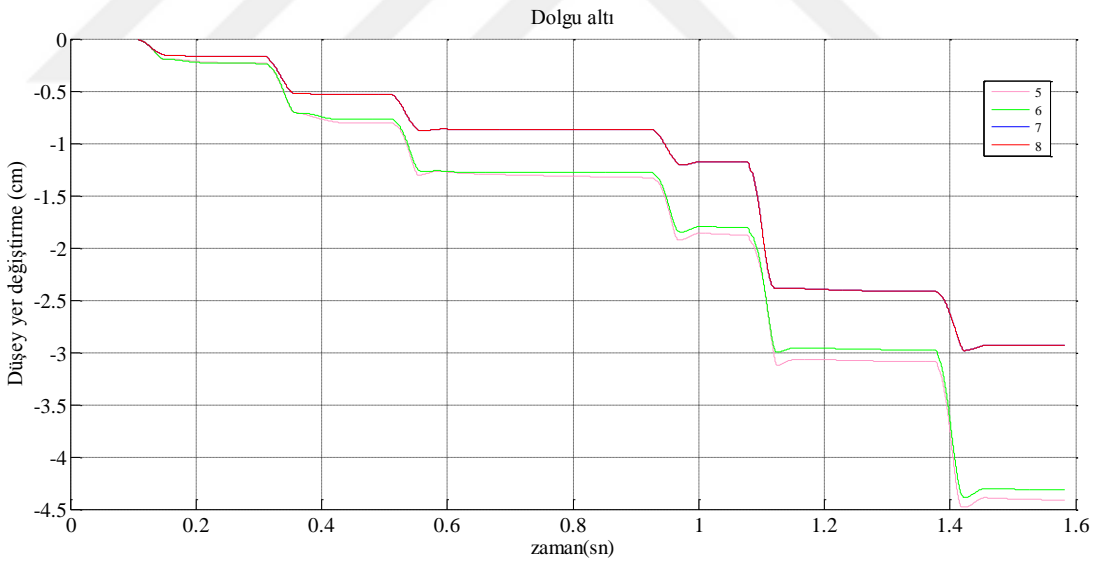


Şekil 6.10: Kazık Desteklenen Sistemin Yarı Kesit Görünüşü

Ahşap kazık destekli karayolunda dikey yer değiştirmeler Şekil 6.11 ve 6.12' de gösterilmektedir. Dolgunun altındaki maksimum dikey yer değiştirme yaklaşık 4,5 cm'dir.

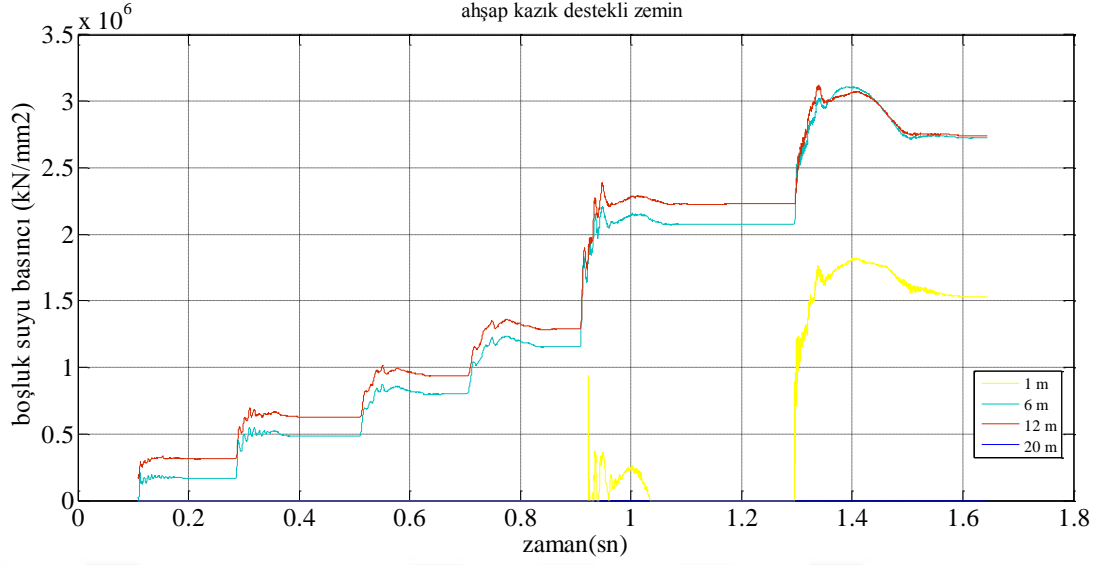


Şekil 6.11: Kazık Destekli Sistemde Dolgu Üstü Oturma Miktarı



Şekil 6.12: Kazık Destekli Sistemde Dolgu Altı Oturma Miktarı

Yüksek plastiseli kil ve düşük plastiseli kildeki gözenek basınçlarında önemli bir değişiklik olmamıştır. Bu durum Şekil 6.13' de gösterilmiştir.



