

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PROBLEMLİ ZEMİNLERDE JET GROUT UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN ŞANAN

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. NAZİLE URAL

BİLECİK, 2024

10683816

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PROBLEMLİ ZEMİNLERDE JET GROUT UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN ŞANAN

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. NAZİLE URAL

BİLECİK, 2024

10683816

BEYAN

“Problemlı Zeminlerde Jet Grout Uygulaması” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR	<input type="checkbox"/>	DESTEK ALINMAMIŞTIR	<input checked="" type="checkbox"/>
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....	

Hüseyin ŞANAN

Tarih

.../.../2024

İmza

ÖN SÖZ

Tez çalışmam boyunca her türlü konuda bana yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen, tez danışmanım kıymetli hocam Prof. Dr. Nazile URAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında olduğu gibi, eğitim ve tez sürecim boyunca da yanımda olan ailem ve kıymetli eşime çok teşekkür ederim.

Hüseyin ŞANAN

2024

ÖZET

PROBLEMLİ ZEMİNLERDE JET GROUT UYGULAMASI

Bu çalışma kapsamında; 14 m x 16 m temel genişliğine sahip 5 katlı bir yapının üzerine konumlandırıldığı sıvılaşma problemi olan bir zemin profili Plaxis 2D programında modellenerek analiz edilmiş ve zeminde oluşan boşluk suyu basıncı ile yapı temelinde meydana gelen düşey deformasyon değerleri incelenmiştir. Analizlerde sıvılaşma gerçekleştiği ve aşırı düşey deformasyonların olduğu görülmüş, farklı çap ve sayıda jet grout kolonu ile zemin iyileştirmesi yapılmış ve böylelikle jet grout kolon çapı artışının ve aynı çaptaki kolon sayısı artışının sonuçlara etkisi incelenmiştir. Analizlere ilave tek ve çift bodrum eklenerek aynı durumlardaki analizler tekrarlanmış ve buna bağlı olarak temel altında oluşan boşluk suyu basıncı ve düşey deformasyon değerleri incelenmiştir. Ayrıca, analizlerde iki farklı deprem etkisi ve iki farklı yeraltı su seviyesi kullanılmış böylelikle farklı deprem ve su seviyelerindeki zeminin davranışı değerlendirilmiştir. Plaxis 2D programında yapılan analizlerde sıvılaşma tahmini için UBC3D-PLM, deformasyon tahminleri için ise Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri kullanılmış ve aralarındaki farklar incelenmiştir. Sonuç olarak, jet grout zemin iyileştirme yönteminin kullanılarak deprem anında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sınırlandırılabilirdiği ve sıvılaşmanın önüne geçilebildiği görülmüştür. Jet grout kolonları sıvılaşmayı engellediği gibi yapı temelinde meydana gelen düşey deformasyonları da azaltmıştır. Farklı su seviyeleri karşılaştırıldığında yüksek su seviyesi bulunan zemin profilinde daha yüksek düşey deformasyon ve boşluk suyu basıncı değerleri meydana gelmiştir. Jet grout kolonlarının çapı ve sayısı artırılarak yapılan farklı analizlerde kolon sayısı artışıyla yapılan iyileştirmenin sıvılaşmayı ve düşey deformasyonu azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür. Yapıya ilave bodrum eklenerek yapılan analizlerde ise temel derinliği arttıkça aynı noktalarda oluşan boşluk suyu basıncı ve düşey deformasyon değerlerinin azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, sıvılaşan zeminlerde uygulanan jet grout yöntemi ile boşluk suyu basınçlarının ve düşey deformasyonların azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, Jet Grout, Zemin İyileştirmesi, Plaxis 2D.

ABSTRACT

JET GROUT APPLICATION ON PROBLEM SOILS

In this study; a soil profile with a liquefaction problem on which a 5-story building with a foundation width of 14 m x 16 m was positioned was modeled and analyzed in the Plaxis 2D program and the pore water pressure formed in the soil and the vertical deformation values formed in the foundation of the structure were examined. In the analyses, it was observed that liquefaction occurred and excessive vertical deformations occurred, the soil was improved with different diameters and the number of jet grout columns, and thus the effects of increasing the jet grout column diameter and the number of columns with the same diameter on the results were examined. The analyses were repeated by adding additional single and double basements. The analyses in the same cases were analyzed and accordingly, the pore water pressure and vertical deformation values formed under the foundation were examined. In addition, two different earthquake effects and two different groundwater levels were used in the analyses and thus the behavior of the soil under different earthquakes and water levels was evaluated. In the analyses performed in the Plaxis 2D program, UBC3D-PLM was used for liquefaction estimation, and Mohr-Coulomb and Hardening Soil soil models were used for deformation estimations, and the differences between them were examined. As a result, it was observed that excessive pore water pressure formed during an earthquake could be limited and liquefaction could be prevented by using the jet grout soil improvement method. Jet grout columns prevented liquefaction and also reduced vertical deformations occurring in the foundation of the structure. When different water levels were compared, higher vertical deformation and pore water pressure values occurred in the soil profile with high water levels. In different analyses performed by increasing the diameter and number of jet grout columns, it was observed that the improvement performed by increasing the number of columns was more effective in reducing liquefaction and vertical deformation. In analyses performed by adding a basement to the structure, it was observed that the pore water pressure and vertical deformation values formed at the same points decreased as the foundation depth increased. As a result, it was observed that pore water pressures and vertical deformations decreased with the jet grout method applied in liquefied soils.

Keywords: Liquefaction, Jet Grout, Soil Improvement, Plaxis 2D.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ	12
3.1. Zemin İyileştirmesi ve Amacı	12
3.2. Problemlili Zemin	13
3.3. Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Seçimi Ve Sınıflandırılması	15
4. SIVILAŞMA	17
4.1. Sıvılaşma Tanımı	17
4.2. Sıvılaşma Türleri	19
4.2.1. Akma Sıvılaşması	19
4.2.2. Yanal Yayılma	20
4.3. Sıvılaşma Sebebiyle Meydana Gelen Hasar Tipleri	20
4.3.1. Kum Kaynaması	21
4.3.2. Akma Göçmesi	23
4.3.3. Yanal Yayılma	24

4.3.4. İstinat Yapısı Yenilmesi	25
4.3.5. Taşıma Gücü Kaybı ve Oturma	25
4.3.6. Gömülü Hafif Yapıların Yüzeğe Yükselmesi	26
4.4. Sıvılaşmaya Karşı Kullanılabilecek Zemin Islah Metodları	27
4.5. Sıvılaşmaya Etki eden faktörler	29
4.5.1. Deprem şiddeti, büyüklüğü ve süresi	29
4.5.2. Yeraltı Su Seviyesi	29
4.5.3. Zemin Tipi	30
4.5.4. Rölatif sıklık	31
4.5.5. Dane Boyu ve Dağılımı	32
4.5.6. Zeminin yaşı	33
4.5.7. Drenaj şartları	33
4.5.8. Çevre Basınçları	33
4.6. Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi	34
4.6.1. Standart Yöntem-Seed ve Idriss (1971)	34
4.6.2. Devirsel Gerilme Oranı	35
4.6.3. Devirsel Direnç Oranı	37
4.6.4. Magnitüd Düzeltme Faktörü	39
4.6.5. Chinese Kriteri	40
5. JET GROUT İLE SIVILAŞMA RİSKİNİN ORTADAN KALDIRILMASI HESAP YÖNTEMİ	42
5.1. Zemin Maksimum Kayma Modülünün Belirlenmesi	42
5.2. Birim Alan Oranı Metodu ve Deprem Kayma Gerilmelerinin Dağılımı	43
5.3. Devirsel Gerilim Azaltım Faktörü	45
5.4. Yapısal Kontroller	46

5.5. Hesap Algoritması	47
6. JET GROUT KOLONLARININ TAŞIMA GÜCÜ HESABI	48
6.1. İyileştirilen Zeminde Taşıma Gücü Hesabı	50
7. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	52
7.1. Plaxis 2D Programı	52
7.2. Plaxis 2D Programında Model Oluşturulması	53
7.3. Plaxis Zemin Modelleri	56
7.4. UBC3D-PLM Bünye Modeli	57
7.4.1. UBC3D-PLM Bünye Modeli Parametreleri	57
8. SAYISAL ANALİZ	60
8.1. Model Geometrisinin ve Sınırlarının Belirlenmesi	65
8.2. Model Ağıının Oluşturulması	66
8.3. Zemin Profili ve Özelliklerinin Belirlenmesi	67
8.4. UBC3D-PLM Zemin Modeli Parametrelerinin Belirlenmesi	69
8.5. Analiz Modelinde Kullanılan Eleman Özelliklerinin Belirlenmesi	70
8.6. Analiz İçin Kullanılacak Deprem Yükünün Belirlenmesi	70
8.7. Analiz Sonuçları	67
8.7.1. Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri	73
8.7.1.1. 1. Durum; YASS 3m, 1. Deprem Etkisi Altında Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri	74
8.7.1.2. 2. Durum; YASS 3m, 2. Deprem Etkisi Altında Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri	78
8.7.1.3. 3. Durum; YASS 1,5m, 1. Deprem Etkisi Altında Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri	83
8.7.1.4. 4. Durum; YASS 1,5m, 2. Deprem etkisi Altında Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri	87

8.7.2. Deformasyon Değişimleri	91
8.8. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	95
8.8.1. Boşluk Suyu Basıncı Değişimlerinin Karşılaştırılması	95
8.8.2. Deformasyon Değişimlerinin Karşılaştırılması	97
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	99
KAYNAKÇA	102

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Su – Çimento Oranına Bağlı Kolon Dayanımları	3
Tablo 3.1. Zemin iyileştirme teknikleri ve kullanım amaçları	13
Tablo 3.2. Amaçlarına göre zemin iyileştirme yöntemleri	16
Tablo 4.1. Sıvılaşmaya Karşı Temel Mühendisliği Uygulamaları	28
Tablo 4.2. Rölatif sıklığa göre zeminlerin sınıflandırılması	31
Tablo 4.3. Farklı ivme değerlerinde sıvılaşma riski taşıyan bölgelerdeki rölatif sıklık değerleri	32
Tablo 5.1. Temel Şekil Katsayıları	48
Tablo 5.2. Terzaghi taşıma gücü katsayıları	49
Tablo 5.3. Kazık malzemesi, δ açısı – K katsayısı arasındaki ilişki	49
Tablo 7.1. UBC3D-PLM modelde kullanılan girdi parametreleri	58
Tablo 8.1. 1. Sondaj kuyusuna ait veriler ile yapılan sıvılaşma analizi sonuçları	61
Tablo 8.2. 2. Sondaj kuyusuna ait veriler ile yapılan sıvılaşma analizi sonuçları	62
Tablo 8.3. 3. Sondaj kuyusuna ait veriler ile yapılan sıvılaşma analizi sonuçları	63
Tablo 8.4. Belirlenen jet grout kolonu çap ve aralığı ile S_R değerinin hesabı	63
Tablo 8.5. Zemin iyileştirme sonrası emniyet faktörü değişim hesabı	64
Tablo 8.6. Analizde Kullanılan Zemin Özellikleri	68
Tablo 8.7. Plaxis UBC3D-PLM zemin modelinde kullanılan değerler	69
Tablo 8.8. Temel ve Jet grout kolonu özellikleri	70
Tablo 8.9. Analiz modelinde seçilen stress point derinlikleri	72
Tablo 8.10. 1. Durumda oluşan boşluk suyu basınçları	77
Tablo 8.11. 1. Durumda yapıya tek bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları	77

Tablo 8.12. 1. Durumda yapıya çift bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları	77
Tablo 8.13. 1. Durumda Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerleri	78
Tablo 8.14. 2. Durumda oluşan boşluk suyu basınçları	81
Tablo 8.15. 2. Durumda yapıya tek bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları	81
Tablo 8.16. 2. Durumda yapıya çift bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları	82
Tablo 8.17. 2. Durumda Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerleri	82
Tablo 8.18. 3. Durumda oluşan boşluk suyu basınçları	85
Tablo 8.19. 3. Durumda yapıya tek bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları	86
Tablo 8.20. 3. Durumda yapıya çift bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları	86
Tablo 8.21. 3. Durumda Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerleri	86
Tablo 8.22. 4. Durumda oluşan boşluk suyu basınçları	90
Tablo 8.23. 4. Durumda yapıya tek bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları	90
Tablo 8.24. 4. Durumda yapıya çift bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları	90
Tablo 8.25. 4. Durumda Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerleri	91
Tablo 8.26. Yapıda oluşan düşey deformasyon miktarları	92
Tablo 8.27. Yapıya tek bodrum ilave edildiğinde oluşan düşey deformasyon miktarları	93

Tablo 8.28. Yapıya çift bodrum ilave edildiğinde oluşan düşey deformasyon miktarları **94**

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Önerilen Hesap Algoritması	5
Şekil 2.2. Jet Kolonların Dayanım Aralıkları	6
Şekil 3.1. Zemin iyileştirme yöntemleri uygulanabilir dane dağılım oranları	16
Şekil 4.1. Niigata 1964 Depreminde Sıvılaştan Zemin Görüntüsü	18
Şekil 4.2. Aşağı San Fernando Barajı'nda 9 Şubat 1971'de meydana gelen depremdeki akma türü sıvılaşma	19
Şekil 4.3. 1999 Kocaeli depreminden yanal yayılma türü sıvılaşma hasarı görüntüsü	20
Şekil 4.4. Yüzeyde Kum Konileri Oluşma Biçimi	21
Şekil 4.5. 2000 Tottori depreminde oluşan kum kaynaması olayı	22
Şekil 4.6. 1999 Chi-Chi depreminde oluşan kum kaynaması	22
Şekil 4.7. Akma Göçmeleri Biçimi	23
Şekil 4.8. San Francisco Merced Gölü Kıyısında Meydana gelen Akma Kayması	23
Şekil 4.9. Yanal yayılma oluşum biçimi	24
Şekil 4.10. 1989 Loma Prieta depreminden görüntü	24
Şekil 4.11. İstinat yapısı yenilme biçimi	25
Şekil 4.12. Taşıma Gücü Kaybı Yenilme Biçimi	25
Şekil 4.13. Gömülü yapı Yüzeylenmesi Biçimi	26
Şekil 4.14. Sıvılaşma sonucu muayene bacası yükselmesi örneği 2003 Tokachi-oki depremi	26
Şekil 4.15. Zeminlerde sıvılaşabilir granülometri aralığı	32
Şekil 4.16. Düz veya Kısmen eğimli Zeminlerde Gerilme Azaltma Katsayısının Deprem Şiddeti ve Derinlikle Değişimi	36
Şekil 4.17. $M=7,5$ için siltli kumlarda devrisel direnç oranı ile $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişki	38

Şekil 4.18 Chinese Kriteri nin Grafik Presentasyonu	40
Şekil 4.19. Yeni Kriter	41
Şekil 5.1. Deprem kayma dalgalarının dağılım modeli ve birim hücrenin tanımlanması	44
Şekil 5.2. Birim alan ve kayma modülü oranlarına bağlı olarak CSR ; DGO azaltım eğrileri (S_R)	46
Şekil 5.3. Önerilen hesap algoritması	47
Şekil 6.1. Jet Grout Kolon yerleşimi ve hesap alanları	50
Şekil 7.1. Plaxis eleman ağı gerilme ve düğüm noktaları	53
Şekil 7.2. Model özellikleri giriş penceresi	53
Şekil 7.3. Model oluşturmada kullanılan ana sekmeler	54
Şekil 7.4. Zemin ve yapısal elemanlar için tanımlama penceresi	55
Şekil 7.5. Zemin profili oluşturma penceresi	55
Şekil 7.6. Meshlenen model görüntüsü	56
Şekil 8.1. Analiz için oluşturulan model geometrisi	66
Şekil 8.2. Meshleme ile oluşturulan model ağı görüntüsü	66
Şekil 8.3. Analizde Kullanılan Zemin Profil.....	67
Şekil 8.4. 1990 Upland depremine (1. Deprem) ait ivme-zaman grafiği (m/s^2-s).....	70
Şekil 8.5. 1983 Trinidad depremine (2. Deprem) ait ivme-zaman grafiği (m/s^2-s).....	71
Şekil 8.6. Plaxis programı deprem verisi ekleme penceresi.....	71
Şekil 8.7. Model üzerinde seçilen stress point noktaları	74
Şekil 8.8. 1. Durumda zemin iyileştirme öncesi ve sonrası oluşan aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı.....	74
Şekil 8.9. 1. Durumda A1 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	74
Şekil 8.10. 1. Durumda A2 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	75
Şekil 8.11. 1. Durumda A3 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	75

Şekil 8.12. 1. Durumda A4 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	75
Şekil 8.13. 1. Durumda A5 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	76
Şekil 8.14. 1. Durumda A6 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	76
Şekil 8.15. 1. Durumda A7 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	76
Şekil 8.16. 2. Durumda zemin iyileştirme öncesi ve sonrası oluşan aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı.....	78
Şekil 8.17. 2. Durumda A1 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	79
Şekil 8.18. 2. Durumda A2 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	79
Şekil 8.19. 2. Durumda A3 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	79
Şekil 8.20. 2. Durumda A4 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	80
Şekil 8.21. 2. Durumda A5 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	80
Şekil 9.22. 2. Durumda A6 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	80
Şekil 9.23. 2. Durumda A7 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	81
Şekil 8.24. 3. Durumda zemin iyileştirme öncesi ve sonrası oluşan aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı	83
Şekil 8.25. 3. Durumda A1 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	83
Şekil 8.26. 3. Durumda A2 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	83
Şekil 8.27. 3. Durumda A3 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	84
Şekil 8.28. 3. Durumda A4 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	84
Şekil 8.29. 3. Durumda A5 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	84
Şekil 8.30. 3. Durumda A6 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	85
Şekil 8.31. 3. Durumda A7 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	85
Şekil 8.32. 4. Durumda zemin iyileştirme öncesi ve sonrası oluşan aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı	87
Şekil 8.33. 4. Durumda A1 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	87

Şekil 8.34. 4. Durumda A2 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	88
Şekil 8.35. 4. Durumda A3 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	88
Şekil 8.36. 4. Durumda A4 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	88
Şekil 8.37. 4. Durumda A5 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	89
Şekil 8.38. 4. Durumda A6 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	89
Şekil 8.39. 4. Durumda A7 noktası boşluk suyu basıncı değişimi	89

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SPT: Standart Penetrasyon Testi

CPT: Koni Penetrasyon Testi

PMT: Presiyometre Testi

YASS: Yeraltı Su Seviyesi

DGO: Devirsel Gerilme Oranı

DDO: Devirsel Direnç Oranı

EF: Sıvılaşma İçin Emniyet Faktörü

İTO: İnce Tane Oranı Yüzde Değeri

MDF: Magnitüd Düzeltme Faktörü

ASCE: American Society of Civil Engineers

a_{maks} : Deprem Sırasında Zemin Yüzeyinde Oluşan Maksimum Yatay Yer İvmesi

g : Yerçekimi ivmesi

r_d : Gerilme Azaltma Katsayısı

M: Deprem Büyüklük Değeri

N: SPT Darbe Sayısı (Düzeltilmemiş)

N_{30} : İlk 30cm için SPT Darbe Sayısı

N_{60} : İlk 60cm için SPT Darbe Sayısı

$(N_1)_{60}$: Düzeltilmiş SPT N Değeri

$(N_1)_{60tk}$: Zeminde Bulunan İnce Dane Oranına Göre Düzeltilmiş SPT Değeri

PI: Plastisite İndisi

w_n : Su Muhtevası Değeri

w_L : Likit limit Değeri

I_p : Plastik Limit Değeri

1. GİRİŞ

Dünya üzerinde zaman geçtikçe nüfus çoğalmakta ve nüfusun çoğalmasıyla da insanlığın yaşamını sürdürebilmesi için yaşam alanı ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Bu ihtiyaç zemin koşulları uygun olan alanların yetersizliğinden veya yaşamaya, projelendirilmeye elverişli olmamasından dolayı bu alanlara yaşam alanı oluşturulması gibi bir sorunu beraberinde getirmektedir.

İnsanlığın bu yaşam alanı ihtiyacını karşılamak ve uygun olmayan zemin koşullarında dahi zeminin elverişli hale getirilerek üzerine yapılar inşaa edilebilmesini sağlamak için zemin iyileştirme yöntemleri çok büyük önem kazanmış ve önemini günümüzde de halen korumaktadır. Bilindiği üzere zemin doğal bir yapı olması dolayısıyla beton gibi, çelik gibi istediğimiz dayanımı verebildiğimiz imal edilebilen bir yapı değildir ve bu sebeple üzerinde detaylı araştırma yapılması gereken bir çalışma alanıdır.

Zemin üzerinde yapılaşmada en çok karşılaşılan taşıma gücü yetersizliği, sıvılaşma, aşırı düşey deformasyon, yeraltı su seviyesi varlığı vb. gibi sorunlar bu alanda mühendislik çalışmalarını yaygınlaştırmıştır. Dünya genelinde ve ülkemizde farklı zemin iyileştirme yöntemlerini uygulanmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu zemin iyileştirme yöntemlerinden bir tanesi olarak ülkemizde kullanılan ve hatta yaygın olan jet enjeksiyon (jet grout) yöntemidir. Bu yöntem sıvılaşma problemlili zeminlerde zeminin taşıma gücünü arttırması ve gerçekleşecek düşey deformasyon miktarını azaltması ile öne çıkmaktadır.

Sıvılaşma, üzerine yapı inşaa edilecek zemin için en büyük mühendislik sorunlarından biridir. Ülkemizde yaşanan depremler bize göstermektedir ki sıvılaşma problemi bulunan zeminler projelendirme aşamasında doğru mühendislik ve zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak projelendirilmezse, her depremde yaşandığı gibi sağlam bir yapının bulunduğu yere gömülmesi veya olduğu yerde yan yatması gibi sonuçlar ile karşılaşmaktayız. Bu ve bunun gibi karşılaşılan problemler, zeminlerin projelendirilme esnasında mevcut davranışının ve ihtiyaç halinde iyileştirme yapıldıktan sonraki davranışının öngörülebilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Gelişen teknoloji ile sonlu elemanlar metodu ve sayısal yöntemler kullanarak hesaplama yapan farklı yazılımlar ile zeminin davranışı projelendirilme esnasında öngörülebilmektedir. Bu yazılımlardan biri de sonlu elemanlar metodu ile çalışan PLAXİS 2D programıdır. Bu çalışmada sıvılaşma, jet enjeksiyon zemin iyileştirme yöntemi ve hesapları hakkında bilgi verildikten sonra PLAXİS 2D programı kullanılarak sıvılaşma problemine sahip zemin profili

modellenmiştir. Sıvılaşma problemi bulunan ve jet grout yöntemi ile iyileştirilen bu zeminin iki farklı deprem etkisi altında ve her deprem için iki farklı yeraltı su seviyesindeki durumu bu program ile incelenerek, iyileştirme öncesi ve sonrası zemin davranışları karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Baumann (1984) çalışmasında farklı profillere sahip ve jet grout zemin iyileştirme yöntemi ile iyileştirilmesi yapılan zeminlerde, jet grout kolonlarının bileşimindeki su-çimento karışım oranlarına bağlı olarak alınan karotlar tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlardaki farklılıklar incelemiştir. Birbirinden farklı yedi adet zemin profilinde teşkil edilen jet grout yöntemi kolonlarından alınan numuneler üzerinden elde edilen sonuçlar, zeminlerdeki su-çimento oranına göre Tablo 2.1’de gösterilmiştir. Araştırmacı sonuçta, karışımdaki çimento miktarının artması ile kolonlardaki basınç dayanımının arttığını belirtmiştir.

Tablo 2.1. Su – Çimento Oranına Bağlı Kolon Dayanımları

Zemin Tipi	Kolon Basınç Dayanımları (Mpa)						
	Çakıl	Kum	Silt, Kil	Organik Zemin	Çakıllı Kumlu	Kumlu Siltli	Siltli Killi
Kolon No	1	2	3	4	5	6	7
Su / Çimento = 0,67	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	12-18	10-14	6-10
Su / Çimento = 1	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	6-10	5-7	3-5

Kaynak: (Bauman, 1984)

Trevi (1994) çalışmasında jet grout uygulaması yapılan siltli ve siltli kumlu zeminlerden alınan numuneler ile tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde jet grout kolonlarının dayanımları ile elastisite modülü arasındaki bağlantıyı değerlendirmiştir. Araştırmacı sonuçta, jet grout kolon mukavemet değerinin, elastisite modülü mukavemet değeri ile doğru orantılı bir bağlantısı olduğunu belirtmiştir.

Durgunoğlu vd. (1998) çalışmasında bir vaka analizi yapmışlardır. Bu vaka analizi 25000 m² alan üstünde bulunan ve jet grout yöntemi ile zemin iyileştirilmesi yapılmış 4 katlı bir yapının uygulamasını içermektedir. Projelendirme aşamasında arazi ve laboratuvar deneylerinden alınan veriler ile yapılan hesaplamalarda yüzeysel temel kullanılması halinde yapının aşırı düşey deformasyona maruz kalacağı saptanmıştır. Bu duruma alternatif çözüm olarak kazıklı temel ve jet grout zemin iyileştirme yöntemi değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda maliyet avantajı ve inşaa sürecinin daha kısa olması sebebiyle jet grout yöntemi

tercih edilmiştir. Jet grout yöntemi ile ilgili bilgiler verilmiş tasarım ve hesap parametreleri, uygulama şekli açıklanmıştır. Uygulamadan sonra kontroller için kolon etrafları kazılarak kolon çapları kontrol edilmiştir. Kolonlardan numuneler alınarak yük taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Araştırmacılar sonuçta, yapılan değerlendirmeler ile istenilen özelliklerde jet grout kolonlarının imal edilebildiği ve oluşabilecek düşey deformasyonların sınırlandırıldığını belirtmişlerdir.

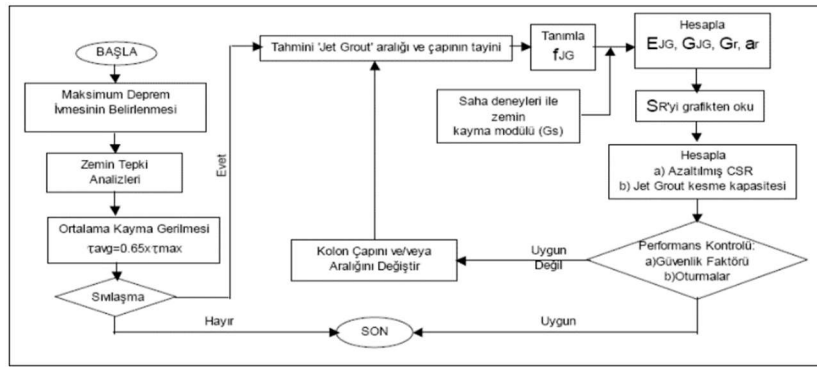
Wong vd. (1999) çalışmasında singapurda yapılan 18000 m² alana sahip temel kazısında güçlendirmesi jet grout kolonları ile yapılmış palplanş ve diyafram duvarlarının kazı yönündeki deformasyonları incelemiş ve deformasyonların azaldığını gözlemlemişlerdir. İyileştirme sonrası drenajsız kayma mukavemetinin 300 kPa' dan 1150 kPa, elastisite modülünün ise 150 MPa dan 350MPa değerlerine yükseldiği tespit edilmiştir. Araştırmacılar sonuçta, güçlendirme öncesi ve sonrası yapılan hendek kazılarına ait inklinometre ölçümlerinden yola çıkarak duvarlarda oluşan sehim miktarlarının jet grout kolonları ile azaltılabildiğini belirtmişlerdir.

Durgunoğlu vd. (2002) çalışmasında İzmir-Tire Organize Sanayi Bölgesinde İnşaatı yapılan fabrika alanında yapılan jet grout çalışmasının vaka analizini yapmışlardır. Teşkil edilen kolonlardan karot numune alımı, oluşturulan kolonların çap kontrolü, alınan numuneler üzerinde mukavemet deneyleri yapılmıştır. Çalışma sırasında yapılan ön deneme bölgesi testlerinin uygulama projesi verilerinin belirlenmesi üzerindeki önemi üzerinde durulmuştur. Araştırmacılar sonuçta, deneme bölgesinde jet-1 yöntemiyle imalatı yapılan jet grout kolonlarının, jet-2 yöntemiyle imalatı gerçekleştirilen kolonlara göre daha yüksek kesit dayanımına sahip olduğu ve aynı koşullarda daha az düşey deformasyon değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Fakat iyileştirme yapılmasındaki asıl sebep zeminin sıvılaşma problemi olması dolayısıyla, gereken yer değiştirme oranını ve daha geniş çaplı jet grout kolonlarının imalatını sağlayan jet 2 yönteminin tercih edildiğini belirtmişlerdir.

Gökalp ve Düzceer (2002) çalışmasında İzmir Aliğa' da bulunan doğalgaz hattının birleştiği güç dönüşüm tesisinin temelinde zemin iyileştirme çalışması olarak yapılan jet grout uygulamasını incelemişlerdir. Yapılan analizlerde düşey deformasyon miktarının fazla olmasından dolayı temel altındaki zeminin jet grout ile iyileştirilmesi kararlaştırılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında uygulanacak jet grout yönteminin seçilmesi, uygulama enjeksiyon basıncı, enjeksiyon nozzle çapları ve adetleri gibi kolon imalatını etkileyen parametreler açıklanmıştır. İmal edilmesi planlanan özellik ve çaptaki kolonlar için enjeksiyon basıncı

belirlenmiştir. Araştırmacılar sonuçta, alınan numuneler üzerinde yapılan deneyler ile istenilen dayanımda kolonların imal edildiğini ve düşey deformasyon değerlerinin jet grout kolonları ile sınırlandırıldığını belirtmişlerdir.

Özsoy ve Durgunoğlu (2003) çalışmasında ‘Jet Grouting’ ve ‘Deep Mixing’ zemin iyileştirme yöntemleri ile sıvılaşma olayının meydana getirdiği olumsuz etkilerin yok edilmesi veya azaltılması için farklı bir hesap metodu ortaya koymuşlardır. Şekil 2.1’de önerilen metod Fort-Otosan Gölcük Tesisleri inşaat alanında gerçekleştirilen zemin iyileştirme çalışmaları ile mukayese edilmiştir. Araştırmacılar sonuçta, zemin iyileştirmesi çalışmalarında önerilen metodun etken bir metod olduğunu, kullanıldığı takdirde ekonomik ve güvenilir sonuçlar elde edileceğini belirtmişlerdir.



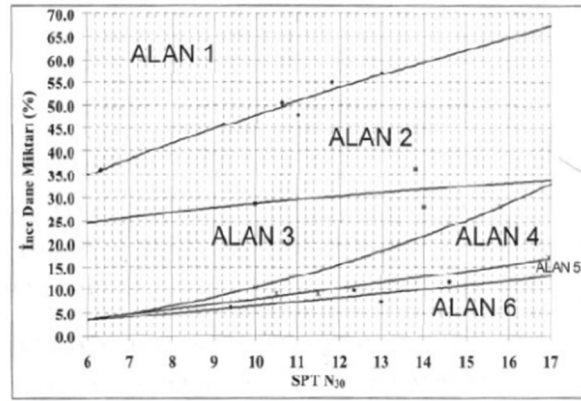
Şekil 2.1. Önerilen Hesap Algoritması

Kaynak: (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003)

Durgunoğlu (2004) çalışmasında problemlili zeminlerde kullanılabilicecek zemin iyileştirme yöntemlerini açıklamış ve zeminde bulunan mühendislik problemlerine karşın hangi iyileştirme yönteminin kullanılabiliceğini tablolar ile vermiştir. Ülkemizde çok yaygın kullanım alanı bulunan ve çoğunlukla iyileştirme yöntemi olarak tercih edilen jet grout kolonları ile iyileştirme yöntemi, kullanım alanları, imalatını etkileyen parametreler, imalat sonrasındaki kalite kontrolü, projelendirme aşamasındaki hesap parametreleri gibi konular açıklanmıştır. Bunun yanında deprem yükleri altında oluşan sıvılaşma problemi üzerinde durulmuş hesap parametreleri ve zeminlerde bulunan sıvılaşma potansiyelinin jet grout kolonlarıyla bertaraf edilmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Çalışmada, 17 Ağustos 1999 depremi öncesinde jet grout ile zemin iyileştirme çalışmalarının kısmen uygulaması yapılan İzmit Carrefour-SA ticaret merkezinin iyileştirme çalışmalarının vaka analizi yapılmıştır. Burada yapılan çalışmanın bir kısmının yapılmış olması ve inşaa aşaması devam ederken

deprem yaşanması yapılan iyileştirme çalışmasının değerlendirilmesinde ciddi bir öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Sıvılaşma potansiyelinin sadece kumlu zeminlerde oluşabileceği yönünde değerlendirme yapan Chinese kriterinin geçerliliği tartışılmış, yaşanan depremler sonucunda sıvılaşmanın ince daneli olan düşük plastisiteli silt ve killerde de gerçekleşebileceği açıklanmıştır. Araştırmacı sonuçta, ince daneli zeminlerde de sıvılaşma tahkikleri yapılarak zemin etütleri incelemeleri üzerinde durulması gerektiğini belirtmiştir. Chnise kriteri yerine yeni bir öneri yapılmıştır. Yapılan örneklemelerle getirilen önerinin geçerli olduğunu belirtmiştir.

