

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK MODÜLLÜ KOLONLARLA ZEMİN
İYİLEŞTİRMESİNİN MİDAS GTS YAZILIMI İLE ÜÇ
BOYUTLU İRDELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seda TEMEL

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sedat SERT

Ocak 2020

BEYAN

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

Seda TEMEL

23 Ocak 2020



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini aldığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Sedat SERT'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında yardımcı olan Araştırma Görevlisi Kadir KOCAMAN'a, Midas GTS yazılımında yaptığım analizler boyunca sorularıma cevap veren, yardımlarını esirgemeyen Dr. Sevinç ÜNSAL ORAL'a ve Ergem Mühendislik Geoteknik Hizmetler A.Ş.'den İnşaat Mühendisi Elif Nur KELEŞ'e teşekkür ederim.

Ayrıca lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca yine Sakarya Üniversitesi Geoteknik Çalışma Grubu çatısı altında bana yardımcı olan, her zaman bilgi ve birikimlerinden faydalandığım, beni destekleyen ve geoteknik alanında bana büyük katkılarda bulunan Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK ve Doç. Dr. Ertan BOL'a tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iiiv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
BÖLÜM 2.	
ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ VE YÜKSEK MODÜLLÜ KOLONLAR	3
2.1. İyileştirme Gerektiren Başlıca Zemin Problemleri	3
2.1.1. Temelin taşıma gücü yetersizliği problemi	3
2.1.2. Sıvılaşma problemi.....	4
2.1.3. Şev ve kazı duraysızlığı problemi	6
2.1.4. Oturma problemi	7
2.1.5. Konsolidasyonunu tamamlamamış zeminler	8
2.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri	9
2.2.1. Yüksek modüllü kolon (jet grout) uygulaması.....	10
2.2.2. Jet grout teknolojisi	11
2.2.2.1. Tek akışkanlı sistem (jet-1)	12
2.2.2.2. Çift akışkanlı sistem (jet-2)	13
2.2.2.3. Üç akışkanlı sistem (jet-3).....	13
2.2.2.4. Metro jet sistem teknolojisi	15

2.3. Yüksek Modüllü Kolon (Jet Grout) Literatür Araştırması	16
BÖLÜM 3.	
NÜMERİK YÖNTEMLER.....	21
3.1. Nümerik Yöntemlerin Amacı	21
3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi (Finite element method).....	22
3.1.2. Sonlu farklar yöntemi (Finite difference method).....	23
3.1.3. Ayrik elemanlar yöntemi (Discrete element method).....	23
3.2. Nümerik Yöntemlere Dayalı Yazılımların Literatürde Uygulamaları..	24
3.3. Tezin Kapsamında Bulunan Midas GTS Yazılımı.....	26
3.4. Midas GTS Literatür Araştırması	28
BÖLÜM 4.	
PROBLEMİN TANIMI VE MIDAS GTS YAZILIMI İLE ANALİZİ	30
4.1. Sistem Genel Bilgileri	30
4.2. Kullanılan Method.....	31
4.3. Midas GTS’de İki Boyutlu (2D) Olarak Zemin Davranışı Analizi	32
4.3.1. İyileştirme öncesi (doğal durum) analizi.....	32
4.3.2. Jet grout iyileştirmesinin bir boyutlu kazık eleman yöntemi ile analizi.....	41
4.4. Midas GTS’de Üç Boyutlu (3D) Olarak Zemin Davranışı Analizi.....	46
4.4.1. İyileştirme öncesi (doğal durum) analizi.....	46
4.4.2. Jet grout zemin iyileştirmesi yapılması durumunda analiz	50
BÖLÜM 5.	
SONUÇ	63
KAYNAKÇA	65
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

c	: Kohezyon
D	: Jet-grout kolon çapı
e_0	: Boşluk oranı
E_0	: Başlangıç elastisite modülü
ϵ_e	: Elastik bölgede deformasyon miktarı
ϵ_p	: Plastik bölgede deformasyon miktarı
K_0	: Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
K_t	: Elastisite modülüne ait kayma yönündeki modül
K_n	: Elastisite modülüne ait normal yöndeki modül
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
ϕ	: Jet grout kolon çapı
χ	: Dilatasyon açısı
γ_n	: Birim hacim ağırlık
γ_d	: Doygun birim hacim ağırlığı
ν	: Poisson oranı
q_d	: Temelin son taşıma gücü
q_u	: Jet grout kolonu basma dayanımı
s	: Jet-grout kolonları arası mesafe

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Temel taşıma gücü yenilmesi (genel ve yerel yenilme - zımbalama) ...	3
Şekil 2.2. Mevcut silo temeli altında zemin iyileştirmesi	4
Şekil 2.3. Sıvılaşma problemine örnekler	5
Şekil 2.4. Nigata (Japonya) 1964 zemin sıvılaşması	6
Şekil 2.5. Kazıklı iksa sistemi ile şev duraylılığının sağlanması	7
Şekil 2.6. Köprü temeli oturması	8
Şekil 2.7. Jet grout imalatı	11
Şekil 2.8. Jet grout imalat teknikleri	12
Şekil 2.9. Jet grout imalatı geleneksel teknikleri	12
Şekil 2.10. Süper jet tekniği	13
Şekil 2.11. X-jet tekniği	14
Şekil 2.12. Rodin jet tekniği.....	14
Şekil 2.13. İkili (Twin) jet tekniği.....	15
Şekil 2.14. MJS’de inşa aşamaları görseli	15
Şekil 2.15. MJS’de kullanılan kompozit borunun örnek bir en kesiti	15
Şekil 3.1. Ayrık elemanlar yöntemine ait örnek bir model.....	23
Şekil 3.2. Midas GTS 3D arayüzü	27
Şekil 3.3. Midas GTS’de 3D ankrajlı derin kazı örnek modeli.....	28
Şekil 4.1. Mohr-Coulomb gerilme-deformasyon grafiği	31
Şekil 4.2. Midas GTS’de iki boyutlu modelin oluşturulması.....	32
Şekil 4.3. Midas GTS’de malzeme listesinin material (malzeme) komutundan oluşturulması	33
Şekil 4.4. Midas GTS’de malzemenin şekil ve boyut özelliklerinin property (nitelik) komutundan girilmesi	34
Şekil 4.5. 2D zeminde 2D temel ve 1D olarak modellenen jet groutların zımbalama hareketi	35
Şekil 4.6. İki boyutlu analizde sonlu eleman ağının oluşturulması.....	35

Şekil 4.7. Yükün modele tanımlanması	35
Şekil 4.8. İyileştirme öncesi durumu ifade eden sonlu eleman ağı.....	36
Şekil 4.9. Sırasıyla sınır koşullarının oluşturulması, yüzeydeki su seviyesinin belirlenmesi ve yerçekimi ivmesinin girilmesini gösteren pencereler ...	36
Şekil 4.10. Aşama tanımlama (stage set) ve başlangıç (inital) durumu ifade eden aşamanın belirlenmesi	37
Şekil 4.11. Temel aşamasının belirlenmesi	37
Şekil 4.12. Yükün analize dahil edilmesi.....	38
Şekil 4.13. Stage Wizard (Aşama Sihirbazı) komutundan doğal durum analizi için inşa aşamaları çizelgesi	38
Şekil 4.14. Analiz türünün belirlenmesi.....	39
Şekil 4.15. Analiz kontrolü penceresinden K_0 uygulanmasının ve yükleme adımlarının belirlenmesi.....	39
Şekil 4.16. 2D doğal durum analizi temelin TY yerdeğiştirmesi	40
Şekil 4.17. 2D doğal durumda yükleme adımlarına karşılık temelin TY yerdeğiştirmesi	40
Şekil 4.18. 2D zemin modelinde kolonların bir boyutlu kazık eleman yöntemi ile modellenmesi.....	41
Şekil 4.19. Bir boyutlu jet grout çubuk eleman kolonlarının sonlu eleman ağına dahil edilmesi.....	42
Şekil 4.20. Bir boyutlu jet grout çubuk elemanlarına sahip 2D modelin sonlu eleman ağı	42
Şekil 4.21. Bir boyutlu jet grout çubuk elemanlara sahip 2D modelin yapım aşamaları çizelgesi.....	43
Şekil 4.22. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m analizi için temel TY yerdeğiştirmesi	44
Şekil 4.23. $s=2,4$ m ve $D=0,6$ m analizi için temel ve jet grout kolonlarına gelen en yüksek ve en düşük eksenel kuvvetler.....	45
Şekil 4.24. $s=2,4$ m ve $D=0,6$ m için temel ve jet grout kolonlarının Y yönündeki en yüksek eğilme momentleri.....	45
Şekil 4.25. $s=2,4$ m ve $D=0,6$ m için temel ve jet grout kolonlarının Z yönündeki en yüksek kayma gerilmeleri.....	46

Şekil 4.26. $s=2,4$ m ve $D=0,6$ m jet grout ile zemin iyileştirme analizi sonrası durum.....	46
Şekil 4.27. 3D modelde sonlu eleman ağının oluşturulması.....	47
Şekil 4.28. 3D model analizinde 2D temel ve jet grout interface elemanının şekil özellikleri	47
Şekil 4.29. 3D model analizinde temel ve interface (arayüz) elemanlı jet groutlar	48
Şekil 4.30. 3D modelde jet grout iyileştirmesinin gerçekleştirilmesi	48
Şekil 4.31. Analizi yapılan 3D modelin son hali.....	49
Şekil 4.32. İyileştirme öncesi (doğal durum) için 3D model analizinde inşa aşamalarını gösteren çizelge.....	49
Şekil 4.33. 3D modelde iyileştirme öncesi analizde yayılı yük altında oluşan temel TZ düşey deformasyonu	50
Şekil 4.34. 3D modelde jet grout iyileştirmeli analiz için yapım aşamaları çizelgesi	51
Şekil 4.35. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout iyileştirmeli modelde temelin ve jet groutların TZ yerdeğiştirilmesi.....	52
Şekil 4.36. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout iyileştirmeli modelde temelin XX yönünde eğilme momenti	53
Şekil 4.37. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout iyileştirmeli modelde temelin YY yönünde eğilme momenti	53
Şekil 4.38. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout iyileştirmeli modelde temelin XY yönünde eğilme momenti	53
Şekil 4.39. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout kolonlarının XZ yönünde kayma gerilmeleri.....	54
Şekil 4.40. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout kolonlarının YZ yönünde kayma gerilmeleri.....	54
Şekil 4.41. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout ile zemin iyileştirmesi analizi sonrası durum.....	54
Şekil 4.42. 2D ve 3D zemin modellerinde iyileştirme öncesi doğal durum analizi yükleme adımı - düşey deformasyon ilişkisi	55

Şekil 4.43. 2D zemin modellerinde farklı aralıklara sahip $D=0,6$ m olan 1D jet grout iyileştirmesi analizlerinde yükleme adımı - düşey deformasyon ilişkisi	55
Şekil 4.44. 2D zemin modellerinde farklı aralıklara sahip $D=0,8$ m olan 1D jet grout iyileştirmesi analizlerinde yükleme adımı - düşey deformasyon ilişkisi	58
Şekil 4.45. 2D zemin modellerinde 1D jet grout iyileştirmesi için kolon aralığı-temelin TY yerdeğiştirme ilişkisi	59
Şekil 4.46. 3D zemin modellerinde 3D jet grout iyileştirmesi için kolon aralığı-temelin TZ yerdeğiştirme ilişkisi.....	59
Şekil 4.47. Tüm zemin iyileştirme analizleri için s/D - temelin düşey yerdeğiştirme ilişkisi	60
Şekil 4.48. 3D analizlerde iyileştirme öncesi ve sonrası temelde oluşan maksimum momentler ($D=0,6$)	61
Şekil 4.49. 3D analizlerde iyileştirme öncesi ve sonrası temelde oluşan maksimum momentler ($D=0,8$)	61
Şekil 4.50. 2D analizlerde iyileştirme öncesi ve sonrası temelde oluşan maksimum momentler.....	61
Şekil 4.51. 2D analizlerde jet groutlarda oluşan maksimum momentler grafiği	62

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Temelin etkiyeceği zemine ait malzeme özellikleri	30
Tablo 4.2. Temelin malzeme özellikleri	31
Tablo 4.3. Jet grout kolonlarının malzeme ve tasarım özellikleri	41
Tablo 4.4. 1D olarak modellenen jet grout kolonlarının 2D analiz türündeki interface malzeme özellikleri	43
Tablo 4.5. 2D zemin modelinde farklı aralıklara ve çaplara sahip 1D jet groutlu iyileştirme analizlerinde temelin maksimum TY yerdeğiştirme si	44
Tablo 4.6. 3D modellerde kullanılan jet grout kolonlarına ait interface elemanın tasarım özellikleri	51
Tablo 4.7. 3D modelde farklı dizilimlere ve çaplara sahip jet grout zemin iyileştirme si sonrası yayılı yük altında temelin maksimum TZ yerdeğiştirme si [mm]	52
Tablo 4.8. Midas GTS’de oluşturulan tüm modellere ait analiz sonuçları	56

ÖZET

Anahtar kelimeler: Taşıma gücü, oturma, sıvılaşma, jet-grout

Günümüzde yapıların inşâsı sırasında ve sonrasında karşılaşılabilecek problemler ön görülerek, bunların sebeplerine ve çözümlerine yönelik bilimsel çalışmalar yürütülmektedir. Bu problemlerin bazıları mühendislik yönünden zayıf zemin koşulları nedeniyle oluşmaktadır ve Geoteknik Mühendisleri bu problemlere çözümler sunmaktadır. Geoteknikte temel mühendisliği özelinde taşıma gücü ve oturma kriterlerinin sağlanması ve ekonomik bir çözüm üretilmesi esastır. Üst yapıdan temele gelen statik ve dinamik yükleri zemine güvenli şekilde aktarmak, şev ve kazı duraylılığını sağlamak gereklidir. Bu şartlar sağlanamadığı takdirde yıkıcı etkiler meydana gelebileceğinden zemin iyileştirme kavramı bu problemin çözülmesine yönelik seçeneklerden birisi olarak gündeme gelebilmektedir. Zemin iyileştirme yöntemlerine duyulan gereksinimler bu alandaki teknolojinin ve birçok yeni yöntemin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte zemin içinde yüksek modüllü kolonlar (jet-grout kolonları) imal etmek ülkemizde en fazla kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerden bir tanesi haline gelmiştir. Uygulanan iyileştirme yöntemlerinin yanısıra oluşabilecek zemin problemlerinin tespiti, yapılacak çözümün uygunluğunu ve verimini öngörme amaçlı Plaxis, Midas GTS, Geo5 gibi geoteknik yazılımlar da sürekli geliştirilmektedir. Bu yazılımlar aracılığıyla öncelikle yapılması düşünülen binanın mevcut zemin şartlarında performansı kontrol edilebilmekte, sonrasında çözüm sonuçları zemin kesitini oluşturan zemin özellikleri ile birlikte değerlendirilerek zemin iyileştirme türüne karar verilebilmektedir. Bunun sonrasında da iyileştirme etkisi sayısal olarak iki veya üç boyutlu irdelenebilmektedir.

Adapazarı 1999 depremleri sırasında çok sayıda can kaybı ve ekonomik kayıp vermesi ile ön plana çıkmış ve deprem sonrası yapılan zemin incelemeleri ile Adapazarı'nda taşıma gücü kaybı ve sıvılaşma gibi zemin problemleri ile sıklıkla karşılaşılabildiği anlaşılmıştır. Ancak aynı incelemeler sonunda Adapazarı'nda yüzeyde karşılaşılan yumuşak tabakaların hemen altında kalınlığı 6-8 m'leri bulabilen çok sıkı kum/çakıl tabakalarının varlığı da ortaya konmuştur. Bu bağlamda, bu çalışmada Adapazarı bölgesinde karşılaşılabilen zemin problemlerine çözüm olarak sunulan yüksek modüllü kolonlarla zemin iyileştirmesi seçeneği öngörülen bir yapı için Midas GTS yazılımıyla irdelenmektedir. Çalışma sonunda jet-grout kolonlarının farklı modelleme seçenekleri ile oluşturulması aktarılmakta ve sonuçlar ortaya konmaktadır.

THE THREE-DIMENSIONAL EXAMINATION THROUGH MIDAS GTS SOFTWARE OF SOIL IMPROVEMENT BY JET GROUTING

SUMMARY

Keywords: Bearing capacity, settlement, liquefaction, jet-grouting

Today, after considering the probable problems that can be encountered during and after the construction of the buildings, scientific studies are carried out for the reasons and solutions of these problems. Some of these problems are caused by poorly soil conditions and Geotechnical Engineers provide solutions to these problems. In geotechnical field, it is essential to provide the bearing capacity and settlement criteria in terms of economy. It is necessary to transfer the static and dynamic loads from the superstructure to the foundation safely and to ensure slope-excavation stability. If this situation cannot be achieved, it causes devastating effects and therefore the concept of soil improvement comes up as one of the options for the solution of the problem. The requirements for soil improvement methods enable the development of technology and many methods in this field. With the developing technology, manufacturing high modulus columns (jet grout columns) in the soil has become one of the most used soil improvement methods in our country. In addition to the improvement methods applied, geotechnical software such as Plaxis, Midas GTS and Geo5 are being developed in order to identify the soil problems and to determine the efficiency of the solution to be made. By means of these softwares, it is possible to control the performance of the anticipated building at the current soil conditions and then the solution results can be evaluated together with the properties of the soil and the type of soil improvement can be decided. After that, the effect of improvement can be analyzed numerically in two or three dimensions.

During the 1999 earthquakes, Adapazarı has come to the forefront due to the loss of life and economic losses. After the earthquakes, the soil problems such as loss of bearing capacity and liquefaction are frequently encountered in Adapazarı. However, at the end of the same investigations, the presence of very dense sand / gravel layers, which can have a thickness of 6-8 m just below the soft layers encountered on the surface, was also revealed in Adapazarı. In this context, with the help of Midas GTS software, the high modulus columns is presented as a solution to the soil problems that may be encountered in Adapazarı region is examined. At the end of the study, the creation of jet-grout columns with different modelings is explained and the results are presented.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Günümüzde yapıların inşâsı sırasında ve sonrasında karşılaşılabilecek problemler ön görülerek, İnşaat Mühendisliği alanında bu problemlerin sebeplerine ve çözümlerine yönelik bilimsel çalışmalar yürütülmektedir. Bu problemlerin bazıları mühendislik yönünden zayıf zemin koşulları nedeniyle oluşmaktadır ve İnşaat Mühendisliği'nin bir alt dalı olan Geoteknik Mühendisliği zeminden kaynaklı bu problemlere çözümler sunmaktadır.

Yapı temelleri açısından bakıldığında Geoteknik Mühendisliği'nde üst yapıdan temele gelen statik ve dinamik yükleri zemine güvenli şekilde aktarmak, şev ve kazı duraylılığını sağlamak esastır. Bunun sağlanamadığı durumlarda yıkıcı etkiler oluşabilmektedir. Yapılaşma öncesinde olası problemlerin sebebi olarak zemin özellikleri görülüyorsa bu durumda zemin iyileştirme kavramı gündeme gelmektedir. Zemin iyileştirmesine gerek duyulan başlıca zemin problemleri; kayma direnci düşük zeminlerde temel taşıma gücü yetersizliği, deformasyon kriterinin sağlanamaması, dolgu ve şev duraysızlığı, deprem etkisi ve/veya ani yük etkisi altında oluşan sıvılaşma durumu olarak belirtilebilir. Turba ve bataklık zeminler, konsolidasyonunu henüz tamamlamamış zeminler, kazı yapılan veya şev oluşturulan kayma direnci düşük zeminler, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu gevşek ve yumuşak zeminler, bina yüküne karşılık temel taşıma gücünün çok düşük olduğu yumuşak killer ve gevşek kumlar, tekrarlı yüklere bağlı olarak sıvılaşma olasılığı olan ve yeraltı su seviyesi altında kalan gevşek kumlar, çevrimsel yumuşama görülebilecek killer zemin kaynaklı problemlere neden olabilmektedirler. Bu gibi problemlerin çözümü için yapılacak zemin iyileştirmelerinde seçilecek yöntem ve yapılan iyileştirmenin verimi yapı yüküne ve zeminin parametrelerine bağlıdır. Zeminin dane dağılımı,

organik içerik miktarı, iyileştirilecek zemin tabakalarının derinliği ve kalınlığı, yapının mevcut veya öngörülen yapı olması durumu, temel ortamının kohezyonlu veya kohezyonsuz olması ve yine ortamın doygun/batık ya da doygun olmaması durumları zemin iyileştirme yöntemi seçiminde göz önünde bulundurulacak önemli faktörlerdir [1].

Zemin iyileştirme yöntemlerine duyulan gereksinimler bu alandaki teknolojinin ilerlemesine ve birçok yöntemin bulunup geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bunun yanında oluşabilecek zemin problemlerinin tespiti, yapılacak çözümün uygunluğunu ve verimini öngörme amaçlı olarak Plaxis, Midas GTS, Geo5 gibi geoteknik yazılımlar da geliştirilmektedir.

Adapazarı bölgesinde inşa edilen bina temellerinde, özellikle 1999 depremleri sırasında, taşıma gücü kaybı ve sıvılaşmaya bağlı problemler sıkça görülmüştür. Bu tarihten sonra hasarlı yapıların altındaki zeminlerin güçlendirilmesi ve yeni yapılaşma öncesi problem tespit edilen zeminlerde güçlendirme yapılması amacıyla yüksek modüllü kolonlar (jet-grout) yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında, yüksek modüllü kolonlarla zemin iyileştirmesinin öngörülen bir yapı için statik yük altındaki verimi Midas GTS geoteknik yazılımıyla incelenmiştir.

BÖLÜM 2. ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ VE YÜKSEK MODÜLLÜ KOLONLAR

2.1. İyileştirme Gerektilen Başlıca Zemin Problemleri

2.1.1. Temelin taşıma gücü yetersizliği problemi

Mühendislik yönünden zayıf zeminlerde temelin taşıma gücü yetersizliği sebebiyle göçme meydana gelebilmektedir. Bir *temelin son taşıma gücü* (q_d), oturma kriterleri içerisinde temelin batmadan taşıyabileceği maksimum gerilmedir. Temelin son taşıma gücü q_d 'ye; zemin türü ve özellikleri, temelin boyutları ve gömme derinliği, yükün eğimi ve eksantrikliği, etkiyen moment ve titreşimler, temelin şekli ve yeraltı su seviyesinin konumu, yeraltı su seviyesi varsa temelin yapımından ve yüklenmesinden sonra geçen süre ve taban pürüzlülüğü etki etmektedir [1].

Taşıma gücü yenilmeleri Şekil 2.1.'de verilen örneklerde gösterildiği gibi genel yenilme, yerel yenilme ve zımbalama yenilmesi olarak üç farklı durumda incelenir.



Şekil 2.1. Temel taşıma gücü yenilmesi (genel yenilme - yerel yenilme - zımbalama) [2]

Sert ve ark. (2015), çalışmalarında taşıma gücü ve oturma şartlarını sağlayamayacak değişken kalınlıklı bir dolgu üzerinde inşa edilmiş bir silo temeli altında jet-grout kolonları ile zemin iyileştirmesini konu edinmişlerdir (Şekil 2.2.). Yazarlar, çalışmalarında, silo temelinin ortamın özellikleri tam anlaşılmadan inşa edildiğinin anlaşıldığını belirtmişlerdir. Silonun inşaatının temelin mevcut hali üzerinde tamamlanması ve silonun yüklenmesi sonrasında farklı oturmaların olabileceği uyarısı sonrasında da mal sahiplerinin problemin çözümü için kendilerine başvurduğunu belirtmişlerdir. Arazide yürütülen deneysel çalışmalar ve sonrasında yapılan analizlerde, taşıma gücünün yetersiz olduğu, toplam ve farklı oturma değerlerinin kabul edilemez seviyelere ulaşacağı tespit edilmiştir. Problemin çözümü için; silo temellerinin dış ampatmanı üzerinde bir sıra ve temel dış sınırında bir sıra olmak üzere 60 cm çapında, şaşırtmalı 120 cm aralıklı jet grout kolonlarının 10 m'den fazla olmamak üzere sağlam zemin tabakası derinliğine kadar teşkil edilmesi önerilmiş ve imalat mevcut temelde dış ampatmandan karotiyerle delikler açıldıktan sonra tamamlanmıştır. İmalattan bir hafta sonra yapılan kontrolde jet grout kolonlarının olduğu gözlenmiş ve alınan numuneler üzerinde yapılan deneyler sonrasında istenen iyileştirmenin elde edildiği vurgulanmıştır [3].



Şekil 2.2. Mevcut silo temeli altında zemin iyileştirmesi [3]

2.1.2. Sıvılaşma problemi

Deprem titreşimleri veya ani yüklemeler sebebiyle oluşan boşluk suyu basıncındaki artışa bağlı olarak kayma direncindeki ve rijitlikteki ciddi düşüş zemin sıvılaşmasının

en genel tanımıdır. Deprem titreşimleri esnasında, kayma dalgaları doygun daneli tabakalardan geçerken, dane yerleşim düzenini değiştirir. Yeraltı su seviyesi altındaki siltlerde ve gevşek kumlarda daneler aralarındaki boşlukları doldurarak hacimlerinde küçülme meydana getirirler. Hacim küçülmesi eğilimi eğer su drene olamaz ise boşluk suyu basıncında artışa neden olur. Boşluk suyu basıncının artması efektif gerilmeyi sıfıra yaklaştırır ve efektif gerilmenin sıfır olduğu noktada zemin katı halden akma durumuna geçer. Bu durum sıvılaşma olarak nitelendirilir. Etkif gerilmenin sıfırın altına inmesiyle kaynama olayı gerçekleşir. Sıvılaşma olayında küçük kayma gerilmeleri büyük şekil değiştirmelere neden olabilir. Sıvılaşma, yapının zemine batması veya yüzme eğilimi göstermesiyle temel taşıma gücü aşılmasına, yanal yayılma yaparak istinat yapısı yenilmesine neden olur. Özellikle, içerisinde kil bulundurmeyen doygun durumdaki gevşek kum ve siltlerin sıvılaşma potansiyeli yüksektir. Şekil 2.3.'de sıvılaşma problemi örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Sıvılaşma problemine örnekler [4]

1964 Niigata (Japonya) depreminde Şekil 2.4.'de gösterilen apartman bloklarının altındaki zemin sıvılaşmış ve taşıma gücü yenilmelerine neden olmuştur. Yenilmelerin çok yavaş olarak geliştiği, yapıların çok sağlam ve rijit olmaları nedeniyle eğilmeye rağmen yıkılmadıkları ve ortadaki binanın sakinlerinin daha sonra binanın dış duvarından aşağı doğru yürümek suretiyle yapıyı terk ettikleri rapor edilmiştir [5].