Şekil 6.13: Kazık Destekli Karayolu Gözenek Basıncı

#### 6.4. Sonuçlarının Doğrulanması

Deney maliyetlerinin yüksek olduğu problemlerin çözümünde zamandan ve maliyetten tasarruf amacı ile nümerik modeller kurulmaktadır. Nümerik analiz çalışmalarının geçerliliğinin kanıtlanması için analiz sonuçlarının doğrulanması önemlidir. Yapılan çalışmalarda, nümerik analiz sonuçları öncelikle yapılan deneysel çalışmalar ile doğrulanır ve kanıtlanan bu model üzerinden diğer çalışmalar yapılır. Ancak tüm senaryolarının deneysel çalışmalar ile yapılması mümkün olmadığı durumlarda çalışmanın doğrulanmasının en iyi yolu literatürde var olan sonuçlarla kıyaslamak veya deneye dayalı formüllerle elde edilen değerleri analiz sonuçları ile kıyaslamaktır [14-47].

Bu nedenle nümerik analiz çalışmaları sonrası elde edilen düşey yer değiştirme değerlerinin değerlendirilmesi amacı ile literatürde kabul edilen yöntemlerle hesaplanan sıkışma değerleri arasında bir doğrulama yapılmıştır. Böylece elde edilen nümerik model sonuçlarının zemin iyileştirme oranlarının literatürdeki yöntemler ile doğrulanması sağlanmıştır.

#### 6.4.1. Oluşacak oturma miktarının belirlenmesi

Zemine uygulanan yük nedeni ile oluşan sıkışmalar oturma olarak tanımlanır. Üç tür oturma vardır:

- $S_e = \hat{A}n_i$  (drenajsız-elastik) oturma,
- $S_c$  = Birincil konsolidasyon oturması,
- $S_s$  = İkincil konsolidasyon oturması (plastik oturma).

İkincil konsolidasyon oturması özellikle killi zeminlerin aşırı yüklenmesi halinde söz konusu olur. Temel zemininin aşırı yüklenmemesi nedeniyle ikincil konsolidasyon oturması hesaplanmamıştır [27].

$$S = S_e + S_c + S_s \quad (6.1)$$

$S$  = Toplam Oturma

Statik yükler altındaki oturma hesabında göz önüne alınması gereken oturma türleri; Elastik Oturma ( $S_e$ ), ve konsolidasyon oturması ( $S_c$ ) olacaktır. Oturma hesabında etki derinliğinin hesabında  $1,5B$  veya efektif gerilmeye göre sondaj derinliği hesabı kullanılabilir. Hesaplaması yapılan sondaj derinliği aslında bir noktada yapı etki derinliği gibi de düşünülebilir.

#### 6.4.2. Mevcut zemin için elastik oturma miktarının hesaplanması ( $S_e$ )

Biz burada sondaj derinliği olarak  $1,5B$  değerinin daha büyük çıktığını düşünerek hesaplama yapacağız. Buna göre;

( $1,5B$ )  $B$  = Temelin kısa kenarı

$$1 \times 1,5 = 1,5 \text{ m}$$

$$S_e = q_0 B (1 - \mu^2 / E_u) I_p \quad (6.2)$$

Burada;

$q_0$  = Temel Taban Basıncı

$B$  = Temel Kısa Kenarı (tablo 6.2)

$\mu$  = Poisson Oranı, (tablo 5.1)

$I_p$  = Boyutsuz Etki Faktörü (tablo 6.1)

$E_u$ =Kil İçin Drenajsız Elastisite Modülü (tablo 5.1)

$q_0$  Değeri

Statik durumda temel taban basıncı ( $1,4G+1,6Q$ ) yükleme durumu için temel taban basıncı) = $85,6 \text{ kN/m}^2$

$I_p$  Değerinin Hesaplanması

L/B değeri için  $7/1=7$  durumu için rijit temelde  $I_p$  Değeri tablo 6.1' den 1,86 olarak alınmıştır.

Tablo 6.1. Temeller için etki faktörü ( $I_p$ ) değerleri

Temel Şekli	$M_1 = L/B$	$I_p$		
		Deforme edilebilir		Rijit
Dairesel	-	Merkez	Köşe	
	-	1.0	0.64	0.79
	1	1.12	0.56	0.88
	1.5	1.36	0.68	1.07
	2	1.53	0.77	1.21
	3	1.78	0.89	1.42
Dikdörtgen	5	2.10	1.05	1.70
	10	2.54	1.27	2.10
	20	2.99	1.49	2.46
	50	3.57	1.80	3.0
	100	4.01	2.0	3.43

$$S_e = 85,6 \times 1 \times ((1 - 0,49^2) / 300) \times 1,86 = 0,40 \text{ m} = 40 \text{ cm}$$

#### 6.4.3. Mevcut zemin için konsolidasyon oturmasının miktarının hesaplanması ( $S_c$ )

Konsolidasyon oturması ani oturma sonrası oluşan ve zaman(t) faktörünü de içinde barındıran boşluklardaki suyun bir yük altında dışarı atılması olayıdır.