Doğu vd. (2006) çalışmasında Taris-Aydın, Limak Lara Otel Antalya, Concorde Otel Antalya inşaat alanlarında gerçekleştirilen jet grout zemin iyileştirme kolonlarından alınan numuneler üzerinde yapılan deneyleri değerlendirmiştir. Zeminde bulunan ince dane yüzdesi ve SPT vuruş sayılarının numunelerin mukavemet değerleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Serbest basınç dayanımlarının zeminde bulunan ince dane içeriğine ve SPT vuruş sayıları ile ilişkili olarak yapılacak karşılaştırmalarla elde edilebileceğini belirtmiştir. Şekil 2.2’de sahada imalatı yapılan jet grout kolonlarının serbest basınç dayanım değerleri alanlara ayrılarak ifade edilmiş ve bu dayanım değerlerini oluşturan alanlar, zeminde bulunan ince dane yüzdesi ile SPT vuruş sayısı ile ilişkili olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.2. Jet Kolonların Dayanım Aralıkları

Kaynak: (Doğu vd., 2006)

Şekil 2.2’de ki grafiğe göre alanlara göre dayanım değerleri şu şekilde belirtilmiştir.

- Alan 1: 2,6N/mm² ’den daha düşük
- Alan 2 : 3,5N/mm² , 2,6N/mm² arası
- Alan 3 : 5,5N/mm² , 3,5N/mm² arası

- Alan 4 : 7,0N/mm² , 5,5N/mm² arası
- Alan 5 : 14,0N/mm² , 7,0N/mm² arası
- Alan 6 : 14,0N/mm² 'den daha yüksek dayanımlı kolonlar

Araştırmacı sonuçta, zemin iyileştirmesi için teşkil edilen jet grout kolonlarının dayanımlarının yüksek elde edilebilmesi için danelerin iyi dercelendirilmiş olması gerektiğini, ayrıca ince dane miktarındaki artışın kolon dayanımı azalttığını belirtmiştir.

Sert vd. (2007) çalışmasında İstanbul Beykoz Belediyesi sınırlarında yapılacak köprü için proje aşamasında zemin değerlendirmesi yapmışlardır. Yapılan değerlendirmeler ile zeminin istenilen taşıma gücünü karşılayamadığı ve aşırı düşey deformasyonların oluşarak bu hali ile zeminin istenilen performansı sağlayamayacağı sonucuna varılmıştır. Araştırmacılar sonuçta, yapılan sayısal analizler ile bu problemlerin önüne geçebilmek için köprünün ayakları altında bulunan zeminde düşey deformasyon miktarlarının yaklaşık 50 m derinlikte bulunan ana kayaya indirilecek olan çelik profil kazıklarla sıfırlanabileceği, yaklaşım dolgusu altında oluşacak uzun süreli düşey deformasyonların ise 65 cm çap genişliğine ve 15 m boy uzunluğuna sahip jet grout kolonları yardımıyla kabul edilebilir değerlere çekilebileceğini belirtmişlerdir.

Erdil (2008) çalışmasında jet grout zemin iyileştirme yöntemi ile ilgili açıklamalar yapmış hesap parametleri ve taşıma gücü hesabı hakkında bilgiler vermiştir. Daha önceden sahada gerçekleştirilmiş bir jet grout uygulamasındaki jet grout kolonları ve zemin yapısı Plaxis 2D programında modellenerek analizleri yapılmıştır. Daha sonra inşaat sahasında jet grout kolonları üzerinde yapılan yükleme testlerinden elde edilen kolon taşıma gücü değerleri, Plaxis yazılımından elde edilen taşıma gücü değerleri ile karşılaştırılmıştır. Araştırmacı sonuçta, sahada imalatı yapılan kolonlardan elde edilen veriler ile Plaxis programında modellenen kolonların analizlerinden elde edilen taşıma gücü değerleri arasında büyük farklılıklar olmadığını belirtmiştir. Bu sebeple de sahada teşkil edilecek jet grout kolonlarının performanslarının sonlu elemanlar metodu ile çalışan Plaxis yazılımı ile değerlendirilebileceğini belirtmiştir.

Küsin (2009) çalışmasında jet grout zemin iyileştirme yöntemi ile ilgili açıklamalarda bulunmuş, imalat aşamaları, ekipmanları, tasarım parametreleri hakkında bilgiler vermiştir. Zeminlerde sıvılaşma problemine karşı jet grout uygulaması incelenmiştir. Yapılan tasarımların analizleri sonlu elemanlar metodu ile çalışan Plaxis yazılımı ile yapılmıştır. Yapılan ilk örnekte dayanım duvarı Plaxis 2D yazılımında modellenmiş ve analiz yöntemleri ile birlikte jet grout zemin iyileştirme yönteminin sisteme etkisi incelenmiştir. İkinci örnekte yer altına yapılacak bir otoparkın temel çukurunda yapılan güçlendirme çalışmaları Plaxis programında tasarlanmış

ve analiz sonuçları incelenmiştir. Üçüncü örnekte kompozit zeminlerde homojenleştirme metodu incelenmiştir. Son örnekte ise yapılacak tank temelleri altında zeminin jet grout ile iyileştirme çalışmalarının analizleri klasik yöntemle ve Plaxis yazılımı ile yapılmıştır. Araştırmacı sonuçta, jet grout yönteminin zeminlerin iyileştirilmesinde etken bir yöntem olduğunu, Plaxis programında yapılan analizlerden elde edilen verilerin bazen klasik yöntemlerden elde edilen verilere göre farklılıklar gösterebildiğini belirtmiştir.

Sünbül ve Parlak (2015) çalışmasında inşaa edilecek 2 bloklu 4 katlı yapının bulunduğu zeminin etüt çalışmaları için 11 adet zemin sondajı yapılmış ve zemin profilleri elde edilmiştir. Yapılan analizlerle inşaat sahasındaki zeminin sıvılaşma probleminin bulunduğu, bu sebeplede binadan gelebilecek toplam yükü taşıyabilecek taşıma gücüne sahip olmadığı ve 52 cm gibi yüksek miktarda düşey deformasyonlara maruz kalacağı belirlenmiştir. Çalışma içerisinde jet grout kolonunun tek olarak ve blok halinde projelendirilmesindeki farklardan bahsedilmiş, yapılan analizlerde tek kolon olarak prokelendirilmesi tercih edilmiştir. Modellenen jet grot kolonu için analizler sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan PLAXİS 2D yazılımı ile yapılmış ve 1999 Marmara depremi verileri ile birlikte analizleri yapılmıştır. Analiz çalışmalarında sırasıyla 60, 80, 100 cm çaplı ve 13, 16 m boylu kolonlar tasarlanarak analizler yapılmış kolon aralarındaki mesafeler değiştirilerek değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca sonlu eleman ağlarındaki düğüm sayıları da değiştirilerek değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan analizlerden sonra inşaat sahasında imalatta oluşabilecek kolon çapını belirlemek amacıyla 3 adet test kolonu inşa edilmiştir. Uygulama esnasında uygun çapı veren jet grout uygulama parametleri tespit edilerek 3 adet yeni test yapılmış ve uygun çaplar model analizlerde kullanılmıştır. Ayrıca inşa edilen test kolonlarında yükleme “ASTM D 1143 – 81” göre yapılmıştır. Araştırmacılar sonuçta, arazi ve labaratuvar deneyleriyle elde edilen veriler kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler ile jet grout kolonlarının modellebileceğini, bu kolonlar ile de zeminde bulunan olumsuz koşulların bertaraf edilerek yaşanacak düşey deformasyon miktarlarının istenilen seviyelere çekilebildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca sıvılaşma problemi bulunan zeminlerde de sıvılaşma potansiyelini önleyici olarak faydalanılabileceği belirtilmiştir.

Aksangür (2017) çalışmasında problemlili zeminlerde uygulanan jet grout zemin iyileştirme yönteminin zemine katkısını, iyileştirme öncesi ve sonrası olmak üzere sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Plaxis 2D programında incelemiştir. Yapılan analizlerde zeminin iyileştirme sonrası davranışı 5 farklı şekilde değerlendirilmiştir. İlk analizde doğal zemin üzerine bina yükü etki ettilimiş ve iyileştirmeye yapılmamış zeminin düşey deformasyon miktarı 17,15 cm olarak elde edilmiştir. Daha sonra jet grout kolonları Plaxis yazılımında farklı

şekillerde modellenebildiği için ilk etapta jet grout kolonları çubuk eleman olarak tasarlanmış ve bina düşey deformasyon miktarı 11,26 cm olarak elde edilmiştir. İkinci etapta ise çubuk eleman olarak tanımlanan jet grout kolonlarının etrafına arayüz (interface) yerleştirilerek bu şekilde düşey deformasyon değeri 11,58 cm olarak elde edilmiştir. Üçüncü etapta; iyileştirme için modellenen alan kompozit bölge olarak ele alınmış ve düşey deformasyon değeri 10,77 cm olarak elde edilmiştir. Geleneksel yöntemlerle modelleme yapıldığında ise düşey deformasyon değeri 11,53 cm olarak elde edilmiştir. Araştırmacı sonuçta, yapılan analizle ile her modelde jet grout kolonları ile iyileştirilen zeminin düşey deformasyon değerlerinin, zeminin önceki durumuna göre daha iyi sonuçlarda elde edildiği belirtmiştir.

Mungan ve Sünbül (2018) çalışmasında aynı zemin yapısına sahip bir yapının zemini darbeli kırmataş, jet grout ve delme kazık zemin iyileştirme yöntemleri ile modellendikten sonra elde edilen analiz sonuçlarını değerlendirmiştir. Oluşturulan modelde bulunan yapı zemininin deprem etkileri altında analizi yapılarak düşey deformasyon miktarları karşılatırılmış ve yapının deprem merkez üssüne olan mesafesinin üsse uzaklık ve yakınlık durumunun zeminin davranışına etkisi de incelenmiştir. Çalışmada Germencik-Aydın' da bulunan Jeotermal Enerji Santrali zemin etüdünden elde edilen verilerle Plaxis 2D programında analiz gerçekleştirilmiştir. Araştırmacı sonuçta, sonuçta, 100 kPa yayılı yük etkilerek darbeli kırmataş kolonlarında 27,56 cm, jet grout kolonlarında 19,11 cm ve delme kazıklı ortamda 7,3 cm düşey deformasyon miktarları elde etmiştir. Ayrıca yapılan analizler sonucunda deprem üssüne yakınlık ve uzaklık durumunda da en iyi sonuçları delme kazık kolonların verdiği belirtilmiştir.

Dağdeviren (2019) çalışmasında yapı zeminlerinin mühendislik hesaplamalarının yapılırken karşılaşılan en önemli sorunlardan biri olan zeminlerde sıvılaşma problemi hakkında bilgiler vererek değerlendirmeler yapmıştır. Türkiye bina deprem yönetmeliğinde bulunan zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için verilen formüller irdelenmiştir. İnşaat projelerinde zeminin sıvılaşma potansiyelini etkileyen bir çok faktör olduğu ve bunların Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine uygun olarak değerlendirilmesinde hatalar yaşanabildiğini belirtilmiştir. Kumlu zeminlerde yapılacak değerlendirmelerde yaşanabilecek zorluklara karşı kolaylık oluşturması ve yol göstermesi için, sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının elde edilmesini sağlayan grafikler oluşturulmuştur. Ayrıca bu kartlar sıvılaşma potansiyeli bulunan zeminlerde yapılacak iyileştirme çalışmaları için kolon teşkilinde, rijitlik ve yerleştirme mesafeleri gibi tasarım parametlerinin de elde edilmesini sağlamaktadır.

Araştırmacı sonuçta, bu geliştirilen kartların sıvılaşma probleminin tahmin edilmesi için kullanılabileceğini ve yapılan hataların önüne geebilebileceğini belirtmiştir.

Mungan vd. (2020) alışmasında 4 katlı bir yapının bulunduğu sıvılaşma ve düşey deformasyon gibi mühendislik sorunlarıyla karşılaşılan zeminin iyileştirme durumunu değerlendirmiştir. Bu sorunları bertaraf etmek için jet grout ve darbeli kırmataş kolon zemin iyileştirme yöntemleri önerilmiştir. Bu iki yöntemden birinin tercih edilmesi için yapının statik ve dinamik etkiler altında davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile Plaxis 2D programında analiz edilmiştir. Araştırmacı sonuçta, yapılan analizler ile darbeli kırmataş kolon yöntemiyle zeminde oluşan düşey deformasyonlar %30 oranında azalırken, jet grout ile iyileştirilen zeminde % 60 oranında azalma değerlerinin elde edildiğini belirtmiştir.

Mısır (2020) alışmasında konya ili meram ilçesinde yapılacak yaşam kompleksinin inşaa sahasındaki zeminin iyileştirme çalışmalarını değerlendirmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucu zeminin gerekli taşıma gücünü sağlamadığı ve yüksek düşey deformasyon miktarlarına maruz kalacağı grlmştir. Bu sebeple jet grout yöntemi ile zemin iyileştirmesi yapılmıştır. Sahada 60 cm çapında, 15 m uzunluğunda 3351 adet jet grout kolonunun 1,6 x 1,6 m karelaj oluşturacak şekilde imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalat tamamlandıktan sonra 25 adet jet grout kolonunda yükleme testleri yapılarak deformasyon değerleri elde edilmiştir. Araştırmacı sonuçta tercih edilen jet grot kolonlarının proje yükleri altında yeterli olacak şekilde çalıştığını belirtmiştir.

Davran (2022) alışmasında sıvılaşma potansiyeli yüksek tipik Adapazarı zeminlerini temsil eden zemin profilinde jet grout yöntemi ile iyileştirme çalışmasını değerlendirmiştir. Zemin Plaxis programında modellenmiş ve iyileştirmenin sıvılaşma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tasarımın modellenmesi boşluk suyu basıncındaki değişimi gösterebilmek için UBCSAND modeli ile yapılmıştır. 4 katlı 10 metre genişliğinde 15 metre yksekliliğinde bir yapı gevşek kum zemin üzerine oturtulmuştur. Analiz aşamasında deprem verisi olarak 1999 Marmara depremi verisi kullanılmıştır. Kesitte analiz sonucu bazı noktalardan alınan ivme zaman değerleri Marmara depremi ivme verileriyle karşılaştırılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Araştırmacı sonuçta, Yapılan analizler ile deformasyon değerleri incelendiğinde iyileştirme sonrası yatay deformasyon değerlerinin %59 a kadar azaldığını belirtmiştir. Ayrıca iyileştirme öncesinde yapılan analizde boşluk suyu basıncının toplam gerilmeye ulaştığı fakat iyileştirme yapıldıktan sonra ise boşluk suyu basıncının toplam gerilmeye ulaşmadığı, böylelikle jet grout ile iyileştirilen zeminde sıvılaşmanın önüne geçilebildiği belirtilmiştir.

Sahin vd. (2022) çalışmasında Kocaeli ili sınırlarındaki trafo binasının bulunduğu inşaat sahasındaki sıvılaşma problemi bulunan zeminin iyileştirilmesini değerlendirmiştir. Sıvılaşma probleminin bertaraf edilmesi için jet grout kolonları ile zemin iyileştirme yapılmasına karar verilmiştir. Yapılacak jet grout zemin iyileştirme yönteminin etkinliğini ve iyileştirme sonucunda zeminin davranışındaki değişiklikler efektif gerilme tabanlı sonlu elemanlar metodu ile analiz yapan MIDAS GTS NX programı ile incelenmiştir. Çalışmada UBCSAND modeli hakkında bilgiler verilmiş yapılan analizlerde bu model kullanılmıştır. Ayrıca jet grout kolonlarının zemindeki kayma gerilmelerini, deformasyonları nasıl etkilediği ve jet grout kolonlarının dayanım oranları ile alan dağılımlarının iyileştirme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçta, aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu incelemek için UBCSAND modelinin kullanılabilceği, jet grout kolonlarının arasındaki mesafe azaldıkça zeminin daha az kayma gerilmesine maruz kaldığı, jet grout kolonlarındaki rijitlik artışı zemindeki kayma gerilmelerini azalttığı fakat belli bir noktadan sonra (60) kayma gerilmelerinin değişimin çok etkilenmediği, jet grout kolonunun rijitliği arttırılıp aralarındaki mesafe azaltılsa dahi boşluk suyu basıncı oranı çok etkilenmediği ve sıvılaşma meydana geldiği bu bakımdan da jet grout kolonlarının sıvılaşmayı ortadan kaldırmaktan ziyade zeminde oluşan kayma gerilmelerini azaltarak fayda sağladığını belirtmişlerdir.

3. ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ

3.1. Zemin İyileşimesi ve Amacı

Zemin iyileştirme yöntemlerinin kullanılarak zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesindeki temel amaç hidrolik, mekanik ve dinamik araçlarla zeminde bulunan mevcut boşluk oranının azaltılması veya mevcut zemin içerisindeki boşlukların çeşitli kireç, çimento gibi kimyasallarla doldurulmasıdır (Davran, 2022).

Roshan vd., 2022 zemin iyileştirmesini, farklı metodlar ile zeminin mekanik ve fiziksel özelliklerinin değiştirildiği farklı bir deyişle de kesme dayanımını ve taşıma gücünü arttırmak sıkışabilirliği, geçirimsizliği ve deformasyonu azaltmak ayrıca zeminlerin sıvılaşmasını önlemek için yapılan çalışmalar olarak tanımlamışlardır.

Yapılaşma için mühendislik özellikleri yeterli zemine sahip sahalar yeterli olmadığında mecburen problemlili zeminler yapılaşma için temel zemini olarak tercih edilmektedir. Bu durumda ise mevcut zemin koşullarının iyileştirilmesi ile yapı temelini oturabileceği zemin olarak kullanılabilmesi sağlanmaktadır.

Zemin iyileştirme yöntemleri ile problemlili zeminlerin iyileştirilmesinde genel amaçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Zemindeki kayma mukavemetini böylelikle de taşıma gücünü arttırmak,
- Boşluk oranını azaltarak aşırı konsolidasyonu ve deformasyonu engellemek,
- Zeminin su miktarını azaltarak zeminin birim hacim ağırlığını arttırmak,
- Zeminin geçirgenliğini azaltarak şekil değiştirmelerin ve taşıma gücü kayıplarının önüne geçmek.

Tablo 3.1 'de zemin türlerine ve bu zeminlerde yaşanan mühendislik problemlerine göre seçilebilecek iyileştirme yöntemleri gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Zemin iyileştirme teknikleri ve kullanım amaçları

UYGULANAN YÖNTEM	ZEMİN TÜRÜ		ZEMİN İYİLEŞTİRME AMACI				
	Daneli	Kohezyonlu	Taşıma Gücü	Oturma Kontrolü	Stabilite	Çevresel Sebepler	Sıvılaşma
Vibrokompaksiyon	X		X	X			X
Kum Sık. Kazıkları	X		X	X			X
Komp. Kazıkları	X		X	X			X
Dinamik Komp.	X		X	X		X	X
Patlatma	X		X				X
Ön Yükleme		X	X	X			
Düşey Drenler		X	X	X			
Isıtma		X		X			
Soğutma	X	X				X	
Geosentetikler		X	X	X			
Mini Kazıklar	X	X	X	X			
Fore Kazıklar	X	X	X		X		
Zemin Çivileri	X	X			X		
Donatılı Zemin	X					X	
Derin Karıştırma	X	X	X	X	X	X	X
Taş Kolonlar		X	X	X	X		X
Permeasyon Enj.	X		X	X	X	X	
Çatlatma Enj.		X	X	X		X	
Komp. Enj.	X	X	X	X			X
Jet Enj.	X	X	X	X	X	X	X

Kaynak: (Öntürk, 2011)

3.2. Problemlili Zemin

Her geçen gün dünya üzerinde nüfus artışı ile birlikte yapılaşma ihtiyacı da artmaktadır. Bunun sonucu olarak her yapılaşma için yapının oturacağı bir inşaat sahası ihtiyacı doğmaktadır. İnşaat sahalarının seçiminde ve alanların imara açılmasında önemli koşullardan bir tanesi üzerinde yapılaşma olacak zeminin mühendislik özelliklerinin elverişli koşullarda olmasıdır. Bu sebeplede bu alanlarda bulunan zeminler üzerinde yapılaşma için zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmaktadır.

Problemlili olarak nitelendirilen ve iyileştirilmesi gereken zemin türleri aşağıda sıralandığı gibidir; (Özdemir ve Mehmet, 2006)

- Bataklık ve tubalık zeminler
- Yumuşak Killer
- Gevşek Kumlar
- Yer altı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak kalın alüvyonlar

Bataklık ve turbalık zeminler içlerinde bulundurdıkları yosun ve diğer çeşitli bitkisel maddelerin zamanla çürümeye maruz kalması ile yapılarında büyük şekil değiştirmeleri yaşayabilen zeminlerdir. Bu zeminlerde taşıma gücü değerleri çok azdır ve çok kötü durumdadır. Temel zemini olarak kullanılması hiç istenmeyen bir durumdur. Fakat mecbur kalınırsa mutlaka iyileştirme yapılarak kullanılması gerekmektedir.

Yumuşak killer de yapılarının yumuşak olması sebebiyle taşıma gücü oldukça düşük olan ve yüksek deformasyona uğrayan bir yapıları vardır. Bu sebeple mümkünse temel zemini olarak kullanılması tercih edilmemelidir. Eğer zorunda kalınırsa iyileştirme yapılarak kullanılabilir.

Gevşek yapıda bulunan kumlar ve yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak kalın alüvyon zeminler ise diğer zeminlere göre daha iyi olabilecek ama orta değerlerde bir taşıma gücüne sahiptirler ve sabit yükler altında deformasyon değerleri sınır değerler içinde kalabilir. Fakat bu zeminlerde deprem gibi tekrarlı yük etkileşimlerinde taşıma gücü kaybı ve aşırı düşey deformasyonlar yaşanabilmektedir. Bu sebeple temel zemini olarak kullanılacaksa iyileştirme yapılarak kullanılması gerekmektedir.

Ayrıca zayıf zeminlerde karşılaşılan mühendislik problemlerini aşağıda olduğu gibi sıralayarak açıklayabiliriz (Aksangür, 2017).

Yetersiz taşıma gücü; temel zemini olarak kullanılmak istenen her zeminin halihazırda bir maksimum taşıma gücü vardır. Eğer zemin üzerine yüklenen yük zeminin kendi maksimum taşıma gücünü aşarsa zeminin taşıma gücü yetersiz gelmektedir ve göçme meydana gelebilmektedir.

Sıvılaşma; iri dane içerikli yeraltı su seviyesi yüksek zeminlerde titreşim ile mevcut boşluk suyu basıncında artış meydana gelir ve efektif gerilme değeri kaybolarak zemin taşıma gücü değerini kaybederek katı halden sıvı hale geçmiş gibi davranması olarak tanımlanır (Özaydın, 2007).

Şişme kabarma; zeminlerden özellikle montmorillonit içerikli kil zeminler yapılarında bulunan şişme özelliği ile üzerlerinde bulunan yapılara kaldırma kuvveti uygulamaktadır. Bu kaldırma kuvveti zemin üzerinde bulunan yapı temellerinde kırılma ve çatlamalara sebep olabilmektedir. Şişen killerin likit limit değerleri %40 dan, plastisite indeksi değerleri ise %15 ten büyüktür (Das, 1995).

Çökme; düşük doğal birim hacim ağırlığı ve düşük birim hacim ağırlığı değerlerine sahip, kohezyonlu veya kohezyonsuz zeminlerde yükleme ve ıslanma ile zeminin iç yapı mekanizmasının çökerek yüksek deformasyon oluşturmasıyla yaşanmaktadır.

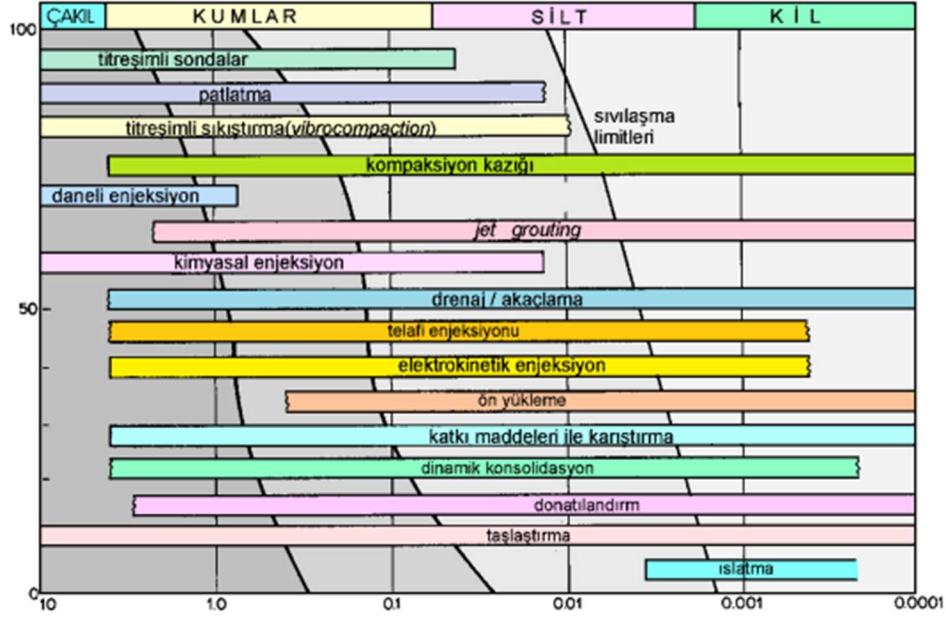
3.3. Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Seçimi Ve Sınıflandırılması

İnşaat sahasında temel zemini seçimi ve seçilen zeminin değerlendirilmesi yapılacak tasarım için en önemli faktörlerden bir tanesidir. İnşaat sahasında bulunan zeminin mühendislik parametrelerinin gerekli zemin etüdü çalışmaları yapılarak doğru tespit edilmesi, geoteknik tasarımda doğru sonuçlar elde edilebilmesi için önemlidir. Zemin etüdünden elde edilen veriler ile zemin yapısı incelenir. Zeminin üstüne yapı oturacaksa, oturacak yapıyı taşıyıp taşıyamayacağı, deformasyon miktarlarının istenen değerler içinde kalıp kalmadığı, bir kazı çalışması veya dayanma yapısı yapılacaksa da zeminin mevcut durumuyla stabilitesini koruyup koruyamayacağı değerlendirilir. Değerlendirme sonucu zemin mevcut değerleri ve yapısı ile yeterli dayanıma sahip değil ise zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulur. Zeminde yapılan geoteknik tasarım ve çalışmalar inşaat sürecinin en başı olması sebebiyle, zeminin yapısına ve özelliklerine göre en uygun iyileştirme yönteminin seçilmesi ilerleyen süreçte deprem veya farklı etkilerle yapıda problemlerle karşılaşılması için önem arz etmektedir.

Doğru zemin iyileştirme yönteminin seçilmesinde izlenmesi gereken adımlar aşağıda sıralandığı gibidir: (Aksangür, 2017)

- Zemin profilinin tayini
- Yeraltı su seviyesinin tespiti
- Zeminin mekanik özelliklerinin tayini
- Hedeflenen iyileştirme miktarı
- İyileştirme için gerekli alan ve uygulama derinliği
- Seçilen iyileştirme yönteminin diğer yöntemlere göre avantajları
- Maliyet ve uygulanabilirlik analizi
- Uygulama aşamasındaki çevre faktörleri ve gereksinimler
- Uygulamadan sonraki yapılması gereken kontroller ve bakım çalışmaları

Zemini oluşturan dane dağılımına göre zemin iyileştirme yönteminin seçilebilmesi için Şekil 3.1’de olduğu gibi sınıflandırma yapılabilmektedir (Aksangür, 2017).



Şekil 3.1. Zemin iyileştirme yöntemleri uygulanabilir dane dağılım oranları

Kaynak: (USACE, 1999)

Zemin iyileştirme yöntemi iyileştirmenin yapılma amacına göre de Tablo 3.2’de olduğu gibi gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Amaçlarına göre zemin iyileştirme yöntemleri

Amaç	Uygulanabilecek Yöntem
Sıvılaşmaya karşı direnci arttırmak, zemin hareketlerini azaltmak.	Titreşimli sondalama, Taş kolon, Derin dinamik kompaksiyon, Kum drenler, Penetrasyon ve kompaksiyon enjeksiyonu, Jet grouting.
Farklı oturmaya maruz kalacak binayı stabil hale getirmek.	Penetrasyon ve kompaksiyon enjeksiyonu, Jet grouting, Mini kazık.
Ani oturmayı azaltmak.	Jet grouting, Dinamik kompaksiyon, Titreşimli sondalama, Kompaksiyon enjeksiyonu, Derin karıştırma.
Konsolidasyon oturmasını azaltmak.	On konsolidasyon, Jet grouting, Taş kolon, Kompaksiyon enjeksiyonu, Derin karıştırma.
Yamaç stabilitesi	Kum direnler, Jet grouting, Penetrasyon ve kompaksiyon enjeksiyonu.
Şişen zeminlerin iyileştirilmesi.	Kireç ve çimento ile stabilizasyon, Şişen zeminin kaldırılması.
Çöken zeminlerin iyileştirilmesi.	Derin dinamik kompaksiyon, Vibro-kompaksiyon, Enjeksiyon.

Kaynak: (Koçbay, 2013)

4. SIVILAŞMA

4.1. Sıvılaşma Tanımı

Dünya çapında yaşanan farklı depremlerde Alaska-1964, Niigata 1964, Loma Prieta 1989, Kobe 1995, Taiwan 1999, Gölcük 1999 zeminlerde sıvılaşma gibi bir problemin olduğu ve bu problemin zemin üzerindeki ve altındaki hatta dayanma yapıları da dahil olmak üzere yapılara çok büyük boyutlu hasarlar verdiği tespit edilmiştir.

Özellikle suya doygun gevşek halde bulunan granüler zeminlerin deprem esnasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncı sonucu, efektif gerilmelerin küçülerek kayma direncini kaybetmesi sonucu zeminin bir sıvı gibi davranması halinin genel tanımını sıvılaşma-liquefaction olarak verilmektedir. Gevşek olmayan yani sıkı ve orta sıkı halde bulunan zeminler, kayma gerilmelerine maruz kaldıklarında gevşek zeminlerin aksine hacimsel artışa yönelik davranış gösterirler. Bu sebeple belirli bir seviyeye ulaşan gerilmeden dolayı boşluk suyundaki ani artışlar bu zeminlerde gerçekleşmez. Gevşek, granüler zeminlerde ise bu durum oluşmadığından gevşek zeminler sıvılaşmaya karşı daha hassastırlar (Durgunoğlu, 2004).

Sıvılaşma kısaca ve genel olarak yeraltı seviyesi altında bulunan kumlu ve siltli zeminlerde deprem gibi tekrarlı etkiler ile boşluk suyu basıncında artış meydana gelerek zeminin taşıma gücünü kaybetmesi olarak tanımlanır (Seed ve Idriss, 1971).

Sıvılaşma problemine sahip zeminlerde deprem etkileri ile yaşanan sorunlar arasında taşıma gücü kayıpları, aşırı zemin düşey deformasyonları, şevli arazilerde ötelenmeler, aşırı boşluk suyu basıncı artışı ile istinat yapılarının yenilme sonucu yıkılması gibi sorunlar yaşanmaktadır. Bu sorunların deprem sonrasında ortaya çıkan sonuçlarından olan mevcut yapıda yaşanan yüksek miktarda düşey deformasyonlar ve zeminin taşıma gücünü kaybederek yapının batmasına ve yan yatmasına sebep olmasıdır. Bu sonuçların açıkça gözlemlenebildiği Niigata 1964 depreminden bir görüntü sıvılaşma probleminin mühendislik hesaplamalarında ne derece bir hassasiyetle dikkate alınması gerektiği gerçeğini gözler önüne sermektedir (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Niigata 1964 Depreminde Sıvılaştan Zemin Görüntüsü

Kaynak: (Küsin, 2009)

Deprem anında meydana gelen kesme dalgaları yayılım yaparak devirsel kesme gerilmelerine sebep olur. Bu kesme gerilmeleri de gevşek, suya doygun, kohezyonsuz zeminlerin hacim olarak küçülmesine neden olur. Bu hacimsel küçülme sırasında su drene olamadığı için boşluk suyu basıncında artış meydana gelir. Meydana gelen bu basınç artışı bir noktadan sonra daneler arasında olan ve taşıma gücünü sağlayan basıncı aşar. Daneler arasındaki temas basıncı ile oluşan taşıma gücü etkeni efektif gerilme kaybolur. Bu etkileşim ile zemin sıvı gibi davranmaya başlar ve sıvılaşma olarak tanımlanan olay meydana gelir.

Bu prensib statik koşullarda, Eşitlik (4.1), dinamik koşullarda ise Eşitlik (4.2) ile ifade edilmektedir.

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_s \quad (4.1)$$

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - (u_s + u_d) \quad (4.2)$$

Eğer $(u_s + u_d) = \sigma_{v0}$ ise, $\sigma'_{v0} = 0$ 'dır.

Burada;

σ'_{v0} : Efektif gerilme, σ_{v0} : Toplam gerilme

u_s : Statik durumdaki boşluk suyu basıncı

u_d : Dinamik durumdaki boşluk suyu basınç fazlalığıdır (Mollamamotoğlu ve Babuççu, 2006).