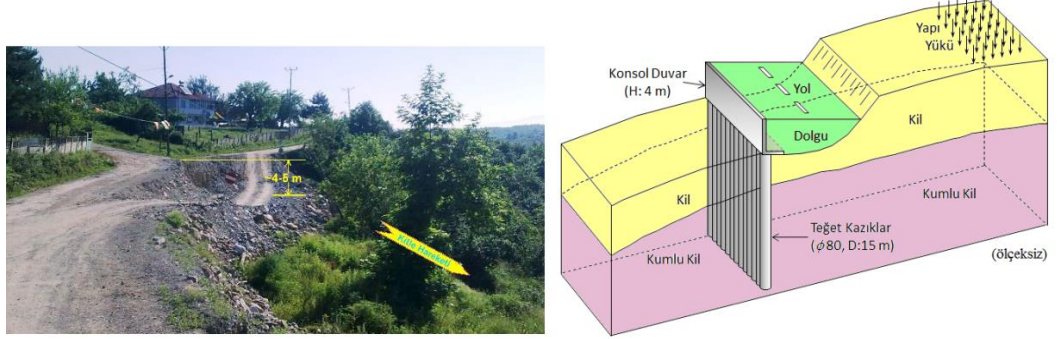
Şekil 2.4. 1964 Niigata (Japonya) depreminde zemin sıvılaşması [5]

2.1.3. Şev ve kazı duraysızlığı problemi

Şev ve kazı duraysızlığı; aşınma ve ayrışma, sismik yükleme, boşluk suyu basıncı artışı ve buna bağlı olarak zemin danelerinin birbirlerine kenetlenme özelliğinde görülen azalma nedeniyle şevi oluşturan malzemenin aşağı yönlü hareketi olarak tanımlanabilir.

Bol ve ark. (2016) çalışmalarında, stabilitesi her aşırı yağış sonrasında bozulan, üzerinde devamlı kullanılan bir yol ile evler bulunan bir yamacın güvenliğinin sağlanması için kullanılan kazıklı iksa sistemini aktarmışlardır. Yamaçta bulunan yol üzerinde yaklaşık 35 m genişlik ve 60 m uzunluğa sahip bir zemin kitlesinin farklı zamanlarda defalarca heyelan ettiği, yağışlar sonrasında heyelan hareketinin şiddetinin arttığı beyan edilmiştir. Buna göre yağışlarla artan su miktarı; yamacın dengesini olumsuz yönde etkileyecek olan sürücü kuvvetlerin artmasına neden olmuş, zeminin kayma direncini düşürmüş ve heyelanı tetiklemiştir. Geçmiş zamanlarda oluşan küçük oturmaların neden olduğu kot farkını gidermek için sürekli yapılan yol dolguları da heyelanın tepesinde ağırlığın artmasına neden olarak doğrudan sürücü kuvvetleri arttırmıştır. Bu durumlar sebebiyle güvenlik sayısı ani düşüş göstermiştir. Laboratuvar çalışmaları ile Talren v5 ve Plaxis 2D yazılımlarıyla yapılan analizler sonrasında, yamacın güvenliğinin sağlanması ve yol kotunun eski haline getirilebilmesi için; çapı 0,80 m, boyu 15 m olan teğet kazıkların üzerine yerleştirilmiş ve geri dolgusu kaliteli gereçle yapılmış konsol duvar sisteminin

oluşturulması gerekli görülmüştür. Yolun, kazıklı iksa sistemi imalatından sonra da yağışlı mevsim geçirmesine rağmen yıllardır sorunsuz bir şekilde hizmet vermeye devam ettiği belirtilmiştir [6].



Şekil 2.5. Kazıklı iksa sistemi ile şev duraylılığının sağlanması [6]

2.1.4. Oturma problemi

Temel tasarımında sadece taşıma gücü kavramı yeterli olmaz. Güvenli bir tasarım için oturma koşulunun da sağlanması gerekmektedir. Oturma kriteri kavramı izin verilen deformasyon miktarını belirten bir ifadedir. İzin verilen maksimum oturma miktarı aşıldığında yapının tesisat sisteminden geçmeye birçok yıkıcı hasarla karşılaşabilmektedir.

Coduto (2001), oturma problemine örnek olarak normalde çok az su taşıyan bir nehri geçmekte olan bir karayolu köprüsünü vermiştir. Köprünün ortasının nehrin ortasında inşa edilmiş temeller üzerine mesnetlenmiş durumda olduğu, şiddetli yağmur döneminde nehirdeki akış hızının ani olarak arttığı ve suyun nehir yatağındaki zemini oyduğu ve temelleri zayıflattığı belirtilmiştir. Bu durum, Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi köprünün ortasında büyük oturmalarla neden olmuştur. Böyle bir durumun oluşmaması için temelin potansiyel oyulma zonu altında bir derinlikte inşa edilmesinin çözüm olabileceği belirtilmiştir [5].



Şekil 2.6. Köprü temeli oturması [5]

2.1.5. Konsolidasyonunu tamamlamamış zeminler

Konsolidasyon, zaman faktörü dahilinde zeminin boşluklarındaki suyu kendi yükü altında ya da başka bir yük altında drene etmesi olarak tanımlanabilir. Konsolidasyon sürecinde, suyun dışarı çıkmasından dolayı zeminde hacimsel küçülme ve sıkışmaya bağlı olarak zemin direncinde artma (sertleşme) meydana gelir. Buna bağlı olarak temel taşıma gücünde artış, oturma miktarlarında azalma gerçekleşir. Bu durum zeminin mühendislik özelliklerinin önemli miktarda iyileşmesini sağlamaktadır. Bu nedenle inşaata başlanmadan önce konsolidasyonun %90'ının tamamlanması beklenir.

Her zeminin geçirimlilik katsayısı farklıdır ve iri daneli zeminde dane boyutu arttıkça geçirimlilik miktarı artar. Zeminlerin sınıflandırılmasında en küçük dane boyutuna sahip killerde, kilin karakteristik özelliğine de bağlı olarak permeabilitenin düşük olması sebebiyle konsolidasyonun %90'ının tamamlanması onlarca yıl sürebilmektedir.

Konsolidasyon süreci sırayla; ani oturma, 1. konsolidasyonun tamamlanması ve 2. konsolidasyonun tamamlanması olarak üç aşamada incelenir. Bilindiği üzere, öngörülen yapı yükleri altında konsolidasyonun uzun sürede tamamlanması istenmediğinden; konsolidasyonun hızlandırılarak zemin özelliklerinin istenen düzeye gelmesi amaçlanmaktadır. Konsolidasyon hızı; suyun drene olabileceği yol

imkanlarının fazlalığına ve drenaj yolunun uzunluğuna, zeminin permeabilite katsayısına ve sıkışma katsayılarına bağlıdır. Bu bilgiye dayanılarak örneğin kum drenleri, yapay drenler ya da dinamik kompaksiyon gibi yöntemlerle oturmaya yönelik parametrelerin istenen düzeye getirilmesi amaçlanır.

2.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin iyileştirme yöntemleri farklı açılardan sınıflandırılabilir [1] ;

a. Yüzeysel İşlemlerle İyileştirme

1. Islatma
2. Vurmalı sıkıştırma
3. Hızlı sarbeli sıkıştırma

b. Titreşimli Yöntemlerle İyileştirme

1. Titreşimli sıkıştırma (Vibro kompaksiyon)
2. Titreşimle zemine gereç yerleştirme (Kompaksiyon kazığı)
3. Dinamik konsolidasyon

c. Önceden Yükleme ve Drenaj ile İyileştirme

1. Basit yükleme
2. Aşırı yükleme (Sürsaj)
3. Düşey drenler (Kum-çakıl drenleri ve yapay drenler)
4. Konsolidasyonun vakum uygulaması ile hızlandırılması

d. Enjeksiyon (İçitim) Yöntemi ile İyileştirme

1. Sızdırma enjeksiyonu
2. Kompaksiyon enjeksiyonu
3. Jet enjeksiyonu
4. Derin karıştırma

Yapılan iyileştirme ile ortam özelliklerinin istenen düzeye gelip gelmediği iyileştirme sırasında ve sonrasında gerçekleştirilen denetimlerle incelenir. Yapım sırasında gerçekleştirilen örneklemeler, malzemeden karot alınması, yapılan yüksek modüllü kolon etraflarının kazılıp kontrol edilmesi, jeofizik yöntemler, plaka taşıma ve presiyometre deneyleri gibi arazi bazlı deneyler ile bu denetim gerçekleştirilebilir.

Farklı amaçlara yönelik yapılan zemin iyileştirmeleri sonucunda zeminde;

1. Kayma direnci ve buna bağlı olarak temel taşıma gücü artar ve oturma miktarları azalır.
2. Sıkılık artışı sonucu permeabilite değeri düşer, buna bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli azalır, yük altında deformasyon azalır.
3. Zeminin büzülme ve kabarma potansiyeli azalır, buna bağlı olarak şekil değiştirmeler azalır.

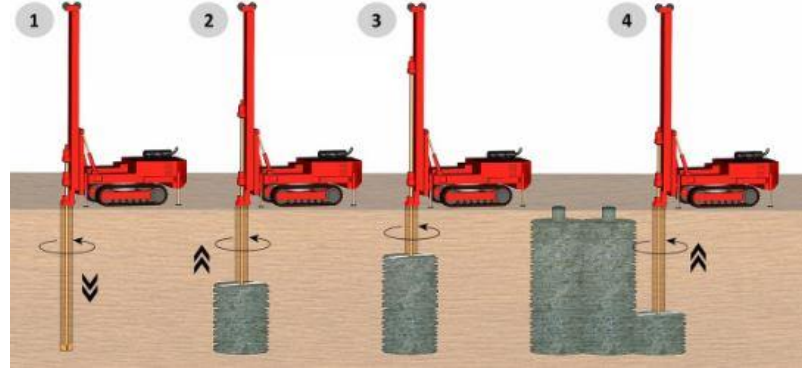
2.2.1. Yüksek modüllü kolon (jet grout) uygulaması

Zemin iyileştirme yöntemlerinden biri enjeksiyon (içitim) yöntemidir. Bu yöntemde, akışkan bir malzeme zemine belirli bir basınç altında enjekte edilir. Bu kapsamda zeminin geçirimliliği azaltıldığı gibi, danelerin kenetlenmesi sağlanarak şekil değiştirme direnci artırılır.

Yahiro (1973), jet grout yönteminin dayandığı esasları dip noktadan yukarıya doğru devirsel hareket eden tijden zemine çimento-su karışımının belirli bir hız ve yüksek basınçla püskürtülmesi, bu etkiyle çevredeki zeminin erozyona uğrayarak silindirik jet grout kolonunun oluşturulması ve belirli bir bölgede iyileştirilmiş zemin elde edilmesi olarak belirtmiştir [7, 8]. Şekil 2.7.'de jet grout imalatının aşamaları gösterilmektedir.

Jet grout kolonları, yanal ve düşey yüklere gösterdiği direnç sayesinde zemin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi, radye temel ile optimize edilip yapı

yüklerinin oturma kriterleri içerisinde güvenli şekilde taşınması ve sıvılaşma riskinin ortadan kaldırılması gibi amaçlarla kullanılır.



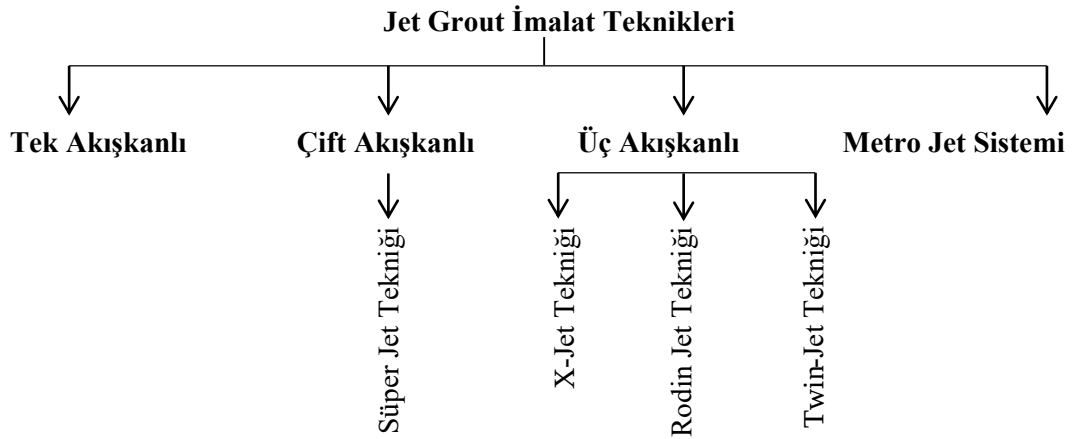
Şekil 2.7. Jet grout imalatı [9]

Gereği halinde jet grout kolonlarının donatılandırılmaları mümkündür. Donatılı kolonlar eğilme momenti ve çekme gerilmelerini taşıyabilmektedir. İmal edilen kolon taze iken donatılar itilerek yerleştirilmektedir. Sertleşmiş kolonlarda ise delgi yapılarak açılan deliğe donatı yerleştirilir ve düşük basınçlı bir dolgu enjeksiyonuyla donatı kolona sabitlenir. Tünel uygulamalarında sadece çekmeye çalışan ve kolayca kesilebilen fiber donatılar kullanılmaktadır.

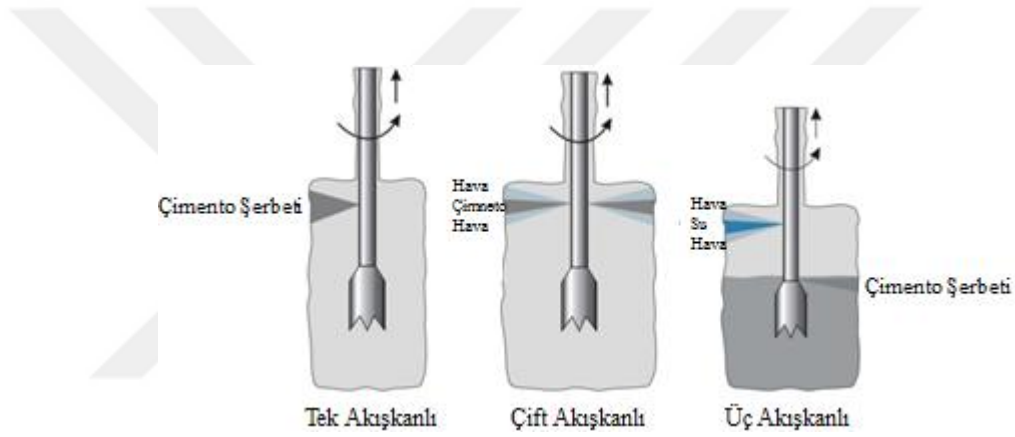
Jetleme esnasında oluşan atık malzemenin miktarı imalat esnasında sürekli olarak kontrol edilmelidir. Atık malzemenin en az seviyede tutulması verimlilik açısından önemlidir. Atık malzemenin yüzeye ulaşmaması kuyuda bir tıkanmanın veya göçmenin belirtisi olup, basınçlarda hızlı bir yükselmeye ve zemin yüzeyinde kabarmalara neden olabilmektedir [10].

2.2.2. Jet grout teknolojisi

Jet grout kolonlarının imalatı farklı yöntemlerle yapılabilmektedir. Şekil 2.8. ve 2.9.'da jet grout imalat teknikleri gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Jet grout imalat teknikleri



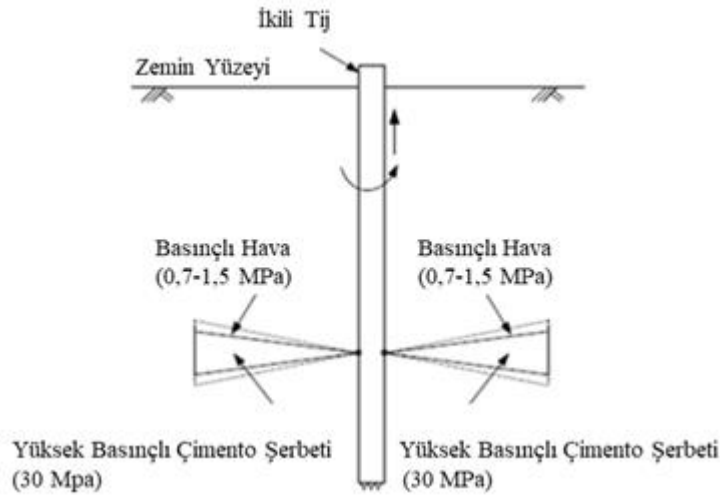
Şekil 2.9. Jet grout imalatı geleneksel teknikleri [9]

2.2.2.1. Tek akışkanlı sistem (jet-1)

Delme-enjeksiyon takımı tek çeperli bir tijden oluşmaktadır. Hazırlanan çimento şerbeti tij üzerindeki belirli bir çaptaki nozuldan yaklaşık 400-600 bar gibi yüksek basınçlarla püskürtülür. Enerjiyle püskürtülen harç zemini keser ve oluşan boşlukları çimento şerbeti doldurur. Tij sabit bir hızla kendi etrafında döndürülüp aşağıdan yukarıya sabit hızla çekilerek jet grout kolonları imal edilir.

2.2.2.2. Çift akışkanlı sistem (jet-2)

Delme-enjeksiyon takımı çift çeperli bir tijden oluşmaktadır. İçteki tij içerisinde çimento şerbeti püskürtülürken dışdaki tijden hava veya su püskürtülür. Hava jeti püskürtmesi dışarıdan, içteki çimento şerbetini zarflayacak şekildedir. Bu sayede püskürtülen çimento şerbeti uzak mesafelere etki ederek zemini içeriden erozyona uğratar. Ayrıca gelişen teknolojiyle birlikte Şekil 2.10.'da görülebileceği üzere “Süper Jet Tekniği” geleneksel çift akışkan sistemine dayalı olarak geliştirilmiştir. Bu yöntemde daha büyük bir jet grout kolonu oluşturmak için, sıkıştırılmış hava (0,7 ~ 1,05 MPa) ile örtülmüş yüksek basınçlı (30 MPa) çimento şerbetini püskürtmek için iki zıt yönlü nozul kullanılır. Geleneksel çift akışkan sisteme kıyasla, süper jet teknolojisi, inşaatta daha yüksek bir akışkan enjeksiyon hacmine sahiptir ve dolayısıyla süper jet teknolojinin elde ettiği çap, bazı durumlarda yaklaşık 5 m'ye ulaşabilir [11].

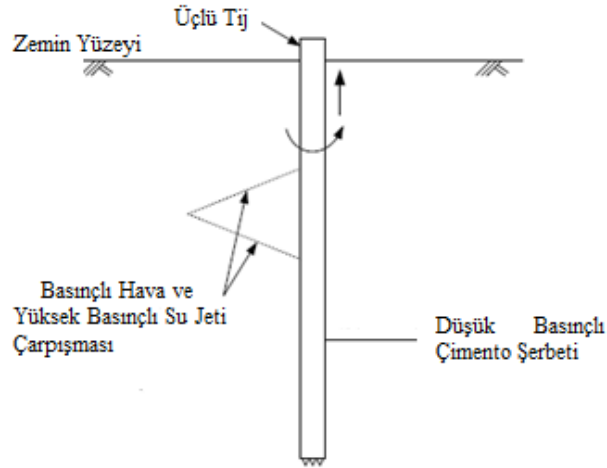


Şekil 2.10. Süper jet tekniği [11]

2.2.2.3. Üç akışkanlı sistem (jet-3)

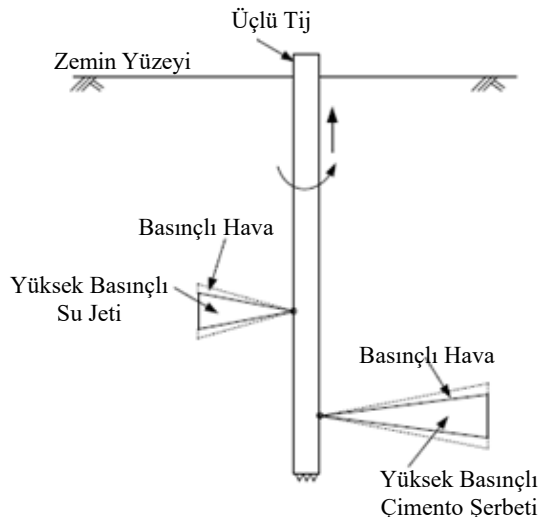
Delme-enjeksiyon takımı 3 kısımdan oluşur. En içrideki tijden su, ortadaki tijden hava ve en dış borudan çimento şerbeti verilir. Üç akışkanlı sistem teknolojisine dayalı olarak “X-Jet”, “Rodin Jet” ve “Twin Jet” teknolojileri geliştirilmiştir.

X-Jet teknolojisinde, Şekil 2.11.'de gösterildiği gibi sıkıştırılmış hava (0,6-1,05 MPa) ile örtülen bir çift çarpışmalı su jetleri (40 MPa) boşluk (erozyon aralığı) oluşturmak için püskürtülür. Daha düşük basınçlı çimento enjeksiyonu düzgün ve kontrollü bir çapta jet grout sütunu oluşturmak için daha düşük kotta yatay bir nozuldan püskürtülür [11].



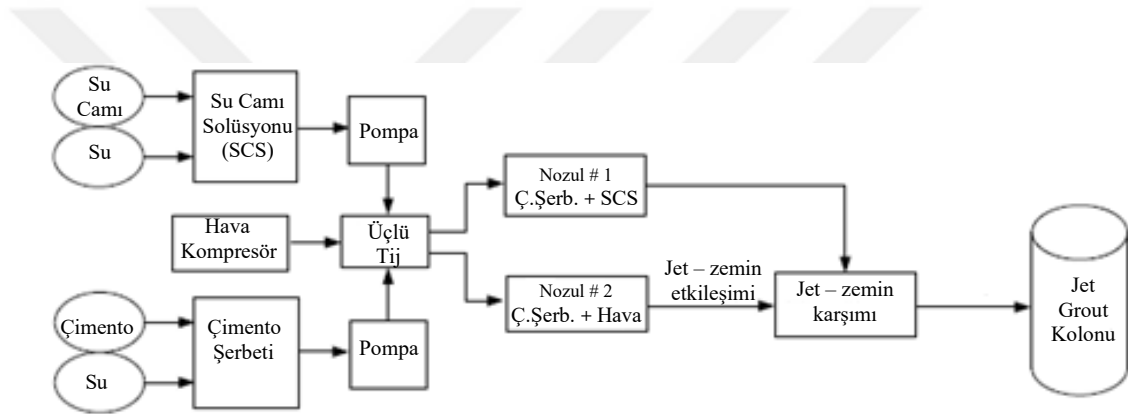
Şekil 2.11. X-jet tekniği [11]

Şekil 2.12.'deki Rodin Jet teknolojisinde (RJP) hem su hem de hava enjeksiyon jetleri yüksek basınç altında eş zamanlı olarak püskürtülür. Zeminin iki kez jetlerdeki kesme kuvvetine maruz kalması, daha geniş bir sütunun oluşmasını sağlar [11].



Şekil 2.12. Rodin jet tekniği [11]

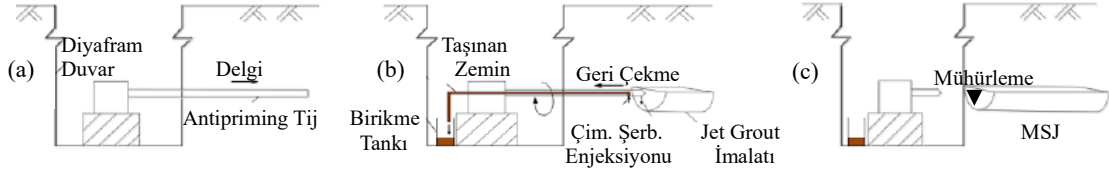
İkili Jet (*Twin Jet*) yöntemi, geleneksel üçlü akışkan sisteme dayalı olarak priz sürecini hızlandırmak amacıyla geliştirilmiştir. Jet enjeksiyonundan hemen sonra karışımın daha çabuk sertleşmesi için bir bağlayıcı malzeme eklenerek işlem hızlandırılır [12, 13]. Bu nedenle özellikle yatay jetli enjeksiyon uygulamalarında avantajlıdır. Şekil 2.13., Twin-Jet metodunun şematik diyagramını göstermektedir. İkili Jet metodunda, sıkıştırılmış hava ile örtülen yüksek basınçlı çimento şerbetinin püskürtülmesi ile zemin aşındırılır ve zemin çimento karışımı oluşur. Daha sonra, çimento şerbetini örten su camı (sodyum silikat) çözeltisi, hızlı bir priz alma için karışım içine yüksek basınçla püskürtülür ve sertleştikten sonra bir jet grout kolonu oluşturulmuş olur [11].



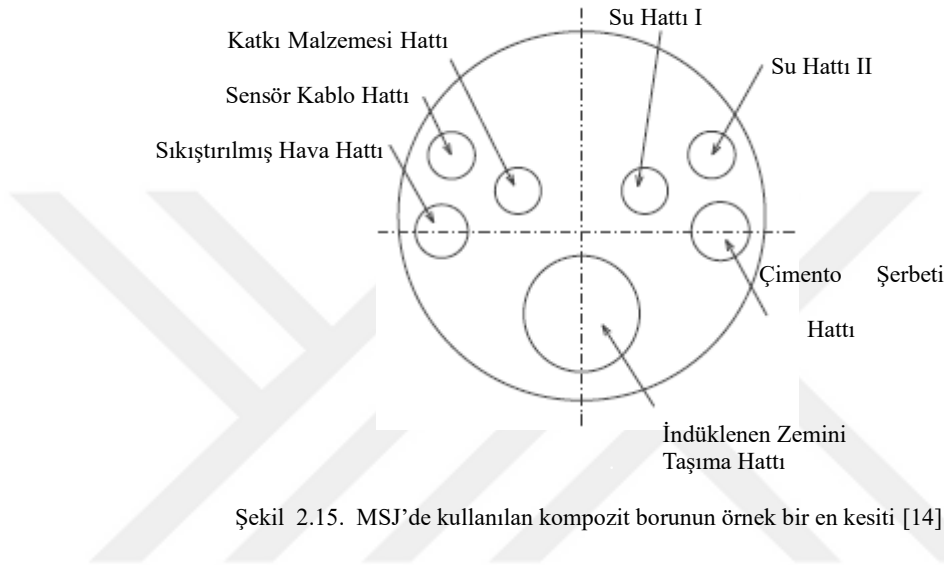
Şekil 2.13. İkili (Twin) jet tekniği [11]

2.2.2.4. Metro jet sistem teknolojisi

Jet enjeksiyon işleminde büyük hacimlerde çimento şerbeti, su, hava ve/veya katkı malzemesi zemine enjekte edildiğinden, zeminin yanal hareketi ve zemin kabarması gibi zemin üzerinde önemli bir etki beklenebilir. Bu olumsuz etkiyi azaltmak için jet grout işlemi sırasında kabaran fazlalık zeminin taşınmasıyla Metro Jet Sistemi (MJS) olarak adlandırılan yeni bir jet grout teknolojisi geliştirilmiştir [11]. MSJ yönteminin aşamalı görseli Şekil 2.14.'de, MJS teknolojisinde kullanılan, farklı amaçlara sahip birçok hattın bulunduğu kompozit borunun örnek en kesit görünümü Şekil 2.15.'de sunulmaktadır. Görüldüğü üzere Metro Jet Sistem teknolojisi, geleneksel jet enjeksiyon teknolojisinden oldukça farklıdır [14].