Konsolidasyon oturması miktarı (  $S_c$  ), konsolidasyon deneyinde belirtilen ( $C_c$ ,  $C_s$ ,  $m_v$ ) değerlerine bağlıdır.

$$S_c = H m_v \Delta\sigma_z \quad (6.3)$$

$H$ =Sıkışabilir kil tabakası kalınlığı

$m_v$ = Hacimsel Sıkışma Katsayısı (tablo 6.3)

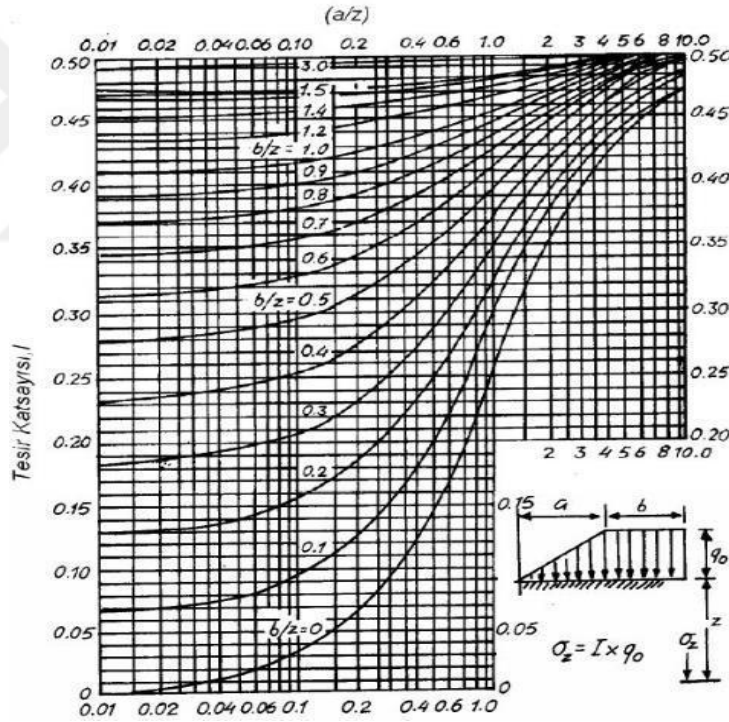
$\Delta\sigma_z$  = Gerilme Değişimi (tablo 6.2)

$$\Delta\sigma_z = qI \quad (6.4)$$

$I$ = Tesir katsayısı (tablo 6.2)

$q$ = Net Temel gerilmesi değeri

$$q = 85,6 \text{ kPa}$$



Şekil 6.14. Uzun Bir Dolgu Yüğü Altında Düşey Gerilmeleri Veren Tesir Katsayıları

Tablo 6.2. Farklı derinliklerdeki I ve  $\Delta\sigma_z$  değerleri

z	b (m)	a (m)	m =a/z	n=b/z	q (kPa)	I	$\Delta\sigma_z$ (kPa)
0,5	1	3,75	7,5	2	85,6	0,480	41,08
1,5	1	3,75	2,5	0,66	85,6	0,455	38,95
2,5	1	3,75	1,87	0,4	85,6	0,420	35,95
3,5	1	3,75	1,07	0,28	85,6	0,37	31,67
4,5	1	3,75	0,83	0,22	85,6	0,360	30,82
5,5	1	3,75	0,68	0,18	85,6	0,275	23,54
6,5	1	3,75	0,57	0,15	85,6	0,250	21,40
7,5	1	3,75	0,5	0,13	85,6	0,220	18,83
8,5	1	3,75	0,44	0,11	85,6	0,190	16,26
9,5	1	3,75	0,39	0,10	85,6	0,18	15,40

#### $m_v$ Değerinin hesaplanması

Tablo 6.3. Zeminlerin sıkışabilirlikleri, hacimsel sıkışma katsayısı ve poisson oranları

Sıkışabilirlik	$m_v$ =Hacimsel Sıkışma Katsayısı (cm <sup>2</sup> /kg)	$\mu$ = Poisson Oranı,	Zemin Türü
Çok yüksek	0,1	0,42-0,35	Göl çökeltisi
Yüksek	0,1-0,02	0,35-0,30	Kil ve siltler, gölsel SM, yerinde oluşmuş zeminler, gevşek volkanik kül
Orta	0,02-0,005	0,30-0,25	.....
Düşük	0,005-0,001	0,30-0,20	Aşırı konsolide kil, kumlu çakıllı siltler
Çok düşük	<0,001	0,25-0,18	Kuruma geçirmiş killer, çamurtaşı

Konsolidasyon deneyi sonuçlarından aldığımız  $m_v = 0,00004$  kPa ( tablo 6.3) olarak verilmiştir.

$$S_c = H m_v \Delta \sigma_z$$

$$S_c = 10 \times 0,00004 \times 41,08 = 0,016 \text{ m} = 1,6 \text{ cm}$$

Toplam Oturma Miktarı

$$S = S_e + S_c + S_s$$

$$S = 40 + 1,6 = 41,6 \text{ cm}$$

Burada  $S_s$  dediğimiz ikincil oturma miktarları organik zeminlerde gerçekleştiği için göz önüne alınmamıştır.