4.2. Sıvılaşma Türleri

Sıvılaşma türleri sebep oldukları hasar tipine bağlı olarak iki sınıfa ayrılabilir. Bunlar:

- Akma Sıvılaşması
- Yanal Yayılma

Kısaca tanımlanacak olursa sıvılaşma türleri oluşum mekanizmalarına göre değerlendirildiğinde; akma sıvılaşmasında dinamik etkiler altında boşluk suyu basıncı artarak efektif gerilme değeri sıfıra eşitlenir ve taşıma gücü tamamen yok olur. Yanal yayılma da ise boşluk suyu basıncının artmasından dolayı efektif gerilme azalır fakat sıfıra eşitlenmez (Öztürk, 2016).

4.2.1. Akma Sıvılaşması

Akma sıvılaşması türünde akma yenilmelerini oluşturan büyük hasarlar gözlemlenir. Zeminin kendi içerisinde dengesini statik olarak sağlayabilmesi için gerekli kesme gerilmesinin, sıvılaşan zeminin rezidüel dayanımından büyük olması durumunda oluşur. Bu tür sıvılaşma bir kere tetiklendikten sonra devamı statik kesme gerilmeleri tarafından devam ettirilir. Genelde kütlelerin yüksek miktarda deformasyon oluşturması şeklinde görülür (Kramer, 1996).



Şekil 4.2. Aşağı San Fernando Barajı'nda 9 Şubat 1971de meydana gelen depremdeki akma türü sıvılaşma

Kaynak: (Kramer, 1996)

4.2.2. Yanal Yayılma

Yanal yayılma, devirsel mobilite olarak adlandırılmaktadır. Bu sınılaşma türü ile büyük çaplı hasarlar meydana gelmektedir. Yanal yayılma türü sınılaşmanın oluşum mekanizması akma sınılaşmasına göre tam tersidir. Yanal yayılma zeminin kendi içerisinde dengesini statik olarak sağlayabilmesi için gerekli kesme gerilmesinin, sınılaşan zeminin rezidüel dayanımından küçük olması durumunda oluşur. Yanal yayılma ile oluşan zemin deformasyonları, deprem titreşimleri devam ettiği sürece artarak devam eder. Yanal yayılma türü sınılaşma ile oluşan deformasyonlar su ile yapı zemini sınır olan eğimi az veya yüzeyi düz olan zeminlerde oluşur (Kramer, 1996).



Şekil 4.3. 1999 Kocaeli depreminden yanal yayılma türü sınılaşma hasarı görüntüsü

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

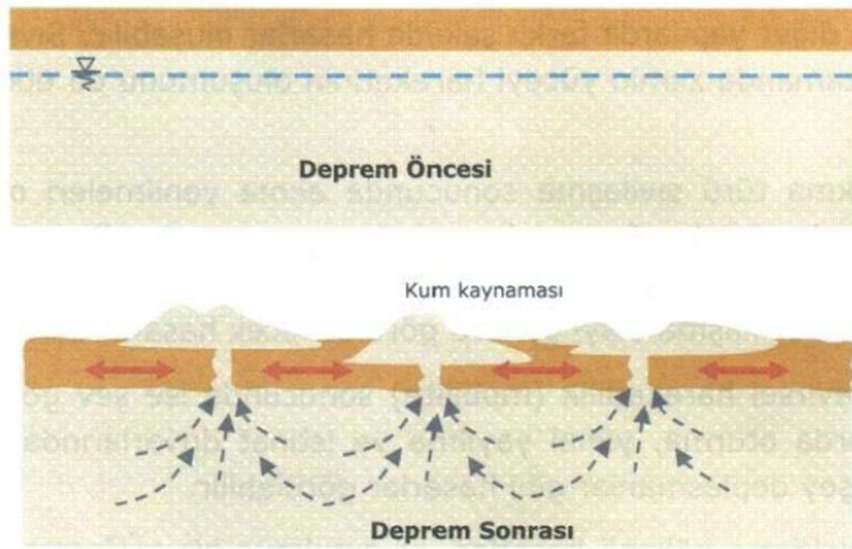
Bu iki tür sınılaşmanın mekanizması değerlendirildiğinde akma türü sınılaşmada efektif gerilme değeri sifira eşitlenmektedir. Yanal yayılma türü sınılaşmada ise efektif gerilme değeri ise efektif gerilme değeri azalmakta fakat sifira eşitlenerek tamamen yok olmamaktadır.

4.3. Sınılaşma Sebebiyle Meydana Gelen Hasar Tipleri

Sınılaşma sebebiyle farklı yapılarda farklı tür hasarlar meydana gelebilir. Akma türü sınılaşmada yenilmeler oluşur. Bunun yanında ağır yapılarda batma ve devrilme, hafif yapılarda yüzme, istinat yapılarında ise yıkılma gibi sonuçlar görülmektedir. Yanal yayılma türü sınılaşmada ise şevli yapıların göçmesi, binalar ve istinat yapılarında yatay ve düşey deformasyona uğrama gibi sonuçlar görülür (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

4.3.1. Kum Kaynaması

Kum kaynaması çoğunlukla sıvılaşma olayı ile birlikte düşünülür. Zemin titreşim hareketleriyle meydana gelen sıvılaşma ile yanal deformasyonunu yapamayacak kadar az bir eğime sahip olduğunda, zemin yanal deformasyonunu rahat yapamadığı için sıvılaşan zemin üzerinde bulunan sıvılaşmayan zemin tabakasını bloklu parçalara ayırarak sıvılaşmış zemin üzerinde hareket ettirebilir. Deprem sırasında artan boşluk suyu basıncının sönmülme ihtiyacı için zemin içerisinde bulunan boşluk suyu yukarıya doğru hareket eder. Bu hareket ile zemin tanecikleri boşluk suyu ile oluşan bloklaşmış parçalar arasından zemin yüzeyine çıkar (Şekil 4.4.). Bu tip sıvılaşma olayı genellikle tek hat üzerinde oluşur. Bu sıvılaşma tipi çatlaklar, yarıklar ve çökme gibi nispeten ufak zararlara sebep olurlar. Şekil 4.5. ve Şekil 4.6'da buna bazı örnekler görülmektedir.



Şekil 4.4. Yüzeyde Kum Konileri Oluşma Biçimi

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)



Şekil 4.5. 2000 Tottori depreminde oluşan kum kaynaması olayı

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçu, 2006)



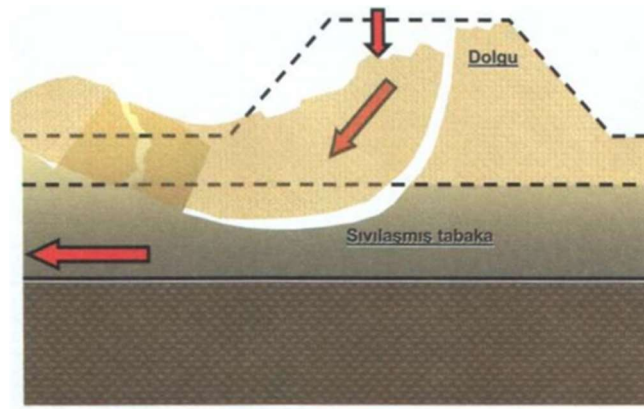
Şekil 4.6. 1999 Chi-Chi depreminde oluşan kum kaynaması

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçu, 2006)

4.3.2. Akma Göçmesi

Bu tür göçmelerle genellikle arazi eğiminin 3 dereceden fazla olduğu hallerde karşılaşılır. Akma göçmeleri sıvılaşma olayının sebep olduğu en feci, ansızın ortaya çıkan, hızlı gelişen ve oldukça geniş şev aşağı doğru hareketlenmesinin görüldüğü hasar tipidirler (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

Akma göçmesi hasar tipinde deformasyon başladıktan sonra herhangi bir ilave titreşim olmasa bile statik kayma gerilme değeri direnç değeri seviyesine düşene kadar veya statik kayma gerilmesine çeşitli etkiler ve sebeplerle zeminin direncinin yükselmesine kadar hareket sürmeye devam eder (Altun vd., 2005).



Şekil 4.7. Akma Göçmeleri Biçimi

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

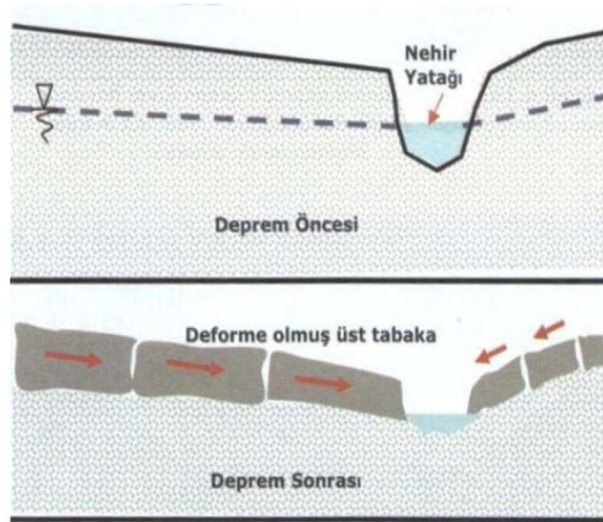


Şekil 4.8. San Francisco Merced Gölü Kıyısında Meydana gelen Akma Kayması

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

4.3.3. Yanal Yayılma

Yanal yayılma tipi sıvılaşma genellikle 0,3 - 3 derece gibi az eğime sahip yamaçlarda veya suya bitişik düzlük zeminlerde gerçekleşmektedir. Bu tip sıvılaşma genelde zeminin yanıl deformasyonunu engelleyecek bütünlükte zemin yapısı olmamasından kaynaklanmaktadır. Yanal yayılma sıvılaşmasının genellikle limanlara, yüzeysel temellere, boru hatlarına, temellere ve gömülü boru hatlarına zarar verdiği görülmüştür. Genel olarak oluşum mekanizması Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Yanal yayılma oluşum biçimi

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

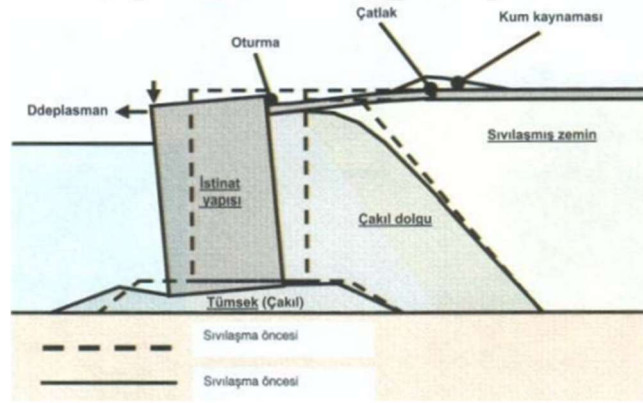


Şekil 4.10. 1989 Loma Prieta depreminden görüntü

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

4.3.4. İstinat Yapısı Yenilmesi

İstinat yapısının altında bulunan temel zemininin ve istinat duvarı önünde bulunan pasif basınç ile destek sağlayan zeminin sıvılaşması ile meydana gelebilir. Veya istinat duvarı arkasında bulunarak aktif basınç sağlayan zeminin içerisindeki boşluk suyu basıncı artışı ile yapıya uygulanan basınç artar ve deformasyona / yenilmeye sebep olur.

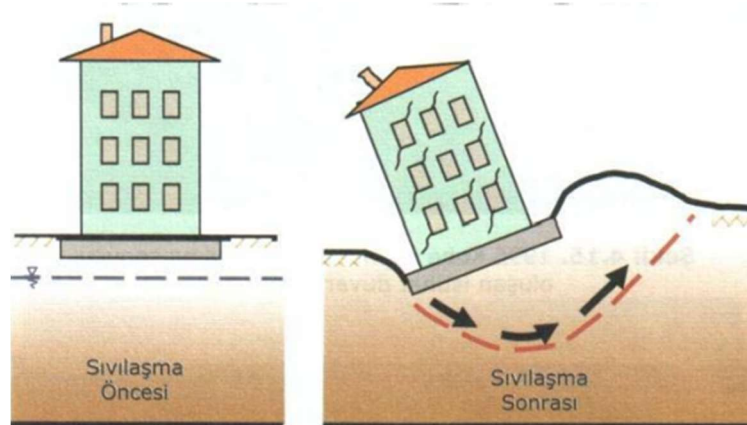


Şekil 4.11. İstinat yapısı yenilme biçimi

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

4.3.5. Taşıma Gücü Kaybı ve Oturma

Sıvılaşan zeminler taşıma gücünü kaybeder ve bunun sonucunda zemin üstünde bulunan yapılarda oturma (düşey deformasyon), batma, yan yatma, ve yıkılma gibi hasar tipleri meydana gelir. Eğer zeminde gerçekleşen sıvılaşma derinlerde yaşanırsa lokal oturma ile zemin üzerinde bulunan yapıda aşırı düşey deformasyon oluşmasına sebep olur.

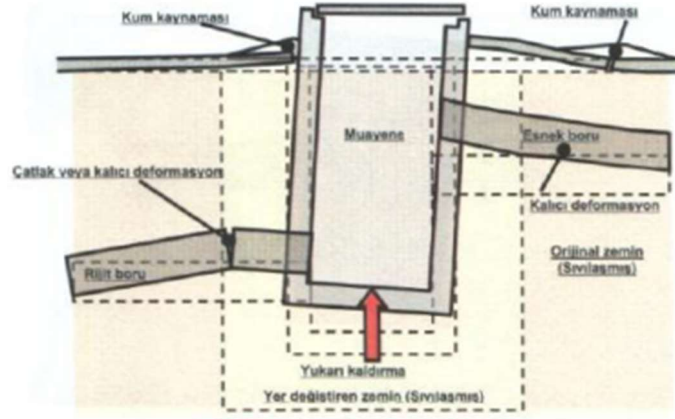


Şekil 4.12. Taşıma Gücü Kaybı Yenilme Biçimi

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

4.3.6. Gömülü Hafif Yapıların Yüzeğe Yükselmesi

Sıvılaşma esnasında artan boşluk suyu basıncının yukarı kaldırma kuvveti ile zemin içerisinde bulunan gömülü hafif yapıların zemin yüzeyine taşınması şeklinde gözlemlenir.



şekil 4.13. Gömülü yapı Yüzeylenmesi Biçimi

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)



şekil 4.14. Sıvılaşma sonucu Muayene bacası yükselmesi rneği 2003 Tokachi-oki depremi

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

4.4. Sıvılaşmaya Karşı Kullanılabilecek Zemin Islah Metodları

Idriss (2002) yapılan incelemeler ve çalışmalar sonucunda sıvılaşma problemine sahip bir inşaat sahasında alınabilecek önlemleri aşağıdaki şekilde sıralamıştır;

- Sıvılaşma problemi olan sahanın kullanılmaktan vazgeçilmesi,
- Proje tasarımının sıvılaşma probleminden gelecek negatif tesirlerden en az etkilenecek şekilde yapılması,
- Zemin ıslah/iyileştirme çalışmaları yapılarak sıvılaşma probleminin bertaraf edilmesi (Küsin, 2009).

Dünya üzerinde yapılaşma ihtiyacının sürekli artması sebebiyle her zaman yeterli mühendislik özelliklere sahip zemin ve inşaat sahaları bulunamamaktadır. Bu sebeple problemlı zeminler üzerinde yapılaşma zorunlu hale gelmektedir. Bu durum bizi problemlı zeminlerin iyileştirilerek kullanılmasına yönlendirmektedir. Yapılan çalışmalarda sıvılaşma problemi olan zeminlerin iyileştirilmesi için farklı yöntemler ve metodlar uygulanarak hayata geçirilmektedir. Zeminlerde sıvılaşmanın azaltılması için uygulanabilecek iyileştirme yöntemleri aşağıdaki şekilde de sıralanabilir;

- Eğer mümkünse sıvılaşma potansiyeli olan zemin tabakasının alınması,
- Sıkıştırma ile boşluk suyunun bertaraf edilmesi,
- Zemin içerisinde bulunan boşluk suyunun dren yöntemiyle bertaraf edilmesi için düşey/yatay direnler kullanılması veya taşkolon teşkil edilmesi,
- Çimento karışımları ile mevcut zemin içerisine jet grout ve derin karıştırma (deep mixing) gibi kolonlar teşkil edilmesi,
- Sıvılaşan tabakanın altındaki sağlam tabakaya oturacak şekilde temel kazıkları teşkil edilmesi.

Sıvılaşma probleminin önüne geçilebilmesi için sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü hesaplanır. Bu faktörün arttırılabilmesi için uygulama metodolojisi Tablo 4.1'de gösterildiği gibi dört grupta sınıflandırılmaktadır.

Tablo 4.1. Sıvılaşmaya Karşı Temel Mühendisliği Uygulamaları

Metodoloji	Prefabrik Dren	Vibroflotasyon Vibrokompaksiyon	Kompaksiyon Kazıkları	Taş Kolonlar (5)	Dinamik Kompaksiyon (4)	Derin Karıştırma	Jet Grout
Aşırı boşluk suyu basıncı oluşumuna mani olunması	√	-	-	-	-	-	-
Zeminin yerinde sıkıştırılması	-	√(2)	√	√(3)	√	-	-
Zemin içinde rijit kolon oluşturulması suretiyle kayma gerilmelerin alınması	-	-	√	-(1)	-	√	√
Zeminin yanal hareketine mani olmak üzere zemin içinde zemini hapsedecek elemanların teşkili	-	-	-	-	-	√	√

(1) İhmal edilebilir

(2) Yalnız kumlarda, ince dane < 5%

(3) İnce daneli zeminlerde, 5% < ince dane < 35%

(4) Enerjinin daha derine iletilmesi için taş keson uygulaması

(5) Ucu kapalı tapa ile boru çakılarak veya vibroreplacement metodu ile

Kaynak: (Durgunoğlu, 2004)

Farklı zemin iyileştirme yöntemlerinin arasından seçim yapılmasında asıl etkili olan kriterler iyileştirme yönteminin uygulama kolaylığı, saptanan problemin bertaraf edilmesindeki etkisi, uygulama maliyeti ve çevresel duyarlılığı şeklinde sıralanabilir. Zemine bağlayıcı şerbetlerle enjekte yöntemi ile imalatı gerçekleştirilen jet grout ve derin karıştırma zemin iyileştirme yöntemleri taşıma gücünün artırılması gerektiği ve inşaat zamanının kısa süreli olduğu hallerde diğer yöntemlere nazaran daha çok tercih edilmektedir (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

4.5. Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler

4.5.1. Deprem Şiddeti, Büyüklüğü Ve Süresi

Sıvılaşma olayının oluşumunu etkileyen çeşitli etkenler vardır. Bu etkenlerden bir kısmını zeminin mevcut mühendislik özellikleri oluşturursa da diğer kısmını arazi deneyleri, gözlemleri ve dış etkenler olarak adlandırılacak faktörler oluşturmaktadır. Deprem titreşimleri ve bu titreşimlerin şiddeti ile süresi de sıvılaşma olayını meydana getiren en önemli faktörlerdendir.

Sıvılaşmanın gerçekleşmesi için en önemli faktör olan bir deprem titreşimine, yer sarsıntısına yani bir sismik enerjiye ihtiyaç vardır. Kesme deformasyonları ile oluşan zeminin büzülmesi ve boşluk suyunun drene olamadığı için oluşan aşırı boşluk suyu basıncının oluşması, depremin oluşturduğu sarsıntı titreşimlerinin şiddetine ve süresine bağlıdır. Sıvılaşma problemi olan zeminlerde maruz kalınan depremin süresi ve şiddeti arttıkça zeminde sıvılaşma olayının gerçekleşme potansiyeli de artmaktadır. Büyük yer ivmelerinin ve uzun süreli yer sarsıntılarının sebebi büyük depremlerdir (Day, 2002).

Yapılan çalışmalarda zeminde sıvılaşma olayının oluşabilmesi için sarsıntı değerlerinde gerekli bir eşğin olduğu tahmin edilebilmektedir. Tahmin edilen bu eşik değerleri deprem sırasında oluşan maximum yatay yer ivmesi değeri (a_{max}) için 0,10g, yerel büyüklük değeri (M_L) için ise yaklaşık 5 dir (İşirara, 1985). Bu sebeple maximum yatay yer ivmesinin 0,10g değerinden ve yerel büyüklük değerinin 5 den daha küçük olduğu yerlerde sıvılaşma analizine genellikle gerek yoktur (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

4.5.2. Yeraltı Su Seviyesi

Sıvılaşma olayı en elverişli olarak yeraltı su seviyesinin altında olan ve yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyine yakın olduğu zeminlerde yaşanmaktadır. Yeraltı su seviyesi altında olmayan ve suya doymun halde bulunmayan zeminlerde sıvılaşma olayı mümkün değildir.

Yeraltı su seviyesinin sürekli değişkenlik gösterdiği zeminlerde su seviyesinin yükselip alçalmasına paralel olarak sıvılaşma potansiyeli de artar ve azalır. Böyle bir durumda sıvılaşma analizlerinde yeraltı su seviyesinin geçmişte ulaşılmış en yüksek seviyesi yapılacak hesaplamalarda dikkate alınır (Division of Mines And Geology, 1997).

4.5.3. Zemin Tipi

İshihara (1985) sıvılaşma potansiyeli en yüksek zemin türleri için şöyle bir yorumda bulunmuştur: “ *Depremler esnasında zemin sıvılaşması ile ilişkili tehlikenin ince ve orta kum ile düşük plastisiteli ince daneler içeren kum çökellerinde karşılaştığı bilinmektedir. Bununla birlikte, sıvılaşmanın zaman zaman çakıllı zeminlerde de olduğu durumlar rapor edilmiştir.* ”

Bu yoruma göre sıvılaşmaya duyarlı zeminler kohezyonsuz zeminler olarak en az dirençliden en çok dirençliye doğru şu şekilde sıralanabilir; temiz kumlar, plastik olmayan siltli kumlar, plastik olmayan siltler ve çakıllar (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

Çakıllı zeminler ince daneli zeminler ile karşılaştırıldığında sismik yükler altında boşluk suyu basıncını sönmüleyebilmektedir ve genellikle doğada gevşek halde bulunmadıklarından dolayı sıvılaşmaya yatkın değildirler. Fakat bazı durumlarda deprem etkisiyle çakıllı zeminlerde sıvılaşmaya rastlanabilmektedir. Bu durumlar şu şekilde sıralanabilir (Öztürk, 2016)

- Çakıl tabakasının kendisine göre geçirimsizliği daha az tabakalar arasında konumlanmasıyla boşluk suyu basıncı sönmelenememesi
- Çakıl danelerinin arası ince daneli malzemeler ile dolu bulunduğu boşluklu yapı kaybolduğu için boşluk suyu basıncı sönmelenememesi
- Çakıl tabakasının fazla kalın olması ile drenaj mesafesinin uzaması

Seed vd. (1983) sıvılaşabilecek zemin için ilk çalışmalarını yaptığı ve daha sonrada geliştirilen kriter aşağıdaki gibidir.

- 0,005 mm den daha ince daneli zemindeki kuru ağırlıkça yüzdesi 15 den daha az olmalıdır (Yani 0,005 mm de geçen yüzde < 15).
- Zeminin likit limit değeri 35 den daha küçük olmalıdır.
- Zeminin su muhtevası, likit limitin 0,9’ undan daha büyük olmalıdır.

Bolunger ve Idriss (2006) ince daneli zeminlerde plastisite indisi değeri 7’ den küçük ise zeminin sıvılaşabileceğini belirtmiştir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

4.5.4. Rölatif Sıklık

Zemin danelerinin boyut ve şekilleri zeminin deformasyon özelliğini etkileyen unsurlardandır. Deformasyon özelliği de zeminde sıvılaşma için gereken aşırı artan boşluk suyu basıncını etkileyen bir unsurdur. Sıvılaşma olayının gerçekleşmesi için en önemli faktör olan ve zeminin boşluk oranı değerleri ile elde edilen rölatif sıklık değeridir ve Eşitlik (4.3)'de ki gibi ifade edilir (Mollamahmutoglu ve Babuçu, 2006).

$$D_r = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \quad (4.3)$$

Burada;

D_r ; rölatif sıklık,

e_{max} ; zeminin en gevşek durumdaki boşluk oranı,

e_{min} ; zeminin en sıkı durumundaki boşluk oranı, e_0 ; zeminin tabii boşluk oranıdır.

Tablo 4.2'de rölatif sıklık değerlerine göre sınıflandırması yapılan zeminin sıklık ve gevşeklik değerlendirilmesi gösterilmiştir. Bu değerlendirmeye göre rölatif sıklık değeri %65' den daha büyük olan zeminlerde sıvılaşma olayı gerçekleşmeyeceği yorumu yapılabilir. Nitekim Niigata 1964 depreminde sıklık değeri % 50 olan kumlu zeminlerde sıvılaşma olayı yaşanmışken rölatif sıklık değeri %70 civarında olan kumlu zeminde sıvılaşma olayı yaşanmamıştır (Seed ve Idriss, 1971).

Tablo 4.2. Rölatif sıklığa göre zeminlerin sınıflandırılması

Rölatif Sıklık %	Zeminin Sıklık Durumu
0-15	Çok gevşek
15-35	Gevşek
35-65	Orta sıkı
65-85	Sıkı
85-100	Çok Sıkı

Tablo 4.3'de ise maximum deprem ivmesi göz önünde bulundurularak zeminin rölatif sıklığına göre sıvılaşma olayı gerçekleşmesi riski yüksek, orta ve düşük olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre deprem anında oluşan ivme değeri yükseldikçe sıvılaşma olay meydana gelme riski değerlendirilmesindeki rölatif sıklık değeri de artmaktadır.

Tablo 4.3. Farklı ivme değerlerinde sıvılaşma riski taşıyan bölgelerdeki rölatif sıkılık değerleri

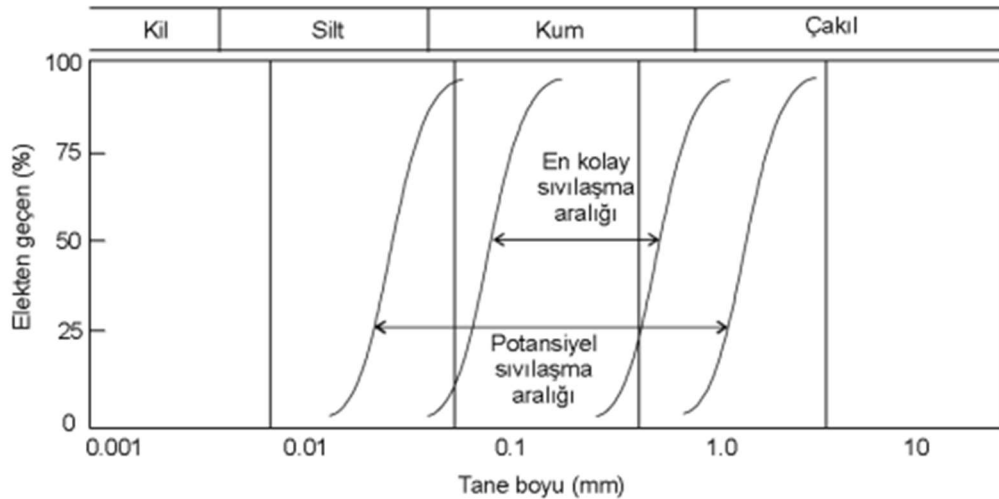
a_{max}	Sıvılaşma Riski		
	Yüksek	Orta	Az
0,10 g	$Dr < 33$	$33 < Dr < 54$	$Dr > 54$
0,15 g	$Dr < 48$	$48 < Dr < 73$	$Dr > 73$
0,20 g	$Dr < 60$	$60 < Dr < 85$	$Dr > 85$
0,25 g	$Dr < 70$	$70 < Dr < 92$	$Dr > 92$

Kaynak: (Seed ve Idriss, 1971).

4.5.5. Dane Boyu ve Dağılımı

Üniform derecelenmiş plastisitesi düşük zeminlerde dane dizilimi dengesiz olduğundan sıvılaşma olayına eğilimleri iyi derecelenmiş zeminlere göre daha fazla olmaktadır. İyi derecelenmiş zeminlerde büyük daneler arasını küçük daneler doldurur böylelikle büyük daneler arasındaki doluluk boşluk suyu basıncındaki aşırı artışların önüne geçer ve zeminin hacimsel olarak büzülmesini engeller. Bu iyi derecelenmiş zeminlerde sıvılaşma eğiliminin daha az olmasına sebep olur (Yüksel vd., 2008).

Sıvılaşma olayının gerçekleşme durumunun daha çok üniform derecelenmiş granüle zeminlerde olduğunu gösteren değerlendirme Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.15. Zeminlerde sıvılaşabilir granülometri aralığı

Kaynak: (Handbook on liquefaction Remediation on Reclaimed Land, 1997)

4.5.6. Zeminin Yaşı

Bir zemin tabakasının yeni çökelmiş olması veya çökelerek oluşma süresi üzerinden geçen zaman sıvılaşma olayına karşı direncini belirlemede önemli bilgiler verebilmektedir. Buna göre yeni çökelmiş bir zemin tabakası çökme ve oluşma zamanı daha eski olan bir zemin tabakasına göre sıvılaşmaya daha duyarlıdır. Bunun sebebi ise oluşan zeminin zamanla daha iyi sıkışması ve daha duraylı bir dizilime sahip olmasından ileri gelmektedir. Ayrıca zemin içerisinde daneler arasında temas ile zamanla çimentolaşma da meydana gelebilmektedir. Bu da bize gösteriyorki jeolojik yaşı büyük olan zeminler sıvılaşmaya karşı daha dirençlidir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

4.5.7. Drenaj Şartları

Sıvılaşma olayının gerçekleşmesinde en büyük etken boşluk suyu basıncının aşırı derecede artmasıdır. Eğer titreşim anında boşluk suyu basıncını azaltabilecek yüksek geçirimli çakıl drenler veya çakıl tabakalara bitişiklik var ise bu durum sıvılaşma potansiyelini azaltıcı etki gösterir.

4.5.8. Çevre Basınçları

Bir zemine etkiyen ve zeminin maruz kaldığı çevre basıncı ne kadar fazla ise o zeminin sıvılaşmaya karşı direnci o kadar fazla olur. Çevre basıncını yükselten etkiler şu şekilde sıralanabilir;

- Derin yeraltı suyu seviyesi
- Zemin yüzeyinden derinlerde bulunan zemin tabakası
- Zemin üzerinde bulunan sürşaj yükleri.

Arazilerde yapılan deneyler sıvılaşma olayının genellikle 15 m derinliğe kadar gerçekleştiğini göstermektedir. Fakat bu durum 15m derinlik altında sıvılaşma analizlerinin yapılmayacağı anlamına gelmemektedir. Sıvılaşma analizinin hangi derinlikte sonlandırılması gerektiği büyük bir mühendislik yargısı ve tecrübe gerektirir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

Mollamahmutoğlu ve Babuçcu 2006, sıvılaşma direnci az zemin türünü ve sıvılaşmaya en duyarlı saha koşullarını aşağıdaki şekilde belirlemiştir;

- “ Dış merkeze veya büyük bir depremin fay yarıtlma yerine yakın saha,
- Yeraltı suyu seviyesinin yer yüzeyine yakın olduğu saha,

- *Çok gevşek veya gevşek halde, zemin daneleri arasında çimentolanma olmayan, daha önceden yüklemeye veya sismik sarsıntıya maruz kalmamış, yakın zamanda çökelmiş, üniform dane dağılımına sahip ve daneleri yuvarlak kumdan oluşan zemin. ”*

4.6. Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi

Zeminlerin sıvılaşmaya duyarlı olması, herhangi bir deprem kuvvetine maruz kalması halinde sıvılaşma olayının her zaman meydana geleceğini göstermez. Sıvılaşmanın meydana gelmesi için sıvılaşmayı başlatacak bir gerilmenin, tetikleme oluşması gerekmektedir. Bu gerilmeyi ve tetikleme tanımlamak için bir çok yöntem geliştirilmiştir.

Sıvılaşma potansiyelinin analiz edilmesindeki yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar; devirsel gerilme oranı ve alternatif devirsel deformasyon yaklaşımlarıdır. Bunların yanı sıra sönümlenmiş enerji yaklaşımı ve efektif gerilmeye dayalı tepki analizi de kullanılan yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde her farklı yöntemin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Fakat sıvılaşma probleminin bulunduğu önem arz eden çalışma sahalarında sıvılaşma analizlerinin yapılması için birden fazla yöntemden yararlanarak aralarında karşılaştırma yapılması ve oluşabilecek kritik duruma göre sonuca varılması yerinde olacaktır. Bu çalışma kapsamında pratikte en fazla tercih edilen ve basit bir yöntem olan devirsel gerilme oranı yaklaşımı üzerinde durulacaktır.

4.6.1. Standart Yöntem-Seed ve Idriss (1971)

1971 yılında yayınlanan yaklaşık yöntem sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde standart yöntem olarak kabul görmüştür ve basitleştirilmiş yöntem olarak da anılmaktadır. Bu yöntem sıvılaşma olayının anlaşılmasında büyük bir role sahiptir. Bu yöntem genellikle sıvılaşmayı tetikleyen etkilerin tespitini hedeflemiş ve arazi deneyleri ile laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerle geliştirilen amprik bir hesap yöntemi olmuştur.