Şekil 2.14. MJS inşa aşamaları görseli (a- delgi aşaması; b- geri çekme ve enjeksiyon aşaması; c- tamamlama ve mühürleme) [14]



Şekil 2.15. MSJ'de kullanılan kompozit borunun örnek bir en kesiti [14]

2.3. Yüksek Modüllü Kolon (Jet Grout) Literatür Araştırması

Önalp ve Sert (2007), İstanbul Beykoz Belediyesi Riva (Çayağzı) Beylik Mandıra mevkiinde yapımı öngörülen köprü için zemin değerlendirmeleri yapmıştır. Değerlendirmelerde, köprü ve yaklaşım dolguları altındaki zemin SPT-N değerleri oldukça düşük normal yüklenmiş kil (NL) olarak belirlenmiş ve sağlam ana kayanın 51. m'de bulunduğu tespit edilmiştir. Köprü inşası sırasında taşıma gücü ve oturma problemlerinin oluşacağı öngörülerek; köprü ayakları altına sağlam zemine oturan boru kazıkların, yaklaşım dolguları altına ise 1,8 m aralıklı 65 cm çaplı jet grout kolonlarının imalatı çözüm olarak önerilmiştir [15].

Önalp ve Sert (2007), Kayseri Serbest Bölgesi'nde zemin koşullarının yanlış değerlendirilmesi sonucu hatalı temel sistemi üzerine oturtulmuş boru dilme

fabrikasında meydana gelen oturma problemlerini irdelemiş ve çözüm önerisi sunmuşlardır. Binanın yapımından sonra daha makineler kurulmadan yaklaşık 50 cm'lik genel oturma olduğu anlaşılmış, zeminin eski bataklık-turbalık zemin olduğu ve yer yer kil ve kum tabakalarının varlığı tespit edilmiştir. Turbalık zeminin devam eden oturma problemine çözüm olarak jet grout kolonları uygulaması önerilmiş ve imalat sonrasında alınan ölçümler oturmaların radikal şekilde azaldığını göstermiştir [16].

Taylan ve ark. (2007), çalışmalarında 1999 Kocaeli depreminde zemin koşulları ve/veya yetersiz üst yapı özellikleri nedeniyle büyük hasarlar almış Sakarya ili merkezinde toplu konut alanını ele almışlardır. Bu kapsamda, dinamik yükler altında düşük plastisiteli silt ve kumlarda gerçekleşen sıvılaşma ile kil zeminlerde gerçekleşen taşıma gücü kaybı problemleri incelenmiştir. İlk aşamada, araziye ait SPT değerleri kullanılarak kayma dalgası hızları bulunmuş ve buna bağlı olarak yüzeyde maksimum yatay ivme değeri hesaplanmıştır. Yüzey ivmelerinin kullanılmasıyla sondajların temsil ettiği zeminlerdeki sıvılaşma riski incelenmiştir. İkinci aşamada sıvılaşmanın neden olduğu oturma değerleri hesaplanmış ve maksimum oturma miktarı 26 cm olarak bulunmuştur. Deprem sonrasında arazide yapılan incelemelerde yoğun olarak sıvılaşma belirtisi gözlemlendiği, arazi gözlemleri ile analizlerden elde edilen sonuçların birbiriyle uyumunun hesapların doğruluğunu destekleyici nitelikte olduğu belirtilmiştir. Son aşamada ise, ince daneli zeminin deprem yükü altındaki davranışları, önceki yıllarda yapılmış çalışmalardan yararlanılarak incelenmiştir. Yaklaşık 5 m'lik kil ve düşük plastisiteli silt tabakası olan bölgelerde deprem yükü öncesi ve sonrası statik mukavemet değerlerinde çok fazla miktarda azalmalar olduğu gösterilmiştir. Depremin boşluk suyu basıncı oranlarında yaklaşık %50 oranında artışa neden olduğu ve taşıma gücünde %40'lara varan azalmalara neden olduğu belirtilmiştir. Taşıma gücü azalmasının, aşırı oturmalar ve bazı bölgelerde zemin göçmelerine sebep olduğu bildirilmiştir [17].

Yıldırım ve ark. (2008), çalışmalarında İstanbul Mabeyinci Arif Paşa Yalısı'nın tekrardan projelendirilmesinde bodrum ihtiyacı olduğunun görüldüğünü ve 7 m kazı yapılmasının gerekliliğini belirtmişlerdir. Marmara Denizi ile bağlantılı yeraltı su

seviyesi nedeniyle önce ıslah çalışması, sonra ise kazı işlemi yapılmıştır. Kazının, ekonomi ve güvenlik koşulları göz önüne alınarak yapılması, tabandan suyun gelmesinin engellenmesi, İstanbul Boğazı tarafında rıhtım yapılması, bölgenin sıvılaşma potansiyelinin ortadan kaldırılması ve yapı temellerinin desteklenmesi ile ilişkili olarak jet grout ıslah çalışması yapılmıştır. 2,5 m x 2,5 m aralıklı 4 adet 60 cm çaplı jet grout kolonunun ortasına 1 adet $\phi 60$ jet grout kolonu gelecek şekilde yerleşim öngörülmüştür. Ayrıca, Boğaz tarafına $\phi 80$ jet grout kolonları ile ağırlık duvarı oluşturulmuştur. Saha ıslahı için 30394 m 60 cm çaplı, 4115 m 80 cm çaplı jet grout kolon imalatı yapılmıştır. Yapılan ıslah çalışmasının sıvılaşma potansiyelini düşürme etkisi, iki adet sondaj kuyusunda ıslah öncesi ve sonrasında yapılan kayma dalgası hızları ölçümüyle incelenmiştir. Kayma dalgası hızı kriterine göre, kuyu sondajlarının bulunduğu bölgeler için yapılan sıvılaşma analizi neticesinde sıvılaşma potansiyelinin tamamen ortadan kalktığı belirlenmiştir. Sahanın diğer bölgelerindeki ıslah sonrası sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için, eşik ivmesi kriterinde SPT vuruş sayılarının korelasyonu ile bulunan kayma dalgası hızlarının 2 kat arttığı ve sahanın tümünde sıvılaşma potansiyelinin ortadan kalktığı belirlenmiştir [18].

Özgan ve ark. (2011), çimento enjeksiyonu yapılmış zeminlerde Kaliforniya Taşıma Oranının (CBR) değişimini 2,5 mm ve 5 mm'lik penetrasyon değerleri için incelemiştir. Çalışmada incelenen zemin için, çimento enjeksiyonu sonucu CBR değerlerinde doğal zemin numunesinde gözlenen CBR değerlerine göre yaklaşık %300'lere varan artışın olduğu belirlenmiştir [19].

Wang ve ark. (2013), Şanghay'daki yumuşak killi ve kumlu zeminde Rodin Jet Pile (RJP) yönteminin performansını ve Güney Kore'de kumlu zeminde İkili (Twin) Jet yönteminin uygulanmasını göstermek için iki vaka analizi sunmuşlardır. Şanghay Huangpu Nehri yakınında RJP yönteminin incelendiği yumuşak zemin üzerinde saha denemeleri yapılmış, zeminin aşınma kabiliyetinin ve karıştırma homojenliğinin farklı katmanlarda önemli ölçüde farklı olduğunu aşağıda verilen bilgiler dahilinde gösterilmiştir:

- a. Dolgu, killi silt ve deniz kilinde zemin yüzeyinden 25 m derinliğe inen kolonlar çok iyi şekil almış, çimento ile zemin homojen olarak karışmıştır.
- b. Sert killi tabaka içinde kalan kolon bölgeleri (25 ile 29 m aralığı) iyi bir kalite göstermesine rağmen bu zemin tabakasındaki zayıf aşınma nedeniyle kolonların çapı yaklaşık 0,8 ile 1,2 m ile sınırlanmıştır.
- c. Kumlu silt ve siltli kum (30 m derinliğin altındaki katmanlar) için, aşınmış mesafenin sert siltli kildekinden çok daha geniş olduğu fakat bu iki tabakada karıştırma homojenliğinin çok zayıf olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak, sertleşmiş kolonların çapının 0,8 m ve 3,3 m arasında değiştiği ve 28 gün sonra basınç dayanımının (UCS) 0,9 ile 8,1 MPa arasında olduğu belirtilmiştir.

Güney Kore'deki vaka analizi ise ikili-jet yönteminin kumlu zeminde başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir. Chang-Ryeong'daki Nam Ji-Kyo tarihi köprüsü başlangıçta araçlar için tasarlanmış, günümüz araç yükü fazlalığı sebebiyle sadece yayaların kullanımına sunulmuştur. Yapılan güvenlik analizlerinde köprünün P6 ve P7 ayaklarında iyileştirmeye gerek duyulmuş ve İkili (Twin)-Jet sistemi uygulanmıştır. Ayakların etrafına kesişen 1,5 m çapında jet grout kolonları ve onların da etrafına 0,8 m çapında yine kesişen jet grout kolonları imal edilmiştir. Saha gözlemleri, jet grout kolonlarının homojen görünümünün mükemmel olduğunu göstermesine rağmen ikili-jet yönteminin kurulmasıyla indüklenen yanal toprak hareketinin, yaklaşık 260 mm'ye kadar artabildiğini belirtmişlerdir [11].

İspir ve ark. (2013), Karadeniz sahiline yaklaşık 200 m mesafede bulunan bir fabrikada kapasite artırımları için yeni makine temelleri ve test havuzları inşasının gerekli olduğu bir vakayı aktarmışlardır. Söz konusu inşaatlar ve bunlara bağlı derin kazılar mevcut yapı ya da yapıya komşu sınırlı alanlar içerisinde kalmaktadır. Yeraltı su seviyesi kotu -2 m'dir. Makine temeli kazısı için 10 m derinliğinde, test havuzu için ise 12 m derinliğinde iki sıra kesişen $\phi 80$ jet grout kolonları ile perdeler oluşturulmuştur. Ayrıca test havuzu yapımı öncesinde 2 m kalınlığında jet grout tapası yapılarak tabandan su gelişi tamamen önlenmiştir. Yüzeyden yaklaşık 2 m kalınlığındaki kil tabakası geriye doğru sıyrılarak, tüm jet grout kolonlarına etkiyen

aktif itki azaltılmıştır. Yapılan çalışmada jet grout yöntemi ile geçirimsiz konsol iksa perdelerinin başarıyla oluşturulduğu, kazıların deplasman ve su sızma problemleriyle karşılaşılmadan tamamlandığı belirtilmiştir [20].

Sert ve ark. (2013), Sakarya merkezde öngörülen B+Z+2+Ç katlı Anadolu İmam Hatip Lisesi inşası için yaptıkları etütlerde "L" biçimindeki binanın oturacağı alanda sağlam olarak nitelenebilecek zemin ve iyileştirme gereken zemin varlığının birarada olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında yapının oturacağı alanda Sakarya Üniversitesi (SAÜ) İnşaat Mühendisliği Geoteknik Çalışma Grubu tarafından toplam 72,2 m derinliğinde 8 adet boşluk suyu basınçlarının da ölçüldüğü koni penetrasyon deneyi (PCPT) yapılmıştır. Koni penetrasyon deneyinden her 2 cm’de bir elde edilen veriler bilgisayarda kayıt altına alınmış ve ofis ortamında uygun yazılımlar ile analizlere tabii tutulmuştur. Aynı alanda farklı firmalara yaptırılmış olan toplam 8 adet sondaj verileri ve her 1,5 m’de yapılan standart penetrasyon ölçümleri de göz önüne alınmıştır. Yapılan incelemeler sonucu Sakarya Üniversitesi (SAÜ) İnşaat Mühendisliği Geoteknik Çalışma Grubunun önerdiği yöntemlerden biri de binanın oturduğu toplam alanda değil, belirli bir kısmında temel alt kotundan başlayarak -8 m derinliğe kadar (yaklaşık 4 m) jet grout kolonları oluşturulmasıdır. Bunun sebebi binanın belirli bir alanda sağlam zemine, belirli bir alanda ise yaklaşık 4 m’lik siltli zemin tabakasına oturmasıdır. Zeminin zayıf olduğu bölgedeki bina sınırlarından en az 1’er sıra taşıyacak şekilde jet-grout kolonlarının 60 cm çapında ve 2,5 m aralıklı inşa edilmesinin yeterli olacağı belirtilmiştir [21].

BÖLÜM 3. NÜMERİK YÖNTEMLER

3.1. Nümerik Yöntemlerin Amacı

Nümerik yöntemler oluşturulan tasarımın sayısal simülasyonudur. Prototip ve deney sayısının en aza indirgenmesi ve proje bileşenlerinin tasarıma istenen aşamalarda uygulanması için nümerik yöntemler kullanılır.

Nümerik yöntemlerde problem matematiksel bir formülasyonla tanıtılır ve tanımlanan matematiksel denklem takımlarının çözülmesi ile sayısal çözümler elde edilir. Nümerik yöntemler makine, uzay, inşaat vb. mühendisliklerde, ısı transferi, akustik analiz gerektiren alanlarda sıklıkla kullanılır. İnşaat Mühendisliği'nde uygulama alanları ise başlıca yapı ve gerilme analizi, statik ve dinamik analiz, doğrusal ve doğrusal olmayan akışkan analizi, zemin mekaniği analizleridir.

Nümerik analizlerin başlıca avantajları aşağıda listelenmektedir [22]:

- a. Karmaşık geometri, malzeme davranışı, yükleme ve sınır koşullarını modellemek mümkündür.
- b. Parametrik analizler yapılabilir ve tasarımda optimizasyon sağlanabilir.
- c. Geri analizler yapılarak tasarım eksikleri ve hataları giderilebilir.
- d. Analizlerde bilgisayar kullanımı zorunlu olduğundan analizler hızlı yapılabilir.
- e. İnşa adımları gözönüne alınabilir.
- f. Farklı problemleri birarada çözmek (bütünleşik problemler) mümkündür.

Literatürde farklı nümerik yöntemler mevcut olup sıklıkla kullanılan üçü Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method), Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Method) ve Ayrık Elemanlar Yöntemi (Discrete Element Method)'dir.

3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi (Finite element method)

Sonlu elemanlar yöntemi, tanımlı bir problem alanı için oluşturulan kısmi diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümüdür. Kısmi diferansiyel çözüm için ilk adım, problemin karmaşık mühendislik problemlerinin rahatlıkla çözülebileceği matematiksel fonksiyon haline getirilmesidir [23]. Bu yöntemde gerekli olan sisteme ait denge denklemlerinden yerdeğiştirme vektörünün bulunması (3.1) ifadesiyle gösterilmiştir.

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\} \quad (3.1)$$

F: Toplam yük vektörü (Bilinen büyüklük)

K: Rijitlik matrisi (Sistem davranışı matrisi - bilinen büyüklük ve matris simetrik)

U: Yer değiştirme vektörü (Bilinmeyen büyüklük)

Sonlu elemanlar yönteminde analiz için, bir araya geldiğinde modeli oluşturan çok sayıda küçük elemandan oluşan bir ağ gerekir. Her bir eleman için hesaplamalar yapılır. Bireysel sonuçlar birleştirilerek yapının nihai sonucu gerçeğe yakın olarak elde edilir. Nesnelerde bulunan sonsuz sayıdaki nokta sonlu elemanlar yönteminde sonlu adete indirgenir ve bu indirgeme işlemine meshleme (sonlu eleman ağı oluşturma), indirgenen noktalara ise düğüm noktası adı verilir. Düğüm noktalarının oluşturduğu şekiller ise eleman olarak nitelendirilir.

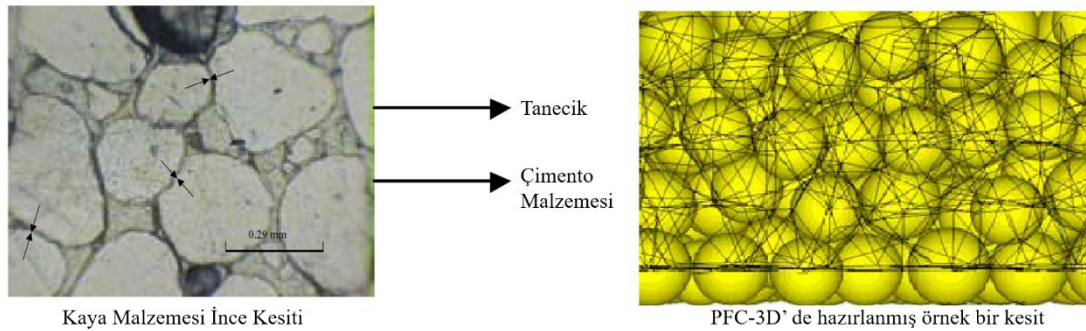
Sonlu elemanlar yöntemi yaklaşık çözümler üreten bir metottur. Eleman sayısı arttırılarak, eleman tipi değiştirilerek, mesh üretim yöntemi değiştirilerek veya mesh üzerinde manuel olarak oynanarak çözüm tekrarlanabilir. Böylece sonuçlar arasındaki fark ta gözlenebilir [24]. Doğru ağ çözümleme, hatalarda önemli bir azalmaya yol açar. Çözümlenen eleman sayısı arttıkça, yani ağ yapısı küçüldükçe hata payı azalır ve net sonuca daha çok yaklaşılr. Zaman optimizasyonu açısından gerilmelerin yoğun olduğu yerlerde eleman sayısının ve dolayısıyla düğüm noktalarının artırılması, gerilme ulaşmayan bölgelerde ise elemanların büyütülerek düğüm noktası sayısının azaltılması uygun olmaktadır.

3.1.2. Sonlu farklar yöntemi (Finite difference method)

Diferansiyel denklemlerin çözümünde sonlu farklar yönteminin uygulanması için ilk adım bilinmeyen büyüklüğü temsil eden fonksiyonun ayrıklaştırılmasıdır. Buna göre bir boyutlu $f(x)$ fonksiyonun eşit Δx aralıklarla i ayrık parçalara bölünmesi sonucunda, diferansiyel denklem ayrık hale getirilebilir [25]. Metod esasında türevsel ifade içeren diferansiyel denklemin seçilen noktalarda Taylor açılımına dayanan yerel farkları kullanan çözüm yöntemidir. Sonlu farklar yöntemi anlaşılması kolay ve basit problemleri çözmede kullanışlı olmasına rağmen karmaşık geometri ve sınır şartlarına sahip problemlerde yöntemin uygulanması çok zordur [26].

3.1.3. Ayrık elemanlar yöntemi (Discrete element method)

Su (2011), ayrık elemanlar yönteminin farklı geometrik şekilli masif kütleler veya dairesel şekilli taneciklerden yararlanarak modelleme yapmayı sağlayan bir sayısal çözümleme yöntemi olduğunu ifade etmiştir. Tanecikler fiziksel özellikleri ve porozite oranına göre bir araya gelerek yapay bir numune oluştururlar. Temas noktalarında birbirlerine bağlanırlar. Bu bağların dayanımının aşıldığı zaman numunenin de yenildiğinin varsayıldığı belirtilmiştir. Çalışmada durumu daha iyi ifade edebilmek için örnek bir kaya malzemenin kesiti ve PFC 3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions) yazılımında modellenen kesiti Şekil 3.1.'de gösterilmiştir [27]. Ayrık elemanlar metodu, modeli belirli sayıda rijit elemana ayırdığından sonlu elemanlar yönteminin basit hali olarak düşünülebilir.



Şekil 3.1. Ayrık elemanlar yöntemine ait örnek bir model (Su, 2011)

3.2. Nümerik Yöntemlere Dayalı Yazılımların Literatürde Uygulamaları

Geoteknik Mühendisliği kapsamındaki nümerik analizler için Plaxis, Midas GTS, Flac, Diana, Geoslope, Rocscience, Abaqus gibi yazılımlar geliştirilmiştir.

PLAXIS, geoteknik mühendisliği problemlerinin 2D ve 3D nümerik analizleri için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Yazılımın önceki versiyonları içerisinde modelin oluşturulmasına ve analizinin yapılmasına olanak sağlayan bir giriş (input) programı ve analiz sonuçlarının detaylı olarak gösterilebildiği bir çıkış (output) programı barındırırken [28], en son 2D versiyonunda model kesiti, diğer geometri elemanları, sonlu eleman ağı ve hesap aşamaları tek bir arayüz kullanılarak oluşturulmakta ve sonuçlara da bu arayüzden ulaşılabilmektedir. Yazılım geoteknik mühendisliği projelerinin tasarımında ihtiyaç duyulan deformasyon ve stabilite analizleri, zemin-yapı etkileşimi, gerilme-şekil değiştirme, yükleme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği konularında ve malzeme çeşitliliği olan durumlarda kullanılmakta ve gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir.

DIANA (Displacement Analyzer) yapı, geoteknik, tünel ve deprem mühendisliği disiplinleri de dahil olmak üzere inşaat, petrol ve gaz mühendisliğinde ortaya çıkan çok çeşitli sorunların analizlerine yönelik çok amaçlı bir sonlu elemanlar yazılım paketidir. DIANA, problemlere yönelik hem yapı tasarımı için uygulanabilecek basit doğrusal dinamik analiz hem de yapının yükleme geçmişini dikkate alarak doğrusal olmayan tam dinamik analiz için detaylı çözümlemeleri yapabilmektedir. Geoteknik mühendisliği alanında temel, dolgu, tünel, kazı, şev stabilitesi, maden ve baraj gibi çeşitli uygulamalarda geniş kapsamlı modelleme imkanları sunmaktadır. Boşluk suyu basıncı ve konsolidasyon hesabı, yeraltı suyu akışı, deprem ve sıvılaşma gibi problemlerin tekil veya birleşik olması durumunda analizlerinin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, zeminle etkileşime giren çelik ve betonarme yapıların modellenmesinde, tünel kaynaklı yerleşim veya gerilme analizinde, tünel ve şaftları arasındaki etkileşimin, tünelin yangın, patlama veya sismik bir olay durumunda nasıl tepki verebileceğini araştırılmasında, gerilme

değişimlerinin ve yüzey çökmelerinin belirlenmesinde DIANA yazılımı kullanılarak 2D ve 3D analizler yapmak mümkündür [29].

Önalp ve ark. (2010) çalışmalarında basit perdeli bir betonarme taşıyıcı sistemin değiştirilen yayılı temel ve zemin koşullarında nasıl davranacağını sonlu elemanlar metodunu kullanan TNO Diana ve Plaxis Foundation 3D yazılımları ile değerlendirmişlerdir. Boyutları 14 m x 20 m x 0,9 m olan yayılı temel, aşırı konsolide (OC) ve normal yüklenmiş (NL) kil zemine oturtulması durumları için incelenmiştir. Üst yapı yükleri Sta4Cad yazılımının kullanılmasıyla elde edilmiştir. İlk önce bu iki yazılımda modele kolon yüklemesi yapılarak analizler yapılmış, daha sonra TNO Diana yazılımında üst yapı da modellenerek analiz yapıp tüm değerler karşılaştırılmıştır. Kolon yüklemesi durumlarında TNO Diana yazılımının sonucuna göre aşırı konsolide kilde 83 mm, normal yüklenmiş kilde ise 280 mm civarında maksimum toplam oturma oluşmuştur. Farklı oturmalar da OC kilde 33 mm, NL kilde 105 mm civarında gerçekleşmiştir. Plaxis yazılımının çözümünden elde edilen oturma değerlerinde ise aşırı konsolide kilde 95 mm, normal yüklenmiş kilde 349 mm civarında maksimum toplam oturma görülmüştür. Temelde meydana gelen farklı oturmalar da OC kilde 50 mm, NL kilde 190 mm civarında çıkmıştır. İkinci durum üst yapı rijitliğinin temele etkimesi koşulunu yansıtmaktadır ve TNO Diana yazılımında maksimum toplam oturma değerleri aşırı konsolide kilde 21 mm ve normal yüklenmiş kilde 105 mm civarında hesaplanmıştır. Farklı oturmalar da OC kilde 16 mm, NL kilde 78 mm civarında gerçekleşmiştir. Analiz değerlendirmeleri sonucunda seçilmiş makul kalınlıkta bir yayılı temelde (radyejeneral) toplam ve farklı oturma sonuçlarının sisteme üst yapı özelliklerinin içerilmemesi durumunda çok farklı hesaplanabildiği gösterilmiştir [30].

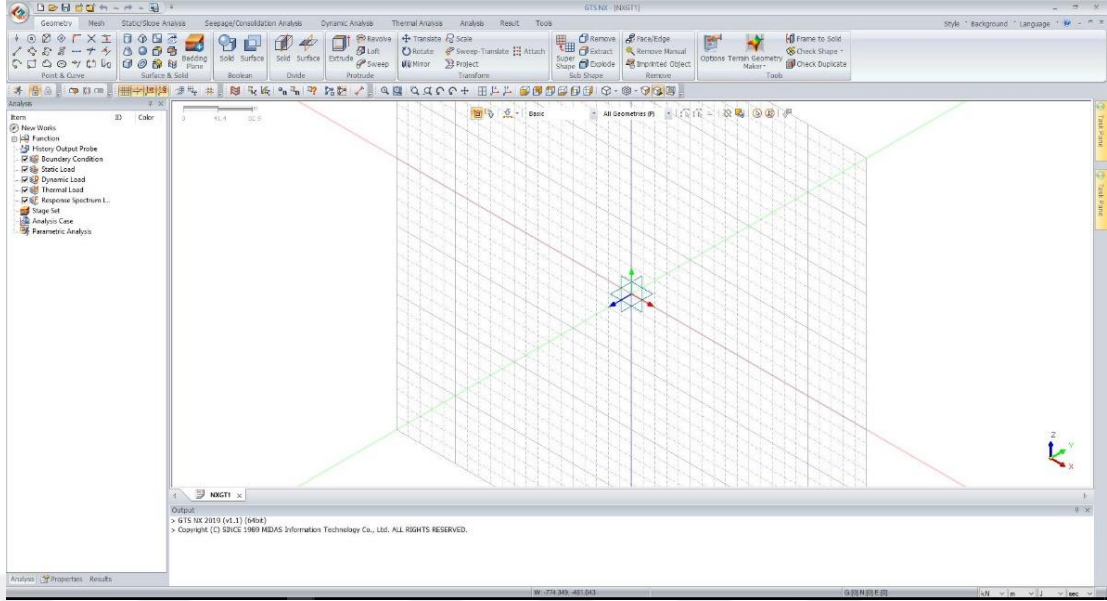
Unutmaz (2015) çalışmasında tünel çevresi zeminlerinin deprem sırasında ve sonrasında davranışını irdeleyebilmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanan Flac-3D geoteknik yazılımında bir dizi modeller oluşturularak analizler yapmıştır. Sonuçlar karşılaştırılarak deprem sırasında oluşacak ekstra yüklerin, tüneller ve zeminin üzerinde bulunan yapılar üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda yapılan analizlerde 10 m ve 15 m derinliklerde inşa edilmiş 5 m ve 10 m çapındaki

tüneller analiz edilmiştir. Farklı zemin gruplarının tünellerin deprem sonrası davranışları üzerindeki etkisi incelemek için zeminlerin kayma dalga hızları 100 m/s ile 300 m/s arasında değiştirilmiştir. Bu kapsamda maksimum yer ivme değerleri 0,10 g ve 0,36 g arasında değişen dört farklı deprem kaydı kullanılmıştır. Bütün bu değişen parametrelerin farklı kombinasyonları denenerek kritik durumlar belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Analizler sonucunda zeminde oluşan maksimum ivme değerleri ve sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı değerleri elde edilmiş, bu değerler ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu analizler sonucunda tünel çapının özellikle yüzeye yakın kesimlerde zemin sıvılaşması açısından çok önemli bir parametre olmadığı, daha derinde yer alan tünellerin içinde bulundukları zeminlerde sıkı tünellere göre sıvılaşma potansiyellerini azalttığı görülmüştür [31].