#### **6.4.4. İnşaat yıkıntı atığı ile iyileştirilen zeminde elastik oturma miktarının hesaplanması ( $S_e$ )**

$$(1,5B)$$

$$1 \times 1,5 = 1,5 \text{ m}$$

$$S_e = q_0 B (1 - \mu^2 / E_u) I_p$$

Burada;

$q_0$  = Temel Taban Basıncı

$B$  = Temel Kısa Kenarı (tablo 6.2)

$\mu$  = Poisson Oranı, (tablo 5.3)

$I_p$  = Boyutsuz Etki Faktörü (tablo 6.1)

$E_u$  = Drenajsız Elastisite Modülü (tablo 5.3)

$q_0$  Değeri

Statik durumda temel taban basıncı ( $1,4G + 1,6Q$ ) yükleme durumu için temel taban basıncı) =  $85,6 \text{ kN/m}^2$

$I_p$  Değerinin Hesaplanması

$L/B$  değeri için  $7/1 = 7$  durumu için rijit temelde  $I_p$  Değeri tablo 6.1' den 1,86 olarak alınmıştır.

$$S_e = 85,6 \times 1 \times ((1 - 0,76^2) / 1114) \times 1,86 = 0,06 \text{ m} = 6 \text{ cm}$$

#### 6.4.3. İnşaat yıkıntı atığı ile iyileştirilen zeminde konsolidasyon oturmasının miktarının hesaplanması ( Sc )

Konsolidasyon oturması ani oturma sonrası oluşan ve zaman(t) faktörünü de içinde barındıran boşluklardaki suyun bir yük altında dışarı atılması olayıdır. Konsolidasyon oturması miktarı ( Sc ) konsolidasyon deneyinde belirtilen ( Cc, Cs, mv ) değerlerine bağlıdır.

$$S_c = H m_v \Delta \sigma_z$$

H=Sıkışabilir kil tabakası kalınlığı

$m_v$ = Hacimsel Sıkışma Katsayısı (tablo 6.3)

$\Delta \sigma_z$  = Gerilme Değişimi (tablo 6.2)

$$\Delta \sigma_z = qI$$

I= Tesir katsayısı (tablo 6.2)

q= Net Temel gerilmesi değeri

$$q = 85,6 \text{ kPa}$$

z= 1,5 m derinlikte  $\Delta \sigma_z = 38,95 \text{ kPa}$  (Tablo 6.2)

Konsolidasyon deneyi sonuçlarından aldığımız  $m_v = 0,00004$  kPa olarak verilmiştir.

$$S_c = H m_v \Delta \sigma_z$$

$$S_c = 9 \times 0,00004 \times 38,95 = 0,014 \text{ m} = 1,4 \text{ cm}$$

Toplam Oturma Miktarı

$$S = S_e + S_c + S_s$$

$$S = 6 + 1,4 = 7,4 \text{ cm}$$

Burada  $S_s$  dediğimiz ikincil oturma miktarları organik zeminlerde gerçekleştiği için göz önüne alınmamıştır.

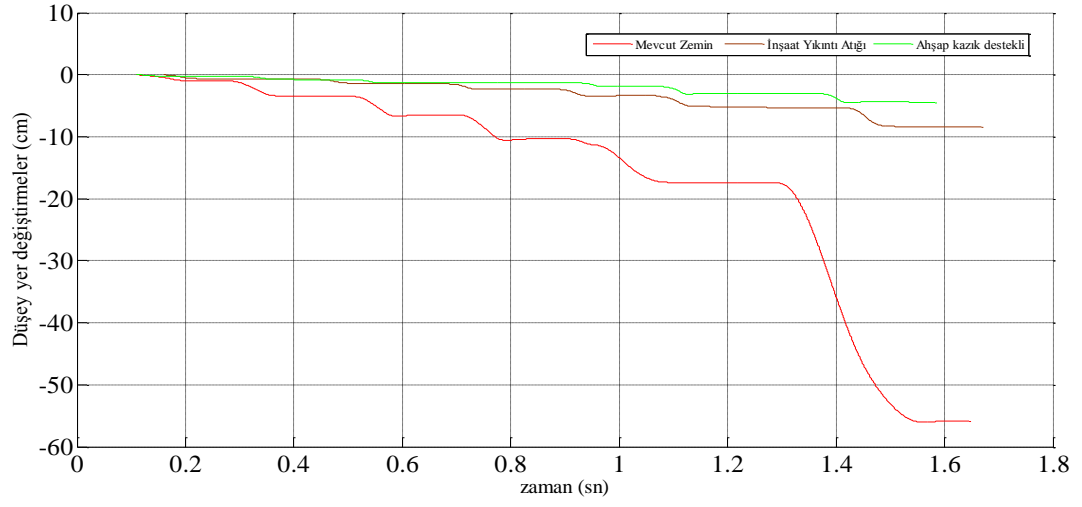
Tablo 6.4. Literatür Yöntemi ve Numerik Model Yer Değişirme Miktarları