Zeminlerin sıvılaşma direncinin belirlenmesinde iki değişkenin hesaplanması gerekmektedir. Bunlar;

- Zemin tabakasındaki sismik talebi ifade eden Devirsel Gerilme Oranı (DGO),
- Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini gösteren Devirsel Direnç Oranı (DDO)’dır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

Günümüzde de yaygın olarak kullanılan bu yöntem standart penetrasyon deneyi (SPT) verilerinden yararlanarak incelenen zeminde sıvılaşma olayı gerçekleşmesinin analizinde aşağıda bulunan işlem adımlarını izlemektedir;

- Zeminin sıvılaşma potansiyelinin bulunup bulunmadığı tespit edilir,
- Zeminde yeraltı su seviyesinin ve ilerleyen süreçte bu seviyenin değişebilme durumu değerlendirilir,
- Depremden dolayı oluşacak devirsel gerilme oranı hesaplanır,
- Deney verileri kullanılarak devirsel direnç oranı hesaplanır,

Bu hesaplanan devirsel direnç oranı (DDO) ve devirsel gerilme oranı (DGO) arasında ki oran Eşitlik (4.4) İle hesaplanarak Emniyet Faktörü (EF) elde edilir. Elde edilen değer 1 den küçük olması durumunda zeminde sıvılaşma gerçekleşeceği kabul edilir (Day, 2002).

$$EF = \frac{DDO}{DGO} \quad (4.4)$$

Seed ve Idriss (1982), bu yönteme ilave olarak emniyet faktörünün 1-1,2 değerleri arasında değerler alması durumunda da sıvılaşma riskinin bulunduğunu belirtmişlerdir.

4.6.2. Devirsel Gerilme Oranı

Seed ve Idriss (1971) yapılan çalışmalarla devirsel gerilme oranının kayma gerilmesi ile meydana geldiği kabulüyle deprem sırasında oluşan maximum kesme gerilmesini ifade eden formülü geliştirmişlerdir. Daha sonra 1979 yılında Seed yayınladığı makalesinde (Seed,1979a) formülü efektif gerilme ile normalize ederek sıvılaşmaya neden olacak kesme gerilmeleri devirsel gerilme oranı cinsinden ifade edilmeye başlanmıştır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

$$DGO = 0,65 \frac{a_{maks}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d \quad (4.5)$$

Burada;

a_{maks} : Deprem sırasında zemin yüzeyinde oluşan maksimum yatay yer ivmesi

g : Yerçekimi ivmesi

σ_{v0} : Düşey gerilme

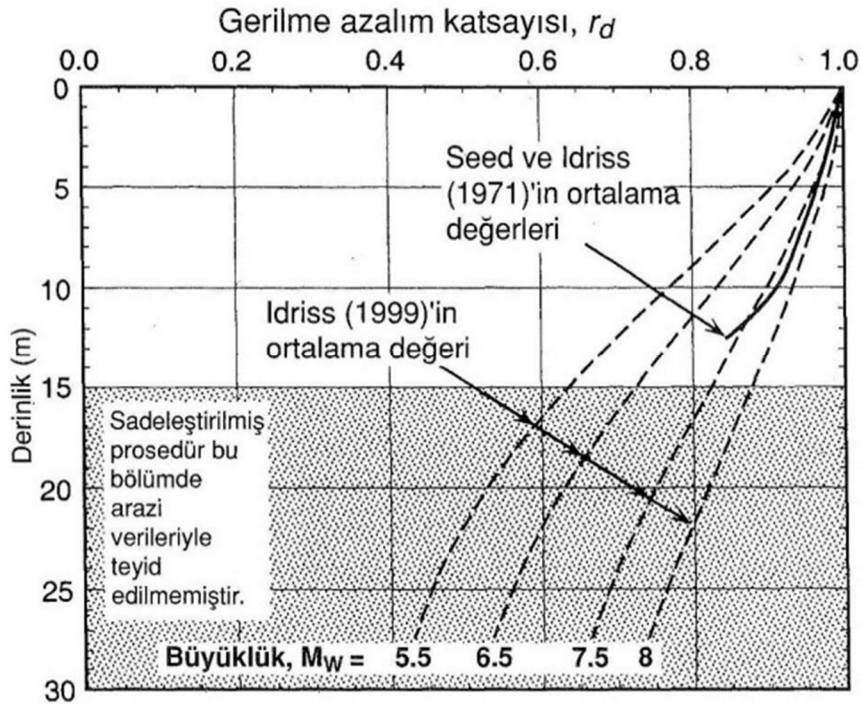
σ'_{v0} : Düşey efektif gerilme

r_d : Gerilme azaltma katsayısı olarak ifade edilmektedir.

Eşitlikte bulunan düşey gerilme ve düşey efektif gerilme değerleri zemin birim hacim ağırlığının doğal ve efektif halinin zeminin yüzeyinden itibaren derinlik değeri ile çarpılması ile elde edilir. Burada bulunan gerilme azaltma katsayısı ise şu şekilde ortaya çıkmıştır;

Zemin rijit bir kütle gibi düşünüldüğünde maksimum yer ivmesine sahip bir zemin kolonunun tabanındaki gerilme zemin birim hacim ağırlığı ile zeminden itibaren yükseklik değerinin çarpılması ile elde edilebilecektir. Fakat zemin rijit bir kütle gibi davranmaz aksine deforme olabilen bir yapıya sahiptir. Bu sebeple belli bir derinlikteki maksimum kesme gerilmesi rijit halde düşünülen zemin kütlelerinde oluşacak maksimum kesme gerilmesinden daha düşük bir değerde olacaktır. Bundan dolayı deprem anında oluşacak gerçek kesme gerilmesini temsil etmesi için tahmin edilen kesme gerilmesi değeri gerilme azaltma katsayısı ile çarpılır. Bu katsayı r_d ile ifade edilir (Seed ve Idriss, 1971).

Gerilme azaltma katsayısı değerinin belirlenmesi için farklı grafiksel ve işlemsel yöntemler önerilmiştir. Şekil 4.15’de belirtilen grafiksel yöntem ile gerilme azaltma katsayısı derinliğe bağlı olarak bulunabilmektedir.



Şekil 4.16. Düz veya Kısmen eğimli Zeminlerde Gerilme Azaltma Katsayısının Deprem Şiddeti ve Derinlikle Değişimi

Kaynak: (Seed ve Idriss, 1971)

Şekil 4.15’de verilen grafiksel olarak verilen eğrinin yanısıra Liao ve Whitman (1986) gerilme azaltma katsayısının kritik olmayan projelerde aşağıda verilen eşitlikler ile de hesaplanabileceğini belirtmişlerdir;

$$r_d = 1,0 - 0,00765z \quad ; z \leq 9,15 \text{ m} \quad (4.6)$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267z \quad ; 9,15 < z \leq 9,15 \text{ m} \quad (4.7)$$

Eşitlikteki (z) değeri zemin yüzeyinden itibaren metre cinsinden derinliktir.

Bazı araştırmacılar derinliğin daha fazla olduğu çalışmalarda gerilme azaltma faktörünün hesaplanabilmesi için farklı çalışmalar yapmışlardır (Robertson ve Wride,1998). Fakat 15m den daha fazla olan derinliklerde yaklaşık/standart yöntemin dışına çıkıldığından gerilme azaltma katsayısının hesaplanması anlamsız hale gelmektedir. Eşitlik (4.8) ile hesaplanan gerilme azaltma katsayısı değeri arazi şartlarında esneklik farklılık gösterdiğinden dolayı bulunabilecek r_d değeri hesaplanan gerilme azaltma katsayısı değerlerinin ortalamasıdır (Youd vd., 2001).

Youd vd., 2001 hesap kolaylığı açısından Şekil 4.15’de bulunan eğriyi ifade edecek aşağıdaki eşitliği ortaya koymuştur.

$$r_d = \frac{1,000 - 0,4113z^{0,5} + 0,04052z + 0,001753z^{1,5}}{1,000 - 0,4177z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,00} \quad (4.8)$$

Yapılan çalışmalardan eğri ile ve iki farklı eşitlik kullanılarak elde edilen gerilme azaltma katsayılarının arasındaki fark sıradan mühendislik uygulamalarında kabul edilebilir düzeyde olduğu belirtilmiştir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

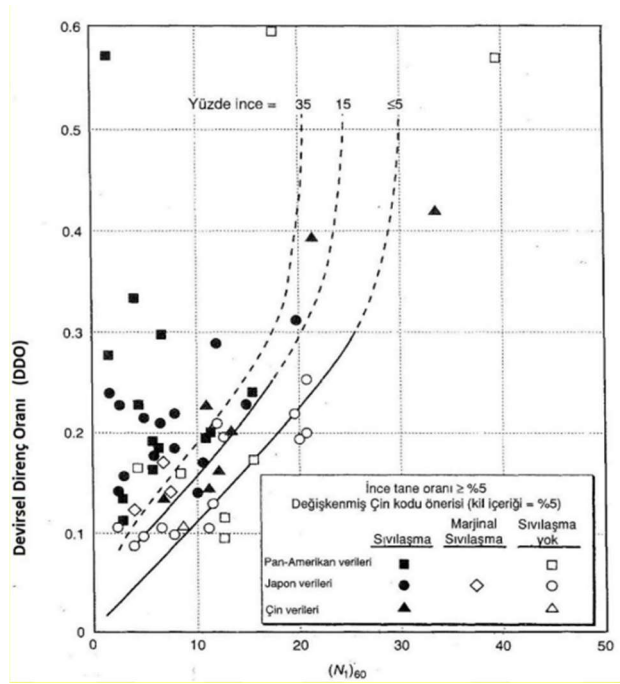
a_{maks} yani zemin yüzeyinde oluşabilecek en büyük yatay yer ivmesi ise gelecekte oluşabilecek bir depremin yatay yer ivmesi değeridir. Gelecekte oluşacak depremin ivme değerini tahmin etmek mümkün olmayacağından dolayı bu değer önceki deprem ve faylarda yapılan çalışmalara dayandırılarak bulunabilmektedir.

4.6.3. Devirsel Direnç Oranı

Devirsel direnç oranı, zeminin sıvılaşmaya karşı direncini ifade etmektedir. Zeminin sıvılaşma direnci ise zeminde sıvılaşma olayı gerçekleşmeden önceki halinde şartların zeminin yenilmeye uğrayacağı noktaya uzaklığına ve zemini yenilme noktasına ulaştırmak için gerekli yüklemenin durumuna bağlıdır. Devirsel direnç oranı standart penetrasyon deneyi, konik penetrasyon deneyi ve kesme dalgası hızı deneyleri gibi farklı yöntemlerle elde

edilebilmektedir. Bu çalışmada devirsel direnç oranının tespit edilmesi standart penetrasyon deneyi verileri ve en yaygın olarak kullanılan Seed ve Idriss (1971) yöntemi ile sağlanacaktır.

Standart penetrasyon deneyi, zemin sıvılaşma direncini ifade eden devirsel direnç oranının elde edilmesinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntemin yaygın kullanılmasının sebebi de zemindeki sıkılık, gerilmeye maruz kalma, uğranan sismik deformasyon, aşırı konsolidasyon oranı gibi özelliklerin sıvılaşma direncini arttırmasıdır. Bu özellikler aynı zamanda zeminin standart penetrasyon direncini de arttırmaktadır. Seed vd.(1985) yaklaşık 7,5 büyüklük değerine sahip depreme maruz kalarak sıvılaşan ve sıvılaşmaya uğramayan temiz ve siltli kumlu zeminlerde standart penetrasyon deneyi darbe sayılarını kullanarak sıvılaşan zeminlerde sıvılaşma meydana gelmesi için gerekli en düşük devirsel gerilme oranlarını tespit ederek bir grafik ortaya çıkartmışlardır (Şekil 4.16.).



Şekil 4.17. M=7,5 için siltli kumlarda devirsel direnç oranı ile $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişki

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006)

Bu grafikte $(N_1)_{60}$ değeri 100 kpa'lık üst tabaka yüküne ve %60 enerji oranına göre düzeltilmiş standart penetrasyon sayısını ifade etmektedir. Grafikteki eğriler görüldüğü üzere ince tane oranı yüzdelere göre oluşturulmuştur. İnce tane oranı %5 ve daha az olan kumlar temiz kum olarak değerlendirilmektedir.

Youd vd. (2001) sınılaşma direncinin belirlenmesinde Şekil 4.16'da bulunan temiz kum eğrisi yerine kullanılabilir bir denklem ortaya koymuşlardır (Eşitlik (4.9)). Bu denklem $(N_1)_{60} < 30$ değerlerine sahip temiz granüler zeminler için geçerlidir. Çünkü bu değere sahip granüler zeminler çok sıkı kabul edilirler ve sınılaşma gerçekleşmeyecek zeminler olarak nitelendirilirler (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

$$DDO = \frac{1}{34-(N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{(10(N_1)_{60}+45)^2} - \frac{1}{200} \quad (4.9)$$

Seed vd. (1985) zemin içerisinde bulunan ince dane oranının zeminin sınılaşma direncinin artmasına yönelik etki ettiğine dair çalışmalar yapmışlardır ve ince dane oranının sınılaşma direncinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu etkinin belirlenebilmesi için $(N_1)_{60}$ değerinde düzeltme sağlayan Eşitlik (4.10)'u geliştirmişlerdir (Youd vd., 2001).

$$(N_1)_{60tk} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (4.10)$$

$(N_1)_{60tk}$; zeminde bulunan ince tane oranına göre düzeltilmiş SPT değerini ifade etmektedir. α ve β ise ince tane düzeltme katsayılarıdır ve aşağıdaki koşullar ile belirlenmektedir. İTO ise; ince tane oranının yüzde değerini ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} \alpha &= 0 && ; \text{İTO} \leq \%5 \\ \alpha &= \text{Exp}[1,76 - (190/\text{İTO}^2)] && ; \%5 < \text{İTO} < \%35 \\ \alpha &= 5,0 && ; \text{İTO} \geq \%35 \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \beta &= 1,0 && ; \text{İTO} \leq \%5 \\ \beta &= [0,99 + (\text{İTO}^{1,5} / 1000)] && ; \%5 < \text{İTO} < \%35 \\ \beta &= 1,2 && ; \text{İTO} \geq \%35 \end{aligned} \quad (4.12)$$

4.6.4. Magnitüd Düzeltme Faktörü

Devirsel direnç oranının belirlenmesinde kullanılan denklemler ve grafiklerde bulunan eğriler $M=7,5$ büyüklüğündeki depremler baz alınarak ortaya konulmuştur. Bu hesaplamaların kullanılacağı zeminlerin farklı deprem büyüklüklerine de maruz kalabileceğinden dolayı elde edilen devirsel direnç değerlerinin magnitüd düzeltme faktörü (MDF, MSF) değeri ile çarpılarak $M=7,5$ büyüklüğündeki deprem değerlerine göre düzenlenmesi gerekmektedir.

Magnitüd düzeltme faktörünün (MDF) elde edilmesi için bir çok araştırmacı çalışmalar yaparak farklı değerler ortaya koymuştur. I. M. Idriss, yaptığı çalışma ile kullanımı daha basit ve açık olan Eşitlik (4.13)'ü ortaya koymuştur.

$$MDF = 10^{2,24} / M^{2,56} \quad (4.13)$$

Burada M; depremin büyüklüğünü / magnitüdünü ifade etmektedir.

Eğer farklı deprem büyüklüklerinde değerlendirmeler yapılacak olursa Emniyet Faktörü (EF) Eşitlik (4.14) ile elde edilecektir.

$$EF = \left(\frac{DDO}{DGO} \right) MDF \quad (4.14)$$

4.6.5. Chinese Kriteri

Seed ve Idriss (1971) zeminlerde sıvılaşma riskinin tahmin edilebilmesi için ince daneli zeminlerde geçerli olan şu kriterleri ortaya koymuşlardır;

Kil içeriği $\% (5\mu\text{m}) < 15\%$

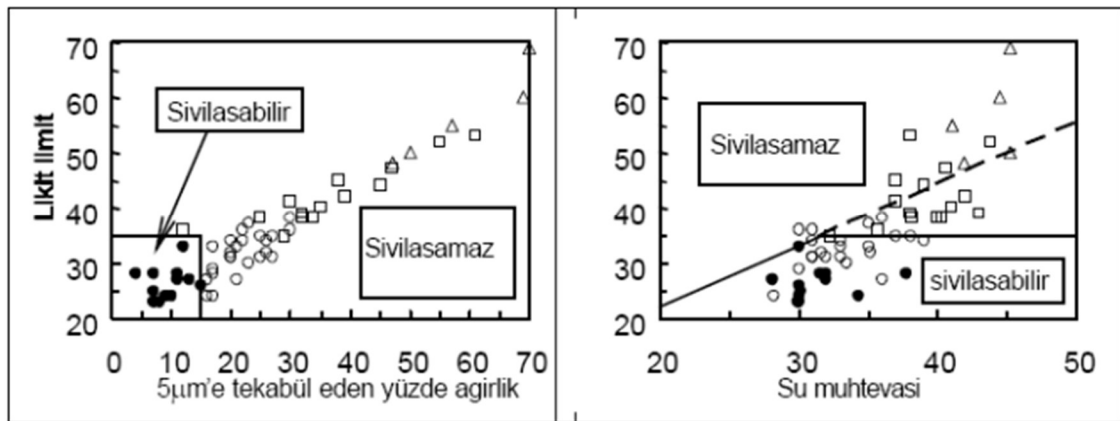
Likit limit $< 35\%$

, ise

Sıvılaşabilir

$w_n > 0.9w_L$

Şekil 4.16'da Chinese Kriterine ait grafik penetrasyonu gösterilmiştir. Burada; $PI < 12$ olan numuneler daire ile, $12 < PI < 20$ olan numuneler üçgen ile gösterilmiştir. Dolu daireler Chinese Kriterinin her üç kriterini de sağlayan numunelerdir. (Küsin, 2009).



Şekil 4.18 Chinese Kriteri nin Grafik Presentasyonu

Kaynak: (Sancio vd., 2003)

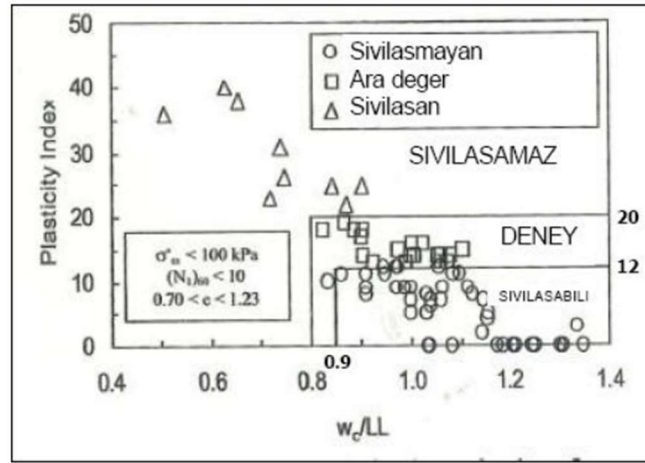
Fakat Adapazarı depreminde (1999) yukarıdaki geliştirilen Çin kriterine silt ve düşük plastisiteli killerin uymadığı halde bu zeminlerde sıvılaşma meydana geldiği görülmüştür. Bu durum üzerine müşterek çalışmalar yapılmış ve yapılan çalışmalar sonucunda Adapazarı killерinin Çin Kriterini sağlamadığı belirlenmiştir (Durgunoğlu, 2004).

Yapılan çalışmalarla yeni bir kriter önerilmiştir (Bray vd., 2004). Bu kritere göre;

$I_p < 12$ ve $w_n / w_L > 0,9$; Sıvılaşabilir

$12 < I_p < 20$ ve $0,8 < w_n / w_L < 0,9$; Ara durum, deney yapılmalı

$I_p > 20$ ve $w_n / w_L < 0,8$; Sıvılaşmaz



Şekil 4.19. Yeni Kriter

Kaynak: (Bray vd., 2004)

5. JET GROUT İLE SIVILAŞMA RİSKİNİN ORTADAN KALDIRILMASI HESAP YÖNTEMİ

Arazi ve labaratuvar deneylerinden elde edilen verilerle yapılan analizlerden yola çıkarak zeminin sıvılaşma potansiyeline sahip olup olmadığı belirlenir. Sıvılaşma potansiyeli bulunan zeminlerde zeminde oluşacak deformasyon değerleri ile zeminin taşıma gücü göz önünde bulundurularak jet grout kolonlarının projelendirmesi şu sıralamayla devam eder (Öztürk, 2016)

- Sıvılaşmanı önüne geçebileceği tahmin edilen kolon çapı ve aralığı belirlenerek iterasyona başlanır,
- Jet grout kolonlarının oluşacak kayma gerilmelerini karşılayacak yeterlilikte olup olmadığına emin olmak için kesme güvenliği kontrolü yapılır,
- Kesme güvenliği kontrolünü sağlamanın ile düşey deformasyon ve taşıma gücü sınırları kontrolleri yapılır,
- Bu kontrolleri sağlayacak şekilde optimum kolon aralık ve çapları belirlenir.

Sıvılaşma probleminin önüne geçilmesi için zeminlerde değerlendirme; açılan sondaj kuyularında en elverişsiz ve en düşük emniyet faktörüne sahip derinlikte, profilde oluşacak kayma gerilmelerine göre yapılmalıdır.

5.1. Zemin Maksimum Kayma Modülünün Belirlenmesi

Yüksek kayma dayanımına sahip rijit kolonlar ile hesap yapılabilmesi için ilk adım maksimum kayma modülünün belirlenmesi ve uygun giriş deprem büyüklüklerinin tespit edilmesidir. Bunun için aşağı kuyu (Down-Hole) veya 'Suspension PS Logging' yöntemleri ile doğrudan; veya SPT, CPT, PMT gibi arazi deneyleri ile dolaylı olarak zemin kayma hızı (V_s) profilinin tayin edilmesi gerekir. Bunun için Eşitlik (5.1) kullanılabilir (Ohta ve Goto, 1978).

$$V_s = 62,14 \times N^{0,219} \times H^{0,230} \times F \quad (5.1)$$

Burada;

N: SPT darbe sayısı (düzeltilmemiş),

H: Tabaka derinliği,

F: Zemin tipine bağlı düzeltme faktörünü ifade etmektedir.

F düzeltme faktörü Killi zeminler için 1,000 , ince kumlarda 1,091, orta daneli kumlarda 1,029, kalın daneli kumlarda 1,073, kum ve çakıllarda 1,151, çakıllı zeminlerde 1,485 değerini alır (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

5.2. Birim Alan Oranı Metodu ve Deprem Kayma Gerilmelerinin Dağılımı

Sıvılaşma problemi olduğu saptanan zeminde jet grout ile yapılacak iyileştirme çalışmalarının projelendirilmesinde ilk adım tasarımcının tecrübesine bağlı olarak kolon çapı ve aralığı belirlenerek iterasyona başlanır. Eşitlik (5.2)'de verilen kayma modülü eşitliğinde bulunan tek eksenli silindirik basınç deneyi mukavemeti (f_{JG}) değeri başlangıçta daha önce benzer sahalarda ve uygulamalarda elde edilmiş değerlerden yorumlanarak elde edilebilecektir. Fakat bu yorumlama yapılacak testlerin önüne geçmemelidir ve inşaat sırasında deneylerle bu verilerin teyit edilmesi zorunludur. Tercihen jet grout kolonlarından alınacak karot numuneleri tek eksenli basınç deneyine tabi tutulacak ve geçici yükleme hallerinde Poisson Oranı (ν) 0,5 kabul edilerek verilen eşitlikler ile Elastisite Modülü (E_{JG} , MPa) ve Kayma modülü (G_{JG} , MPa) elde edilebilecektir (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

$$E_{JG} = 4730\sqrt{f_{JG}} \quad (5.2)$$

$$G_{JG} = \frac{E_{JG}}{2x(1+\nu)} \quad (5.3)$$

Tek eksenli basınç deneyinden elde edilecek sonuca 2,0 mertebesinde bir güvenlik faktörü uygulanması sonucunda eski tecrübeler ışığında 1,000 MPa ile 4,000 MPa arasında değerler elde edileceği görülmektedir. Uygulamada gerçekleştirilen yer değiştirme miktarını tanımlamak üzere jet grout kolon alanının (A_{JG}) Şekil 5.1'de gösterilen birim hücre alanına (A) oranı olan, Alan Yer Değiştirme Oranı(a_r) 5.4 ve 5.5 eşitlikleri ile tanımlanmaktadır.

$$a_r = \frac{A_{JG}}{A} \quad (5.4)$$

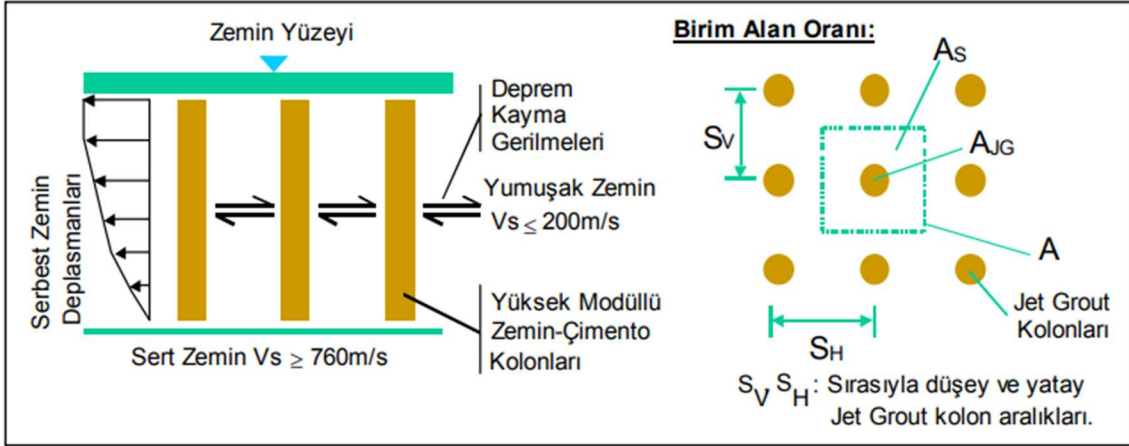
$$a_s = \frac{A_s}{A} = 1 - a_r \quad (5.5)$$

Hesabın bundan sonraki adımları deprem anında meydana gelecek kayma gerilmelerinin birim alan içerisinde üniform olarak oluşturulan kolonlar ile bu elemanları çevreleyen zemin arasında dağılacağı ve bu dağılımın kayma modülleri oranında olacağı kabulüne dayanmaktadır. Sıvılaşma riski taşıyan zeminlerde kayma dalgası hızının genellikle 200m/s'den az olacağı kabul edilirse çimento karışımı kolonların kayma modülünün (G_{JG}) zemin kayma modülüne (G_S) oranı olan G_r değerinin 15 ila 160 kat farklı olabileceği

hesaplanmıştır. Bu durumda oluşacak kayma gerilmeleri uygun bir uygulama çapı ve aralığının seçimi ile kolonlar arasında kalan zeminden ziyade kolonlar üzerinde yoğunlaşacaktır.

Burada bulunan G_S değeri Eşitlik (5.6) ile hesaplanabilmektedir.

$$G_S = \rho V_s^2 \quad (5.6)$$



Şekil 5.1. Deprem kayma dalgalarının dağılım modeli ve birim hücrenin tanımlanması

Kaynak: (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003)

Yapılan tanımların yön göstermesiyle birim alan içerisindeki gerilme konsantrasyonu (n) Eşitlik (5.7) ile tanımlanabilecektir.

$$n = \frac{\tau_{JG}}{\tau_s} \quad (5.7)$$

Eşitlik (5.7)'de τ_{JG} ; çimento-zemin karışımı kolonlara etkileyen kayma gerilmesini ve τ_s ; kolonlar arasında kalan zemine etkileyen kayma gerilmesini ifade etmektedir.

Bu durumda birim alan üzerine etki eden gerilme (τ), herhangi bir derinlikte birim alan içerisindeki kayma gerilmesinin dengesinden yola çıkarak ve alan değişim oranına (a_r) bağlı olarak şu şekilde hesaplanacaktır;

$$\tau = \tau_s a_s + \tau_{JG} a_r \quad (5.8)$$

$$\tau = \tau_s (1 - a_r) + \tau_{JG} a_r \quad (5.9)$$

5.10 ve 5.11 numaralı eşitliklerin gerilim konsantrasyon oranına (n) bağlı olarak çözümü durumunda Eşitlik (5.10) ve Eşitlik (5.11) elde edilir;

$$\tau_s = \frac{\tau}{(1+(n-1)a_r)} \implies \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{1}{(1+(n-1)a_r)} \quad (5.10)$$

$$\tau_{JG} = \frac{n\tau}{(1+(n-1)a_r)} \implies \frac{\tau_{JG}}{\tau} = \frac{n}{(1+(n-1)a_r)} \quad (5.11)$$

5.3. Devirsel Gerilim Azaltım Faktörü

Zeminde çimento zemin karışımı kolonların veya herhangi bir donatılı elemanın olmaması durumunda ortalama kayma gerilmeleri Seed ve Idriss (1971) çalışması v.b gibi farklı metodlarla bulunabilir. Ortalama kayma gerilmesinin (τ_{avg}) formüllerdeki birim alan üzerine etki eden gerilme (τ) yerine kullanılmasının sebebi gerçekleşecek şekil değiştirmelerin depremde genellikle bu gerilme seviyesinde ortaya çıkmasından dolayıdır. Bu durumda kolonlar ve onları çevreleyen zemin arasındaki gerilme paylaşımı kolon çapı ve aralığının bir fonksiyonu haline gelecektir (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

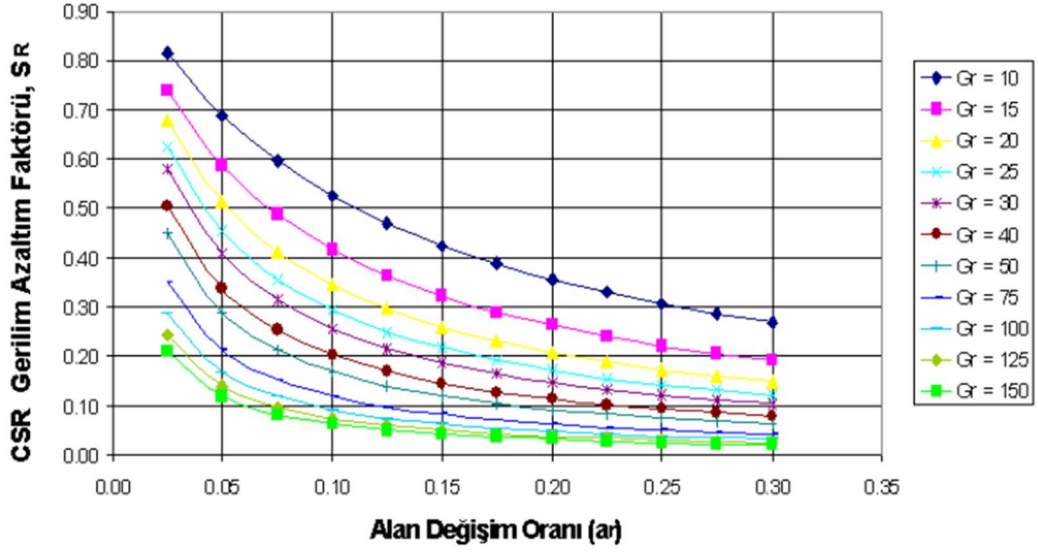
Çevrimsel/Devirsel gerilme oranı (CSR/DGO) üzerine etkiyecek azaltım faktörü (S_R), birim alan içerisindeki kolonlar ve bunları çevreleyen zemin arasında şekil değiştirme uyumu olduğu kabulüyle Eşitlik (5.12)'deki gibi tanımlanabilmektedir;

$$S_R = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{\tau_s}{\tau_{avg}} = \frac{1}{(1+(G_r-1) \times a_r)} = \frac{1}{G_r} \times \frac{1}{\left[a_r + \frac{1}{G_r}(1-a_r) \right]} \quad (5.12)$$

Bu eşitlikte bulunan S_R değeri devirsel gerilme oranını azaltmakta dolayısı ile sıvılaşma için emniyet faktörünün artırılmasında kullanılacaktır.

$$DGO_{tasarım} = DGO \times S_R \quad (5.13)$$

Zeminin sıvılaşma kontrolü için kullanılan ve emniyet faktörü değerini veren eşitlik iyileştirmenin neticesini değerlendirmek için $DGO_{tasarım}$ değeri ile tekrar kullanılacaktır. Uygun emniyet faktörü elde edilene kadar uygun değişiklikler yapılarak işlem tekrarlanacaktır. Eşitliklerin tecrübelerden yararlanılarak uygun tasarım aralıklarında kullanılması durumunda Şekil 5.2'de bulunan eğri elde edilmektedir.



