

DERİN KAZILARDA PASİF DİRENCİ ARTIRMA AMAÇLI GRİD ŞEKLİNDE KESİŞEN JET ENJEKSİYON KOLONLARIN TASARIMI

DESIGN OF INTERSECTING JET-GROUT COLUMNS WITH GRID PATTERN TO INCREASE PASSIVE RESISTANCE OF DEEP EXCAVATIONS

İlbüke YALÇINKAYA¹, Salahaddin Miraç KARADEMİR², Zeynep ÇEKİNMEZ BAYRAM³

ÖZET

Zayıf zeminlerde yapılan derin kazılarda, soket bölgesindeki pasif direncin yetersiz kaldığı durumlarda, iksa yapısına ilave destek sağlamak amacıyla zaman zaman zemin iyileştirmesi yöntemlerine başvurulmaktadır. Bu çalışma kapsamında, diyafram duvar ve yukarıdan aşağıya inşaat metodu ile imalatı planlanan bir derin kazı projesinde, pasif direnci artırma amacıyla zemin iyileştirmesi yöntemi olarak grid şeklinde jet enjeksiyon kolonlarının uygulanması öngörülmüştür. Öncelikle, jet enjeksiyon kolonları iki boyutlu nümerik analizlerde kompozit malzeme özellikleri ile tanımlanarak modellenmiştir. İki boyutlu nümerik analizlere ek olarak, aynı sistem üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile de analiz edilerek iki boyutlu yaklaşımlar ile uyumluluğu kontrol edilmiştir. Plaxis 3D analizinde jet enjeksiyon kolonları imalatı öngörüldüğü şekliyle grid sistem olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizleri Plaxis 2D ve 3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlara göre benzer şekilde yapılacak tasarımlarda nasıl bir yöntem izlenmesi gerektiğine dair önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Jet enjeksiyon kolonları, zemin iyileştirmesi, diyafram duvar

ABSTRACT

In deep excavations carried out on weak soils where the passive resistance in the socket area is insufficient, ground improvement methods are occasionally used to provide additional support to the braced excavation. Within the scope of this study, it was envisaged to apply grid-shaped jet grout columns as a ground improvement method in order to increase passive resistance in a deep excavation project. It was planned to be constructed with top-down construction method with diaphragm walls. Firstly, jet grout columns were modeled by defining composite material properties in two-dimensional numerical analyses. In addition to two-dimensional numerical analyses, the same system was analyzed with the three-dimensional finite element method and its compatibility with two-dimensional approaches was checked. In Plaxis 3D analysis, jet grout columns are

¹ İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje, iuslu@yukseproje.com.tr (Sorumlu yazar)

² İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje, mkarademir@yukseproje.com.tr

³ Dr. İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje, zcekinmez@yukseproje.com.tr



modeled as a grid system to reflect real condition. Finite element analyses were completed with Plaxis 2D and 3D. According to the results, suggestions were made about which method should be followed in similar designs.

Keywords: *Jet grout columns, soil improvement, diaphragm wall*

1. GİRİŞ

Son yıllarda etkin olarak kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olarak jet-enjeksiyon yöntemi tercih edilmektedir. Her türlü zayıf kum ve kil gibi zeminlerde uygulanan bu yöntem, diğer iyileştirme yöntemlerine göre daha ekonomik ve hızlıdır. Jet-enjeksiyon yöntemi ile yüksek basınçlı çimento enjeksiyonu mevcut zemini iyileştirme amaçlı kullanılır ve zemin daneleri ile enjeksiyon malzemesi karışımından oluşan zemin ve çimento içerikli iyileştirilmiş kolonlar oluşturulur. Çok çeşitli geoteknik mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasının sebebi birçok avantaja sahip olmasıdır. Bunlardan bazıları; ekonomik olması ve her türlü zemine uygulanabilirliğidir. Enjeksiyon istenilen derinlikten başlanıp bitirilebilir ve istenilen çapta/aralıkla kolonlar üretilebilir. Su ve çimento karışımı kullanıldığı için çevreye zararı minimize eder. Mevcut yapılara zarar vermez.