Zemin şartları	Literatürde kabul edilen yöntemler ile hesaplanan oturma miktarları			Numerik model analizi sonucu çıkan oturma miktarları	
	Ani oturma (cm)	Konsolidasyon oturması (cm)	Plastik oturma (cm)	Toplam oturma (cm)	Toplam oturma (cm)
Mevcut zemin	40	1,6	-	41,6	57
İnşaat yıkıntı atığı ile iyileştirilmiş zemin	6	1,4	-	7,7	9

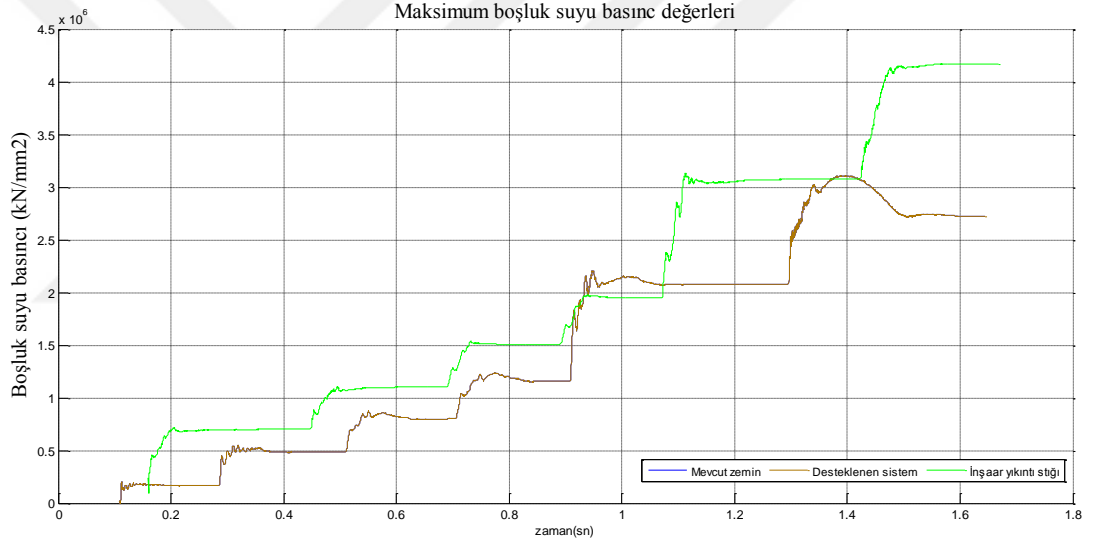
### 6.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Zemin mekaniği, temel mühendisliği ve geoteknik imalatlar gelişen teknoloji ile önem kazanmaya başlamıştır. Zeminlerin taşıma gücü, sıvılaşma özellikleri, sınıflandırılması, şişme potansiyeli gibi birçok özelliği zeminden alınan örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri sonucu tespit edilebilmektedir. Saha çalışmalarının maliyetli ve mümkün olmadığı durumlarda nümerik modelleme yapılarak zemin problemleri çözüme ulaştırılabilmektedir. Araştırmamızda farklı zemin modellerinde oluşan maksimum düşey yerdeğiştirme şekil 6.15 ve boşluk suyu basıncı değerleri 6.16' da gösterilmiştir.

Zayıf zeminde = 57 cm olan düşey yer değiştirme, inşaat yıkıntı atığı ile iyileştirilen zeminde = 9 cm, ahşap kazık ile desteklenen zeminde = 4,5 cm olarak görülmüştür.



Şekil 6.15. Mevcut Zemin ve İyileştirme Yöntemine Göre Zemindeki Maksimum Oturma Miktarları



Şekil 6.16. Mevcut Zemin ve İyileştirme Yöntemine Göre Zemindeki Boşluk Suyu Basıncı

## BÖLÜM 7. SONUÇLAR

Bu çalışma inşaat ve yıkıntı atıklarının zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla yapılmıştır. Taşıma gücü istenilen değerde olmayan bir karayolu güzergâhındaki zeminin taşıma gücü iki farklı yöntem ile arttırılmıştır.

- İnşaat yıkıntı atıkları ile dolgu,
- Ahşap kazıklar yardımı ile sağlam zemine ulaşılmış ve zemin desteği sağlanmıştır.

Zeminde yapılacak çalışmalarda sistemin dinamik veya statik bir dış etki altında olup olmadığı bilinmelidir. Dinamik yükleme durumunda,

- Geometrik uygunluk
- Denge koşulları
- Radyasyon sönümü etkisi

Zemin ortamında sağlanması gereken koşullardır.

Dış etkiler altındaki yapı-zemin etkileşimi, zemin ortamının altyapı ile beraber analiz edilmesini gerektirir. FLAC 2D sonlu farklar programı yardımı ile zeminin modellenmesi yapılarak oturma değerleri arasındaki farklar yaklaşık olarak belirlenebilmektedir. Belirlenen zemin parametreleri bize göstermektedir ki zeminler farklı dayanıma sahiptir. Taşıma gücü istenilen dayanımı sağlamayan zeminler, dayanımı daha yüksek zeminlerle veya literatürde belirlenen zemin iyileştirme yöntemleri ile iyileştirilerek istenilen şartları sağlayacak duruma getirilebilmektedir.

Günümüzde ilerleyen teknoloji ve mühendislik bilgileri, yapılması planlanan proje veya projelerin, sistemsal ve/veya yapısal tepkilerinin erken saptamasına yardımcı olmaktadır. Bu ilerleme karmaşık ve değişken olan zemin şartlarının belirlenmesi ve önlem alınması konusunda bizlere imkân sağlamaktadır.

Beklenenin dışında yer değiştirme, ani çökme, kayma gibi zemin etkileri alt ve üst yapı sistemlerin de hasar veya telafi edilemeyecek problemler çıkarmaktadır.

Arazinin tamamındaki zemin parametreler saha ve laboratuvar çalışmaları ile tam olarak belirlenmesi mümkün olmasa bile gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmektedir.

Elde edilen bulgular ışığında zemin iyileştirmede, düşük maliyet ve çevresel sorunları ortadan kaldıracak yöntemler tercih edilir duruma gelmiştir. Kentlerdeki büyüme, artan nüfus koşulları ve çevresel sağlık problemlerinin artış göstermesi bu yöntemlerin tercihini zorunlu hale getirmiştir.

Literatürdeki zemin iyileştirme yöntemlerinin farklı avantaj ve dezavantajları olmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre;

- İnşaat yıkıntı atıkları ile iyileştirilen zeminde % 84, ahşap kazık destekli sitemde iyileşme oranı % 95 olmuştur.
- Ahşap kerestelerin temin edilmesi sürecinde doğaya zarar veriliyor olmasına karşılık, atık malzemenin kullanılması ile kentsel dönüşüm ve artan nüfus sonucu kentlerde oluşan çevresel kirlilik ve oluşabilecek sağlık sorunları azalmaktadır. Kullandığımız modelle 1 km' lik yol alt yapısını iyileştirmek için, kazık destekli sitemde 1000 adet ahşap kazık elde etmek için ortalama 500 adet ağaç kesilmesi, inşaat atıkları ile dolgu yapılması ile yaklaşık 12 bin m<sup>3</sup> atık bertarafı sağlanabilmektedir.
- Kerestelerin işlenerek istenilen boyutlara getirilmesi ve uygulama işlemlerinin oluşturduğu maliyete karşılık, yıkıntı atıkları kazı ve dolgu gibi maliyeti düşük işlemler ile uygulanabilmektedir.
- Yıkıntı atıklarının kullanımı ile bazı doğal kaynakların azalması engellene bilmektedir.
- Ülkemizde oluşan katı atıkların % 48' lik kısmı kontrolsüz bir şekilde depolanmaktadır. Kentsel dönüşüm atıklarının depolanması için ayrılan alanların çevreye kazandırılması ve getirisi daha yüksek projeler için kullanılabilmesine imkân sağlanmaktadır.



Nümerik model analizlerinin sonucunda elde ettiğimiz veriler birlikte değerlendirildiğinde kentlerde çevre kirliliği oluşturan, deprem sonucu oluşan yıkıntılar, ağır hasar alan yapıların yıkımından oluşan atıklar, demir yollarındaki yenileme çalışmaları ve son zamanda çokça karşımıza çıkan kentsel dönüşüm çalışmalarında oluşan inşaat ve yıkıntı atıklarının zemin iyileştirmede kullanılabilir olduğu tesbit edilmiştir.



## KAYNAKLAR

- [1] Akyarlı A. – Kavak A. – Atay S. – Alkaya S. Killi Zeminlerin Kireç ile İyileştirilmesi [www.kimtas/ozeluygulamalar.html](http://www.kimtas/ozeluygulamalar.html)
- [2] Altun, S. Ansal, A. 2003, Tekrarlı Yükler Altında Kumların Gerilme–Şekil Değişirme Özellikleri, *İtü Dergisi Sayı 12 Mühendislik, Cilt:2, Sayı:4*, Pp.2534. İstanbul.
- [3] Aydınöğlu, M.N. 1994 Yapı Analizi Ve Tasarımı Süresince Statik ve Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, Odtü, Ankara*.
- [4] Balman V. 1987 “Katı Atıklardan Enerji Üretimi”, *İller Bankası Dergisi, Ağustos*
- [5] Berilgen M. 2016 Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Yöntemler ve Program Kullanımı, Ytü İnş. Fak. İnş. Müh.Böl. Geoteknik Anabilim Dalı. <http://imoistanbul.org/imoarsiv/geoteknik-kurs-notlari>
- [6] Bilgin, T. 1984, Adapazarı Ovası ve Sapanca Oluğunun Alüvyal Morfolojisi ve Kuvaternerdeki Jeoforfolojik Tekâmülü, *İst. Üni. Edebiyat Fak. Yayınları, No: 2572*, İstanbul.
- [7] Bol E. 2003 *Adapazarı Zeminlerinin Geoteknik Özellikleri*, Doktora Tezi, Saü, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [8] Byrne, P.M. - Park, S.S. - Beaty, M. - Sharp, M.K. - Gonzalez, L. - Abdoun, T. 2004, Numerical Modeling Of Liquefaction And Comparison With Centrifuge Tests, *Canadian, Geotechnical Journal, Vol. 41 (2):193-211*.
- [9] Çetin A.Y. 2011 *Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu*, İstanbul Teknik Üniversitesi (Yüksek Lisans) Haziran
- [10] Çelebi, E. - Fırat S. - Çankaya, İ. 2006, Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları, *İmo Teknik Dergi, Yazı 252*.
- [11] Çetin H. Zemin Islah Yöntemleri, <https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2016>
- [12] Çinicioğlu S.F. 2005 Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı, *Seminer İMO İstanbul 19.02*
- [13] Erol B. 2008 *Atık Maddelerin Yol İnşaatlarında Temel Malzemesi Olarak Kullanımı, Atık Maddelerin Yol İnşaatlarında Temel Malzemesi Olarak Kullanımı*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri (Yüksek Lisans) Haziran
- [14] Erken, A. - Okan, R. - Erdem, A. 2003 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde Adapazarında Yeralan Zeminlerin Davranışı, *V. Ulusal Deprem Müh. Konferansı, İstanbul*.