Şekil 5.2. Birim alan ve kayma modülü oranlarına bağlı olarak CSR ; DGO azaltım eğrileri (S_R)

Kaynak: (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003)

5.4. Yapısal Kontroller

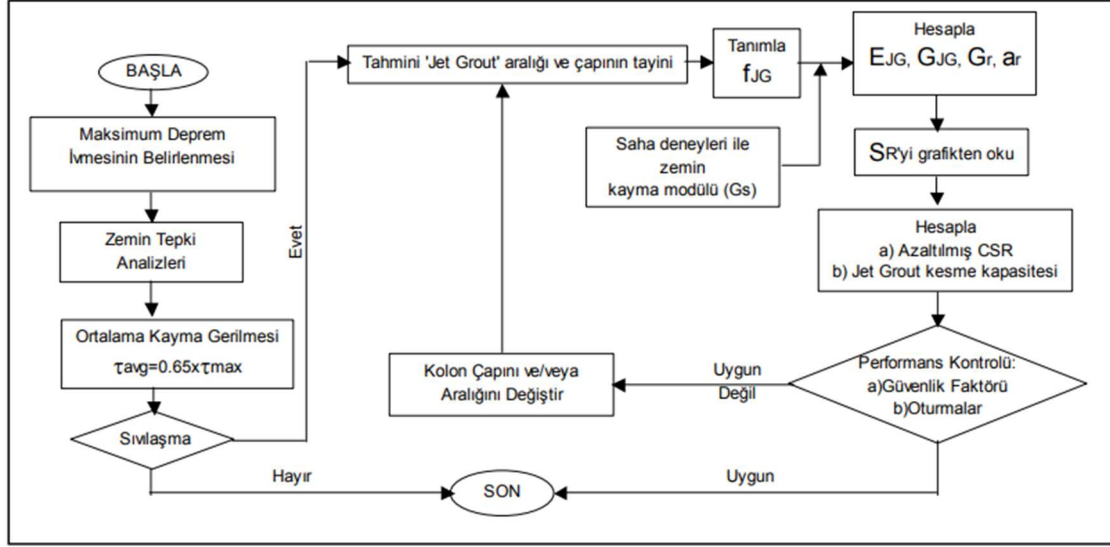
İyileştirme için teşkil edilen kolonlar arasında bulunan zeminin sıvılaşma riskinin azaltılması için yüksek kayma modüllü kolonların kendilerine gelecek kayma kuvvetini karşılayacak dayanıma sahip olması gerekmektedir. Kullanılan kolon kesitinin kayma kuvvetlerine (V_{JG}) karşı yeterli olup olmadığının kontrolü için çimento karışımı kolonların donatısız olarak düşük dükiliteli elemanlar olduğu düşünülerek Eşitlik (5.14) kullanılabilir (International Navigation Association, 2001).

$$V_{JG} = 0,3\sqrt{f_{JG}}A_{JG} \quad (5.14)$$

Burada kullanılan basınç mukavemetinin ilke tasarımı aşamasında daha önce yapılmış benzer araştırma sonuçlarından yola çıkılarak bulunması durumunda minimum 2,0 güvenlik faktörü, basınç mukavemeti değerine (f_{JG}) uygulanmalıdır. Her durumda sonuçların uygulama sırasında elde edilen yerinde karot numuneleri ile kontrolü gereklidir.

5.5. Hesap Algoritması

Hesap yönteminin ışığında Şekil 5.3’de gösterilen uygulama algoritması kullanılabilir. Hesap algoritmasının son adımı ‘Jet Grout’ kolonlarının aralık ve çaplarının sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörlerini karşılamasının yanında statik ve dinamik etkiler altında üstyapı düşey deformasyon kriterlerini de karşılayıp karşılamadığının kontrolüdür (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).



Şekil 5.3. Önerilen hesap algoritması

Kaynak: (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003)

6. JET GROUT KOLONLARININ TAŞIMA GÜCÜ HESABI

Zeminde teşkil edilen bir jet grout kolonu yapısında iki yükü/kuvveti bulundurur ve bunları taşır. Bunlar kendisine etki eden üstyapıdan gelen yük ve kendi ağırlığıdır. Jet grout kolonları kazık elemanlara benzer prensiple çalıştığı için hesap yöntemleri de kazık elemanları ile benzer olmaktadır. Bu sebeple kazık da olduğu gibi jet grout kolonlarında da oluşan servis yükü uç direnci ve çevre direnci ile birlikte karşılanmaktadır.

Bunun sonucu olarak, teşkil edilecek jet grout kolonun kırılma olmadan taşıyabileceği maksimum yük; jet grout kolonunun taşıma gücü (Q_{JG}) ve ağırlığının (W_{JG}) toplamı olacaktır. Bu servis yükü de kolon ucundaki zeminin maksimum taşıyabileceği yük ($Q_{uç}$) ile çevre sütünmesi ile taşıyabileceği yükün (Q_f) toplamı ile karşılanmaktadır. Bu etkileşimler ile teşkil edilecek bir jet grout kolonunun taşıyabileceği net yük Eşitlik (5.15) ile hesaplanabilmektedir.

$$Q_{JG} = Q_{uç} + Q_f - W_{JG} \quad (5.15)$$

$$Q_{uç} = A q_d \quad (5.16)$$

Eşitlikte bulunan A, jet grout kolon en kesit alanını q_d jet grout kolonunun ucundaki zeminin taşıma gücünü ifade etmektedir. q_d değeri Eşitlik (5.17) ile hesaplanabilmektedir;

$$q_d = k_1 c N_c + P_0 N_q + k_2 B \gamma_2 N_\gamma \quad (5.17)$$

$$P_0 = \gamma_1 D_f \quad (5.18)$$

Eşitlikte bulunan k_1 ve k_2 değerleri temel şekil katsayılarını (Tablo 5.1.), c zeminin kohezyonunu, N_c , N_q , N_γ değerleri taşıma gücü katsayılarını (Tablo 5.2.), B değeri jet grout kolonu çapını, γ_1 değeri kolon etrafındaki zeminin birim hacim ağırlığını, γ_2 değeri kolonun ucunda bulunan zeminin birim hacim ağırlığını, P_0 değeri kazık uç seviyesindeki efektif basınç gerilmesini, D_f jet grout kolonu boyunu ifade etmektedir.

Tablo 5.1. Temel Şekil Katsayıları

Temel Şekli	k_1	k_2
Şerit	1,00	0,50
Kare	1,20	0,40
Daire	1,30	0,30
Dikdörtgen	1,03	0,48

Kaynak: (Terzaghi,1948)

Tablo 5.2. Terzaghi taşıma gücü katsayıları

Ø	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
N_c	5,7	7,3	9,6	12,9	17,7	25,1	37,2	58,0	96,0	172,0	348,0
N_q	1,0	1,6	2,7	4,4	7,4	12,7	22,5	41,0	81,0	173,0	415,0
N_γ	0,0	0,5	1,2	2,5	5,0	9,7	19,7	42,0	100,0	298,0	1153,0

Kaynak: (Kumbasar ve Kip, 1987)

Temel şekil katsayıları kullanılırken jet grout kolon kesitinin şekli dikkate alınarak kullanılır yani jet grout kolonu dairesel olarak imalatı gerçekleştirildiği için tablodan daire şekli için olan değerleri alınır.

$$Q_f = A_s f_s \quad (5.19)$$

Eşitlik (5.19)'da Q_f jet grout kolonunun yan direncini, A_s kolonun kesit çevresi ile zemin içerisinde kalan boy uzunluğunun çarpılması ile elde edilen zemin içerisinde kalan yüzey alanını, f_s ise jet grout kolonun birim alanına etkileyen ortalama sürtünme gerilmesini ifade etmektedir.

$$f_s = K \sigma'_v \tan(\delta) \quad (5.20)$$

Eşitlik (5.20)'de K yanal toprak basıncı katsayısını, σ'_v efektif düşey gerilme değerini, δ ise jet grout kolonu ile zemin arasındaki adezyon (sürtünme) açısını (Tablo 5.3.) ifade etmektedir. Adezyon açısı değeri Das, 2016'ya göre içsel sürtünme açısının 0,5 ila 0,8 katı olacak şekilde alınabilmektedir (Öztürk, 2016).

Tablo 5.3. Kazık malzemesi, δ açısı – K katsayısı arasındaki ilişki

Kazık Malzemesi	δ	K Değerleri	
		Küçük Relatif Sıklık	Yüksek Relatif Sıklık
Çelik	20°	0,5	1,0
Beton	3/4 Ø	1,0	2,0
Ahşap	2/3 Ø	1,5	3,0

Kaynak: (Kumbasar ve Kip, 1987)

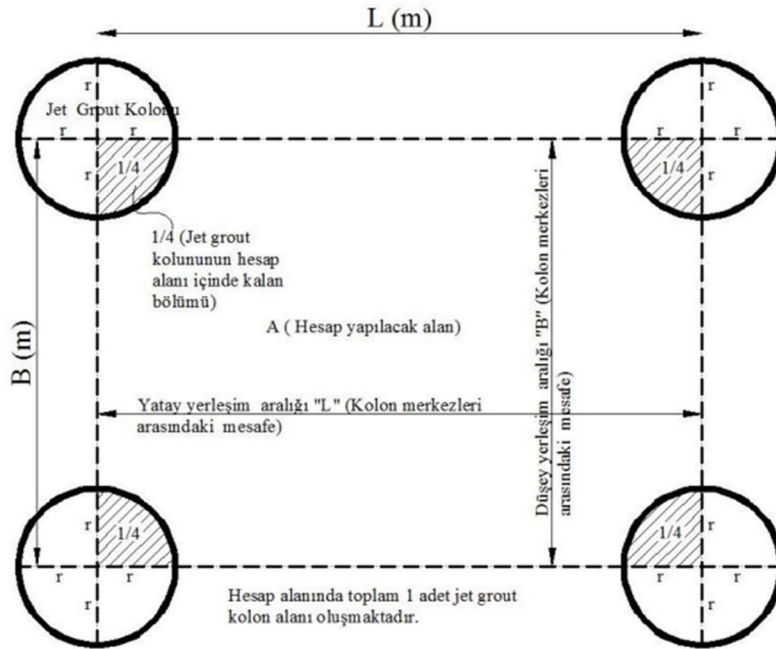
Jet gout kolonları beton kazıklar sınıfına girdiğinden dolayı tablodan K ve δ değerleri için beton kazık değerleri kullanılacaktır.

$$W_{JG} = \gamma D_f A \quad (5.21)$$

Jet grout kolonunun ağırlığının hesaplanacağı Eşitlik (5.21)'de γ jet grout kolonu betonunun birim hacim ağırlığını, D_f kolonun zemin içerisinde kalan boyunu, A kolonun kesit alanını ifade etmektedir. Verilen eşitliklerden elde edilen değerlerle jet grout kolonu taşıma gücü hesaplanır. Hesaplanan taşıma gücü değeri güvenlik katsayısına bölünerek jet grout kolonu için net taşıma gücü değeri elde edilerek kullanılabilir.

6.1. İyileştirilen Zeminde Taşıma Gücü Hesabı

İyileştirmesi jet grout kolonları kullanılarak yapılan bir çalışma sahasında kolonların yerleştiği alan kadar bir alan göz önünde bulundurulduğunda toplam jet grout en kesit alanı, bir adet jet grout kolonunun en kesit alanına eşit olmaktadır. Geri kalan alan ise kolonlar arasında kalan zeminden oluşmaktadır. Bu durum Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Jet Grout Kolon yerleşimi ve hesap alanları

Kaynak: (Öztürk, 2016)

Şekil 6.1'de görüldüğü gibi yerleşime göre taşıma gücünü jet grout kolonlar ile zemin birlikte sağlamaktadır. Zemin ile jet grout kolonunun birlikte oluşturduğu taşıma gücü Melegary ve Garasino, 1997 tarafından önerilen Eşitlik (6.1) ile hesaplanabilmektedir.

$$q_{is} = \left[(BL - \pi r^2) q_{emin} + \pi r^2 q_{jG} \right] / (BL) \quad (6.1)$$

Eşitlik (6.1)'de q_{is} iyileştirilmiş zemin taşıma gücünü, B ve L merkezden merkeze kolonlar arası mesafeyi, r kolon yarıçapını, q_{emin} mevcut zeminin emniyetli taşıma gücünü, q_{JG} ise iyileştirme için yapılmış jet grout kolonunun taşıma gücünü ifade etmektedir.

7. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Geoteknik mühendisliği çözümlerinde zeminin tanımlanması için bir çok parametre bir arada bulunmaktadır ve birbirini etkileyen bu parametreler birlikte kullanılmaktadır. Bu durum ile homojen olmayan ve bulunduğu şartlara göre değişiklik gösteren zemin yapısının tanımlanması zorlaşmakta ve karmaşık bir hale gelebilmektedir. Zemin problemlerinin çözümünde yapılan çalışmalar ile ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Fakat bu ampirik yöntemler genellikle genel bir kabule dayandırılarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler basit çözümleri sağlasa da gerçekçi incelemelerde yetersiz kalabilmektedir.

Zemin yapısının gerçekçi değerlendirilmesi için zemin ortamının fiziksel özellikleri ve bulunduğu koşullar altında birlikte değerlendirilerek bir matematiksel model oluşturulması gerekmektedir. Bu ihtiyaç ile sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle zemin özellikleri ve temel ile birlikte üst yapı rijitliğini de dikkate alarak çözümler üreten bilgisayar programları geoteknik tasarımların daha güvenilir ve daha düşük maliyetli olmasını sağlamaktadır (Düzgün, 2001).

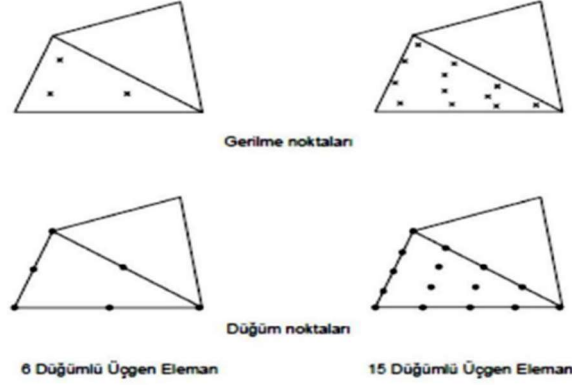
Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamalar yapılabilen farklı programlar geliştirilmiştir. Bu programlardan biri de Plaxis programıdır. Bu çalışmada analizler için Plaxis 2D programı kullanılmıştır.

7.1. Plaxis 2D Programı

Plaxis sonlu elemanlar programı, geoteknik mühendisliği çözümlerinde tasarım ve analizler için kullanılan bir programdır. Program içerisinde yapılan modellemeler ile taşıma gücü, deformasyon, gerilme-şekil değiştirme, yapı zemin etkileşimi, konsolidasyon, şev analizi, dinamik analiz, stabilite ve yeraltı su akımı gibi kavramlar incelenebilmektedir (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

Plaxis programı sonlu elemanlar yöntemi ile çalışmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli ve büyük alanlara sahip bir zemin yapısının belli sınırlar içerisinde analiz yapılarak değerlendirilmesini sağlar. Belli bir alan içerisinde oluşturulan zemin modeli kendi içerisinde bir çok elemana ayrılır. Bu elemanların birbirine bağlantısı düğüm noktaları ile sağlanmaktadır. Sonlu eleman ağı oluşturulmasında 6 ve 15 düğüm noktasından oluşan iki farklı elemandan biri kullanılır. Bunlardan 15 düğümlü eleman ağı kullanılması daha hassas analizler yapılmasını sağlamaktadır. 6 düğümlü elemanlar ise daha hızlı sonuçlar elde edilmek istendiğinde kullanılabilir. Plaxis programında yapılan analizlerde elde edilmek istenen deformasyon

ve gerilme değerleri oluşturulan eleman ağları üzerindeki gerilme ve dđęüm noktaları üzerinden okunarak elde edilmektedir. Plaxis 2D programında oluşturulan eleman ağındaki gerilme dđęüm noktaları Şekil 7.1'deki gibidir.

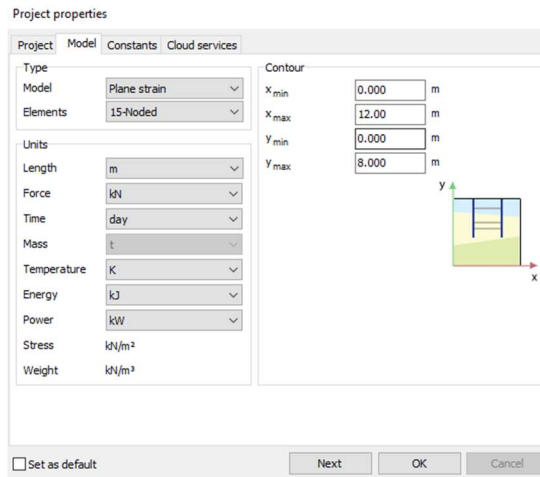


Şekil 7.1. Plaxis eleman ağı gerilme ve dđęüm noktaları

Kaynak: (Plaxis 2D Referance Manuel, 2020)

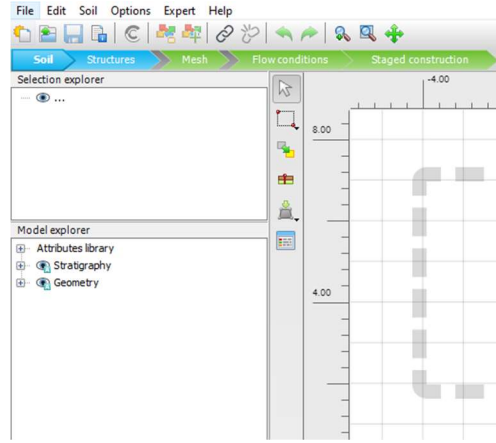
7.2. Plaxis 2D Programında Model Oluşturulması

Programda model oluşturmaya ilk önce model sınırları ve dđęüm noktası adetleri belirlenerek başlanılır. 'Project properties' penceresinde oluşturulacak modelin x ve y koordinatlarında sınır başlangıç ve bitiş değerleri girilir. 'Elements' sekmesinden 6 veya 15 dđęüm noktalı eleman seçimi yapılır hızlı sonuçlar için 6 dđęüm noktası seçilebilecekken detaylı analiz sonuçları için 15 dđęüm noktalı seçeneğin seçilmesi doğru olacaktır. 15 dđęüm noktalı elemanların 6 dđęüm noktalıya göre dezavantajı ise analizlerin biraz daha uzun sürmesidir. İşlem penceresi Şekil 7.2'de gösterilmiştir.



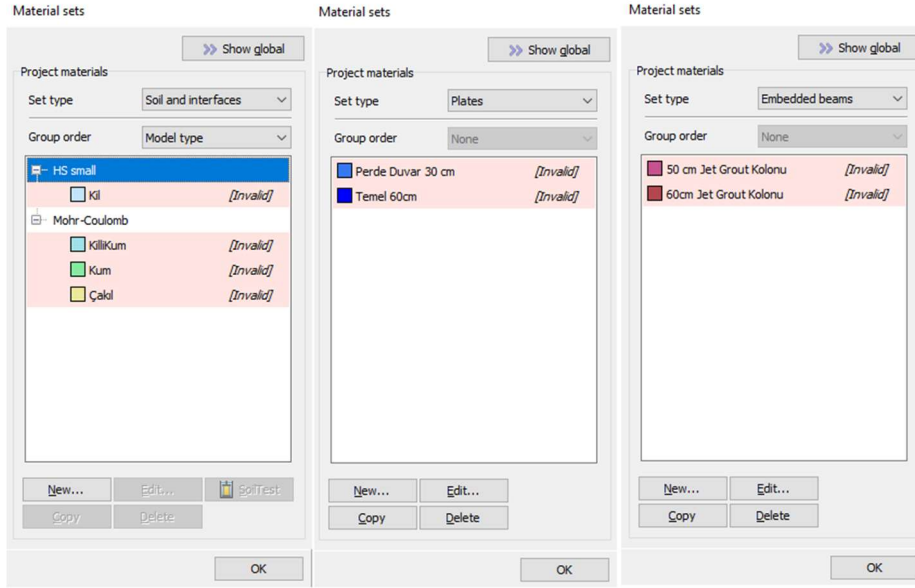
Şekil 7.2. Model özellikleri giriş penceresi

Plaxis 2D programı ana penceresinde 5 ana sekme bulunmaktadır (Şekil 7.3.). Bunlar soil, structures, mesh, flow conditions ve staged construction sekmeleridir. Model oluşturma adımları bu sekmelerde yapılan işlem sırası ile devam etmektedir. Ayrıca model oluşturulduktan sonra daha önce gelen herhangi bir sekmede yapılan değişiklikten sonra devamındaki sekmelerde de düzenleme yapılması gerekmektedir. İşlem sırasında program kendisi uyarı vermektedir. Burada bulunan ‘soil’ kısmında zemin ve zeminde bulunan yeraltı su seviyesi ‘borehole’ yardımıyla modellenir. ‘Structure’ kısmında ise zemin haricindeki temel, duvar, kazık, iksa yapıları vb. gibi yapısal elemanlar modellenir. ‘Flow conditions’ kısmından ise ilk kısımda tanımlanan yeraltı su seviyesi kontrol edilerek seviyesinde değişiklik yapılmak isteniyorsa yapılır eğer istenmiyorsa kontrol edilerek diğer sekmeye geçilir. ‘Staged construction’ kısmında ise son olarak hesap adımları belirlenir ve modellenen elemanlar işlem adımına göre aktif edilerek analiz adımları oluşturularak analiz yapılır.



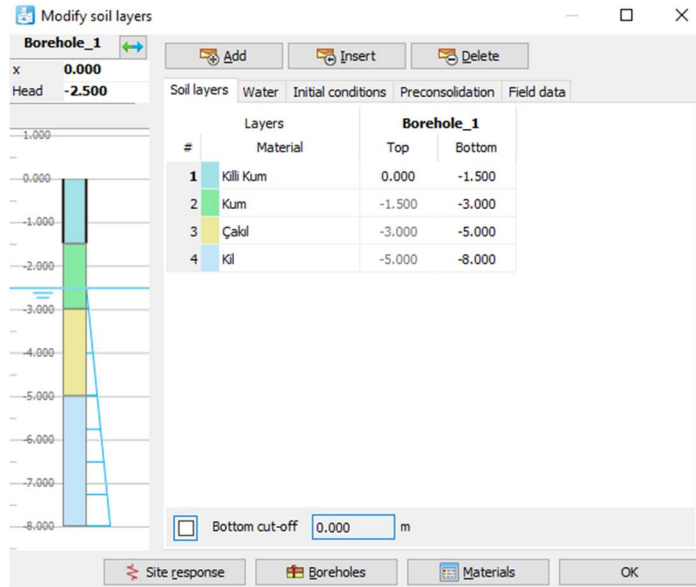
Şekil 7.3. Model oluşturmada kullanılan ana sekmeler

Programda modelleme yapılırken model sınırları belirlendikten sonra model içerisinde kullanılacak zeminin ve yapısal elemanların özellikleri ‘show materials’ ikonuna tıklanarak açılan ‘Material sets’ kısmından tanımlanmaktadır. Bu pencerede ‘set type’ kısmında tanımlanacak zemin veya eleman tiplerine göre sınıflama yapılmıştır. Şekil 7.4’de görüldüğü gibi ‘soil and interfaces’ kısmından zemin modeli ile birlikte zemin cinsi ve özellikleri, ‘plates’ kısmından temel, perde vb. gibi yapı elemanları, ‘embedded beams’ kısmında ise jet grot kolonu gibi gömülü kazık elemanları tanımlanmaktadır. Oluşturmak istenen eleman sınıfında ‘new’ sekmesine tıklanarak gerekli özellikler girilir ve istenen özelliklerdeki eleman, zemin vb. tanımlanır.



Şekil 7.4. Zemin ve yapısal elemanlar için tanımlama penceresi

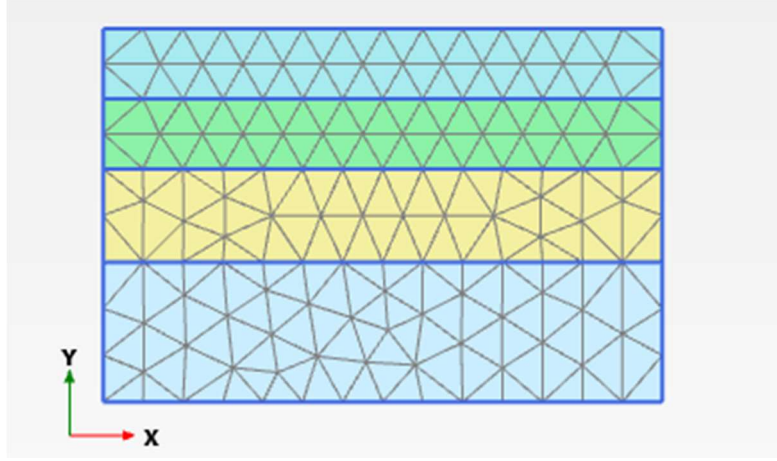
Programda oluşturulacak modelde kullanılacak zemin ve yapısal elemanların özellikleri girilerek tanımlama yapıldıktan sonra zemin profili oluşturma aşamasına geçilir. Bunun için ise ekranda bulunan 'create borehole' ikonu tıklanılarak açılan Şekil 7.5'deki pencerede zemin katmanlarının cinsi ve seviyeleri girilir. Sol üst köşeden ise zemin içerisinde bulunan yer altı su seviyesi girilerek zemin profili oluşturulmuş olur. Daha sonra oluşan zemin üzerine yüklemeler girilir kazılar yapılır ve yapısal elemanlar oluşturularak eleman atamaları yapılır.



Şekil 7.5. Zemin profili oluşturma penceresi

Zemin profilinin oluşturulması yapısal elemanların tanımlanması ile meydana gelen zemin modeli için mesh işlemi gerçekleştirilir. 'Mesh' sekmesinden gerçekleştirilen işlemde

model, Şekil 7.6’da görülen örnek görseldeki gibi üçgen elemanlara bölünür ve bu şekilde hesap elemanları ve düğüm noktaları meydana getirilir. Meshleme işlemi yapılırken kötüden iyiye doğru birkaç derecede mesleme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Meshleme derecesi iyileştikçe oluşan eleman ve düğüm noktası sayısı artmaktadır. Mesh derecesinin artması ile inceleme yapılan alanda daha doğru ve hassas sonuçlar alınması mümkün olmaktadır.



Şekil 7.6. Meshlenen model görüntüsü

Plaxis programında yukarıdaki adımlardan sonra analiz adımlarına geçilmektedir. Bu bölümde program üzerinde yapılan işlem adımlarından yüzeysel olarak bahsedilmiştir. İlerleyen bölümde model oluşturulurken takip edilen işlem adımları ve eleman özellikleri daha detaylı belirtilecektir.

7.3. Plaxis Zemin Modelleri

Plaxis programında oluşturulan model içerisinde bulunan zemin türüne göre farklı zemin modelleri bulunmaktadır. Zemin modellerinin amacı zemin türüne ve ulaşmak istenen sonuca göre daha doğru sonuçlara ulaşılmasını hedeflemektedir. Bu zemin modelleri aşağıda sıralanmıştır.

- Lineer Elastik (LE) Zemin Modeli
- Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli
- Hardening Soil (HS) Zemin Modeli
- Hardening Soil Small Strain (HSSS) Zemin Modeli
- Soft Soil (SS) Zemin Modeli

- Soft Soil Creep (SSC) Zemin Modeli
- Jointed Rock (JR) Zemin Modeli
- Modified Cam Clay (MCC) Zemin Modeli
- UBC3D-PLM Zemin Modeli

Bu çalışma kapsamında ön statik hesaplamalar için Mohr-Coulomb zemin modeli sıvılaşma analizlerinde ise bunun için bulunan UBC3D-PLM zemin modeli kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır. Ayrıca kullanılan zemin modellerinin sonuçlara etkisini görebilmek için aynı statik ve dinamik analizler Mohr-Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri ile tekrarlanarak sonuçlardaki farklılıklar incelenmiştir.

7.4. UBC3D-PLM Bünye Modeli

UBC3D-PLM bünye modeli, Plaxis programında sıvılaşmanın modellenmesinde kullanılan ve kullanıcı tanımlı özellikli bünye modelidir. UBC3D-PLM bünye modeli ilk olarak Beaty ve Byrne (1998) ile Pueble vd. (1997) tarafından temeli oluşturularak orijinal haliyle UBCSAND olarak bilinen model olarak meydana getirilmiştir. UBCSAND, kumlu veya siltli kum zeminlerin sıvılaşma davranışını modelleyebilen elasto-plastik efektif gerilme modelidir. Petalas ve Galavi (2013), Galavi vd. (2013) ve Tsegaye (2010) UBCSAND model üzerinde geliştirmeler ve düzeltmeler uygulayarak UBC3D-PLM modelin son halini ortaya koymuşlardır (Demir, 2019).

Ayrıca, UBCSAND ile UBC3D-PLM bünye modelleri arasındaki temel fark akma yüzeyini tanımlarken kullandıkları boyut farklılığıdır. UBCSAND model, 2 boyutlu (2D) Mohr-Coulomb akma yüzeyini kullanıyorken, UBC3D-PLM ise Mohr-Coulomb akma durumunu 3 boyutlu (3D) asal gerilme uzayında ele almaktadır (Petalas, A. ve Galavi, V., 2013). Bu çalışmada 3 boyutlu akma yüzeyini kullanan UBC3D-PLM bünye modeli kullanarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir.

7.4.1. UBC3D-PLM Bünye Modeli Parametreleri

Sayısal analizlerde kullanılan bünye modellerinden kullanılan parametre değerleri yapılmış laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler ile belirlenebilir. Fakat her parametre için yapılan ve doğruluğu kabul görmüş değerler literatürde bulunmayabilmektedir. Buradaki eksikliği giderip bünye modelinde kullanılacak girdi parametrelerini belirlemek için laboratuvar deneylerinin haricinde arazi deneyleride kullanılabilir. Girdi

parametrelerinin belirlenmesinde ülkemizde en yaygın olarak kullanılan standart penetrasyon deneyi önde gelmektedir. Standart penetrasyon deneyinden elde edilecek $N_{1,60}$ değeri ile UBC3D-PLM bünye modelindeki girdi parametrelerinin elde edilmesi büyük oranda kolaylaşmaktadır. Girdi parameterlerinin elde edilebilmesi için Beaty ve Byrne (2011) UBCSAND bünye modeli için $N_{1,60}$ değerini kullanarak bazı korelasyonlar önermiştir. Daha sonra Makra (2013) tarafından bu korelasyonlar düzenlenerek UBC3D-PLM bünye modelinde kullanılabilir hale getirilmiştir. UBC3D-PLM bünye modelinde kullanılan 15 adet girdi parametreleri (Tablo 7.1.) ve $N_{1,60}$ değeri kullanılarak elde edilebilecek korelasyonlar gösterilmiştir (Demir, 2019).

Tablo 7.1. UBC3D-PLM modelde kullanılan girdi parametreleri

Sembol	Parametre Tanımı	Birim	Metot	Varsayılan
$N_{1,60}$	Düzeltilmiş SPT N değeri	-	Yerinde arazi deneyi	-
ϕ_{cv}^o	Sabit hacim içsel sürtünme açısı	(°)	Üç eksenli veya DSS	-
ϕ_p^o	Pik içsel sürtünme açısı	(°)	Üç eksenli veya DSS	-
c	Kohezyon	kPa	Üç eksenli veya DSS	0
k_G^e	Elastik kayma modülü sayısı	-	Eğri uydurma	-
k_B^e	Elastik bulk modülü sayısı	-	Eğri uydurma	-
k_G^p	Plastik kayma modülü sayısı	-	Eğri uydurma	-
m_e	Elastik bulk modülü indisi	-	Eğri uydurma	0,5
n_e	Elastik kayma modülü indisi	-	Eğri uydurma	0,5
n_p	Plastik kayma modülü indisi	-	Eğri uydurma	0,4-0,5
R_f	Göçme oranı	-	Eğri uydurma	0,9
P_A	Atmosferik basınç	kPa	Standart değer	100
σ_t	Çekme kesimi (cut-off)	kPa	-	0
f_{achard}	Sıkılaştırma faktörü	-	Eğri uydurma	1
f_{acpost}	Sıvılaşma sonrası faktör	-	Eğri uydurma	0,2-1

Kaynak: (Demir, 2019)

$$\emptyset_p = \emptyset_{cv} + \frac{N_{1,60}}{10} + maks(0, \frac{N_{1,60}-1}{5}) \quad (7.1)$$

$$k_G^e = 21,7 \times 20 \times (N_{1,60})^{0,333} \quad (7.2)$$

$$k_B^e = 0,7 \times k_G^e \quad (7.3)$$

$$k_G^p = k_G^e \times (N_{1,60})^2 \times 0,003 + 100 \quad (7.4)$$

$$R_f = 1,1 \times (N_{1,60})^{-0,15} \quad (7.5)$$

UBC3D-PLM bünye modeli parametreleri elde edilirken ilk yapılacak iş $N_{1,60}$ değerinin elde edilmesidir. Daha önce yapılmış ve literatüre geçmiş çalışmalarda rölatif sıkılığa (D_r) bağlı olarak $N_{1,60}$ değerinin elde edilmesi ile ilgili çok sayıda kolerasyon bulunmaktadır. Bunlardan en çok tercih edilenlerden biri olan ve Idriss ve Boulanger (2008) tarafından önerilen korelasyon Eşitlik (7.6)'da gösterilmiştir.

$$N_{1,60} = 46 \times D_r^2 \quad (7.6)$$

$N_{1,60}$ değeri elde edildikten sonra bünye modeli için gerekli diğer parametreler verilen korelasyonlar ile elde edilir. Elde edilen parametreler ile tabloda bulunan yaklaşık değerler programa giriş yapılır.

8. SAYISAL ANALİZ

Bu tez çalışmasında 14 m x 16 m temel genişliğine sahip ağırlığı 1860 ton olan 5 katlı bir yapı sıvılaşma potansiyeli olan bir zemin profili üzerine konumlandırılmıştır. Zemin etüdü için 3 adet sondaj yapılmış ve yapılan sondajlardan elde edilen SPT verileri ile zeminin sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda yeraltı su seviyesi altında bulunan tabakanın sıvılaştığı tespit edilmiştir. Sıvılaşmanın önüne geçebilmek için 60cm çapında jet grout kolonları 2,5m lik mesafe ile karelej oluşturulacak şekilde projelendirilmiştir. Teşkil edilmesi planlanan jet grout kolonlarının sıvılaşmaya etkisi Tablo 8.5’de gösterilmiştir.