3.3. Tezin Kapsamında Bulunan Midas GTS Yazılımı

Midas GTS, derin temeller, kazılar, karmaşık tünel sistemleri, sızıntı analizi, konsolidasyon analizi, dolgu tasarımı, dinamik ve şev stabilitesi analizi dahil tüm geoteknik tasarım uygulamalarını kapsayan kapsamlı bir sonlu eleman analiz yazılımı paketidir [32].

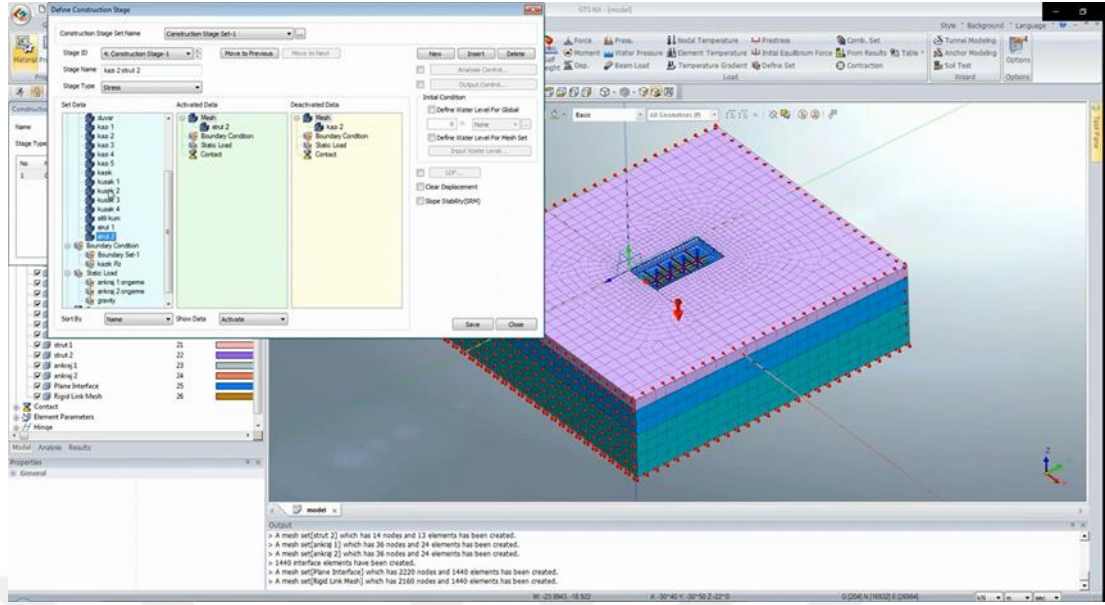
Midas GTS’de hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu analiz seçeneği mevcuttur. Analiz yaparken, çeşitli tasarım aşamalarının etkilerini karşılaştırmak için farklı analizler yapmak gerekir. Midas GTS’de her analiz durumu için ayrı bir model dosyası açılmasına gerek duyulmadan aynı model üzerinde birden çok analiz yapılarak aynı dosya üzerinde sonuçlar elde edilebilir. Geometrik model Midas’ın kendi modelleme birimleriyle oluşturulabileceği gibi Autocad ile de oluşturulan çizimler aktarılıp tanımlanabilmektedir. Şekil 3.2.’de Midas GTS’in 3D modelleme için arayüz ekranı verilmiştir.



Şekil 3.2. Midas GTS 3D arayüzü

Midas GTS’de geometri oluşturulduktan sonra hesap noktalarının oluşturulması için sonlu eleman ağının oluşturulması (mesh) gerekir. Mesh işlemi öncesinde Material komutundan malzeme özellikleri listesi oluşturulur ve sonrasında bu malzemelerin şekil ve boyut özellikleri (1D, 2D, 3D, other element) Property komutundan belirlenir. Malzeme özellikleri elemanlara Mesh işlemi sırasında Property olarak atanır. Bu nedenle sonlu eleman ağı oluşturulması tüm modele değil elemanlara tek tek yapılır. Daha sonra problemin türüne göre Statik/Şev, Sızıntı/Konsolidasyon, Dinamik, Termal Analiz sekmelerinden sınır şartları, yerçekimi ivmesi, su seviyesi değişimi, arayüzey özellikleri (interface), dinamik ve statik yükler vb. gerekli değerler girilir.

Eğer aşamalı inşaat analizi yapılacaksa, herbir aşamada hangi elemanların aktif-deaktif olduğu Construction Stage oluşturma komutuyla Şekil 3.3.’de gösterildiği gibi gerçekleştirilir. Diğer bir seçenek ise Stage Wizard komutundan akış çizelgesi oluşturularak da tanımlama yapmaktır.



Şekil 3.3. Midas GTS’de 3D ankrajlı derin kazı örnek modeli

3.4. Midas GTS Literatür Araştırması

Kılıç (2011), yüksek lisans tezinde yayımlı temellerde üstyapı rijitliğinin etkilerini, sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan Midas GTS yazılımıyla örnek bir uygulama üzerinde irdelemiştir. Bu bağlamda, Midas GTS yazılımıyla, farklı temel kalınlıklarında ve iki farklı zemin koşulunda modeller oluşturularak birbiriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları şekiller, tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur. Sonuç olarak üst yapı rijitliğinin temelde oluşan deplasmanlarda önemli rol oynadığı ve gözardı edilmesinin artık doğru bir yaklaşım olmadığı söylenmiştir [33].

Günay (2013), yüksek lisans tezinde Eskişehir’in Odunpazarı ilçesinde inşa edilen, konut yapısına ait kazıklı radye temelin davranışı üst yapıdan gelen düşey yükler altında Etabs, Safe ve Midas GTS üç boyutlu sonlu elemanlar yazılımları aracılığıyla irdelemiştir. Yükün, radye ve kazıklar arasında paylaşarak zemine aktarıldığı ve bu paylaşım sonucunda kazık elemanlara gelen yüklerin azalmasından dolayı daha az kazık elemanı kullanarak daha ekonomik temel sistemleri tasarlanabileceği ifade edilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları değerlendirildiğinde, kazık eksenel yükleri ve deplasmanları açısından benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kesit tesirleri açısından

moment ve kesme kuvveti değerlerinde bir miktar farklı sonuçlar elde edilmiştir. Zemin rijitliğinin tanımlanmasında, Midas GTS programında zeminlere ait elastisite modülü değeri kullanılırken, Etabs ve Safe programlarında ise sadece yay sabiti değeri kullanılarak daha rijit bir zemin modeli tanımlanması sebebiyle bu farklılığın ortaya çıktığı belirtilmiştir [34].

Köktan ve ark. (2019) çalışmalarında Midas GTS sonlu elemanlar yazılımında konsol bir istinat duvarın sismik davranışına yeraltı su seviyesindeki değişimlerin etkisini zaman tanım alanında irdelemişlerdir. Zemin ile duvar arasındaki davranışı daha doğru modelleyebilmek için özel arayüzey elemanları kullanıldığı ve San Fernando Pacoima Dam depremine ait kaydın kullanıldığı ifade edilmiştir. Yeraltı suyunun mevcut olmadığı ve su seviyesinin üç farklı seviyede olduğu durumları temsilen toplamda dört su seviyesinde analizler yapılmıştır. Zeminde yeraltı su seviyesinin yükselmesine bağlı olarak duvarın yatay yer değiştirmelerinde önemli miktarda artış meydana gelmiş, bu analiz çerçevesinde ele alınan istinat duvarı-zemin sisteminde meydana gelen yatay yer değiştirmelerin hem dolgu yönünde hem de dolgunun tersi yönde olduğu grafiksel olarak gösterilmiştir. Buradan istinat duvarlarının yer değiştirmeye oldukça duyarlı yapılar olduğunun görülmekte olduğu, yapılan analizler neticesinde yeraltı su seviyesindeki değişimlerin duvarın hareketini ve duvar üzerinde oluşan gerilmeleri önemli mertebelerde etkilediği belirtilmiştir [35].

BÖLÜM 4. PROBLEMİN TANIMI VE MIDAS GTS İLE ANALİZİ

4.1. Sistem Genel Bilgileri

Adapazarı zemininde inşası öngörülen bir konut binasının yapılması durumunda iyileştirmenin gerekliliği ve jet grout iyileştirmesinin etkisi bu tez kapsamında Midas GTS geoteknik yazılımı ile irdelenmiştir.

Öngörülen konut binasının yüzeysel temelinin boyutları 0,5 m x 12 m x 12 m olup temele gelen toplam gerilmenin 150 kPa olması durumu için jet grout ile zemin iyileştirmesine ait irdellemeler yapılmıştır. Su yüzeyde alınmış olup kesitte yüzeyden aşağıya ilk 15 m boyunca 5 farklı kumlu zemin tabakası, 15 m'den sonra ise sağlam anakaya mevcuttur. Analizlerde ilk 15 m modellenmiş ve sınır koşulları 15 m için düzenlenmiştir. Zemin özellikleri, drenaj türü ve seçilen model türü Tablo 4.1.'de ve temel malzeme özellikleri Tablo 4.2.'de ayrıntılı şekilde verilmiştir.

Tablo 4.1. Temelin etkiyeceği zemine ait malzeme özellikleri

	Zemin-1	Zemin-2	Zemin-3	Zemin-4	Zemin-5
Malzeme Model Türü	Mohr-Coulomb Drenajlı	Mohr-Coulomb Drenajlı	Mohr-Coulomb Drenajlı	Mohr-Coulomb Drenajlı	Mohr-Coulomb Drenajlı
Poisson Oranı , ν	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Doğal Birim Hacim Ağırlık, γ_n (kN/m ³)	17	17	17	18	19
Doygun Birim Hacim Ağırlık, γ_d (kN/m ³)	18	18	18	19	20
Boşluk Oranı , e_0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Elastisite Modülü, E (kPa)	4500	6000	8000	25000	40000
Kayma Direnci Açısı, ϕ °	20	20	20	28	36
Dilatasyon Açısı, χ °	0	0	0	0	6
Kohezyon, c (kPa)	15	5	20	3	1

Tablo 4.2. Temelin malzeme özellikleri

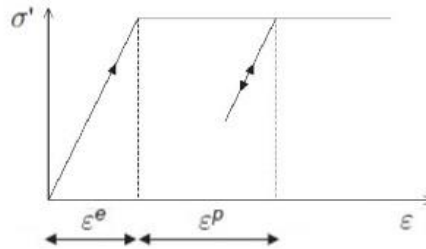
Model Türü	Elastik (Structure Seçenekli)
Poisson Oranı , ν	0,2
Birim Hacim Ağırlığı γ (kN/m ³)	24,5
Elastisite Modülü, E (kPa)	30000000

4.2. Kullanılan Metod

Bu çalışma kapsamında yazılım olarak Midas GTS 2019 programı tercih edilerek yapı altında farklı çaplarda jet groutların aşamalı inşaa sürecinde 2D ve 3D analizleri yapılarak oturmada meydana getirdikleri pozitif değişimlerin incelenmesi hedeflenmiştir.

Zemin Mohr-Coulomb zemin modeli ile modellenmiştir. Mohr-Coulomb modelde zemin elasto-plastik olarak tanımlanır. Kullanılan zemin parametrelerinden elastisite modülü (E), zemin esnekliğini belirten poisson oranı (ν), zeminin mekanik özelliklerini belirleyen içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c), genleşebilirlik ifadesi dilatasyon açısı (χ) Mohr-Coulomb zemin modelini belirler.

Mohr-Coulomb modeli, Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi bir elasto-plastik davranışı ile tanımlanmaktadır.



Şekil 4.1. Mohr-Coulomb gerilme-deformasyon grafiği

Mohr-Coulomb akma kriterinde, zemin malzemelerinin tanımlanmasında 2 tane noksanlık söz konusudur. Birincisi, ortalama asal gerilme, zeminin gerçek test sonuçlarına karşı bir varsayım olan akmayı etkilemez. İkincisi, Mohr çemberinin

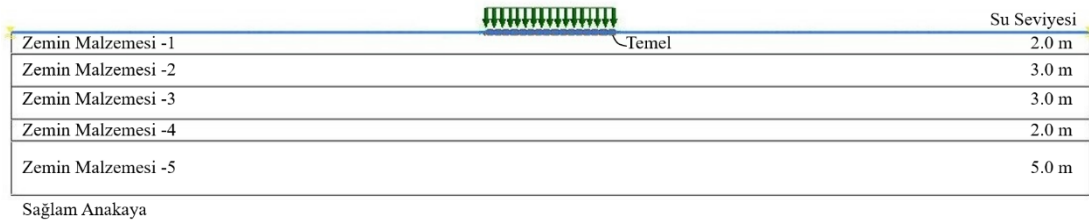
kırılma zarfı doğrusaldır; bu nedenle sürtünme açısı parametresi, hidrostatik basınç ile değişmez. Bu akma kriteri sınırlı bir hidrostatik basıncı aralığında doğrudur, ancak aralık farkı arttıkça doğruluk azalır. Bu davranışsal varsayım, kullanımı kolay olduğundan hidrostatik basınç aralığında zeminin genel nonlinear analizi için güvenilir sonuçlar gösterir ve çoğu arazinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılır [36].

Başka bir ifadeyle, Mohr-Coulomb zeminin ya da kayaların 1. dereceden yaklaşımını temsil etmektedir. Mohr-Coulomb modelinde, her zemin tabakası için sabit bir ortalama rijitlik hesaplanır, bu rijitlik derinlikle doğrusal olarak artar. Ancak lineer elastik-mükemmel plastik Mohr Coulomb model, zeminlerin gerçek davranışlarını yansıtmada birçok kısıtlamalar içermektedir. Derinlik boyunca zemin rijitliğinin artımı gözönüne alınmasına rağmen, Mohr Coulomb modelde gerilme durumuna ya da anizotropik gerilme durumuna bağlı rijitlik göz önüne alınmamaktadır [37].

4.3. Midas GTS’de İki Boyutlu (2D) Olarak Zemin Davranışı Analizi

4.3.1. İyileştirme öncesi (doğal durum) analizi

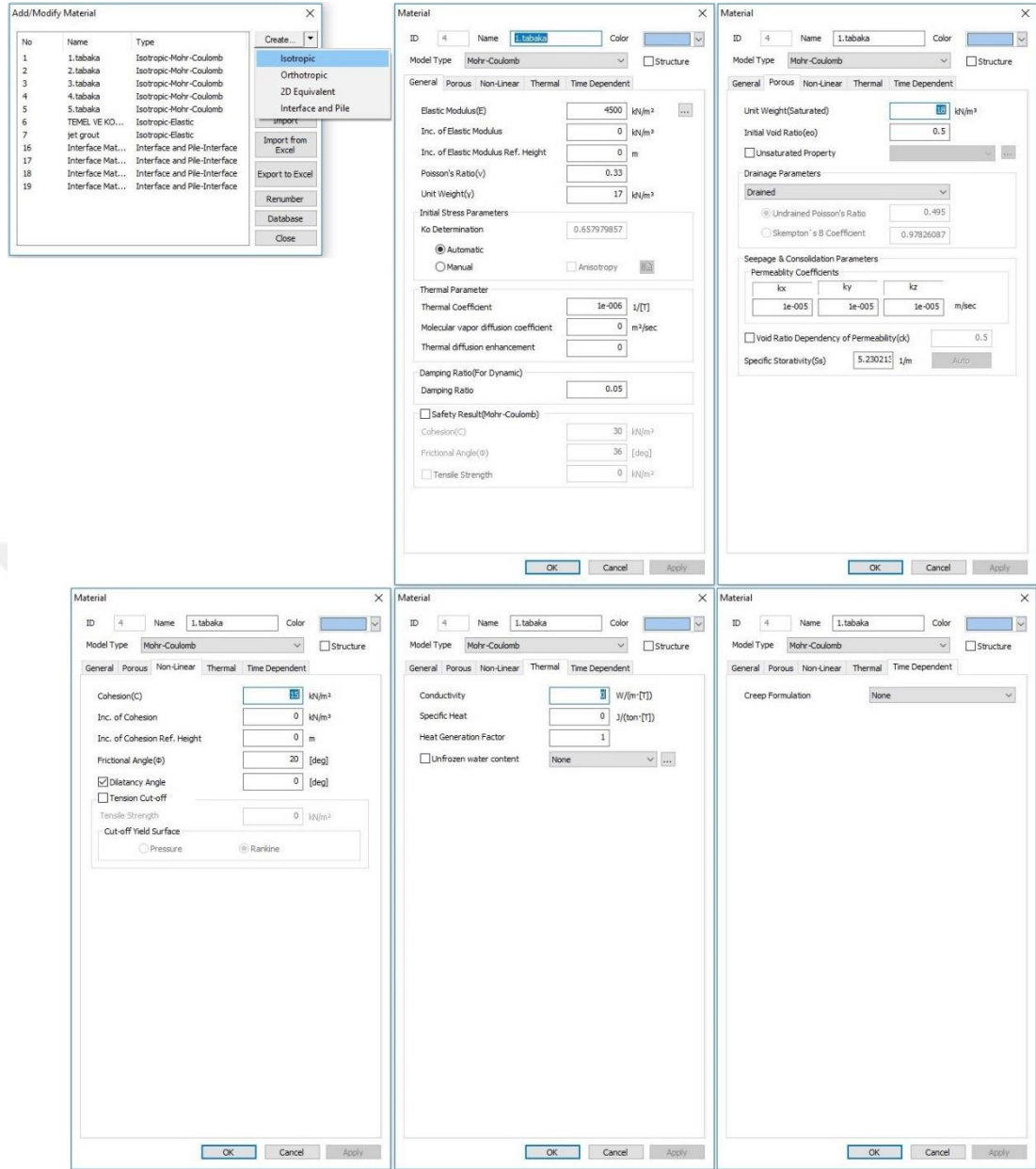
Midas GTS’de 2 boyutlu analiz için ilk işlem olarak Şekil 4.2.’deki çalışma alanının geometrisi tasarlanmıştır. Sınır şartlarının sonuçları etkilememesi için temel orta noktasından 50’şer m sağa ve sola mesafe ve 15 m derinlik alınarak model sınır ölçüleri oluşturulmuştur. Material (Malzeme) ve Property (Nitelik) komutlarından malzeme listesi sırasıyla Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.’de gösterildiği gibi hazırlanmıştır.



Zemin Malzemesi	Temel	Su Seviyesi
Zemin Malzemesi -1		2.0 m
Zemin Malzemesi -2		3.0 m
Zemin Malzemesi -3		3.0 m
Zemin Malzemesi -4		2.0 m
Zemin Malzemesi -5		5.0 m

Sağlam Anakaya

Şekil 4.2. Midas GTS’de iki boyutlu modelin oluşturulması

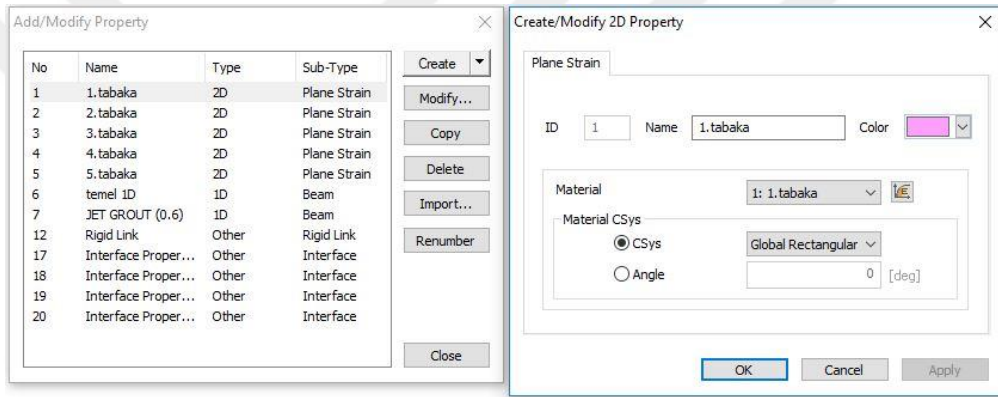


Şekil 4.3. Midas GTS’de malzeme listesinin material (malzeme) komutundan oluşturulması

Dilatasyon açısı kayma gerilmesine göre hacimdeki artış oranı olarak tanımlanabilir ve genellikle içsel sürtünme açısının 30° eksigidir. Buradan hareketle, eğer içsel sürtünme açısı 30° ’den küçük ise dilatasyon açısı 0 (sıfır)’a yakındır. Gerçek testlerde, çok yumuşak zeminlerde negatif dilatasyon açısı belirlenebilir fakat sayısal olarak dilatasyon açısı 0 (sıfır) ile içsel sürtünme açısı arasındaki değerdir.

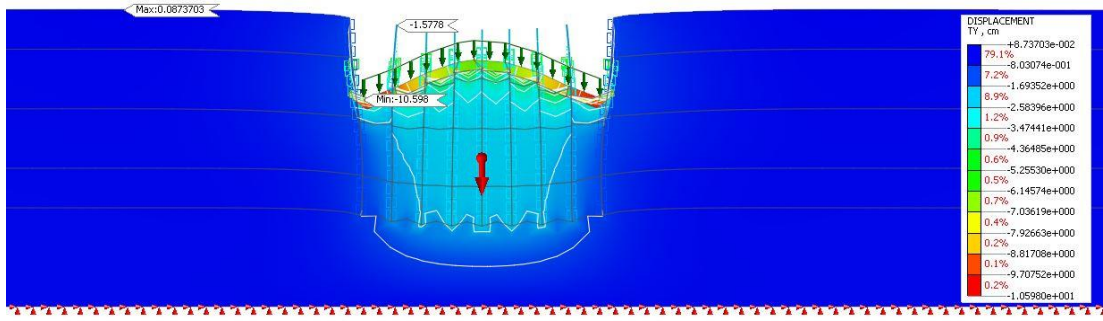
Drenajsız deneylerde içsel sürtünme açısı 0 (sıfır) ise dilatasyon açısı da 0 (sıfır) alınmalıdır. Eğer dilatasyon açısının etkisi göz ardı edilecekse dilatasyon ve içsel sürtünme açılarına aynı değerler girilmelidir. Diğer bir ifadeyle, “Consider dilatancy angle (Dilatasyon açısını göz önünde bulundur)” seçeneği onaylı değilse otomatik olarak içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısı eşit alınarak hesap yapılır [36].

İlk 4 tabakanın zemin tabakasının içsel sürtünme açısı değerleri 30°’den küçük olduğu için dilatasyon açıları 0 alınmıştır. 5. tabakanın içsel sürtünme açısı 36° olduğundan dilatasyon açısı 30° eksiği alınarak 6° girilmiştir.

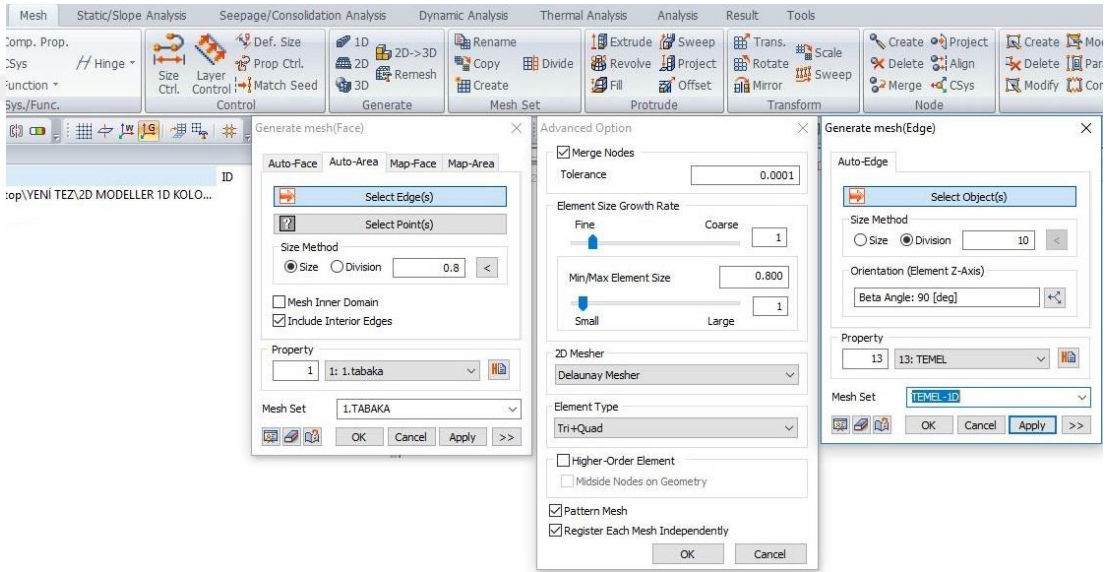


Şekil 4.4. Midas GTS’de malzemenin şekil ve boyut özelliklerinin property (nitelik) komutundan girilmesi

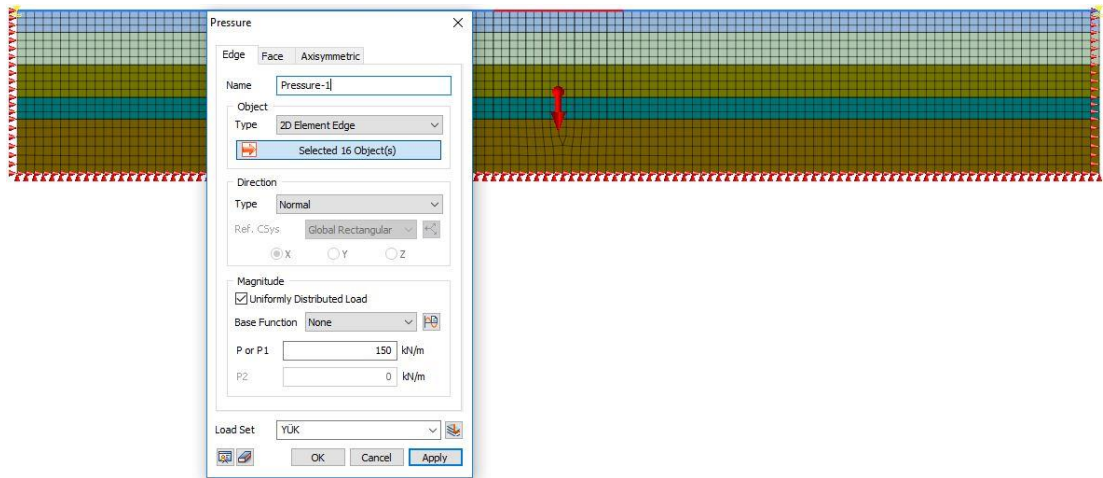
Temel 2D olarak modellendiğinde, 1D jet grout kolonları 2D temel içerisine Şekil 4.5.’de gösterildiği gibi zımbalama hareketi gösterdiğinden, temel tez kapsamındaki 2D analizlerin tümünde 1D olarak tanımlanarak temel ve jet groutların birlikte hareketi sağlanmıştır. Şekil 4.6.’da gösterildiği gibi Mesh (Sonlu Eleman Ağı) Sekmesinden temel için ‘1D Mesh’, zemin için ‘2D Mesh’ seçeneğinden sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Zemine ait her bir sonlu elemanın her bir boyutunun 0,8 m’den küçük, üçgen ve/veya dörtgen şekillerden oluşması seçilmiştir. Temele ait 1D sonlu eleman ağı için default olarak 10 parça oluşmasına tamam denilerek, aslında zemin ve temelin birleştiği alandaki düğüm noktalarının yazılım tarafından ortak düğüm noktaları olarak belirlenmesi sağlanmıştır. Elemanlara malzeme özellikleri sonlu eleman ağı oluşturulduktan sonra ‘Parameters’ komutundan elemanlar seçilerek atanmıştır. Şekil 4.7.’de yükün modele tanıtılması, Şekil 4.8.’de ise sonlu eleman ağı ve yayılı bina yükü gösterilmektedir.