- [15] Erel A. – Yalçın N.S. Yüksek Hızlı Demiryollarında Altyapının Önemi ve Tasarım İlkeleri, YTÜ, İnşaat Fak., İnş. Müh. Böl. Ulaştırma A.D.
- [16] Flac 2d, User's Manual-Fast Lagrangian Analysis Of Continua, Itasca Consulting Group, Minnesota
- [17] Flac 2d, Fast Lagrangian Analysis Of Continua Online Manual Table Of Contents
- [18] Fei Y. - Qingyou H. Milan R. – Meng W. 2015 Numerical Modelling And Experimental Approach For Shot Velocity Evaluation During Ultrasonic Shot Peening, *Int. J. Computational Materials Science and Surface Engineering*, Vol. 6, No. 2.
- [19] Fırat S. – Cömert A.T. 2011 Uçucu Kül, Kireç ve Çimento ile İyileştirilmiş Kaolinde Kür Süresinin Cbr Üzerine Etkileri, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 26*, No 4, 719-730
- [20] Fırat S. – Yılmaz G. – Vural İ. – Khatip J. – Umu S. U. 2015 Çelikhane Cürufu ile Yol Altyapı Dolgusunun Zemin özelliklerinin iyileştirilmesi, *Ejoir Aralık IWCEA Özel Sayısı Cilt 1*
- [21] Gaafer M. - Bassioni H. - Mostafa T. 2015 Soil Improvement Techniques, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 6, Issue 12, December ISSN 2229-5518
- [22] Gürsoy, Ş. Durmuş, A. 2002 Betonarme İstinat Duvarlarının Zemin Etkileşimini De Dikkate Alarak Çeşitli Yöntemlerle Karşılaştırmalı Deprem Hesabı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 21-22 Ekim.
- [23] Hamurcu U.A. Buldurur M.A. 2017 Sürdürülebilir Kentsel Dönüşüm İçin Performans Göstergeleri, *Planlama 2017;27(3):222-235*
- [24] Kalem Z. – Vural İ. – Kaya S. 2016 İnşaat Yıkıntı Atıkları ile Zeminlerin Taşıma Gücü Özelliklerinin İyileştirmesi, 3-5 november *ISITES 2016 Alanya/Antalya-Turkey*
- [25] Karavul C. – Kurnaz T. F. – Bayhan G. – Kıyak A. 2005 Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Adapazarı Zemin Sıkılık Durumunun Haritalanması, *Deprem Sempozyumu Kocaali*
- [26] Karayolları ve Ulaştırma İşleri Araştırma Şirketi Toprak İşleri ve Alt Yapı Çalışma Ekibi, *Fgsv 1995 Basımı*
- [27] Kayabaşı A. Gökçeoğlu C. 2012 Taşıma Kapasitesi ve Oturma Miktarının Hesaplanmasında Yaygın Kullanılan Yöntemlerin Mersin Arıtma Tesisi Temeli Örneğinde Uygulanması, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi 36*
- [28] Kavak A. – Güngör A.G. – Avşar C. – Atbaş B. 2008 Kireç ile Zemin Stabilizasyonu, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi 16-17 Ekim*, Selçuk Üniversitesi, Konya
- [29] Kılıç H. 2017, Geoteknikmühendisliğinde Sayısal Analizler Notları, Geoteknik İMO Meslekiçi Eğitim Kursu 03 Aralık 2017
- [30] Kök B.V. - Yılmaz M. - Geçkil A. 2012 Çimento Stabilizasyonlu Zeminin Esnek Üstyapı Maliyetine Etkisi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi Cilt 18*, Sayı 3, Sayfa 165-172