Plaxis 2D programında zemin profili üzerine yapı temeli ve yapıdan zemine aktarılan yük oluşturulmuş daha sonra 60 cm çapında 6 adet jet grout kolonları teşkil edilerek sıvılaşmayı en iyi yansıtan UBC3D-PLM bünye modeli kullanılarak analiz modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde iki farklı yeraltı su seviyesi ve farklı büyüklükteki iki farklı deprem kullanılarak farklı analizler yapılmış böylelikle deprem büyüklüğünün ve yeraltı su seviyesinin de sıvılaşan zemin davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Yapılan iyileştirmenin farklı durumlardaki etkisini görebilmek için jet grout kolonlarının çapı 90 cm olarak değiştirilmiştir. Ayrıca 60 cm çapında 6 adet olan kolon sayısı 9 adete çıkarılarak bu durumda da analizler yapılmış, böylelikle jet grout kolon çapı artışının ve aynı çaptaki kolon sayısı artışının sonuçlara etkisi incelenmiştir. Bu analizlere ilave olarak zaten tek bodrumlu olan yapıya ilave tek ve çift bodrum eklenerek aynı durumlardaki analizler tekrarlanmış ve buna bağlı olarak temel altında oluşan boşluk suyu basıncı ve düşey deformasyon değerleri incelenmiştir.

Yapılan analizde suya doymun zeminde deprem anında sıvılaşmaya asıl etken olan aşırı boşluk suyu basıncının artışını ölçebilmek için zemin profili içerisinde farklı noktalar seçilmiştir. Seçilen bu noktalarda aşırı boşluk suyu basıncının artışı ve modelde oluşan toplam deformasyonlar iyileştirme öncesi ve sonrası olarak ölçülmüştür. Böylece iyileştirmeye için yapılan jet grout kolonlarının zemin sıvılaşmasına ve düşey deformasyona etkisi değerlendirilmiştir.

Tablo 8.1. 1. Sondaj kuyusuna ait veriler ile yapılan sıvılaşma analizi sonuçları

Derinlik (m)	$N_{1,60}$	$N_{1,60tk}$	σ_{v0} (kpa)	σ'_{v0} (kpa)	r_d	a_{maks} (g)	MDF	DDO	DDO_{tk}	DGO	EF
1.5	8	14	24	24	0.989	0.368	1	0.096	0.150	0.236	0.635
3	19	26	48	48	0.977	0.368	1	0.203	0.313	0.234	1.340
4.5	9	15	75	60.285	0.966	0.368	1	0.104	0.160	0.287	0.557
6	14	21	102	72.57	0.954	0.368	1	0.150	0.228	0.321	0.712
7.5	15	21	129	84.855	0.943	0.368	1	0.160	0.228	0.343	0.666
9	19	27	156	97.14	0.931	0.368	1	0.203	0.338	0.358	0.946
10.5	16	23	183	109.425	0.894	0.368	1	0.170	0.257	0.357	0.719
12	19	27	210	121.71	0.854	0.368	1	0.203	0.338	0.352	0.960
13.5	17	25	237	133.995	0.814	0.368	1	0.181	0.292	0.344	0.848
15	13	20	264	146.28	0.774	0.368	1	0.141	0.215	0.334	0.645
16.5	13	19	291	158.565	0.733	0.368	1	0.141	0.203	0.322	0.631
18	15	23	318	170.85	0.693	0.368	1	0.160	0.257	0.309	0.832
19.5	11	18	345	183.135	0.653	0.368	1	0.122	0.192	0.294	0.652
21	8	14	372	195.42	0.613	0.368	1	0.096	0.150	0.279	0.538

Tablo 8.2. 2. Sondaj kuyusuna ait veriler ile yapılan sıvılaşma analizi sonuçları

Derinlik (m)	$N_{1,60}$	$N_{1,60tk}$	σ_{v0} (kpa)	σ'_{v0} (kpa)	r_d	a_{maks} (g)	MDF	DDO	DDO_{tk}	DGO	EF
1.5	9	15	24	24	0.989	0.368	1	0.104	0.160	0.236	0.677
3	18	25	48	48	0.977	0.368	1	0.192	0.292	0.234	1.249
4.5	10	17	75	60.285	0.966	0.368	1	0.113	0.181	0.287	0.629
6	15	22	102	72.57	0.954	0.368	1	0.160	0.242	0.321	0.754
7.5	15	21	129	84.855	0.943	0.368	1	0.160	0.228	0.343	0.666
9	19	27	156	97.14	0.931	0.368	1	0.203	0.338	0.358	0.946
10.5	15	22	183	109.425	0.894	0.368	1	0.160	0.242	0.357	0.677
12	18	26	210	121.71	0.854	0.368	1	0.192	0.313	0.352	0.889
13.5	17	25	237	133.995	0.814	0.368	1	0.181	0.292	0.344	0.848
15	14	21	264	146.28	0.774	0.368	1	0.150	0.228	0.334	0.684
16.5	13	19	291	158.565	0.733	0.368	1	0.141	0.203	0.322	0.631
18	15	23	318	170.85	0.693	0.368	1	0.160	0.257	0.309	0.832
19.5	13	19	345	183.135	0.653	0.368	1	0.141	0.203	0.294	0.691
21	9	15	372	195.42	0.613	0.368	1	0.104	0.160	0.279	0.573

Tablo 8.3. 3. Sondaj kuyusuna ait veriler ile yapılan sıvılaşma analizi sonuçları

Derinlik (m)	$N_{1,60}$	$N_{1,60tk}$	σ_{v0} (kpa)	σ'_{v0} (kpa)	r_d	a_{maks} (g)	MDF	DDO	DDO_{tk}	DGO	EF
1.5	13	19	24	24	0.989	0.368	1	0.141	0.203	0.236	0.860
3	19	26	48	48	0.977	0.368	1	0.203	0.313	0.234	1.340
4.5	10	17	75	60.285	0.966	0.368	1	0.113	0.181	0.287	0.629
6	16	23	102	72.57	0.954	0.368	1	0.170	0.257	0.321	0.801
7.5	13	20	129	84.855	0.943	0.368	1	0.141	0.215	0.343	0.628
9	18	26	156	97.14	0.931	0.368	1	0.192	0.313	0.358	0.875
10.5	15	22	183	109.425	0.894	0.368	1	0.160	0.242	0.357	0.677
12	18	26	210	121.71	0.854	0.368	1	0.192	0.313	0.352	0.889
13.5	18	26	237	133.995	0.814	0.368	1	0.192	0.313	0.344	0.910
15	15	22	264	146.28	0.774	0.368	1	0.160	0.242	0.334	0.725
16.5	13	19	291	158.565	0.733	0.368	1	0.141	0.203	0.322	0.631
18	16	23	318	170.85	0.693	0.368	1	0.170	0.257	0.309	0.832
19.5	13	19	345	183.135	0.653	0.368	1	0.141	0.203	0.294	0.691
21	9	15	372	195.42	0.613	0.368	1	0.104	0.160	0.279	0.573

Tablo 8.4. Belirlenen jet grout kolonu çap ve aralığı ile S_R değerinin hesabı

D (m)	S (m)	A_{JG}	A	a_r
0.6	2.5	0.282	6.25	0.045
E_{JG} (Mpa)	G_{JG} (Mpa)	G_S (Mpa)	G_r	S_R
600	200	6.7	29.86	0.43

Sondaj kuyularından elde edilen SPT değerleri ile sıvılaşma analizi yapılmış ve yeraltı su seviyesi altında bulunan katmanın tamamında emniyet faktörü (EF) değerinin 1,1 değerinden küçük olduğu görülmüştür. Bu durum bize bu katmanda sıvılaşma olayının gerçekleşeceğini göstermektedir. Yeraltı su seviyesinin üzerinde kalan derinliklerde ise sıvılaşma beklenmemektedir.

Sıvılaşmanın bertaraf edilmesi için teşkil edilebilecek jet grout kolonu çapı (D) ve kolon aralığı (S) belirlenerek, Bölüm 5. de bulunan eşitlikler ile alan yerdeğiştirme oranı (a_r), kayma modülü oranı (G_r) ve devirsel gerilme oranına etkileyecek azaltım faktörü (S_R) değerleri Tablo 8.4’de hesaplanarak gösterilmiştir.

Teşkil edilecek jet grout kolonlarının elde edilen emniyet faktörüne etkisini görmek için devirsel gerilme oranlarının ortalaması olan (DGO_{ort}) 0,312 değeri, azaltım faktörü 0,43 değeri ile çarpılmış ve iyileştirme sonrası hesaplamalarda kullanılacak devirsel gerilme oranı ortalaması 0,14 olarak elde edilmiştir. Devirsel direnç oranı ortalaması (DDO_{ort}) değeri ile elde edilen yeni değer birbirine oranlandığında 0,76 olan eski emniyet faktörü ortalama değeri (EF_{ort}) 1,76 olarak elde edilmiştir (Tablo 8.5.). Bu sonuç bize teşkil edilecek jet grout kolonları çapı ve aralığı ile sıvılaşmanın önüne geçilebileceğini göstermektedir.

Tablo 8.5. Zemin iyileştirme sonrası emniyet faktörü değişim hesabı

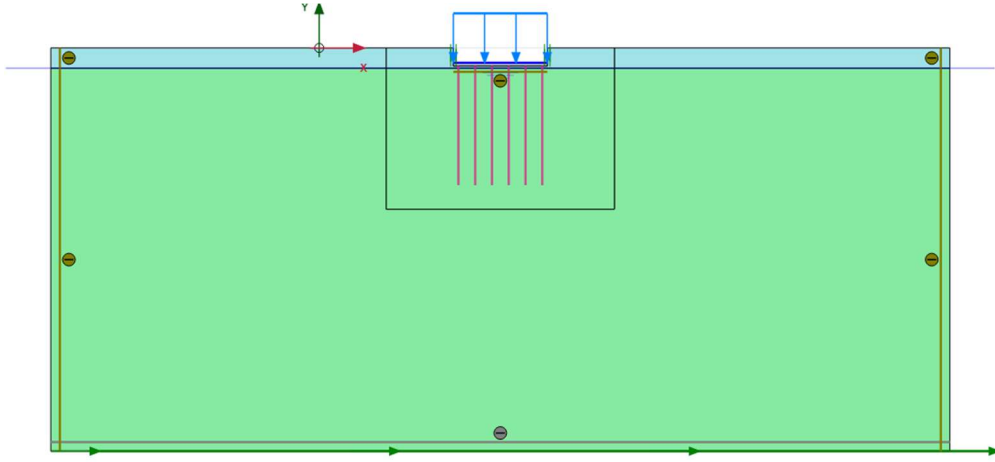
	İyileştirme Öncesi	İyileştirme Sonrası
DDO_{ort}	0.238	0.238
DGO_{ort}	0.312	0.14
EF_{ort}	0.76	1.76

8.1. Model Geometrisinin ve Sınırlarının Belirlenmesi

Analizin gerçekleştirilebilmesi için ilk adım olarak sınırlama olasılığı yüksek zemin üzerine 5 katlı binanın 14 m genişliğinde ve 16 m uzunluğunda, 60 cm kalınlığında bir radye temeli inşaa edilmiştir. Analiz için kullanılan yapı yükü toplamda 1860 ton olarak belirlenmiştir ve temel genişliğince çizgisel yük olarak 90 KN/m^2 temel üzerine etkilmiştir. Temel derinliği 2,2 m olarak alınmıştır. Daha sonra temel ile jet grout kolonlarının arasında gerçek saha koşullarını yansıtmaya için başlık dolgusu oluşturulmuş temelden gelen yükün jet grout kolonu başlıklarına daha geniş şekilde dağıtması amaçlanmıştır. Sınırlamaya etkisi araştırılan jet grout kolonları ise 17,5 m uzunluğa, 6 adet 60 cm ve 90 cm çapa sahip olacak şekilde yatayda 2,5 m aralıklarla zemin içerisinde farklı modeller için teşkil edilmiştir. Daha sonra 9 adet 60 cm çapında jet grout kolonları modellenerek analizler tekrarlanmıştır. Tüm analizler için yeraltı su seviyesi 1,5 m ve 3 m olarak iki farklı durum oluşturacak şekilde belirlenmiş ve bununla birlikte zemin profilinin en alt noktasına farklı büyüklüklerdeki iki deprem sırasıyla etkilerek analizler yapılmıştır.

Aynı jet grout sayıları ve çapları ile binaya ilave tek ve çift olacak şekilde ayrı ayrı bodrum eklenerek temel kazı derinliğinin artırılması ile temelde oluşan düşey deformasyonlar ve temel altındaki noktalarda oluşan boşluk suyu basıncı değişimleri incelenmiştir. İlk analizlerde 2,20 m derinlikte bulunan temel seviyesi ilave tek bodrum ile 4,85 m derinliğe, çift bodrum ile 7,5 m derinliğe indirilmiştir. İlave tek bodrumda yapı yükü olarak etkililen çizgisel yük 105 KN/m^2 , çift bodrumda ise 120 KN/m^2 olarak kullanılmıştır. Temel derinliği artırılırken jet grout kolonlarının uç nokta derinlikleri sabit tutulmuştur.

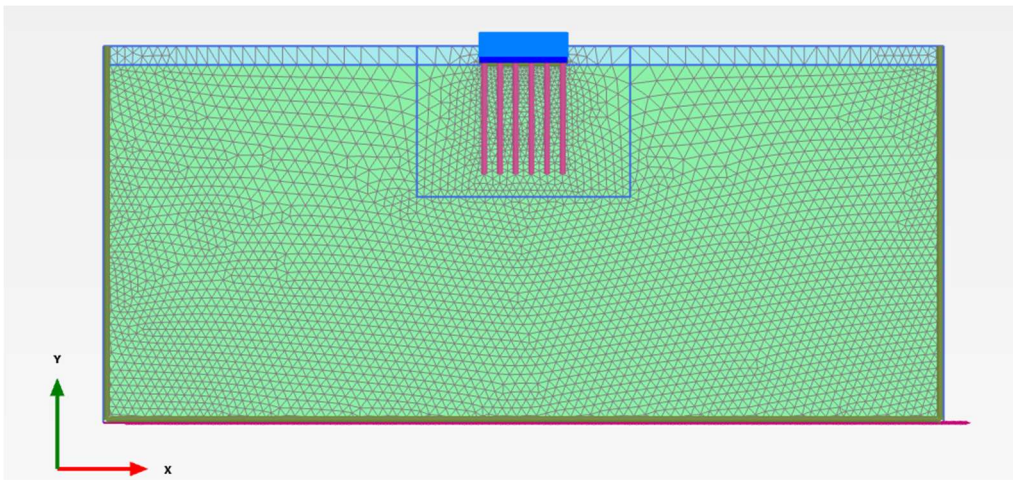
Oluşturulan modelde gerçekçi sonuçlar alınabilmesi için model sınırlarının yeterli genişlikte belirlenmesi oldukça önemlidir. Model sınırının belirlenmesinde Dr. R. Brinkgreve, 2005 yaptığı çalışmada her iki yönde temel genişliğinin en az 3 katı uzaklıkta olacak kadar model genişliği belirlenmesi gerektiğini belirtmiştir. Oluşturulan analiz modelinde ise sınırlar biraz daha geniş tutularak model genişliği 134 m olarak, model derinliği ise 60 m olarak belirlenmiştir. Oluşan model geometrisi Şekil 8.1'de gösterilmiştir.



Şekil 8.1. Analiz için oluşturulan model geometrisi

8.2. Model Ağının Oluşturulması

Model geometrisi oluşturulduktan sonra Plaxis 2D programında ‘mesh’ sekmesinden model 15 düğümlü elemanlara bölünmüştür. Doğru sonuçlar alınmak istendiğinde hassas analizler yapılabilmesi için modelin bölünmesi ile oluşturulan eleman sayısı önem arz etmektedir. ‘Mesh’ ekranından yapılacak meshleme derecesi seçilebilmektedir. Yüzeysel sonuçlar alınmak istenen analizlerde bu derece düşük tutulabilmektedir. Fakat daha hassas sonuçlar alınmak istenen analizlerde meshleme derecesi iyi veya çok iyi derece olarak seçilmelidir. Bu çalışmada oluşturulan modelde meshleme işlemi için çok iyi derece seçilmiştir. Ayrıca temel altında kalan ve asıl incelenmek istenen alanlar bir sınır içerisinde alınarak daha küçük boyutlarda elemanlara bölünmesi sağlanmıştır ve Şekil 8.2’de gösterilen model ağı oluşturulmuştur.



Şekil 8.2. Meshleme ile oluşturulan model ağı görüntüsü

Oluşturululan model meshleme işlemi ile içerisinde düğüm ve gerilme (stress) noktaları bulunan elemanlara bölünmüştür. Bu noktalar bize analiz süresince ve sonucunda oluşan deformasyon ve gerilme değerlerinin okunmasını sağlamaktadır. Model üzerinde bulunan ve ‘node’ adı verilen düğüm noktaları ile o noktadaki deformasyon değerleri, ‘stress point’ adı verilen gerilme noktalarından ise o noktadaki gerilme değerleri elde edilmektedir. Bu analiz modelinde farklı düğüm ve stress noktaları analiz öncesinde seçilerek analiz süresince ve sonucunda meydana gelen deformasyon değerleri ile boşluk suyu basıncı değişim değerleri elde edilerek değerlendirilmiştir.

8.3. Zemin Profili ve Özelliklerinin Belirlenmesi

Analiz için oluşturulan modelde sıvılaşma problemine sahip Tablo 8.1’de katman ve özellikleri verilen zemin profili kullanılmıştır. Tablo 8.1’de görülen yerlatı su seviyesi daha sonra temel seviyesi üzerinde olacak şekilde 1,5 m derinliğe çekilerek farklı analiz ile değerlendirme yapılmıştır. Sıvılaşma olayının değerlendirilmesi amaçlanan analizde dinamik analiz adımına geçmeden önce statik analiz yapılmış işlem adımı buna göre düzenlenmiştir. Statik analiz için Mohr-Coulomb (MC) zemin Modeli kullanılmıştır. Dinamik analizde ise sıvılaşma olayını yansıtan UBC3D-PLM zemin modeli kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir.

0.0	$\gamma_n = 16 \text{ kN/m}^3$	
	$N_{30} = 11$	$N_{60} = 11$
	$N_{1,60} = 14$	$E = 15 \text{ MPa}$
	$\phi^\circ = 27^\circ$	$e = 0.7$
	-3.0m YASS	
-3.0	$\gamma_n = 18 \text{ kN/m}^3$	
	$N_{30} = 17$	$N_{60} = 17$
	$N_{1,60} = 14$	$E = 20 \text{ MPa}$
	$\phi^\circ = 25^\circ$	$e = 0.8$
-22.5		

Şekil 8.3. Analizde Kullanılan Zemin Profili

Tablo 8.6. Analizde Kullanılan Zemin Özellikleri

Zemin Parmetreleri	Üst Tabaka (0 , -3m)	Alt Tabaka (-3m , -22.5m)
	Siltli Kum	Düşük Plastisiteli Siltli/Killi Kum
Birim Hacim Ağırlığı, γ_n (kN/m^3)	16	18
Elastisite Modülü, E (Mpa)	15	20
Boşluk Oranı, e	0.7	0.8
Kohezyon, c (kPa)	0.5	0
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ^o	27	25
Poisson oranı	0,3	0,4
N_{30}	11	17
N_{60}	11	17
$N_{1,60}$	14	14
Yeraltı Su Seviyesi	-1.5m ve -3m durumları değerlendirilmiştir.	

8.4. UBC3D-PLM Zemin Modeli Parametrelerinin Belirlenmesi

UBC3D-PLM bünye modelinde kullanılan parametreler önceki bölümde verilen korelasyonlar ile hesaplanarak elde edilmiştir ve Tablo 8.2’de gösterilmiştir.

Tablo 8.7. Plaxis UBC3D-PLM zemin modelinde kullanılan değerler

Sembol	0, -3 m	-3, -22.5 m
$N_{1,60}$	14	14
ϕ_{cv}^o	27	25
ϕ_p^o	28,4	26,4
c (kPa)	0,5	0
k_G^e	1045,1	1045,1
k_B^e	731,6	731,6
k_G^p	714,5	714,5
m_e	0,5	0,5
n_e	0,5	0,5
n_p	0,4	0,4
R_f	0,9	0,9
P_A (kPa)	100	100
σ_t (kPa)	0	0
f_{achard}	1	1
f_{acpost}	0,2	0,2

8.5. Analiz Modelinde Kullanılan Eleman Özelliklerinin Belirlenmesi

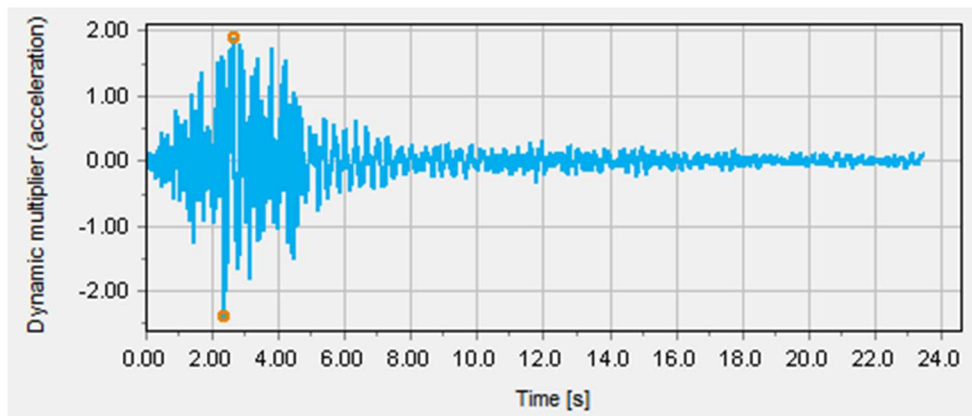
Analiz modelinde kullanılan radye temel ve jet grout kolonlarının boyut ve özellikleri Tablo 8.3’de verilmiştir. Plaxis 2D programında temel modellemek için ‘Plate’, jet grout kolonlarını modellemek için ise ‘Embeded Beam’ eleman türü kullanılmaktadır.

Tablo 8.8. Temel ve Jet grout kolonu özellikleri

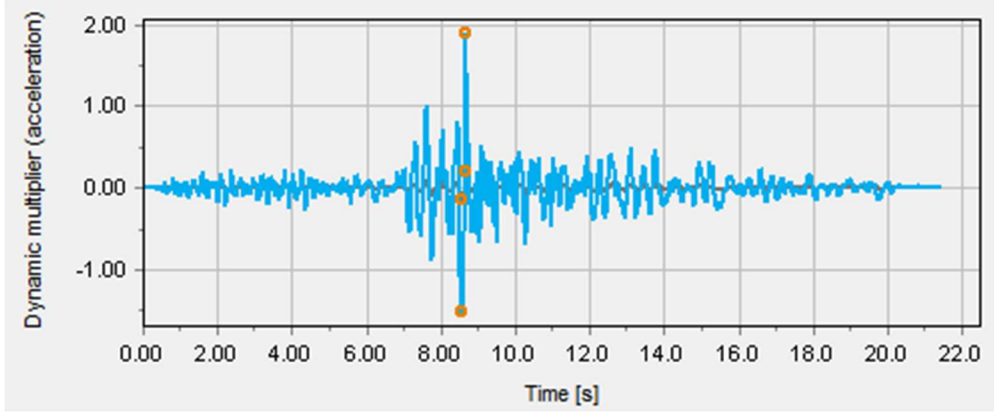
Temel		Jet Grout	
h	0,6 m	D	0,6 m
w	15 kN/m/m	γ	22 kN/m ³
EA	19.2 x 10 ⁶	$L_{spacing}$	2,5 m
EI	0,576 x 10 ⁶	E	600000 kN/m ²
v	0,2	F_s , Start, Min	25 kN/m ²
		F_s , End, Max	95 kN/m ²
		F_{max}	450 kN

8.6. Analiz İçin Kullanılacak Deprem Yükünün Belirlenmesi

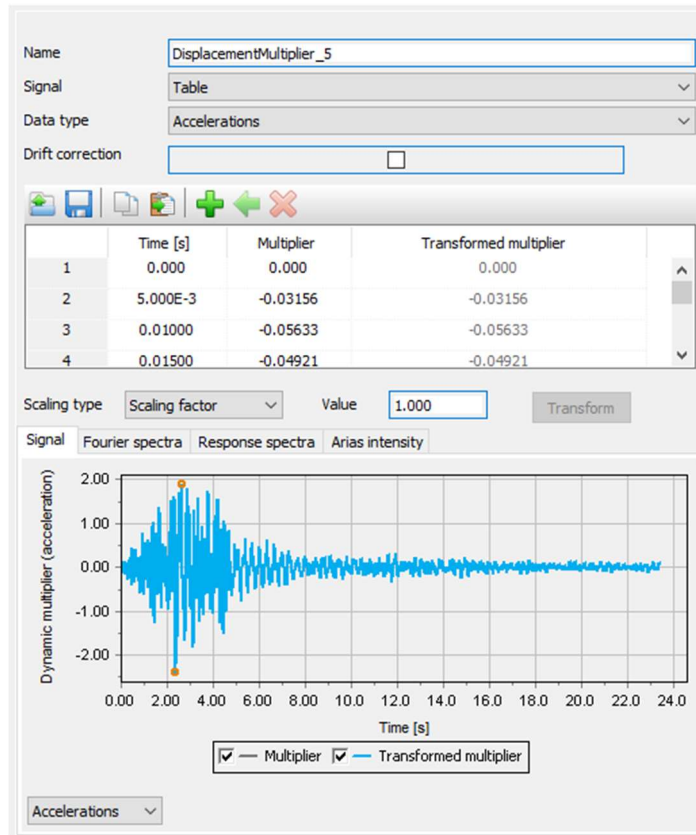
Dinamik analizde, oluşturulan geometrik modelin deprem etkisiyle davranış farklılığı karşılaştırılacaktır. Ayrıca, farklı depremlerde davranışını görebilmek için iki farklı depreme ait ivme kaydı kullanılmıştır. Kullanılan 1. deprem ve 2. depreme ait ivme kayıtları Şekil 8.3 ve Şekil 8.4’te gösterilmiştir. Deprem kayıtları Plaxis programına Şekil 8.5’te gösterildiği gibi deprem verisi ekleme penceresinden eklenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta Plaxis programı ivme verilerini metre ve saniye (m/s²) cinsinden istemektedir.



Şekil 8.4. 1990 Upland depremine (1. Deprem) ait ivme-zaman grafiği (m/s²-s)



Şekil 8.5. 1983 Trinidad depremine (2. Deprem) ait ivme-zaman grafiği (m/s^2 -s)



Şekil 8.6. Plaxis programı deprem verisi ekleme penceresi

8.7. Analiz Sonuçları

Analiz için sıvılaştan zemin modeli 4 farklı durumda analize tabi tutulmuştur. Jet grout kolonlarının sıvılaştırma üzerindeki etkisi incelenirken yapı altında bulunan aynı zeminin 2 farklı yeraltı su seviyesinde ve 2 farklı deprem etkisi ile davranışı değerlendirilmiştir. Oluşturulan bu durumlar için yapıya ilave tek ve çift bodrum eklenmesi durumlarında da ayrı ayrı modeller oluşturularak analizler yapılmıştır. Analiz için oluşturulan durumlar şunlardır:

- 1. Durum; YASS 3m, 1. Deprem etkisi altında,
- 2. Durum; YASS 3m, 2. Deprem etkisi altında,
- 3. Durum; YASS 1,5m, 1. Deprem etkisi altında,
- 4. Durum; YASS 1,5m, 2. Deprem etkisi altında.

Sıvılaştırma analizi için UBC3D-PLM zemin modeli kullanılmış, sıvılaştırma asıl etken olan deprem etkisi ile boşluk suyu basıncı değişimi incelenmiştir. Model içerisinde 'stress point' adı verilen farklı derinlikteki gerilme noktaları analiz öncesinde seçilmiş ve bu noktalar yardımı ile değişen boşluk suyu basıncı değerleri elde edilmiştir. Seçilen nokta adları ve derinlikleri Tablo 9.1'de gösterilmiştir.

Tablo 8.9. Analiz modelinde seçilen stress point derinlikleri

Stress Point	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Derinlik (m)	4	5	7	8	12	16	20

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 16.6.2 numaralı maddesinde, sıvılaştırma kontrolü için zemin yüzeyinden itibaren 20 m derinliği sınır kabul edilmiş ve kontrolün bu derinliğe kadar yapılması istenmiştir. Bu duruma istinaden 20 m derinlikteki noktalar seçilmiş ve bu noktalarda oluşan boşluk suyu basıncının durumu da incelenmiştir.

Demir S. (2019), yaptığı çalışmada laboratuvar ortamında deneye tabi tuttuğu sıvılaştırabilen kum zemininden elde ettiği verileri, modellemesini UBC3D-PLM kullanarak yaptığı sayısal analizlerden elde ettiği veriler ile karşılaştırmıştır. UBC3D-PLM zemin modeli, aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu yansıttığı fakat drenajsız çalışan bir model olduğundan yapılan analizlerde hacim değişimi meydana gelmediğinden, oluşan artık suyu basıncının sönümlenemediğini tespit etmiştir. Bundan dolayı bu modelde boşluk suyu basıncı değişimi ölçülebilirken elde edilen deformasyon değerlerinin tutarsız olduğunu ve gerçeği yansıtmadığını belirtmiştir.

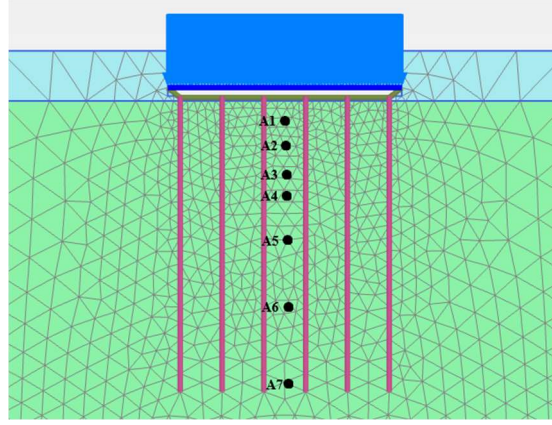
Özener P. ve Demir S. (2019), çalışmalarında UBC3D-PLM modelinin boşluk suyu basıncının pik noktaya kadar ulaşmasında gerçeği yansıttığını fakat sönümleyemediği için deformasyon verilerini doğru yansıtmadığını tespit etmişlerdir. Bu sebeple de modelde yapılan analiz sonuçları değerlendirilirken bu durumun göz önünde bulundurulması gerektiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, deformasyon değerlerinin elde edilmesinde UBC3D-PLM modelinden elde edilen verilerin yerine Mohr-Coloumb ve Hardening Soil zemin modelleri kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır. Yapılan analiz ile sıvılaşabilen bir zeminde jet grout kolonlarının deformasyon üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Yapılan analiz sonuçlarının karşılaştırılmasında, zemin üzerinde deprem etkisi olmadan sadece bina olması (B), bina ve deprem etkisinin birlikte olması (BD), bina zeminine 60 cm çapında 6 adet jet grout kolonu teşkil edilerek deprem etkisi olmadan ve deprem etkisi ile birlikte olması (BJ, BDJ 6x60cm), aynı şekilde 6 adet 90cm çapında kolon kullanılması (BJ, BDJ 6x90cm) ve bina zemininde 9 adet 60cm jet grout kolonu kullanılarak deprensiz ve deprem etkisi altında olması (BJ, BDJ 9x60cm) koşullarından elde edilen değerler incelenmiştir. Boşluk suyu basıncı değişimlerinin değerlendirilmesinde deprem etkisi altında dinamik analizler incelenmiş, düşey deformasyon değerlerinin değerlendirilmesinde ise hem statik hemde dinamik analizlerden elde edilen veriler incelenmiştir.

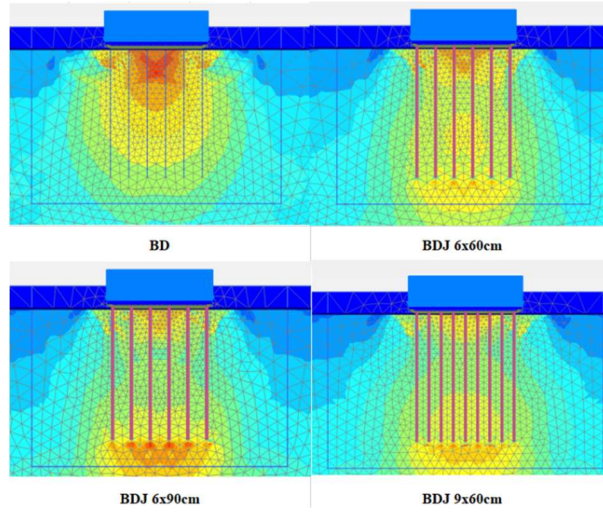
8.7.1. Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri

Yapılan sayısal analizler öncesinde seçilen stress point noktaları ve isimleri model üzerinde Şekil 9.1’de olduğu gibi gösterilmiştir. Seçilen bu noktalardan deprem süresi boyunca boşluk suyu basıncındaki değişim grafikleri elde edilmiştir. 4 farklı analiz durumunda zeminin jet grout kolonları ile iyileştirme yapılmadan önce ve yapıldıktan sonra olacak şekilde değişim grafikleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma ile jet grout kolonlarının sıvılaşma üzerinde asıl etken olan aşırı boşluk suyu basıncı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deprem süresince boşluk suyu basıncındaki artış ve ulaşılan değer seçilen noktadaki düşey gerilme ile karşılaştırılmış ve jet grout kolonlarının sıvılaşma olayı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Daha sonra yapıya ilave edilen borular ile yapılan analizlerden elde edilen değerler bölüm sonunda tablolar halinde verilmiştir.

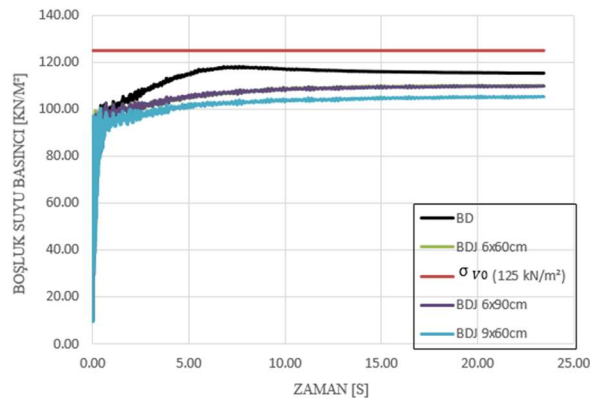


Şekil 8.7. Model üzerinde seçilen stress point noktaları

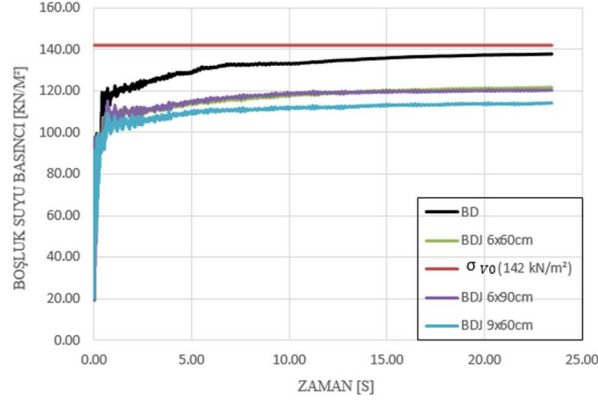
8.7.1.1. 1. Durum; YASS 3m, 1. Deprem Etkisi Altında Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri



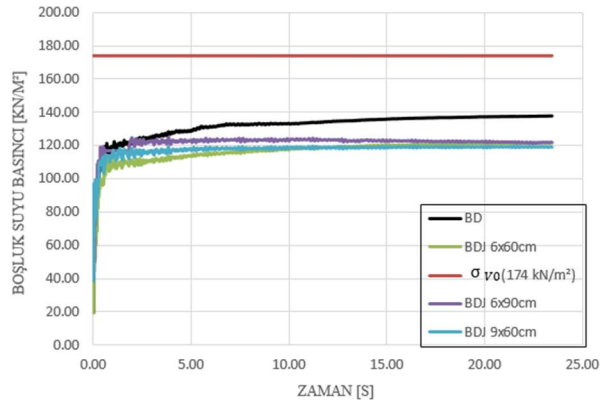
Şekil 8.8. 1. Durumda zemin iyileştirme öncesi ve sonrası oluşan aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı



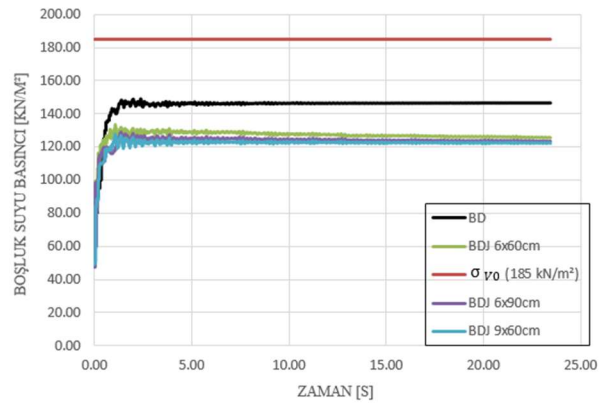
Şekil 8.9. 1. Durumda A1 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



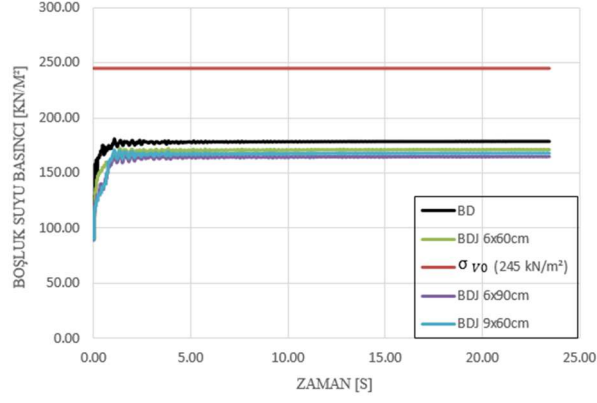
Şekil 8.10. 1. Durumda A2 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



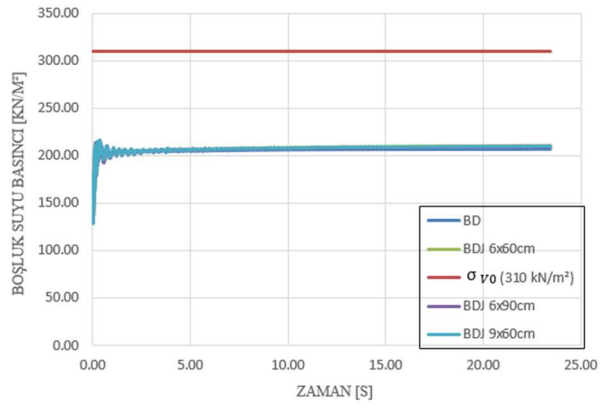
Şekil 8.11. 1. Durumda A3 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



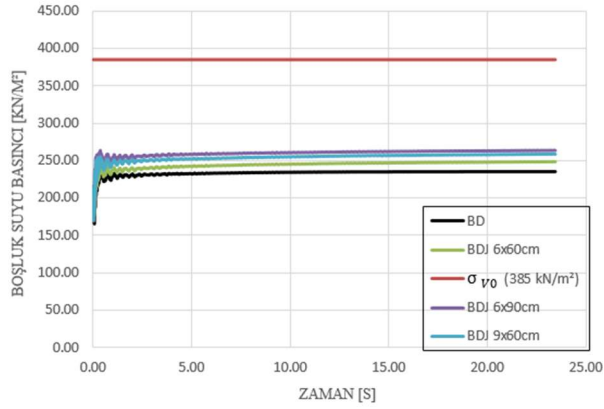
Şekil 8.12. 1. Durumda A4 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.13. 1. Durumda A5 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.14. 1. Durumda A6 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.15. 1. Durumda A7 noktası boşluk suyu basıncı değişimi

Tablo 8.10. 1. Durumda oluşan boşluk suyu basınçları

1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6x60cm	BDJ 6x90cm	BDJ 9x60cm
A1	4m	125	120	110	110	105
A2	5m	143	140	110	120	110
A3	7m	174	150	125	120	120
A4	8m	185	150	130	120	120
A5	12m	245	180	170	160	170
A6	16m	310	205	210	210	210
A7	20m	385	235	250	260	260

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.11. 1. Durumda yapıya tek bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları

1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6x60cm	BDJ 6x90 cm	BDJ 9x60cm
A1	-	-	-	-	-	-
A2	-	-	-	-	-	-
A3	7m	135	120	115	115	110
A4	8m	172	135	128	123	120
A5	12m	192	175	165	158	160
A6	16m	312	207	203	200	202
A7	20m	380	235	240	250	243

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.12. 1. Durumda yapıya çift bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları

1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6x60cm	BDJ 6x90 cm	BDJ 9x60cm
A1	-	-	-	-	-	-
A2	-	-	-	-	-	-
A3	-	-	-	-	-	-
A4	8m	180	115	110	110	112
A5	12m	253	162	157	155	154
A6	16m	315	200	195	193	193
A7	20m	385	230	235	240	235

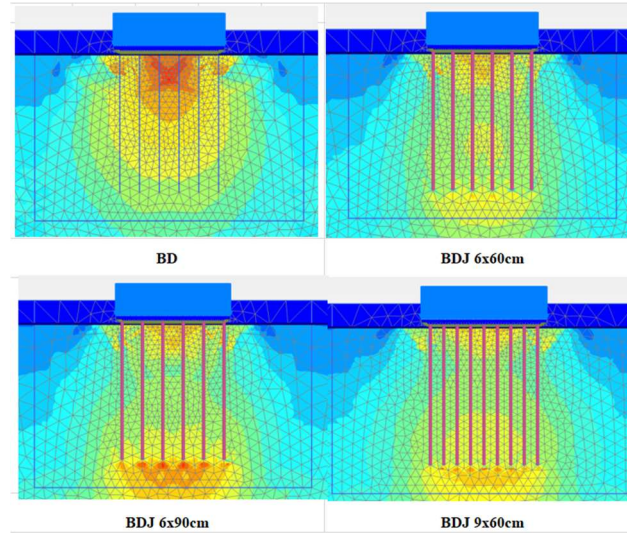
BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.13. 1. Durumda Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerleri

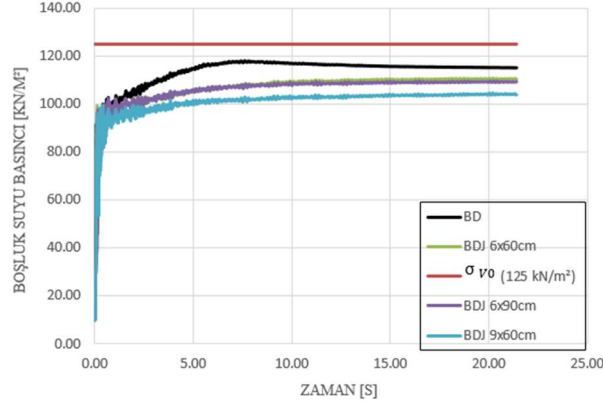
1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)			Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			Mohr Coulomb		Hardening Soil	
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	BD	BDJ 6x60cm	BD	BDJ 6x60cm
A1	4m	145	69	63	77	73
A2	5m	162	76	68	86	79
A3	7m	195	94	80	106	95
A4	8m	213	101	85	113	100
A5	12m	275	124	110	140	130
A6	16m	310	137	142	161	159
A7	20m	374	177	164	192	186

BD: Bina + Deprem BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

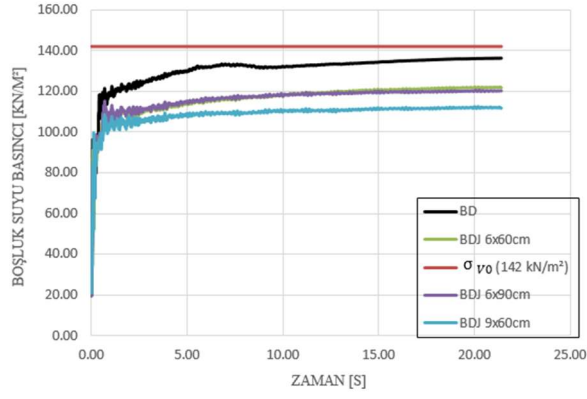
8.7.1.2. 2. Durum; YASS 3m, 2. Deprem Etkisi Altında Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri



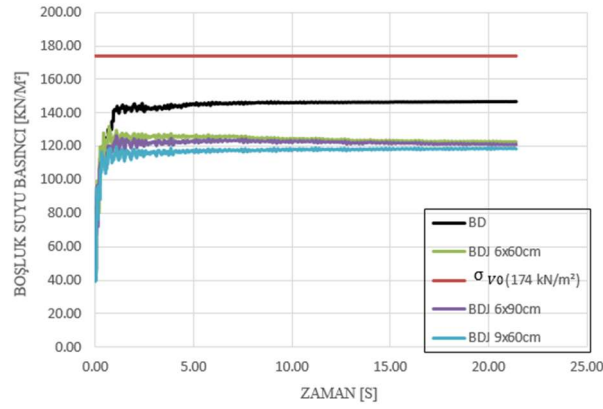
Şekil 8.16. 2. Durumda zemin iyileştirme öncesi ve sonrası oluşan aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı



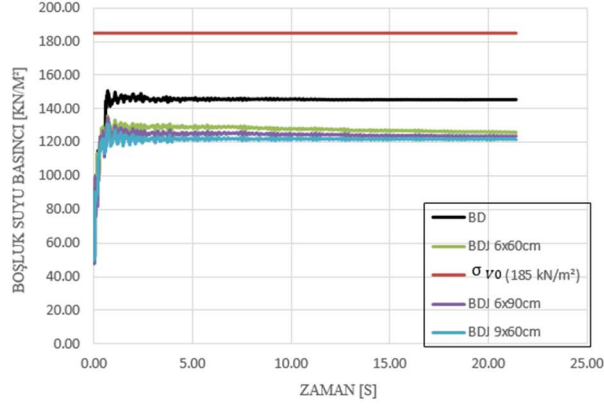
Şekil 8.17. 2. Durumda A1 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



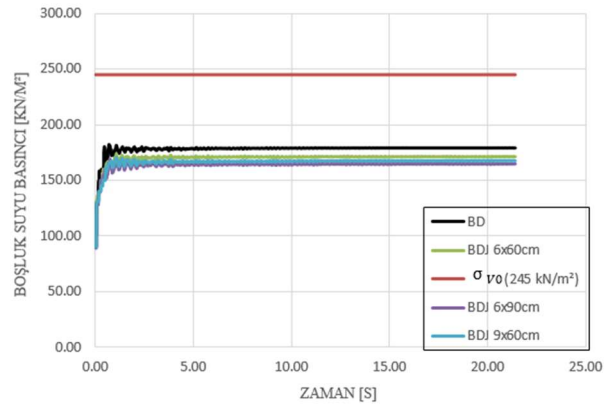
Şekil 8.18. 2. Durumda A2 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



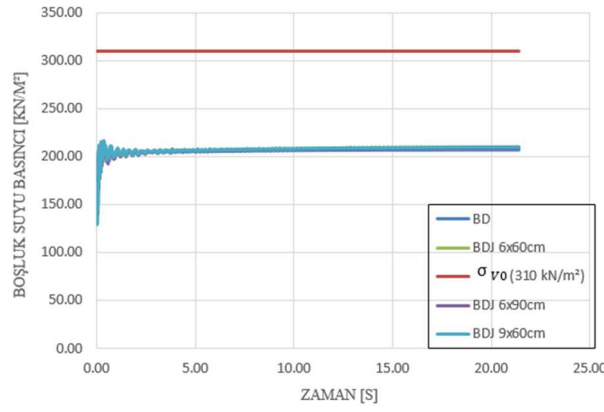
Şekil 8.19. 2. Durumda A3 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



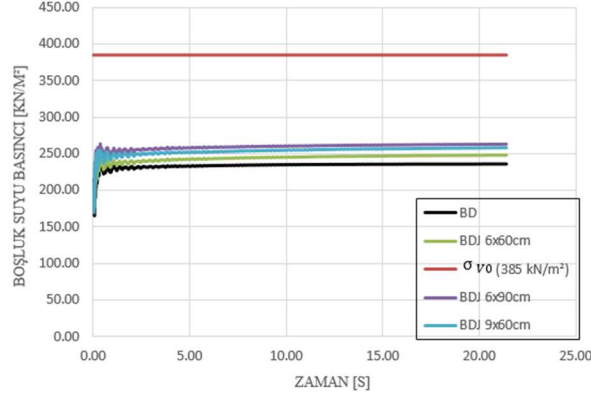
Şekil 8.20. 2. Durumda A4 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.21. 2. Durumda A5 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.22. 2. Durumda A6 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.23. 2. Durumda A7 noktası boşluk suyu basıncı değişimi

Tablo 8.14. 2. Durumda oluşan boşluk suyu basınçları

2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6x60cm	BDJ 6x90 cm	BDJ 9x60cm
A1	4m	125	120	110	110	100
A2	5m	143	135	120	120	110
A3	7m	174	150	130	120	120
A4	8m	185	150	130	125	120
A5	12m	245	180	170	165	170
A6	16m	310	205	210	205	210
A7	20m	385	230	250	260	260

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.15. 2. Durumda yapıya tek bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları

2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6x60cm	BDJ 6x90 cm	BDJ 9x60cm
A1	-	-	-	-	-	-
A2	-	-	-	-	-	-
A3	7m	135	120	115	115	111
A4	8m	172	135	125	125	120
A5	12m	192	175	165	158	160
A6	16m	255	205	202	198	200
A7	20m	380	235	241	245	240

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.16. 2. Durumda yapıya çift bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları

2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6x60cm	BDJ 6x90 cm	BDJ 9x60cm
A1	-	-	-	-	-	-
A2	-	-	-	-	-	-
A3	-	-	-	-	-	-
A4	8m	180	115	112	110	113
A5	12m	253	160	157	155	153
A6	16m	315	200	195	192	192
A7	20m	385	245	235	233	232

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

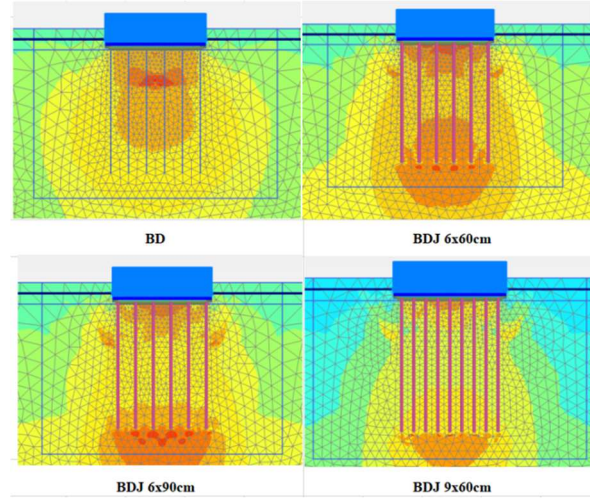
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.17. 2. Durumda Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerleri

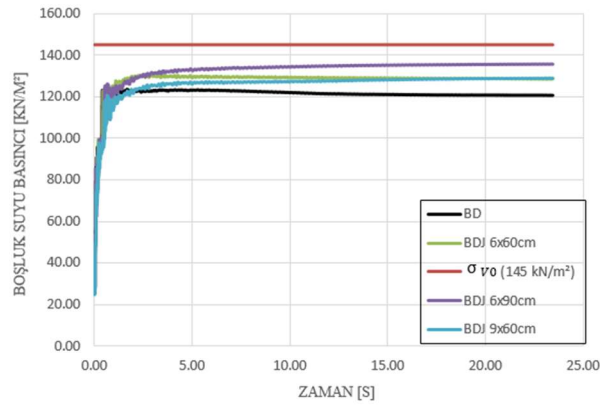
2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)			Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Mohr Coulomb		Hardening Soil	
			BD	BDJ 6x60cm	BD	BDJ 6x60cm
A1	4m	145	69	63	73	70
A2	5m	162	76	68	80	76
A3	7m	195	94	80	95	94
A4	8m	213	100	84	101	100
A5	12m	275	124	110	130	124
A6	16m	310	137	141	158	136
A7	20m	374	177	184	192	176

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

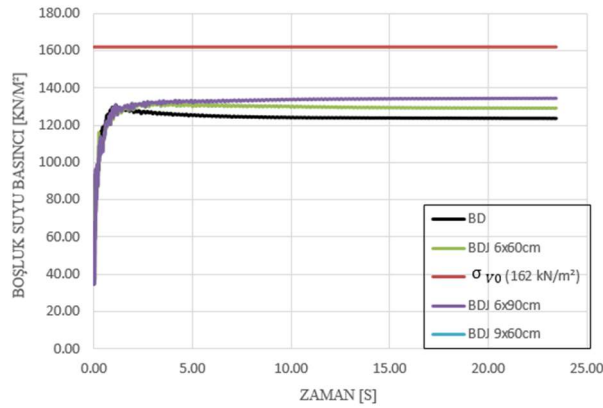
8.7.1.3. 3. Durum; YASS 1,5m, 1. Deprem Etkisi Altında Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri



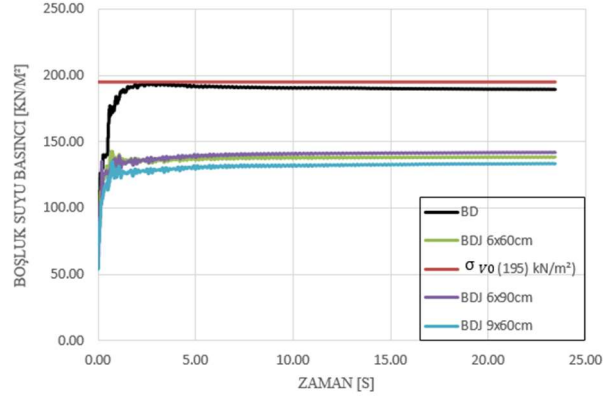
Şekil 8.24. 3. Durumda zemin iyileştirme öncesi ve sonrası oluşan aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı



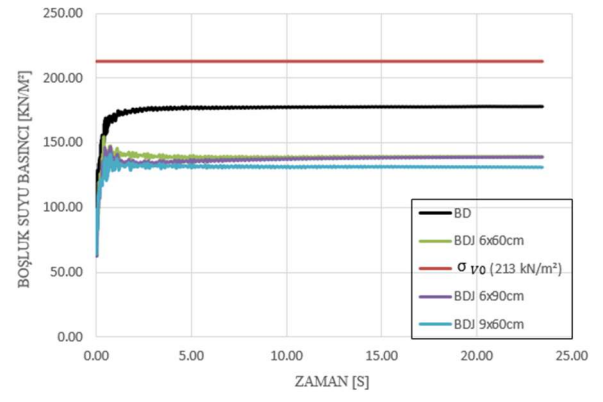
Şekil 8.25. 3. Durumda A1 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



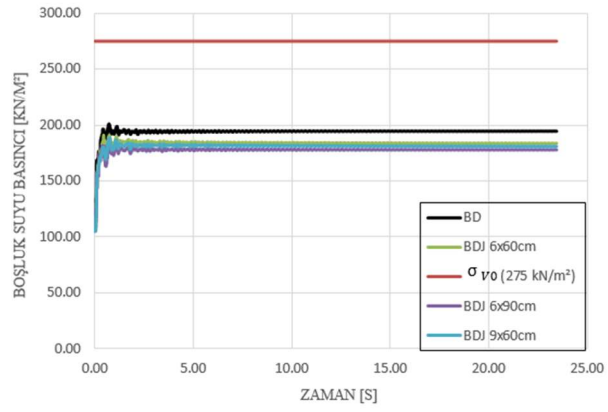
Şekil 8.26. 3. Durumda A2 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



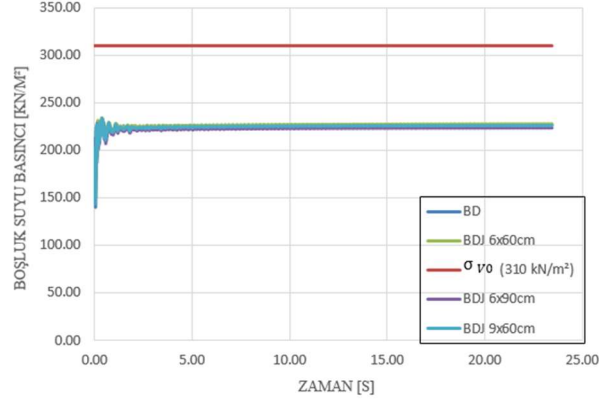
Şekil 8.27. 3. Durumda A3 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



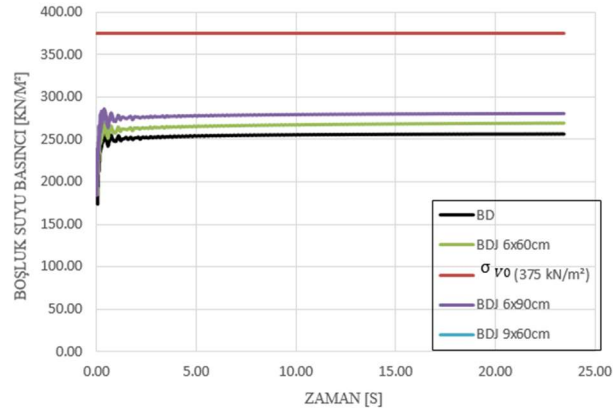
Şekil 8.28. 3. Durumda A4 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.29. 3. Durumda A5 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.30. 3. Durumda A6 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.31. 3. Durumda A7 noktası boşluk suyu basıncı değişimi

Tablo 8.18. 3. Durumda oluşan boşluk suyu basınçları

3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6x60cm	BDJ 6x90cm	BDJ 9x60cm
A1	4m	145	130	120	120	120
A2	5m	162	125	130	135	130
A3	7m	195	190	140	140	130
A4	8m	213	180	140	140	130
A5	12m	275	195	180	175	180
A6	16m	310	225	225	220	225
A7	20m	374	255	270	280	280

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.19. 3. Durumda yapıya tek bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları

3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6x60cm	BDJ 6x90cm	BDJ 9x60cm
A1	-	-	-	-	-	-
A2	-	-	-	-	-	-
A3	7m	187	150	145	140	137
A4	8m	207	160	150	150	142
A5	12m	275	205	190	180	183
A6	16m	320	233	226	220	225
A7	20m	380	250	260	270	265

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.20. 3. Durumda yapıya çift bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları

3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6x60cm	BDJ 6x90cm	BDJ 9x60cm
A1	-	-	-	-	-	-
A2	-	-	-	-	-	-
A3	-	-	-	-	-	-
A4	8m	197	150	150	150	135
A5	12m	270	190	182	178	177
A6	16m	330	230	220	215	215
A7	20m	395	265	270	275	258

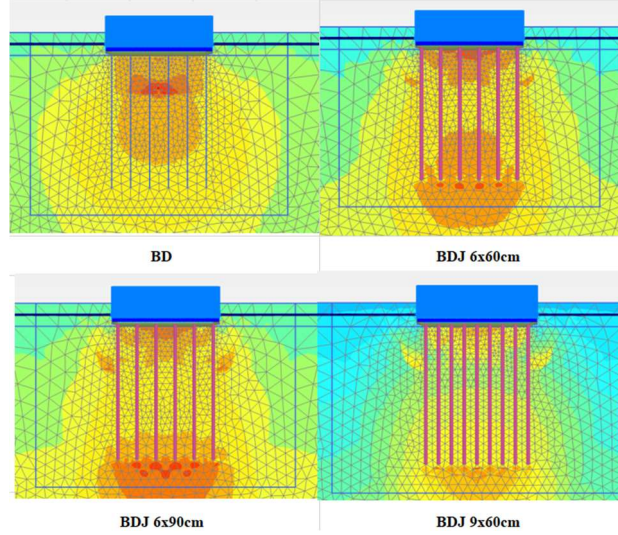
BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.21. 3. Durumda Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerleri

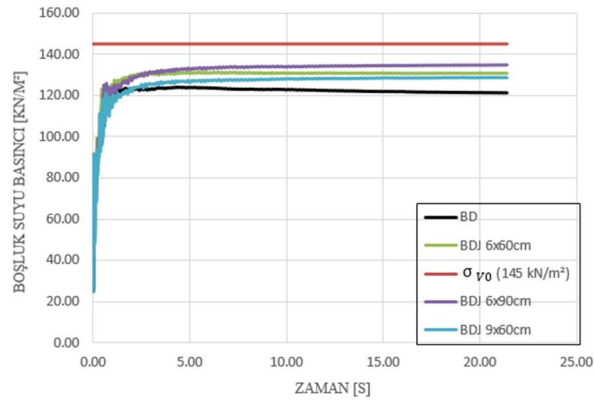
3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)			Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme(kN/m ²)	Mohr Coulomb		Hardening Soil	
			BD	BDJ 6x60cm	BD	BDJ 6x60cm
A1	4m	145	92	87	100	98
A2	5m	162	100	92	111	103
A3	7m	195	120	104	132	116
A4	8m	213	128	108	138	122
A5	12m	275	150	129	163	150
A6	16m	310	161	156	185	179
A7	20m	374	182	196	208	213

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

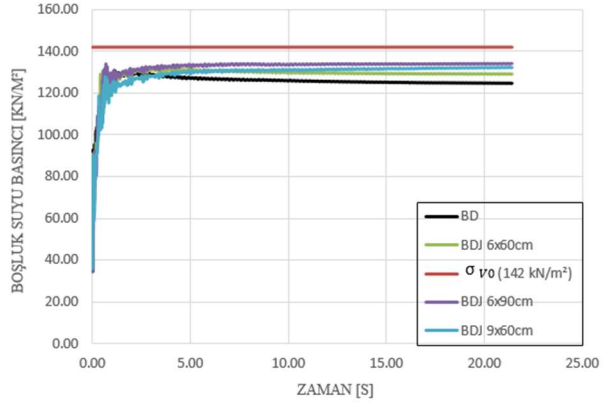
8.7.1.4. 4. Durum; YASS 1,5m, 2. Deprem etkisi Altında Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri



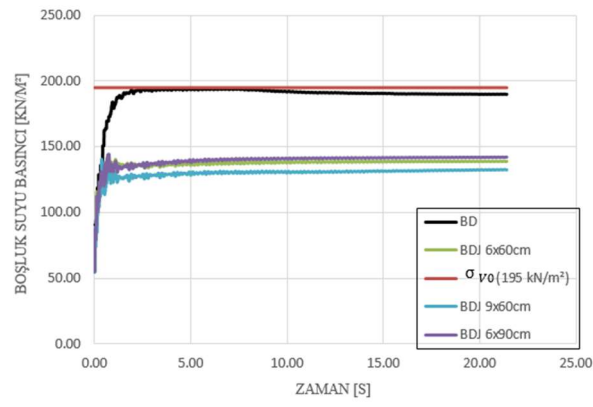
Şekil 8.32. 4. Durumda zemin iyileştirme öncesi ve sonrası oluşan aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı



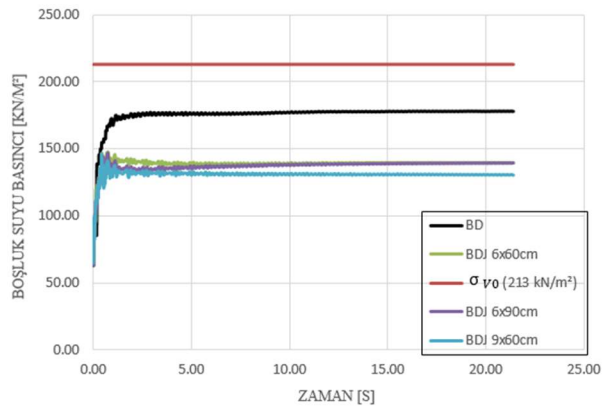
Şekil 8.33. 4. Durumda A1 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



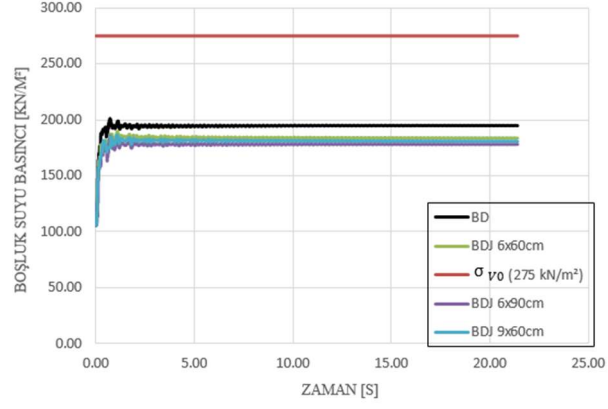
Şekil 8.34. 4. Durumda A2 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



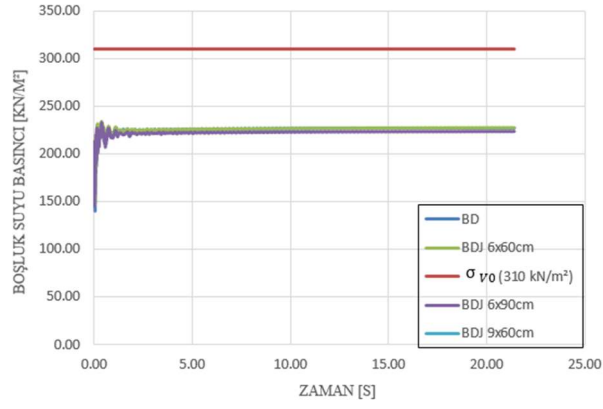
Şekil 8.35. 4. Durumda A3 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



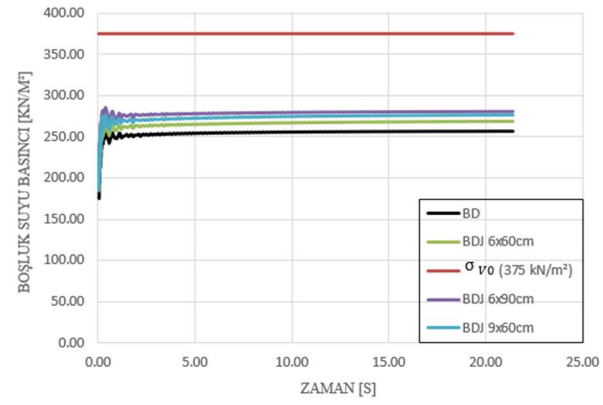
Şekil 8.36. 4. Durumda A4 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.37. 4. Durumda A5 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.38. 4. Durumda A6 noktası boşluk suyu basıncı değişimi



Şekil 8.39. 4. Durumda A7 noktası boşluk suyu basıncı değişimi

Tablo 8.22. 4. Durumda oluşan boşluk suyu basınçları

4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6X60cm	BDJ 6X90 cm	BDJ 9x60cm
A1	4m	145	130	120	120	120
A2	5m	162	125	130	135	130
A3	7m	195	200	140	140	130
A4	8m	213	180	140	140	130
A5	12m	275	195	180	180	180
A6	16m	310	225	225	225	225
A7	20m	374	255	270	280	270

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.23. 4. Durumda yapıya tek bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları

4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6x60cm	BDJ 6x90cm	BDJ 9x60cm
A1	-	-	-	-	-	-
A2	-	-	-	-	-	-
A3	7m	187	150	145	140	137
A4	8m	207	160	150	149	140
A5	12m	275	205	190	180	180
A6	16m	320	235	225	220	225
A7	20m	380	260	265	270	265

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.24. 4. Durumda yapıya çift bodrum ilave edildiğinde oluşan boşluk suyu basınçları

4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)						
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme (kN/m ²)	Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			BD	BDJ 6x60cm	BDJ 6x90cm	BDJ 9x60cm
A1	-	-	-	-	-	-
A2	-	-	-	-	-	-
A3	-	-	-	-	-	-
A4	8m	197	150	150	150	135
A5	12m	270	190	182	178	178
A6	16m	330	230	222	117	216
A7	20m	395	260	265	275	258

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 6x90cm: Bina + Deprem + 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu
BDJ 9x60cm: Bina + Deprem + 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

Tablo 8.25. 4. Durumda Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerleri

4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)			Boşluk suyu basıncı (max) (kN/m ²)			
			Mohr Coulomb		Hardening Soil	
Nokta	Derinlik	Düşey gerilme(kN/m ²)	BD	BDJ 6x60cm	BD	BDJ 6x60cm
A1	4m	145	92	87	98	92
A2	5m	162	100	92	103	100
A3	7m	195	110	98	120	117
A4	8m	213	128	108	127	121
A5	12m	275	150	130	151	150
A6	16m	310	161	156	160	180
A7	20m	374	161	156	180	210

BD: Bina + Deprem
BDJ 6x60cm: Bina + Deprem + 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu

8.7.2. Deformasyon Değişimleri

Yapılan analizler sonucunda yapı temelinde oluşan düşey deformasyon değerlerini elde edebilmek için Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri kullanılmıştır. İki farklı zemin modeli sonuçları karşılaştırılmıştır. Bunlardan elde edilen deformasyon değerleri ile karşılaştırılabilmesi için tablolarda sıvılaşma tespiti için kullanılan UBC3D-PLM zemin modeliyle yapılan analizlerden elde edilen verilere de yer verilmiştir. Elde edilen düşey deformasyon değerleri incelenerek jet grout kolonları ile yapılan zemin iyileştirmesinin, bina temelinde statik ve dinamik koşullarda oluşan düşey deformasyonlar üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Tablolarda bulunan B değeri binanın deprem etkisine maruz kalmadan önce statik yükler altındaki düşey deformasyon miktarını, BD değeri binanın iyileştirme yapılmadan önce deprem etkisi altında düşey deformasyon değerini, BJ değeri zemini jet grout ile iyileştirilen binanın deprem etkisi olmadan düşey deformasyon değerini, BDJ değeri ise zemini jet grout ile iyileştirilen binanın deprem etkisi altındaki düşey deformasyon miktarını belirtmektedir. Zemin iyileştirmesi için 60cm çapında 6 adet kolon, 90cm çapında 6 adet kolon ve 60 cm çapında 9 adet kolon modellenerek ayrı ayrı analiz edilmiştir. Böylelikle hangi çap ve miktarda kolon kullanılarak daha düşük düşey deformasyon değerleri elde edilebileceği değerlendirilmiştir. Bunun yanında yapıya ilave tek ve çift bodrum eklenerek temel derinliği artırılmış, bu koşullarda da ayrı ayrı analizler tekrarlanarak ilave bodrumlar ile deformasyon değişimleri incelenmiştir.