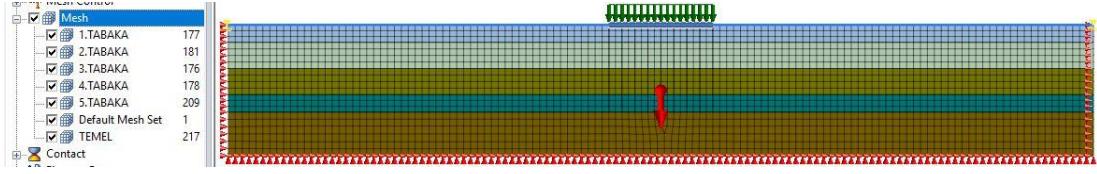
Şekil 4.5. 2D zeminde 2D temel ve 1D olarak modellenen jet groutların zımbalama hareketi



Şekil 4.6. İki boyutlu analizde sonlu eleman ağının oluşturulması

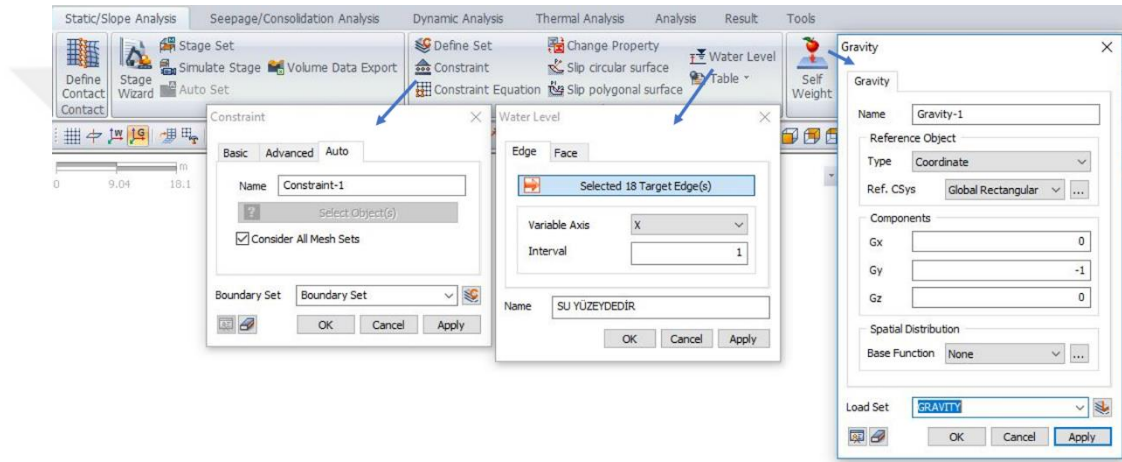


Şekil 4.7. Yükün modele tanımlanması



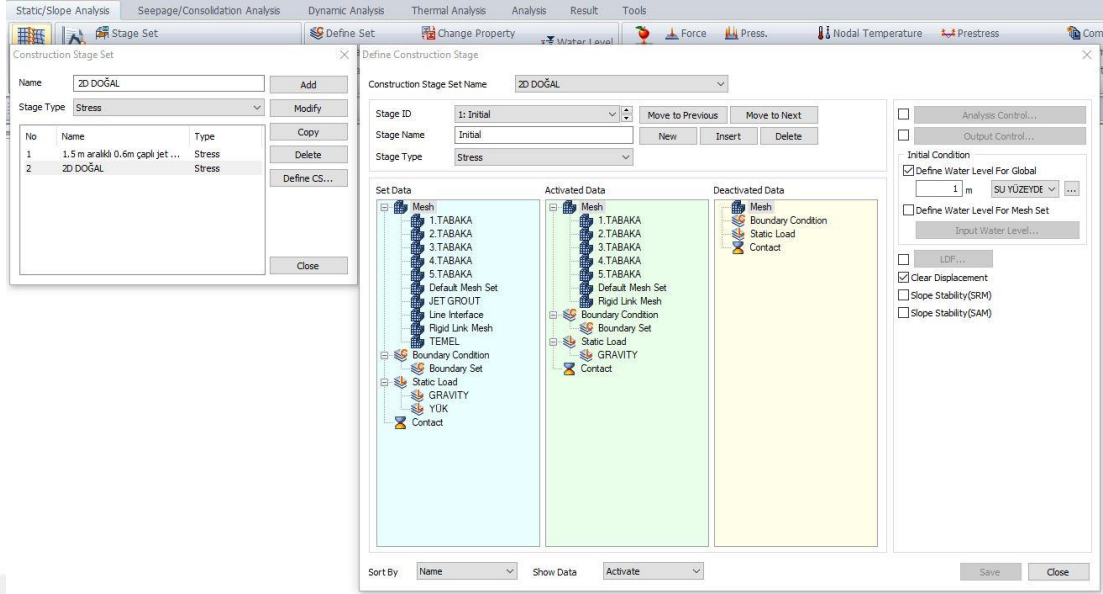
Şekil 4.8. İyileştirme öncesi durumu ifade eden sonlu eleman ağı

Şekil 4.9.’da gösterilen pencerelerde sırasıyla sınır koşullarının oluşturulması, yüzeyde bulunan su seviyesinin belirlenmesi ve yer çekiminin mevcudiyetini belirtme işlemleri gerçekleştirilmiştir.



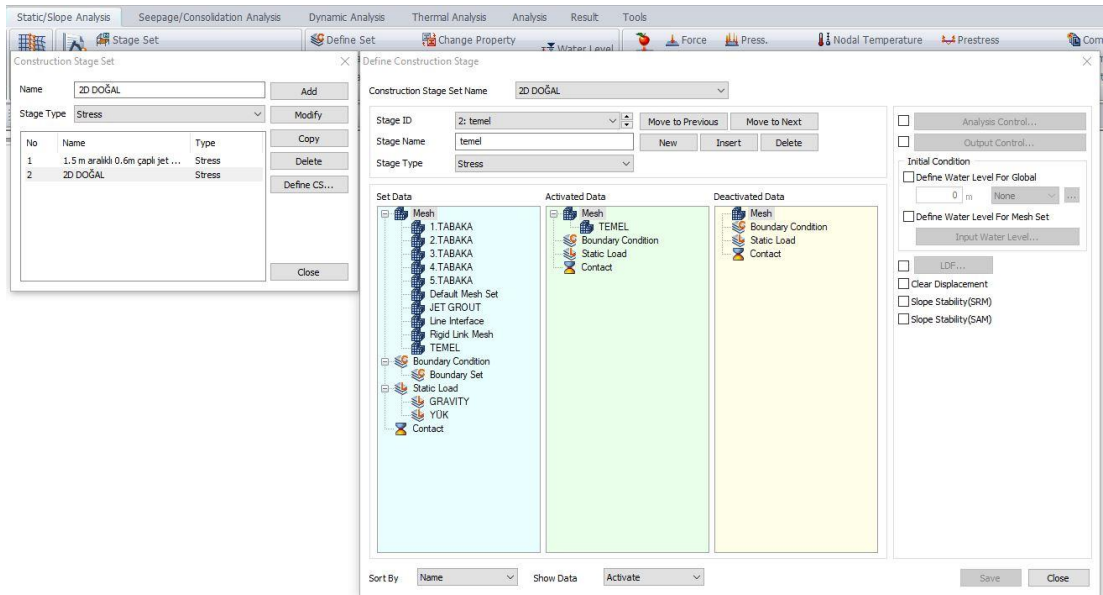
Şekil 4.9. Sırasıyla sınır koşullarının oluşturulması, yüzeyde bulunan su seviyesinin belirlenmesi ve yerçekimi ivmesinin girilmesini gösteren pencereler

Şekil 4.10.’da ‘Stage Set (Aşama Tanımlama)’ komutundan inşaat aşamalarının oluşturulması ve başlangıç (initial) aşaması gösterilmektedir. Doğal durum ve jet grout iyileştirmeli durum aynı modelde fakat farklı koşullarda analiz edildiğinden, doğal durum için bu aşamada ‘Rijit Link Mesh’ aktiftir. Bu ifade aktif ise interface oluşacak bir durumun henüz olmadığına göstergesidir. Bu ifade deaktif olduğunda jet grout etrafında interface oluşumu için düğüm noktalarını birbirinden ayırır. Şekil 4.9.’da su seviyesinin belirlendiği pencerede ‘Interval (Mesafe)’ hücresinde 1 rakamının yazması aktifleştirme kilit görevi görmektedir. Aşama listesi hazırlanırken önceden oluşturulan su seviyesi seçilip 1 yazılarak suyun varlığı yazılıma tanıtılmıştır. ‘Clear Displacement (Deformasyon Sıfırla)’ kutucuğu seçilerek başlangıç (initial) durumda deformasyonun olmadığı ve bu durumun referans alınarak deformasyonların hesaplanması gerektiği belirtilmiştir.

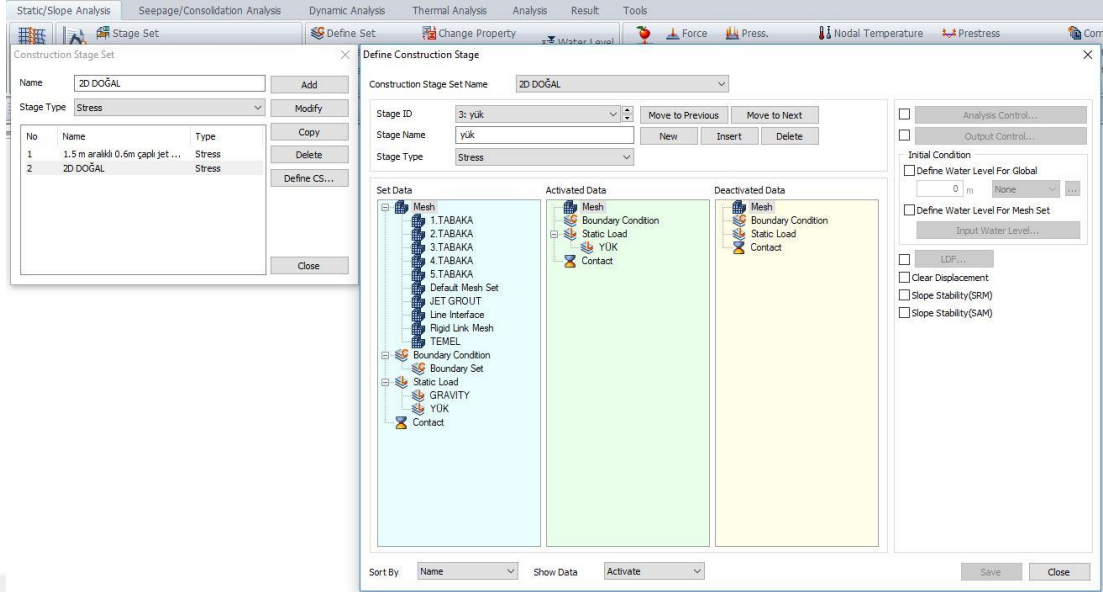


Şekil 4.10. Aşama tanımlama (stage set) ve başlangıç (inital) durumu ifade eden aşamanın belirlenmesi

Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'de sırasıyla temelin oluşumu ve yükün temele verilmesi aşamaları gösterilmektedir. Her aşama kendinden önceki aşamaların geçerli olduğunu kabul eder ve sadece değişen durumlar farklı aşamalarda belirtilir. Bu nedenle her aşamada su seviyesi, zemin mevcudiyeti ve sınır koşulları gibi model bileşenleri tekrar tanımlanmamıştır.

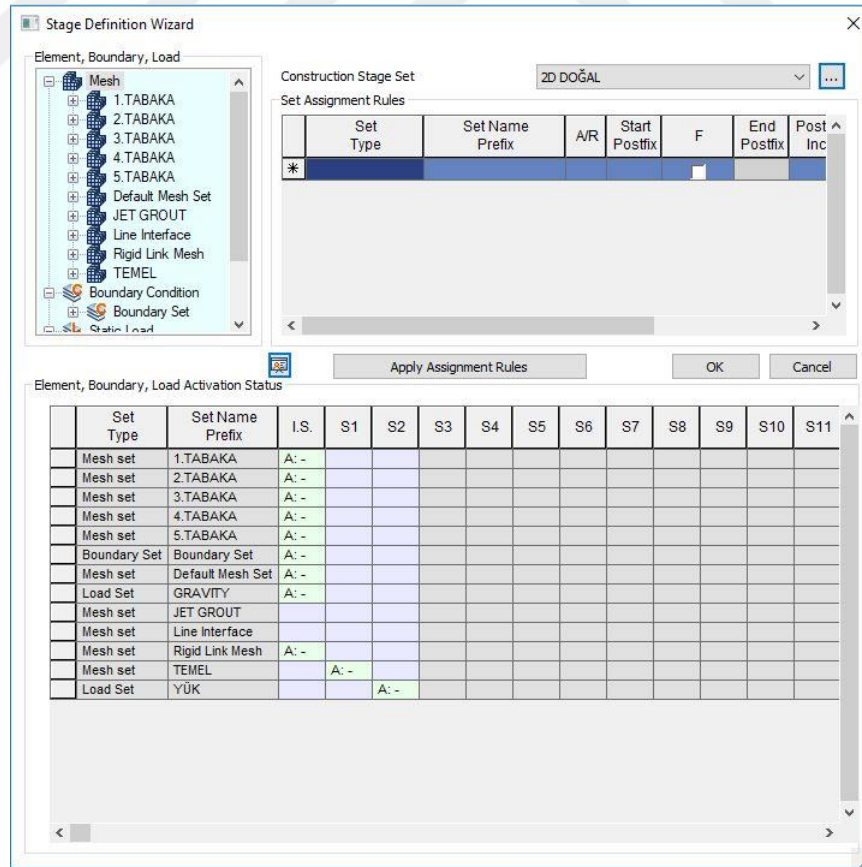


Şekil 4.11. Temel aşamasının belirlenmesi



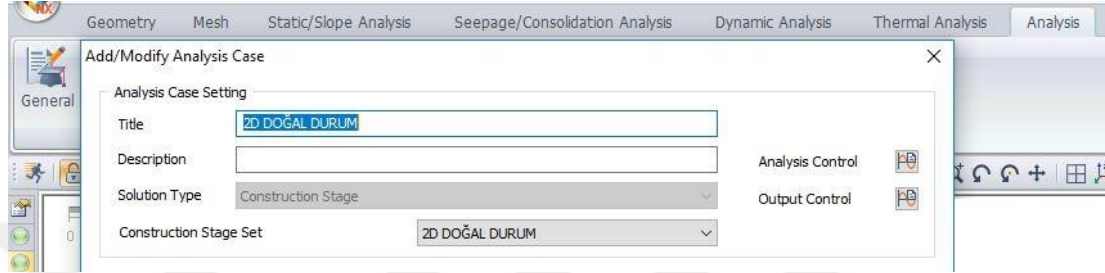
Şekil 4.12. Yükün analize dahil edilmesi

Şekil 4.13.'de ise hangi aşamalarda hangi elemaların aktif (A) veya deaktif (R) olduğunun çizelgesi 'Stage Wizard (Aşama Sihirbazı)' komutundan gösterilmiştir.

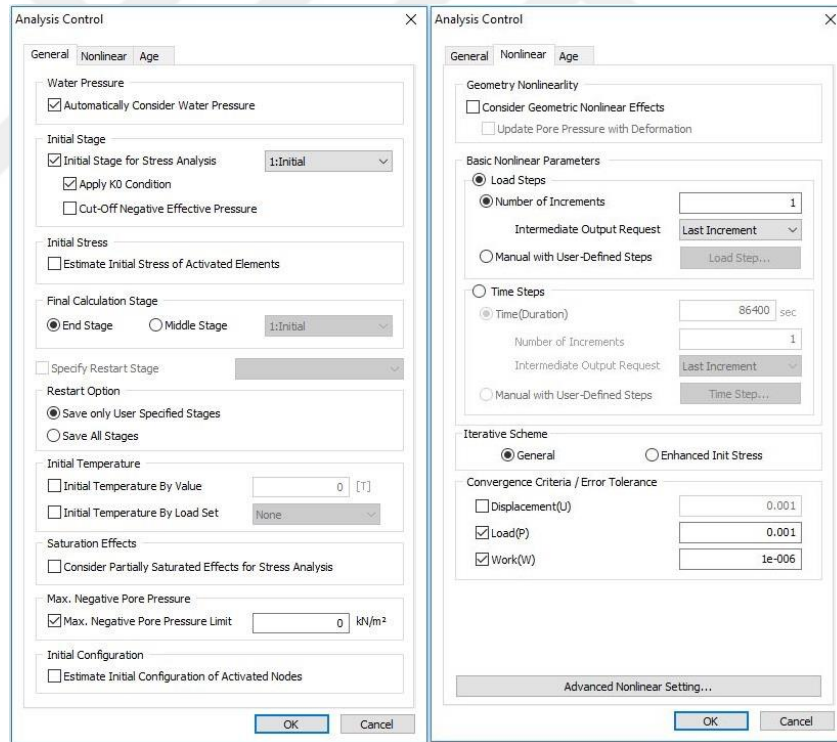


Şekil 4.13. Stage Wizard (Aşama Sihirbazı) komutundan doğal durum analizi için inşa aşamaları çizelgesi

Şekil 4.14.'de Analiz sekmesinden 'Analysis Case / General (Analiz Durumu / Genel)' komutundan analiz türü 'Construction Stage (İnşaat Aşamalı Analiz)' olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.15.'de su basınçlarının otomatik olarak hesaba katılması, başlangıç (initial) durum için K_0 koşulunun uygulanmasının seçilmesi ve yükün tek adımda yüklenmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Analiz türünün belirlenmesi



Şekil 4.15. Analiz kontrolü penceresinden K_0 uygulanmasının ve yükleme adımlarının belirlenmesi

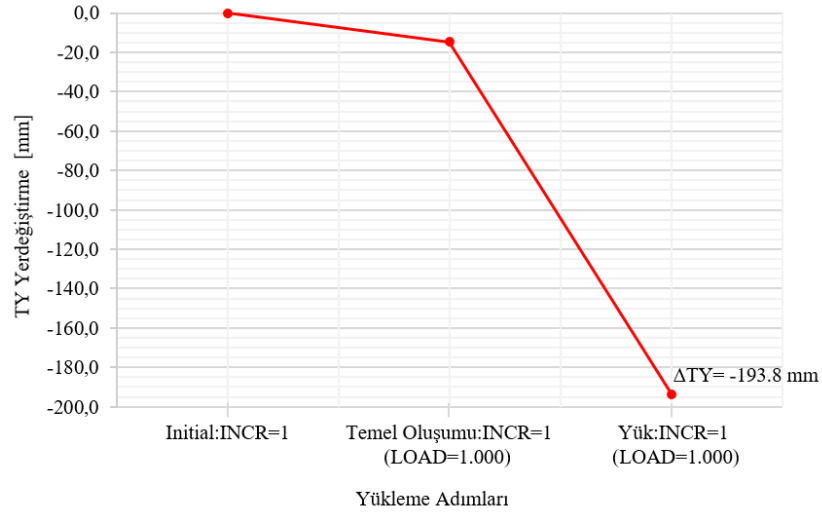
Zeminin iyileştirme öncesi, doğal durumda yüklenmesi analizinin sonucunda oluşan düşey deformasyonlar ve basınç soğanlarının sıklaştığı bölge Şekil 4.16.'da gösterilmiştir. En yüksek deformasyon temelin ortasında yaklaşık 194 mm oturma

olarak gerçekleştirilmiştir ve zemin iyileştirmesine ihtiyaç olduğu anlaşılmıştır. Yükleme adımına karşılık TY Yerdeğiştirme (Oturma) grafiği Şekil 4.17.'de verilmiştir.



[DATA] 2D DOĞAL, yük, INCR=1 (LOAD=1.000), [UNIT] kN, mm

Şekil 4.16. 2D doğal durum analizi temelin TY yerdeğiştirmesi (Ölçeksiz)



Şekil 4.17. 2D doğal durumda yükleme adımlarına karşılık temelin TY yerdeğiştirmesi

4.3.2. Jet grout iyileştirmesinin bir boyutlu kazık eleman yöntemi ile analizi

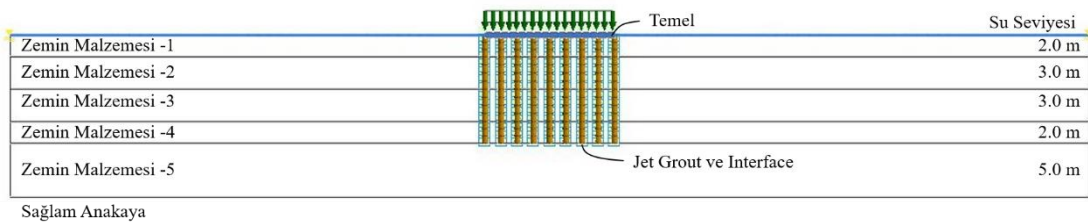
Oluşan deformasyonları önlemek için yapılacak iyileştirmenin iki boyutlu analizinde jet groutların bir boyutlu kazık eleman olarak modellenmesi literatürde mevcuttur. Oluşan 193,8 mm'lik oturmayı azaltmak için uygulanacak yüksek modüllü kolonların malzeme ve tasarım özellikleri Tablo 4.3.'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Jet grout kolonlarının malzeme ve tasarım özellikleri

Model Türü	Elastik (Structure)	Eleman Türü
Poisson Oranı , ν	0,2	1D Beam (1 Boyutlu Çubuk Eleman)
Birim Hacim Ağırlığı γ (kN/m ³)	21	Arayüzey Malzemesi
Elastisite Modülü, E (kPa)	8000000	Interface Property /Wizard (Interface Arayüz Elemanı / Otomatik)
Çap, D (m)	0,6 ve 0,8	

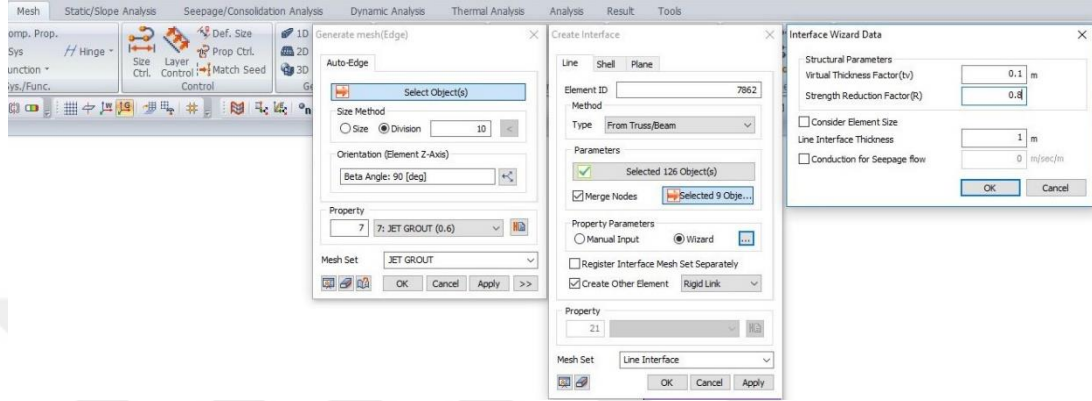
Bu yöntemde jet grout kolonlarını temsil eden bir boyutlu çubuk elemanlar arayüz etkileşimleri ile beraber mevcuttur. Kolon çapına ve dizilimine bağlı olarak kaynaklanan kolonlar arası etkileşimi (olumlu veya olumsuz kolon etkisi) dikkate alır.

Tüm modellerde temelin köşe noktası jet grout kolonunun merkezine gelecek şekildedir. Şekil 4.18.'de, 1,5 m aralıklarla dizili 1D jet grout iyileştirmeli model gösterilmektedir. Tüm modellerde jet grout kolon aralıkları $s_L=s_B$ olmak üzere eşit aralıklıdır. Kolon boyu 10 m'dir. Midas GTS'de jet grout kolonuna ait üçüncü boyuttaki aralıkları şekil özelliklerinin belirlendiği 'Property (Malzeme)' komutundan girilebilmektedir.



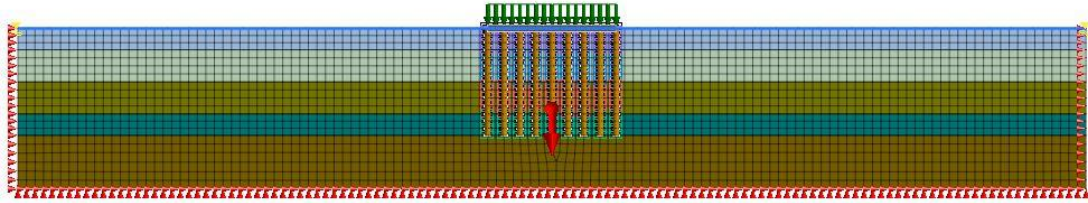
Şekil 4.18. 2D zemin modelinde kolonların bir boyutlu kazık eleman yöntemi ile modellenmesi

Şekil 4.19.'da bir boyutlu jet grout kazıklarının sonlu eleman ağının nasıl oluşturulduğunun yöntemi verilmiştir. İki boyutlu model analizinde bir boyutlu jet grout çubuk elemanları dönme veya burkulma hareketi yapamayacağından 'Y' yönünde hareket sınırlaması (R_y) yapılmamıştır.



Şekil 4.19. Bir boyutlu jet grout çubuk eleman kolonlarının sonlu eleman ağına dahil edilmesi

Şekil 4.20.'de modelin sonlu eleman ağı, su seviyesi, yer çekimi ivmesi ve sınır koşulları ile birlikte gösterilmektedir.