Bu çalışmada, jet-enjeksiyon kolonları, düşük mukavemete sahip bir zeminde yapılacak olan derin kazıda soket bölgesindeki pasif direnç yetersiz kaldığı için iksa yapısına ilave destek sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. İmalat yöntemi olarak yukarıdan aşağıya inşaat metodu kullanılması planlanmıştır. Bununla birlikte kazı diyafram duvar, kalıcı döşemeler ve geçici çelik borularla desteklenmektedir. Öncelikle, jet enjeksiyon kolonları, iki boyutlu nümerik analizlerde kompozit malzeme özellikleri ile tanımlanarak modellenmiştir. İki boyutlu nümerik analizlere ek olarak, aynı sistem üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile de analiz edilerek iki boyutlu yaklaşımlar ile uyumluluğu kontrol edilmiştir. Plaxis 3D analizinde jet enjeksiyon kolonları imalatta öngörüldüğü şekliyle kesişen grid sistem olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizleri, Plaxis 2D ve 3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlara göre benzer şekilde yapılacak tasarımlarda nasıl bir yöntem izlenmesi gerektiğine dair önerilerde bulunulmuştur.

2. JET ENJEKSİYON YÖNTEMİ

Jet enjeksiyon yöntemi bir veya daha çok akışkanın (çimento şerbeti, hava, su) zemine yüksek basınç altında enjekte edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde, klasik enjeksiyon yöntemine göre daha yüksek basınçlar uygulanmaktadır. Yapılan iyileştirme ile birlikte zemin mukavemetinde artış ve geçirgenliğinde ise azalma meydana gelmektedir. Jet enjeksiyon yöntemleri aşırı oturmaları ve sıvılaşmayı engellemek, tünel ayna stabilitesini arttırmak, yapı temeli altındaki zeminin mukavemetini arttırmak ve derin kazılarda pasif direnci arttırmak için kullanılabilir.

Bu yöntemde, yüksek basınçlı çimento su karışımı doğrudan zemine enjekte edilmektedir. Bu yüksek basınç sayesinde her türlü zemine enjeksiyon yapılabilir. Sonuçta zeminin bir kısmı çimento şerbeti ile yer değiştirmektedir. Bu yöntemin özelliklerinden biri de



oluşacak iyileştirilmiş parametrenin önceden tahmin edilebilmesidir. Ayrıca kesişen veya ayırık olarak tasarım yapılabilir. Buna bağlı olarak parametreler değişkenlik göstermektedir. İki boyutlu nümerik analizlerde, iyileştirilmiş kolon ve zemin genellikle kompozit parametre yaklaşımı ile modellenmektedir. Tasarım aşamasında, öncelikle aşağıdaki referans kaynaktan hedef tek eksenli basınç dayanım değeri, q_u , seçilmiştir (Durgunoğlu, 2004).

Tablo 1. Zemin Cinsine göre Soilcrete Serbest Basınç Mukavemeti ve Modülü

Zemin Cinsi	Serbest Basınç Mukavemeti f_{jg} (MPa)	Modül Oranı(*), E/f_{jg}
Kil	2-5	150
Silt	3-7	200
Kum	7-14	600
Çakıl	12-18	900

(*) %40 gerileme seviyesine tekabül eden modül

Kompozit parametrenin belirlenmesi için izlenen prosedür aşağıdaki gibidir (Çekinmez Bayram ve Erol (2018)).

$$\gamma_{komp} = \gamma(1 - a_r) + \gamma_{jg}a_r \quad (1)$$

$$c_{komp} = c_s(1 - a_r) + c_{jg}a_r \quad (2)$$

$$\phi_{komp} = \tan^{-1}[a_r \tan \phi_s] \quad (3)$$

$$E_{komp} = E_s(1 - a_r) + E a_r \quad (4)$$

3. PROJE DETAYLARI

Bu uygulamada, yaklaşık 36.5 m derinliğinde bir kazı iksa projesi analiz edilmiştir. Yeraltı su seviyesi yüzeyden 2.5 m aşağıdadır. Projede kullanılan zemin parametreleri Tablo 2’de gösterilmektedir.