- [31] Maçın K.E. – Demir İ. 2018 Kentsel Dönüşüm Sürecinde İstanbul'da İnşaat ve Yıkıntı Atıkları Yönetimi, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 9 188-201
- [32] Mazak E. 2017 Researching Of Two And Three-Dimensional Analyses Of Pile Group, *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi Cilt: 16, No: 2, (1-11)*
- [33] Modaressi H. D. Aubry E. Faccioli C. 1995 Noret Numerical Modelling Approaches For The Analysis Of Earthquake Triggered Landslides, *Proceedings: Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, W April2-7, 1995, Volume II, St. Louis, Missouri, Missouri University of Science and Technology.*
- [34] Nptel – Advanced Foundation Engineering-I Module 8 (Lectures 29 To 34) Pile Foundations
- [35] Öntürk K. – Fırat S. – Vural İ. – Khatip J.M. 2014 Uçucu Kül ve Mermer Tozu Kullanılarak Yol Alt Yapısının İyileştirilmesi, *Politeknik Dergisi Cilt:17, Sayı: 1 (Özel Sayı), s.35-42*
- [36] Puebla, H. - Byrne, P.M. - Phillips, R. 1997 Analysis Of Canlex Liquefaction Embankments: Prototype And Centrifuge Models. *Canadian Geotechnical Journal, 34(5), 641- 657.*
- [37] Pulat H. F. – Aksoy Y. Y. 2017 Türkiye Kentsel Katı Atık Kompozisyonunun Kayma Mukavemeti Özellikleri ve Şev Duraylılığının İncelenmesi, *Article in Teknik Dergi · JanuaryDOI: 10.18400/tekderg.299128*
- [38] Steven J. Winter Schnabel Engineering Associates, Blacksburg, Virginiacase Histories Of Soil Improvement, Grouting, Geosynthetics, Dynamic Compaction, Vibroflotation, Blasting and Other Methods Including Geo Economics. Paper No. Gr-V11, *Proceedings: Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, March 9-12, 1998*
- [39] Sakarya İlinin Çevre Jeolojisi ve Doğal Kaynakları, Mta Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara, 1998.
- [40] Sakarya İli Akyazı Belediyesi G25d08a2d Pafta, 2 Ada, 582 Parsel'e Ait Sondaja Dayalı Zemin ve Temel Etüt Raporu, Mart 2018
- [41] Sayar Ş. 2012 *Sakarya İli Entegre Atık Yönetimi ve Ambalaj Atıklarının Geri Dönüşümü*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. Sakarya.
- [42] Sert S. – Özocak A. – Arel E. – Bol E. 2005 Sakarya Bölgesinde Yerel Zemin Özelliklerinin Hasar Büyüklüğüne Etkisi, Arifiye-Geyve-Güneşler Örneği, *Deprem Sempozyumu Kocaali*
- [43] T.C. Millî Eğitim Bakanlığı Aile ve Tüketici Hizmetleri Atık Lastikler Ankara, 2011
- [44] Tuncan A. Ders Notları Anadolu Üniversitesi Kazık Temeller
- [45] Turoğlu, H. 2004, *Zemin Sıvılaşmasının 17 Ağustos 1999 Depreminde Adapazarındaki Hasara Etkisi*, İst. Üni. Edebiyat Fak. Coğrafya Bölümü, Coğrafya
- [46] Vural İ. 2019 İnşaat Yıkıntı Atıklarının Zemin İyileştirmesinde Kullanılabilirliği, *Academic Platform Journal of Engineering and Science 7-1, 01-06,*

- [47] Vural İ. 2012 *Alüvyal ve Sıvılaşılabilen Zeminlerde Altyapıların Deprem Risk Analizi: Adapazarı Örneği*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi) Ekim
- [48] Yıldırım B. – Alata T. – Dağdalen E. *Zemin Stabilizasyonunda Bitümün Kullanılması ile Üst Yapıda Sağlanacak Ekonominin Artırılması*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri (Yüksek Lisans)
- [49] Yılmaz F. 2016 Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Kullanımı, *ISEM2016, 3rd International Symposium on Environment and Morality*, 4-6 November, Alanya – Turkey
- [50] Yüksek S. – Kaya S. 2017 Kömür Baca Külü, Kireç ve Jips Ürünlerinden Yapı Malzemesi Yapımı, *Akademik Platform 08-07*
- [51] Zorluer İ. – Usta M. 2003 Zeminleri Atık Mermer Tozu ile İyileştirilmesi, *Türkiye IV Mermer Sempozyumu (Mersem 2003) Bildirimler Kitabı 18-19 Aralık*

## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Tahsin BİLGİÇLİ, 01/08/1985' te Sakarya' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2002 yılında Adapazarı İmam Hatip Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Yapı Öğretmenliği Bölümü'nü 2012 yılında bitirdi. 2012 yılında Sakarya ilinde Şantiye Şefi olarak çalışmaya başladı akabinde 2013 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Lisans ve Yüksek Lisan eğitimine başladı. İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2016 yılında bitirdi. Sakarya ilinde özel bir firmada Proje Müdürü olarak görev yapmaktadır.