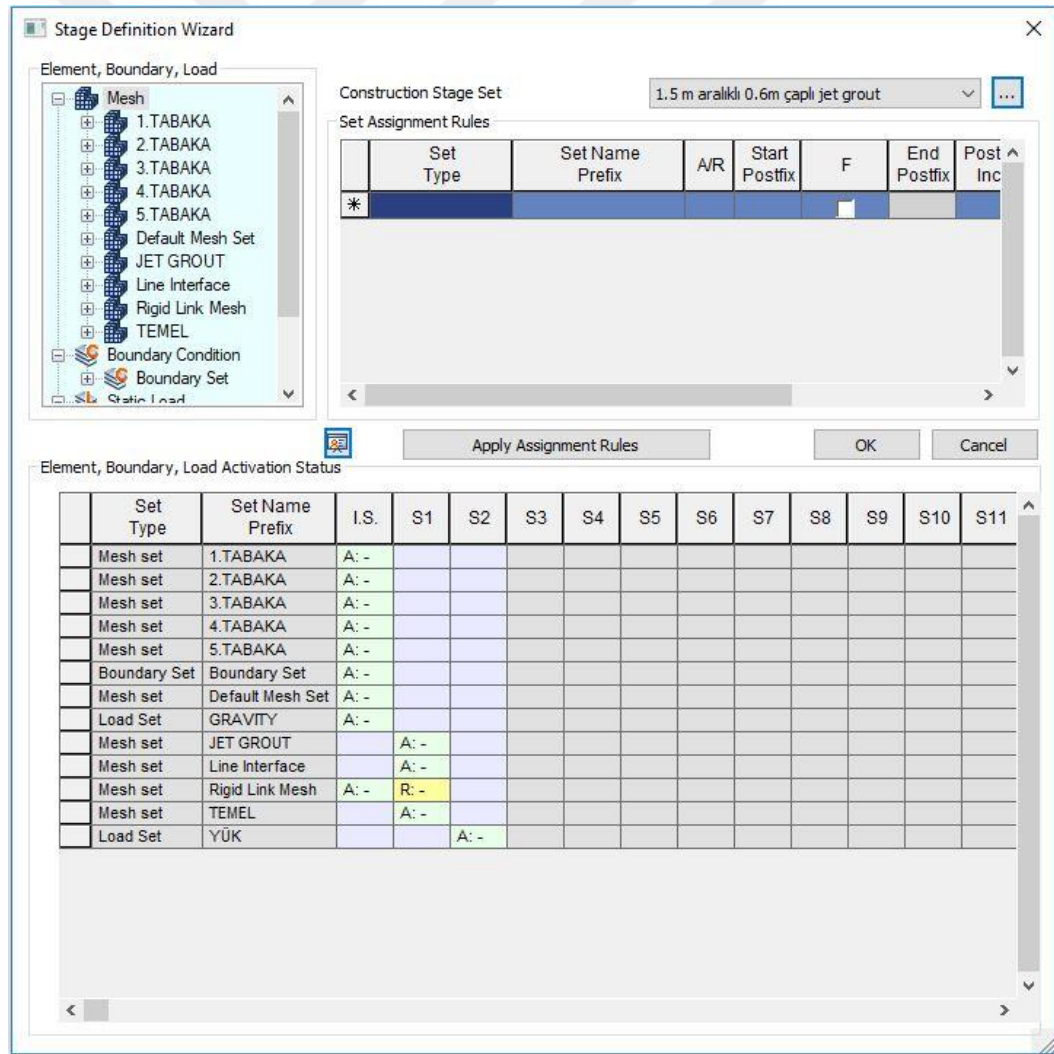
Şekil 4.20. Bir boyutlu jet grout çubuk elemanlarına sahip 2D modelin sonlu eleman ağı

“Interface Wizard” tarafından oluşturulan arayüzey elemanlarına (interface) ait özellikler malzeme listesine otomatik olarak eklenmekte olup Tablo 4.4.'de verilmiştir. K_t ve K_n değerleri, elastisite modülünün kayma yönündeki ve normal yöndeki bileşenleridir [36].

Tablo 4.4. 1D olarak modellenen jet grout kolonlarının 2D analiz türündeki interface malzeme özellikleri

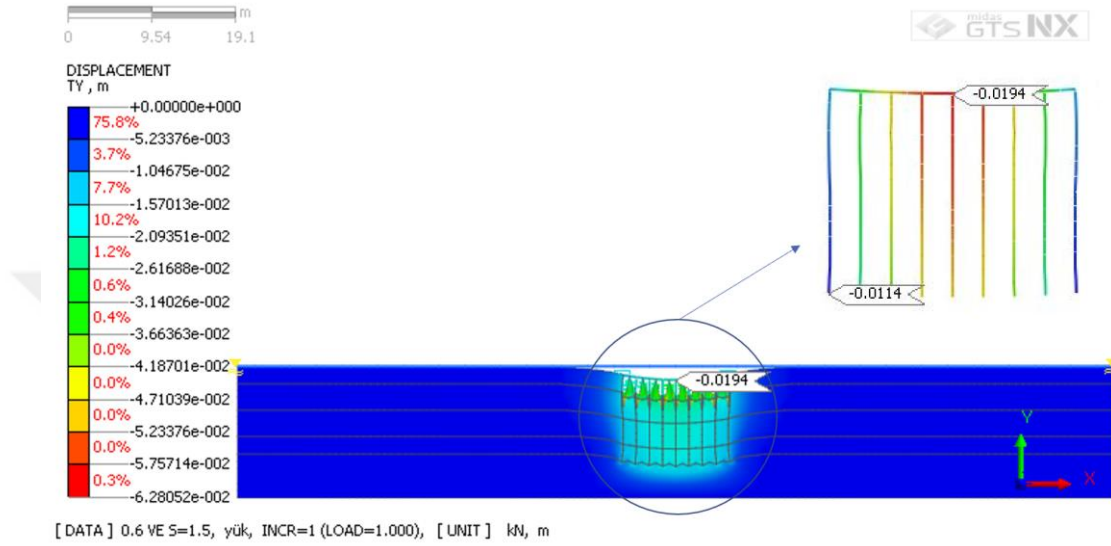
Zemin Türü	K_n (kN/m ³)	K_t (kN/m ³)	Kohezyon c (kPa)	Kayma Direnci Açısı, ϕ (°)	Dilatasyon Açısı, χ (°)
Zemin Tabakası -1	139568	12688	11,25	15,3	0
Zemin Tabakası -2	186090	16917	3,75	15,3	0
Zemin Tabakası -3	248120	22556	15	15,3	0
Zemin Tabakası -4	775376	70489	2,25	21,7	0

Jet grout kolonlarının bir boyutlu çubuk eleman olarak modellenmesi yönteminde, $s=1,5$ m ve 0,6 m çap için çözümde modelin yapım aşamaları Stage Wizard (Aşama Sihirbazı) komutundan Şekil 4.21.'de gösterilmiştir. Diğer bir boyutlu çubuk eleman esasına dayanan analizlerde de yapım aşamaları aynı şekildedir.



Şekil 4.21. Bir boyutlu jet grout çubuk elemanlara sahip 2D modelin yapım aşamaları çizelgesi

Şekil 4.22.'de $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m için yapılan analiz sonrası en yüksek düşey deformasyonun yaklaşık -19,4 mm değerinde oturma olarak gerçekleştiği gösterilmiştir. Bu durum, jet groutların zemin iyileştirmesinde olumlu etki yaparak doğal durumda oluşan oturma değerinin azalmasını sağladığının göstergesidir.



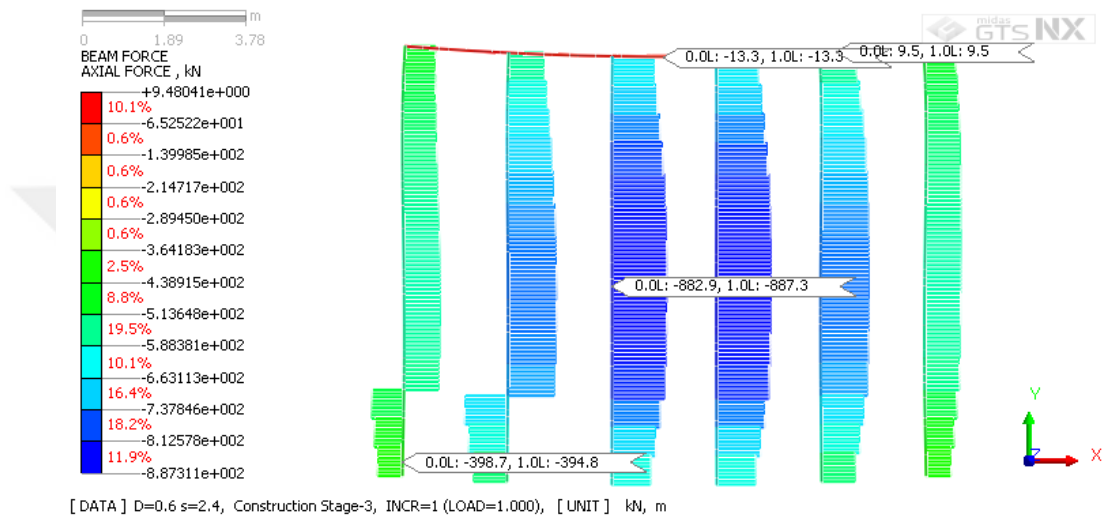
Şekil 4.22. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m analizi için temelin TY yerdeğiştirmesi [m]

2D zemin modelinde farklı aralıklara ve çaplara sahip 1D jet groutlu iyileştirme analizlerinde oluşan en yüksek düşey deformasyonlar Tablo 4.5.'de verilmiştir.

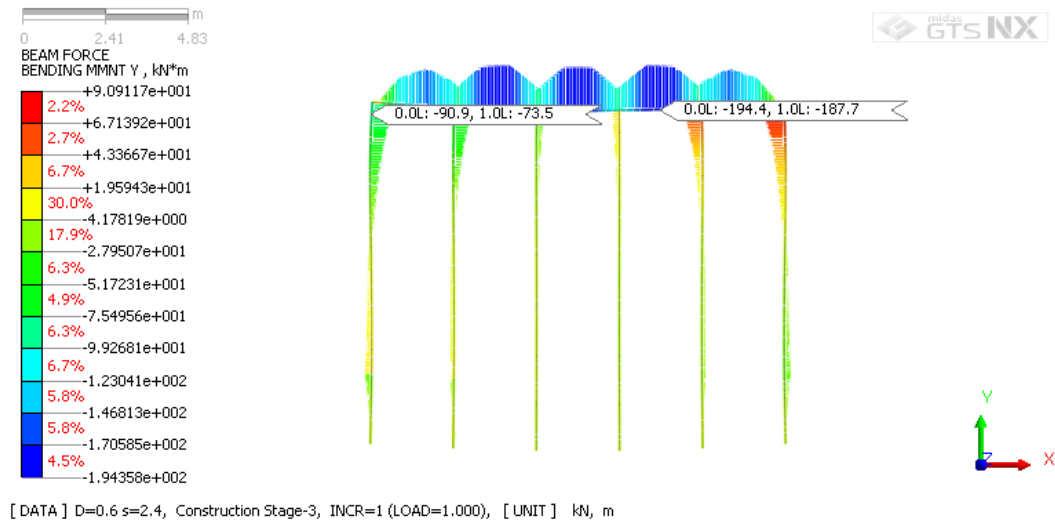
Tablo 4.5. 2D zemin modelinde farklı aralıklara ve çaplara sahip 1D jet groutlu iyileştirme analizlerinde temelin maksimum TY yerdeğiştirmesi [mm]

Kolon Aralığı, s [m]	D=0,6 m	D=0,8 m
İyileştirme Öncesi = -194 mm		
1,20	-19,72	-21,84
1,33	-19,50	-21,03
1,50	-19,43	-20,39
1,70	-19,69	-20,10
2,00	-20,76	-20,63
2,40	-22,15	-21,36

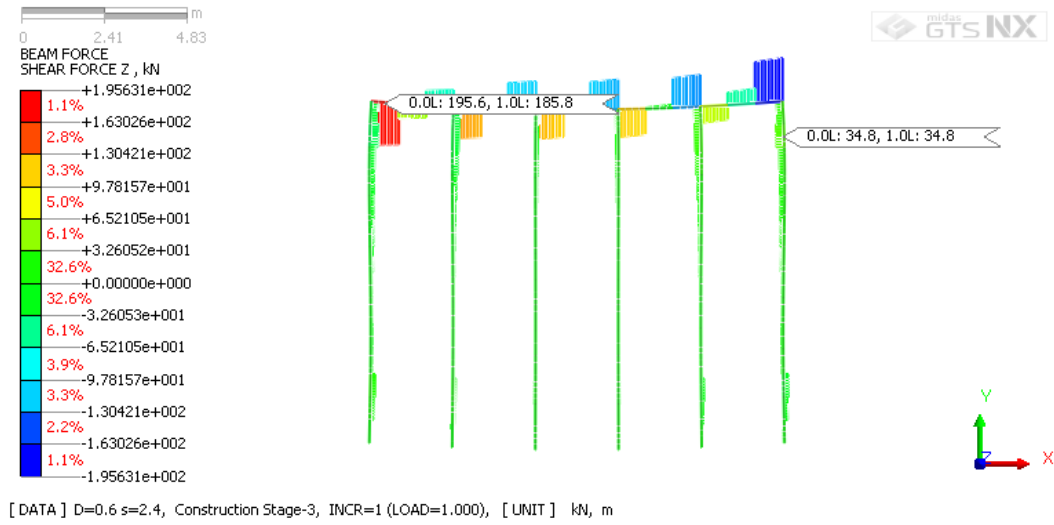
Diğer bir model olan $s=2,4$ m ve $D=0,6$ m için yapılan analiz sonucu düz radye temele ve jet grout kolonlarına gelen eksenel kuvvetler, Y yönündeki eğilme momentleri (Z yönünde moment sıfır), Z yönündeki kayma gerilmeleri (Y yönünde kayma gerilmesi sıfır) ve yükleme sonrası modelde oluşan yenilme noktaları durumu sırasıyla Şekil 4.23. – 4.26.’da gösterilmiştir. Tüm modellerin sonuçları son bölümde Tablo 5.1.’de sunulmuştur.



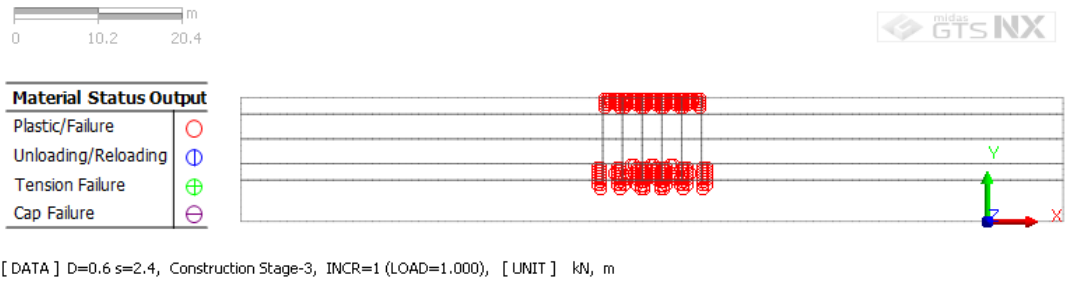
Şekil 4.23. $s=2,4$ m ve $D=0,6$ m için temel ve jet grout kolonlarına gelen en yüksek ve en düşük eksenel kuvvetler



Şekil 4.24. $s=2,4$ m ve $D=0,6$ m için temel ve jet grout kolonlarının Y yönündeki en yüksek eğilme momentleri



Şekil 4.25. $s=2,4$ m ve $D=0,6$ m için temel ve jet grout kolonlarının Z yönündeki en yüksek kayma gerilmeleri

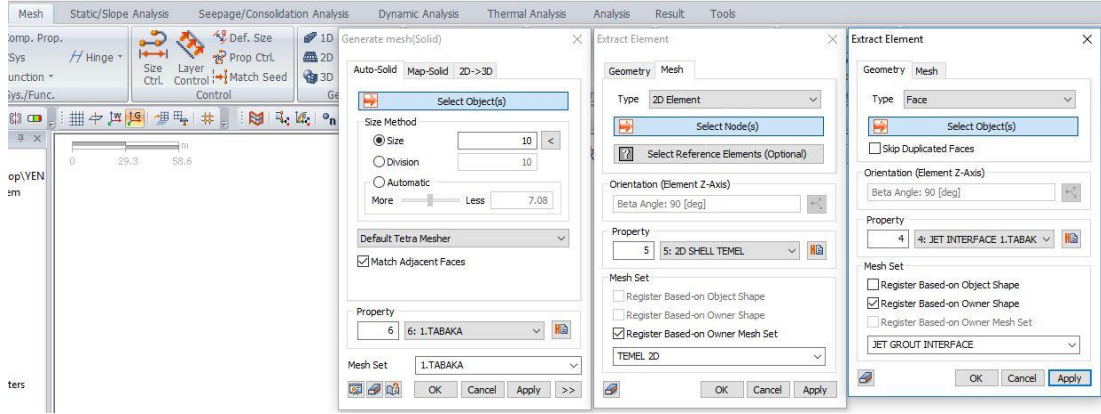


Şekil 4.26. $s=2,4$ m ve $D=0,6$ m jet grout ile zemin iyileştirme analizi sonrası durum

4.4. Midas GTS'de Üç Boyutlu (3D) Olarak Zemin Davranışı Analizi

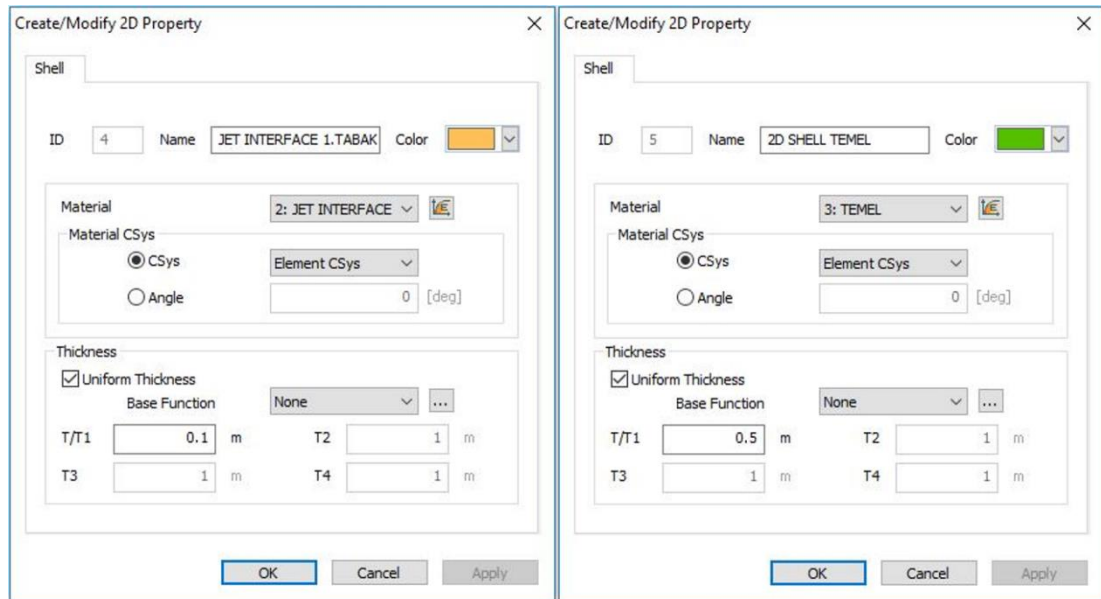
4.4.1. İyileştirme öncesi (doğal durum) analizi

Kurulan modelde 2D plan geometrisi çizildikten sonra üçüncü boyut yönünde uzatılıp solid (katı hacim) elemana dönüştürülerek üç boyutlu model hazırlanmıştır. 3D modelin sonlu eleman ağının oluşturulması yöntemi Şekil 4.27.'de verilmiştir. İyileştirme öncesi ve sonrası aynı model üzerinde analiz yapıldığından jet grout interface elemanını oluşturma yöntemi de aynı görselde verilmiştir.

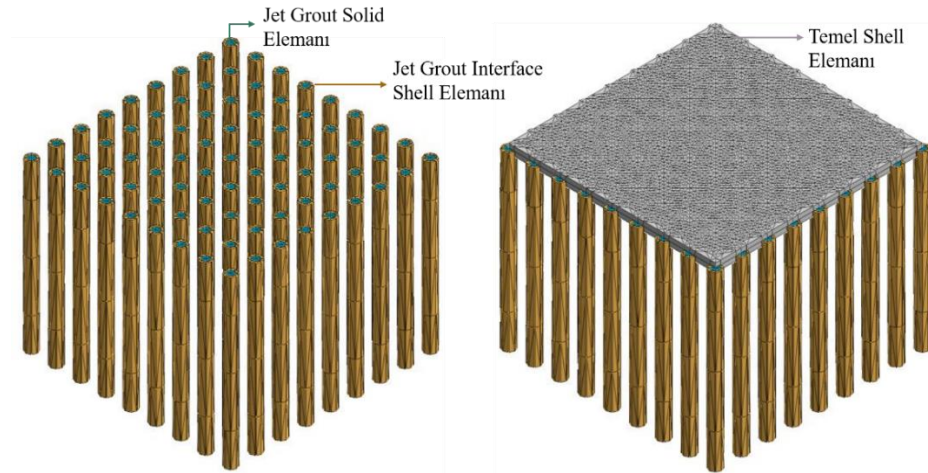


Şekil 4.27. 3D modelde sonlu eleman ağıının oluşturulması

Solid elemanların eleman boyutu en fazla 10 m olacak şekilde ayarlanmıştır. Bunun yanında sonlu eleman ağındaki elemanlar gerilme yoğunlaşmasının olduğu temel altında daha küçük, temelden uzaklaştıkça daha büyük olacak şekilde oluşturulmuştur. Temel, 2D shell (kabuk) eleman olarak, 3D jet grout kolonlarının interface elemanı ise aynı dış yüzeye sahip 0,1 m kalınlığında yine shell eleman olarak tanımlanmıştır. Tanımlama için, istenen elemandan ortak düğüm noktalı 1D veya 2D bir eleman çıkartma işlemi olan ‘Extract Element’ komutu kullanılmıştır. 0,5 m kalınlığındaki temelin ve jet grout interface elemanının şekil özellikleri Şekil 4.28.’de verilmiştir. Şekil 4.29.’da oluşturulan elemanların görseli sunulmuştur.

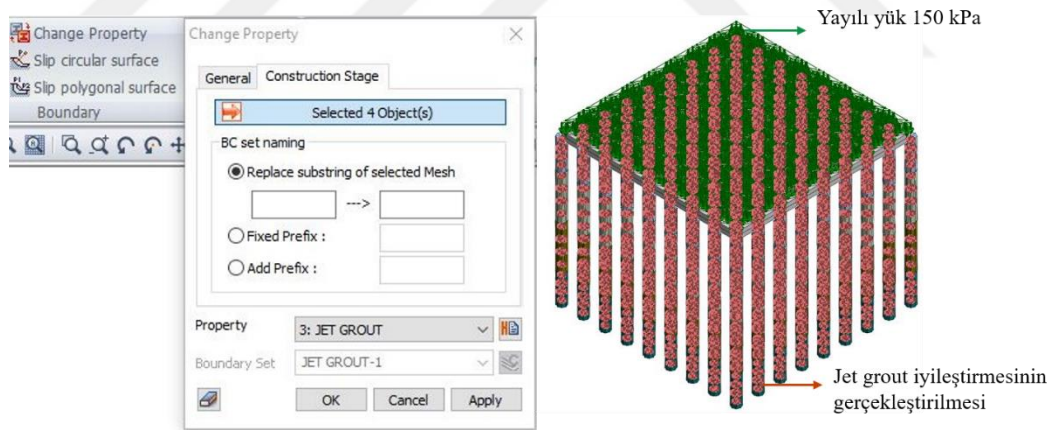


Şekil 4.28. 3D model analizinde 2D temel ve jet grout interface elemanının şekil özellikleri



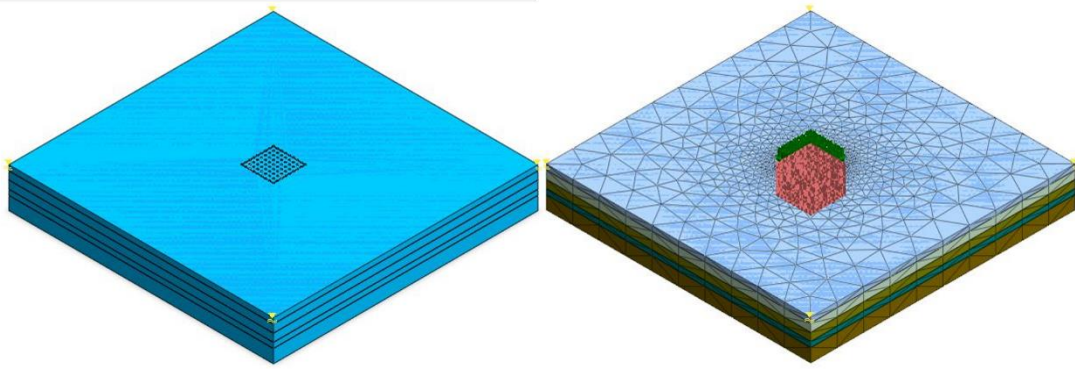
Şekil 4.29. 3D model analizinde temel ve interface (arayüzey) elemanlı jet groutlar

Jet grout kolonlarını temsil eden solid elemanları başlangıçta zemin elemanı olup, bu elemanlar ‘Change Property / Construction Stage (Nitelik Değişirme / Yapım Aşamasında)’ komutundan seçilip jet grout malzemesine dönüştürülerek iyileştirme işlemi Şekil 4.30.’da gösterildiği gibi tanımlanmıştır.



Şekil 4.30. 3D modelde jet grout iyileştirmesinin gerçekleştirilmesi

Analizi yapılacak 3D modelin son hali ise Şekil 4.31.’de verilmiştir. İyileştirme öncesi doğal durum için 3D model analizinde inşa aşamalarını gösteren çizelge Şekil 4.32.’de sunulmuştur. Verilen çizelgedeki “Mesh Set” etiketli jet grout elemanları, hacmin henüz zemin elemanı olarak bulunması durumunu; “Boundary Set” etiketi altındaki jet grout elemanları ise iyileştirme işleminin gerçekleşmesi durumunu göstermektedir.