Tablo 2. Zemin parametreleri

Zemin	Kalınlık (m)	Zemin Türü	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (MPa)
Yapay Dolgu	6.5	-	19	5	32	25
S1	4.5	Siltli Kum	19	1	32	6
S2	4.5	Siltli Kum	19	1	32	12
S3	3	Siltli Kum	20	1	38	18
S4	3	Siltli Kum	20	1	40	26
S5	21	Siltli Kum	21	1	41	40
S6	20	Siltli Kum	21	1	41	66

Kazının, 120 cm kalınlığında diyafram duvarlar kullanılarak yukarıdan aşağıya yapım yöntemi ile gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. 36.5 m kazı derinliği sebebi ile kalıcı ve geçici destek elemanlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bunlar yukarıdan aşağıya doğru;

- İlk iki sırada 100 cm kalınlığında kalıcı döşemeler,
- Üçüncü sırada 140 cm kalıcı döşeme,



- 3 sıra Ø1016/16 mm çelik boru'dur.

Üçüncü sıradaki 140 cm kalınlığa sahip döşeme ile temel arasında yaklaşık 16 m net açıklık bulunmaktadır. Kazı derinliği ve açıklığın oldukça fazla olması sebebiyle, kazı esnasında desteklenmesi için araya geçici destek elemanları (Ø1016/16 mm çelik boru) kullanılmıştır. Söz konusu açıklığın sebebi, operasyon sırasında bu açıklıktan TBM ile tünel imalatının yapılacak olmasıdır. Gerçekleştirilen ön analizlerde, kazı derinliği, su basıncı ve zemin mukavemet parametreleri etkisiyle, zeminin yeterli pasif direnci sağlayamadığı ve diyafram duvar kesit kapasitesini aşan kesit tesiri değerleri saptanmıştır. Ayrıca, herhangi bir zemin iyileştirme yapılmadığı durumda, zemindeki yenilmelere bağlı olarak analizler tamamlanamamaktadır. Bu sebeple iyileştirme yöntemi olarak jet enjeksiyon kolonları kullanılmıştır. Ø80/60 cm kesişen jet enjeksiyon kolonları iki sıra olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu iki sıra kolonların yatay aralığı (s_h) ise 5 m olarak öngörülmüştür. Plaxis 2D uygulamasında iyileştirilmiş zemin, bir önceki bölümde tariflenen yöntemle göre kompozit malzeme olarak tanımlanırken, Plaxis 3D uygulamasında iyileştirilmiş zemin bloğu literatürde önerilen parametreler ile doğrusal elastik olarak tanımlanmıştır. Bu parametreler Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Jet enjeksiyon parametreleri – Plaxis 2D ve Plaxis 3D

Uygulama	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (MPa)
Plaxis 2D	22	281	31	365
Plaxis 3D	22	-	-	1200

Her iki analiz modelinde tanımlanan inşaat aşamaları ise Tablo 4'te sunulmaktadır.