Tablo 8.26. Yapıda oluşan düşey deformasyon miktarları

Zemin Modeli = Mohr Coulomb	Deformasyon (cm)							
	Jet Grout Yok		6x60cm Jet Grout		6x90cm Jet Grout		9x60cm Jet Grout	
	B	BD	BJ	BDJ	BJ	BDJ	BJ	BDJ
1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)	5.6	5.7	4.9	5	5.5	5.5	5	5.1
2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)	5.6	5.8	4.9	4.9	5.5	5.5	5	5
3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)	7.3	7.4	5.6	5.7	6.1	6.1	5.5	5.5
4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)	7.3	7.4	5.6	5.7	6.1	6.1	5.5	5.5
Zemin Modeli = Hardening Soil	Deformasyon (cm)							
	Jet Grout Yok		6x60cm Jet Grout		6x90cm Jet Grout		9x60cm Jet Grout	
	B	BD	BJ	BDJ	BJ	BDJ	BJ	BDJ
1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)	2.1	2.3	2.1	2.1	2.2	2.2	2	2
2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)	5.6	5.7	2	2	2.2	2.2	1.9	1.9
3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)	2.7	2.8	2.4	2.5	2.6	2.7	2.4	2.4
4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)	7.3	7.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.4	2.4
Zemin Modeli = UBC3D-PLM	Deformasyon (cm)							
	Jet Grout Yok		6x60cm Jet Grout		6x90cm Jet Grout		9x60cm Jet Grout	
	B	BD	BJ	BDJ	BJ	BDJ	BJ	BDJ
1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)	5.6	6.6	4.9	6.9	5.5	8	5	7
2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)	5.6	6.3	4.9	6.5	5.5	7.6	5	6.8
3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)	7.3	7.8	5.7	8.3	6.2	9.5	5.6	8.7
4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)	7.3	7.5	5.7	8	6.2	9	5.6	8.3
B: Bina	BD: Bina + Deprem	6x60cm: 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu			9x60cm: 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu			
BJ: Bina + Jet Grout	BDJ: Bina + Deprem + Jet Grout	6x90cm: 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu						

Tablo 8.27. Yapıya tek bodrum ilave edildiğinde oluşan düşey deformasyon miktarları

Zemin Modeli = Mohr Coulomb	Deformasyon (cm)							
	Jet Grout Yok		6x60cm Jet Grout		6x90cm Jet Grout		9x60cm Jet Grout	
	B	BD	BJ	BDJ	BJ	BDJ	BJ	BDJ
1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)	3.5	3.6	3.7	3.7	4.4	4.4	3.9	3.9
2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)	3.5	3.5	3.7	3.7	4.4	4.4	3.9	3.9
3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)	5.2	5.3	4.7	4.8	5.3	5.3	4.7	4.8
4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)	5.2	5.3	4.7	4.8	5.3	5.3	4.7	4.8
Zemin Modeli = Hardening Soil	Deformasyon (cm)							
	Jet Grout Yok		6x60cm Jet Grout		6x90cm Jet Grout		9x60cm Jet Grout	
	B	BD	BJ	BDJ	BJ	BDJ	BJ	BDJ
1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)	2	2.1	2.1	2.2	2.1	2.1	2	2
2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)	3.5	3.6	2.2	2.2	2.1	2.1	1.9	2
3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)	2.5	2.6	2.4	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4
4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)	5.2	5.3	2.6	2.7	2.6	2.7	2.4	2.5
Zemin Modeli = UBC3D-PLM	Deformasyon (cm)							
	Jet Grout Yok		6x60cm Jet Grout		6x90cm Jet Grout		9x60cm Jet Grout	
	B	BD	BJ	BDJ	BJ	BDJ	BJ	BDJ
1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)	3.5	3.7	3.7	4.5	3.7	5.5	3.9	4.8
2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)	3.5	3.5	3.7	4.2	3.7	5.1	3.9	4.6
3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)	5.2	5	4.7	5.7	4.7	6.9	4.8	6.1
4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)	5.2	4.8	4.7	5.4	4.7	6.5	4.8	5.8
B: Bina		BD: Bina + Deprem		6x60cm: 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu		9x60cm: 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu		
BJ: Bina + Jet Grout		BDJ: Bina + Deprem + Jet Grout		6x90cm: 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu				

Tablo 8.28. Yapıya çift bodrum ilave edildiğinde oluşan düşey deformasyon miktarları

Zemin Modeli = Mohr Coulomb	Deformasyon (cm)							
	Jet Grout Yok		6x60cm Jet Grout		6x90cm Jet Grout		9x60cm Jet Grout	
	B	BD	BJ	BDJ	BJ	BDJ	BJ	BDJ
1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)	2.7	2.8	3.1	3.1	3.7	3.7	3.3	3.3
2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)	2.7	2.8	3.1	3.1	3.7	3.7	3.3	3.3
3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)	3.9	4	4	4	4.6	4.6	4.1	4.2
4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)	3.9	4	4	4	4.6	4.6	4.1	4.2
Zemin Modeli = Hardening Soil	Deformasyon (cm)							
	Jet Grout Yok		6x60cm Jet Grout		6x90cm Jet Grout		9x60cm Jet Grout	
	B	BD	BJ	BDJ	BJ	BDJ	BJ	BDJ
1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1	1.1
2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)	2.6	2.7	2.2	2.3	2.3	2.3	2.1	2.2
3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)	1.5	1.5	1.5	1.6	1.5	1.6	1.5	1.5
4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)	3.9	3.9	2.3	2.4	2.4	2.5	2.2	2.2
Zemin Modeli = UBC3D-PLM	Deformasyon (cm)							
	Jet Grout Yok		6x60cm Jet Grout		6x90cm Jet Grout		9x60cm Jet Grout	
	B	BD	BJ	BDJ	BJ	BDJ	BJ	BDJ
1. Durum (YASS 3m, 1. Deprem)	2.7	2.9	3.2	3.6	3.2	4.4	3.3	3.9
2. Durum (YASS 3m, 2. Deprem)	2.8	2.8	3.1	3.4	3.1	4.2	3.3	3.6
3. Durum (YASS 1.5m, 1. Deprem)	3.9	4	4	4.6	4	5.5	4.1	4.8
4. Durum (YASS 1.5m, 2. Deprem)	3.9	3.8	4	4.4	4	5.2	4.1	4.5
B: Bina		BD: Bina + Deprem		6x60cm: 6 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu		9x60cm: 9 Adet 60 cm çapında jet grout kolonu		
BJ: Bina + Jet Grout		BDJ: Bina + Deprem + Jet Grout		6x90cm: 6 Adet 90 cm çapında jet grout kolonu				

8.8. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

8.8.1. Boşluk Suyu Basıncı Değişimlerinin Karşılaştırılması

Yapılan analizler tüm durumlar için deprem sırasında yeraltı su seviyesi altında aşırı boşluk suyu basıncının geliştiğini göstermiştir. Fakat sadece UBC-3DPLM zemin modeli kullanılarak oluşturulan modeller üzerindeki seçilen noktalarda, artan boşluk suyu basıncının düşey gerilme değerine ulaşarak sıvılaşma olayının gerçekleştiği görülmüştür. Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modeli ile yapılan analizlerde ise aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunun daha sınırlı seviyelerde kaldığı ve bu sebeple de hiçbir durumda deprem anında artan boşluk suyu basıncı değerinin düşey gerilme değerine ulaşmadığı görülmüştür.

Boşluk suyu basıncı ölçümü için UBC-3DPLM zemin modeli kullanılarak oluşturulan modellerde seçilen gerilme noktaları incelendiğinde;

- Yeraltı su seviyesinin 1,5m olması durumunda her iki deprem etkisiyle; A1, A2 noktaları incelendiğinde bu noktalarda iyileştirme öncesi boşluk suyu basıncının düşey gerilme değerine ulaşmadığı, iyileştirme sonrasında ise basınç artışlarının daha fazla olduğu fakat sıvılaşma meydana gelmediği görülmüştür. 7m ve 8m derinlikte bulunan A3 ve A4 noktaları yeraltı su seviyesinin 1,5m olması durumunda incelendiğinde ise iyileştirme yapılmadan önce boşluk suyu basıncı düşey gerilmeye ulaşırken jet grout kolonlarıyla yapılan iyileştirme ile bu artışın ciddi şekilde sınırlandırıldığı ve sıvılaşmanın önüne geçildiği görülmüştür. Bu noktalardan elde edilen grafikler jet grout kolonlarıyla yapılan iyileştirmenin sıvılaşmaya karşı etkisini diğer noktalara göre daha yüksek değerlerde göstermektedir.
- Yeraltı su seviyesinin 3m olduğu durumda; A1, A2, A3, A4 noktaları incelendiğinde her iki deprem etkisiyle tüm noktalarda iyileştirme yapılmayan modelde boşluk suyu basıncı değerleri düşey gerilme değerine ulaşmış veya yakın değerler almıştır. Böylelikle sıvılaşma olayı meydana gelmiştir. Fakat jet grout kolonu ile iyileştirilen zemin profilinde aynı noktalarda deprem anında artan boşluk suyu basıncı düşey gerilme değerine ulaşamamış ve sıvılaşma gerçekleşmemiştir. Böylelikle yapılan jet grout kolonları yardımı ile sıvılaşmanın önüne geçildiği görülmüştür.
- Derinliğin artması durumunda; daha derinlerde bulunan A5, A6, A7 noktalarında ise her iki su seviyesi durumunda da sıvılaşma meydana gelmemiştir. Zemin içerisinde oluşan düşey gerilme derinlik ile artan bir faktör olması sebebiyle bu noktalarda oluşan düşey gerilme yüzeye yakın noktalarda oluşan gerilmelere göre daha yüksek

değerler almaktadır. Boşluk suyu basıncı değerinin derinlikle artışı ise düşey gerilmeye nazaran daha sınırlı seviyelerde kalmaktadır. Yani derinlik arttıkça aynı noktada düşey gerilme ile boşluk suyu basıncı değerleri arasındaki fark büyümektedir. Bu durumda zemin yüzeyine yakın noktalarda boşluk suyu basıncı düşey gerilme değerine ulaşabilirken, derinlik arttıkça ulaşması zorlaşmakta ve sıvılaşma olayı gerçekleşmemektedir.

- Farklı deprem etkilerinde; seçilen noktalarda genellikle iki deprem etkisi altında da aynı boşluk suyu basıncı değerleri oluşurken 3m yeraltı su seviyesi için 7m derinlikte bulunan A3 noktasında 2. Deprem etkisi altında iyileştirme yapılmadan önce daha yüksek seviyede boşluk suyu basıncı artışı görülmüştür. Fakat yapılan iyileştirme sonrası oluşan boşluk suyu basıncı artışları düşerek aynı seviyelerde elde edilmiştir.
- Farklı jet grout kolon çapları ve adetleri kullanıldığında; 60cm olan jet grout kolonu çapları %50 arttırılarak 90cm e çıkarılmıştır. Yapılan analizler incelendiğinde boşluk suyu basıncı değişimlerinin çok az miktarda azaldığı hatta bazı noktalarda aynı değerleri verdiği görülmüştür. Daha sonra 6 adet olan 60cm çapındaki jet grout kolonlarının sayısı %50 arttırılarak 9 adet 60cm çapında jet grout kolonu teşkil edilmiştir. Jet grout kolon sayısı arttığında elde edilen sonuçlar jet grout kolon çapının artmasıyla elde edilen boşluk suyu basınçlarından daha düşük değerlerde elde edilmiştir.
- Bodrum kat sayısının artması durumunda; mevcut yapıya tek ve çift olacak şekilde bodrumlar eklenerek temel derinliği arttırılmıştır. Yapılan analizlerde aynı noktalar için bodrum eklenerek yapılan analizlerde bodrum eklenmeden yapılan analizlere göre daha düşük değerlerde boşluk suyu basıncı artışları görülmüştür.

8.8.2. Deformasyon Değişimlerinin Karşılaştırılması

Oluşturulan modellerde yapıda meydana gelecek düşey deformasyonları tahmin edebilmek için Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri kullanılmıştır. Hardening Soil model ile yapılan analizlerde jet grout zemin iyileştirmesinin düşey deformasyonları daha belirgin azalttığı görülmüştür. Laman vd. (2007) de çalışmalarında kum zemin üzerine oturan dairesel bir temelin deformasyon davranışını deneysel olarak ve sayısal ortamda Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleriyle analiz ederek sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonuçta, Hardening Soil modelinin deneysel çalışmaya daha yakın ve gerçekçi sonuçlar verdiğini, Mohr Coulomb modelinin ise deneysel verilere göre daha düşük ve sınırlı sonuçlar

verdiğini bu sebeple de deformasyon analizlerinde doğru sonuçlar için Hardening Soil modelinin kullanılmasının gerektiğini belirtmişlerdir. Bu modellerden elde edilen değerlerin karşılaştırılabilmesi amacıyla sıvılaşma analizi için kullanılan UBC3D-PLM zemin modelinden elde edilen deformasyon değerlerine de aynı tablolar içerisinde yer verilmiştir. Fakat Mohr Coulomb ile Hardening Soil zemin modellerinde elde deformasyon verileri incelendiğinde iyileştirme yapılan ve yapılmayan durumlarda daha tutarlı sonuçlar görülürken UBC3D-PLM ile elde edilen verilerde daha tutarsız sonuçlar elde edilmiştir. Demir ve Özener (2019) de çalışmalarında labaratuvar ortamında yaptıkları sıvılaşma deneyini sayısal olarak UBC3D-PLM zemin modeliyle de modelleyerek analizlerden elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonuçta, sayısal modelden elde edilen boşluk suyu basıncı değerlerinin labaratuvar deneyleri ile örtüşüğünü fakat deformasyon değerlerinin labaratuvar deneylerine göre çok farklı büyüklüklerde olduğu ve UBC3D-PLM model ile tutarsız sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu sebeple değerlendirmeler Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri üzerinden yapılmıştır.

- Tüm durumlarda statik ve dinamik etkiler ile yapıda düşey deformasyon meydana geldiği görülmüştür.
- Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri kullanıldığında yeraltı su seviyesi 1,5m olması durumunda 3m olması durumuna göre daha yüksek düşey deformasyon değerleri elde edilmiştir.
- Farklı deprem etkileri altında; aynı su seviyelerinde analiz yapıldığında Mohr Coulomb modeliyle aynı deformasyon değerleri elde edilmiştir. Hardening Soil modeli ile analiz yapıldığında ise 2. Deprem etkisi altında olan modellerde 1. Deprem etkisine göre daha yüksek düşey deformasyon sonuçları elde edilmiştir.
- Tüm durumlarda yapılan jet grout kolonlarının meydana gelecek deformasyonlara etkisini incelemek için değerlendirme yapıldığında Mohr Coulomb modeliyle yapılan analizlerde %10-15 oranlarında deformasyon azalması görülürken Hardening Soil modeliyle yapılan analizlerde %50-60 oranlarında deformasyon azalması görülmektedir.
- Farklı jet grout kolon çapı ve adedi kullanılması durumunda; yapıda meydana gelen düşey deformasyonu daha az seviyelere indirmek için kolon çapı ve daha sonra da kolon sayısı arttırılmıştır. Analiz sonuçlarında en düşük düşey deformasyon değerleri 9 adet 60 cm çapında jet grout kolonu kullanılarak elde edilmiştir. Zeminin jet grout kolonları kullanarak iyileştirilmesi ile bütün durumlarda düşey

deformasyonlar sınırlandırılmış ve aşırı deformasyonların önüne geçilebileceği görülmüştür.

- Bodrum kat sayısının artması durumunda; yapıya ilave tek ve çift bodrum eklenerek temel derinliği düşürülmüş yani kazı derinliği arttırılarak analizler tekrarlanmıştır. Analizlerden elde edilen veriler incelendiğinde derinlik arttıkça yapıda meydana gelen düşey deformasyonların azaldığı görülmüştür.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Problemlili zeminlerde sıvılaşmanın önlenmesi için jet grout zemin iyileştirme yönteminin etkisini incelemek amacıyla statik, 2 farklı deprem etkisi altında ve farklı yeraltı suyu seviyelerinde Mohr Coulomb, Hardening Soil ve UBC-3DPLM modelleriyle analizler yapılmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre yapılan değerlendirme sonucunda sıvılaşma problemi olan zemin profili, UBC3D-PLM zemin modeli ile modellenerek sayısal ortamda analiz edildiğinde sıvılaşma olayı gerçekleşmiş ve yapılan jet grout iyileştirmesi ile sıvılaşmanın bertaraf edilebileceği görülmüştür. Fakat aynı zemin profili Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri ile analiz edildiğinde sıvılaşma olayı gerçekleşmemiştir. Bu durum sıvılaşma olayını UBC3D-PLM zemin modeli yansıtabilirken Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri yansıtamadığını göstermektedir.
- Sıvılaşma yeraltı su seviyesi altında bulunan zeminlerde meydana gelmektedir. Ayrıca su seviyesi arttıkça zeminde oluşan boşluk suyu basıncı artışlarında artmaktadır. Bu durumda yüksek su seviyesi altında bulunan zeminlerin düşük su seviyesi altında bulunan aynı tür zeminlere göre daha yüksek sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür.
- Analiz noktaları incelendiğinde 12m' ye kadar olan derinliklerde jet grout kolonlarının etkisi ile boşluk suyu basınçları yüksek seviyelerde sınırlandırılırken 16m ve jet grout kolonlarının sonu olan 20m derinliğe doğru kolonların etkisi azalmakta hatta kolon sonlarında boşluk suyu basıncında azalma görülmemektedir. Bu durumda jet grout kolonlarının orta ve üst noktalarında bulunan etkisinin kolon sonlarında kaybolduğu görülmüştür.
- Zemin yüzeyinden derinlik arttıkça artan boşluk suyu basıncının artan düşey gerilme değerine ulaşması zorlaşmaktadır. Bu da derinlik arttıkça sıvılaşma potansiyelinin azaldığını göstermektedir. Bu durum Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde 20m derinlikten sonra sıvılaşma değerlendirmesi istenilmemesiyle uyumlu olmaktadır.
- Kullanılan farklı büyüklüklerdeki depremlerde boşluk suyu basınçları genellikle aynı değerlere ulaşmış fakat magnitudü daha büyük olan 2. Depremde bazı noktalarda daha büyük boşluk suyu basıncı oluşmasına sebep olmuştur. Fakat

yapılan jet grout kolonları her iki depremde de aynı seviyelerde boşluk suyu basınçlarını sınırlamıştır.

- Jet grout kolonlarının çapı artmasıyla boşluk suyu basınçlarında azalma olmuş fakat yakın değerler görülmüştür. Bunun yerine jet grout kolonu sayısı arttığında ise diğer durumlara nazaran daha düşük boşluk suyu basıncı ve düşey deformasyon değerleri elde edilmiştir.
- Yapılan iyileştirmenin etkisini arttırmak için kolon çapını arttırmak yerine aynı oranda kolon sayısını arttırmak, deformasyon değerlerini daha belirgin şekilde azaltmaktadır.
- Ayrıca yapıya bodrum eklenerek temel derinliği düşürüldüğünde temel altında bulunan aynı noktalarda bodrumsuz duruma göre daha düşük boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. Bu durum kazı derinliğinin artmasıyla veya sıvılaştıran tabakanın bir kısmını alarak sıvılaştırmanın önüne geçilebileceğini göstermektedir.
- Yapıya ilave bodrum eklenerek temel seviyesi düştüğünde yani kazı derinliği arttığında meydana gelen deformasyonlar bir önceki duruma göre daha düşük seviyelerde olmaktadır.
- Yapıda oluşan deformasyonların tahmin edilebilmesi için Mohr Coulomb ve Hardening Soil zemin modelleri ile analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde Mohr Coulomb zemin modeli farklı depremlerde aynı değerleri verirken Hardening Soil modeli ise depremdaki farklılıkları dikkate alarak farklı sonuçlar vermiştir. Ayrıca yapılan iyileştirmelerin etkisini Hardening Soil model daha iyi yansıtmıştır. Bu durum yapılan analizlerde deformasyon değerlerinin elde edilmesi için Hardening Soil zemin modelinin kullanılmasının daha doğru olacağını göstermektedir. Boşluk suyu basınçları ise UBC3D-PLM zemin modeli kullanılarak elde edilmektedir.
- Sonuçlar incelendiğinde jet grout kolonları boşluk suyu basıncı artışlarını sınırlandırarak sıvılaşmayı engelleyebildiği gibi yapıda oluşan düşey deformasyonları azaltarak aşırı düşey deformasyonların da önüne geçebildiği görülmüştür .

Yapılan analizlerden elde edilen veriler ışığında jet grout zemin iyileştirme yönteminin sıvılaşmayı engelleme ve yapılarda oluşan düşey deformasyonların önüne geçilmesi amacıyla kullanılabileceği görülmüştür. Gelişen teknoloji ile zeminin iyileştirilmesi sonlu elemanlar metoduyla analiz edilerek zeminin iyileştirme sonrası davranışı öngörülebilmektedir. Tasarım ve analizlerden elde edilen sonuçlar, uygulama sonrası arazi deneyleri ile yerinde kontrol

edilmelidir. B6ylelikle, yapılarda oluşacak ağır hasarların ve meydana gelecek can kayıplarının önüne geçilebilecektir.

KAYNAKÇA

- Aksangür, Z.** (2017). *Yüksek Modüllü Kolonların (Jet Grout) Zemin İyileştirmesinde Kullanılması Ve Hesap Yöntemleri*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Altun, S., Göktepe, A. B., Erdoğan D., & Tan, Ö.** (2005). Kumların Sıvılaşma Sırasındaki Akma Davranışı, *Geoteknik Sempozyumu*, Ekim, Adana, Bildiriler Kitabı.
- Baumann, V.** (1984). “Das Soilcrete - Verfahren In Der Baupraxis”, *Vortrage Der Baugrundtagung*, Duesseldorf: 49 - 83. Dgeg.
- Bray, J. D., Sancio, R. B., Riemer, M., & Durgunoglu, H. T.** (2004), Liquefaction Susceptibility Of Fine Grained Soils, *Proceedings 11th Icsd And 3th Icege*, Uc Berkeley, California, U.S.A
- Brinkgreve, Ronald, B. J.** (2005). *American Society Of Civil Engineers Geo-Frontiers Congress*, Austin, Texas, United States (January 24-26, 2005) Soil Con..
- Dağdeviren, U.** (2019). Yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Zeminlerin Sıvılaşma Analizi Ve Sıvılaşmaya Karşı İyileştirilmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama Ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler Ve Çevre Dergisi*.
- Das, B. M.** (1995). Principles Of Foundation. Engineering, *Pws Publishing' Company*, A Division Of International Thomson Publishing Inc. Boston, Usa.
- Davran, S.** (2022). *Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Sayısal Analiz Yardımıyla Değerlendirilmesi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Day, R. W.** (2002). *Geoteknik Deprem Mühendisliği El Kitabı* , Çev. Mollamahmutoğlu, M. Ve Kayabalı, K., Mcgraw-Hill Book Co., New York.
- Division Of Mines And Geology*, 1997. Guidelines For Evaluating And Mitigating Seismic Hazard In California.
- Demir, S.** (2019). *Yüksek Modüllü Kolonlarla İyileştirilmiş Sıvılaşabilir Zeminlerin Davranışının İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Doğu, O., Yıldırım, H., & Durgunoğlu, A. T. (2006).** Zeminin İnce Dane Oranı Ve Spt Vuruş Sayısının Jet Grout Kolonların Mukavemetine Etkisi, *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği On Birinci Ulusal Kongresi*, K.T.Ü., Trabzon.

Durgunoğlu, H.T., Kulaç, H.F., Oruç, K., Öge, C.E., & Eker, F.Ş. (1998). “Jet Grout Yöntemi İle Zemin İyileştirme Üzerine Bir Uygulama”, *Zemin Mekaniği*.

Durgunoğlu, H.T. (2004). Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı, *Tmh-Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 431-2004/3.

Durgunoglu, H.T., Kulaç, H.F., Oruç, K., Yıldız, R., Altugu, T., & Emrem, C.A. (2002). “Sıvılaşmaya Karşı Jet Grout Yöntemi İle Zemin Islahına Ait Bir Vaka Analizi”, *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Düzgün, M. (2001). Elastik Zemine Oturan Sürekli Temellerin Kuvvet Yöntemi İle Analizi Ve Sayısal Hesabı İçin Geliştirilen Bilgisayar Programı, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 3(3), 33-50.

Erdil, B. (2008). *Jetgrout Kolonu Tasarım Taşıma Gücü Hesabı*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gökalp, A., & Düzceer, R. (2002). “Ground Improvement By Jet Grouting Technique For Foundations Of A Natural Gas Combined Cycle Power Plant İn Turkey” *Ninth International Conference & Exhibition On Piling And Deep Foundations*, Dfi, October 2002, Nice, France.

International Navigation Association, (2001). “Seismic Guidelines For Port Structures”, Working Group No. 34 Of The Maritime Navigation Commission, A.A. Balkema Publishers, Netherlands.

Koçbay, A. (2013). Zemin İyileştirme Yöntemleri, *T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü Eğitim Semineri*, 12-14 Mart. Antalya.

Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Eartquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, ABD.

Küsin, C. C. (2009). *Jet Grout Yöntemi İle İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal Analizi*. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Laman, M., Yıldız, A., Örnek, M., & Demir, A. (2007). Zeminlerin Mekanik Davranışının Modellenmesi, *XV. Ulusal Mekanik Kongresi*, 03-07 Eylül 2007, Isparta.

Mısır, G. (2020). Jet Grout Yöntemi İle Zemin İyileştirme Ve Deplasman Tahmini: Vaka Analizi, *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, Sayı 18, S. 290-299.

Mollamahmutoğlu M., & Babuçu F. (2006). *Zeminlerde Sıvılaşma Analiz Ve İyileştirme Yöntemleri Kitabı.*

Mungan, H., & Sünbül A.B. (2018). Sonlu Elemanlara Dayalı Dinamik Analiz; Zemin İyileştirme - Derin Temel Örneği, *6th International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science, 09-11 November 2018 (Isites2018 Alanya – Antalya - Turkey).*

Mungan, H., Sünbül, Güner, A. B., & Özkaynak, H. (2020). Yüzeysel Temelli Yapı Grubunda Yapı Zemin Etkileşiminin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi, *Euroasia Journal Of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences International Indexed And Refereed, Issn: 2667-6702.*

Ohta, Y., Goto, N. (1978). Emprical Shear Wave Velocity Equations In Terms Of Characteristic Soil Indices, *Earthquake Engineering And Structural Dynamics, Vol.6, P. 167 - 187.*

Öntürk, K. (2011). *Zemin İyileştirmesinde Polısaj, Kireç Ve Uğuucu Külün Kullanımı.* Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Özaydın, K. (2007). Zeminlerde Sıvılaşma, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.*

Özdemir, A., & Mehmet, Ö. (2006). Zeminlerin İyileştirilmesi Ve Son Yıllarda Sondaj, *Dünyası Dergisi, Sayfa 34-38.*

Özener, P., & Demir, S. (2019). Sıvılaşmanın Ubc3d-Plm Model İle Tahmin Edilmesi: Santrifüj Deneyi Örneği, *Teknik Dergi, 2019 9421-9442, Yazı 550.*

Özsoy, B., & Durgunoğlu, H.T. (2003). “Sıvılaşma Etkilerinin Yüksek Kayma Modüllü Zemin-Çimento Karışımı Kolonlarla Azaltılması”, *5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.*

Öztürk, S. (2016). *Sıvılaşmaya Karşı Jet Grout Yöntemi İle Zemin İyileştirilmesi: Samsun-Tekkeköy Örneği.* Trabzon Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Plaxis 2d General Information Manuel. (2020). Bentley Communities.

Plaxis 2d Materials Manuel. (2020). Bentley Communities.

Plaxis 2d Referance Manuel. (2020). Bentley Communities.

Plaxis 2d Scientific Manuel. (2020). Bentley Communities.

Plaxis 2d Tutorials Manuel . (2020). Bentley Communities.

Roshan, M.J., vd. (2022). Improved Methods To Prevent Railway Embankment Failure And Subgrade Degradation: A Review, *Transportation Geotechnics*, Volume 37.

Seed, H.B., & Idriss, I.M. (1971). Simplified Procedure For Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Asce Journal Of The Soilmechanics And Foundations Division*.

Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., & Chung, R., (1985). Influence Of Spt Procedures İn Soil Liquefaction Resistance Evaluations, *Journal Of Geotechnical Engineering*, Asce, Vol.111(12), Pp.1425-1445, 1985.

Sert, S., & Önalp, A. (2007). Turba Üzerine Yapılmış Rijit Platformun Oturmaları Ve Kontrolü, *Zmtm 1. Özel Konulu Sempozyumu: Teori Ve Uygulamada Zemin - Yapı Etkileşimi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı*, Sayfa: 181 - 185, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Sünbül, A.B., & Parlak, S. (2015). Sonlu Elemanlara Dayalı Sayısal Analiz; Temel Altı Zemin İyileştirme Örneği, *2nd International Sustainable Buildings Symposium*, Isbs, Ankara, Turkey.

Şahin, G., Toygar, O., & Kahyaoglu, M.R. (2022). Sıvılaşma Riskinin Azaltılması İçin Kullanılan Jet Grout Kolonlarının Verimliliği Üzerine Bir Sayısal Çalışma, *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 4(2), 210-229.

Usace. (1999). Guidelines On Ground Improvement For Structures And Facilities. *Technical Letter No. 1110-1-185*, Department Of The Army. U.S. Army Corps Of Engineers, Washington, D.C.109 Pp.

Youd, L.T., Idriss, I.M., Andrus, R.D., & Arango, I. (2001). Liquefaction Resistance Of Soils: Summaryreport From The 1996 Nceer And 1998 Nceer-Nsf Workshops On Evaluation Of Liquefaction Resistance Of Soils, *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, Asce, 127(10), 817 – 833.

Wong, K.S., Li, J.C., Goh, A.T.C., Poh, K.B., & Oishi, E. (1999). ‘‘Effect Of Jet Grouting On Performance Of Deep Excavation İn Soft Clay’’, *Proceedings Of The 5th International Symposiom On Field Measurements İn Geomechanicsfmgm99*, Singapure, 279 - 284.