Şekil 4.31. Analizi yapılan 3D modelin son hali

Stage Definition Wizard

Element, Boundary, Load

Mesh

- 1.TABAKA
- 1.TABAKANIN ORT
- 2.TABAKA
- 2.TABAKANIN ORT
- 3.TABAKA
- 3.TABAKANIN ORT
- 4.TABAKA
- 4.TABAKANIN ORT
- 5.TABAKA
- 5.TABAKANIN ORT
- Default Mesh Set
- INTERFACE-

Construction Stage Set

Set Assignment Rules

Set Type	Set Name Prefix	A/R	Start Postfix
*			

Apply Assignment Rules

OK

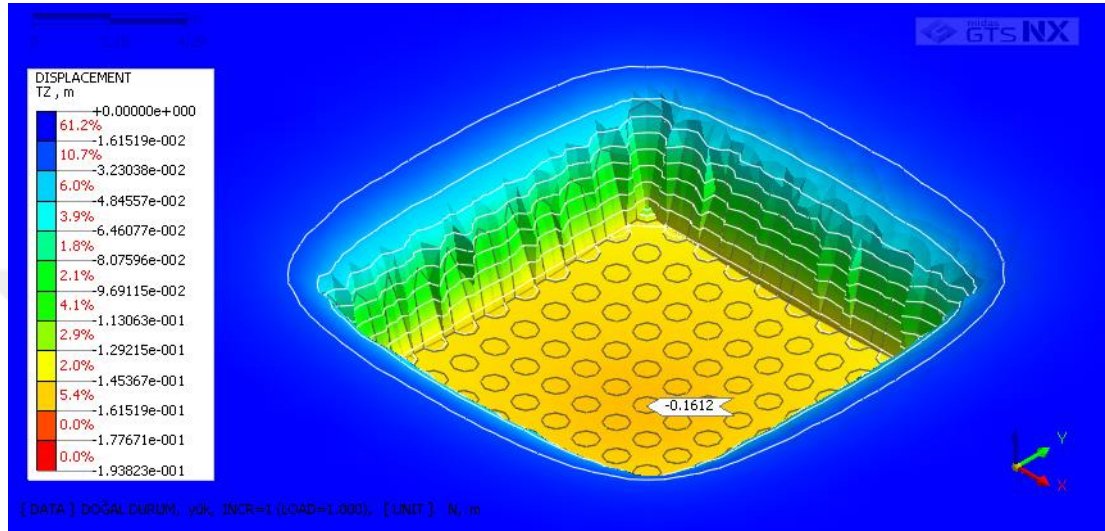
Cancel

Element, Boundary, Load Activation Status

Set Type	Set Name Prefix	I.S.	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Mesh set	1.TABAKA	A: -									
Mesh set	1.TABAKANIN ORTASI	A: -									
Mesh set	2.TABAKA	A: -									
Mesh set	2.TABAKANIN ORTASI	A: -									
Mesh set	3.TABAKA	A: -									
Mesh set	3.TABAKANIN ORTASI	A: -									
Mesh set	4.TABAKA	A: -									
Mesh set	4.TABAKANIN ORTASI	A: -									
Mesh set	5.TABAKA	A: -									
Mesh set	5.TABAKANIN ORTASI	A: -									
Boundary Set	Boundary Set	A: -									
Mesh set	Default Mesh Set	A: -									
Load Set	GRAVITY	A: -									
Mesh set	INTERFACE-										
Boundary Set	JET GROUT 1.TABAKANIN İÇİNDEKİ										
Mesh set	JET GROUT 1.TABAKANIN İÇİNDEKİ	A: -									
Mesh set	JET GROUT 2.TABAKANIN İÇİNDEKİ	A: -									
Boundary Set	JET GROUT 2.TABAKANIN İÇİNDEKİ										
Boundary Set	JET GROUT 3.TABAKANIN İÇİNDEKİ										
Mesh set	JET GROUT 3.TABAKANIN İÇİNDEKİ	A: -									
Boundary Set	JET GROUT 4.TABAKANIN İÇİNDEKİ										
Mesh set	JET GROUT 4.TABAKANIN İÇİNDEKİ	A: -									
Mesh set	TEMEL 2D		A: -								
Load Set	YÜK			A: -							

Şekil 4.32. İyileştirme öncesi doğal durum için 3D model analizinde inşa aşamalarını gösteren çizelge

Üç boyutta yapılan iyileştirme öncesi yayılı yük altında doğal durum analizi sonrası maksimum yer değiştirme temel merkezinde yaklaşık 16 cm olarak Şekil 4.33.'te gösterildiği gibi gerçekleşmiştir. Analiz yapılan 2D ve 3D tüm modellerde deformasyon sonuç lejantları birbiriyle eşittir.



Şekil 4.33. 3D modelde iyileştirme öncesi analizde yayılı yük altında oluşan temel TZ düşey deformasyonu [m]

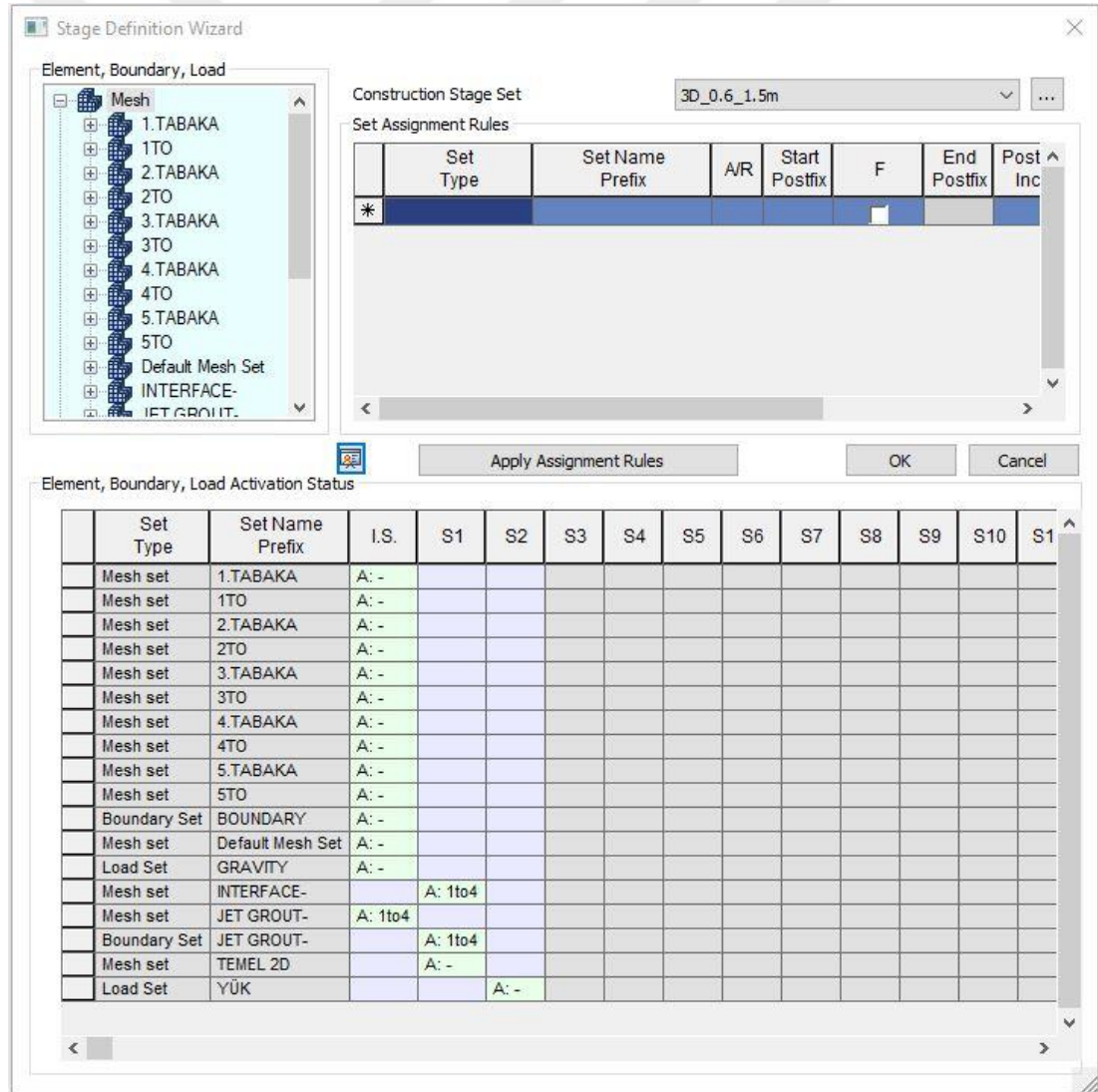
4.4.2. Jet grout zemin iyileştirmesi yapılması durumunda analiz

İki boyutlu analizleri yapılan farklı kolon aralıklarına ve farklı çaplara sahip jet grout tasarımlarının üç boyutlu analizleri yayılı yük altında tekrardan incelenmiştir. Bu modellerde jet grout kolonları 3D eleman olarak modellenmiştir. İki boyutlu analizde jet grout interface elemanı, Interface Wizard (Interface Arayüz Sihirbazı) tarafından otomatik oluşturulmuşken, üç boyutlu analizde manuel olarak oluşturulmuştur. 3D analizlerde jet grout interface shell elemanı malzemesi, her tabaka için ayrı ayrı ve mevcut zemin tabakasının elastisite modülü değerinin $2/3$ 'ü oranında bir rijitliğe sahip olacak şekilde oluşturulmuş olup değerleri Tablo 4.6.'da verilmiştir.

Tablo 4.6. 3D modellerde kullanılan jet grout kolonlarına ait interface elemanın tasarım özellikleri

Jet Grout Interface Elemanı	Elastisite Modülü E (kPa)	Model Türü
1. tabakada	3000	Malzeme : Elastik Drenajlı Property : 2D Shell Eleman 0,1 m Kalınlığında
2. tabakada	4000	
3. tabakada	5300	
4. tabakada	16700	

İyileştirme analizi ve doğal durum analizi aynı model üzerinde yapıldığı için, jet grout iyileştirmeli modelin inşa aşaması çizelgesi ayrı olarak Şekil 4.34.'de verildiği gibi oluşturulup analizi yapılmıştır.

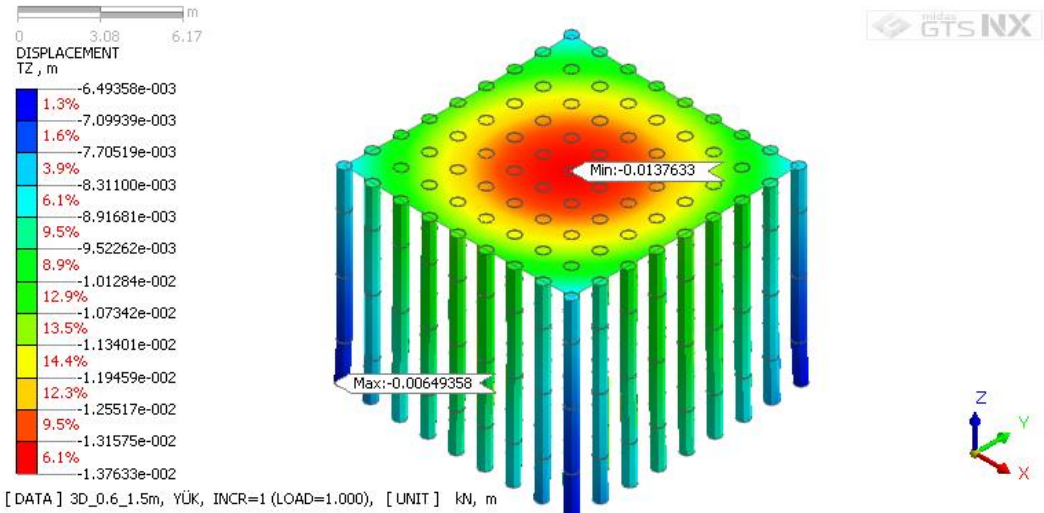


Şekil 4.34. 3D modelde jet grout iyileştirmeli analiz için yapım aşamaları çizelgesi

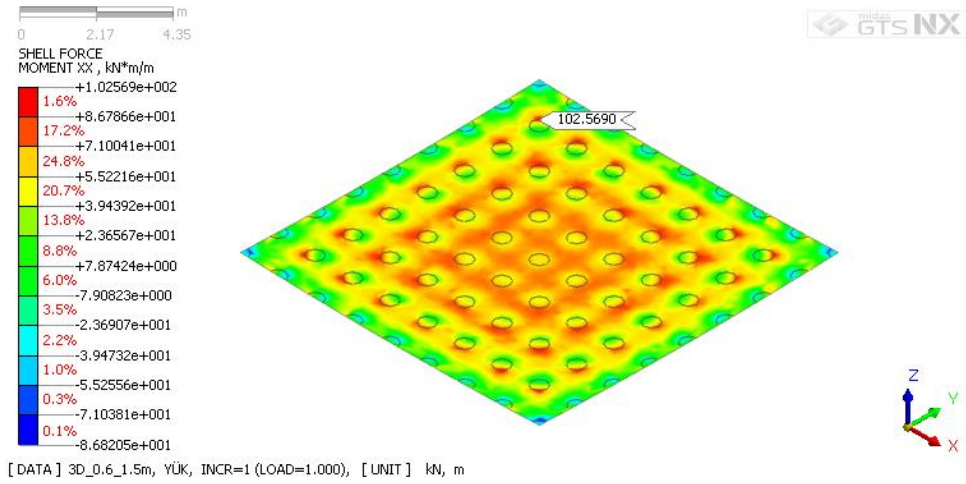
$s=1,5$ m, $D=0,6$ m jet groutlara sahip 3D modelin yayılı yük altındaki analiz sonuçları sırasıyla temelin, TZ düşey deformasyon, XX, YY ve XY yönündeki eğilme momentleri, XZ ve YZ yönündeki kayma gerilmeleri ve yükleme sonrası modelde oluşan durum olmak üzere Şekil 4.35. – 4.41.'de gösterilmiştir. Tablo 4.7.'de modellemelerde oluşan maksimum düşey (TZ) deformasyonlar verilmiştir.

Tablo 4.7. 3D modelde farklı dizilişlere ve çaplara sahip jet grout zemin iyileştirmesi sonrası yayılı yük altında temelin maksimum TZ yerdeğiştirmesi [mm]

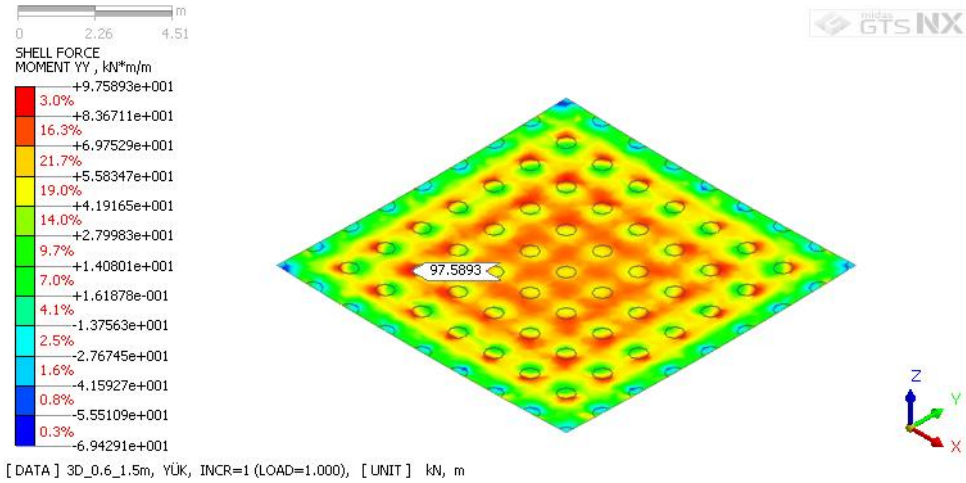
s, Kolon Aralığı [m]	D=0,6 m	D=0,8 m
1,20	-12,8	-12,0
1,33	-132	-12,1
1,50	-13,8	-12,4
1,70	-14,7	-12,9
2,00	-16,2	-13,8
2,40	-18,9	-15,6



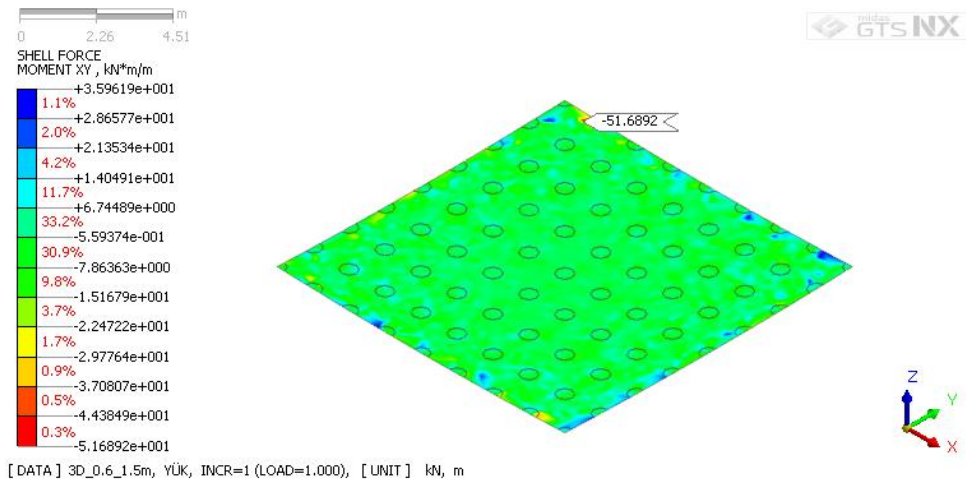
Şekil 4.35. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout iyileştirmeli modelde temelin ve jet groutların TZ yerdeğiştirmesi [m]



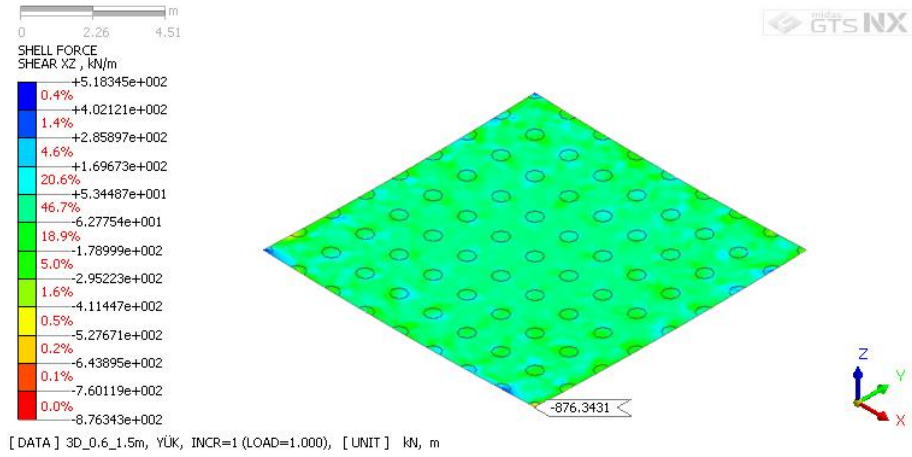
Şekil 4.36. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout iyileştirmeli modelde temelin XX yönünde eğilme momenti [kNm/m]



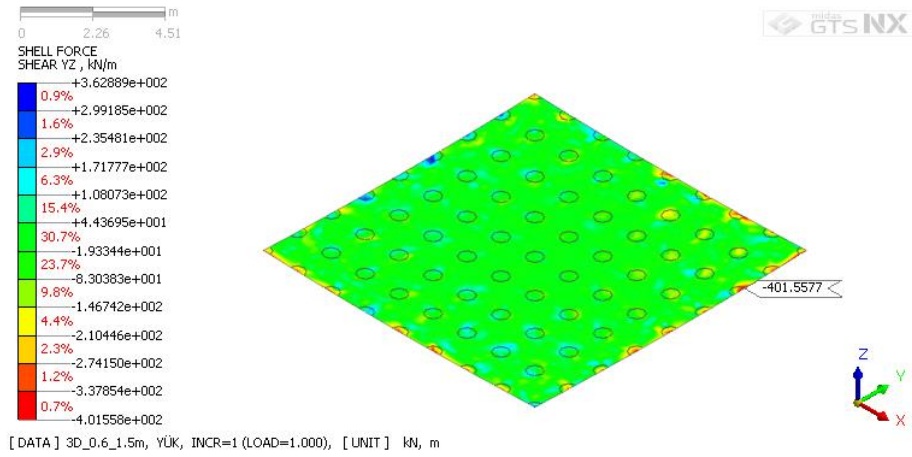
Şekil 4.37. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout iyileştirmeli modelde temelin YY yönünde eğilme momenti [kNm/m]



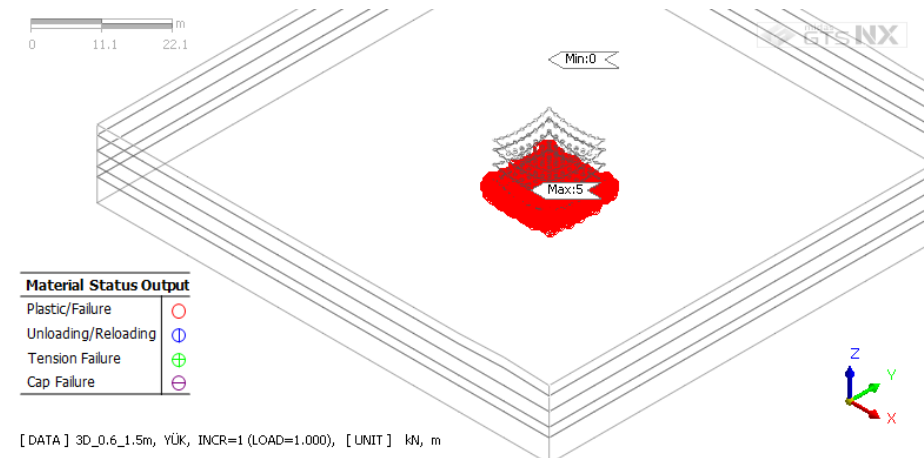
Şekil 4.38. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout iyileştirmeli modelde temelin XY yönünde eğilme momenti [kNm/m]



Şekil 4.39. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout kolonlarının XZ yönünde kayma gerilmeleri

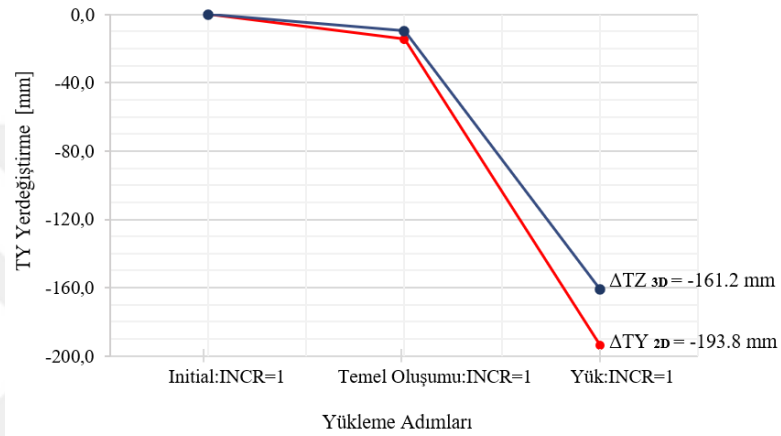


Şekil 4.40. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout kolonlarının YZ yönünde kayma gerilmeleri

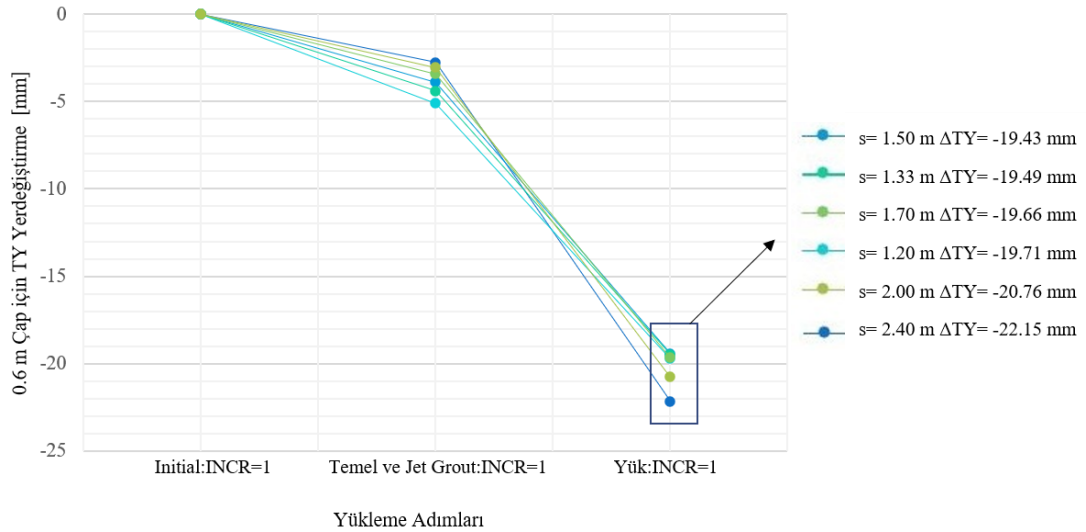


Şekil 4.41. $s=1,5$ m ve $D=0,6$ m jet grout zemin iyileştirmesi analizi sonrası durum

Yapılan tüm analizlerin model özellikleri ve sonuçları ayrıntılı şekilde Tablo 4.8.'de verilmiştir ve değerlerin daha iyi anlaşılması için maksimum düşey deformasyon ve moment değerleri grafikler halinde sunulmuştur. Şekil 4.42.'de iyileştirme öncesi, Şekil 4.43.'te 0,6 m çaplı, Şekil 4.44.'de ise 0,8 m çaplı jet grout kolonlarının farklı aralıklarla oluşturulması durumları sonrasında hesaplanan düşey deplasmanlar gösterilmektedir.