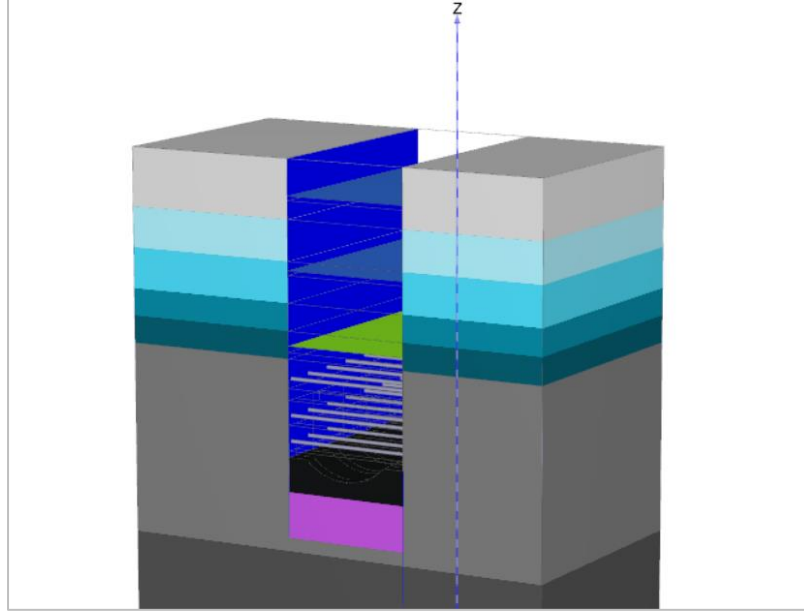
Tablo 4. İnşaat aşamaları

Aşamalar	Aşama Detayı
0	Birincil gerilmelerin oluşturulması
1	Diyafram duvar ve iyileştirmenin yapılması (Deplasmanların sıfırlanması)
2	İlk döşeme (100 cm) için kazı yapılması
3	İlk döşemenin aktif edilmesi
4	İkinci döşeme (100 cm) için kazı yapılması
5	İkinci döşemenin aktif edilmesi
6	Üçüncü döşeme (140 cm) için kazı yapılması
7	Üçüncü döşemenin aktif edilmesi
8	İlk sıra çelik boru (Ø1016/16 mm) için kazı yapılması
9	İlk sıra çelik borunun aktif edilmesi
10	İkinci sıra çelik boru (Ø1016/16 mm) için kazı yapılması
11	İkinci sıra çelik borunun aktif edilmesi
12	Üçüncü sıra çelik boru (Ø1016/16 mm) için kazı yapılması
13	Üçüncü sıra çelik borunun aktif edilmesi
14	Temel kazısının yapılması
15	Temelin aktif edilmesi
16	Çelik boruların kaldırılması (kalıcı durum)

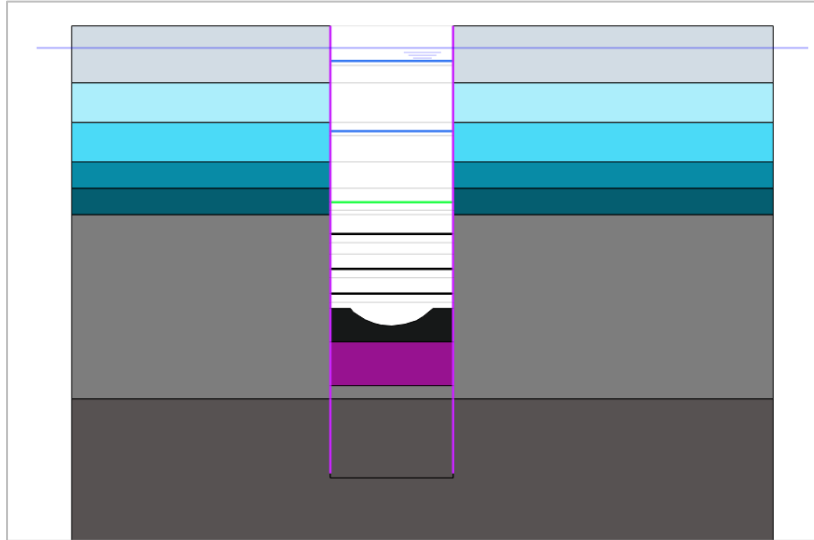


2.4. Sonlu Elemanlar 2D-3D Modelleri

Jet enjeksiyon kolonları Plaxis 2D’de kompozit malzeme özellikleri ile tanımlanarak modellenmiştir. İki boyutlu nümerik analizlere ek olarak, aynı sistem üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile de analiz edilerek iki boyutlu yaklaşımlar ile uyumluluğu kontrol edilmiştir. Plaxis 3D analizinde jet enjeksiyon kolonları imalatı öngörüldüğü şekliyle kesişen grid sistem olarak modellenmiştir. Örnek kesit görünümü Şekil 1 ve 2’de gösterilmektedir. Tipik uygulama planı Şekil 3’te gösterilmektedir.

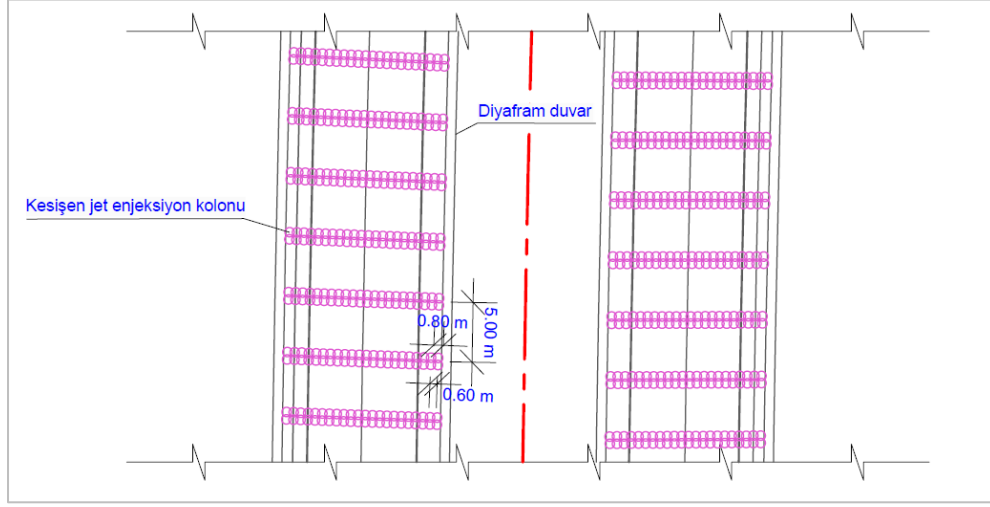


Şekil 1. Plaxis 3D 3 boyutlu model görünümü



Şekil 2. Plaxis 2D kesit görünümü

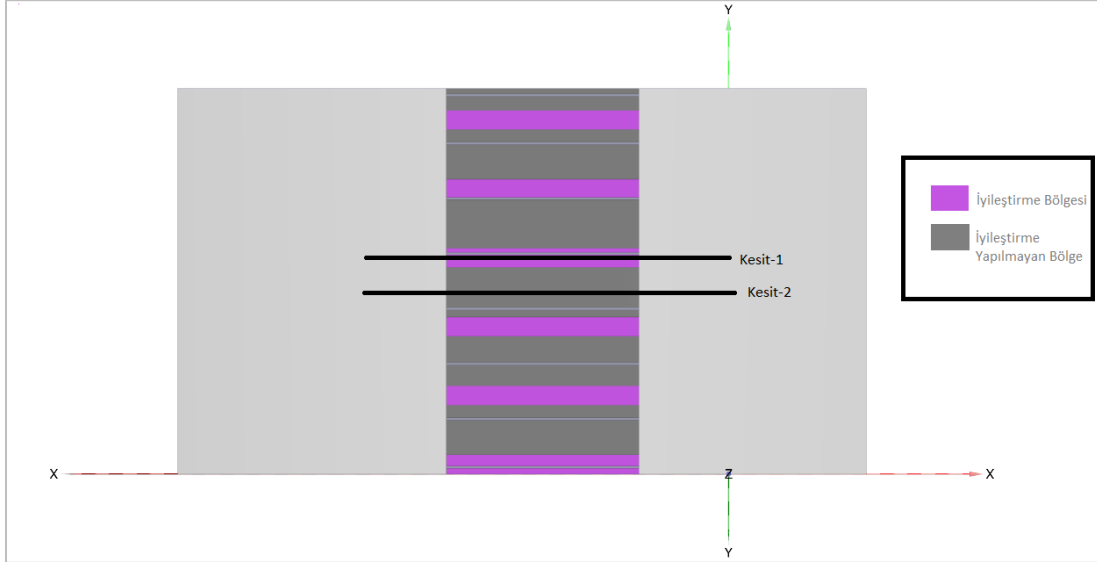




Şekil 3. Tipik uygulama planı

4. ANALİZ SONUÇLARI

İki ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen sonuçlar (diyafram duvar deplasman ve kesit tesiri değerleri ile çelik boru üzerinde oluşan yükler) kıyaslanmıştır. Üç boyutlu analiz sonuçları hem jet enjeksiyon kolonlarının ortasından (Kesit-1) hem de iyileştirme yapılmayan bölgeden (Kesit-2) alınan kesitler üzerinden incelenmiştir. Yapılan bu ayırım ile grid sistemi ile modellemede iyileştirme yapılan bölge ve iyileştirme yapılmayan bölge arasında sonuçlardaki farklılık gözlemlenebilmektedir. Söz konusu kesitler, Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Plaxis 3D kesit-1 ve kesit-2 ayırımı

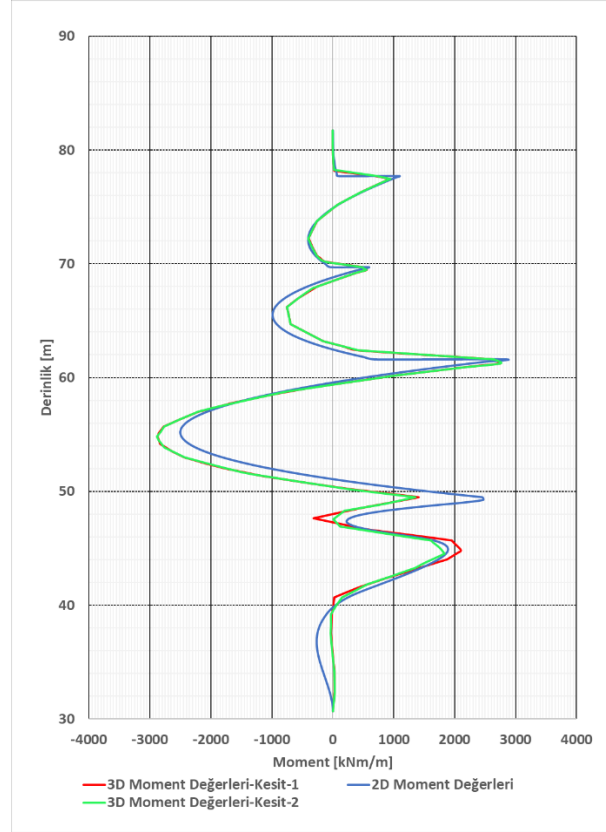
Analizler sonucunda, kalıcı (nihai) durumdaki hem iki boyutlu analiz hem de üç boyutlu analizdeki farklı iki bölgeden alınmış kesitler için, diyafram duvarda oluşan yanıl deplasman (u_x) ile eğilme



momenti (M) ve kesme kuvveti (Q) değerleri elde edilerek kıyaslanmıştır. Maksimum değerler aşağıdaki tabloda, diyafram duvar boyunca deplasman ve kesit tesirlerinin değişimi ise takip eden grafikerlerde sırasıyla sunulmaktadır. Buna ek olarak, her iki analiz modelinde geçici çelik borulara etkiyen yük değerleri de kıyaslanmış olup, sonuçlar Şekil – 5-8 arasındaki grafiklerde aktarılmaktadır. Bulunan maksimum değerler Tablo 5’te sunulmaktadır.

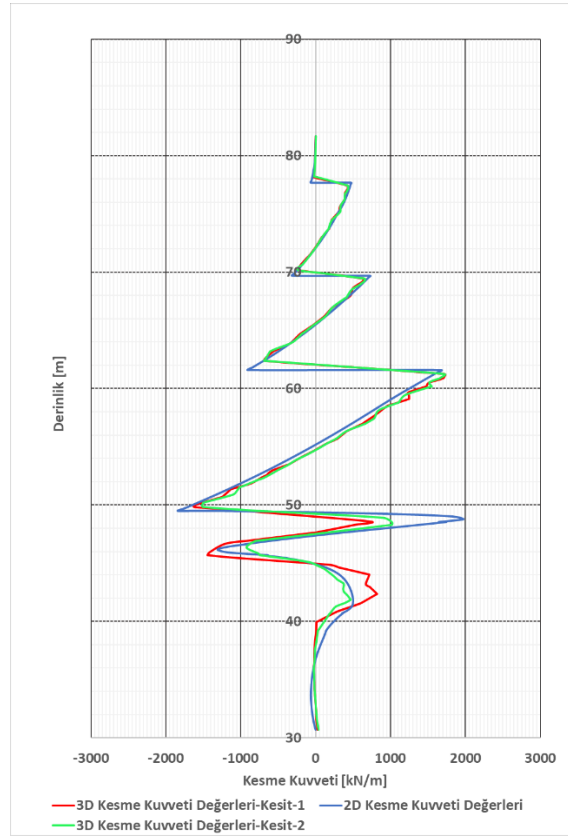
Tablo 5. Maksimum Değerler – 2D ve 3D

	Moment (kNm/m)	Kesme Kuvveti (kN/m)	Deplasman (m)
2D	2843	1971	0.029
3D Kesit-1	2879	1765	0.026
3D Kesit-2	2881	1720	0.026

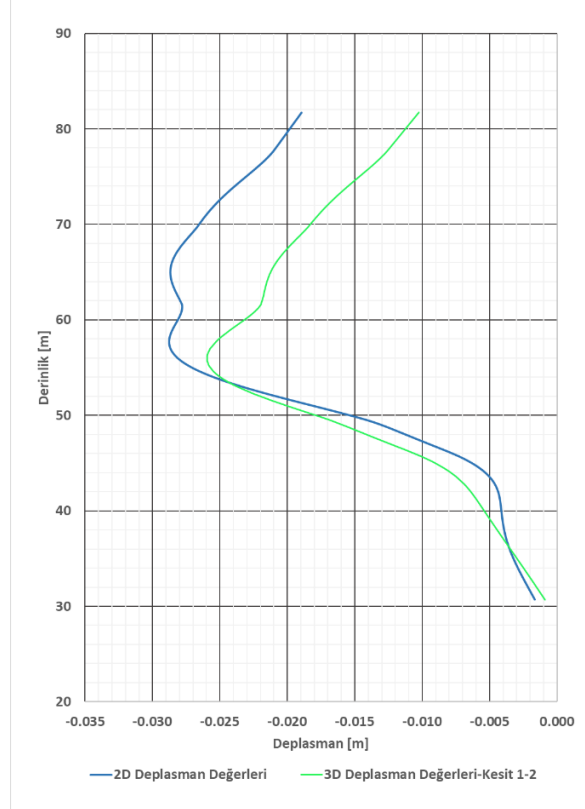


Şekil 5. Kalıcı durum- eğilme momenti (M) değerleri karşılaştırma



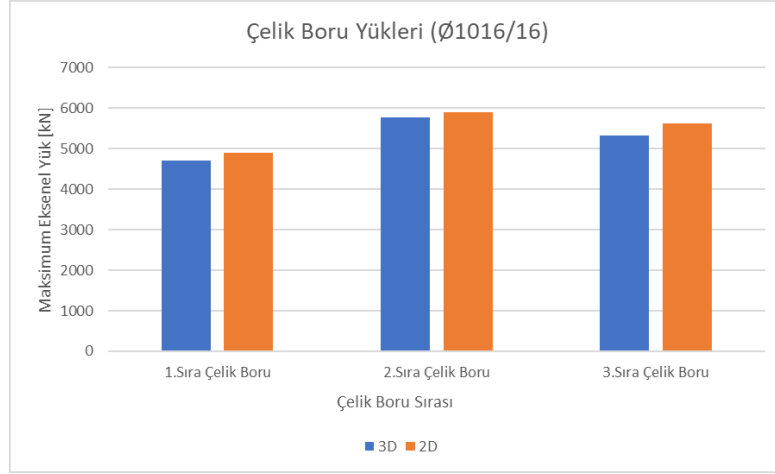


Şekil 6. Kalıcı durum- kesme kuvveti (Q) değerleri karşılaştırma



Şekil 7. Kalıcı durum- deplasman (u_x) değerleri karşılaştırma





Şekil 8. Çelik borulara etki eden maksimum eksenel kuvvetler

5. DEĞERLENDİRMELER

Analizler sonucunda aşağıdaki çıkarım ve değerlendirmeler yapılabilmektedir:

- Üç boyutlu analiz modelindeki, Kesit-1 ve 2'den elde edilen eğilme momenti (M) değerleri arasındaki fark %0.1, kesme kuvveti değerleri arasındaki fark %2.6, deplasman değerleri arasındaki fark ise %0.2'dir. Bu durum, sahadaki imalatı daha gerçekçi şekilde tanımlayan üç boyutlu modeldeki grid şeklinde elemanların, kompozit davranış gösterdiği şeklinde değerlendirilmiştir. İyileştirme bölgesinin içinde ve dışında davranış son derece benzerdir.
- 3D ve 2D analizlerindeki maksimum eğilme momenti (M) arasındaki fark yaklaşık %1.3 mertebesinde.
- 3D ve 2D analizlerindeki maksimum kesme kuvveti değeri (Q) arasında %10.5 fark bulunmaktadır.
- 3D ve 2D analizlerindeki maksimum deplasman değerleri arasında %10.3 (0.3 cm) fark bulunmaktadır.
- Şekil 7'de ise 3D ve 2D analizlerinde çelik borulara etki eden maksimum eksenel kuvvetler gösterilmektedir. Buna göre ilk sıra çelik borudaki fark %3.9, ikinci sıradaki %2.3, üçüncü sıradaki ise %5.3'tür. Bu fark çelik boru tasarımında herhangi bir değişikliğe sebep olmayacak olup, 2D analizlerindeki sonuçlar daha kritik olarak hesaplanmaktadır.
- Yukarıdaki değerlendirmeler doğrultusunda, 2D ve 3D analizlerinde davranışın oldukça benzer olduğu ve sonuçların mühendislik açısından kabul edilebilir mertebede farklar olduğu değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlar arasındaki fark düşük olmakla birlikte, kritik sonuçlar 2D analiz modelinden elde edilmektedir. Ancak, 3D model oluşturma zorlukları, sistemi sonlu elemanlara ayırma (mesh) ve analiz süreleri değerlendirildiğinde bu farkın makul olduğu değerlendirilmiştir.



- Yukarıdaki değerlendirmeler ışığında, kesişen grid sistemli jet-enjeksiyon kolon modellemesinde, iki boyutlu analizler için literatürde önerilen alan oranı ve kompozit malzeme yaklaşımının geçerliliğini sürdürdüğü gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Yüksel Proje'nin mevcut yurtdışı ulaşım projelerinden biridir; bahsi geçen verilerin bildiri kapsamında kullanılmasına destek sağladığı için şirketimize teşekkür ediyoruz.

KAYNAKLAR

Bentley (2023), Plaxis 2D 2024.1 Manual, Advancing Infrastructure.
Bentley (2023), Plaxis 3D 2024.1 Manual, Advancing Infrastructure.
Durgunoğlu, H.T. (2004), "Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı", TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri, 431, 39-52.
Erol, O., Çekinmez Bayram, Z. (2018), "Jet Enjeksiyon Yöntemi", Yüksel Proje

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
γ_{komp}	Kompozit malzeme birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	c_{komp}	Kompozit malzemenin kohezyonu (kPa)
ϕ_{komp}	Kompozit malzemenin kayma direnci açısı (°)	E_{komp}	Kompozit malzeme elastisite modülü (MPa)
γ	Zeminin birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	a_r	Alan oranı
γ_{jg}	Jet kolon malzemesi birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	c_{jg}	Jet kolon malzemesinin kohezyonu (kPa)
c'	Zeminin efektif kohezyonu (kPa)	ϕ_s	Zemin kayma direnci açısı (°)
c_s	Zemin efektif kohezyonu (kPa)	E_s	Zemin elastisite modülü (MPa)