Şekil 4.42. 2D ve 3D zemin modellerinde iyileştirme öncesi doğal durum analizlerinde yükleme adımı - düşey deformasyon ilişkisi



Şekil 4.43. 2D zemin modellerinde farklı aralıklara sahip D=0,6 m olan 1D jet grout iyileştirmesi analizlerinde yükleme adımı - düşey deformasyon ilişkisi

Tablo 4.8. Midas GTS’de oluşturulan tüm modellere ait analiz sonuçları

Tek Sırada Kolon Adedi	MODELLEME	S(m)	D(m)	Düşey Deformasyon (mm)			Eksenel Kuvvetler (kN)				Maksimum Kesme Kuvvetleri Z Yönünde (kN)		Maksimum Eğilme Momentleri Y Yönünde (kN.m)		Statü
				Temel Min	Temel Max.	Temel Fraklı Oturma (mm)	Temel Min.	Temel Max.	Jet Grout Min.	Jet Grout Max.	Temel	Jet Grout	Temel	Jet Grout	
	DOĞAL	2D Analiz		193,07	193,80	0,73	1,84	33,06	—	—	18,63	—	15,7	—	P
11	1D TEMEL 1D JET GROUT 2D ZEMİN MODELİ	1,20	0,6	13,62	19,71	6,09	13,15	20,86	88,8	264,7	153,3	17,1	123,4	55,2	P
10		1,33	0,6	13,12	19,49	6,37	8,8	18,5	107,1	316,8	149	17,9	130,2	56,5	P
9		1,50	0,6	12,69	19,43	6,74	3,6	24,8	134,8	389,1	145,5	18,4	141,4	57,0	P
8		1,70	0,6	12,40	19,66	7,26	17,5	31,1	173,7	494,3	142,6	19,7	158,3	56,0	P
7		2,00	0,6	13,00	20,76	7,76	4,01	23,09	317,8	644	185,4	28	164,9	82,7	P
6		2,40	0,6	13,30	22,15	8,85	9,48	13,28	394,75	887,31	195,6	34,8	194,4	90,9	P
11		1,20	0,8	16,70	21,84	5,14	3,2	47,4	92,3	308,7	187,9	27,8	107,5	103,6	P
10		1,33	0,8	15,60	21,03	5,43	9,8	32,8	102,8	344,6	179,3	29,3	115,0	109	P
9		1,50	0,8	14,72	20,40	5,68	17,4	17,9	130	414,5	170,7	31,7	121,2	113,6	P
8		1,70	0,8	13,93	20,10	6,17	1	25,2	167,8	518,4	163,7	34	139,5	117,7	P
7		2,00	0,8	13,96	20,63	6,67	4,4	41,7	367,1	662,5	204,3	44,2	147,2	166,7	P
6		2,40	0,8	13,70	21,36	7,66	1,9	29,9	452,6	906,2	210,3	53,2	174,7	188,7	P

P, plastik nokta oluşumu

R, boşalma ve yeniden yükleme

Ç, çekme durumu oluşması

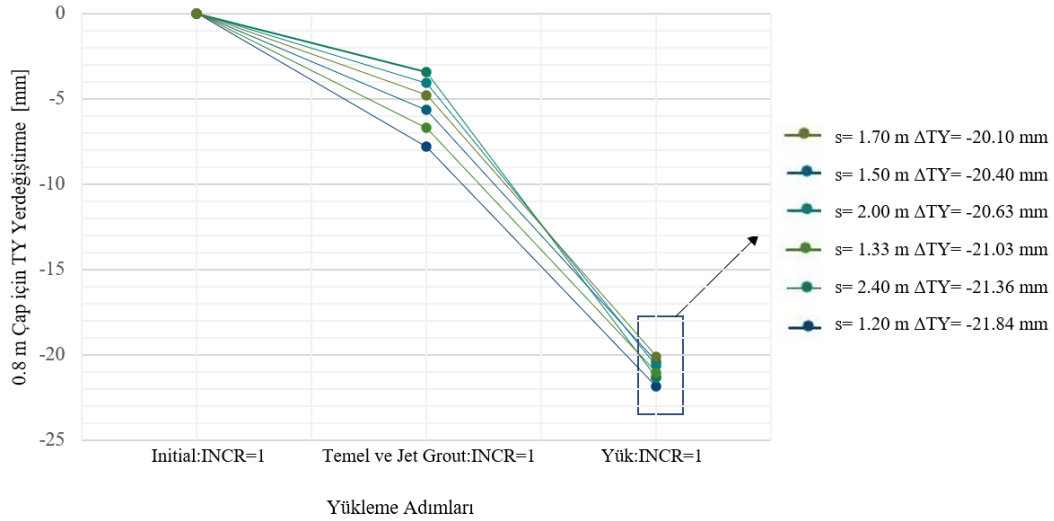
Tablo 4.8. (Devam)

Tek Sırada Kolon Adedi	MODELLEME	S(m)	D(m)	Düşey Deformasyon (mm)			Maksimum Eğilme Momentleri (kN.m)			Maksimum Kesme Kuvvetleri (kN)		Statü
				Temel Min	Temel Max.	Temel Fraklı Oturma (mm)	Temel XX Yönünde	Temel YY Yönünde	Temel XY Yönünde	Temel XZ Yönünde	Temel YZ Yönünde	
	DOĞAL	3D Analiz		141,6	161,2	19,7	234,8	235,2	93,65	157,83	132,2	Ç ve P
11	2D TEMEL 3D JET GROUT 3D ZEMİN MODELİ	1,20	0,6	8,5	12,8	4,3	79,7	75,3	45,4	513,8	425,6	P
10		1,33	0,6	8,3	13,2	4,9	85,6	85,5	35,6	517,7	751,0	P
9		1,50	0,6	8,1	13,8	5,7	102,6	97,6	51,7	876,3	401,6	P
8		1,70	0,6	8,0	14,8	6,8	121,8	135,3	59,1	589,0	1155,2	P
7		2,00	0,6	7,9	16,3	8,4	161,9	161,7	83,3	1400,0	619,6	P
6		2,40	0,6	8,0	18,9	10,9	188,7	197,1	85,9	1874,1	778,3	P
11		1,20	0,8	9,0	12,0	3,0	69,5	55,5	33,8	424,5	483,0	P
10		1,33	0,8	8,6	12,1	3,5	65,8	66,1	36,9	345,7	429,5	P
9		1,50	0,8	8,2	12,4	4,2	98,1	80,5	42,6	398,5	566,2	P
8		1,70	0,8	8,0	12,9	4,9	109,9	104,7	59,4	570,7	737,3	P
7		2,00	0,8	7,7	13,8	6,1	133,9	125,5	61,1	672,1	999,4	P
6		2,40	0,8	7,6	15,6	8,0	160,7	162,5	69,3	605,0	1351,6	P

P, plastik nokta oluşumu

R, boşalma ve yeniden yükleme

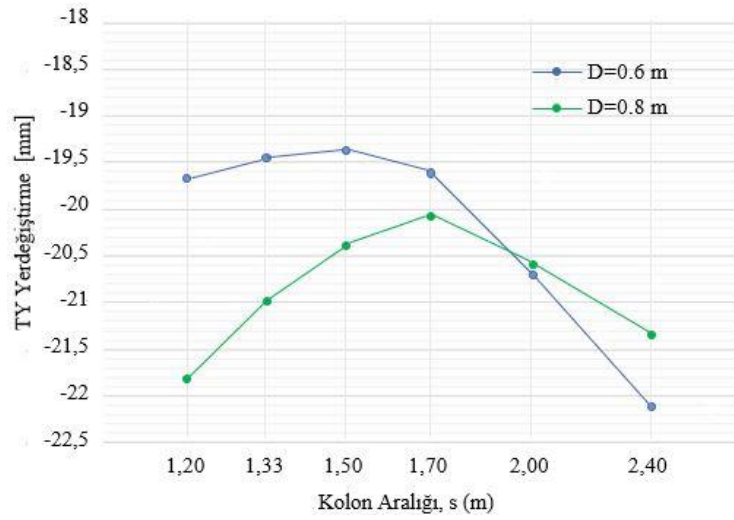
Ç, çekme durumu oluşması



Şekil 4.44. 2D zemin modellerinde farklı aralıklara sahip D=0,8 m olan 1D jet grout iyileştirmesi analizlerinde yükleme adımı - düşey deformasyon ilişkisi

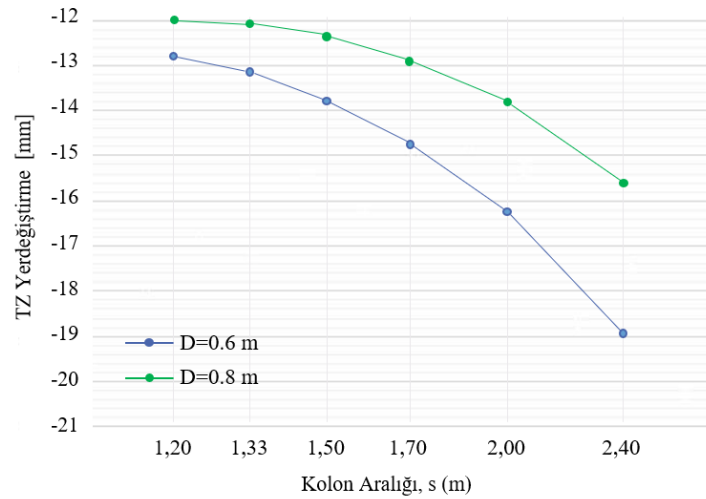
Tablo 4.8.'de verildiği üzere, 0,5 m'lik düz radye temelde farklı oturma değerleri yapılan tüm iyileştirme analizlerinde 3 mm ile 11 mm aralığında kabul edilebilir sınırlardadır. Jet grout kolon aralığı azaldıkça temel eğilme momentleri azalmaktadır. Bunun sebebi kolon aralığı azaldığında jet grout sayısının artması ve bu durumun temelin hareketini sınırlamasıdır. Yapılan analizlerde, iyileştirme öncesi zeminde oluşan yaklaşık 20 cm'lik oturma değeri, farklı aralık ve çaplara sahip jet grout zemin iyileştirmesi analizleri sonrasında yaklaşık 2 cm değerine azalmıştır.

Şekil 4.45.'te 2D zemin içerisinde 1D olarak modellenen jet grout kolonları ile iyileştirmenin analizleri için kolon aralıklarına karşılık temelin TY yerdeğiştirmesi verilmiş, kolon aralığı değerindeki artmanın veya azalmanın zemin iyileşmesine etkisi gösterilmiştir. Tez kapsamındaki zemin şartlarında, kolon aralığı 2 m'ye kadar olan durumlarda 0,6 m çapa sahip jet groutlar 0,8 m çaplı jet groutlara göre iyileştirmede daha etkin iken, aralık 2 m'yi geçince 0,8 m çapa sahip kolonlar iyileştirmede daha etkindir.

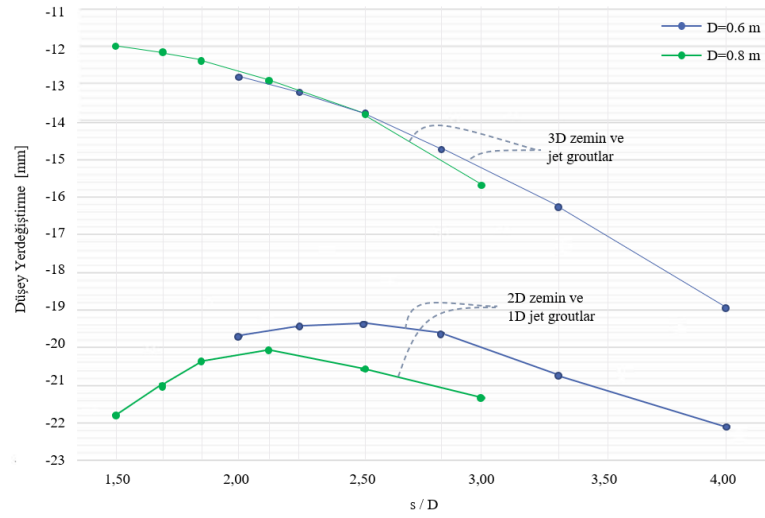


Şekil 4.45. 2D zemin modellerinde 1D jet grout iyileştirmesi için kolon aralığı - temelin TY yerdeğiştirme ilişkisi

Şekil 4.46.'da 3D zemin içerisinde 3D olarak modellenen jet grout kolonları ile iyileştirme analizleri için kolon aralıklarına karşılık temelin TZ yerdeğiştirmesi grafiği verilmiş olup burada kolon aralığı değerindeki artmanın zemin iyileşmesine olumsuz etkisi görülmektedir.



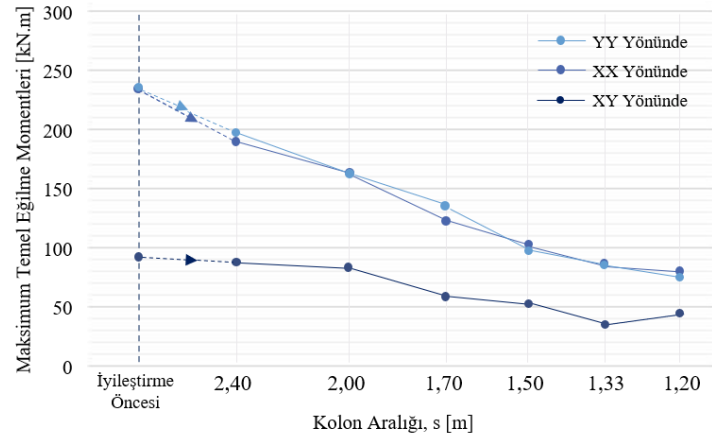
Şekil 4.46. 3D zemin modellerinde 3D jet grout iyileştirmesi için kolon aralığı - temelin TZ yerdeğiştirme ilişkisi



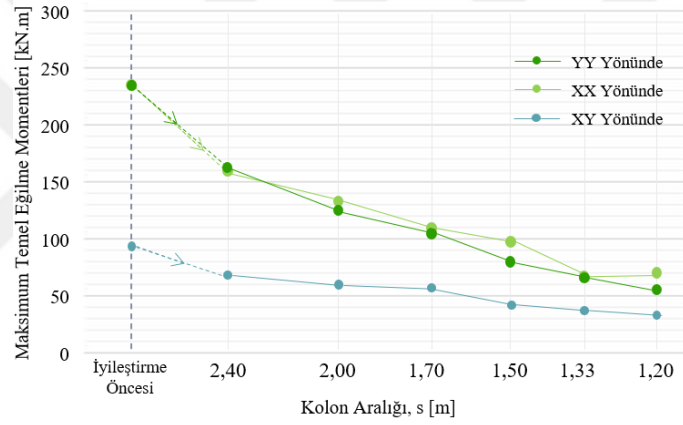
Şekil 4.47. Tüm zemin iyileştirme analizleri için s/D - temelin düşey yerdeğiştirme ilişkisi

Şekil 4.47.'de ise kolon aralığı / çap oranına (s / D) karşılık temelin düşey yerdeğiştirmesi sunulmuştur. 2D analizlerde, mevcut zemin koşullarına göre, 0,6 m çapa sahip jet groutlarda kolon aralığı $2,5D$ değerinde iken en yüksek iyileşme, bu değer aşıldığında ise iyileştirme miktarında azalma oluşmuştur. 0,8 m çapa sahip jet grout iyileştirmesinde ise kolon aralığı $2,2D$ değerinde iken en yüksek iyileşme gerçekleşmiş, bu değeri aşıldığında ise iyileştirme miktarında azalma oluşmuştur. Ayrıca 3D zemin içerisinde 3D kolon modellemesinde temelin düşey deformasyon eğrilerinde, 2D zemin içerisinde 1D kolon modellemesindeki temelin düşey deformasyon eğrilerindeki gibi zirve nokta oluşmadığı aynı grafikte gösterilmiştir. Bu nedenle 2D analiz eğrilerindeki gibi optimum kolon aralığı belirlenememiş fakat s/D oranı arttıkça deformasyon miktarının arttığı izlenmiştir.

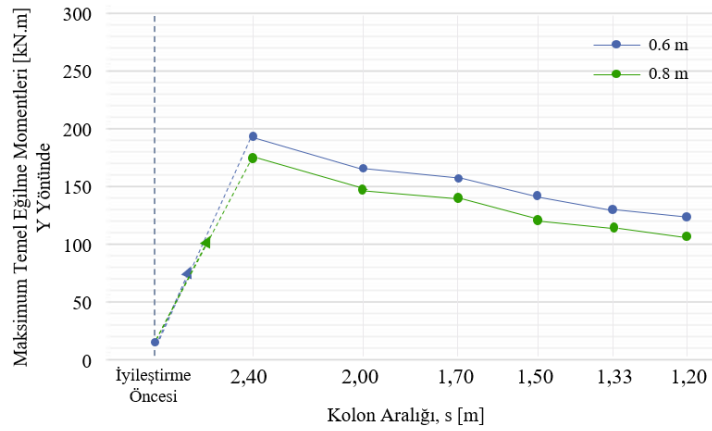
Şekil 4.48. ve 4.49.'da verilen 3D analiz sonuçlarından görülebileceği gibi her iki çap değeri için jet grout kolonları aralığının azalması temelde oluşan eğilme momenti değerlerini düşürmüştür. Aynı husus 2D analizler için Şekil 4.50. ve 4.51.'de sunulmuştur.



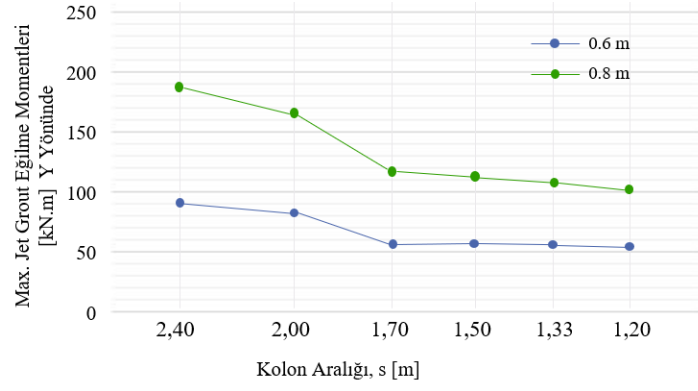
Şekil 4.48. 3D analizlerde iyileştirme öncesi ve sonrası temelde oluşan maksimum momentler (D=0,6 m)



Şekil 4.49. 3D analizlerde iyileştirme öncesi ve sonrası temelde oluşan maksimum momentler (D=0,8 m)



Şekil 4.50. 2D analizlerde iyileştirme öncesi ve sonrası temelde oluşan maksimum momentler



Şekil 4.51. 2D analizlerde jet groutlarda oluşan maksimum momentler grafiği

BÖLÜM 5. SONUÇ

Tez kapsamında Midas GTS NX yazılımında yüksek modüllü kolonlarla zemin iyileştirmesi yönteminin iki boyutta ve üç boyutta analizleri yapılmıştır. Çalışmada 2D’de oluşturulan zemin içinde tanımlanan 1D jet grout kolonlarının ve 3D’de oluşturulan zemin içinde tanımlanan 3D jet grout kolonlarının modellemeleri yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Modellerde kullanılan zemin kesiti 5 farklı kumlu zemin tabakası ve sonrasında sağlam ana kayadan oluşmaktadır. 12 m x 12 m x 0,5 m boyutlarındaki yayılı temele 150 kPa gerilme gelmektedir. Yer altı su seviyesi yüzeydedir ve inşa aşamaları için sadece statik analiz yapılmıştır. Temel, iki boyutlu zemin modellerinde 1D beam (çubuk eleman) olarak, üç boyutlu zemin modellerinde 2D shell (kabuk) eleman olarak tasarlanmıştır.

İki boyutlu analizlerde jet grout kolonları ile zeminin etkileşimde olduğu arayüz için interface elemanı otomatik olarak yazılım tarafından oluşturulurken, üç boyutlu jet grout modellerinin interface elemanları manuel olarak oluşturulmuştur. Manuel olarak oluşturulan bu elemanlar her tabaka için ayrı ayrı 0,1 m kalınlığında tanımlanan shell elemanlardır. Bunlarda malzeme elastik malzeme seçilip, rijitlikleri mevcut zemin tabakasının elastisite modülünün $\frac{2}{3}$ ’ü değerinde olacak şekilde belirlenmiştir.

Tez kapsamındaki zemin şartlarında yapılan tüm analizlerin sonuçları beraber değerlendirildiğinde şu sonuçlar ortaya çıkmıştır:

- a. İyileştirme öncesi zeminde hesaplanan yaklaşık 20 cm'lik oturma değeri, farklı aralık ve çaplara sahip jet grout kolonlarla zemin iyileştirmesi yapılması durumu için yapılan analizlerde yaklaşık 2 cm değerine düşmüştür.
- b. Düşey deplasmanlar incelendiğinde, 0,5 m kalınlığındaki plak radye temelde farklı oturma değerlerinin yapılan tüm iyileştirme analizlerinde 3 mm ile 11 mm aralığında kabul edilebilir sınırlarda olduğu görülmektedir.
- c. Jet grout kolon aralığı azaldıkça temel eğilme momentleri azalmaktadır. Bunun sebebi kolon aralığı azaldığında jet grout sayısının artması ve bu durumun temelin hareketini sınırlamasıdır.
- d. 2D zemin modelinde, jet groutların 1D çubuk elemanlarla oluşturulduğu analizlerde; kolon aralığı 2 m'ye kadar olan durumlarda 0,6 m çapa sahip yüksek modüllü kolonlar, aralık 2 m'yi geçince 0,8 m çapa sahip kolonlar iyileştirmede daha etkindir.
- e. 3D zemin içerisinde 3D olarak modellenen jet grout iyileştirmesi analizlerinde kolon aralığı değerlerindeki artma, zeminin iyileştirilmesinde olumsuz etki oluşturmuştur.
- f. 2D analizlerde, $D=0,6$ m iken kolon aralığı $s=2,5D$ değerinde; $D=0,8$ m iken kolon aralığı $s=2,2D$ değerinde en yüksek iyileşme elde edilmiş, bu değerler aşıldığında ise iyileştirme miktarında azalma oluşmuştur.
- g. 3D zemin içerisinde 3D kolon modellemesinde temelin düşey deformasyon eğrilerinde zirve nokta oluşmadığı için 2D analiz eğrilerindeki gibi optimum kolon aralığı belirlenememiş fakat s/D oranı arttıkça deformasyon miktarının arttığı izlenmiştir.

Bu tez çalışmasında Adapazarı'ndan alınmış gerçek değerler ile oluşturulmuş bir zemin kesitinde yüksek modüllü kolonlar ile zemin iyileştirmesi Midas GTS yazılımı ile 2 ve 3 boyutlu olarak modellenmiş ve yöntemin taşıma gücünü artırıcı ve oturmaları azaltıcı etkisi ortaya konularak teyit edilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Önalp, A., Sert, S. (2016). Geoteknik Bilgisi 3 Bina Temelleri, Genişletilmiş baskı, İstanbul, Birsan Yayınevi.
- [2] Yılmaz, M. Tolga (2019), TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı Açısından Radye Temellerin Geotekniği Semineri, Ankara, http://www.imo.org.tr/http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/889ba837e6a7a89_ek.pdf?tipi=79&turu=X&sube=3, Erişim Tarihi: 20.01.2020.
- [3] Sert, S., Özocak, A., Bol, E. (2015). Mevcut Silo Temeli Altında Zemin İyileştirmesi, ISITES2015ID394.
- [4] Çetin, K. Ö., Bilge, H. T. (2019), TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Yeni Deprem Yönetmeliğinde Geoteknik Hususlar 2 – Semineri Sismik Zemin Sıvılaşması, Ankara, http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/8f3f1cebd079c05_ek.pdf?tipi=79&turu=X&sube=3, Erişim Tarihi: 20.01.2020.
- [5] Coduto, D. P., Temel Tasarımı: İlkeler ve Uygulamalar, Çevirenler: Murat Mollamahmutoğlu, Kamil Kayabalı (Foundation Design – Principles and Practices, 2001, D. P. Coduto, Prentice Hall, 883 s) Gazi Kitabevi, Ankara.
- [6] Bol, E., Sert, S., Özocak, A. (2017). Kazıklı İksa Sistemi ile Şev Duraylılığının Sağlanması (Ensuring Slope Stability with Piled Retaining System) - Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi - Vol.21 (5) - pp.860-870 - DOI : 10.16984/saufenbilder.304422.
- [7] Yahiro, T., Yoshida, H. (1973). Induction grouting method utilizing high speed water jet. In Proceedings of the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow.
- [8] Ekmen A.B. ve Algin H.M, Jet Grout Kolonlarla Desteklenmiş Radye Temellerin Tasarım Prensipleri, 1. Ulusal Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu, 12 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, (2016)
- [9] <http://www.railsystem.net/jet-grouting/> Erişim Tarihi: 20.01.2020.
- [10] Erol, A.O., Çekinmez Bayram, Z. (2018). Jet Enjeksiyon Yöntemi, Yüksel Proje Uluslararası A.Ş.
- [11] Wang, Zhifeng & Shen, Shui-Long & Ho, Chu-Eu & YH, Kim. (2013). Jet Grouting Practice: an Overview. Geotechnical Engineering. 44. 88-96.
- [12] Kim, Y.H. (2008). Technological Manual of Twin-Jet. Korea Foundation Technology (KFT) E&C, Seoul, Korea (in Korean).

- [13] Shen, S.L., Luo, C.Y., Bai, Y., Kim, Y.H., and Peng, S.J. (2009a). "Instant solidification of soft ground horizontally using jetgrouting". Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support. Geotechnical Special Publication No. 187, American Society of Civil Engineers, Reston, pp257-264.
- [14] Zhang P., Liu Y., Kang X., Zhong K., Chen R. (2018). Application of Horizontal MJS Piles in Tunneling Beneath Existing Twin Tunnels. In: Chen R., Zheng G., Ou C. (eds) Proceedings of the 2nd International Symposium on Asia Urban GeoEngineering. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Singapore. DOI :10.1007/978-981-10-6632-0_25.
- [15] Sert, S., Önalp, A., Özocak, A., (2007), Derin Yumuşak Kil Üzerinde Köprü Ayağı Temeli, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Sayfa: 150-160, Sheraton Voyager Hotel, Antalya.
- [16] 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.
- [17] Taylan, Z. N., Uysal, H., Lav, M. A., & Erken, A. (2007). Sıvılaşma ve taşıma gücü kaybı sonucu oluşan oturmaları kapsayan vaka analizi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 471-482.
- [18] Yıldırım, H., Doğu O., Durgunoğlu, A. T., (2008). Jet Grouting Tekniği ile Sıvılaşmanın Yok Edilmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, Konya.
- [19] Özgan, E., Serin, S., Bektaş, S., (2011). Çimento Enjeksiyonu Yapılmış Zeminlerde Kaliforniya Taşıma Oranının (CBR) İncelenmesi, 6. Uluslararası Gelişmiş Teknolojiler Sempozyumu, Elazığ.
- [20] Ispir, M. E., Yıldız, M., Çevik, A., (2013). Kapalı Alanlarda ve Tam Doygun Siltli Kumlu Zeminlerde Jet Grout Kolonları ile Geçici İksa Sistemleri Bir Uygulama Örneği, 5.Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [21] Sert, S., Özocak, A., Bol, E. (2013), Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Müh. Bölümü Geoteknik Çalışma Grubu, Anadolu İmam Hatip Lisesi Zemin İnceleme Raporu, Sakarya.
- [22] Huvaj, N., http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/e2298dc5379657d_ek.pdf Erişim Tarihi: 05.06.2019, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Geoteknik Mühendisliği'nde Sonlu Elemanlar Yöntemi Temel Bigiler Semineri, Ankara.
- [23] <http://analizsimulasyon.com/muhendislik-problemleri-cozum-yontemleri/> Erişim Tarihi: 30.05.2019.
- [24] <http://analizsimulasyon.com/mesh-olusturma-kriterleri/> Erişim Tarihi: 30.05.2019.

- [25] Dalgıç, H.A. (2013). Yüksek Frekans Deniz Radarının Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi İle Modellenmesi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- [26] [kisi.deu.edu.tr/bulent.icten/dosyalar/Sonlu Elemanlar/DERS1.ppt](http://kisi.deu.edu.tr/bulent.icten/dosyalar/Sonlu%20Elemanlar/DERS1.ppt), Erişim Tarihi : 31.12.2019 Sonlu Elemanlara Giriş Dersi Ders Notu.
- [27] Su, O . (2011). Kalem Uçlu Keskilerle Kayaç Kesmede Ayrık Elemanlar Yöntemiyle Spesifik Enerjinin Kestirimi. Bilimsel Madencilik Dergisi, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/madencilik/issue/32477/361085> Erişim Tarihi : 30.12.2019.
- [28] Töremiş, E.İ. (2003). Geotekstiller ve Plaxis Sonlu Elemanlar Programı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [29] <https://dianafea.com/diana-brochures> Erişim Tarihi :10.06.2019.
- [30] Önalp, A., Tanaydın, M.O., Sert, S., (2010), Üst Yapı-Temel Etkileşiminde Rijitliğin Etkisi, Zemin Mekanik ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, Cilt 2, Sayfa: 603-612, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul.
- [31] Unutmaz, B. (2015). Tünel Çevresi Zeminlerinin Deprem Sonrası Davranışı, 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana. doi: 10.5505/2015geoteknik.S090.
- [32] https://en.midasuser.com/product/GTSnx_overview.asp ErişimTarihi: 01.01.2020
- [33] Kılıç, A. N. (2011). Yayılı Temel Analizinde Üst Yapı Rijitliğinin Etkisi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- [34] Günay, F. (2013). Kompozit Bir Temelin Davranışının Farklı Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- [35] Köktan, U., Demir, G., Ertek, M.K. (2019). Bir Konsol İstinat Duvarının Sismik Davranışına Yeraltı Su Seviyesindeki Değişimlerin Etkisinin İncelenmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 10.17714/gumusfenbil.398875.
- [36] Midas GTS Yazılımı, Program Dosyası, Manual Eğitimler 4. Bölüm Sonlu Elemanlar Ağı Rehber Dosyası.
- [37] Öncü Bali, Ö. (2019). Yumuşak Zeminler Üzerindeki Yol Dolgularında Konsolidasyonun Hızlandırılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

ÖZGEÇMİŞ

Seda TEMEL, 1993 yılında Bolu’da doğdu. İlköğretim eğitimini Balıkesir ve Zonguldak’ta, orta öğrenimini (lise) Sakarya’nın Hendek ilçesi Atike Hanım Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2011 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne başlayıp 2017 yılında mezun oldu. 2017 yılında Sakarya Üniversitesi’nde Fen Bilimleri Enstitüsü Geoteknik Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı.