
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

DERİN KAZILARDA 2B VE 3B SONLU ELAMANLAR YÖNTEMLERİ İLE ELDE EDİLEN SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Göksu TUNÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Göksu Tunç
26/06/2025

DERIN KAZILARDA 2B VE 3B SONLU ELAMANLAR YÖNTEMLERİ İLE ELDE EDİLEN SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Göksu TUNÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Kentsel nüfusun hızla artması ulaşım kaynaklarını yetersiz kılmakta, ulaşım için kullanılan otopark ve arazilerin eksikliği nedeniyle de geleneksel ulaşım yöntemleri artık uygulanamamaktadır. Bu nedenler, yoğun nüfuslu kentsel alanlarda derin kazıları kaçınılmaz hale getirmiştir. Kazıdan kaynaklı hareketlerin ve zemin deplasmanlarını tahmin etmek için ampirik yöntemlerin yanı sıra sayısal analizler yapılarak sonuçlar dikkate alınmalıdır. Bu kazıların yapıldığı alanların şehir içi olması mevcut yapı etkileşimini de beraberinde getirmektedir. Kazı duvarlarının deformasyonu veya hareketi, bu elemanlara etkiyen maksimum momentler ve kesme kuvvetleri ile yatay destek elemanı olarak kullanılan strut elemanlarının derin kazılar için en kritik tasarım parametreleri olduğu bilinmektedir. Derin kazıların davranışını anlamak için çalışmalar çeşitlendirilmeli ve bu parametreler üzerindeki etkiler geliştirilmelidir. Mevcutta yapılan bu kazıların numerik olarak modellenmesi gerçekte karşılaşılma olasılığında alınacak olan önlemlerin artırılmasında ve davranışın belirlenebilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışma, sonlu elemanlar yöntemini temel hesap metodolojisi olarak kabul eden 2B ve 3B analiz yaparak sonuçlarının irdelenmesi ile iki durumun aralarındaki oransal farklılıkların tespit edilmesini amaçlamaktadır. Elde edilen sonuçlar ışığında iki boyutlu modelleme yapılmasının, hızlı sonuç alma ve gerçek sonuçlara yakınsayan çözümlere ulaşmayı sağlayacaktır. Çalışma kapsamında bir bölge seçilerek zemin idealize edilerek geoteknik parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen parametre seti doğrultusunda sonlu elemanlar yöntemi tabanlı çalışan Plaxis2D ve Plaxis3D ile modeller oluşturulmuştur. Derin kazı durumu geçici kazı senaryosunda olup kazı aşamaları gerçeğe uygun modellenmiştir. Modelleme sonucunda elde edilen kazıklara ait deplasman ve kesit tesirleri özetlenerek 2B ve 3B analiz sonuçları arasındaki oransal farklar tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda düşey destek elemanında ve çevre yapı oturma değerlendirmelerinde 3B modellemenin pozitif etkisi görülürken, iç destek sisteminde (kuşak kirişlerinde) ve çelik strut elemanlarda bu etki elde edilememiş sonuçların 2B ve 3B analizlerinde kısmi değişiklikler ortaya çıkardığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 91105
Anahtar Kelimeler : Derin Kazılar, Kazık, Sonlu Elemanlar Metodu Analizleri
Sayfa Adedi : 119
Danışman : Prof. Dr. Seyhan FIRAT

COMPARISON OF RESULTS OBTAINED BY 2D AND 3D FINITE ELEMENT METHODS IN DEEP EXCAVATIONS

(M.Sc. Thesis)

Göksu TUNÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

The dramatic increase in the urban population makes transportation resources insufficient, and traditional transportation methods can no longer be applied because of the lack of parking lots and land used for transportation. These reasons have made deep excavations inevitable in densely populated urban areas. To estimate the movements and ground displacements caused by excavation, numerical analyses should be performed, and the results should be considered in addition to empirical methods. The fact that these excavations are carried out in the city also brings about the interaction of the existing structure. It is known that the deformation or movement of the excavation walls, the maximum moments and shear forces acting on these elements and the struts used as horizontal supports are the most critical design parameters for deep excavations. Studies should be diversified to understand the behavior of deep excavations and the effects on these parameters should be developed. Numerical modeling of this excavation that currently carried out plays an important role in increasing the precautions to be taken in case of real encounters and in determining the behavior. This study aims to determine the proportional differences between the two situations by examining the results by making 2D and 3D analysis accepting the finite element method as the basic calculation methodology. In the light of the obtained results, two-dimensional modeling will provide fast results and results that are close to the real results. Within the scope of the study, a region was selected, and the ground was idealized, and its geotechnical parameters were determined. Models were created with Plaxis2D and Plaxis3D, which work based on the finite element method, in line with the obtained parameter set. The deep excavation situation is in the temporary excavation scenario and the excavation stages are modeled according to reality. The displacement and fraction effects of the piles obtained because of the modeling were summarized and the proportional difference between the 2D and 3D analysis results were determined. In the results obtained, while the positive effect of 3D modeling was observed in the vertical support element and surrounding structure settlement evaluations, this effect was not obtained in the internal support system (waist beams) and steel strut elements, and it was observed that the results revealed partial changes in 2D and 3D analyses.

Science Code : 91105
Key Words : Deep Excavation Pile, Finite Element Method (FEM) Analysis
Page Number : 119
Supervisor : Prof. Dr. Seyhan FIRAT

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanmasına bilgi, birikim ve rehberliğiyle bana yol gösteren, daha iyi yerlere gelebilmem için elinden gelen çabayı gösteren, bana hep destek olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Seyhan FIRAT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte bana yol gösteren, işe ilk başladığım günden bu güne, yaklaşık sekiz yıl boyunca, hep beni ileriye taşıyan, gerektiği her an arkamda duran, bir patrondan ziyade zor anlarda yanımda var olduğunu bildiğim çok değerli mesleki büyüğüm saygıdeğer Danyal KUBİN'e, bana bugüne gelebilmem için bilgi birikimlerini aktarmaktan kaçınmayan, yaptığı sayısız abilik ile iyi bir mühendis olmamı sağlayan Tolga UÇAK'a ve her zaman bir telefon kadar uzakta olan hem teknik açıdan hem de her şeyin kağıt üzerindeki mümkünlüğüne ek öğretileri ve gösterdiği ışık ile meslek hayatımdaki sonsuz deneyimi veren Cesur Levent VASFIOĞLU'na çok teşekkür ederim. Bu süreçte birlikte çalıştığım arkadaşlarım, abilerim Rıdvan GÖKCE, Cem Ünal, Emin ATLI'ya, geçmişte birlikte çalıştığım ama artık dost olarak hayatımda büyük yeri olan Tuğba Bahar Bahşi ÇİFTLİKLİOĞLU'na, uzun yıllar sonra bu süreci yapabileceğime inandıran desteğini hep hissettiren Aybüke Nur Tuncel GÖKDOĞAN'a, tez çalışmaları süresince verdiği tüm destek için Zeynep KUT'a ve neşesi ile moralimi her daim yüksek tutan en mühendis kadın Bengü Elcik EROL'a teşekkür ederim. Son olarak üniversite hayatının bana verdiği en değerli kişilere Bora KARA, İnanç Taha SERBEST, Elif KINA ve Sena ŞENSES'e bunca yıl akademik yaşamda bana kattıkları ve tüm hayatıma olan değerli dostlukları için sonsuz teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman kale gibi arkamda duran, ne olursa olsun beni benden çok destekleyen canım annem Zeynep HIZIROĞLU'na; her koşulda kızlarının yanında duran, her başarısı ile gurur duyan canım babam Tansel HIZIROĞLU'na ve her zaman yanımda olan canım kardeşim, ailemizin "çalışkan hukukçusu" bir tanecik teyzemiz Gökçen HIZIROĞLU'na teşekkür ederim. En büyük teşekkürü ise maddi ve manevi desteğini esirgemeyen canım eşim Efe Kaan TUNÇ'a ve minik oğlum Pars TUNÇ'a etmek istiyorum. Eşim ve oğlumun destekleri olmadan bu çalışmayı tamamlamam mümkün olmazdı.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 5

2.1. Derin Kazılarda Genel Kavramlar 5

2.2. Derin Kazılarda Deplasman Tahmin Yöntemleri 11

2.2.1. Ampirik yöntemler 12

2.2.2. Analitik yöntemler 14

2.2.3. Nümerik yöntemler 15

2.3. Literatürde Yer Alan Önceki Çalışmalar 17

3. MATERYAL VE METOT 21

3.1. Materyal 21

3.1.1. Zemin bünye modelleri 21

3.2. Metot 24

3.2.1. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analizleri 24

3.2.2. Plaxis yazılım programı 24

3.2.3. Plaxis2D ve Plaxis3D 25

4. DERİN KAZI ETKİSİNDEKİ İKSA DAVRANIŞI 27

Sayfa

4.1. Açık Kazı ile Yapılan Derin Kazılar 27
4.2. İksa Sistemi ile Yapılan Derin Kazılar 27
4.2.1. Konsol sistemler 28
4.2.2. İçten destekli iksa sistemleri 28
4.2.3. Ankrajlı iksa sistemleri 29
4.2.4. Yukarıdan aşağıya imal edilen iksa sistemleri 32
4.2.5. Eksenel simetrik kazı iksa sistemleri 33
5. ÖRNEKLEME ÜZERİNE YAPILAN 2B VE 3B ANALİZLER 35
5.1. Sonlu Eleman Girdileri 35
5.1.1. Model geometrisinin tanımlanması 35
5.1.2. Malzeme bünye modellemesi 37
5.1.3. İksa elemanları 39
5.2. Kazı Aşamaları 40
5.3. 2B ve 3B Analiz Çalışmaları 42
5.3.1. Analiz kesiti A-A 45
5.3.2. Analiz kesiti B-B 70
5.3.3. Çelik strut analiz sonuçları 81
5.3.4. İç destek sistemi (kuşak kirişi) analizi 86
5.3.5. Plaxis3D yatay deplasman sonuçları 97
5.3.6. Çevre bina oturması 99
5.3.7. Güvenlik analiz sonuçları 104
6. SONUÇLARIN YORUMLANMASI 107
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 111
KAYNAKLAR 115
ÖZGEÇMİŞ 119

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.1. Bina/Yapı Plaxis girdileri 37

Çizelge 5.2. Plaxis zemin girdi verileri..... 38

Çizelge 5.3. Çelik strut özet bilgi tablosu 40

Çizelge 5.4. 2B ve 3B Analiz sonucuna göre deplasmanların yüzdece değişimi 47

Çizelge 5.5. Tasarım kesme kuvvetlerinin kıyaslanması..... 51

Çizelge 5.6. Kazık kesme donatısı Plaxis2D 52

Çizelge 5.7. Kazık kesme donatısı Plaxis3D 52

Çizelge 5.8. Tasarım kesme donatısı kıyaslanması 53

Çizelge 5.9. A-A kesiti eğilme momenti kıyas tablosu (faktörsüz ve faktörlü) 56

Çizelge 5.10. Kazık eğilme donatısı Plaxis2D..... 57

Çizelge 5.11. Kazık eğilme donatısı Plaxis3D..... 57

Çizelge 5.12. A-A kesiti metraj kıyas tablosu 57

Çizelge 5.13. Plaxis2D ve Plaxis3D analiz sonuçları özet tablosu..... 58

Çizelge 5.14. Plaxis2D ve Plaxis3D analiz sonuçlarına göre metraj kıyas tablosu..... 58

Çizelge 5.15. 2B ve 3B analiz sonucuna göre deplasmanların yüzdece değişimi 60

Çizelge 5.16. Tasarım kesme kuvvetlerinin kıyaslanması..... 64

Çizelge 5.17. B-B kesiti eğilme momenti kıyas tablosu (faktörsüz ve faktörlü)..... 68

Çizelge 5.18. Plaxis2D ve Plaxis3D analiz sonuçları özet tablosu..... 69

Çizelge 5.19. 2B ve 3B analiz sonucuna göre deplasmanların yüzdece değişimi 72

Çizelge 5.20. Tasarım kesme kuvvetlerinin kıyaslanması..... 76

Çizelge 5.21. B-B Kesiti eğilme momenti kıyas tablosu (faktörsüz ve faktörlü)..... 80

Çizelge 5.22. Plaxis2D ve Plaxis3D analiz sonuçları özet tablosu..... 81

Çizelge 5.23. Plaxis2D strut yükleri 82

Çizelge 5.24. +83,55 kotu strut kıyas tablosu..... 83

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.25. +75,40 kotu strut kıyas tablosu 83

Çizelge 5.26. +68,55 Kotu strut kıyas tablosu 84

Çizelge 5.27. +62,05 kotu strut kıyas tablosu 85

Çizelge 5.28. A-A kesiti strut yükleri özet tablo 85

Çizelge 5.29. B-B kesiti strut yükleri özet tablo 86

Çizelge 5.30. Üst kuşak kirişi dış moment kıyası 88

Çizelge 5.31. Üst kuşak kirişi iç moment kıyası 89

Çizelge 5.32. Alt kuşak kirişi dış moment kıyası 89

Çizelge 5.33. Alt kuşak kirişi iç moment kıyası 90

Çizelge 5.34. Sol kuşak kirişi iç moment kıyası 91

Çizelge 5.35. Sağ kuşak kirişi iç moment kıyası 92

Çizelge 5.36. Üst kuşak kirişi kesme kuvveti kıyası 94

Çizelge 5.37. Alt kuşak kirişi kesme kuvveti kıyası 94

Çizelge 5.38. Sol kuşak kirişi kesme kuvveti kıyası 95

Çizelge 5.39. Sağ kuşak kirişi kesme kuvveti kıyası 96

Çizelge 5.40. Bina düşey oturma değerleri 100

Çizelge 5.41. Bina düşey oturma değerleri 102

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Kazıklı duvar tipik sistem kesiti 6
Şekil 2.2. Mini kazıklı duvar tipik sistem kesiti 7
Şekil 2.3. Betonarme perde imalat detayı 7
Şekil 2.4. Diyafram duvar imalatı 8
Şekil 2.5. Palplanş uygulaması 8
Şekil 2.6. Tipik öngerme halatlı geçici ankraj elemanı 9
Şekil 2.7. Tipik zemin çivisi detayı (KDYY, 2023) 10
Şekil 2.8. Tipik destek elemanı ve kuşak kirişi bağlantı detayları (KDYY, 2023) 11
Şekil 2.9. Zemin yüzeyi oturmalarının tahmini için Peck yöntemi (1969) 13
Şekil 2.10. Zemin yüzeyi oturmalarının tahmini için Bowles yöntemi (Bowles, 1986) 14
Şekil 3.1. Sonlu eleman tipleri (Huvaj, 2017) 22
Şekil 3.2. Elastik-İdeal plastik bünye modeli (Berilgen, 2014) 23
Şekil 3.3. İleri düzey plastik modeller (Berilgen, 2014) 23
Şekil 3.4. Düzlem şekil değiştirme durumu (Huvaj, 2017) 26
Şekil 3.5. Eksenel simetrik modelleme (Huvaj, 2017) 26
Şekil 4.1. Konsol kazık uygulama alanları 28
Şekil 4.2. Tipik içten destekli iksa sistem kesiti (Daş, 2020) 29
Şekil 4.3. Ankraj tip kesiti (Demir, 2025) 30
Şekil 4.4. Zemin tipine göre ankraj türleri (Federal Highway Administration, 1999) ... 31
Şekil 4.5. Ankraj kök ve serbest boy tipik kesit ve plan gösterimi 32
Şekil 4.6. Yukarıdan aşağı (Top-Down) imalat yönteminin tipik kesiti 32
Şekil 4.7. Eksenel simetrik kazı yöntemi ile tipik bir kesit (ISSMGE, 2017) 33
Şekil 5.1. Plaxis2D analiz modeli 36
Şekil 5.2. Plaxis3D analiz modeli 36

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.3. Plan kesit, çevre yüklemeler 37
Şekil 5.4. Plaxis2D zemin modellemesi 38
Şekil 5.5. Plaxis3D zemin modellemesi 39
Şekil 5.6. Metro istasyonun iç yapı modellemesi (Plaxis3D) 41
Şekil 5.7. Metro istasyonu genel yerleşimi 43
Şekil 5.8. Analiz kesiti plan gösterimi (analiz kesiti A-A) 43
Şekil 5.9. Analiz kesiti plan gösterimi (analiz kesiti B-B) 44
Şekil 5.10. Plaxis2D analiz kesiti (A-A kesiti) 44
Şekil 5.11. Deplasman özet verileri 46
Şekil 5.12. Yatay deplasman değerlerinin 2B ve 3B analiz sonuçları 47
Şekil 5.13. Kesme kuvveti özet verileri 48
Şekil 5.14. Plaxis2D ve Plaxis3D kesme kuvveti analiz çıktıları (kN) 49
Şekil 5.15. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı 50
Şekil 5.16. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı 51
Şekil 5.17. Eğilme momenti özet verileri 53
Şekil 5.18. Plaxis2D ve Plaxis3D eğilme momenti analiz çıktıları (kNm) 54
Şekil 5.19. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı 55
Şekil 5.20. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı 56
Şekil 5.21. Deplasman özet verileri 59
Şekil 5.22. Yatay deplasman değerlerinin 2B ve 3B analiz sonuçları 60
Şekil 5.23. Kesme kuvveti özet verileri 61
Şekil 5.24. Plaxis2D ve Plaxis3D kesme kuvveti analiz çıktıları (kN) 62
Şekil 5.25. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı 63
Şekil 5.26. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı 64
Şekil 5.27. Eğilme momenti özet verileri 65

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.28. Plaxis2D ve Plaxis3D eğilme momenti analiz çıktıları (kNm) 66

Şekil 5.29. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı 67

Şekil 5.30. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı 68

Şekil 5.31. Analiz kesiti plan gösterimi (analiz kesiti B-B) 70

Şekil 5.32. Deplasman özet verileri 71

Şekil 5.33. Yatay deplasman değerlerinin 2B ve 3B analiz sonuçları 72

Şekil 5.34. Kesme kuvveti özet verileri 73

Şekil 5.35. Plaxis2D ve Plaxis3D kesme kuvveti analiz çıktıları (kN) 74

Şekil 5.36. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı 75

Şekil 5.37. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı 76

Şekil 5.38. Eğilme momenti özet verileri 77

Şekil 5.39. Plaxis2D ve Plaxis3D eğilme momenti analiz çıktıları (kNm) 78

Şekil 5.40. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı 79

Şekil 5.41. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı 80

Şekil 5.42. +83,55 kotu strut eksenel kuvveti, kN, kombinasyon: Self+Soil 82

Şekil 5.43. +75,40 kotu strut eksenel kuvveti, kN, kombinasyon: Self+Soil 83

Şekil 5.44. +68,55 kotu strut eksenel kuvveti, kN, kombinasyon: Self+Soil 84

Şekil 5.45. +62,05 kotu strut eksenel kuvveti, kN, kombinasyon: Self+Soil 85

Şekil 5.46. Plaxis3D moment sonuçları genel gösterimi 87

Şekil 5.47. SAP2000 moment sonuçları genel gösterimi 87

Şekil 5.48. Üst kuşak kirişi, M- Moment, kN.m, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil 88

Şekil 5.49. Alt kuşak kirişi, M- Moment, kN.m, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil 89

Şekil 5.50. Sol kuşak kirişi, M- moment, kN.m, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil..... 90

Şekil 5.51. Sağ kuşak kirişi, M- Moment, kN.m, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil 91

Şekil 5.52. Plaxis3D kesme kuvveti sonuçları genel gösterimi 92

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.53. Plaxis3D kesme kuvveti sonuçları genel gösterimi 93

Şekil 5.54. Üst Kuşak Kirişi, V, kN, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil 93

Şekil 5.55. Alt kuşak kirişi, V, kN, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil 94

Şekil 5.56. Sol kuşak kirişi, V, kN, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil 95

Şekil 5.57. Sağ kuşak kirişi, V, kN, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil 96

Şekil 5.58. Plaxis3D uzun ve kısa cephe kazık deplasman davranışı 97

Şekil 5.59. Plaxis3D uzun cephe kazık yatay deplasman davranışı 98

Şekil 5.60. Plaxis3D kısa cephe kazık yatay deplasman davranışı 98

Şekil 5.61. Bina düşey oturma değerleri (A-A analiz kesiti sol aks) 99

Şekil 5.62. A-A analiz kesiti sol aks kıyas gösterimi 100

Şekil 5.63. Bina düşey oturma değerleri (A-A analiz kesiti sağ aks) 101

Şekil 5.64. A-A analiz kesiti sağ aks kıyas gösterimi 102

Şekil 5.65. Plaxis3D deforme kazık davranışı üç boyutlu gösterimi 103

Şekil 5.66. Plaxis3D deforme kazık davranışı plan gösterimi 103

Şekil 5.67. Plaxis3D toplam düşey oturma/kabarma sonuç verisi 104

Şekil 5.68. 3B model güvenlik analiz sonuçları 105

Şekil 5.69. Plaxis2D toplam düşey oturma/kabarma sonuç verisi 105

Şekil 5.70. 2B model güvenlik analiz sonuçları 106

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a_d	Yanal deformasyon yapan zeminin hacmi
B	İksa iç yüzeyi arası mesafesi
c'	Efektif kohezyon
cm	Santimetre
D	İksa elemanı soket boyu
dvm	Maksimum zemin yüzey oturması
E'	Deformasyon modeli
h	Strutlar arası düşey mesafe
H	Yüzeyden kazı tabanına olan derinlik
He	Tam kazı durumundaki derinlik
kN	Kilonewton
kN.m	Kilonewtonmetre
lx	Duvardan D noktası kadar uzaklık
M	Eğilme Momenti
m	Metre
Nb	Zemin stabilite faktörü
Ncb	Taban kabarmasına karşı kritik stabilite faktörü
r	İç radyal yön
Sh	Ankraj yatay ara mesafesi
Su	Zeminin drenajsız kayma mukavemeti
ux	Yatay deplasman
uy	Düşey deplasman
z	Radyal düşey yön
χ	Güvenli kayma kaması mesafesi
Q	Kesme Kuvveti
2B	2 Boyut
3B	3 Boyut
ø	Zemin içsel sürtünme açısı

Simgeler	Açıklamalar
dv	Oturma değerinin iksa düşey elemanına uzaklığı
γ	Zemin doğal birim hacim ağırlığı
θ	Radyal yönde yapılan açı
σr	Radyal yönde oluşan iç gerilme
σz	Radyal yönde oluşan düşey gerilme

Kısaltmalar	Açıklamalar
HS	Hardening Soil Bünye Modeli
HSsmall	Hardening Soil Small Strain
MC	Mohr Coulomb Bünye Modeli
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SPT-N	Standart Penatrasyon Deneyi Darbe Sayısı

1. GİRİŞ

Derin kazılar genellikle madencilik, arkeoloji, jeolojik ve inşaat gibi birçok alanda kullanılan yer altındaki daha derin seviyelerdeki yapı ve/veya malzemeleri ortaya çıkarmak amacı ile yapılan kazılardır. Bu kazılarda kazı derinliği birkaç metre olabileceği gibi yüzlerce metreyi de bulabilir. Kazı amacı yer altında bulunan doğal kaynaklara ulaşmak olabileceği gibi yer altına yapı yapmak için de kullanılmaktadır. Günümüzde şehirleşme mevcut kullanım alanlarında yeni yapılaşmalara izin vermezken, hem yer altı otoparkları, tünelleri gibi gündelik hayatta karşılaşılan ihtiyaçların yapımında hem de üst yapıların bodrum katları gibi temel kazıları için ihtiyaç duyulan bu kazılar için klasik kazı yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Zemin ve yeraltı yapıların ilişkisi doğru şekilde irdelenmeli, stabilitesi sağlanmalı ve uygun yapım yönteminin tasarlanması gerekmektedir. Derin kazılar, yer altına yapılar için yüzeyden birkaç metreden yüzlerce metre derinliğe ulaşabilen kazı işlemleridir. Bu kazılarda, kazı kenarlarının stabilize edilmesi ve çökmelerin önlenmesi amacıyla kullanılan destekleyici yapı veya düzenlemelere iksa sistemi denilmektedir. Bu sistemler, kazı alanındaki zeminin ve yapıların güvenliğini sağlar, kazı sürecinin düzgün ve güvenli bir şekilde ilerlemesine yardımcı olur. Genel olarak kullanılan iksa sistemleri çelik istinat duvarları (çelik kazıklar ve palplaj yapıları), kazık sistemleri (ahşap, çelik ya da betondan yapılan kazık sistemleri), diyafram duvar sistemleri gibi düşeyde stabiliteyi sağlamayı amaçlayan iksa sistemleri bulunmaktadır. Bunlara ek olarak yatayda sisteme destek verecek iksa elemanları ise çelik strutlar, ankraj sistemleri ve zemin çivisi/kaya bulonu gibi içinde bulunduğu jeolojik birime bağlı değişen destek sistemleri kullanılmaktadır. Genel olarak iksa elemanları derin kazılarda hem düşeyde hem de yatayda desteklenerek sistemin kazı sırasında oluşturacağı hareketi engellemeyi ya da olabildiğince minimumda tutarak sistem güvenliğini ve çevre yapı etkileşimini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu tür kazıların stabilizesi oldukça önemli ve önceden tahmin edilmesi gereken bir konudur. Kazı yapılmadan önce oluşan gerilme, deformasyon, su akışı gibi yapı-zemin etkileşimini etkileyen karmaşık mühendislik problemleri gerçeğe en yakın şekilde tahmin edilerek oluşabilecek etkiler için önlemler alınmalıdır. Bu doğrultuda gelişen teknoloji yardımı ile sonlu elemanlar yöntemi (SEY) bu karmaşık problemleri sayısal bir hale getirerek çözülmesini sağlamaktadır. Bu yöntem kazı öncesinde sınırlı veri bilinen karmaşık bir yapı için oldukça önemli ve doğru yorumlanması gereken bir metottur. Bu sayede karşılaşılması olası olan problemler kazı öncesi görülebilir. Bu doğrultuda kazıdan dolayı zeminde oluşacak gerilme değişimleri ve yer değiştirmeler hesaplanır. Yapı elemanları (perde, ankraj,

kazık vb.) üzerindeki iç kuvvetler belirlenir. Kazı aşamaları adım adım modellenerek her aşamadaki zemin davranışı ve destek sistemlerinin tepkisi analiz edilir. Zemin ile yapı (perde duvar, kazık vb.) arasındaki etkileşim ayrıntılı olarak incelenir.

Derin kazılarda farklı durumlar için farklı analiz yöntemleri gerekli olmaktadır. Gerçekte karşılaşılan problem kazının sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü ne kadar detaylı ve gerçeğe en yakın şekilde modellenirse o kadar doğruya yakın sonuç elde edilebilir. Bu durum problemi doğru tanımlama ile ilişkilendirilebilir.

3B analiz, özellikle karmaşık ve kritik projelerde daha gerçeğe yakın sonuçlar vereceği düşünülse de zaman, maliyet ve veri kısıtları nedeniyle çoğu pratik mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılamamaktadır. Bunun yerine iyi kalibre edilmiş bir 2B analizlerin de yeterli ve güvenilir sonuçlar vereceği bilinmektedir. Bu tez kapsamında basitleştirilmiş bir zemin profili özelinde bir metro kazısının gerçeğe uygun kazı aşamaları doğrultusunda oluşturacağı sonuçlar irdelenmiştir. Bu kazı senaryosu incelenirken sonlu elemanlar yöntemi ile kazı yapılacak olup Plaxis2D ve Plaxis3D yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda kesit tesirlerinin incelenmesinin yanı sıra düşey iksa elemanında oluşan deplasmanlar ve yatay destek elemanı olarak kullanılan strutlara dair kıyas sonuçları da verilmiştir. Son olarak iki boyutlu analizde ve üç boyutlu analizde yer alan aynı çevre (mevcut) yapıya dair oturma kıyaslaması da yapılarak elde edilen analiz sonuçları yorumlara ve sonuçlara eklenmiş, kıyaslamalarına dair sonuç değerlendirmesi yapılmıştır.

Bölüm ikide derin kazılar hakkında temel kavramlara yer verilirken derin kazılarda deplasman tahmin yöntemlerine ait literatür verilerine yer verilmiştir. Buna ek olarak derin kazılarda yapılan önceki çalışmalar ve elde edilen sonuçlara yer verilecektir.

Bölüm üçte materyal ve metot anlatılmış olup materyal olarak derin kazılar için önemli bir kavram olan zemin bünye modelleri anlatılırken metot olarak sonlu elemanlar yöntemi kavramı ve kullanılan Plaxis yazılımı üzerinde durulmuştur.

Bölüm dört olarak verilen bölüm derin kazılarda iksa davranışı açık kazı ve derin kazılar özelinde incelenmiştir.

Bölüm beş bir örnekleme üzerine yapılan iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerin değerlendirildiği bölüm olup yapılan modellemenin iksa sistemi üzerindeki düşey ve yatay iksa elemanlarının kıyasını içermektedir.

Bölüm altı sonuçların yorumlandığı bölümdür. Bu bölümde yapılan analiz sonuçlarının iki boyutlu ve üç boyutlu modellemeden elde edilen benzerlik ve yüzdece farklılıklarının yorumlandığı bölümdür.

Son bölümde ise derin kazılarda yapılan iksa sistemlerinin iki boyutta ve üç boyuttaki davranışı, elde edilen tesir kuvvet sonuçlar özetlenerek yapılacak olan çalışmalardaki önerilere yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölüm derin kazılar kavramını ele almış olup genel olarak derin kazılar kavramı üzerinde bilgileri içermektedir. Derin kazılar özelinde incelenen iksa sitemi kavramı ve bu iksa sistemini oluşturan düşey ve yatay elemanlar üzerinde durulacaktır. Bununla birlikte, bu tezin kapsamında yer verilecek olan sonlu elemanlar yönteminin derin kazı ile ilişkisini konu alan literatür çalışmaları incelenerek iksa sitemi üzerindeki etkilerinden bahsedilmiştir.

2.1. Derin Kazılarda Genel Kavramlar

İksa sistemi kavramı derin kazı çalışmalarında, kazı çukurunun göçmesini önlemek ve çevredeki yapıları korumak amacıyla kullanılan bir destekleme sistemidir. İksa sistemleri geçici olabildiği gibi kalıcı olarak da tasarlanabilir. Burada dikkat edilmesi gereken temel konu yönetmelik, şartnamelere uygun tasarımlar yapmak ve derin kazının amacını ihtiyaca uygun olarak belirlemektir.

Geçici destek yapısı

Tüm yüklerin gerekli emniyet ve sınır koşullarını sağlamak koşulu ile en çok iki yıl boyunca taşıyacak şekilde tasarlanacağını ön gören, iki yılın sonunda tüm yüklerin ve fonksiyonunun destek yapısı önündeki yapıya aktaracağını ve görevini tamamlayacağı kabul edilir (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022).

Kalıcı destek yapısı

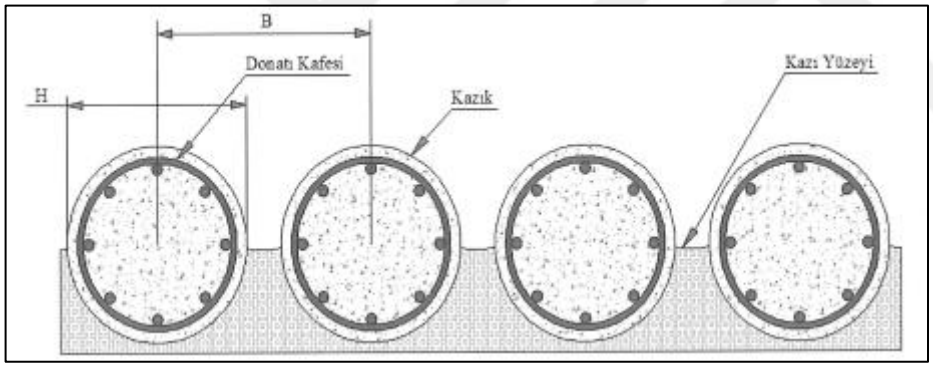
Tüm yüklerin gerekli emniyet ve sınır koşullarını sağlamak koşullarını sağlayacak şekilde inşa edilen bina veya bina türü yapının ömrü boyunca sisteme hizmet edeceği öngörülerek tasarlanan yapıdır (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022).

İksa sisteminde kullanılan düşey elemanlar

Yapılan derin kazıların desteklenmesi amacı ile yapımı birbirinden farklı duvar tipi yardımı ile bu kazılar desteklenebilmektedir. Bu destek sisteminin seçimi çeşitli kriterlere bağlı olup

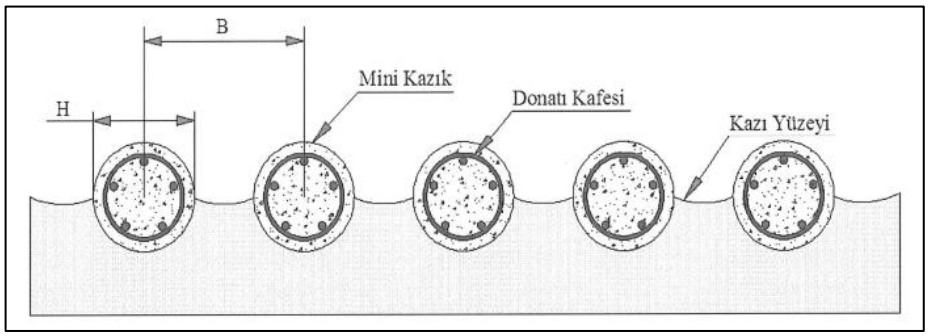
yapım yöntemine karar verirken kazı boyutuna, zemin koşullarına, yeraltında karşılaşılabilecek sorunlara, kazıya komşu yapıların düşey ve yatay oturma miktarlarına, kazı sınırlarına dikkat edilmelidir. Seçilen yöntem aynı zamanda maliyet, yapım hızı gibi etkenleri de göz önüne alarak seçilmelidir. Bu sayede hem kazı güvenliği hem de uygulanabilirliği en uygun şekilde sağlanmış olacaktır (Ergun, 2016).

Kazıklı Duvarlar: Delgi yapılarak içerisindeki zeminin çıkarılması ve içerisine önceden donatı kafesinin yerleştirilmesi ile hazır beton dökülerek imal edilen betonarme yapıdır. Bu imalat yöntemi hem pratik hem de kullanılabilirlik açısından en çok tercih edilen yöntemdir. Fore kazıklar aralıklı yapılabileceği gibi su ya da zeminden kaynaklı geçirimsizlik istendiği durumlarda kesişen olarak da imal edilebilmektedir. Çoğunlukla kullanılan kazık çapları 0,65, 0,80, 1,00 ve 1,20 m'dir (Ergun, 2016). Şekil 2.1'de kazıklı duvar imalatlarındaki tipik sistem kesiti gösterilmiştir (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022).



Şekil 2.1. Kazıklı duvar tipik sistem kesiti

Mini Kazık: Çapı 0,150 m ile 0,30 m arasında değişen, standart fore kazık yöntemine göre daha küçük çaplı kazık türleridir. Geleneksel büyük çaplı kazıklara göre daha düşük güçteki makinalarla yapılabilirler. Özellikle standart fore kazık makinalarının imal edemediği dar alanlarda, mevcut yapıların güçlendirilmesinde ve zemini buna uygun projelerde tercih edilirler. Şekil 2.2'de mini kazıklı duvar imalatlarında tasarlanan sistemin kesiti ve imalat elemanları gösterilmiştir (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022).



Şekil 2.2. Mini kazıklı duvar tipik sistem kesiti

Betonarme Perde: Kısa vadede kendini tutabilen zeminler için ya da kaya kazılarında zemin basıncını dengelemek ve çevredeki yapıların zarar görmesini önlemek için kullanılan donatı sürekliliğini sağlayan, tek yüz kalıp ile yerinde dökme yöntemi ile yapılan sürekli bir beton duvar olup Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022).

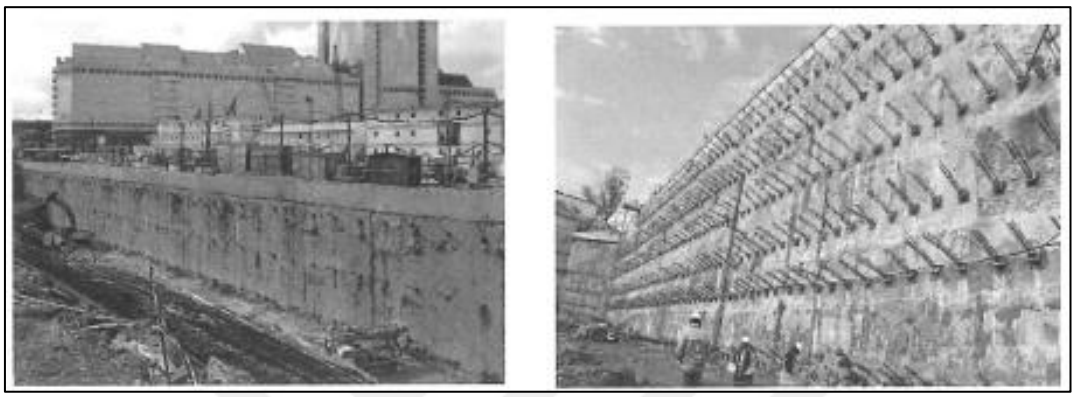


Şekil 2.3. Betonarme perde imalat detayı

Püskürtme Beton Perde: Kısa vadede kendini tutabilen zeminler için ya da kaya kazılarında uygulanan betonarme perdeye kıyasla daha düşük beton dayanımı olan beton sınıfı ile uygulanabilen bir yöntemdir. Kazı sırasında düşeyde ve yatayda donatı sürekliliği sağlanması gereklidir (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022).

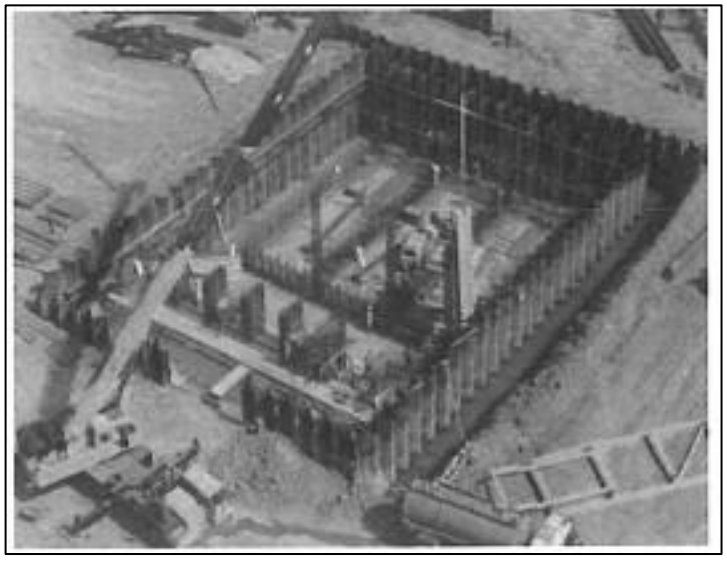
Diyafram Duvar: İstenilen kalınlıkta imal edilebilen genellikle su tablasının altında olan zeminler için tercih edilen bir yöntemdir. İmalatı yapılırken kazılan duvar boşluğu bentonit-su karışımı ile tamamen doldurulur, buradaki temel amaç görece zayıf zeminlerde kazılan

bölgenin yenilerek göçmesi engellenmektedir. Daha sonrasında hazırlanan donatı paneli içerisine yerleştirilerek istenilen beton sınıfına göre betonarme yapı tamamlanmaktadır. Şekil 2.4'te değişik panel boyutlarına göre diyafram duvar imalatları gösterilmektedir (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022). Paneller halinde imal edilmekte olup, 2 m ile 10 m arasında diyafram duvar imalatı yapılabilmektedir (Ergun, 2016).



Şekil 2.4. Diyafram duvar imalatı

Palplanş: Uzun kenarlarından birbirine yivler ile imal edilen su geçirimsizliği amaçlanan farklı kesitlerde ve boylarda oluşturulabilen çelik profil elemanlardır (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022). Yumuşak zeminlerde birden fazla kesit kalıp yardımı ile zemin içerisine çakılabilir. Bu sayede zemin içerisinde su geçirmez çelik bir duvar oluşturulur (Ergun, 2016). Şekil 2.5'te palplaş uygulamasına ait yapım yöntemini gösterilmektedir (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022).

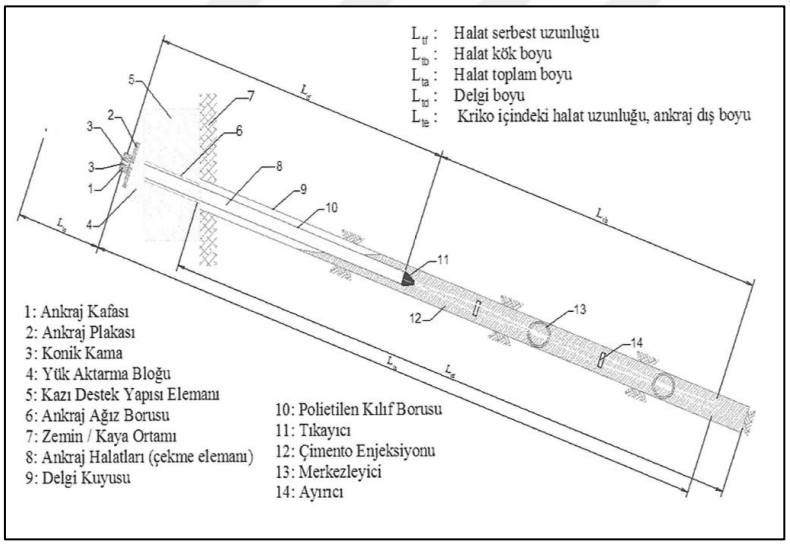


Şekil 2.5. Palplanş uygulaması

İksa sisteminde kullanılan düşey elemanlar

İksa sistemlerinde düşey taşıyıcı elemanlar konsol kazılar şeklinde yapılabileceği gibi kazı derinliği arttıkça konsol olarak tasarlanan sistem gelen yatay zemin etkisine yetmeyecek ve yatay destek olarak ek bir imalat gereksinimi doğacaktır. Bu durumda elde edilen yatay kuvvetler çeşitli iksa elemanı ile tasarlanarak dengeli bir dağılım sağlanması hedeflenmektedir. Bu sayede daha güvenilir ve daha ekonomik çözümler yapılabilmektedir.

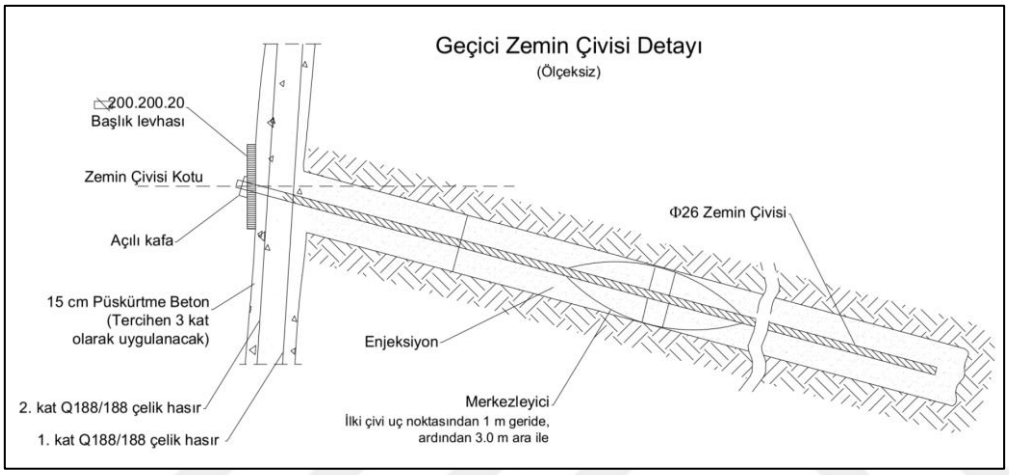
Öngermeli Ankraj: İstinat duvarları, şev stabilizasyonu, baraj yapıları ve derin kazılar gibi uygulamalarda kullanılan, zemine içerisine imal edilen, sonrasında gerilerek aktif hale getirilen çelik halatlı yapılardır. Temel faydası yüksek taşıma kapasitesi sayesinde sistemde deplasman oluşmadan önce ön germe yapılması sayesinde oluşan kuvvet azalır ve düşey destek elemanında oluşacak olan deplasmanlar kısıtlandırılmış olur. Şekil 2.1'de tipik bir geçici ön germeli ankraja ait detaylar gösterilmektedir (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022).



Şekil 2.6. Tipik öngerme halatlı geçici ankraj elemanı

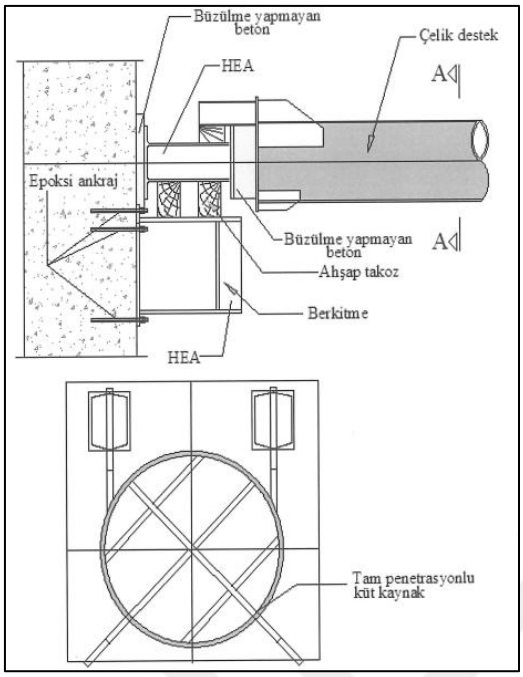
Ankraj sistemleri geçici ya da kalıcı olarak tasarlanabilmekte olup tasarımı yaparken bu doğrultuda yük katsayıları kullanılmalıdır. Geçici ankrajlar özel bir tedbir alınmadığında en çok iki yıl, alındığında ise en çok üç yıl olarak kullanılabilmektedir (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022). Kalıcı ankraj sistemleri ise yönetmelik, standartlar ve şartnamelerde belirtilen yük katsayılarına zeminin uzun dönem koşullarına bağlı olacak şekilde tasarlanan özel yapılardır.

Zemin Çivisi (Pasif Ankraj): Uygulanılan zemin veya kaya özeliğine bağlı olarak değişen çaptaki delgiler içerisine çelik çubuk yerleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu delinen bölge dipten uca genellikle çimento şerbeti ile doldurulmaktadır. Zemin çivili sitemler zemini güçlendirmeyi amaçlar, bu sayede oluşan yatay itkiler zemin içerisine belirli bir karelajla yerleştirilen zemin çivileri sayesinde gelen yükü kontrollü şekilde dağıtır ve kazı yüzeyinde rijit bir yapısal kaplama oluşmasını sağlar. Geçici zemin çivisine ait tipik çizim detayı Şekil 2.7'de sunulmaktadır.



Şekil 2.7. Tipik zemin çivisi detayı (KDYY, 2023)

İç Destek: Düşey iksa elemanlarının iç kısmına karşıdan karşıya veya çeşitli açılar ile yerleştirilen taşıyıcı elemanlardır. Bu elemanlar çelik boru, profil ya da betonarme şekilde imal edilebilmektedir. Şekil 2.8'de iç destek elemanları için tipik ve kuşak giriş bağlantı detayları gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Tipik destek elemanı ve kuşak kirişi bağlantı detayları (KDYY, 2023)

İksa sisteminde kullanılan birleştirme elemanları

Başlık Kirişi: Birbirinden ayrı olarak çalışan, diğer bir değişle aralarında herhangi bir yapısal bağlantı olmadan inşa edilen düşey iksa elemanlarının yatayda maruz kaldığı zemin itkisine karşı birlikte hareket etmelerini amaçlayan çelik veya betonarme kiriş elemanıdır.

Kuşak/Göğüsleme Kirişi: Birbirinden ayrı olarak çalışan, diğer bir değişle aralarında herhangi bir yapısal bağlantı olmadan inşa edilen düşey iksa elemanlarının düşeyde çeşitli kotlarda düşey iksa elemanının önüne imal edilen çelik veya betonarme elemanlardır. Burada asıl amaç sistemi tek olarak çalıştırmak ve yatay zemin basıncına karşı birlikte hareket etmelerini sağlamaktır.

2.2. Derin Kazılarda Deplasman Tahmin Yöntemleri

Kazı destek sistemlerinin temel amacı, çevredeki zemin itkisini diğer bir değişle zeminin yatay yöndeki hareketlerine karşı koymaktır. Bu nedenle, kazı destek sistemlerinin tasarımında, duvar hareketlerinin ve zemin yer değiştirmelerinin öngörülmesi en önemli faktörler arasındadır.

Deplasman tahminin kazı öncesinde belirlenmesinde temel yöntemler yer almakta olup kazı derinliği göz önüne alındığında en uygun yönteme başvurulmalıdır. Bu yöntemler ampirik yöntemler, analitik yöntemler ve nümerik yöntemler olarak ayrılmaktadır.

2.2.1. Ampirik yöntemler

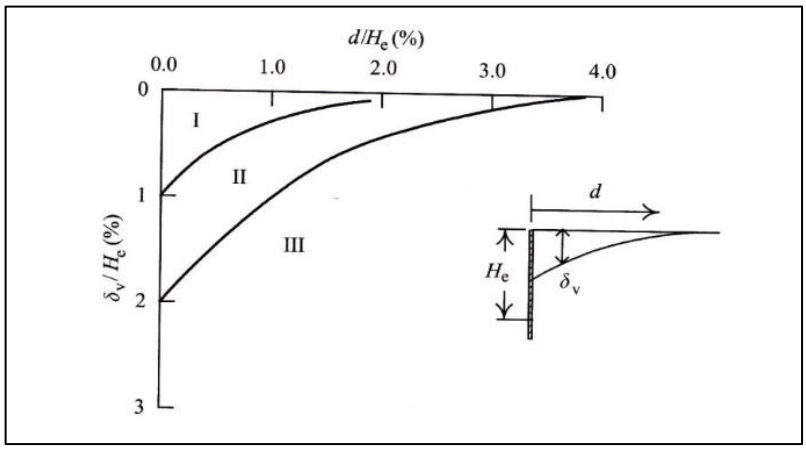
Kazı sırasında oluşacak deplasmanları öngören ilk çalışmalar ampirik yöntemler ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmaların başında Peck tarafından yapılan ve temelini saha gözlemleri sonucundan alan bir çalışma yer almaktadır. Bu çalışmada zemin oturmaları gözlemlenmiştir. Peck'in çalışmasında ele aldığı konu çelik palplanş ile yapılan bir kazıda zeminin çok yumuşak-yumuşak killerde maksimum kazının %1'i olması gerektiğini öngörmektedir. Peck bu çalışmasında yatay hareketlerin büyüklüğünü, zeminin özelliklerine ve kazı derinliğine bağlamaktadır (Peck, 1969). Peck tarafından geliştirilen bu yaklaşım Şekil 2.9'da da gösterildiği gibi zemin yüzey oturmalarının ön hesapları için geliştirilmiş bir yöntemdir.

Bu metot yardımı ile zemin içeriğine göre üç tip sınıflandırma yapılabilir.
Tip-1: Yumuşak-sert kil veya kum
Tip-2: Çok yumuşak-yumuşak kil
1. Kazı taban kotunun altında kil derinliğinin sınırlı olduğu durum
2. Kazı taban kotunun altındaki kilin derinliğinin $N_b<N_{cb}$

Tip-3: Kazı taban kotunun altındaki çok yumuşak – yumuşak kilin derinliğinin $N_b<N_{cb}$
Burada Nb stabilite faktörü olmak üzere;

$$N_b = \gamma . H_e / S_u \quad (2.1)$$

N_b: Zemin stabilite faktörü
γ: Zemin doğal birim hacim ağırlığı
H_e: Tam kazı durumundaki derinlik
S_u: Zeminin drenajsız kayma mukavemeti
N_{cb}: Taban kabarmasına karşı kritik stabilite faktörü



Şekil 2.9. Zemin yüzeyi oturmalarının tahmini için Peck yöntemi (Peck, 1969)

Bowles ise kazılardan kaynaklı yüzey oturma yaklaşımı olarak yaptığı çalışmasında verilen adımlar aşağıdaki gibi önerilmektedir (Bowles, 1986);

1. Duvar yanal deformasyonu sonlu elemanlar veya eşdeğer kiriş yöntemi ile öngörülebilmektedir.
2. Yanal deformasyon yapan zeminin hacmi hesaplanabilir (a_d).
3. Caspe (1969) tarafından önerilen yöntem kullanılarak aşağıdaki formülden etki oranı (D) belirlenir.

$$D = (H_e + H_d) \tan (45 + \emptyset/2) \quad (2.2)$$

Burada;

$\emptyset$: Zemin içsel sürtünme açısı

H_e: Tam kazı durumundaki derinlik

Kohezyonlu zeminlerde;

H_d= B, B: kazı genişliği olarak tanımlanmaktadır.

Kohezyonsuz zeminlerde ise;

$$H_d = 0.5B \tan (45 + \emptyset/2) \quad (2.3)$$

Bu bilgiler ışığında Şekil 2.10'da da detaylandırılan yöntem için;

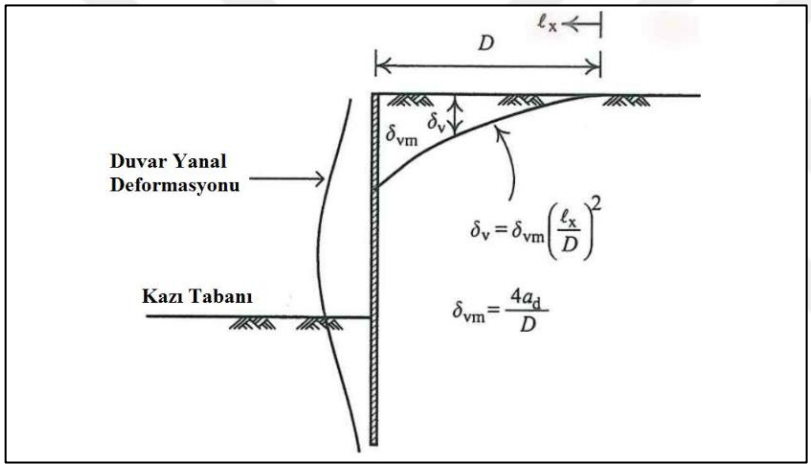
1. Düşeyde oluşan oturmanın iksa elemanında olduğu kabulü ile maksimum zemin yüzey oturması aşağıda verilen formül yardımı ile hesaplanabilir;

$\delta_{vm} = (\frac{4ad}{D})$ (2.4)

2. Oturma değerinin iksa düşey elemanına uzaklığı aşağıda verilen formül yardımı ile hesaplanabilir;

$\delta_v = \delta_{vm} (\frac{lx}{D})^2$

l_x = Duvardan D noktası kadar uzaklıktaki bir noktadaki uzaklık $\delta_v = l_x$ uzaklıktaki oturma miktarı



Şekil 2.10. Zemin yüzeyi oturmalarının tahmini için Bowles yöntemi (Bowles, 1986)

Teorik olarak drenajsız koşullarda yumuşak zeminlerde yapılan kazılarda, yanal duvar deplasmanı hemen hemen zemin yüzey oturması kadar olmalıdır. Dolayısıyla δvm değeri $4a_d/D$ yerine $3a_d/D$ olmalıdır. Buna göre Bowles'un metodu 1,33 kez daha büyük sonuçlar vermektedir (Ou ve Hsieh, 2011)

2.2.2. Analitik yöntemler

Bu yöntemler, tamamen teorik (analitik) çözümler ile saha verilerinin veya deney sonuçlarının birleştirilmesi yoluyla geliştirilmiştir. Zemin davranışı tamamen elastik kabul edilmez. Bir kısım plastik deformasyon veya mobilizasyon etkisi dikkate alınmıştır. Bu yöntemde düşey iksa elemanı elastik deplasman hesaplanır, ardından bu deplasman mobilite faktörü ile çarpılarak gerçeğe daha yakın hale getirilmiştir. Diğer bir değişle elastik çözümlere

bir mobilite katsayısı eklenmiştir. Bu katsayı, zemin-gerilme ilişkilerini daha gerçekçi yansıtacak şekilde seçildiği görülmektedir (Chang-Yu, 2006). Bu yöntemin kullanımında derin kazılar sonrası deformasyon tahmini için elastik analizler ile saha verilerini harmanlayan yarı-analitik yöntemlerin geliştirilmesi amaçlanmış özellikle kazı duvarlarının yatay deplasmanlarının saha ölçümleriyle kalibre edilmesi bu çalışmada önem göstermektedir (D.O'Rourke, 1990). Diğer bir çalışmada ise normalleştirilmiş deformasyon eğrileri sunularak analitik çözüm yöntemi uygulandığı görülmüştür. Bu çalışmada özet olarak yumuşak ile orta kil yataklarında destekli kazılar için duvar ve toprak hareketlerinin tahmini için basitleştirilmiş bir yöntem sunulmuş, yöntem, saha verisi performansı ve sonlu eleman analizlerinin sonuçları birleştirilerek geliştirilmiştir. Benzer destek sistemlerine sahip 130 yayınlanmış ve yayınlanmamış vaka geçmişinin dikkatli bir incelemesi yapılmıştır. Hem saha verileri hem de sonlu eleman sonuçları, sistem hareketleri ile taban kabarmasına karşı emniyet faktörü arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Belirlenen davranış eğilimlerine dayanarak, duvar sapmalarının ve zemin çökmelerinin maksimum büyüklüklerini ve dağılımlarını taban kabarmasına karşı emniyet faktörü ve toprak ve yapısal sistemin diğer önemli parametrelerinin bir fonksiyonu olarak tahmin etmek için boyutsuz grafikler geliştirilmiştir (Mana ve Clough, 1981).

2.2.3. Nümerik yöntemler

Derin kazılar sonucu oluşan deplasmanların tahmini için standart bir yöntem bulunmamaktadır. Mevcut tahmin yöntemleri, ampirik gözlemler veya sayısal modelleme (nümerik yöntemler) esas alınarak geliştirilmektedir. Aşamalı olarak gerçekleştirilen derin kazıların karmaşıklığı ve zemin koşullarının büyük farklılıklar göstermesi nedeniyle, sınırlı verilere dayanılarak oluşturulan ampirik bağıntılar, deplasmanların hassas bir şekilde tahmini için her zaman yeterli olmayabilir. Bu sebeple, ampirik yöntemlere kıyasla derin kazı sistemini daha gerçekçi şekilde modelleyebilen nümerik yöntemler tercih edilmektedir. Geoteknik parametrelerin belirlenmesi ve uygun zemin modeli seçimi gibi süreçler hâlâ çeşitli zorluklar barındırsa da derin kazı performansı nümerik yöntemlerle en doğru şekilde modellenebilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan nümerik analizlerde, alınacak tasarım kararı doğrultusunda kazı geometrisi ve ön tasarım, saha koşullarını en iyi şekilde yansıtacak uygun bir zemin bünye modeli ile gerekli zemin parametreleri kullanılarak yazılım ortamında

modellenir. Analizler, drenajlı ve drenajsız koşulları temsil edecek şekilde farklı senaryolar için gerçekleştirilebilir. Bu sayede, tasarım aşamasında meydana gelebilecek olası deformasyonlar önceden tahmin edilebilmektedir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular, şartnamelerde belirtilen deformasyon ve güvenlik kriterleri doğrultusunda kontrol edilir.

2009 yılında Kung tarafından yatay iksa hareketini etkileyen faktörler üç grup altında sınıflandırılmış ve kazının karmaşık bir yapı-zemin etkileşimi olduğu vurgulanmıştır (Kung, 2009). Bu faktörler;

A. İçsel faktörler

1. Stratigrafi: Zemin mukavemeti, zemin sertliği, zeminin gerilme geçmişi ve yeraltı suyu koşulları gibi. Genel olarak, daha düşük mukavemet ve sertliğe sahip zeminlerde kazı için daha büyük iksa deformasyonu meydana gelebilir.
2. Saha ortamı: Bitişik binalar ve trafik koşulları gibi. Kazı alanına bitişik yüksek binalar ve yoğun trafik ekstra iksa deformasyonu oluşturabilir.

B. Tasarımla ilgili faktörler

1. Destek sisteminin özellikleri: İksa düşey elemanının rijitliği, yanal eleman rijitliği ve iksa uzunluğu gibi. Düşük kazık/diyafram duvar rijitliği kullanıldığında yanal deplasmanların artması beklenebilir.
2. Kazı geometrisi: Kazının genişliği ve derinliği dahil. Genel olarak, oluşan deplasmanlar yaklaşık olarak kazı derinliğine orantılıdır.
3. Strut ön gerilimi: Strut ön gerilimi strut ile duvar arasında iyi bir bağlantı kurmayı amaçlar. Ancak ön gerilim deplasmanları azaltabilir.
4. Zemin iyileştirme: Jet grouting yöntemi, derin karıştırma yöntemi, sıkıştırma ile grouting yöntemi, elektro-ozmoz yöntemi ve payandalar gibi. Zemin iyileştirme yöntemleri zeminin dayanıklılığını ve rijitliğini arttırabilir.

C. İnşaatla ilgili faktörler

1. İnşaat yöntemleri: Yukarıdan aşağıya yöntem, aşağıdan yukarıya yöntem ve ankraj yöntemi gibi.
2. Aşırı/Fazla miktarda kazı: Sistemde planlanan destek sitemi kurulumundan önce aşırı kazı, beklenenden daha büyük deplasmanlara neden olabilir.
3. Önceki inşaat: Diyafram duvarının inşasından önce hendek kazısının etkisi gibi.
4. Beton döşeme levhasının inşası: Beton döşeme levhasının termal büzülmesi, iksa deplasmanlarının artışa neden olabilir.
5. İnşaat dizisinin süresi: Strut imalatının kurulumunun veya döşeme inşaatının süresi. Killi zeminlerde kazı yapıldığında, strutların yerleştirilmesi veya döşeme imalatı için geçen süre beklenenden daha uzun sürede yapılırsa, kilin konsolidasyonu gibi nedenlerle daha büyük deplasmanlara neden olabilir.
6. İşçilik: Daha kötü işçilik daha yüksek deplasmanlara neden olabilir.

2.3. Literatürde Yer Alan Önceki Çalışmalar

Nümerik yöntemler kullanılarak derin kazıları etkileyen faktörler çeşitli araştırmacılar tarafından kapsamlı biçimde incelenmiştir. Yapılan çalışmalar aşağıda özetlenerek sunulmaktadır.

Zemini yumuşak kilde yapılan 12,2 m derinliğindeki bir kazının yakınında bulunan üç katlı bir okul binasına olan etkisi incelenmiştir. Bu kazıya dair kazı destek yapısı olarak verilen genel bilgiler kazının kesişen kazıklı sistemle kazıldığı ve buna ek olarak yatay destek elemanında ise ankraj kullandığı görülmektedir. Okul binasına dair verilen bilgilerde ise betonarme taşıyıcı sisteme sahip okul binasında kazıdan kaynaklanan deformasyonlar ve hasarlar incelenmiş, bina hareketleri eğimölçerler ve optik ölçüm noktaları ile takip edilmiştir. Okulda oluşan hasarlar, genellikle yük taşımayan duvarlardaki 300–500 mm uzunluğunda ince çatlaklar şeklinde olup, birkaç çatlak 6 mm'den geniştir. Okulun kazıya yakın kısımlarında oturma olurken diğer kısımlarda ise yükselme davranışı gözlemlenmiştir. İlk hasarlar sonrasında kazı derinliğinin 5,5 metre olduğu ve elde edilen verilerden yapılan hesaplamalar sonucunda açısal deformasyonun 1/940 seviyesine ulaştığı gözlemlenmiştir. Proje sonunda ise en büyük açısal deformasyonun 1/300 seviyesine kadar ulaştığı belirtilmektedir. Vaka incelemesinden sonra yapının hasar almaması için elde edilen nihai

açısal deformasyonun 1/1000'den küçük olması gerektiğini vurgulanmaktadır (Bryson ve Finno, 2002).

Çevre yapıları ile derin kazıyı inceleyen diğer bir çalışma ise San Francisco, California'daki Embarcadero sahil bölgesinde gerçekleştirilen MUNI Metro Turnback projesi kapsamında yer almaktadır. Burada zemin yumuşak zemin olup yaklaşık 30 m derinliğinde kazı yapılmıştır. Projede, çevredeki oturmaya hassas binaların etkilenmesini en aza indirmek amacıyla, kazı ve destek sistemleri, zemin deformasyonlarını belirli sınırlar içinde kontrol edecek şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan düşey destek elemanı diyafram duvar olarak belirtilmiş ve diyafram duvarın yapımı sırasında oluşan deplasmanların çevre yapılara etki de gözlenmiştir. Diyafram duvarların yapımı sırasında zeminin yumuşak kil olması beton dökümü sırasında önemli bir mesafeye kadar uzanan deformasyon etkileri oluşturduğunu göstermektedir. Nihai durumda ise yapım sırasında oluşan deformasyonlar, çevre yapılarda oturmaları sınırlandırmaya çalışırken sistem davranışının hedeflenen değerlere ulaşmasını olumsuz etkilediği belirtilmiştir (Koutsoftas, 2000).

Nguyen ve Likitlersuang (2021) çalışmasında, Bangkok'ta bulunan bir yeraltı MRT istasyonunun derin kazı analizinde, zeminin boşaltılmamış kayma mukavemetinin mekânsal değişkenliğinin etkilerini incelemiştir. Araştırmada rastgele sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, zemin yüzeyinde meydana gelen oturmalar ve yan duvar hareketleri değerlendirilmiştir. Bangkok'un zemin yapısında bulunan kil tabakalarının kayma mukavemetindeki iki boyutlu değişkenlik, rastgele alan teorisi ve Monte Carlo simülasyonu yardımıyla modellenmiştir. Mohr–Coulomb modeli kullanılarak deformasyon davranışı analiz edilmiş; kazının stabilitesi ise dayanım azaltma yöntemi ile güvenlik faktörü üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, zeminin mekânsal değişkenliğinin hem yüzey oturmalarını hem de yan duvar hareketlerini önemli ölçüde etkilediğini ve kazı ilerledikçe güvenlik faktöründe dikkate değer değişimlere yol açtığını ortaya koymuştur (Suched Likitlersuang, 2021).

Ankara kilinde yapılan 20 metrelik derin bir kazı çalışması incelenmiş olup kazı sırasında oluşan yanal deplasmanlar ve zemin davranışı, inklinometre ölçümleriyle elde edilen veriler kullanılarak değerlendirilmiş, alınan veriler doğrultusunda model girdilerinin geri analiz yöntemi ile yapıldığı gözlemlenmiştir. Analizlerde, zemin parametrelerinin belirlenmesinde SPT-N değerleriyle korelasyon kurulmuş ve Plaxis yazılımının farklı zemin modelleri (MC,

HS ve HSsmall) kullanılarak kazı davranışı simüle edilmiş, sonuçlarda sert Ankara kilinde gerçekçi deformasyon modülü değerlerinin kullanılmasının, analiz sonuçlarının saha gözlemleriyle daha uyumlu hale gelmesini sağladığını göstermektedir. Çalışma temelinde Ankara kilinde derin kazıların analizinde zemin parametrelerinin doğru belirlenmesinin ve uygun zemin modellerinin seçilmesinin önemini vurgulamaktadır (Calışan, 2009).

Ankara'nın Söğütözü bölgesinde kazı derinliği yaklaşık 20 m olan bir derin kazı incelemesi yapılmıştır. Burada çapı 65 cm olan kazıklar yatayda 6 sıra ankrajlar ile desteklenmektedir. Derin kazı sonrasında elde edilen saha verilerinde maksimum yanal deplasman 26 mm olarak ölçüldüğü gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler analiz edilmiş ve geri analiz sonuçları, saha verileriyle uyumlu olup olmadığı incelenmiştir. Yapılan çalışma sonrasında modelin gerçek davranışı yansıttığı gösterilmiştir (Bozkurt ve Akbas, 2023).

Taipei National Enterprise Center (TNEC) kazı projesi yapım yöntemi olarak "top-down" (yukarıdan aşağı) inşaat yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışma olduğu, diyafram duvarların beton döşemelerle desteklendiği belirtilmektedir. Yapılan ilk çalışmalarda düzlem şekil değiştirme (plane strain) koşulları altında ana gözlem kesitinde deformasyon ve gerilme–şekil değiştirme davranışlarını incelemiştir. Yapılan son çalışmada ise saha gözlemleri ve sonlu eleman analizleri ile zeminin ve duvarın üç boyutlu hareketlerini değerlendirdikleri görülmektedir. Sonuçlar özetlendiğinde kazı alanı dışındaki zeminin merkeze doğru hareket etme eğiliminde olduğunu ve bu eğilimin kazı derinliği arttıkça büyüdüğünü göstermektedir. Ayrıca, köşe bölgelerinde oluşan "köşe etkisi" nedeniyle köşe yakınındaki oturmalar, merkez bölgeye göre daha az olduğunun gözlendiği belirtilmektedir. Clough ve O'Rourke tarafından önerilen ampirik oturma tahmin bağıntısının hem düzlem şekil değiştirme hem de diğer koşullar için uygun olduğu, üç boyutlu sonlu eleman analizleri ile duvar deformasyonları ve yüzey oturmaları makul bir doğrulukla tahmin edilebildiği kıyaslanmıştır. Parametrik çalışmalar ise kazının son aşamalarına yakın başlatılan bölgesel kazıların kazı davranışı üzerinde çok az etkisi olduğunu ortaya koymuştur (Chang-Yu Ou, 2000).

Diyafram duvarlarında beklenenden fazla görülen yatay yer değiştirme ve buna bağlı zemin oturması, çevredeki binalarda hasara yol açan başlıca nedenlerden olduğu ve bu nedenle, bodrum kazıları sırasında, özellikle yakındaki yapıların bütünlüğü açısından, diyafram duvar deplasmanının en aza indirilmesi amacı ile yapılan bu çalışmada altı katlı bir bodrum

kazısında diyafram duvar deformasyonları gözlemlenmiştir. Deformasyonların azaltılması amacıyla çalışma kapsamında jet grout (enjeksiyon) yöntemi kullanılmıştır. Kazı alanı içerisindeki zemin kitlesinin bir bölümü jet grout yöntemiyle iyileştirilerek, pasif direncin artırılması ve duvar deplasmanının sınırlandırılması hedeflenmiştir. Jet grout uygulamasının etkileri nümerik analizlerle değerlendirilmiş ve saha ölçümleri, iyileştirme yönteminin etkinliğini doğrulamıştır (Hsii-Sheng Hsieh, 2003).

Londra'daki Crossrail projesine ait, çalışmada kullanılan geometri, inşaat aşamaları ve zemin koşulları, Moor House yakınlarında yapılması planlanan bir derin kazı alanına dayanmaktadır. Kare ve dikdörtgen şeklindeki kazılar analiz edilmiş ve genellikle modelleme amaçlarıyla kullanılan eksenel simetrik ve düzlem şekil değiştirme (plane strain) analizleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın amacı, kare ve dikdörtgen kazılarda istinat duvarlarının modellenmesi sırasında, duvarın arka yüzünde aşağı yönde etkili kayma gerilmelerinin oluşturduğu momenti azaltmanın yararlı olabilecek olası yollarını araştırmak ve herhangi bir 3D sonlu elemanlar analizi için en uygun yaklaşım konusunda yol göstermesi hedeflenmiştir (Zdravkovic, 2005).

Bu bölümde derin kazılarda temel kavramlar üzerinde durulmuş genel kavramlar özetlenmiş derin kazıların yazılımsal temelini oluşturan kavramlar üzerine durulmuş ampirik ve analitik yöntemler özetlenerek sonlu elemanlar yönteminin temelini oluşturan nümerik çözümler hakkında bilgi verilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Yapılan çalışmalarda amaçlanan, gerçeğe en yakın simülasyonunun yapılarak oluşacak zemin etkilerinin yapı üzerindeki etkisinin irdelenmesidir. Bu kapsamda zeminin tanımlanmasında etkiyen faktörler ve nasıl modellenmesi gerektiği büyük önem taşımaktadır. Zemin tanımlamasının yanı sıra tanımlanan programlar ve bu programlardaki zemin bünye modellerinin karşılaşılan problemi gerçeğe uygun şekilde yansıtası önem taşımaktadır. Bütün bu etkiler göz önene alınmış ve sistem davranışını simüle etmek için Plaxis2D ve Plaxis3D programları seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar kendi içerisinde değerlendirilirken, iç destek sistemi sonuç kıyaslarında Plaxis2D'ye ek olarak SAP2000 program çıktıları da kullanılmıştır.

3.1. Materyal

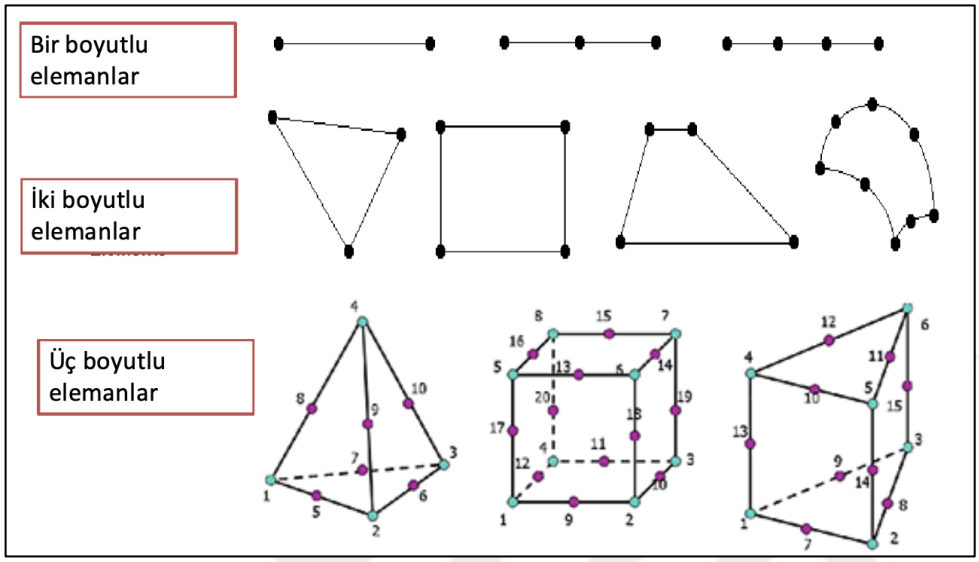
Yapılan çalışmaya esas olan materyal zemin davranışı ve bu davranışın derin kazılardaki iksa sistemine etkisidir. Modelleme yapılırken en önemli ve sonuçlara etki edecek konu gerçekte karşılaşılan zeminin analitik ortamda doğru modellenmesi ve yorumlanmasıdır. Bu doğrultuda zemin verilerinin analizlere hangi materyal olarak tanımlanacağı bu bölümde bahsedilmiş olup zemin davranışının gerçeğe en yakın davranışı göstermesi amaçlanmıştır.

Zemin içeriği çeşitlilik gösterdikçe (kum, çakıl, kil, silt ya da farklı formasyonlardaki kayalar) modellenmesi değişiklik gösterecektir. Bunun nedeni doğada bulunan hiçbir malzeme aynı davranışı göstermemesidir. Dolayısıyla analitik çözüm yöntemleri ve yazılımlar gerçeğe en uygun davranışa yakınsayacak şekilde oluşturulur. Bu doğrultuda zeminleri tanımlamak ve zemin davranışını en gerçekçi modelleyebilmek için bünye modelleri oluşturulmuştur.

3.1.1. Zemin bünye modelleri

Zemin yapısı oluşumu gereğince üç fazdan oluşmaktadır. Bu fazlar hava, su ve dane olacak şekilde nitelendirebilmektedir. Zemin bu bileşenleri göz önüne alındığında heterojen bir yapıda olup anizotrop olarak davranmaktadır. Elastik olmayan (elasto-plastik) bir davranış gösterir ve yükleme koşullarına, drenaj durumuna göre içerdiği bileşenler doğrultusunda

farklı davranmaktadır (Huvaj, 2017). Şekil 3.1'de zemin bünye modellerinde yer alan elemanlara ait boyut farklılıkları ve bu boyutlara göre elemanların düğü noktaları gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Sonlu eleman tipleri (Huvaj, 2017)

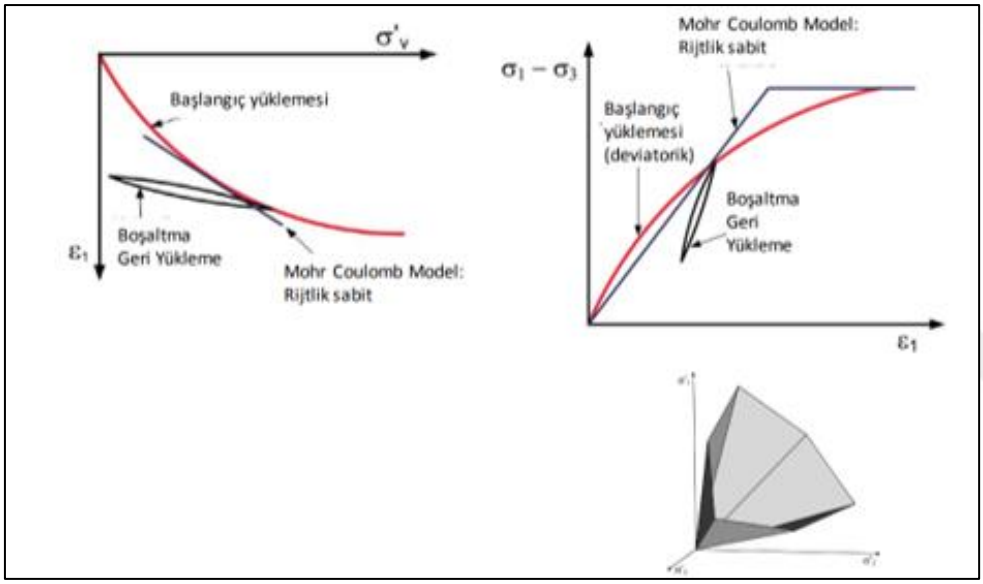
Malzeme bünye modelleri gerçek davranışa yakın olma derecesine göre doğrusal ve doğrusal olmayan elastik modeller, doğrusal ve doğrusal olmayan elastik-ideal plastik modeller, izotropik pekleşen tek yüzey plastik modeller ve izotropik pekleşen çift yüzey plastik modeller olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Berilgen, 2014).

Zeminler tane dağılımlarına, boşluk suyunun varlığına, drenaj durum, zamana bağlı davranışına, sıkışma ve ayrılma durumuna göre davranışı değişkenlik gösteren karmaşık bir malzeme yapısındadır (Kılıç, 2017). Zemin için malzeme bünye modelleri ve kaya için malzeme modellerinin ayrılması gerçekte karşılaşılan davranışa en uygun yöntem öngörülerek model yapılması gerekmektedir.

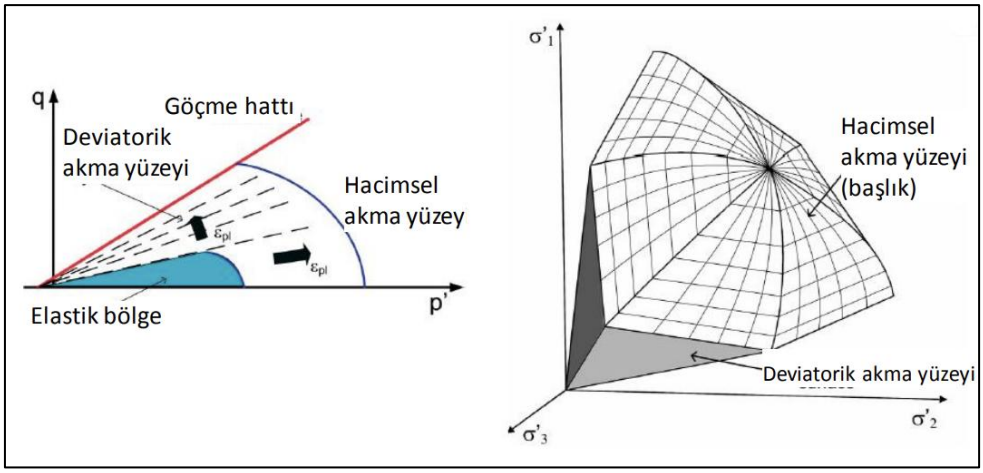
Zemin bünye modelleri olarak verilen modeller; Mohr-Coulomb, Hiperbolik modeller (Koedner (1963), Duncan-Chan (1971) ve Hardening Soil model (Schanz,1996)), Cam Clay modeller (Cam Clay, Modifiye Cam Clay), Soft Soil Model) ve diğerleri (Lade (1977), Sekiguchi-Ohda (1977) olarak gösterilebilir (Berilgen, 2014).

Kaya bünye modelleri olarak ise Mohr-Coulomb, Hoek-Brown ve Jointed Rock gösterilebilir (Berilgen, 2014).

Elde edilen zemin/kaya bilgileri nasıl davranacağı konusunda bilgi vermekte olup uygun bünye modeline göre modellenerek gerçek davranışına en uygun şekilde modellenir. Bu doğrultuda başlangıç yüklemesi, yükleme-boşaltma durumu, hacimsel akma yüzeyi gibi davranışı doğrudan etkileyen etkenler gereğince sistem davranışı değişiklik göstermektedir. Şekil 3.2 ve 3.3'te verilen bünye modelleri genel olarak kullanılan durumları göstermekte olup karmaşık zemin/kaya davranışını cebirsel ifadeler ile yansıtmaktadır.



Şekil 3.2. Elastik-İdeal plastik bünye modeli (Berilgen, 2014)



Şekil 3.3. İleri düzey plastik modeller (Berilgen, 2014)

3.2. Metot

Derin kazılarda oluşabilecek etkilerin gerçeğe en yakın sonuçlarının önceden en doğru şekilde tahmin edilebilmesi ve elde edilen sonuçlara göre kazının sonlandırılması kazı sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda en güvenilir yöntem nümerik yöntemler olup en bilinin hali ile sonlu elemanlar çözüm prensibi ile derin kazılar simüle edilmektedir (Ansys, 2025). Sonlu elemanlar yöntemi ile aşamalı kazılar yapılarak zemin ve yapı davranışı kısa ve uzun dönemde modellenebileceği gibi çevre yapı etkileri de sisteme dahil edilerek karmaşık durumda oluşabilecek tüm etkiler ve sonuçları elde edilebilmektedir. Çalışmanın bu bölümüne ele alınan ana konu sonlu eleman analizlerinin ve Plaxis yazılımının temel çalışma prensiplerini özetleyerek gerçekte karşılaşılan derin kazılardaki iksa davranışına olan etkisini irdelemektir.

3.2.1. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analizleri

Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık problemlerde ortaya çıkan sorunları daha basite indirgeyerek sayısal olarak çözmeyi mümkün kılan karmaşık diferansiyel denklemler yardımı ile sonuca ulaştırabilen gelişmiş bir matematiksel yöntemdir (Ansys, 2025). Sonlu elemanlar yöntemi olarak ifade edilen çözüm yöntemi temelinde tanımlanan ortamı küçük parçalara bölerek her elemanın bağlandığı düğüm noktalarına (node'lara) diferansiyel denklemeler tanımlanması ve bu denklemlerin çözümü ile mümkün olmaktadır. Bu düğüm noktalarında belirli sayıda ve çeşitte serbestlik derecesi (degrees of freedom) olan matriksler çözülmektedir (Huvaj, 2017). Gerçeğe en yakın çözüm yöntemi kullanılan programın tanımlamalarını doğu yorumlamak ve probleme en uygun yöntem/metodu belirlemektir. Bu doğrultuda girdilerin doğru girilmesi alınacak sonuçların doğruluğu ile doğrudan ilişkili olacaktır.

3.2.2. Plaxis yazılım programı

PLAXIS, 1980'lerin ikinci yarısında Hollanda Delft Teknoloji Üniversitesi'nde (TU Delft) ve Hollanda Altyapı ve Su Yönetimi Bakanlığı (Rijkswaterstaat) ile iş birliği içinde bir araştırma projesi olarak başlamış ve araştırma, altyapı projelerindeki zemin yapıların davranışını simüle etmek için sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan gerilme-gerinim modellerini birleştirmiştir (Bentley, 2023). Plaxis yardımı ile birçok kontrol

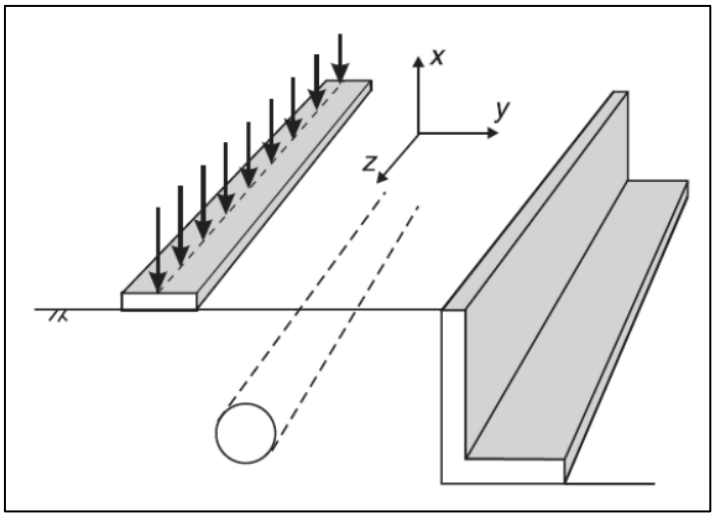
yapılabilmektedir. Bunlardan başlıca olanları stabilize analizleri, zemin-yapı etkileşim analizleri, zeminin düşey yükler altındaki deformasyon ve oturma tahkikleri, zemin dinamiği ve deprem analizleri, zaman bağımlı analizler (konsolidasyon, drenajlı zemin davranışı gibi), su davranış analizleri ve gömülü yapı (tünel ve yeraltı yapıları) kazı sistemleri olacak şekilde özetlenebilmektedir (Bentley, 2023).

3.2.3. Plaxis2D ve Plaxis3D

Plaxis yazılımı gerçekte karşılaşılan problemlere uygun modelleme yapılabilmektedir. İki boyutlu analizlerde düzlem kesit incelenebilirken üç boyut etkisine ihtiyaç duyulan durumlarda sistem davranışı hacimsel olarak değerlendirebilir. Analiz yöntemine karar verirken modellenecek problemin geometrik özellikleri (simetrik olup olmaması gibi) en temel yöntemdir. Şev kazıları, boyuna yönde tekrarlanan yapısal eleman benzerliği ve buna bağlı olarak analiz edilen iksa sistemleri, tünel yapıları ve yüzeysel temel analizlerinde davranış tahmin edilebilir davranış sergiler ve üç boyut etkisinin sonuçları etkilememesi beklenir. Ancak karmaşık geometriye sahip yapılarda, gelen yüklerin dağılımı detaylı analiz yapılmasının gerekliliğini göstermektedir. Bu durumda iki boyutlu analiz yöntemleri yeterli kalmamakta özellikle asimetrik yapı davranışlarında (tünel bağlantıları, iksa sistemlerinde köşe etkisinin olması, temel altı kazıklarında grup etkisi gibi) üç boyutlu analiz yapılması kaçınılmazdır (Bentley, 2023). Diğer etkenler olarak düşünülebilecek olan etken ise analiz süresi, hassas sonuçlara erişim ve donanım gereksinimleri olarak verilebilir. Bu durumda en uygun yöntem seçilmeli ve bu doğrultuda sonuçlandırılmalıdır.

<u>Düzlem şekil değiştirme kavramı</u>

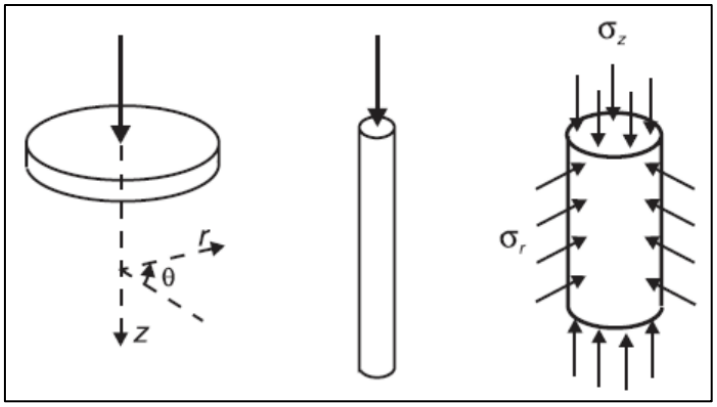
Düzlem şekil değiştirme durumu bir yapı veya yanının bir bölümünün tek bir düzlemle sınırlandırıldığı durumu temsil eder. Bu dururumda cismin parçacıklarının yalnızca bir düzlem içinde yer değiştirdiği kabul edilen bu şekil değiştirme durumu, düzlem şekil değiştirme (plane strain) olarak bilinir (Megson, 2019). Şekil 3.4'te düzlem şekil değiştirme bünye modelinde kullanılan metot gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Düzlem şekil değiştirme durumu (Huvaj, 2017)

Eksenel simetri /aksisimetri) kavramı

Karşılaşılan problem tipine bağlı olacak şekilde bazıları rotasyonel simetri özelliğine sahiptir ve bu yapılar eksenel simetrik olarak çözülebilir. Simetri özelliği Şekil 3.5'te ilk görselde gösterilen θ yönünde bir yer değiştirme göstermediği ve r ve z yönündeki yer değiştirmelerin de θ yönünden etkilenmediği temel kabulü ile aksisimetrik davranış göstermektedir. Bu duruma verilen en uygun yapılar üniform ve/veya merkezden yüklü dairesel temeller, silindir seklindeki numuneler, tekil kazıklar ve şaft yapılarıdır (Huvaj, 2017).



Şekil 3.5. Eksenel simetrik modelleme (Huvaj, 2017)

Bölüm kapsamında ele alınan temel konu derin kazılar kavramında bahsedilen zemin etkisinin analitik çözümlerde nasıl ele alındığı ve bu etkilerin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesidir. Yapılan bu çalışmada kullanılan analiz programı Plaxis2D ve Plaxis3D olup yazılım sonlu elemanlar metodu ile çalışmaktadır.

4. DERİN KAZI ETKİSİNDEKİ İKSA DAVRANIŞI

Derin kazılar kazılan zemin ya da kaya türüne bağlı olarak çevre yapı ilişkisi ve zeminin stabilitesi dikkate alan kazı türüdür. Yeraltı otoparkları, metro istasyonları ve tünellerin yapımı için derin kazılar vazgeçilmezdir. Derin kazı yöntemleri en genel bakış ile açık kazılar ve iksa sistemleri olan derin kazılar olarak iki başlık altında değerlendirilebilir.

4.1. Açık Kazı ile Yapılan Derin Kazılar

En geleneksel kazı yöntemlerinin başında gelir. Bu kazı yöntemi yapılırken çevre koşulları önemlidir. Yapımı planlanan açık kazının çevrede yapı olmaması (varsa da mevcut binaya sınırlar dahilinde etki edilmesi) alt yapıların kontrol edilmesi ve zeminin bu kazıya uygun şev açıları ile kazılması gerekmektedir (KDYY, 2023). Şev kazılarının uzun dönem ve kısa dönem durumlarına göre kontrol edilmesi, şev yapısı kalıcı ise depremli analiz yapılarak gerekli güvenlik katsayılarının sağlanması yüksekliği 15 m'den daha derin kazılarda ve dolgu şevlerinde ise 10 m'yi geçen her 10 m'lik yükseklikte 5 m genişliğinde palye yapılarak toptan göçme durumu kontrol edilmelidir. Uzun dönem ve geçici durumu temsil eden şev kazılarında güvenlik faktörü 1,5 ve üzerinde olmalıdır, bu hesaplarda maksimum kayma dayanım zemin parametreleri kullanılır. Uzun dönem deprem analizlerinde ise güvenlik analizinin 1,01'den büyük olduğu kontrol edilmeli ve deprem analizi verisi olan Kh (eşdeğer yatay yük katsayısı) analizin yapıldığı bölge dikkate alınarak hesaplanmalıdır (Yüksel Proje, 2007).

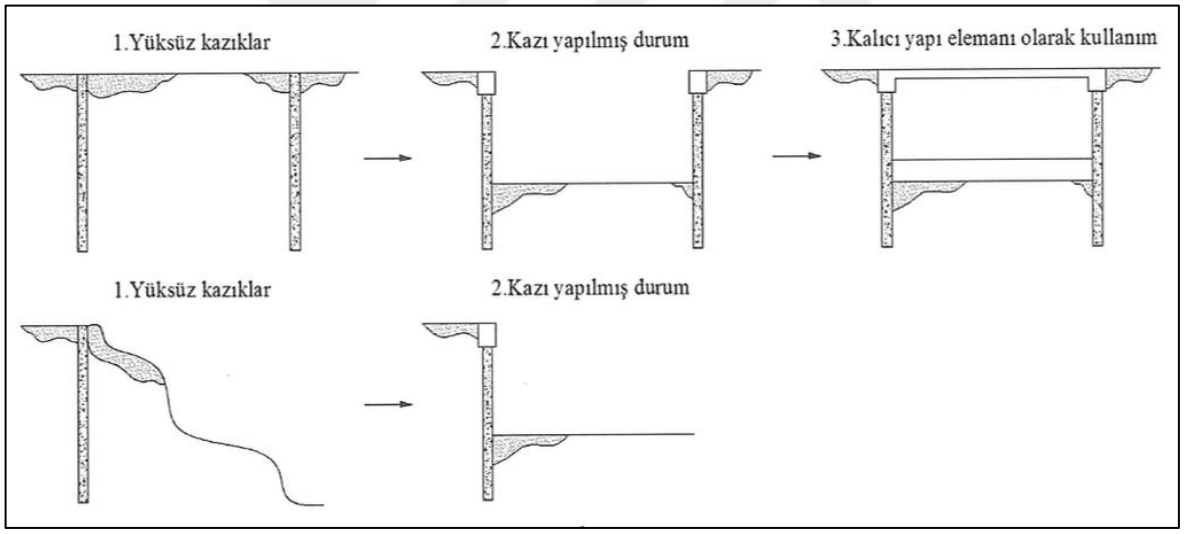
4.2. İksa Sistemi ile Yapılan Derin Kazılar

Günümüzde sayısı az sayılamayacak kadar derin kazı yapılmasının ardından sorun yaşanmakta olup bu sorunların başında da yeterli tedbir alınmaması, teorinin doğru uygulanamaması ve yetersiz uygulama gibi nedenler gelmektedir. Bu hususta dikkat edilmesi gereken kazının geçici ya da kalıcı olma durumu gözetilmeksizin, yaşayan bir süreç olduğunun bilincinde olup bu derece önemli derinliklerde gerekli önlemelerin aldığından emin olunmalıdır. Özellikle şehir içinde karşılaşılan derin kazılarda açık kazı seçeneği kısıtlı alanlar dışında mümkün olmayıp yerini iksa sitemi adı verilen dayanma yapıları ile desteklenmelidir. Bu yapılar da tıpkı diğer karşılaşılan problemler (yatay deplasman, düşey

oturma, eğilme problemi) gibi riskler taşısa da aletsel gözlem yöntemleri ile izlenmeli gerekli önlemler süreç içerisinde kontrollü şekilde alınmalıdır. Başarılı bir derin kazı teori ile tecrübenin ortak bir ürünü olarak tasarlanmalı, süreç içerisinde tedbirler alınmalıdır.

4.2.1. Konsol sistemler

Tek sıra kazık veya palplanşlar ile yapılabilmektedir. Bu kazıların 8 m'yi geçmemesi önerilmekte olup kazı derinliği arttıkça iki sıra kazık (birbirine başlık kirişi ile bağlanmış olarak) bir sitem ile tasarlanmalıdır. Bu tasarımlar geçici ya da kalıcı olarak imal edilebilir. Kalıcı olması durumunda sistem davranışı uzun dönem parametreleri ile plastik davranışı yansıtan çözüm yöntemleri ile zemin ve betonarme eleman kontrolleri yapılır (Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları, 2022). Konsol olarak kazılabilir sistemlerin uygulama alanları Şekil 4.1'de verilmektedir.

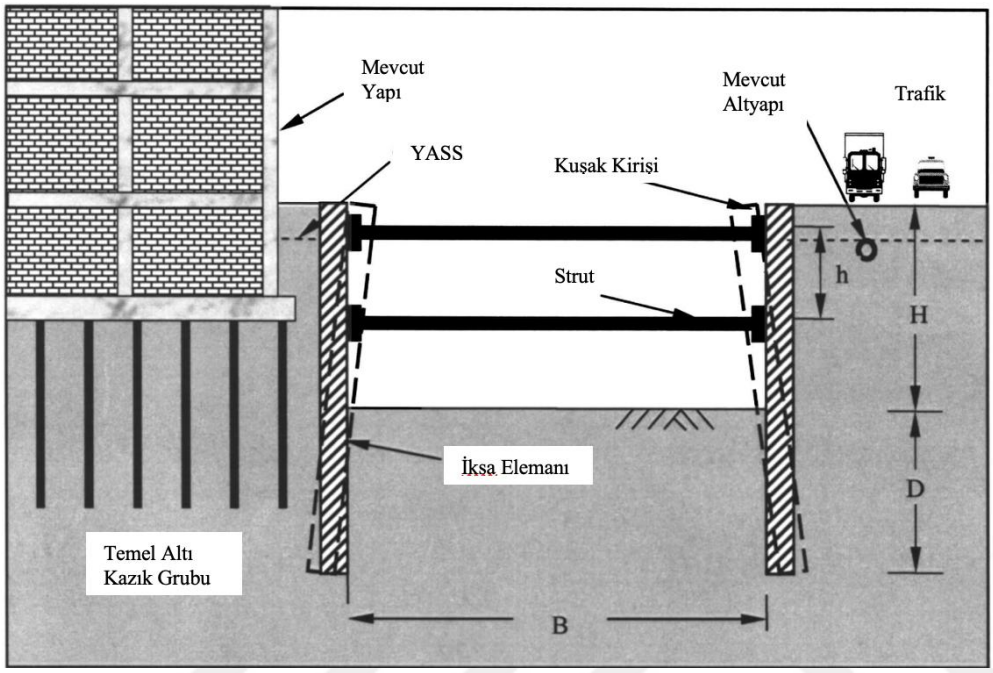


Şekil 4.1. Konsol kazık uygulama alanları

4.2.2. İçten destekli iksa sistemleri

İksa sisteminin arkasında bulunan zemin/kaya malzemesinin tutmayı amaçlayan genellikle düşeyde kazık ya da diyafram duvar olarak tercih edilen, duvar önüne ise yatay desteklerin yerleştirilmesi ile oluşan sitemlerin geneline içten destekli iksa sistemleri denilmektedir. Çalışma mekanizması olarak yatay zemin basıncı düşey iksa elemanına yükünü aktarırken, bu düşey eleman yükün bir kısmını kendisi karşılarken bir kısmını da iç destek elemanı olarak çalışan yatay destek elemanına aktarır (The Constructor, 2009-2021). Şekil 4.2'de

verilen tipik iksa kesitinde iten destekli bir kazı örneklemesi verilmektedir. Burada verilen h, strutlar arası düşey mesafe; H, yüzeyden kazı tabanına olan derinlik; D, iksa elemanı soket boyu ve B ise iksa iç yüzeyi arası mesafeyi ifade etmektedir.



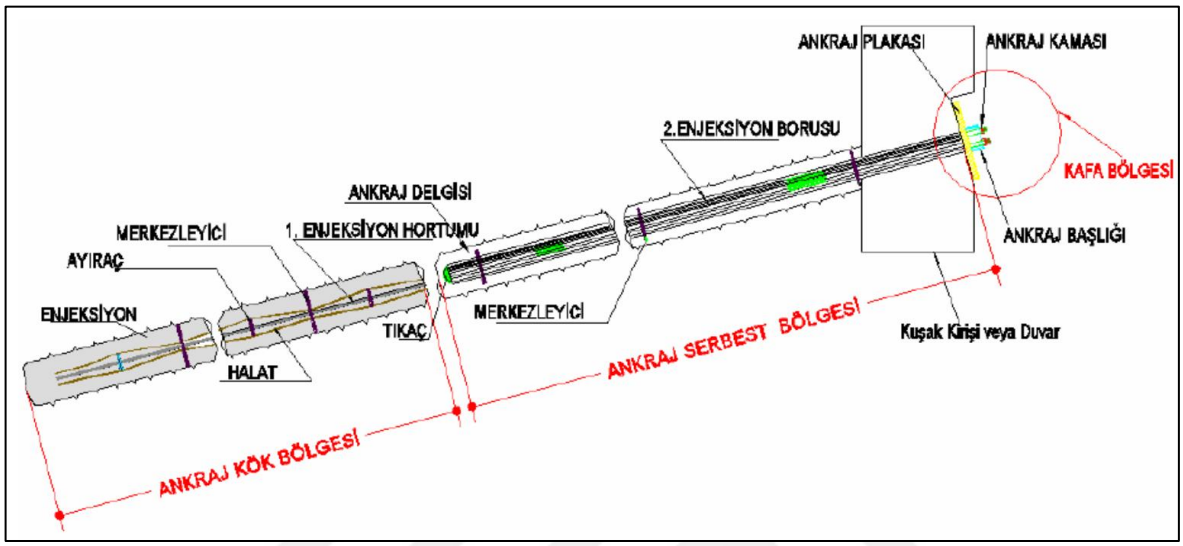
Şekil 4.2. Tipik içten destekli iksa sistem kesiti (Daş, 2020)

4.2.3. Ankrajlı iksa sistemleri

Ankraj, korozyona karşı dayanıklı, yüksek mukavemetli özel çelik halatlardan oluşan ve kaya ya da zemin içine yerleştirilen öngermeli bir yapısal elemandır. Bu sistem, uygulanan gerilme kuvvetlerini sağlam zemine aktararak betonarme ya da fore kazık gibi yapısal elemanların stabilitesini sağlar. Zemin ankrajlarının tasarımında ise ankraj kökünün boyutları, gömme derinliği, grup etkisi ve toptan göçme tahkiki gibi faktörler büyük önem taşır (Demir, 2025).

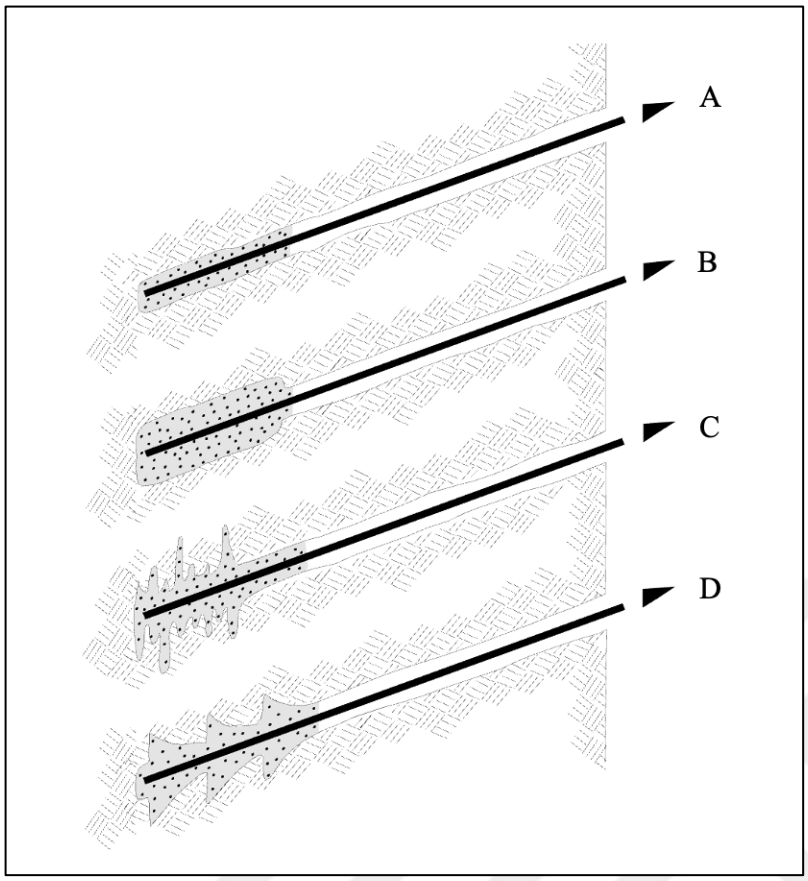
Yapıldığı zemin özelliklerine göre kullanılan ankraj tipi ve tasarımı değişkenlik göstermektedir. Ankraj çekme kuvvetini taşıyan yanal destek elemanı olarak kullanılabilirken, gelen yükü daha iyi bir zemine ya da kaya birimine taşıyan taşıyıcı bir eleman olarak da tasarlanabilmektedir (Ergun, 2016).

Kullanım alanına göre kalıcı ve geçici olarak ikiye ayrılır. Geçici ankrajlar iki yıllık bir süre için tasarlanır. Kalıcı ankrajlar tasarım süresi boyunca düşünülür ve bu doğrultuda tasarlanır. Ankrajın temel bileşenleri serbest boy, kök boyu ve ankraj kafa bölgesi olarak üç bölümde incelenebilir, Şekil 4.3'te tipik bir kesit verilmektedir (Demir, 2025).



Şekil 4.3. Ankraj tip kesiti (Demir, 2025)

Ankrajlı iksa sistemleri içinde bulundukları zemin içeriğine göre de dört ana başlıkta incelenebilir. Bunlar; A tipi ankrajlar (kayalarda uygulanır), B tipi ankrajlar (genellikle kohezyonsuz zeminlerde uygulanır), C tipi ankrajlar (hem kohezyonlu hem kohezyonsuz zeminler için uygundur) ve D tipi ankrajlar (kohezyonlu zeminlerde uygulanır) (Federal Highway Administration, 1999). Şekil 4.4'te zemin içeriğine göre ayrılan bu dört tip içi öngörülen ideal kök bölgesi davranışını göstermektedir.

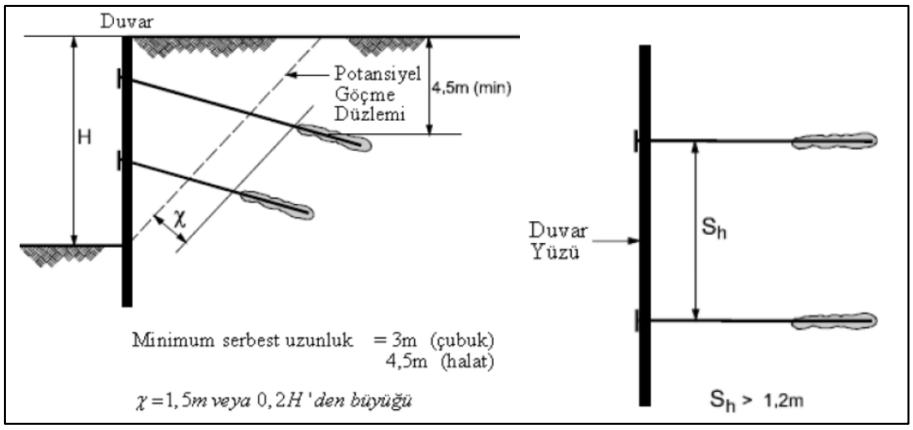


Şekil 4.4. Zemin tipine göre ankraj türleri (Federal Highway Administration, 1999)

Derin kazılarda ankraj tasarımında önemli olan diğer bir konu ise ankraj kök bölgesinin birbiri ile ilişkisidir. Bu durum etkileşimi sınırlandırmak için gerekli olup minimum iki kök arasındaki mesafe 1,2 m'den daha az olmamalıdır. Ankraj kök boyu ise kayada 3 m'den az 10 m'den çok olmaması gerekirken kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde de bu değerler önerilmektedir (BS 8081, 1989).

Ankrajlı derin kazı tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken diğer bir konu ankraj serbest boyudur. Bu durum içine yapılacak olan jeolojik verilere göre en kritik yerden alınan kesit özelinde seçilmeli ve minimumda verilen kriterlere uygun olmalıdır.

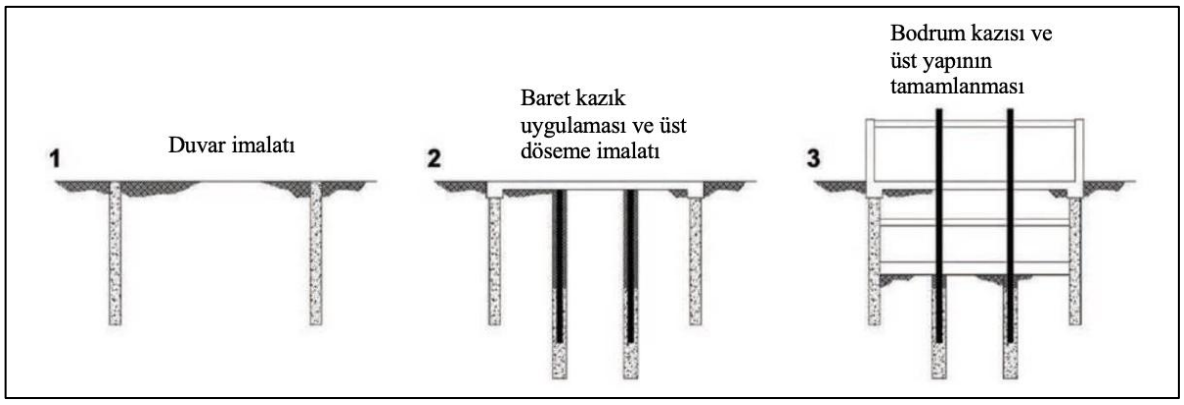
Kök bölgesi serbest bölgeden minimum olarak önerilen değer H kazı derinliği olmak üzere H/5 veya 1,5 m'den daha uzak bir noktadan başlatılmalıdır (Demir, 2025). Diğer bir yaklaşıma göre ise potansiyel göçme düzleminden 1,5 m veya 0,2H (hangisi daha büyük ise) daha uzaktan başlatılmalıdır (Federal Highway Administration, 1999). Ankraj kök ve serbest boyu için istenen bu minimum kabuller Şekil 4.5'te kesit ve plan gösterimi olarak verilmektedir.



Şekil 4.5. Ankraj kök ve serbest boy tipik kesit ve plan gösterimi

4.2.4. Yukarıdan aşağıya imal edilen iksa sistemleri

Kalıcı yapı iç destek sistemlerinin geçici kazı yapılırken de kullanıldığı yukarıdan aşağıya doğru imal edilerek yapılan yapım yöntemidir. Bu metot ile kat döşemeleri bodrum perdesi olarak tasarlanan betonarme elemana yatay destek elemanı görevi göstererek yaparak en alt kazı kotuna inilmesi ile kazı tamamlanır. Bu yapım yöntemi derim bodrumlara sahip üst yapı projelerinde ve yeraltı otoparkı, altgeçitler ve metro istasyonları gibi şehir içi altyapı diğer bir değişle gömülü yapılarda kullanılır. Yapımı tercih edilen zeminler genellikle ankraj yapılamayan zeminlerde ya da geniş açıklıklı strut yapımının da zor olduğu minimum düzeyde iksa hareketine izin verilen kazılarda tercih edilir. Bu yapım yöntemi kullanıldığında sistem hem geçici durumdaki zemin yüklerine karşı hem de kalıcı durumdaki etkilere karşı tasarlanmalıdır (Geotech, 2025). Yukarıdan aşağıya yapım yöntemi olarak bilinen ve terminolojisi "Top-Down" olarak verilen bu imalat metoduna dair tipik kesit gösterimi Şekil 4.6'da verilmektedir.

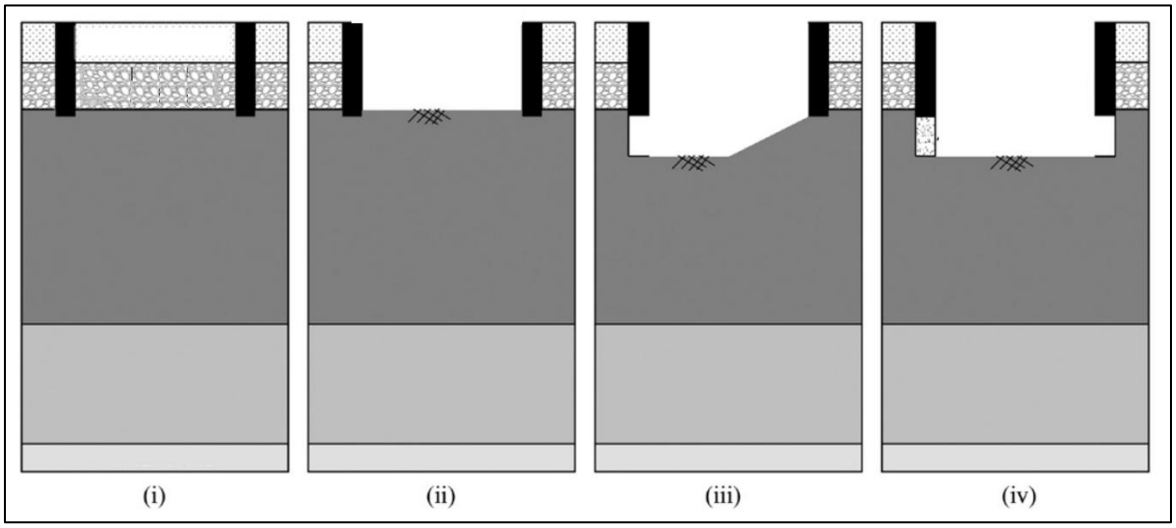


Şekil 4.6. Yukarıdan aşağı (Top-Down) imalat yönteminin tipik kesiti

4.2.5. Eksenel simetrik kazı iksa sistemleri

Zemin basıncının dairesel olarak sisteme eşit yük getirdiği su deposu, gömülü silo temelleri, dairesel metro şaftları gibi yapıların kazılarında kullanılan kazı iksa sistemidir. Bu kazı iksa sitemi hesaplarında diğer yöntemlerden farklı olarak çembersel ve radyal gerilmeler dikkate alınır. Kazı derinliği arttıkça gelen zemin basıncı yanal destek elemanı olarak kullanılan kuşak kirişleri ile desteklenir. Bu kuşak kirşleri betonarme olabileceği gibi çelik kirişler yarımı ile de desteklenebilmektedir. Dairesel zemin gerilmeleri kendi içerisinde geometrik özelliğinin verdiği avantaj ile daha stabil yapılar olup zayıf zeminlerde çok daha güvenli kazı yapılmasını sağlamaktadır (FHWA-NHI 18-024, 2018).

Eksenel simetrik kazılar genelde kendi içerisinde stabilize olan yapılar olarak görülmektedir. Şekil 4.7 ile sunulan görsel tipik bir eksenel simetrik kazının kazı aşamalarını göstermekte olup (i) kazının görece zayıf zonuna düşey iksa elemanın (kazık, mini kazık gibi) uygulandığı fazı gösterirken, (ii) olarak verilen ikinci kazı adımında ilgili derinliğe kadar kazı yapılıp ardından (iii) olarak verildiği gibi kısmı kazılar yardımı ile kazı güvenli şekilde ilerletilir, (iv) olarak verilen aşamada ise kazılan bölgelere püskürtme beton uygulaması yapılır. Bu şekilde kazı istenilen derinliğe kadar güvenli bir şekilde kazılır. Kazı derinliği arttıkça ve yanal zemin basıncı arttıkça hesaplar doğrultusunda iç destek sistemi olarak ring kirişleri (kuşak kirişleri) uygulaması da yapılabilir (ISSMGE, 2017).



Şekil 4.7. Eksenel simetrik kazı yöntemi ile tipik bir kesit (ISSMGE, 2017)

Bu bölüm kapsamında derin kazılarda iksa sistemini konu alınmıştır. İksa siteminde yer alan temel davranış sükünette var olan zemin yatay basıncının kazı ile aktif zemin davranışına dönmesidir. Bu davranış sonucunda oluşan toprak basıncı iksa sistemi elemanları ile dengelenmekte olup tasarım açısından önemli bir unsurdur. Bahsi geçen iksa davranışı konsol kazılarda, içten destekli kazılarda ve ankrajlı iksa davranışlarda değişiklikler gösterse de hepsinde ortak olarak ele alınan derin kazıda oluşacak olan aktif toprak basıncının doğru değerlendirilmesi ve zemine uygun iksa davranışın kazı destek sisteminde kullanılmasıdır.

5. ÖRNEKLEME ÜZERİNE YAPILAN 2B VE 3B ANALİZLER

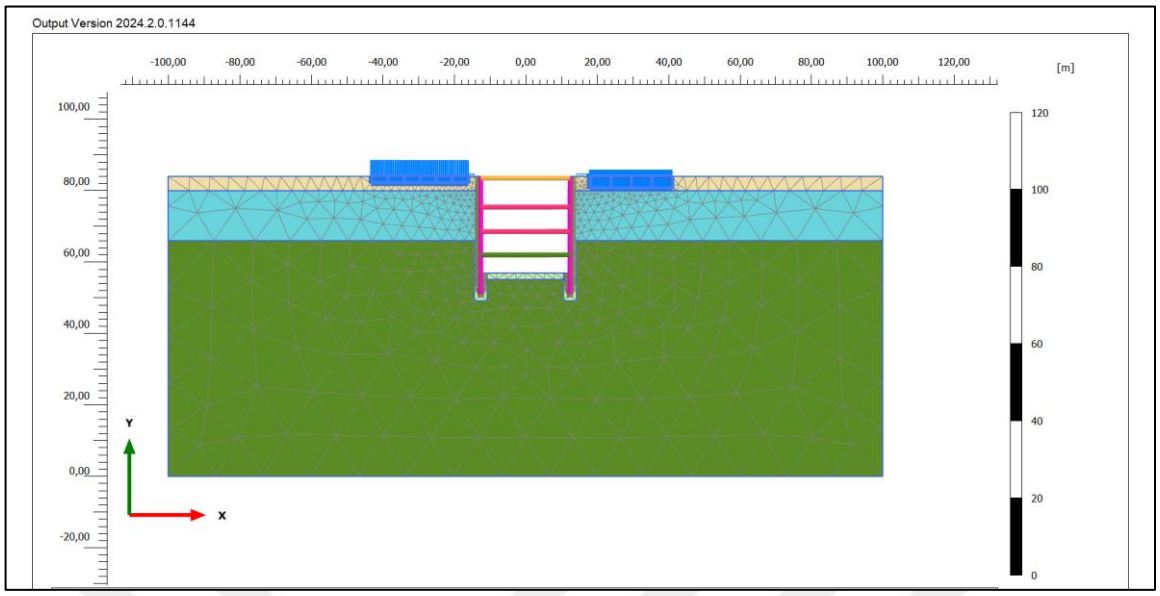
Derin kazılar günümüzde şehirleşmenin etkisinde kaçınılmaz bir hale gelmiştir. Hem ulaşım da hem de yer üstü yapılarının mevcudiyeti ile yer altına da yapılaşmaların kaçınılmaz olması gömülü yapıları daha da önemli hale getirmektedir. Bu doğrultuda yapılacak olan derin kazıların çevre yapı etkileşimini ve kendi iç sistemlerini kontrol altında tutarak en kısa sürede gerçeğe en uygun yaklaşımla projelendirmek ve bu kazıyı mühendislik normlara uygun ekonomide çözmek, kısacası optimum çözüme ulaşmak amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda her derin kazının iki boyutta ya da üç boyutta analiz edilmesi ve sonuçlarının kıyaslanması karmaşık projelerde, kısıtlı verilerle mümkün olmamaktadır. Bu çalışmanın amacı aynı problemi, aynı girdi verileri kullanarak hem iki boyutta hem de üç boyutta analiz ederek uygulanabilirlik açısından süre ve donanımsal pratiklik sağlayan sonucun elde edilebilmesinin araştırılmasıdır. Bu çalışma sonucunda iki boyutlu analiz sonucundan elde edilen verilerin üç boyut analiz yapılmadığı durumda da oransal olarak yorumlanabilmesi amaçlanmaktadır.

5.1. Sonlu Eleman Girdileri

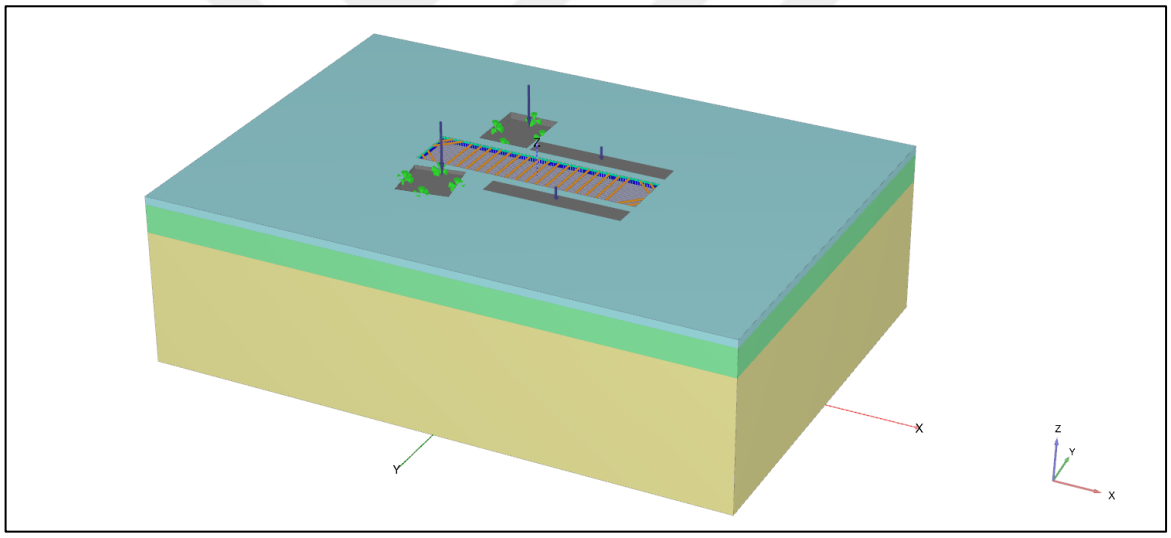
Çalışma kapsamında seçilen derin kazı bir metro istasyon kazısıdır. Seçilen metro istasyonunun iki cephesinde de yapılaşma bulunması, şehir içinde yapılan kazılarda çevre yapı etkileşimine de dikkat edilmesi gereğince seçilmiştir.

5.1.1. Model geometrisinin tanımlanması

Arazi kotları incelendiğinde düz bir yerde olduğu bilinen, çevrede yapılaşmaların olduğu standart geometrilere sahip metro istasyonu modelleme açısından değişkenlik göstermeyen bir yapıdadır. Bu doğrultuda kazı derinliğinin yaklaşık 27 m olması nedeni ile model sınırları kazı destek yönetmeliği gereğince minimum koşullar doğrultusunda modellenmiştir. Şekil 5.1'de ve Şekil 5.2'de sırası ile iki boyutta ve üç boyutta kurulan modeller verilmektedir.



Şekil 5.1. Plaxis2D analiz modeli



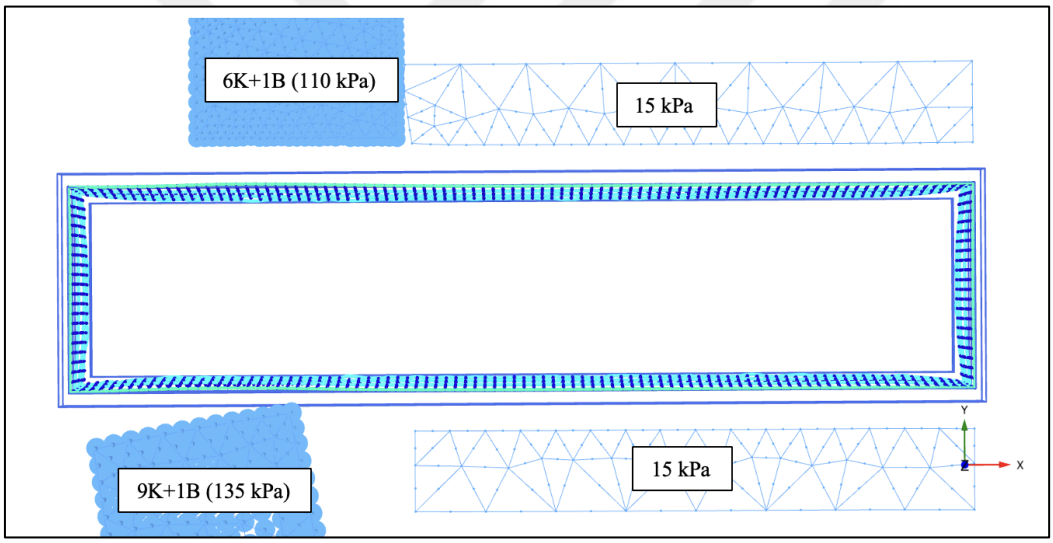
Şekil 5.2. Plaxis3D analiz modeli

İstasyon yapısı 21,80 m genişliğinde 107,80 m boyundadır. Çevrede iki adet yapı bulunmakta olup kuzeyde yer alan bina altı kat bir bodrum yapısına sahip iken; güneyde yer alan bina istasyona daha açılı şekilde inşa edilmiş dokuz kat bir bodrumu bulunmaktadır. Yapı ağırlıkları ve yerleşimi açısından modellere dahil edilmiş, yapı bulunmayan bölgelerde trafik durumu ve inşaat yapımı sırasında oluşabilecek çeşitli yükleme koşulları da göz önüne alınarak sabit yük verilmiştir. İstasyon kısa kenarları ise eşit yük gelmemesi durumunu da oluşabilecek dengesiz yükleme koşulu göz önüne almak amacı ile boş bırakılmıştır. Çizelge 5.1'de modele girilen bina/yapı yük bilgilerine ait özet kabuller verilmektedir.

Çizelge 5.1. Bina/Yapı Plaxis girdileri

Bina/Yapı Konumu	Kat Bilgisi	Bodrum Bilgisi	Temel Derinliği (m)	Kazıktan Merkezine Uzaklığı (m)	Alınan Bina/Yapı Yükü (kPa)
Planda Kuzeyde Kesitte Kazı Bölgesinin Sağında	6	1	3	4 ile 7 (Değişken)	110
Planda Güneyde Kesitte Kazı Bölgesinin Solunda	9	1	3	3 ile 7,5 (Değişken)	135

Verilen yapı girdileri aynı kabuller ile Şekil 5.3'te Plaxis3D'den alınan görsel üzerinde de gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Plan kesit, çevre yüklemeler

5.1.2. Malzeme bünye modellemesi

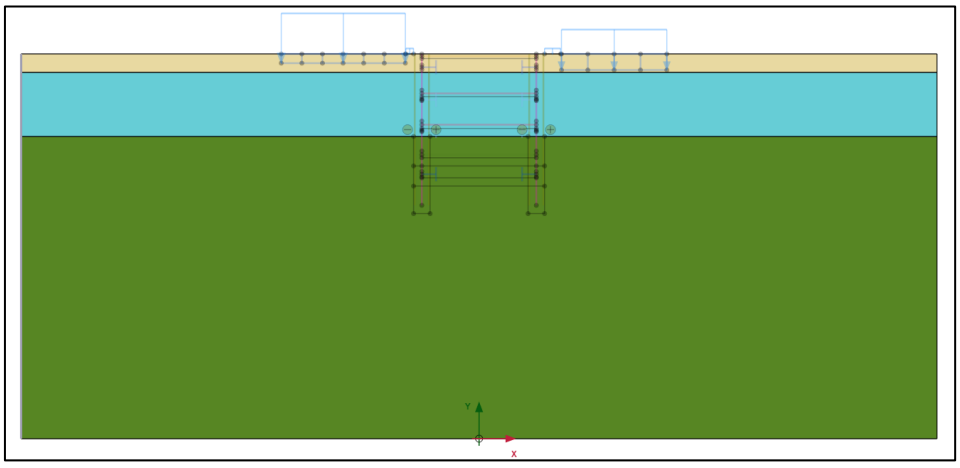
Seçilen bölge zemini incelendiğinde ilk 4 m'si dolgu olarak nitelendirilen, dolgu tabakasının altında 14 m derinliğinde zeminleşmiş killi kireçtaşı, kiltaşı-marn ardalanması olarak tanımlanan birim altında model sonuna kadar zayıf-orta dayanımlı kireçtaşı-kiltaşı-marn ardalanması görülmektedir. Görülen kayaların ayrışma seviyesi W3-W4 olarak tanımlanmaktadır. İstasyonun bulunduğu bölgede ölçülen yer altı su seviyesi yüzeyden 8 m derinliktedir. Kaya için parametre tayini yapılırken kayanın kazı sırasındaki mekanik örselenmesi de dikkate alınarak analizlerde kazı sırasında görülen örselenme kaynaklı bölge örselenme faktörü (D) olarak 0,7 ile parametre tayini ile yapılmış örselenmeden

etkilenmeyen kaya parametreleri örselenmeden parametre seçilmiştir. Bu durum Hoek'un makalesinde detaylandırılmıştır (Hoek, Carranza-Torres ve Corkum, 2002). Yapılan çalışma gereğinde elde edilen zemin/kaya parametreleri aşağıda sunulmaktadır. Çizelge 5.2'de Plaxis zemin girdileri özetlenmiş olup aynı kabuller hem 2B analizde hem de 3B analizde kullanılmıştır.

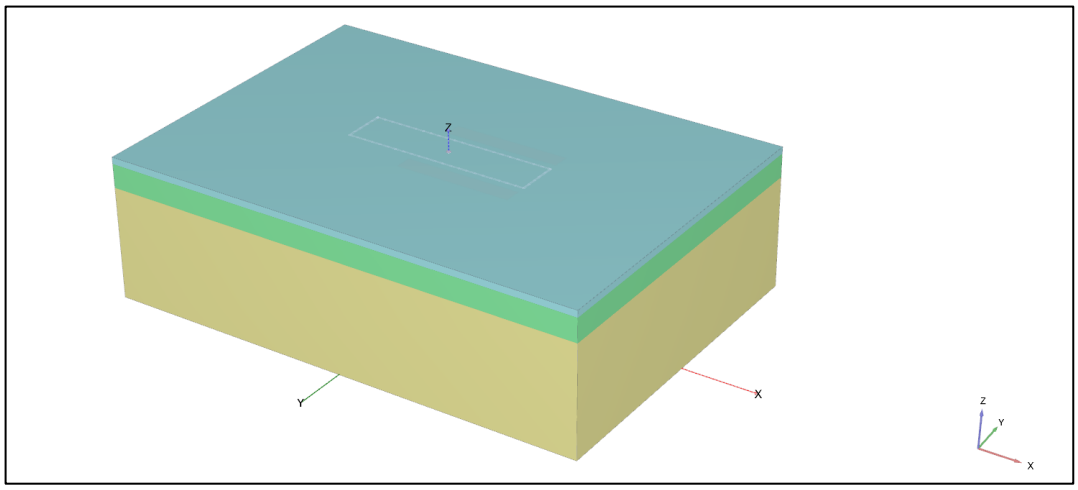
Çizelge 5.2. Plaxis zemin girdi verileri

Derinlik (m)	Tabaka Betimlemesi	Birim Hacim Ağırlık γ (kN/m^3)	Efektif Kohezyon c' (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı ϕ (°)	Deformasyon Modülü E' (MPa)
0.0-4.0	Dolgu	18	5	25	15
4.0-18.0	Zeminleşmiş Killi Kireçtaşı-Kiltaşı-Marn Ardalanması	20	15	27	40
18.0-…	Orta Dayanımlı-Zayıf Kireçtaşı-Kiltaşı-Marn Ardalanması (W3-W4) (D=0)	23	70	27	140
18.0-…	Orta Dayanımlı-Zayıf Kireçtaşı-Kiltaşı-Marn Ardalanması (W3-W4) (D=0.7)	23	40	18	55

Kabul edilen Plaxis zemin girdileri derinlikleri de göz önüne alınarak her iki analiz programında da değişken renkler kullanarak modellenmiştir, zemin model girdileri Şekil 5.4'te ve Şekil 5.5'te verilmektedir.



Şekil 5.4. Plaxis2D zemin modellemesi



Şekil 5.5. Plaxis3D zemin modellemesi

Plaxis yazılımının sağlamış olduğu kullanım el kitabında ve literatür verilerinden elde edilen bünye modelleri göstermektedir ki gerçeğe en yakın davranışı veren bünye modeli sonuçları doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle dolgu ve zeminleşmiş kaya modellemelerinde pekleşen emin modeli olarak gösterilen Hardening Soil (HS) kullanılması, zeminin yükleme boşaltma durumunu daha doğru simüle etmekte ve oluşan gerilmeleri daha gerçekçi oluşturmaktadır. Diğer yandan kaya olarak görülen birimlerde ise kayanın oluşum mekanizması gereği pekleşen bir yapıda değil davranışının kırılgan (brittle) bir malzeme olmasından kaynaklı Mohr-Coulomb malzeme modeli ile daha doğru modellendiği belirtilmektedir. Bu bilgiler ışığında, çalışma kapsamında dolgu ve zeminleşmiş killi kireçtaşı-kiltaşı-marn ardalanması bünye modeli Hardening Soil (HS)-Pekleşen zemin modeli kullanılmış olup orta dayanımlı-zayıf kireçtaşı-kiltaşı-marn ardalanması olarak adlandırılan birim için Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır.

5.1.3. İksa elemanları

Kazılması planlanan metro istasyonu için yapılan zemin incelemesi, yer altı su seviyesinin durumu ve kazılacak alanın geometrik özellikleri detaylıca incelenmiş olup iksa sistemi seçilmiştir. İksa sistemi olarak düşeyde aralıklı kazık yapılması ve yatay destek elemanı olarak ise içten destekli strut (boru çelik eleman) kullanılmıştır. Kazı derinliğinin yaklaşık 27 m olduğu bu örneklemede kazık soketlerinin kayaya soketlenmesi de göz önüne alınarak kazı tabanından 6 m olarak belirlenmiştir. Kazı aynası 100 cm çapında 120 cm aralıklı fore kazıklar ile desteklenmiştir. Yatayda ise bir tanesi başlık kirişinde olmak üzere dört farklı kotta strut kullanılmış, kullanılan strut aralığı 5 m olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Kullanılan strutlar gelen yüke göre optimize edilmiş ve farklı kotlarda farklı strutlar kullanılmıştır, detaylı bilgiler Çizelge 5.3'te sunulmaktadır.

Çizelge 5.3. Çelik strut özet bilgi tablosu

Kullanıldığı Yer	Çelik Stut Tipi	Betonarme Kiriş Tipi
1.Sıra	812,8 x 15,9 mm	120 x 90 cm Başlık Kirişi
2.Sıra	1219,2 x 20 mm	100 x 130 cm Kuşak Kirişi
3.Sıra	1219,2 x 20 mm	100 x 130 cm Kuşak Kirişi
4.Sıra	1219,2 x 15,9 mm	100 x 130 cm Kuşak Kirişi

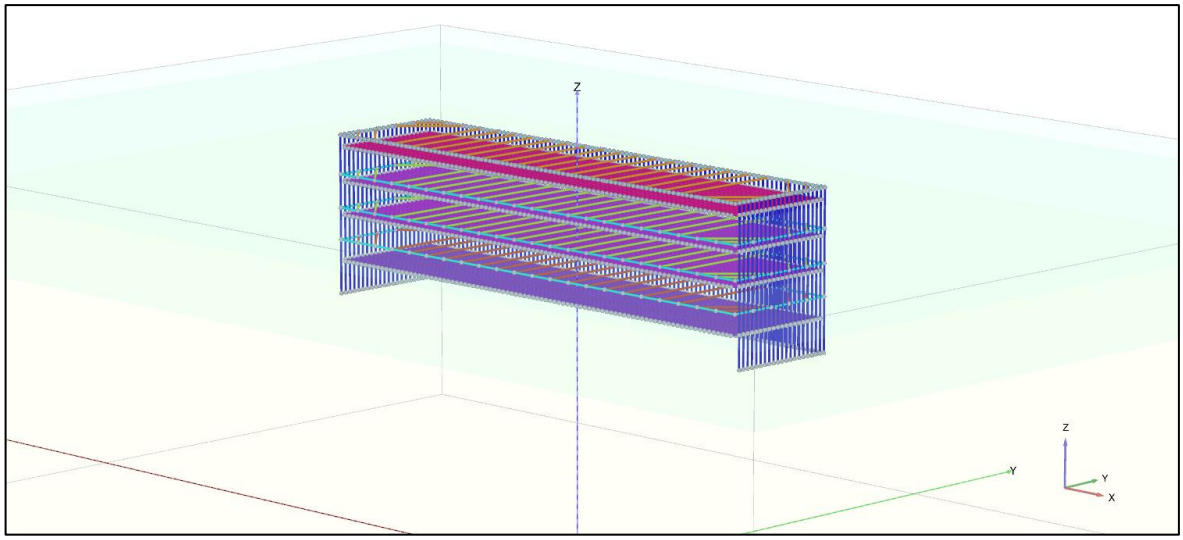
5.2. Kazı Aşamaları

Modelleme yapılırken sonuç doğrulunu etkileyen en önemli unsurlardan biri yapımı planlanan kazı adımları ile modellemede yapılan kazı adımlarının paralellik göstermesidir. Kazı adımlarının değiştirilmesi gelen yükün değişmesine dolayısı ile oluşacak olan etkilerin de farklılığına yol açacaktır. Bu doğrultuda hedeflenen kazı senaryosuna sadık analiz yapılmıştır. Analiz hem iki boyutlu hem de üç boyutlu olarak yapılmış olup farklılık içeren adımlar modelleme gereğince yapılarak belirtilmiştir.

Yapımı planlanan derin kazı imalat yöntemi;
Aşama 1: Yüzey yüklerin aktif edilmesi
Aşama 2: Kazık imalatının yapılması
Aşama 3: Başlık kirişinin imal edilmesi (3B modelde olup 2B modelde yer almamaktadır)
Aşama 4: 1.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması
Aşama 5: Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi (3B modelde olup 2B modelde yer almamaktadır)
Aşama 6: 1.sıra strutın imal edilmesi
Aşama 7: 2.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması
Aşama 8: Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi (3B modelde olup 2B modelde yer almamaktadır)
Aşama 9: 2.sıra strutın imal edilmesi
Aşama 10: 3.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması

Aşama 11: Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi (3B modelde olup 2B modelde yer almamaktadır)
Aşama 12: 3.sıra strutın imal edilmesi
Aşama 13: 4.strut kotunun 1 m altına kadar kazı yapılması
Aşama 14: Kuşak/Göğüsleme kirişinin imal edilmesi (3B modelde olup 2B modelde yer almamaktadır)
Aşama 15: 4.sıra strutın imal edilmesi
Aşama 16: Tam kazı kotuna kadar kazılması
Aşama 17: Temel imalatının yapılması
Aşama 18: 4.sıra strutın demontajının yapılması
Aşama 19: Ara döşeme imalatının yapılması
Aşama 20: 3.sıra strutın demontajının yapılması
Aşama 21: Ara döşeme imalatının yapılması
Aşama 22: 2.sıra strutın demontajının yapılması
Aşama 23: En üst tabliye betonunun imalatının yapılması
Aşama 24: 1.sıra strutın demontajının yapılması
Aşama 25: Nihai durum güvenlik analizinin yapılması

Yapım aşamaları belirtilen modellemeye ait Plaxis3D model görünümü Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Metro istasyonun iç yapı modellemesi (Plaxis3D)

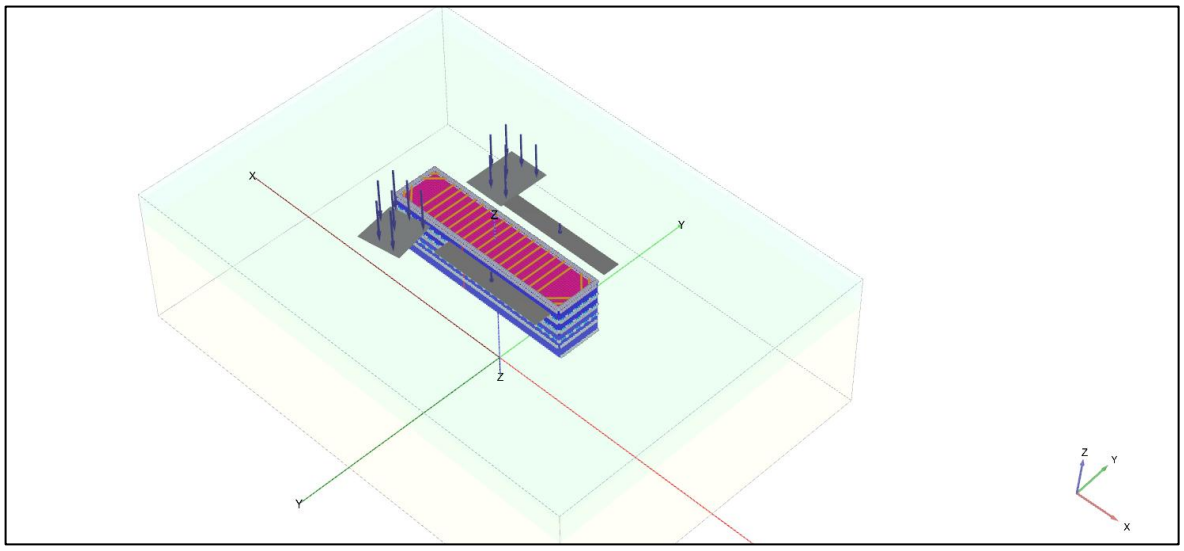
Plaxis2D ve Plaxis3D analiz programı aşamalı kazı olarak bilinen her adımda değişkenleri değiştirilebildiği ve gerçeğe en uygun şekilde kazı adımlarının belirlenebildiği bir yazılımdır. Bu doğrultuda girdiler programa istenildiği gibi, gerçeğe uygun şekilde girilebilir ve çıktıları da bu doğrultuda alınabilmektedir. Nihai durumda elde edilen düşey destek elemanına (kazıklara) ait deplasman değerlerinin yanı sıra kesit tesirleri de hem ara kazı adımı bazında hem de kesit tesit zarfı olarak tam kazı durumunda ya da nihai kazı aşamasında alınabilmektedir. Yatay destek elemanı olarak modellenen strutlar için ise gelen eksenel kuvvetler alınabildiği gibi oluşan düşey ya da yatay sehim miktarı da elde edilebilen sonuçlar arasında yer almaktadır. Bunlara ek olarak kazı destek sisteminin genel davranışından elde edilen yüzey oturmaları modellemeden sonra elde edilen çıktılardır.

5.3. 2B ve 3B Analiz Çalışmaları

İki boyutlu analiz yöntemi genişlik ve yükseklik ile analiz yaparken üçüncü boyut etkisini (derinliği) hesaplamalarına dahil etmez, bu durumda yapılan analiz “plain strain” analiz olarak Plaxis2D manuelinde anlatılmakta olup genellikle tünel kesitleri, kazı duvarları, açık kazı/dolgu kesitlerinde ve temel altı gerilmeleri gibi alanlarda sıkça tercih edilmektedir. Bu durum modelleme süresi, donanım yetersizliği ve analiz çözüm süresini doğrudan etkilemektedir. Üç boyutlu analizlerde ise yapı bütün boyutlarda incelenerek, gerçek duruma en yakın hali ile modellenir. Derin kazıların özellikle köşe etkisinde ve iki boyutta modellenemeyen karmaşık yapılarda tercih edilir. Modelin karmaşık olması ve detay seviyesinin artması hem modelleme hem de çözüm süresini oldukça arttırmaktadır.

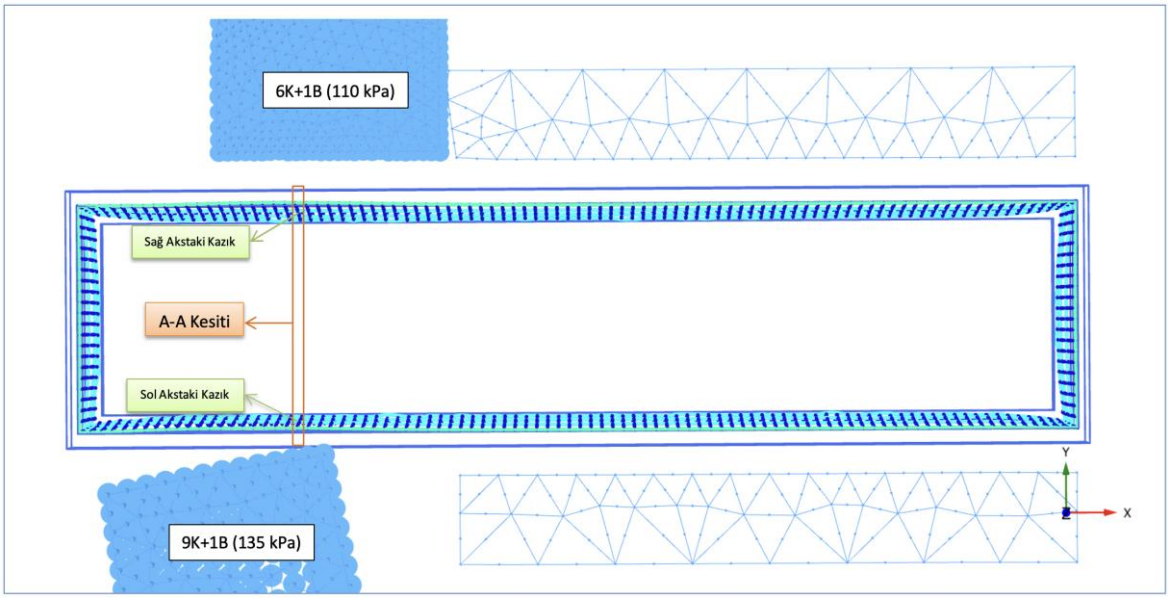
Bu çalışma kapsamında hem iki boyutlu hem de üç boyutlu analiz yapılarak elde edilen sonuçlar kıyaslanacaktır. Üç boyutlu model kazı her yönü ile modelleme imkânı verirken iki boyut analizde bu durum kesit alarak mümkün olmaktadır. Daha detaylı analiz için iki boyutta kesit sayısını arttırmak genel davranış incelenmiştir.

Üç boyutlu modelleme olarak kurulan modellerde istasyon çevresi ve tüm imalatların modellenmesine ait görsel Şekil 5.7’de sunulmaktadır.



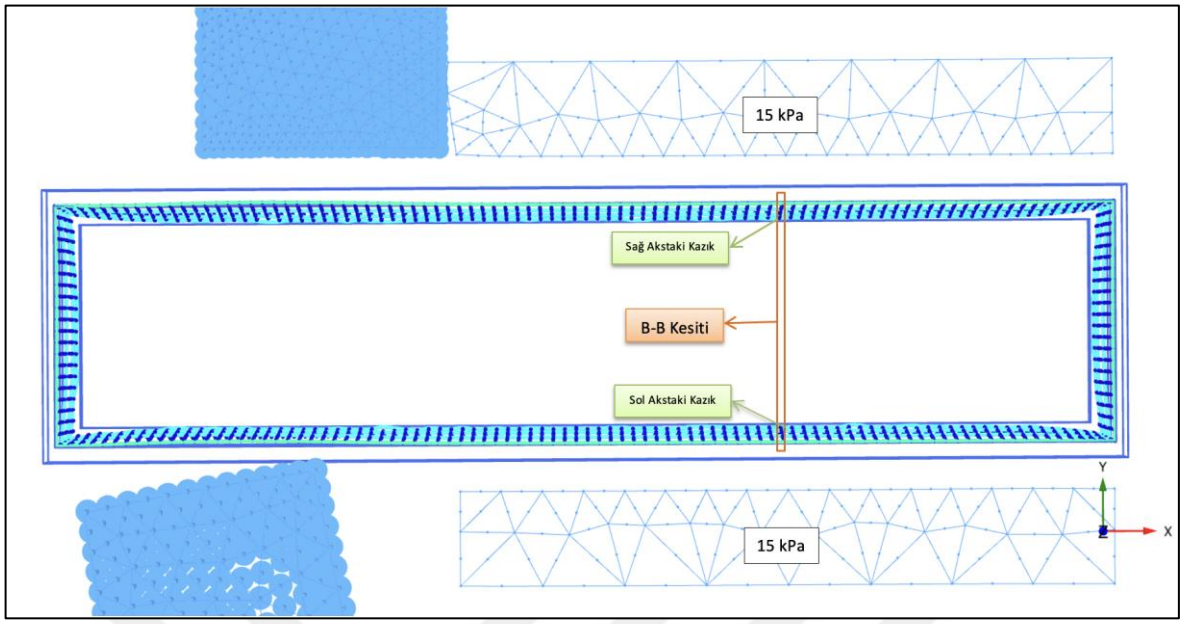
Şekil 5.7. Metro istasyonu genel yerleşimi

Üç boyutlu analizde ve iki boyutlu analizlerde kıyası için seçilen analiz yerleri yapılaşmanın olduğu bölge için A-A kesiti alınırken, çevre yapı olmayan sadece inşaat yükü, olası trafik yükü olarak düşünülen bölge için ise B-B Analiz kesti alınmıştır. Analiz kesitlerinin alındığı yerler Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da sırası ile gösterilmektedir.



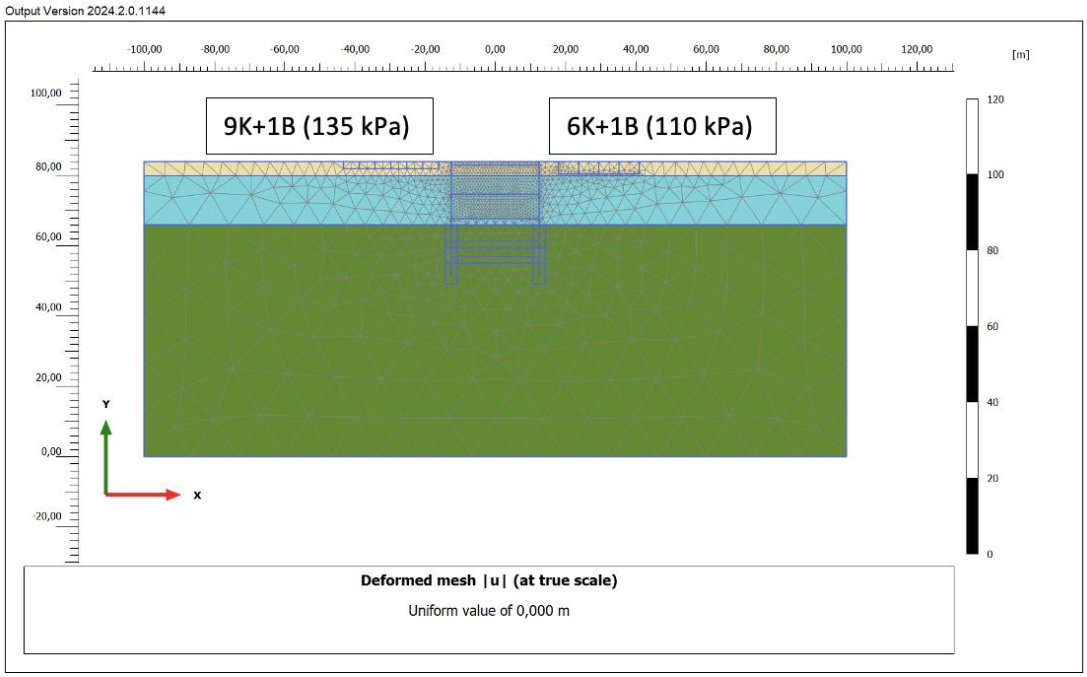
Şekil 5.8. Analiz kesiti plan gösterimi (analiz kesiti A-A)

Plan düzleminde kuzey ve güney (ya da yukarı ve aşağı) olarak tanımlanabilen bölgeler kesit alındığında iki boyut analizleri ile ortak tariflenebilmesi adına sağ aks ve sol aks olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.9. Analiz kesiti plan gösterimi (analiz kesiti B-B)

Plan düzleminde kesit yerleri gösterilen A-A kesitinin Plaxis2D'de yapılan analiz modeli Şekil 5.10'da verilmekte olup model genişliği ve derinliğinin üç boyutlu modelle paralel olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 5.10. Plaxis2D analiz kesiti (A-A kesiti)

Yapılan çalışmalar kesit özelinde kıyaslanarak sunulmakta olup Plaxis2D sonuçları ve Plaxis3D sonuçlarının aynı birimde kıyaslanmasına dikkat edilmiştir. Diğer bir değişle

Plaxis2D'den elde edilen sonuçlarda iki boyut etkisinden kaynaklı birim başına gelen tesir kuvvetleri verilmektedir. Elde edilen sonuçlar ilgili birim derinlikle çarpılarak sonuçlar aynı birimde kıyaslanmıştır.

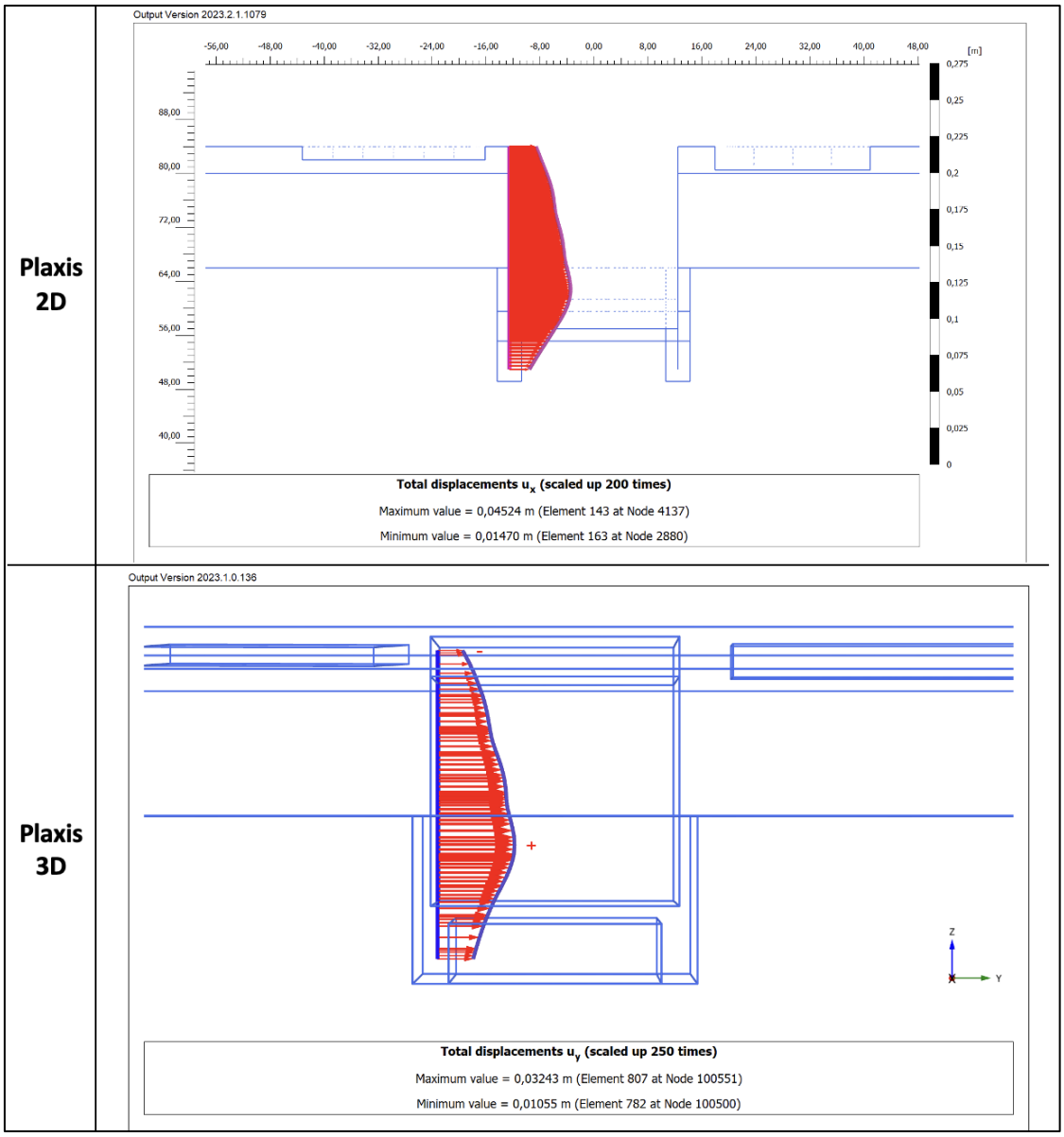
Sonuçlar incelenirken kazıklar için elde edilen sonuçlar deplasman, kazık tesirleri ve çevre yapıları ile ilişkisi kesitler özelinde incelenecek olup kazı destek sisteminde yer alan iç destek sistemi ve strut kuvvetleri için kat planı üzerinden inceleme yapılacaktır. İncelenecek sonuçlar inşaat son durumu üzerinden kıyaslanacak olup ilgili inşaat aşaması durumu başlık kirişinde yer alan strutın da alınıp üst döşemenin imal edildiği aşamadır. Bu aşamadan alınan tüm değer ve ekran alıntıları elde edilen en kritik durumu oluşturan toplam deplasman, eğilme moment zarfını ve kesme kuvveti zarfını içermektedir.

5.3.1. Analiz kesiti A-A

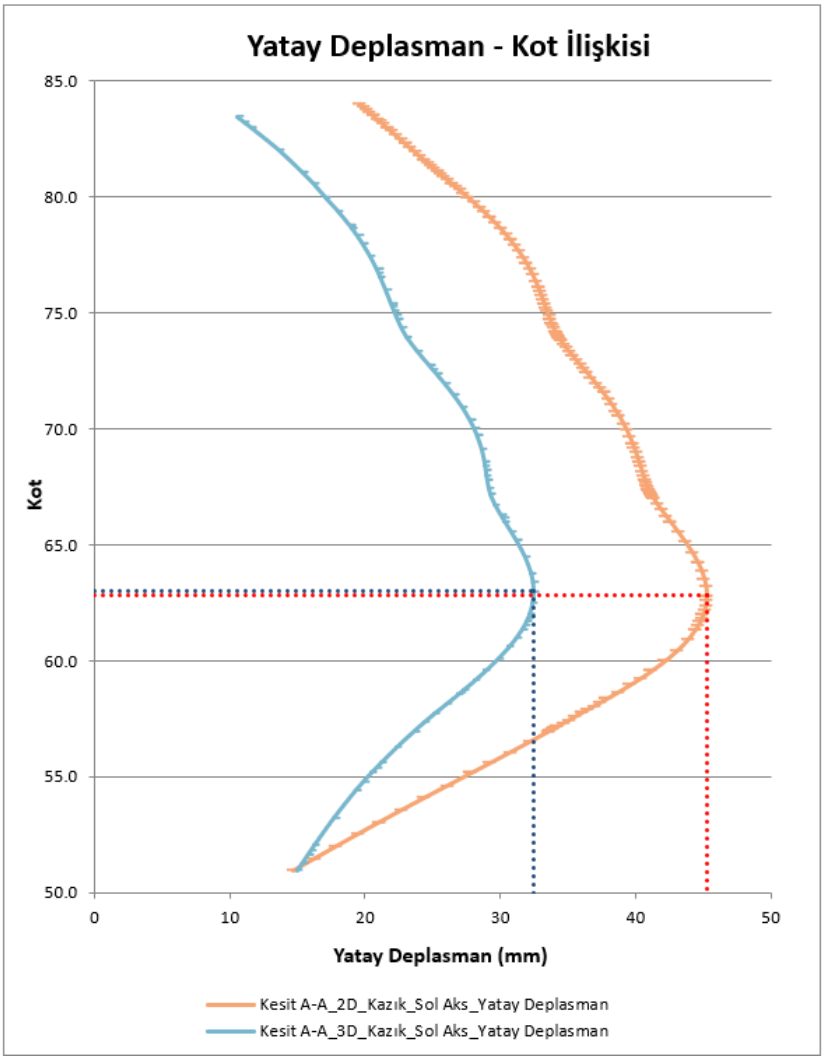
Analiz kesiti için seçilen bölge çevre yapıların olduğu yeri temsil etmektedir. Bu kesitte yer alan yapılar, kuzeyde 6 kat 1 bodrumlu iken güneyde yer alan yapı 9 katlı 1 bodrumlu görece daha yakın bina yapısıdır. Plaxis2D'de alınan analiz kesitinde bölgedeki çevre yükler analizlere dahil edilerek aynı koşullar sağlanmıştır. Kazık deplasman değerleri ve kesit tesirleri incelenirken önce sol kazık aksı üzerinden sonuçlar verilirken sonrasında aynı sıralama ile sağ kazık verilecektir.

A-A kesiti sol aks kazık yatay deplasman

Analiz kesiti A-A sol aksından alınan kazık deplasman değer Plaxis2D'de maksimum 4,524 cm iken soket ucu 1,470 cm olarak ölçülmektedir. Aynı değer Plaxis3D'de ise sırası ile 3,243 cm ile 1,055 cm olarak ölçülmektedir. Deplasman değerleri Şekil 5.11'de sunulmaktadır.



Şekil 5.11. Deplasman özet verileri



Şekil 5.12. Yatay deplasman değerlerinin 2B ve 3B analiz sonuçları

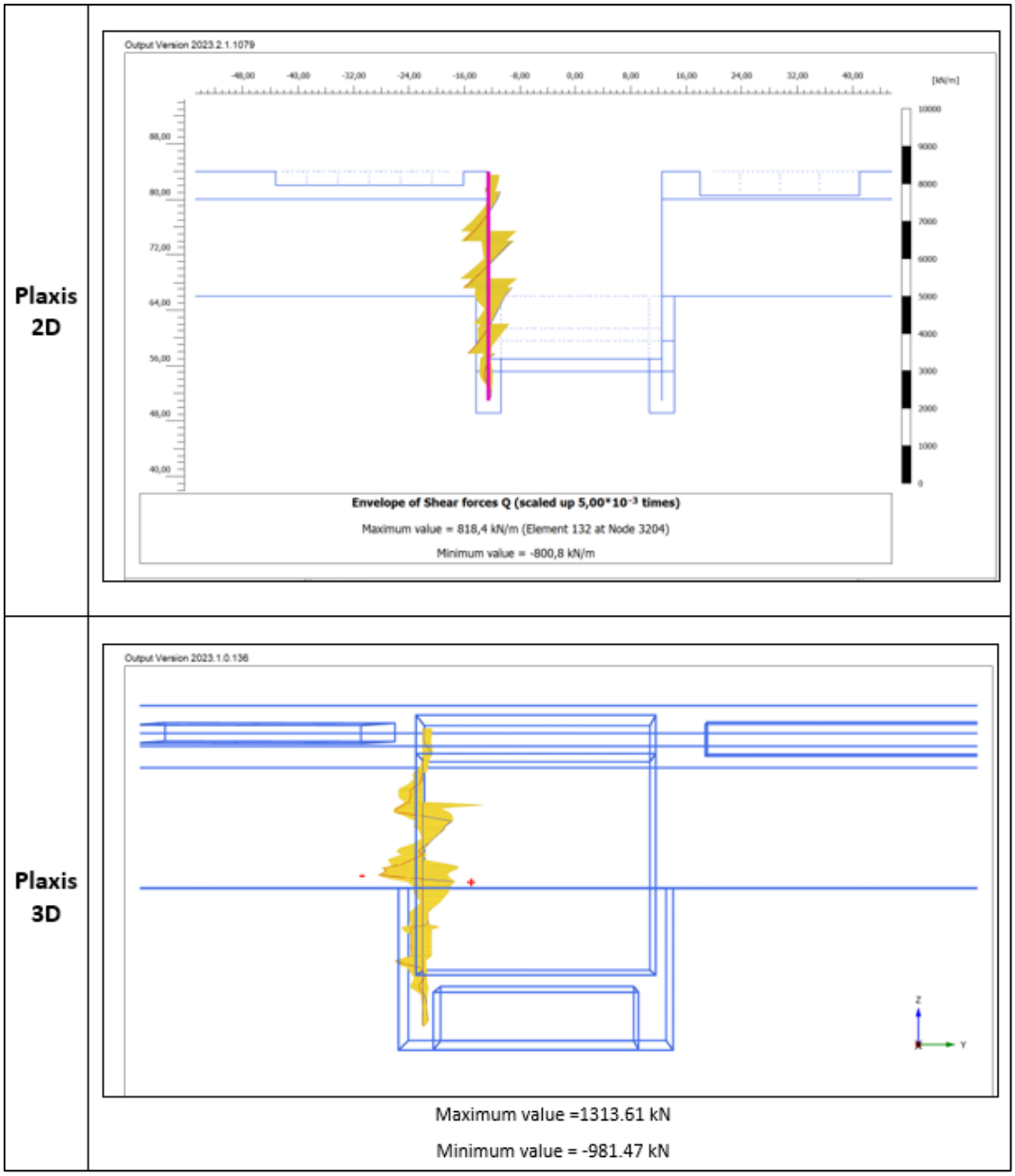
Aynı kabuller doğrultusunda yapılan analiz sonuçları Şekil 5.12'de üst üste yazdırılmış davranışın benzer olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlarda ise yatay deplasmanların paralelliğine ek olarak mertebece farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Çizelge 5.4'te özetlenmiş olup 3B analiz yapılması sistemde okunan yatay deplasmanın %28 daha az olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.4. 2B ve 3B Analiz sonucuna göre deplasmanların yüzdece değişimi

A-A Kesiti Sol Aks Kazık		
	Deplasman (cm)	
Plaxis 2D (Self+Soil)	4,52	
Plaxis 3D (Self+Soil)	3,24	
Sonuç	%28	↓

A-A kesiti sol aks kazık kesme kuvveti zarfı, Q

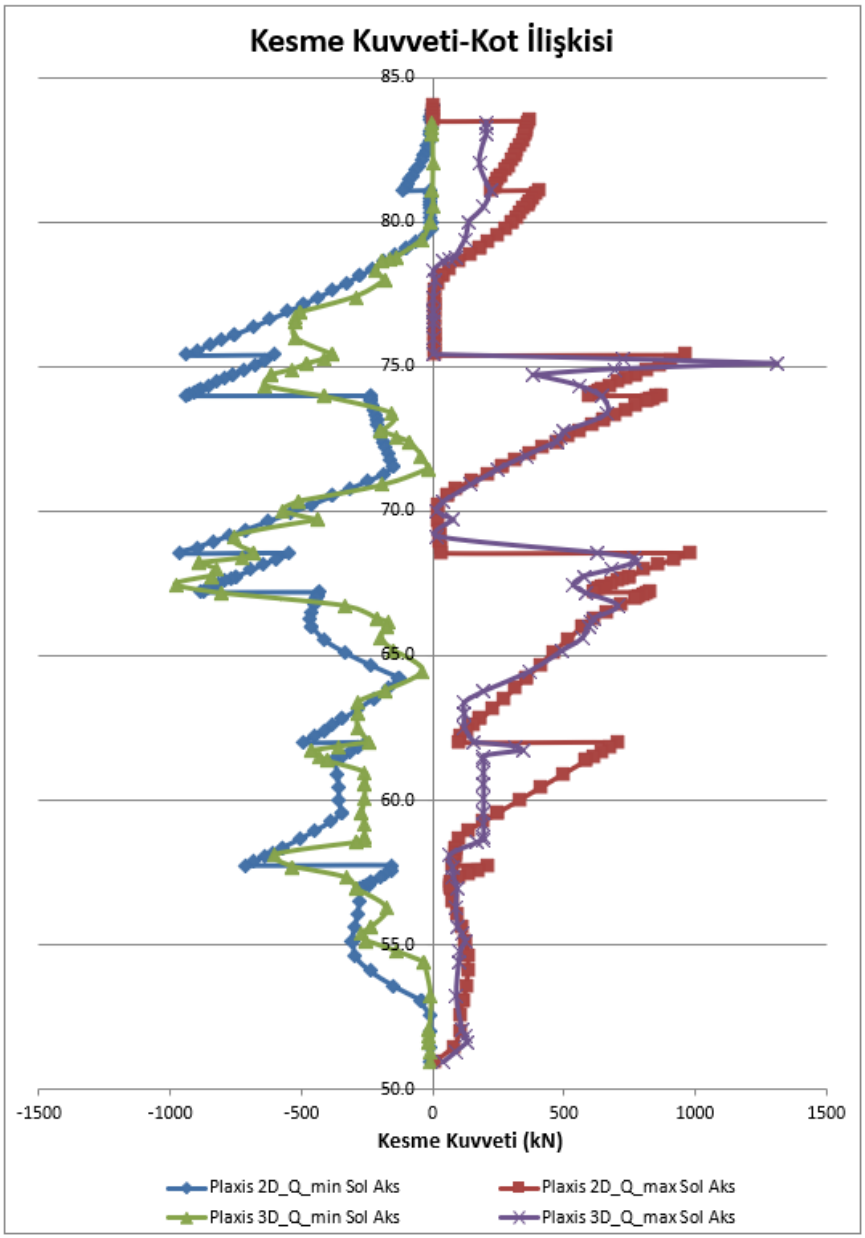
Analiz kesiti A-A sol aksından alınan kazık kesme kuvveti değeri Plaxis2D'de 818,4 kN/m iken aynı değer Plaxis3D'de 1313,61 kN olarak ölçülmektedir, Şekil 5.13'te Plaxis çıktıları verilmektedir.



Şekil 5.13. Kesme kuvveti özet verileri

Kazığa gelen kesme kuvvetlerinin karşılaştırması

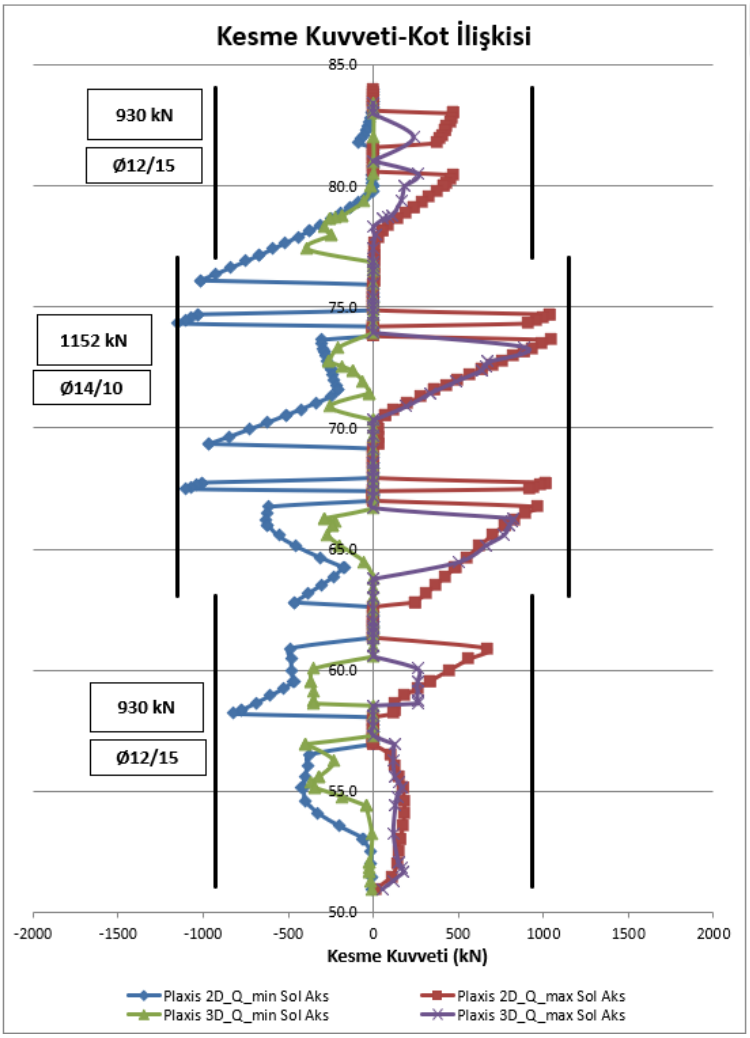
Elde edilen Plaxis2D değeri metre başına gelen kesme kuvvetini göstermekte olup kazık arağı olan 120 cm ile çarpılarak kıyas aynı birim üzerinden yapılmıştır. Bu durumda kesme kuvveti değerleri (kN) Şekil 5.14'te sunulmaktadır.



Şekil 5.14. Plaxis2D ve Plaxis3D kesme kuvveti analiz çıktıları (kN)

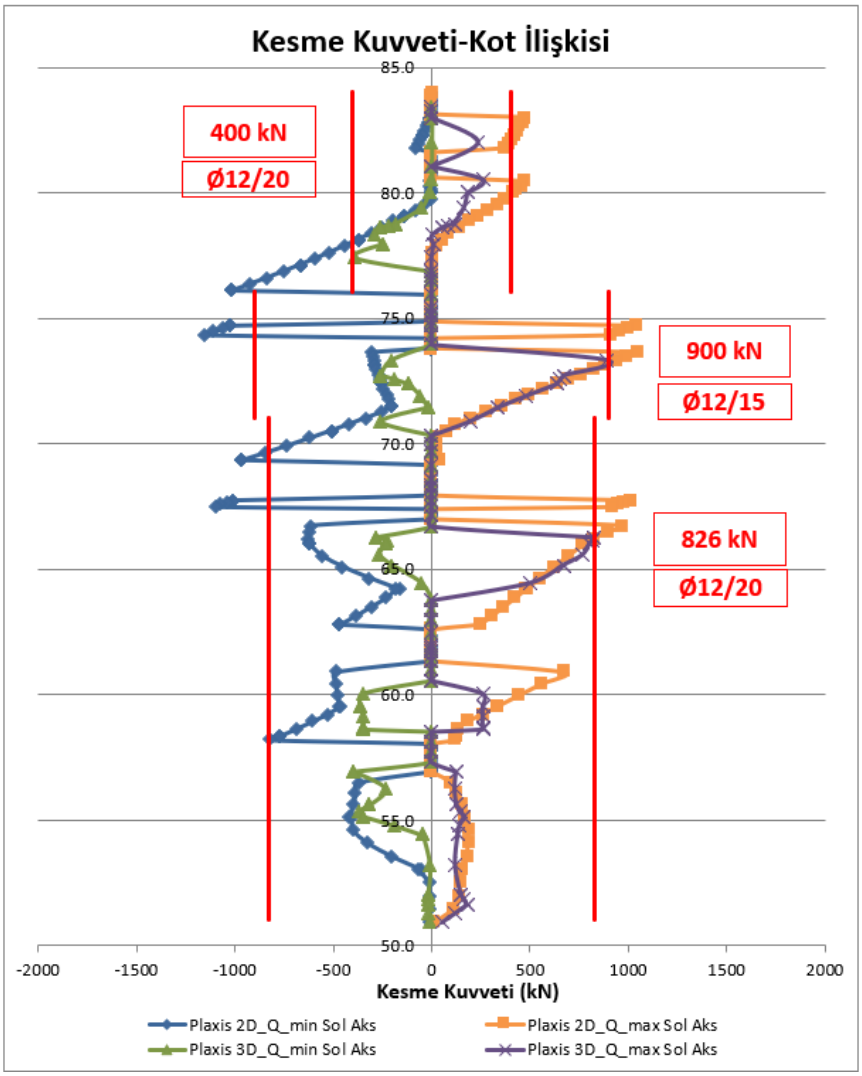
Kazık kesme donatısının karşılaştırması

Programdan elde edilen ham veriler tasarım kuvvetine geçilirken (her proje özelinde değişkenlik gösterebileceği gibi) genellikle güvenlik faktörü 1,35 (KDYY, 2023) ile arttırılarak donatı seçimi yapılır. Donatı seçimi yapılırken dikkat edilen diğer bir husus mesnet noktalarına gelen tesir kuvvetlerinin TS500 uyarınca donatı verilmemesi ve bu doğrultuda mesnetlerdeki reaksiyonların silinmesidir. Bu doğrultuda alınan ham veriler Şekil 5.15'te sunulduğu gibi hem faktörlü yüke çevrilmiş hem de mesnet reaksiyonları silinmiştir. Verilen donatılar kıyas yapılması amacı ile seçilmiş olup 2B ve 3B analiz sonuçlarına göre aynı kabuller gereğince verilmiştir.



Şekil 5.15. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı

Bu kesitte verilmesi gereken minimum donatı 12 mm çapında 15 cm ara ile betonarme kesit (kazık) boyunca verilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.16. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı

Verilen donatılar Şekil 5.16'da 3B analizinden elde edilen sonuçlar gereğince verilmiş olup donatı sınırları kırmızı düz çizgi ile taşıyabildiği kesme kuvveti sınırları gösterilmektedir.

Elde edilen tasarım kesme kuvvetleri özetlendiğinde Çizelge 5.5'te sunulduğu gibi üç boyutlu analiz sonucunda %22 oranında daha az tesir kuvveti görülmüştür.

Çizelge 5.5. Tasarım kesme kuvvetlerinin kıyaslanması

	Kesme Kuvveti (kN) (1,35Self+1,35Soil)
Plaxis 2D	1152
Plaxis 3D	900
Sonuç	%22 ↓

Görülen kesme kuvvetlerinin donatı metrajına etkisi de incelenerek karşılaştırılmıştır. Bu durum analizlerin ekonomik boyutunu da kıyaslamak için bu kesit üzerinde yapılmış olup sırası ile Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7'de sunulmaktadır.

Çizelge 5.6. Kazık kesme donatısı Plaxis2D

Plaxis 2D Kullanılarak Verilen Kazık Kesme Donatısı Metraj Tablosu				
Çap (mm)	Adet	Boy (cm)	Toplam Boy (m)	
			Ø12	Ø14
12	1	25230	252,30	
14	1	35273		352,73
12	1	9272	92,72	
Toplam Boy (m)			345,02	352,73
Birim Ağırlık (kg/m)			0,888	1,208
Ağırlık (kg)			306,38	426,10
Toplam Ağırlık (kg)			732,48	

Çizelge 5.7. Kazık kesme donatısı Plaxis3D

Plaxis 3D Kullanılarak Verilen Kazık Kesme Donatısı Metraj Tablosu			
Çap (mm)	Adet	Boy (cm)	Toplam Boy (m)
			Ø12
12	1	26912	269,12
12	1	9094	90,94
12	1	9640	96,40
Toplam Boy (m)			456,46
Birim Ağırlık (kg/m)			0,888
Ağırlık (kg)			405,34
Toplam Ağırlık (kg)			405,34

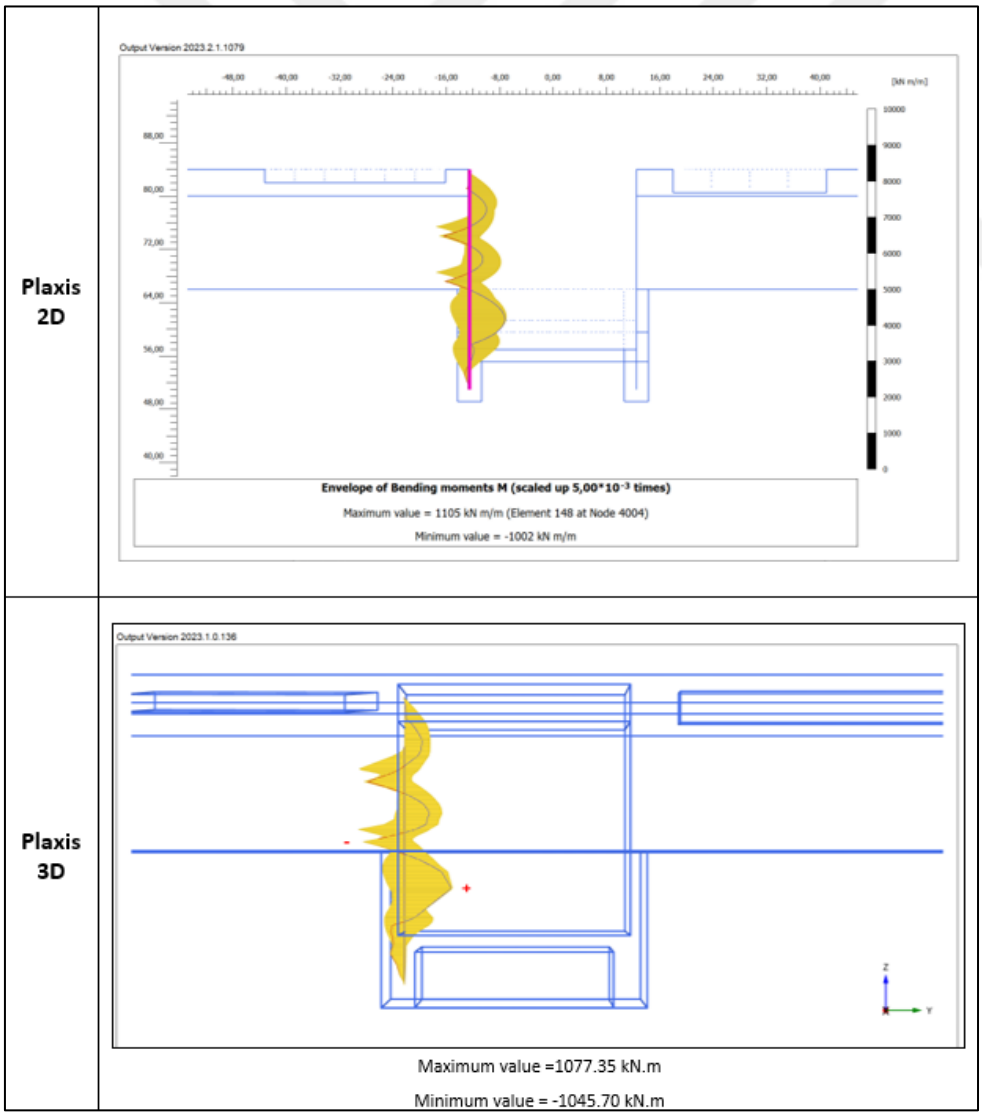
Kesme kuvvetlerinde yapıldığı gibi verilen donatılar üzerinde de yüzdece fark hesaplanarak, sonuçların donatı metrajına olan etkisi incelenmiştir. Bu durumun donatı kıyasına etkisi %45 daha az olmuştur. Elde edilen tasarım kesme donatıları özetlendiğinde Çizelge 5.8'de sunulduğu gibi üç boyutlu analiz sonucunda %45 oranında daha az tonajda olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.8. Tasarım kesme donatısı kıyaslanması

	Kesme Donatısı/Fret (ton)
Plaxis 2D	732,48
Plaxis 3D	405,48
Sonuç	%45 ↓

A-A kesiti sol aks kazık moment zarfı, M

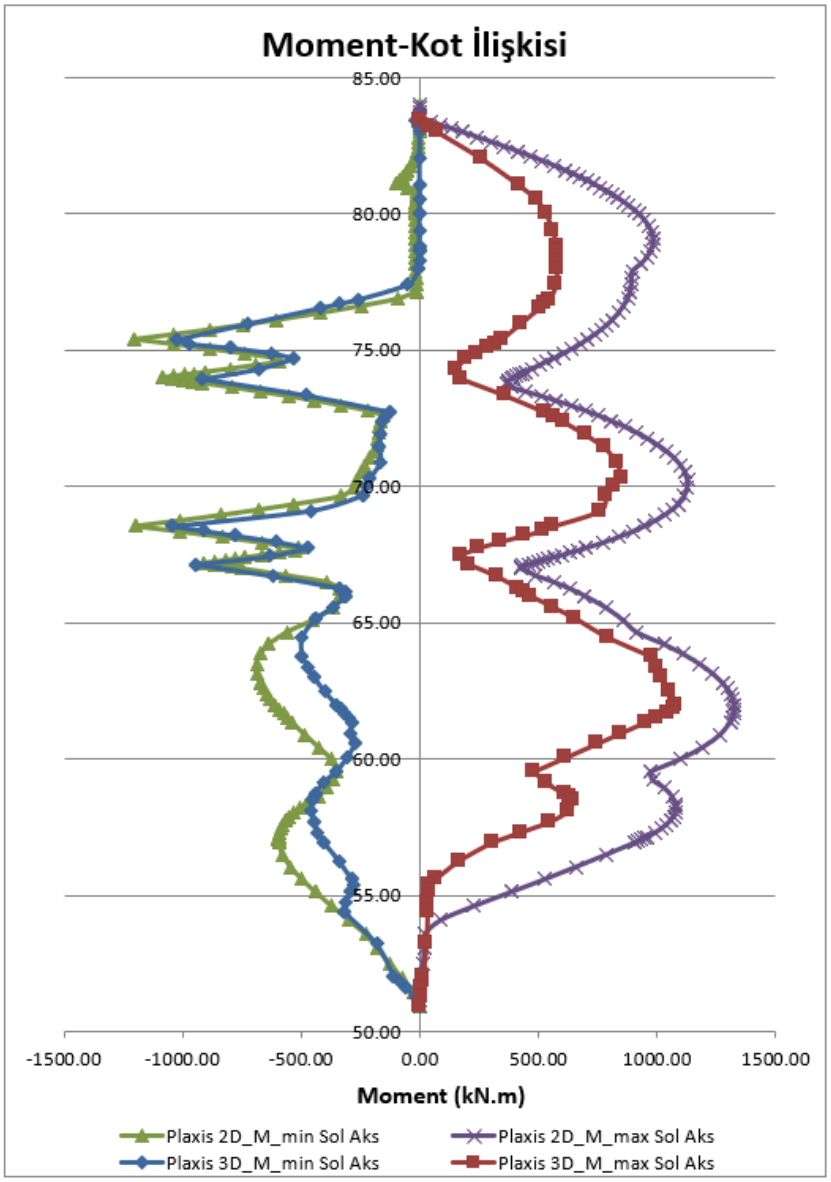
Analiz kesiti A-A sol aksından alınan kazık kesme kuvveti değeri Plaxis2D'de 1105 kNm/m iken aynı değer Plaxis3D'de 1077,35 kN olarak ölçülmektedir, Şekil 5.17'de Plaxis çıktıları verilmektedir.



Şekil 5.17. Eğilme momenti özet verileri

Kazığa gelen momentin karşılaştırması

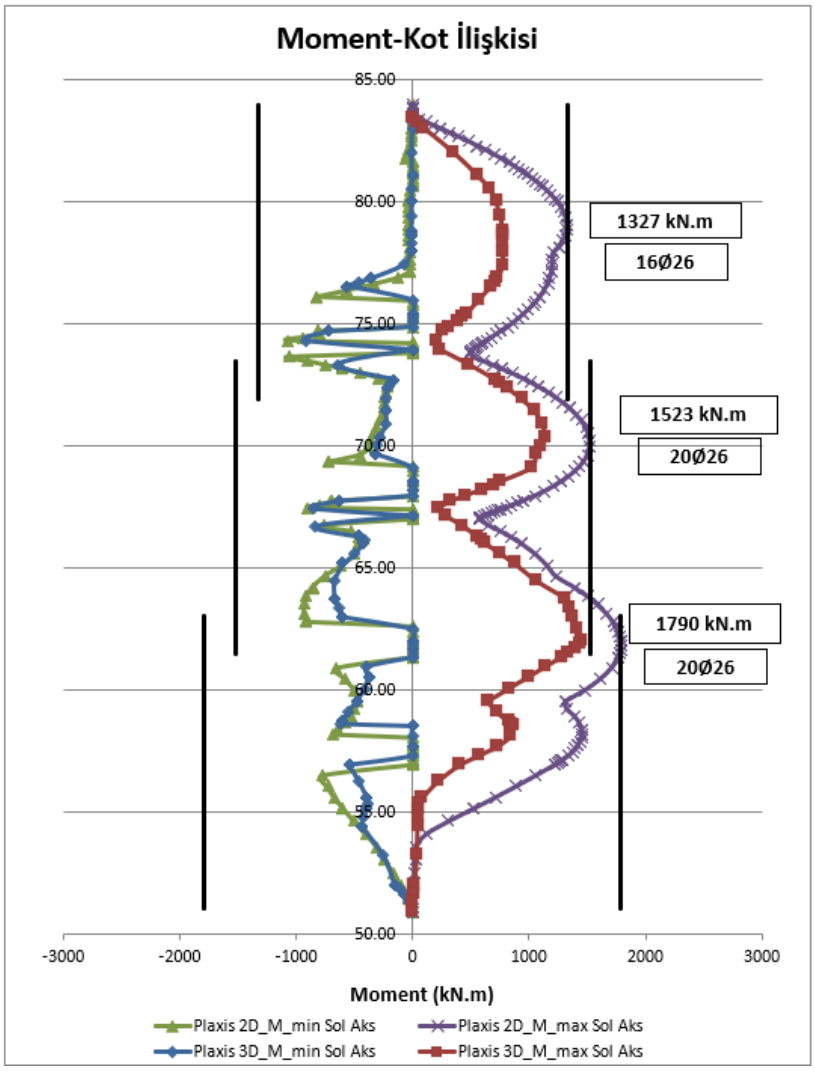
Elde edilen Plaxis2D değeri metre başına gelen moment değerlerini göstermekte olup kazık arağı olan 120 cm ile çarpılarak kıyas aynı birim üzerinden yapılmıştır. Bu durumda oluşan değerler (kNm) Şekil 5.18'de sunulmaktadır.



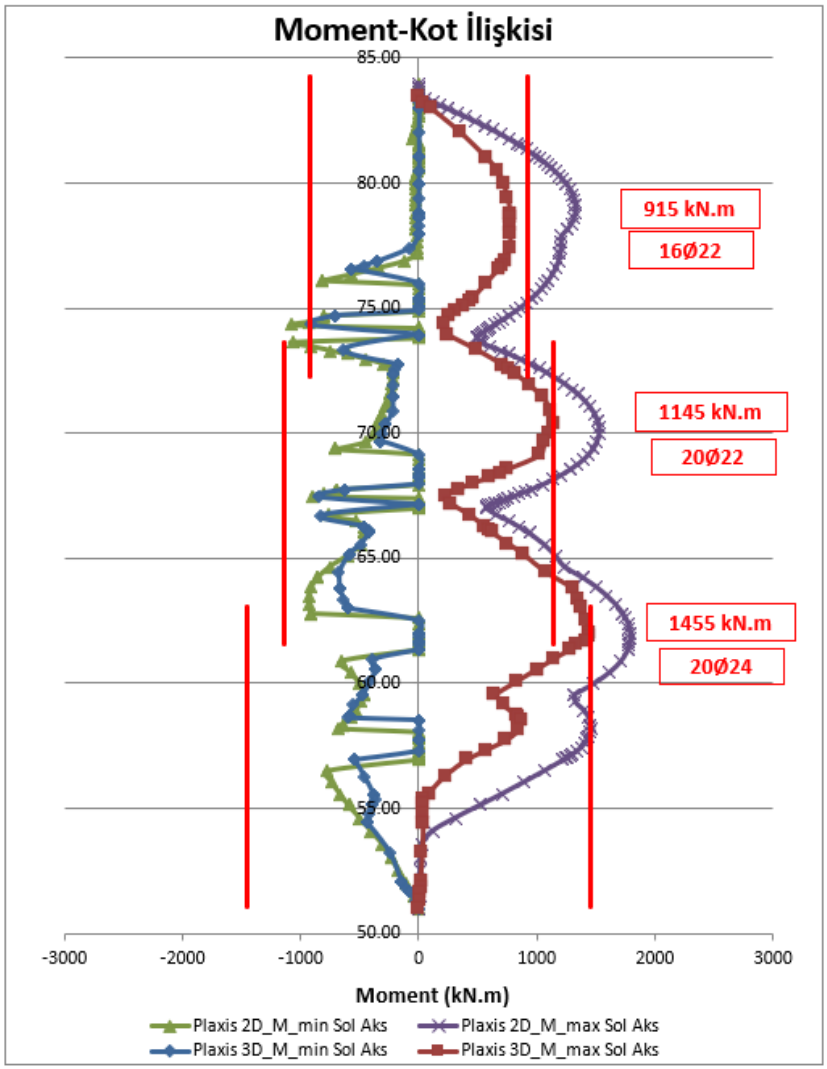
Şekil 5.18. Plaxis2D ve Plaxis3D eğilme momenti analiz çıktıları (kNm)

Kazık eğilme donatısının karşılaştırması

Programdan elde edilen ham veriler tasarım değerlerine geçilirken (her proje özelinde değişkenlik gösterebileceği gibi) genellikle güvenlik faktörü 1,35 (KDYY, 2023) ile arttırılarak donatı seçimi yapılır. Donatı seçimi yapılırken dikkat edilen diğer bir husus mesnet noktalarına gelen tesir kuvvetlerinin TS500 uyarınca donatı verilmemesi ve bu doğrultuda mesnetlerdeki reaksiyonların silinmesidir. Bu doğrultuda alınan ham veriler Şekil 5.19'da sunulduğu gibi hem faktörlü yüke çevrilmiş hem de mesnet reaksiyonları silinmiştir. Kesme kuvvetlerinden farklı olarak kazı iç yüzeyinde oluşan ve eğilme iç tesir moment yerlerine denk gelen noktalar silinmemiştir. Verilen donatılar kıyas yapılması amacı ile seçilmiş olup 2B ve 3B analiz sonuçlarına göre aynı kabuller gereğince verilmiştir.



Şekil 5.19. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı



Şekil 5.20. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı

Verilen donatılar Şekil 5.20'de 3B analizinden elde edilen sonuçlar gereğince verilmiş olup donatı sınırları kırmızı düz çizgi ile taşıyabildiği eğilme momentinin sınırları gösterilmektedir. Elde edilen tasarım eğilme momentlerinin özetlendiği Çizelge 5.9'da da görüldüğü gibi üç boyutlu analiz sonucunda %19 oranında daha az tesir kuvveti görülmüştür.

Çizelge 5.9. A-A kesiti eğilme momenti kıyas tablosu (faktörsüz ve faktörlü)

	Moment (kN.m/m) (Self+Soil)	Moment (kN.m) (Self+Soil)	Moment (kN.m) (Self+Soil)
Plaxis 2D	1105	1325	1790
Plaxis 3D	-	1077	1455
Sonuç		%19	%19 ↓

Eğilme momentlerinin donatı metrajına etkisi de incelenerek karşılaştırılmıştır. Bu durum analizlerin ekonomik boyutunu da kıyaslamak için bilgi vermekte olup sırası ile Çizelge 5.10 ve Çizelge 5.11'de sunulmaktadır.

Çizelge 5.10. Kazık eğilme donatısı Plaxis2D

Plaxis 2D Kullanılarak Verilen Kazık Eğilme Donatısı Metraj Tablosu			
Çap (mm)	Adet	Boy (cm)	Toplam Boy (m)
			Ø26
26	56	1200	672,00
		Toplam Boy (m)	672,00
		Birim Ağırlık (kg/m)	4,168
		Ağırlık (kg)	2800,90
		Toplam Ağırlık (kg)	2800,90

Çizelge 5.11. Kazık eğilme donatısı Plaxis3D

Plaxis 3D Kullanılarak Verilen Kazık Eğilme Donatısı Metraj Tablosu				
Çap (mm)	Adet	Boy (cm)	Toplam Boy (m)	
			Ø22	Ø24
24	20	1200		240,00
22	36	1200	432,00	
		Toplam Boy (m)	432,00	240,00
		Birim Ağırlık (kg/m)	2,984	3,551
		Ağırlık (kg)	1289,09	852,24
		Toplam Ağırlık (kg)	2141,33	

Eğilme moment değerlerinde yapıldığı gibi verilen donatılar üzerinde de yüzdece fark hesaplanarak, sonuçların donatı metrajına olan etkisi incelenmiştir. Bu durumun donatı kıyasına etkisi Çizelge 5.12'de görüldüğü gibi 3B analiz sonucunda %24 daha az okunmuştur.

Çizelge 5.12. A-A kesiti metraj kıyas tablosu

	Eğilme/Boy Donatı (ton)
Plaxis 2D	2800,90
Plaxis 3D	2141,33
Sonuç	%24 ↓

A-A kesiti sol aks kazık özet tabloları

Analiz kesiti olarak ele alınan A-A kesiti özetlendiğinde kazıkta meydana gelen deplasman değerleri, kazık kesme kuvveti (faktörlü) ve eğilme momenti (faktörlü) hem iki boyutlu analizlerde hem de üç boyutlu analizlerden elde edilerek Çizelge 5.13'te özetlenmiştir. Bu özet tablo aynı bölge üzerinde alınan ancak farklı etkenler incelendiğinde sonuçların yüzdece farklılıklarını göstermektedir. Sonuçların %19 ile %28 arasında değişkenlik gösterdiği görülmekte olup en fazla fark yatay deplasmanda oluşmaktadır.

Çizelge 5.13. Plaxis2D ve Plaxis3D analiz sonuçları özet tablosu

	Yatay Deplasman (cm)	Kesme Kuvveti (kN) (1,35Self+1,35Soil)	Moment (kN.m) (1,35Self+1,35Soil)
Plaxis 2D	4,52	1152	1790
Plaxis 3D	3,24	900	1455
Sonuç	%28 ↓	%22 ↓	%19 ↓

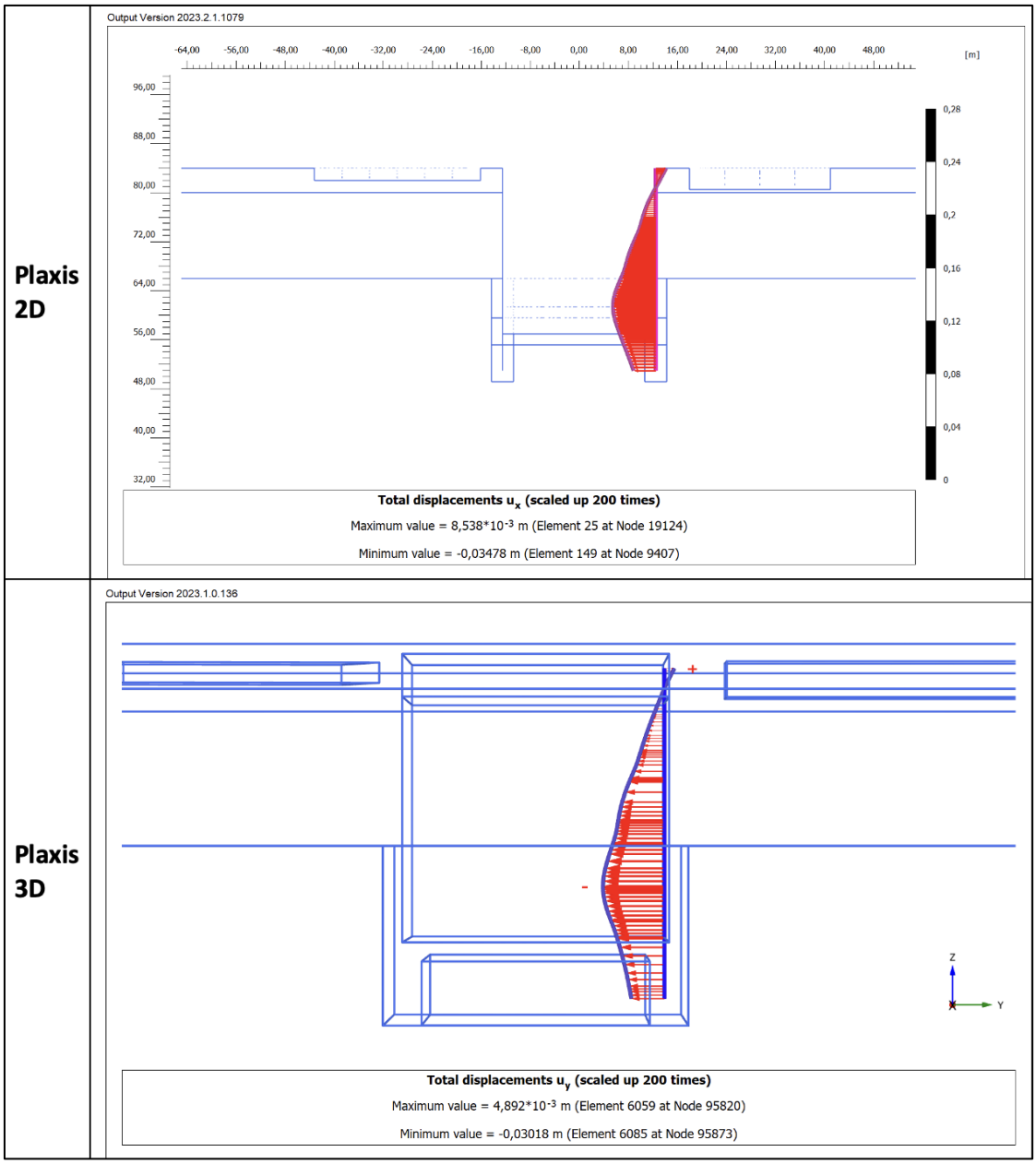
Oluşan tesir kuvvetlerine ek olarak kazıklarda donatı metrajları da kıyaslanarak Çizelge 5.14'te özetlenmektedir. Eğilme moment değeri ve eğilmeye karşı atılan donatı sonuçları yüzdece benzer sonuç verse de kesme kuvvetlerine kıyasla kesme donatısı değişim yüzdeleri büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Bu durum nihai tasarımda ekonomik olarak farklılık yaratmaktadır.

Çizelge 5.14. Plaxis2D ve Plaxis3D analiz sonuçlarına göre metraj kıyas tablosu

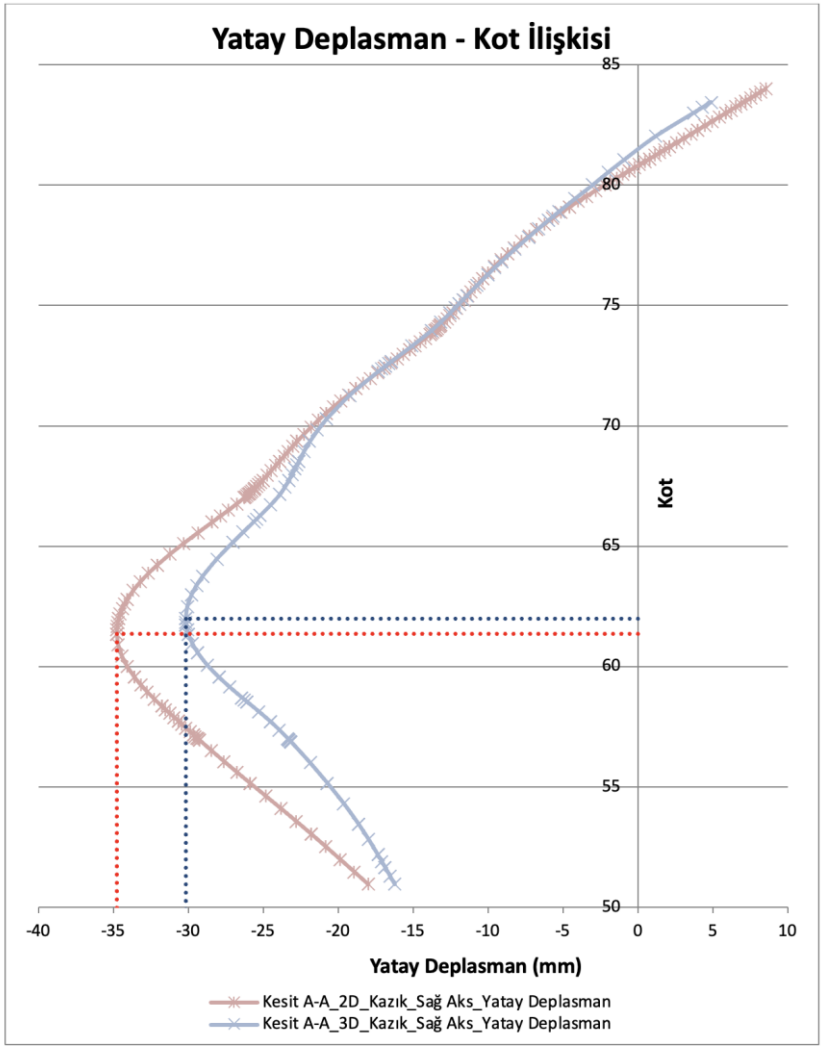
	Kesme Donatısı/Fret (ton)	Eğilme/Boy Donatı (ton)
Plaxis 2D	732,48	2800,90
Plaxis 3D	405,48	2141,33
Sonuç	%45 ↓	%24 ↓

A-A kesiti sağ aks kazık yatay deplasman

Analiz kesiti A-A sağ aksından alınan kazık deplasman değeri incelendiğinde Plaxis2D'de maksimum deplasman 3,478 cm iken soket ucu 1 cm'den az olarak ölçülmektedir. Aynı değer Plaxis3D'de ise sırası ile 3,018 cm ile soket ucu 1 cm'den az olarak ölçülmektedir. Deplasman değerleri Şekil 5.21'de sunulmaktadır.



Şekil 5.21. Deplasman özet verileri



Şekil 5.22. Yatay deplasman değerlerinin 2B ve 3B analiz sonuçları

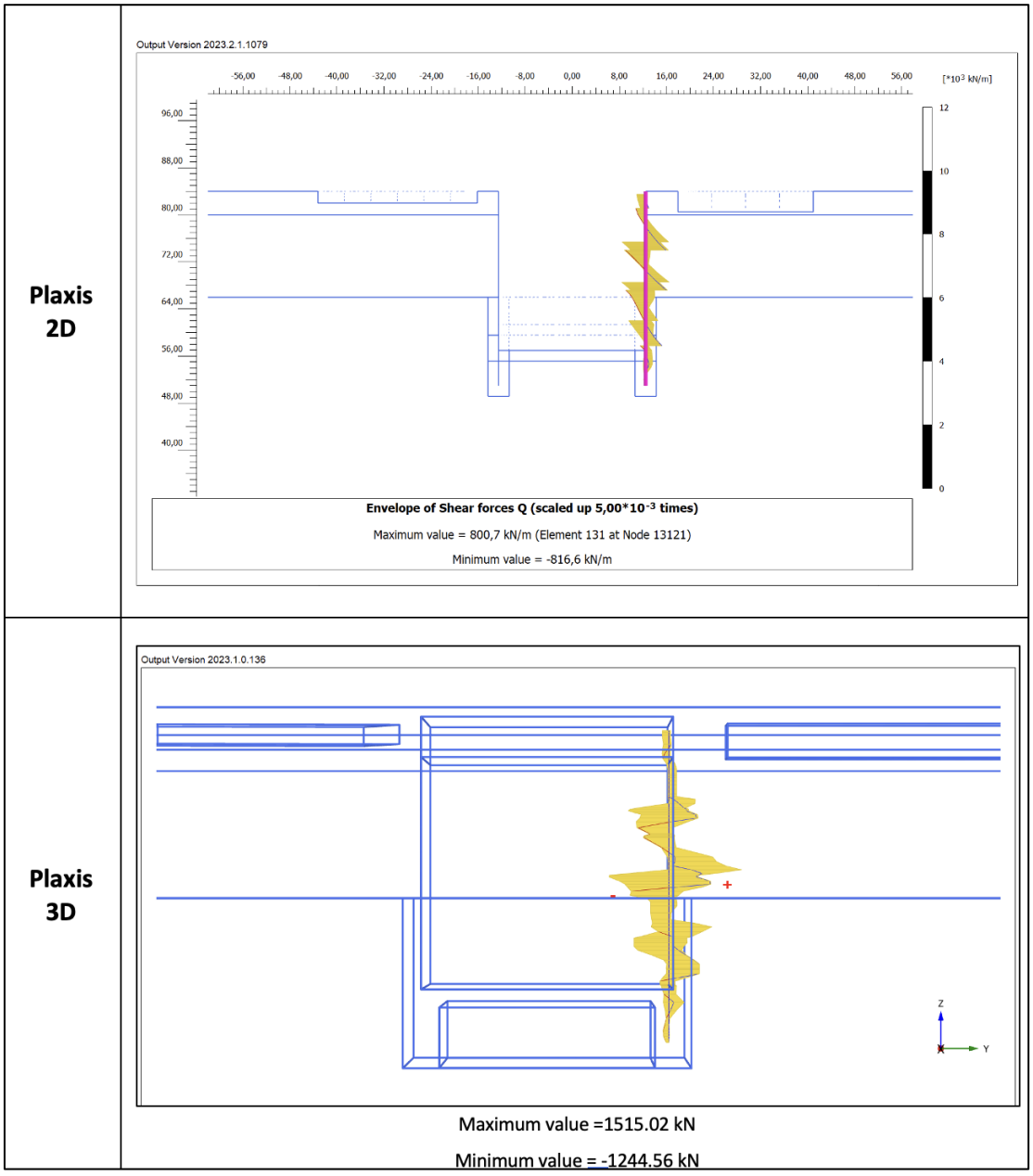
Aynı kabuller doğrultusunda yapılan analiz sonuçları Şekil 5.22'de üst üste yazdırılmış davranışın benzer olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlarda ise yatay deplasmanların paralelliğine ek olarak mertebece yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Çizelge 5.15'te özetlenmiş olup 3B analiz yapılması sistemde okunan yatay deplasmanın %13 daha az olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.15. 2B ve 3B analiz sonucuna göre deplasmanların yüzdece değişimi

	Deplasman (cm)
Plaxis 2D (Self+Soil)	3,48
Plaxis 3D (Self+Soil)	3,02
Sonuç	%13 ↓

A-A kesiti sağ aks kazık kesme kuvveti zarfı, Q

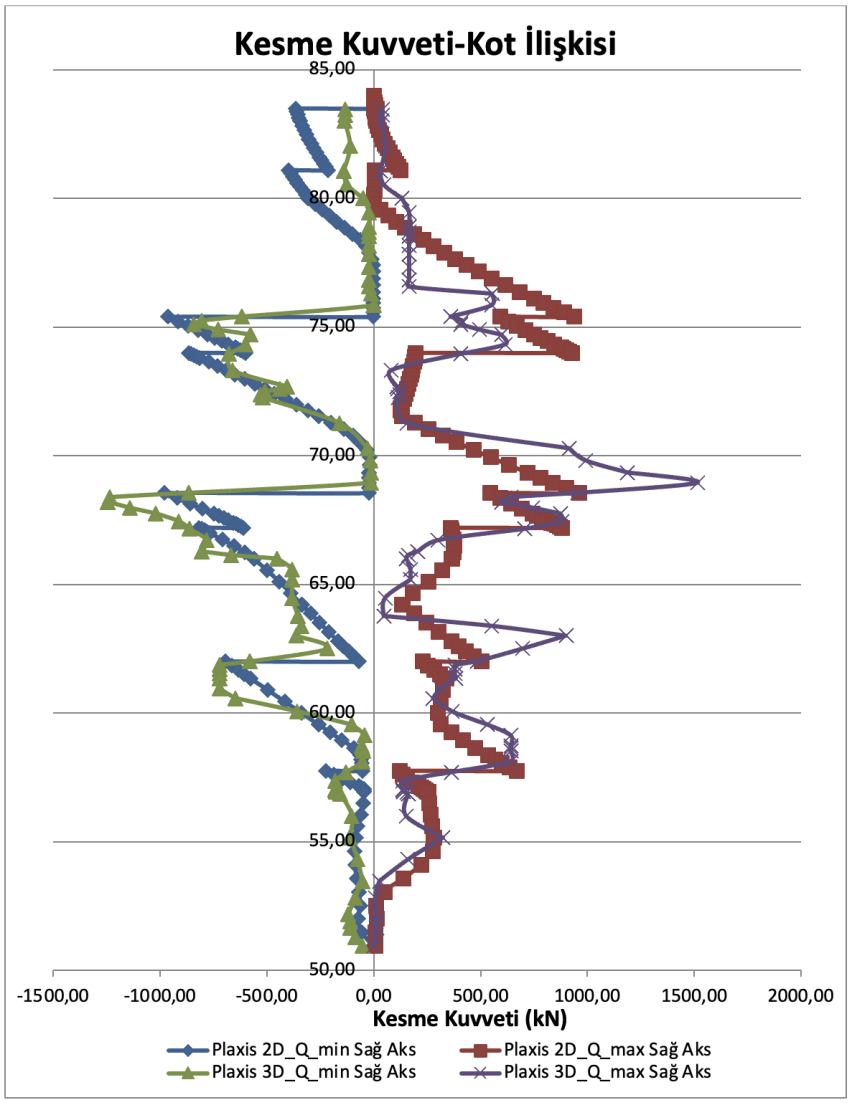
Analiz kesiti A-A sağ aksından alınan kazık kesme kuvveti değeri Plaxis2D'de 816,6 kN/m iken aynı değer Plaxis3D'de 1515,02 kN olarak ölçülmektedir, Şekil 5.23'te Plaxis çıktıları verilmektedir.



Şekil 5.23. Kesme kuvveti özet verileri

Kazığa gelen kesme kuvvetlerinin karşılaştırması

Elde edilen Plaxis2D değeri metre başına gelen kesme kuvvetini göstermekte olup kazık aralığı olan 120 cm ile çarpılarak kıyas aynı birim üzerinden yapılmıştır. Bu durumda kesme kuvveti değerleri (kN) Şekil 5.24'te sunulmaktadır.

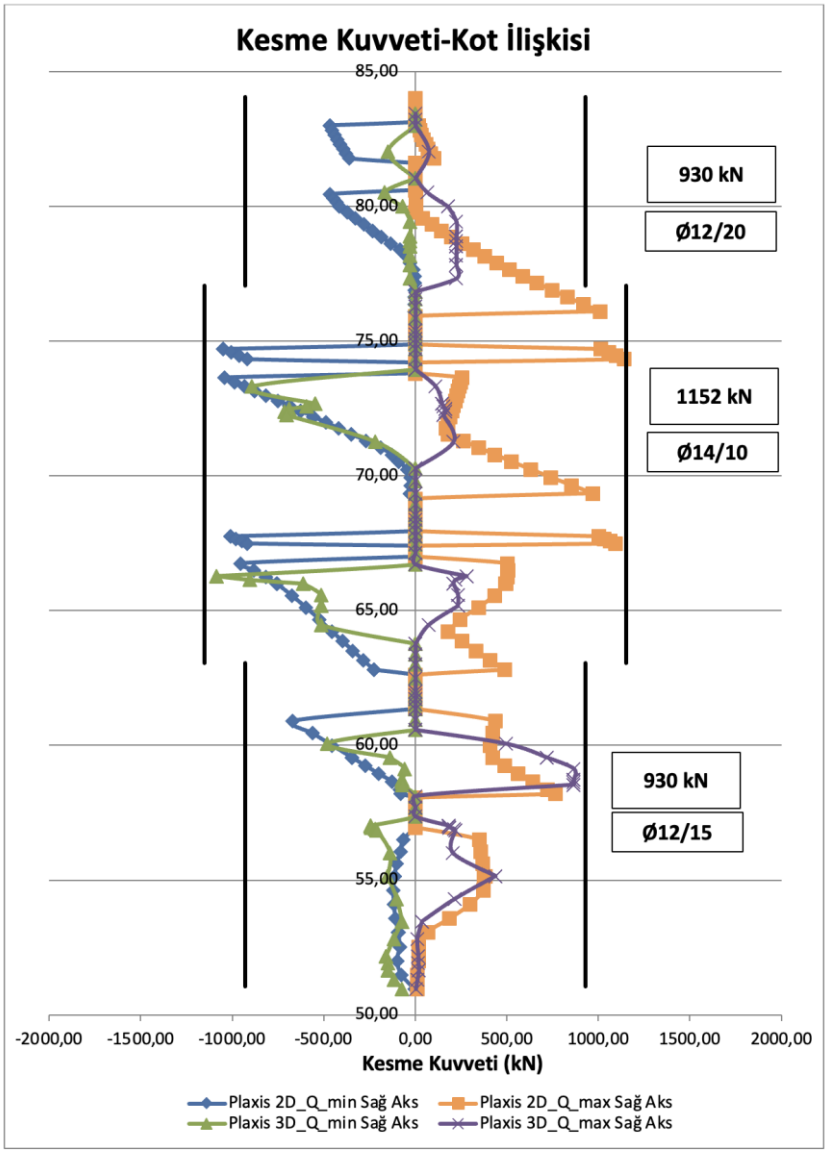


Şekil 5.24. Plaxis2D ve Plaxis3D kesme kuvveti analiz çıktıları (kN)

Kazık kesme donatısının karşılaştırması

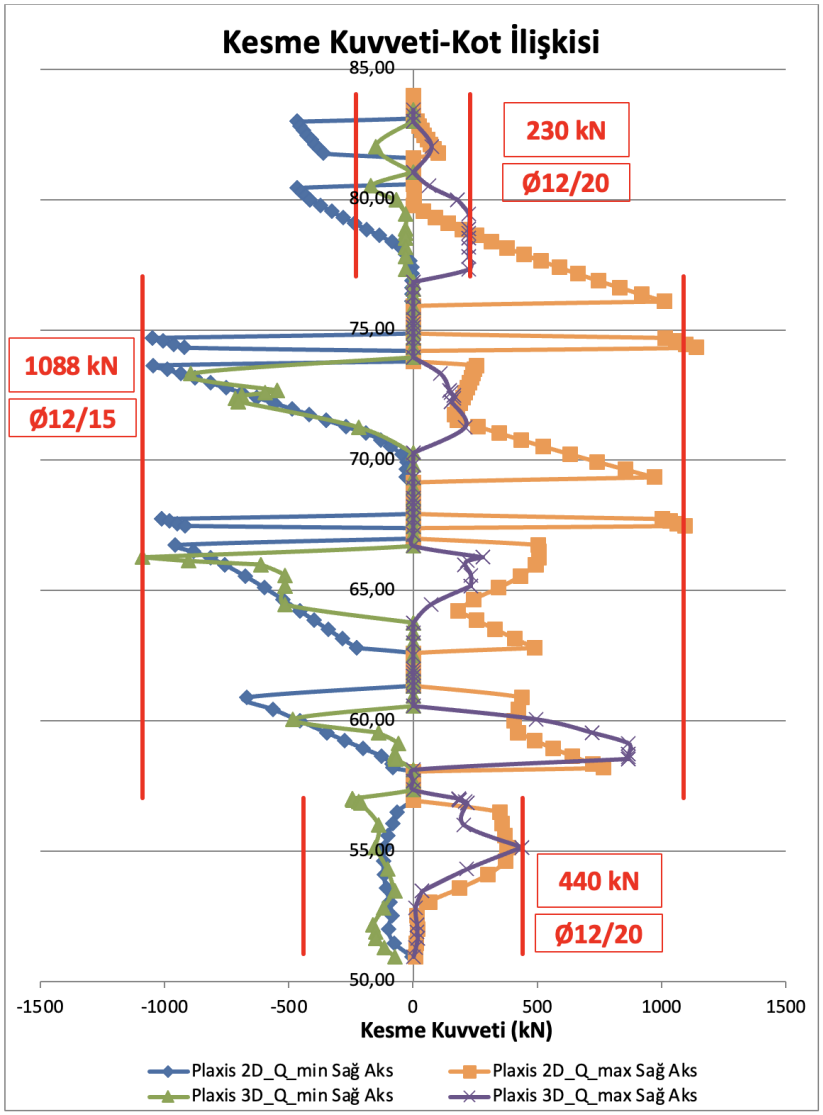
Programdan elde edilen ham veriler tasarım kuvvetine geçilirken (her proje özelinde değişkenlik gösterebileceği gibi) genellikle güvenlik faktörü 1,35 (KDYY, 2023) ile arttırılarak donatı seçimi yapılır. Donatı seçimi yapılırken dikkat edilen diğer bir husus

mesnet noktalarına gelen tesir kuvvetlerinin TS500 uyarınca donatı verilmemesi ve bu doğrultuda mesnetlerdeki reaksiyonların silinmesidir. Bu doğrultuda alınan ham veriler Şekil 5.25'te sunulduğu gibi hem faktörlü yüke çevrilmiş hem de mesnet reaksiyonları silinmiştir. Verilen donatılar kıyas yapılması amacı ile seçilmiş olup 2B ve 3B analiz sonuçlarına göre aynı kabuller gereğince verilmiştir.



Şekil 5.25. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı

Bu kesitte verilmesi gereken minimum donatı 12 mm çapında 15 cm ara ile betonarme kesit (kazık) boyunca verilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.26. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı

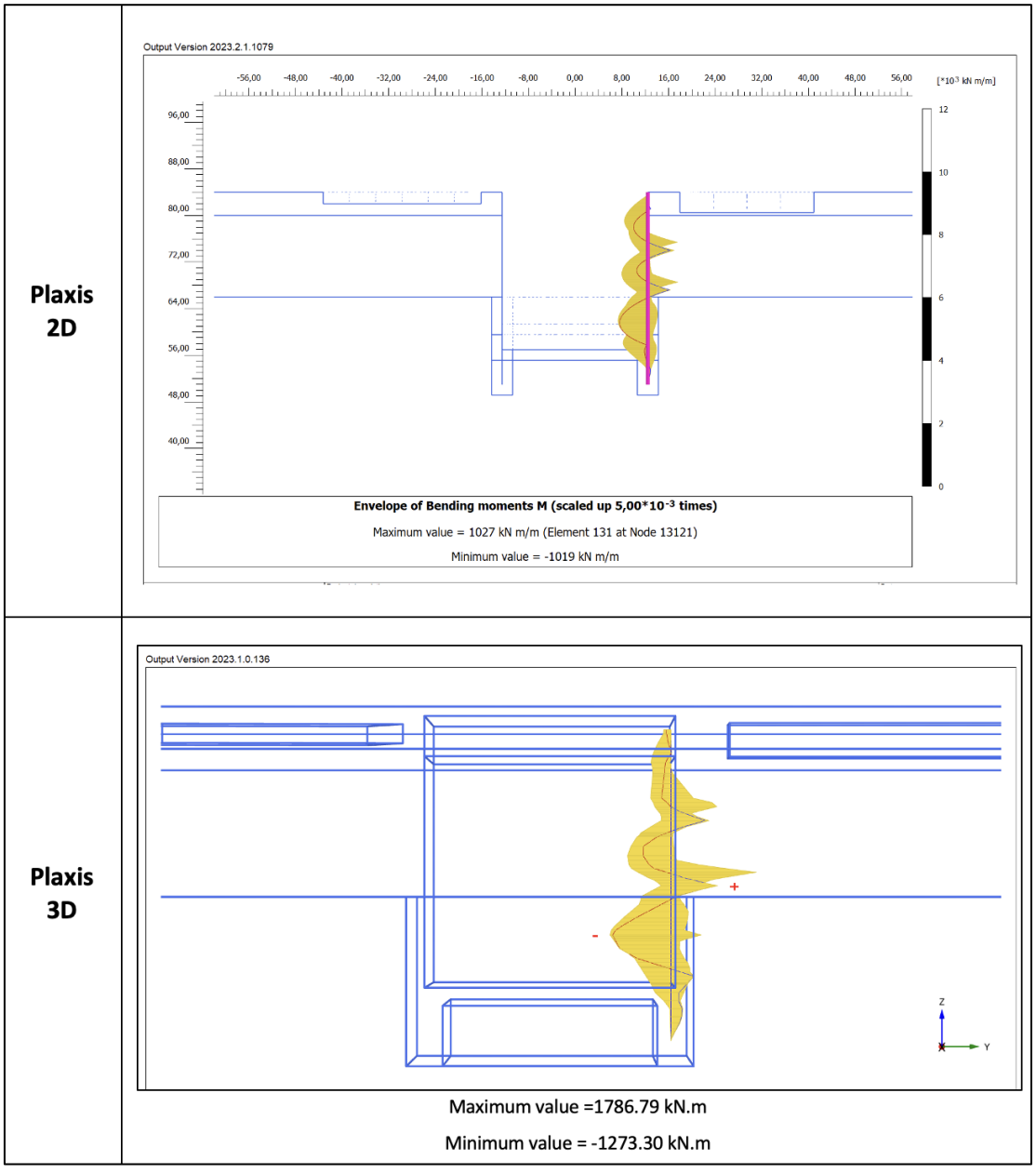
Verilen donatılar Şekil 5.26'da 3B analizinden elde edilen sonuçlar gereğince verilmiş olup donatı sınırları kırmızı düz çizgi ile taşıyabildiği kesme kuvveti sınırları gösterilmektedir. Elde edilen tasarım kesme kuvvetleri özetlendiğinde Çizelge 5.16'da sunulduğu gibi üç boyutlu analiz sonucunda %6 oranında daha az tesir kuvveti görülmüştür.

Çizelge 5.16. Tasarım kesme kuvvetlerinin kıyaslanması

	Kesme Kuvveti (kN) (1,35Self+1,35Soil)
Plaxis 2D	1152
Plaxis 3D	1088
Sonuç	%6 ↓

A-A kesiti sağ aks kazık moment zarfı, M

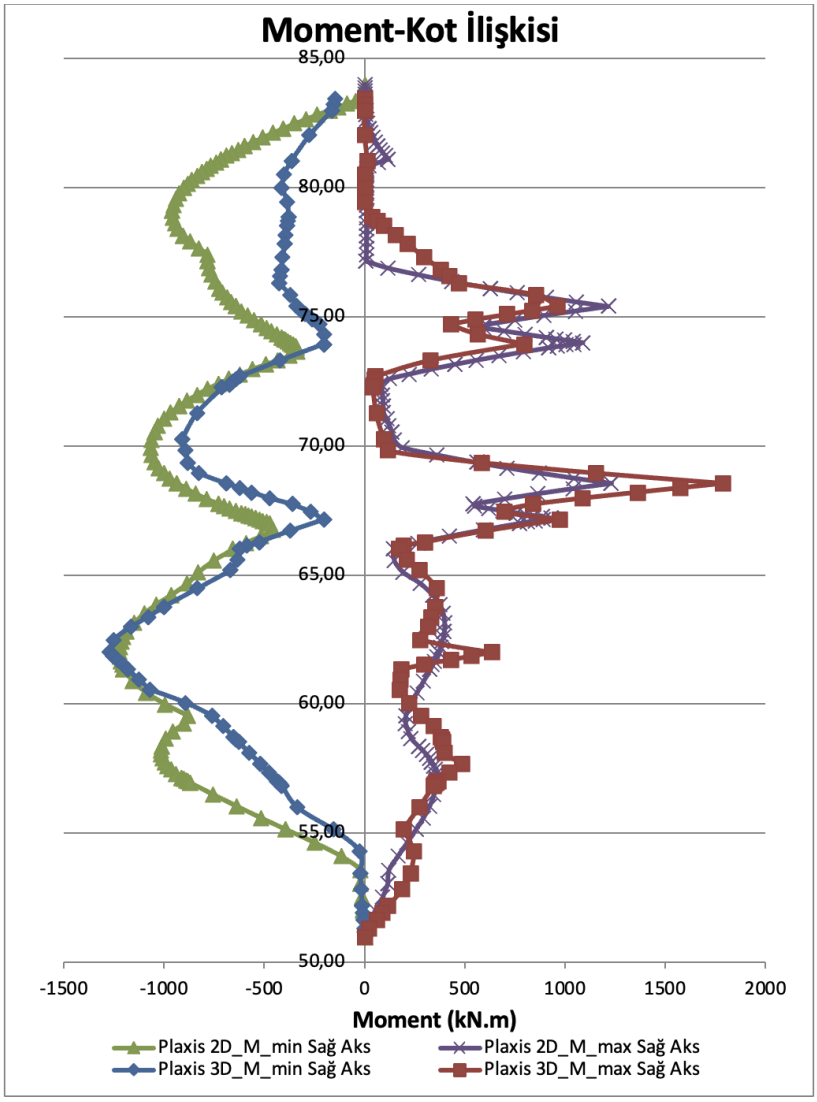
Analiz kesiti A-A sağ aksından alınan kazık kesme kuvveti değeri Plaxis2D'de 1027 kNm/m iken aynı değer Plaxis3D'de 1786,79 kNm olarak ölçülmektedir, Şekil 5.27'de Plaxis çıktıları verilmektedir.



Şekil 5.27. Eğilme momenti özet verileri

Kazığa gelen momentin karşılaştırması

Elde edilen Plaxis2D değeri metre başına gelen tesirler göstermekte olup kazık arağı olan 120 cm ile çarpılarak kıyas aynı birim üzerinden yapılmıştır. Bu durumda oluşan moment değerleri (kNm) Şekil 5.28'de sunulmaktadır.

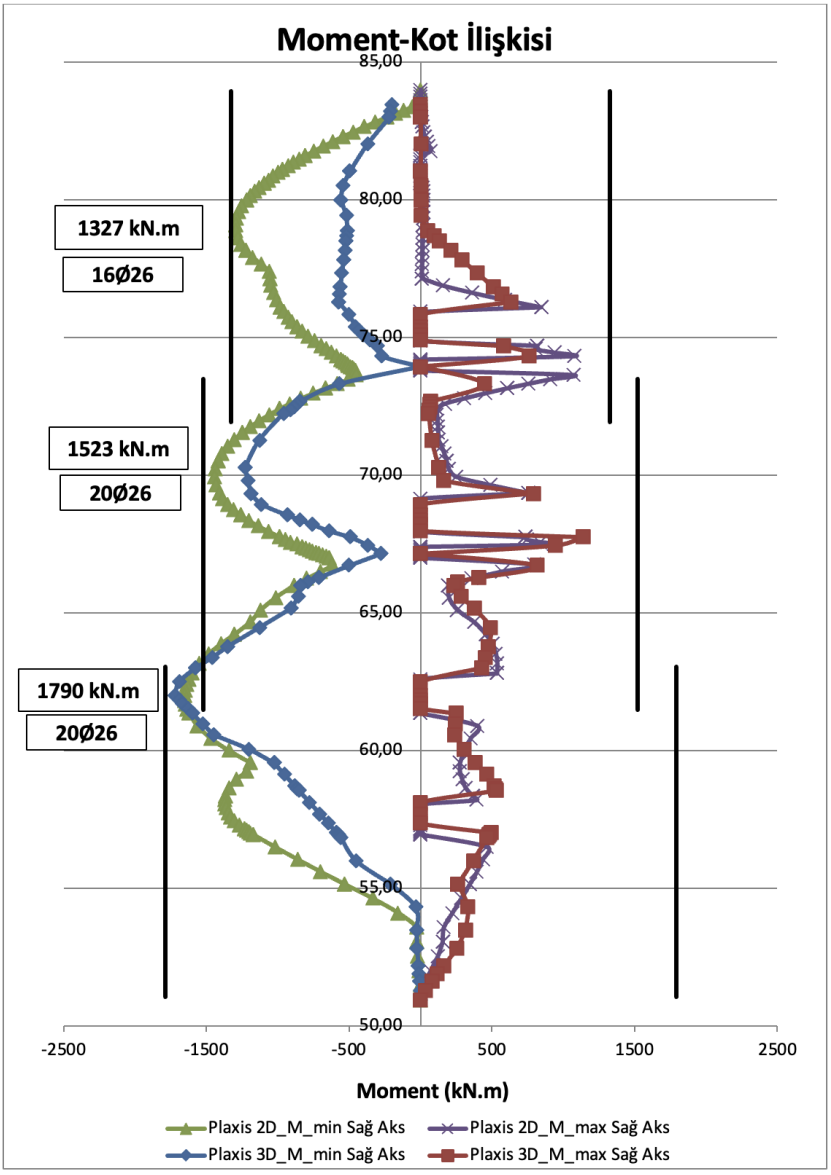


Şekil 5.28. Plaxis2D ve Plaxis3D eğilme momenti analiz çıktıları (kNm)

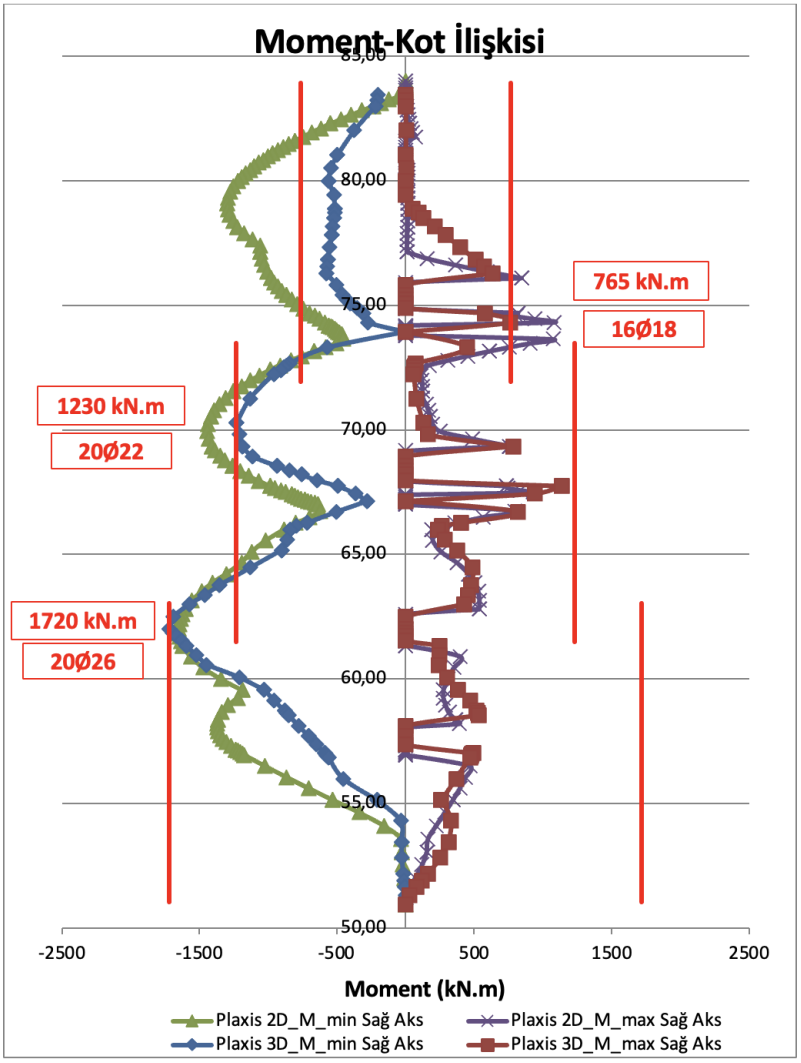
Kazık eğilme donatısının karşılaştırması

Programdan elde edilen ham veriler tasarım kuvvetine geçilirken (her proje özelinde değişkenlik gösterebileceği gibi) genellikle güvenlik faktörü 1,35 (KDYY, 2023) ile arttırılarak donatı seçimi yapılır. Donatı seçimi yapılırken dikkat edilen diğer bir husus

mesnet noktalarına gelen tesir kuvvetlerinin TS500 uyarınca donatı verilmemesi ve bu doğrultuda mesnetlerdeki reaksiyonların silinmesidir. Bu doğrultuda alınan ham veriler Şekil 5.28'de sunulduğu gibi hem faktörlü yüke çevrilmiş hem de mesnet reaksiyonları silinmiştir. Kesme kuvvetlerinden farklı olarak kazı iç yüzeyinde oluşan ve eğilme iç tesir moment yerlerine denk gelen noktalar silinmemiştir. Verilen donatılar kıyas yapılması amacı ile seçilmiş olup 2B ve 3B analiz sonuçlarına göre aynı kabuller gereğince verilmiştir.



Şekil 5.29. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı



Şekil 5.30. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı

Verilen donatılar Şekil 5.29'da 3B analizinden elde edilen sonuçlar gereğince verilmiş olup donatı sınırları kırmızı düz çizgi ile taşıyabildiği eğilme momentinin sınırları gösterilmektedir. Alınan sonuç momentlerinin özetlendiği Çizelge 5.17'de de görüldüğü üzere üç boyutlu analiz sonucunda %4 oranında daha fazla eğilme momenti görülmüştür.

Çizelge 5.17. B-B kesiti eğilme momenti kıyas tablosu (faktörsüz ve faktörlü)

	Moment (kN.m/m) (Self+Soil)	Moment (kN.m) (Self+Soil)	Moment (kN.m) (Self+Soil)
Plaxis 2D	1019	1223	1651
Plaxis 3D	-	1273	1719
Sonuç		%4 ↑	%4 ↑

A-A kesiti sağ aks kazık özet tabloları

Analiz kesiti olarak ele alınan A-A kesitinin sağ aksı incelendiğinde kazıkta meydana gelen deplasman değerleri, kazık kesme kuvveti (faktörlü) ve eğilme momenti (faktörlü) hem iki boyutlu analizlerde hem de üç boyutlu analizlerden elde edilerek Çizelge 5.18'de kıyaslanmıştır.

Bu özet tablo aynı bölgeden alınan sonuçların yüzdece farklılıklarını göstermektedir. Sonuçların deplasman ve kesme kuvvetleri açısından incelendiğinde %13 ile %6 arasında değişkenlik gösterdiği görülmekte olup bu değerler azalan yöne iken; eğilme momenti için elde edilen sonuçlar incelendiğinde momentlerde üç boyutlu analizlerin mertebece yakın olsa da %4 daha fazla tesir kuvvetine sahip olduğu göstermektedir.

Çizelge 5.18. Plaxis2D ve Plaxis3D analiz sonuçları özet tablosu

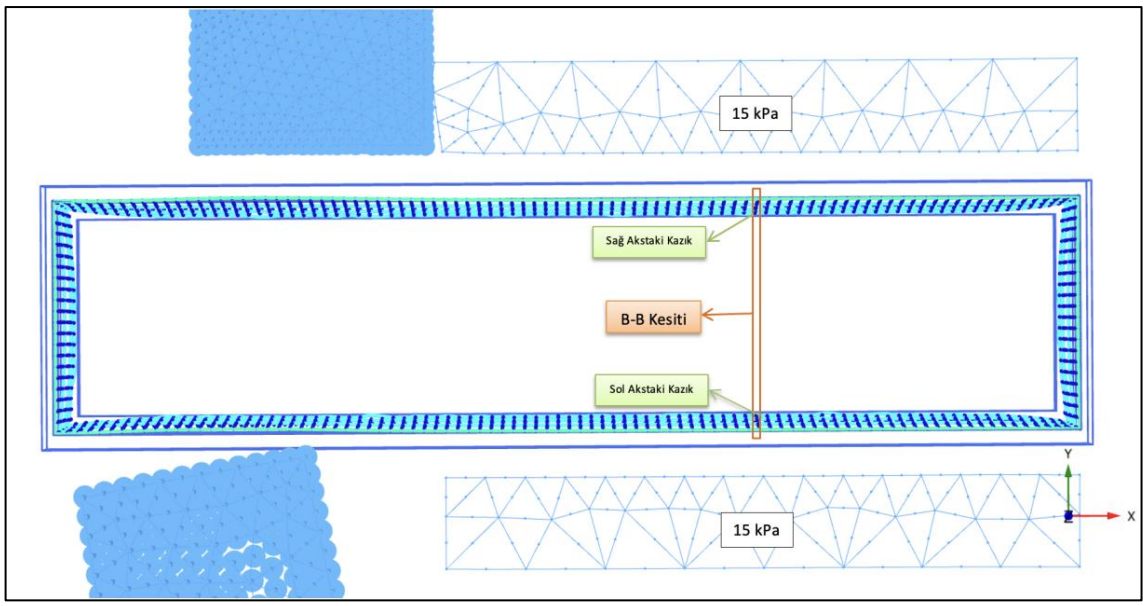
	Yatay Deplasman (cm)	Kesme Kuvveti (kN) (1,35Self+1,35Soil)	Moment (kN.m) (1,35Self+1,35Soil)
Plaxis 2D	3,48	1152	1651
Plaxis 3D	3,02	1088	1719
Sonuç	%13 ↓	%6 ↓	%4 ↑

Üç boyutlu analizlerde kazı destek sistemi modellenirken tüm çevre yapılar ve istasyonun geometrik yapısı birebir modellenebilmekte olup oluşan farklı etkiler aynı model üzerinden gözlemlenebilmektedir. Ancak iki boyutta analiz yaparken çözüm sistemi kesitler üzerinden ilerlenerek yapılmaktadır. Bu doğrultuda kesit sayısı ve alınan kesitlerin yerleri önemli olup genel davranışı gerçekte olduğu şekilde yansıtmalıdır. Bu doğrultuda kazı destek sisteminin davranışını incelemek amacıyla bir kesit daha alınmış aynı etkiler diğer analiz kesitinde de incelenerek sonuçlara dair kıyaslamalar ve çıkarımlar yapılması amaçlanmıştır.

A-A analiz kesitine ek kesit istasyonun en kritik bölgesini temsil etmesi için seçilmişken alınan diğer kesit istasyonun diğer bölgelerini temsil edecek şekilde seçilmiş olup iksa yapısında oluşacak farklı yüklemelerin etkilerini daha doğru yansıtmıştır.

5.3.2. Analiz kesiti B-B

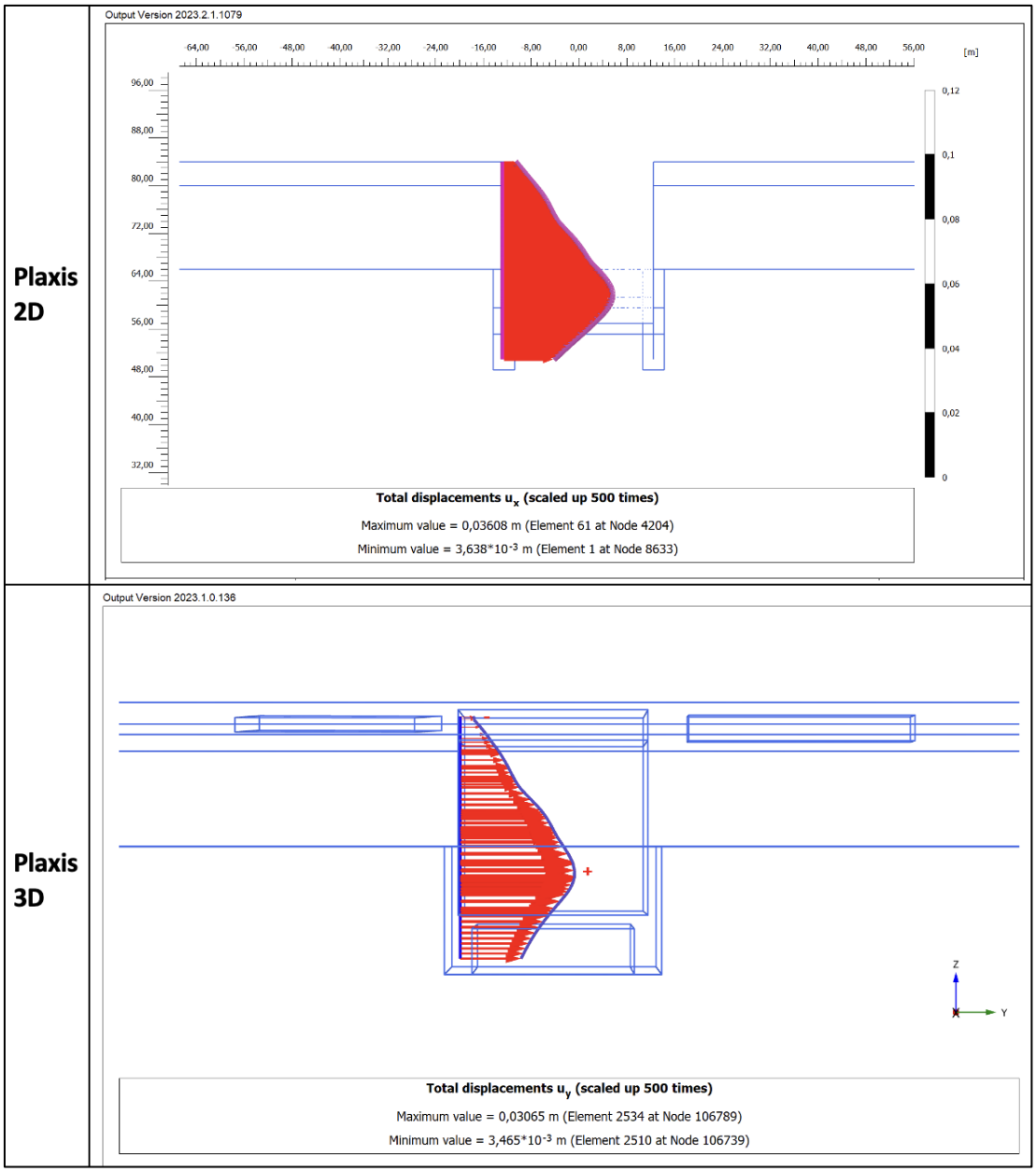
Analiz kesiti için seçilen diğer bir bölge Şekil 5.31'de verilmiş olup yapılaşmanın olmadığı çevre yüklemesi olarak sabit 15 kPa'lık bir yük verilen B-B Kesiti alınmıştır. Plaxis2D'de alınan analiz kesitinde de aynı bölgeyi temsil etmesi amacı ile aynı koşullar sağlanmıştır. Kazık deplasman değerleri ve kesit tesirleri sol kazık aks üzerinden sunulmaktadır.



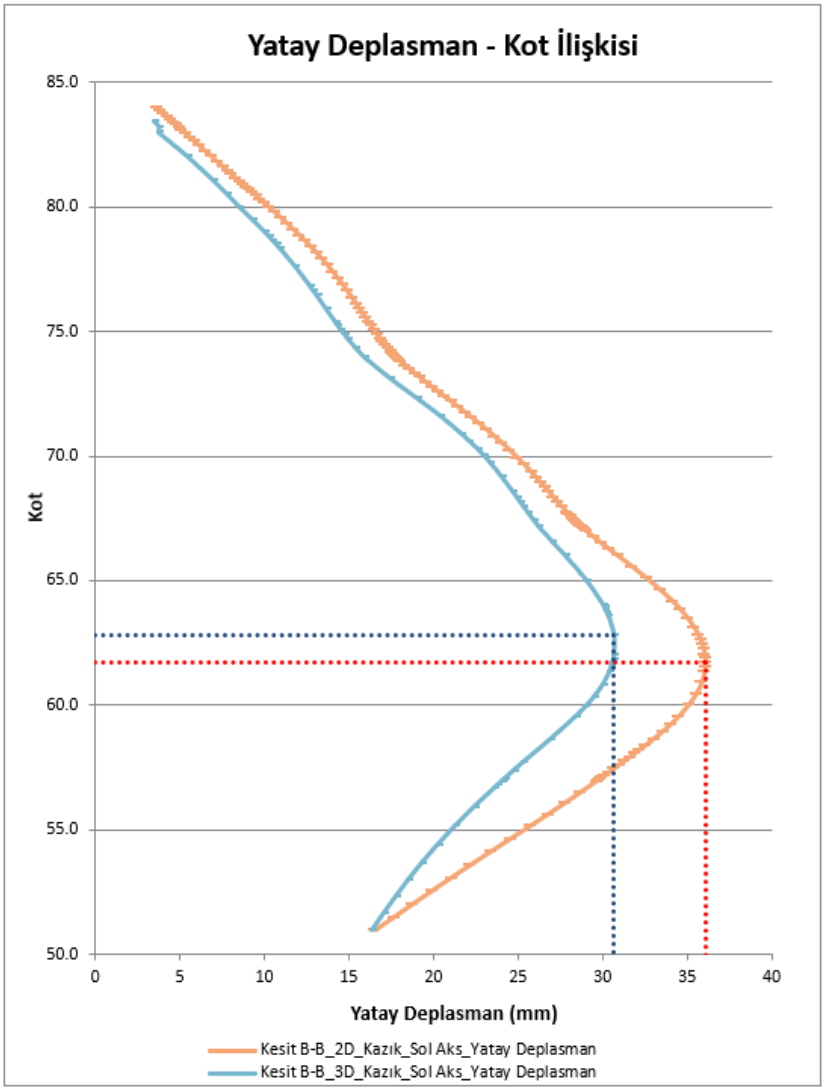
Şekil 5.31. Analiz kesiti plan gösterimi (analiz kesiti B-B)

B-B kesiti sol aks kazık yatay deplasman

Analiz kesiti B-B sol aksından alınan kazık deplasman değeri incelendiğinde Plaxis2D'de maksimum deplasman 3,608 cm iken soket ucu 1 cm'den az olarak ölçülmektedir. Aynı değer Plaxis3D'de ise sırası ile 3,065 cm ile soket ucu 1 cm'den az olarak ölçülmektedir. Deplasman değerleri Şekil 5.32'de sunulmaktadır.



Şekil 5.32. Deplasman özet verileri



Şekil 5.33. Yatay deplasman değerlerinin 2B ve 3B analiz sonuçları

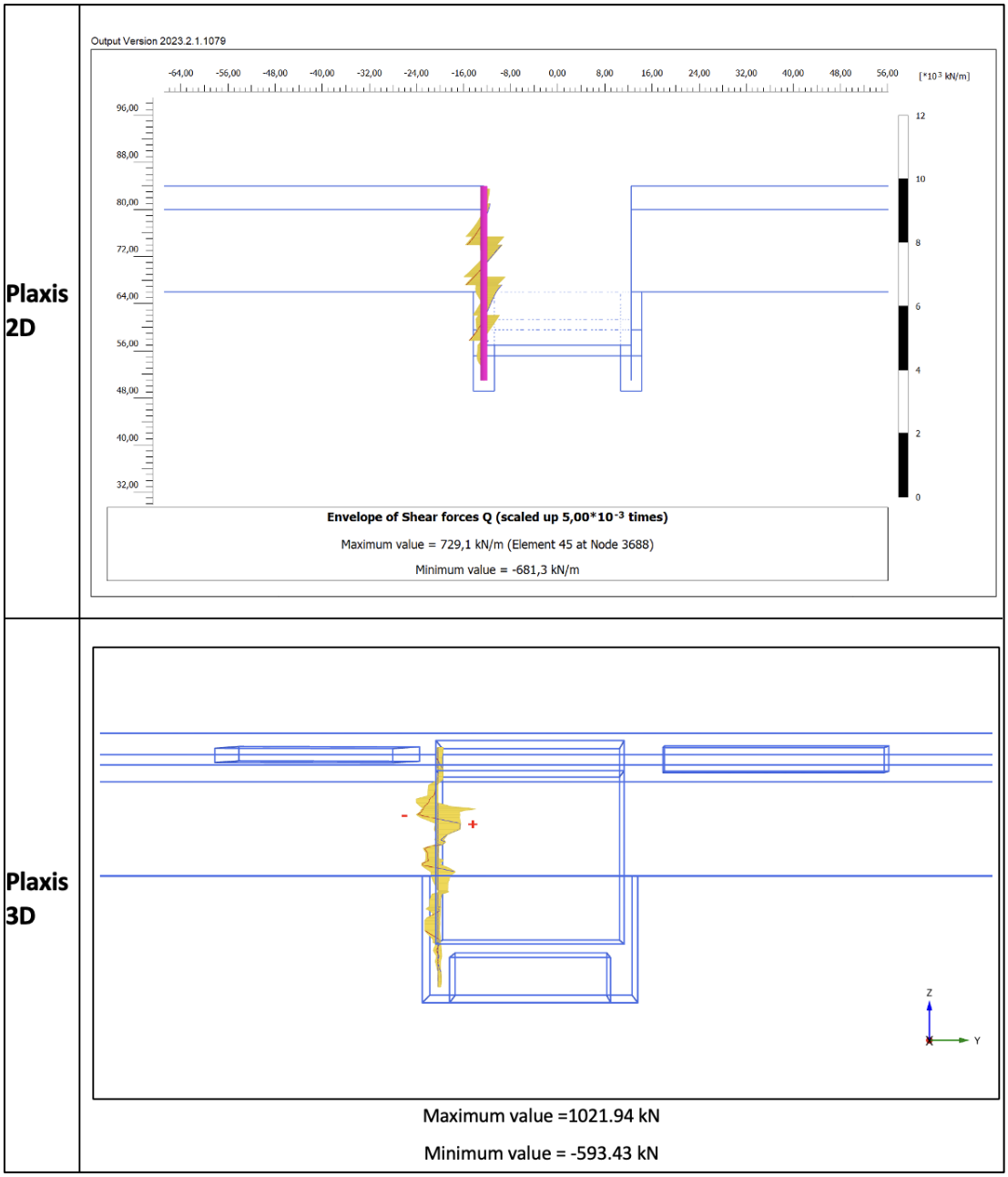
Aynı kabuller doğrultusunda yapılan analiz sonuçları Şekil 5.33'te üst üste yazdırılmış davranışın benzer olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlarda ise yatay deplasmanların paralelliğine ek olarak mertebece yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Çizelge 5.19'da özetlenmiş olup 3B analiz yapılması sistemde okunan yatay deplasmanın %15 daha az olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.19. 2B ve 3B analiz sonucuna göre deplasmanların yüzdece değişimi

	Deplasman (cm)
Plaxis 2D (Self+Soil)	3,61
Plaxis 3D (Self+Soil)	3,06
Sonuç	%15 ↓

B-B kesiti sol aks kazık kesme kuvveti zarfı, Q

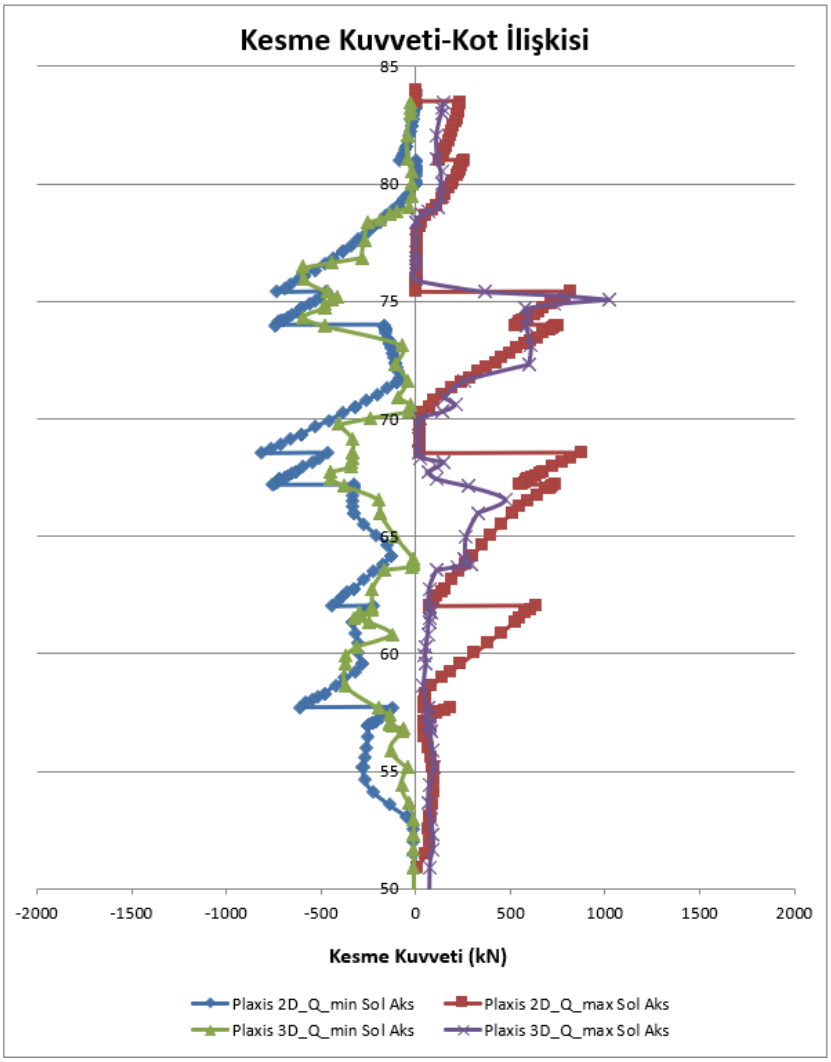
Analiz kesiti B-B sol aksından alınan kazık kesme kuvveti değeri Plaxis2D'de 729,1 kN/m iken aynı değer Plaxis3D'de 1021,94 kN olarak ölçülmektedir, Şekil 5.34'te Plaxis çıktıları verilmektedir.



Şekil 5.34. Kesme kuvveti özet verileri

Kazığa gelen kesme kuvvetlerinin karşılaştırması

Elde edilen Plaxis2D değeri metre başına gelen kesme kuvvetini göstermekte olup kazık arağı olan 120 cm ile çarpılarak kıyas aynı birim üzerinden yapılmıştır. Bu durumda kesme kuvveti değerleri (kN) Şekil 5.35'te sunulmaktadır.

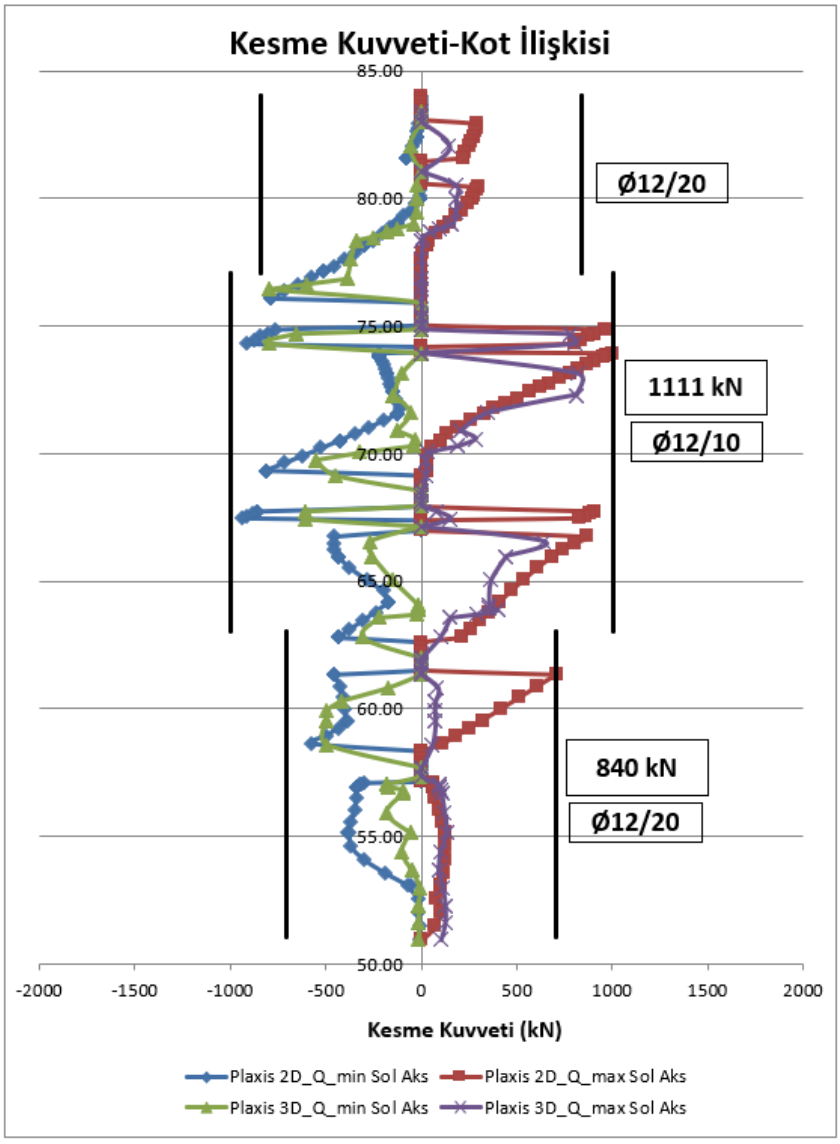


Şekil 5.35. Plaxis2D ve Plaxis3D kesme kuvveti analiz çıktıları (kN)

Kazık kesme donatısının karşılaştırması

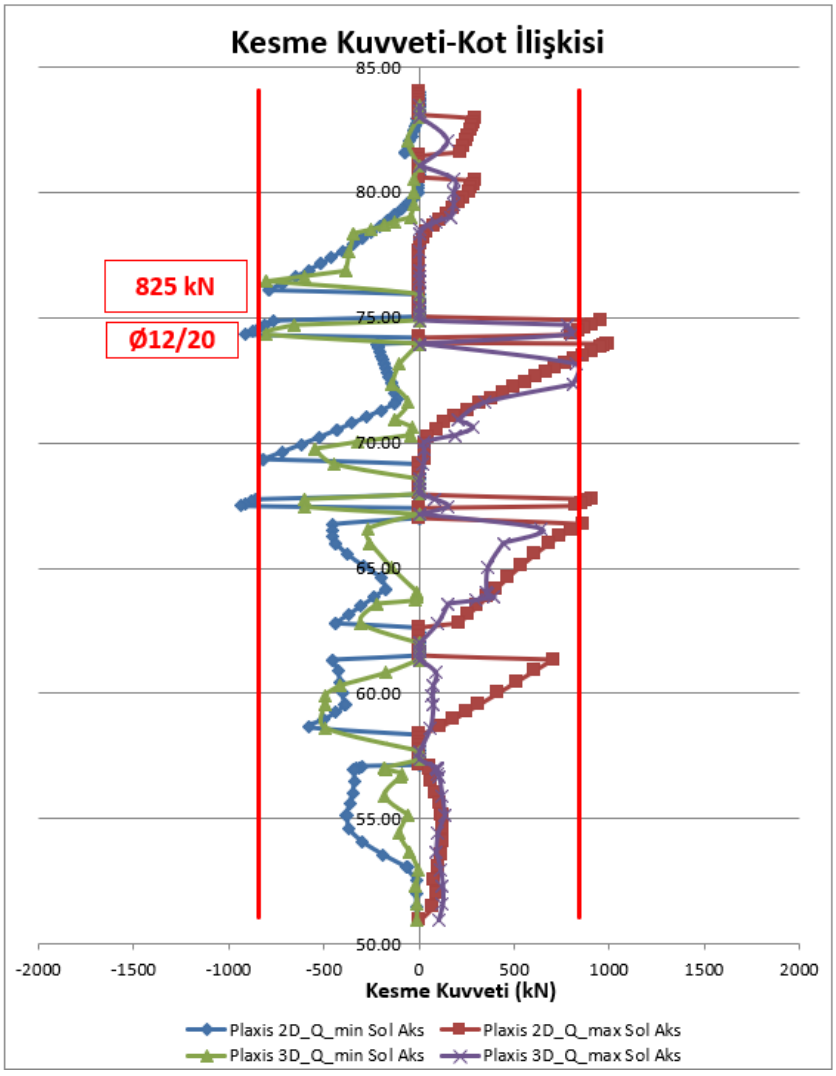
Programdan elde edilen ham veriler tasarım kuvvetine geçilirken (her proje özelinde değişkenlik gösterebileceği gibi) genellikle güvenlik faktörü 1,35 (KDYY, 2023) ile arttırılarak donatı seçimi yapılır. Donatı seçimi yapılırken dikkat edilen diğer bir husus mesnet noktalarına gelen tesir kuvvetlerinin TS500 uyarınca donatı verilmemesi ve bu

doğrultuda mesnetlerdeki reaksiyonların silinmesidir. Bu doğrultuda alınan ham veriler Şekil 5.36'da sunulduğu gibi hem faktörlü yüke çevrilmiş hem de mesnet reaksiyonları silinmiştir. Verilen donatılar kıyas yapılması amacı ile seçilmiş olup 2B ve 3B analiz sonuçlarına göre aynı kabuller gereğince verilmiştir.



Şekil 5.36. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı

Bu kesitte verilmesi gereken minimum donatı 12 mm çapında 20 cm ara ile betonarme kesit (kazık) boyunca verilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.37. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık kesme donatısı

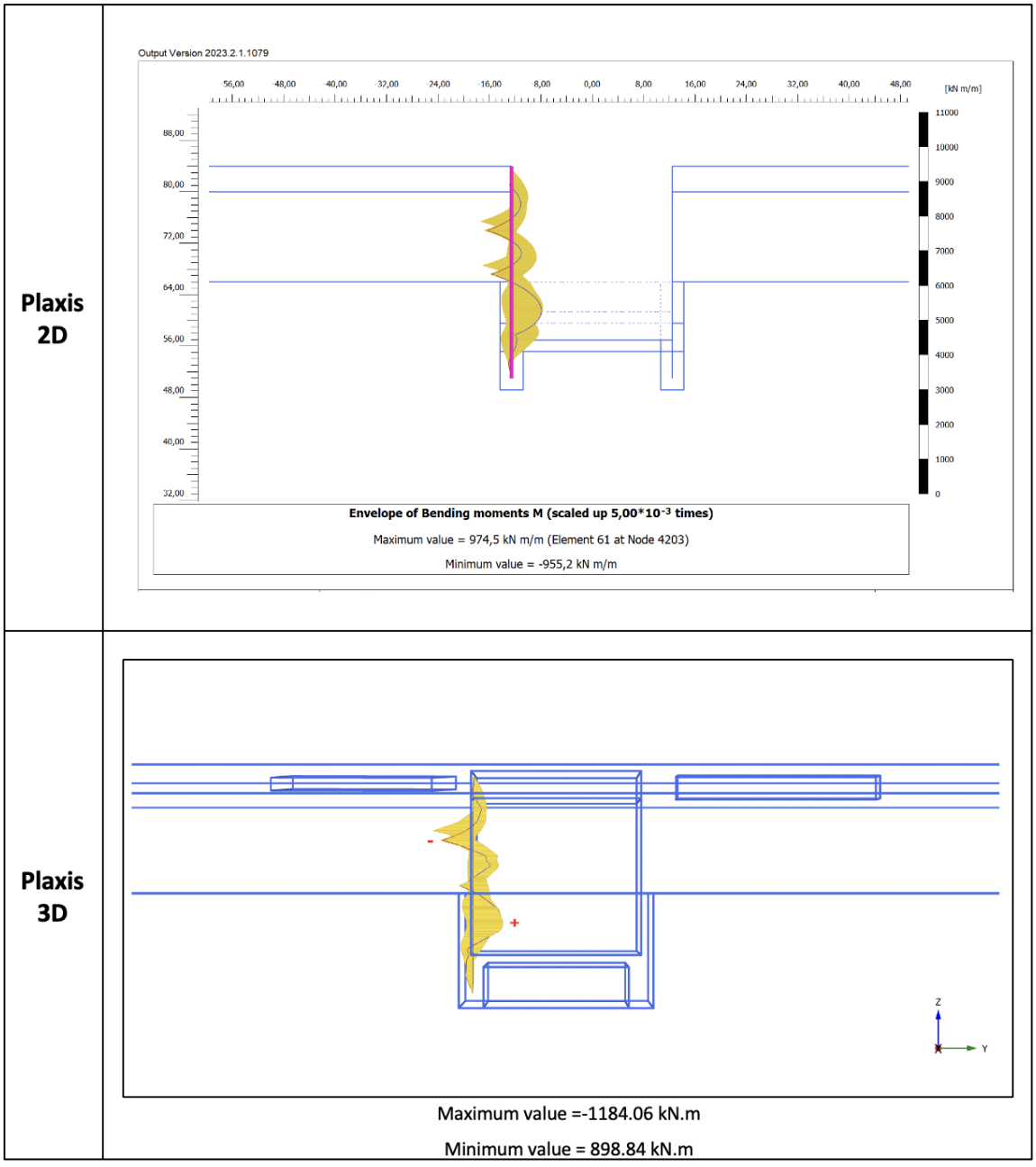
Verilen donatılar Şekil 5.37'de 3B analizinden elde edilen sonuçlar gereğince verilmiş olup donatı sınırları kırmızı düz çizgi ile taşıyabildiği kesme kuvveti sınırları gösterilmektedir. Elde edilen tasarım kesme kuvvetleri özetlendiğinde Çizelge 5.20'de sunulduğu gibi üç boyutlu analiz sonucunda %26 oranında daha az tesir kuvveti görülmüştür.

Çizelge 5.20. Tasarım kesme kuvvetlerinin kıyaslanması

	Kesme Kuvveti (kN) (1,35Self+1,35Soil)
Plaxis 2D	1111
Plaxis 3D	825
Sonuç	%26 ↓

B-B kesiti sol aks kazık moment zarfı, M

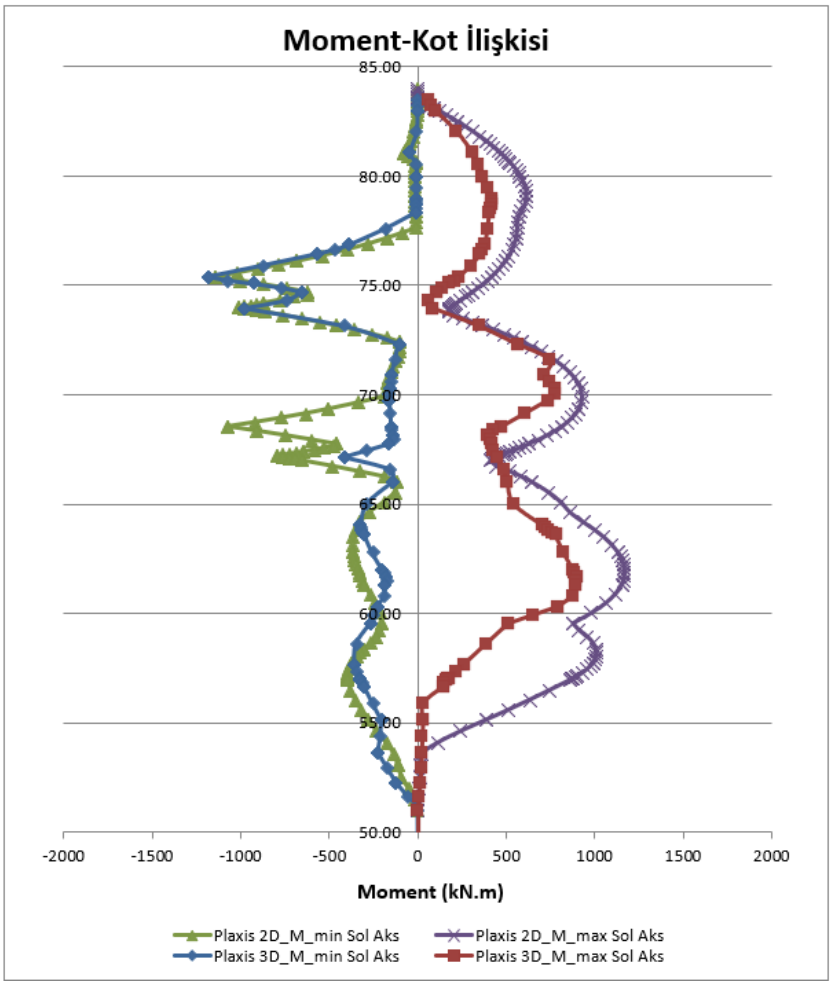
Analiz kesiti B-B sol aksından alınan kazık momenti değeri Plaxis2D'de 974,5 kNm/m iken aynı değer Plaxis3D'de 1184,06 kN olarak ölçülmektedir, Şekil 5.38'de Plaxis çıktıları verilmektedir.



Şekil 5.38. Eğilme momenti özet verileri

Kazığa gelen momentin karşılaştırması

Elde edilen Plaxis2D değeri metre başına gelen tesirleri göstermekte olup kazık arağı olan 120 cm ile çarpılarak kıyas aynı birim üzerinden yapılmıştır. Bu durumda eğilme moment değerleri (kNm) Şekil 5.39'da sunulmaktadır.

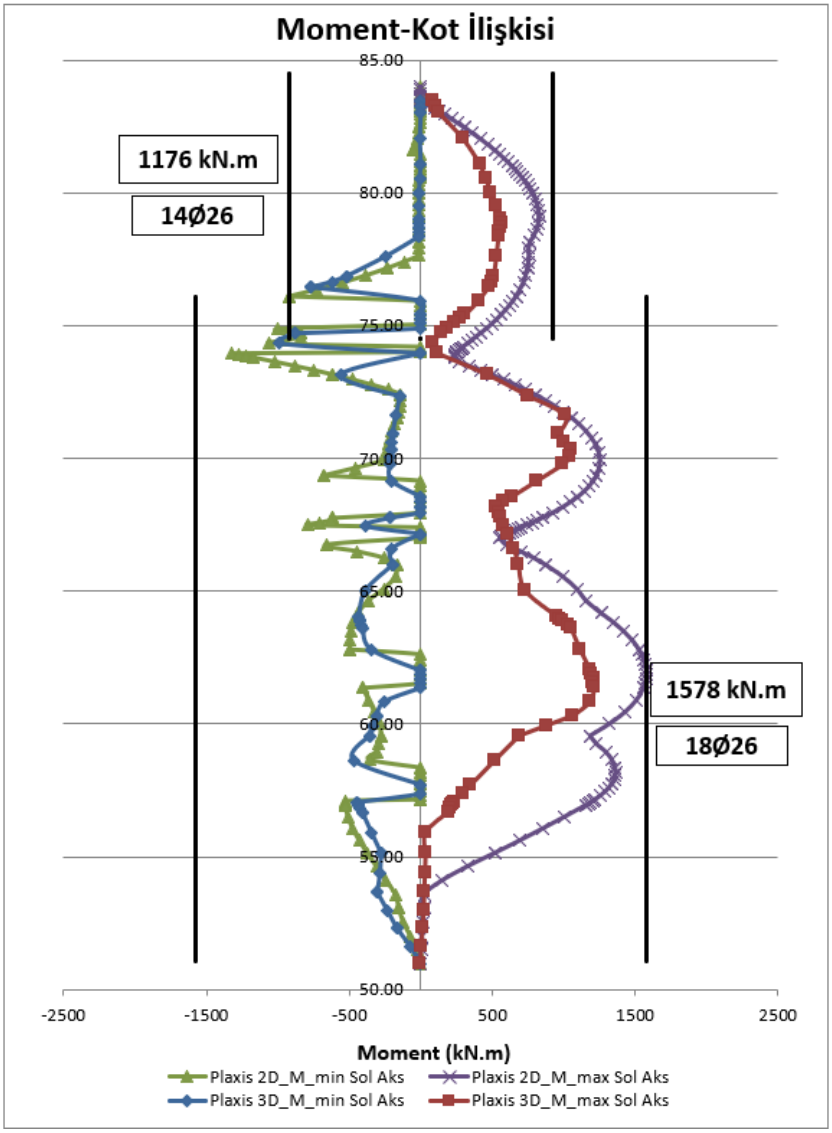


Şekil 5.39. Plaxis2D ve Plaxis3D eğilme momenti analiz çıktıları (kNm)

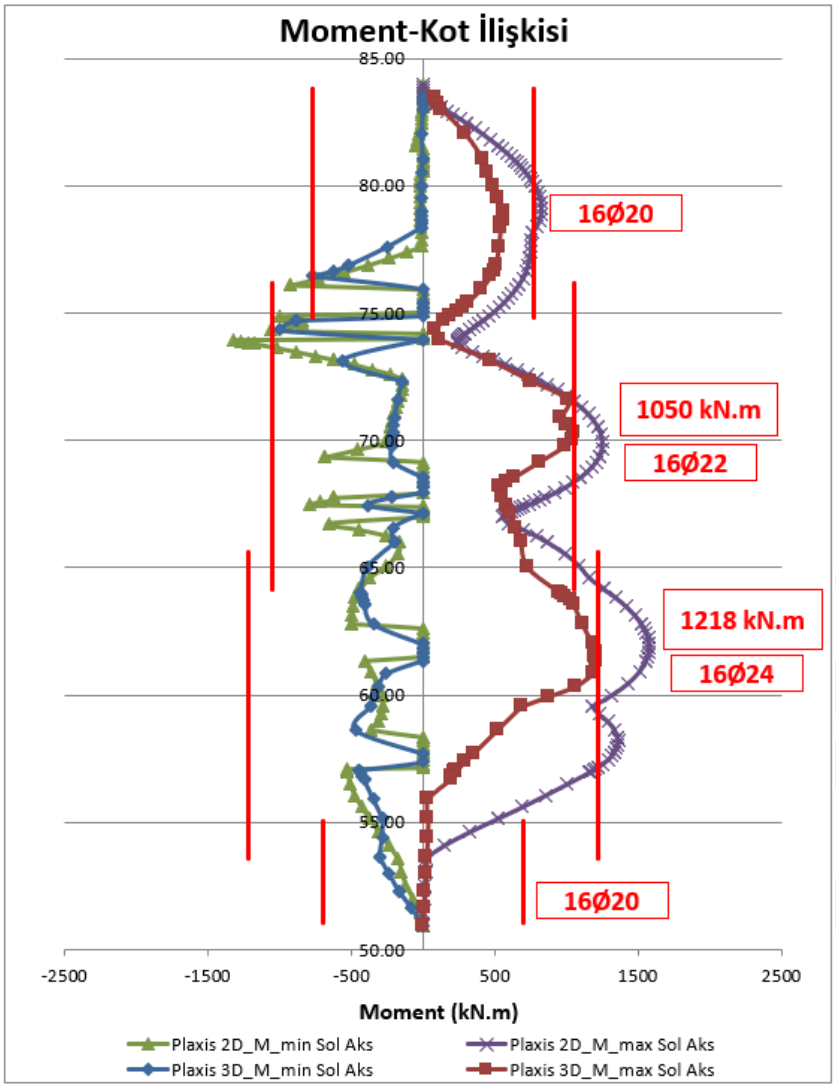
Kazık eğilme donatısının karşılaştırması

Programdan elde edilen ham veriler tasarım kuvvetine geçilirken (her proje özelinde değişkenlik gösterebileceği gibi) genellikle güvenlik faktörü 1,35 (KDYY, 2023) ile arttırılarak donatı seçimi yapılır. Donatı seçimi yapılırken dikkat edilen diğer bir husus mesnet noktalarına gelen tesir kuvvetlerinin TS500 uyarınca donatı verilmemesi ve bu doğrultuda mesnetlerdeki reaksiyonların silinmesidir. Bu doğrultuda alınan ham veriler Şekil 5.40'ta sunulduğu gibi hem faktörlü yüke çevrilmiş hem de mesnet reaksiyonları

silinmiştir. Kesme kuvvetlerinden farklı olarak kazı iç yüzeyinde oluşan ve eğilme iç tesir moment yerlerine denk gelen noktalar silinmemiştir. Verilen donatılar kıyas yapılması amacı ile seçilmiş olup 2B ve 3B analiz sonuçlarına göre aynı kabuller gereğince verilmiştir.



Şekil 5.40. Plaxis2D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı



Şekil 5.41. Plaxis3D kullanılarak verilen kazık eğilme donatısı

Verilen donatılar Şekil 5.41'de 3B analizinden elde edilen sonuçlar gereğince verilmiş olup donatı sınırları kırmızı düz çizgi ile taşıyabildiği eğilme momentinin sınırları gösterilmektedir. Elde edilen tasarım eğilme momentlerini özetlendiği Çizelge 5.21'de görüldüğü gibi üç boyutlu analiz sonucunda %23 oranında daha az tesir kuvveti görülmüştür.

Çizelge 5.21. B-B Kesiti eğilme momenti kıyas tablosu (faktörsüz ve faktörlü)

	Moment (kN.m/m) (Self+Soil)	Moment (kN.m) (Self+Soil)	Moment (kN.m) (Self+Soil)
Plaxis 2D	975	1169	1578
Plaxis 3D	-	899	1214
Sonuç		%23 ↓	%23 ↓

B-B kesiti sol aks kazık özet tabloları

Analiz kesiti olarak ele alınan B-B kesiti incelendiğinde kazıkta meydana gelen deplasman değerleri, kazık kesme kuvveti (faktörlü) ve eğilme momenti (faktörlü) hem iki boyutlu analizlerde hem de üç boyutlu analizlerden elde edilerek Çizelge 5.25 de özetlenmiştir. Bu özet tablo aynı analiz bölgesi üzerinde alınan sonuçların yüzdece farklılıklarını göstermektedir. Sonuçların %15 ile %26 arasında değişkenlik gösterdiği görülmekte olup sonuçların yaklaşık olarak aynı mertebede değişimi gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.22. Plaxis2D ve Plaxis3D analiz sonuçları özet tablosu

	Yatay Deplasman (cm)	Kesme Kuvveti (kN) (1,35Self+1,35Soil)	Moment (kN.m) (1,35Self+1,35Soil)
Plaxis 2D	3,61	1111	1578
Plaxis 3D	3,06	825	1214
Sonuç	%15 ↓	%26 ↓	%23 ↓

5.3.3. Çelik strut analiz sonuçları

Kazık tesir kuvvetleri ve kazık deplasmanlarının yanı sıra bir derin kazı sisteminde önemli olan diğer bileşen iç destek sisteminden elde edilen sonuçların kıyaslanmasıdır. Bu durum karmaşık bir sistem olan düşey ve yatay etkilerin zemin basıncına hangi oranda karşılık verdiğini ortaya koymakta olup bu kıyas 2B ve 3B analiz sonunda yüzdece farklarını göstermektedir.

Çelik strut olarak tanımlanan yatay destek elemanı yapısal çelik malzemesinden oluşturulan yüksek dayanımlı, basınca çalışan ve zemin basıncının oluşturduğu yatay hareketi engellemek için kullanılır. Bu çalışma kapsamında boru kesit tercih edilmiş olup her derinlik için gelen yük dağılımına göre strutın çapı ve et kalınlığı değişkenlik göstermiştir.

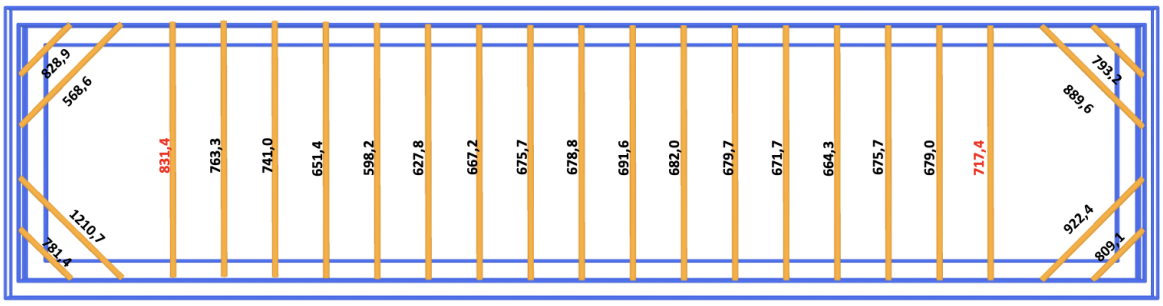
Yatay iksa elemanları iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde aynı girdiler ile tanımlanmış olup elde edilen sonuçlar bu doğrultuda kıyaslanmıştır.

Üç boyutlu analizden kat bazındaki her strut yükü alınabilirken, iki boyutlu program verileri ilgili kesit bölgesindeki strut sonucunu vermektedir. Bu doğrultuda iki boyutlu model sonuçlarından alınan strut yükleri Çizelge 5.23'te verilmektedir.

Çizelge 5.23. Plaxis2D strut yükleri

Analiz Kesiti	Yatay İksa Elemanı	Kotu (m)	Tipi	Boru Destek Yükü Nmax (kN)
Plaxis 2D Kesit A-A	1. Sıra	+83,55	D812,8*15,9 mm	1581
	2. Sıra	+75,40	D1219,2*20 mm	7926
	3. Sıra	+68,55	D1219,2*20 mm	8080
	4. Sıra	+62,05	D1219,2*15,9 mm	4989
Plaxis 2D Kesit B-B	1. Sıra	+83,55	D812,8*15,9 mm	1003
	2. Sıra	+75,40	D1219,2*20 mm	6499
	3. Sıra	+68,55	D1219,2*20 mm	7039
	4. Sıra	+62,05	D1219,2*15,9 mm	4503

Birinci sıra başlık kirişi kotu olarak tasarlanmış olup 2B analizde ve 3B analizde aynı strut çapı (812,8 mm çapında, et kalınlığı 15,9 mm çelik boru) analizlere dahil edilmiştir. Şekil 5.42'de verilen Plaxis3D kat planında bütün strutlara gelen eksenel kuvvet verilmiş olup analiz kesitinin temsil ettiği bölgedeki maksimum kuvvet kıyas için değerlendirmeye dahil edilmiştir.



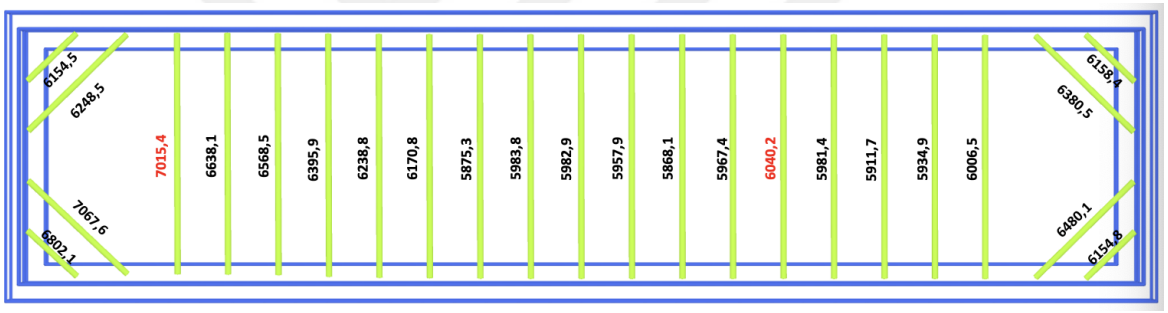
Şekil 5.42. +83,55 kotu strut eksenel kuvveti, kN, kombinasyon: Self+Soil

Çapraz strutlar ile düz strutların birleştiği bölge en çok çalışan strutın bulunduğu yeri göstermektedir. 2B analizin sonuçları ile maksimum yük alan ilgili strut eksenel yükü kıyaslandığında Çizelge 5.24'te görüldüğü gibi strut yükleri A-A kesit içi yaklaşık yarıya inmekte olup B-B için bu yüzde yaklaşık %30 mertebesindedir.

Çizelge 5.24. +83,55 kotu strut kıyas tablosu

	A-A Kesiti Eksenel Yük, N (kN) (Self+Soil)	B-B Kesiti Eksenel Yük, N (kN) (Self+Soil)
Plaxis 2D	1580,7	1003,0
Plaxis 3D	831,4	717,4
Sonuç	%47 ↓	%28 ↓

İkinci sıra (birinci kuşak kirişi) kotu olarak tasarlan 1219,2 mm çapında, et kalınlığı 20 mm çelik boru 2B analizde ve 3B analizde aynı boyutta girdi olacak şekilde alınmıştır. Şekil 5.43'te verilen Plaxis3D kat planında bütün strutlara gelen eksenel kuvvet verilmiş olup analiz kesitinin temsil ettiği bölgedeki maksimum kuvvet kıyas için değerlendirmeye dahil edilmiştir.



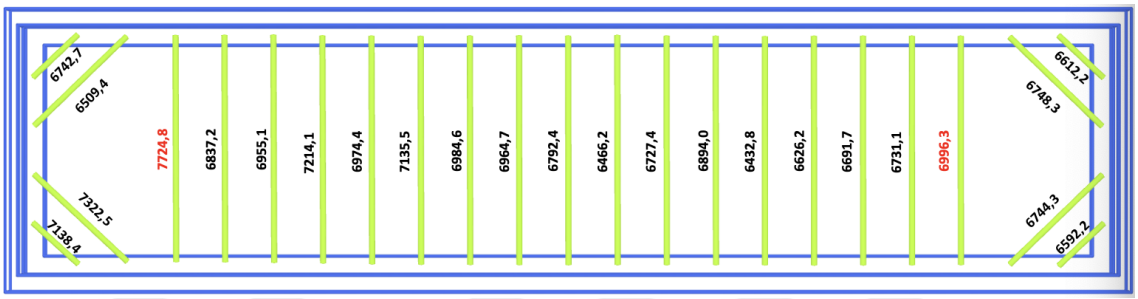
Şekil 5.43. +75,40 kotu strut eksenel kuvveti, kN, kombinasyon: Self+Soil

Çapraz strutlar ile düz strutların birleştiği bölge en çok çalışan strutın bulunduğu yeri göstermektedir. 2B analizin sonuçları ile maksimum yük alan ilgili strut eksenel yükü kıyaslandığında Çizelge 5.25'te görüldüğü gibi strut yükleri A-A kesit içi yaklaşık %11 üç boyutta az iken B-B için de bu oran yüzde %7'dir. Sonuçlar incelendiğinde elde edilen eksenel yüklerin farklı olduğu görülse de mertebe olarak %10 olarak değerlendirilebilmektedir.

Çizelge 5.25. +75,40 kotu strut kıyas tablosu

	A-A Kesiti Eksenel Yük, N (kN) (Self+Soil)	B-B Kesiti Eksenel Yük, N (kN) (Self+Soil)
Plaxis 2D	7926,1	6498,8
Plaxis 3D	7015,4	6040,2
Sonuç	%11 ↓	%7 ↓

Üçüncü sıra (ikinci kuşak kirişi) kotu olarak tasarlan 1219,2 mm çapında, et kalınlığı 20 mm çelik boru 2B analizde ve 3B analizde aynı boyutta girdi olacak şekilde alınmıştır. Şekil 5.44'te verilen Plaxis3D kat planında bütün strutlara gelen eksenel kuvvet verilmiş olup analiz kesitinin temsil ettiği bölgedeki maksimum kuvvet kıyas için değerlendirmeye dahil edilmiştir.



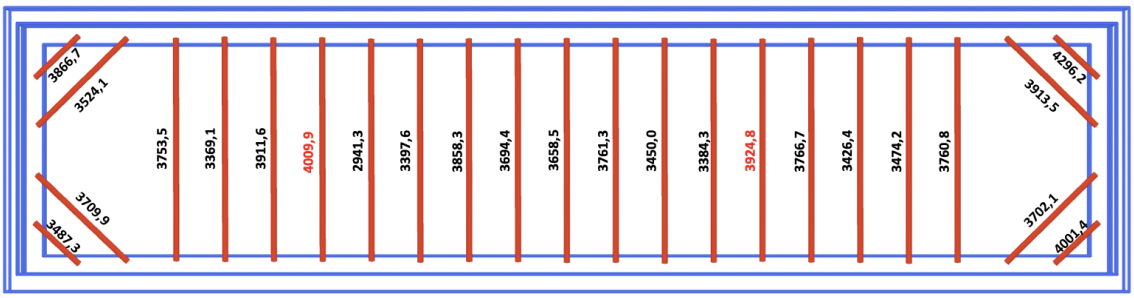
Şekil 5.44. +68,55 kotu strut eksenel kuvveti, kN, kombinasyon: Self+Soil

Çapraz strutlar ile düz strutların birleştiği bölge en çok çalışan strutın bulunduğu yeri göstermektedir. 2B analizin sonuçları ile maksimum yük alan ilgili strut eksenel yükü kıyaslandığında Çizelge 5.26'da görüldüğü gibi strut yükleri A-A kesit içi yaklaşık %4 üç boyutta az iken B-B için de bu yüzde yaklaşık %1 mertebesindedir. Dolayısı ile sonuçları hemen hemen aynı çıktığı kabul edilebilmektedir.

Çizelge 5.26. +68,55 Kotu strut kıyas tablosu

	A-A Kesiti Eksenel Yük, N (kN) (Self+Soil)	B-B Kesiti Eksenel Yük, N (kN) (Self+Soil)
Plaxis 2D	8079,5	7039,1
Plaxis 3D	7724,8	6996,3
Sonuç	%4 ↓	%1 ↓

Dördüncü sıra (üçüncü kuşak kirişi) kotu olarak tasarlan 1219,2 mm çapında, et kalınlığı 15,9 mm çelik boru 2B analizde ve 3B analizde aynı boyutta girdi olacak şekilde alınmıştır. Şekil 5.45'te verilen Plaxis3D kat planında bütün strutlara gelen eksenel kuvvet verilmiş olup analiz kesitinin temsil ettiği bölgedeki maksimum kuvvet kıyas için değerlendirmeye dahil edilmiştir.



Şekil 5.45. +62,05 kotu strut eksenel kuvveti, kN, kombinasyon: Self+Soil

Çapraz strutlar ile düz strutların birleştiği bölge en çok çalışan strutın bulunduğu yeri göstermektedir. 2B analizin sonuçları ile maksimum yük alan ilgili strut eksenel yükü kıyaslandığında Çizelge 5.27'de görüldüğü gibi strut yükleri A-A kesit içi yaklaşık %20 üç boyutta az iken B-B için de bu yüzde yaklaşık %13'tür. Elde edilen sonuçların diğer kotlardan farklı olarak birbirine yakın sonuç vermediği görülmüştür.

Çizelge 5.27. +62,05 kotu strut kıyas tablosu

	A-A Kesiti Eksenel Yük, N (kN) (Self+Soil)	B-B Kesiti Eksenel Yük, N (kN) (Self+Soil)
Plaxis 2D	4988,8	4503,2
Plaxis 3D	4009,9	3924,8
Sonuç	%20 ↓	%13 ↓

Yapılan çalışmada yatay destek elemanı olarak kullanılan çelik strutların eksenel yükleri hem 2B analiz sonucundan (A-A analiz kesiti ve B-B analiz kesitinden) alınmış, 3B analiz sonucu ile kot bazında kıyaslanmıştır.

Çizelge 5.28 ve Çizelge 5.29'da kesit bazında alınan tüm sonuçlar kıyaslanarak kesitlerin olduğu bölgeler özelinde sunulmaktadır.

Çizelge 5.28. A-A kesiti strut yükleri özet tablo

	+83,55 Kotu	+75,40 Kotu	+68,55 Kotu	+62,05 Kotu
Plaxis 2D	1580,7	7926,1	8079,5	4988,8
Plaxis 3D	831,4	7015,4	7724,8	4009,9
Sonuç	%47 ↓	%11 ↓	%4 ↓	%20 ↓

Çizelge 5.29. B-B kesiti strut yükleri özet tablo

	+83,55 Kotu	+75,40 Kotu	+68,55 Kotu	+62,05 Kotu
Plaxis 2D	1003,0	6498,8	7039,1	4503,2
Plaxis 3D	717,4	6040,2	6996,3	3924,8
Sonuç	%28 ↓	%7 ↓	%1 ↓	%13 ↓

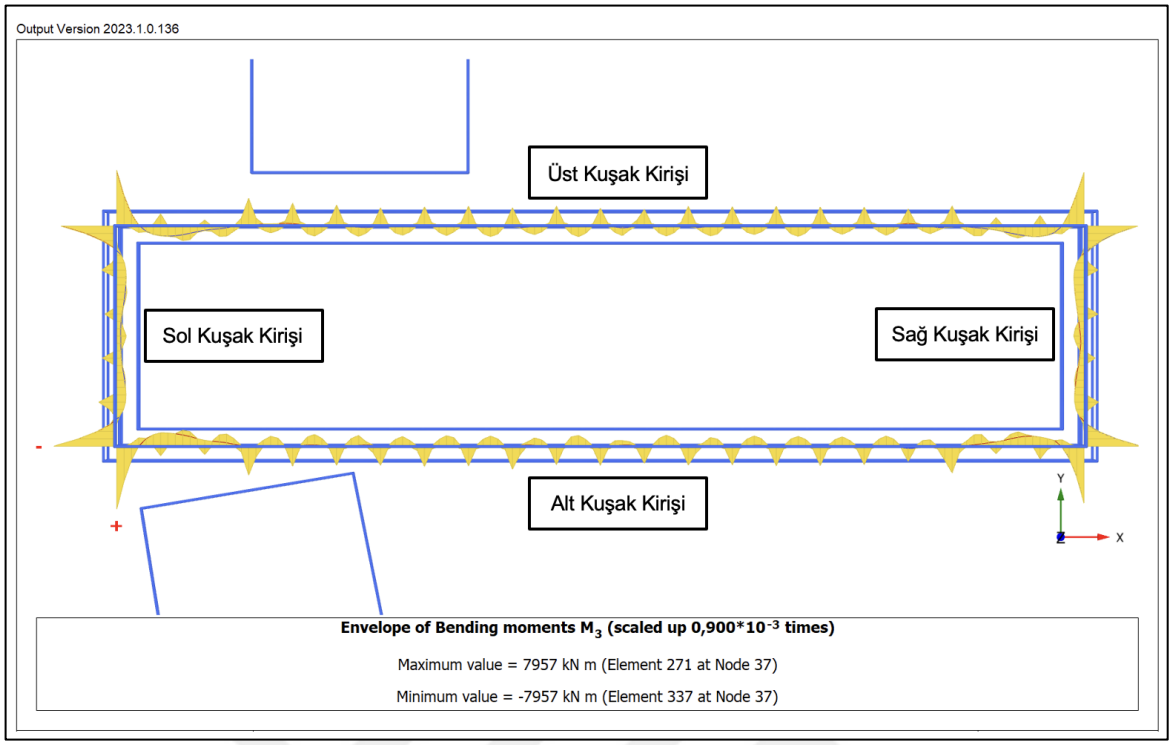
5.3.4. İç destek sistemi (kuşak kirişi) analizi

Analiz sonuçları incelenirken düşey iksa elemanı, kazıklar kesitler bazında kıyaslanırken iç destek sistemi plan bazında incelenerek kıyaslanacaktır.

Plaxis2D programı iki boyutta analiz yapan bir program olup iki boyutta kuşak kirişlerine gelen tesir kuvvetlerinin elde edilemediği bilinmektedir. Bu nedenle Plaxis2D'den elde edilen zemin basınçları düzgün yayılı yük olarak alınarak SAP2000 programına aktarılıp aynı geometri ile kirişlere ait tesir kuvvetleri SAP2000 programından okunmuştur. Bu doğrultuda +75,40 kotuna ait sonuçlar Plaxis3D ile kıyaslanmıştır.

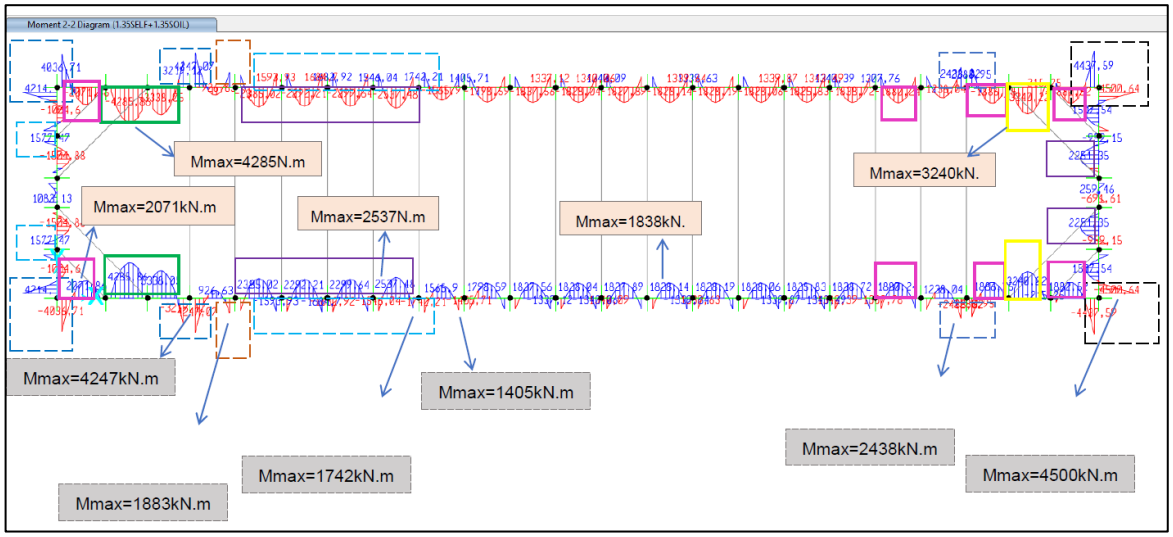
<u>+75,40 kotu eğilme moment sonuçları</u>

Sonuçları kıyaslanacak olan kuşak kirişi kotu için alınan yük kabulleri (zemin basınçları) aynıdır. Bu doğrultuda sistemin eğilmeye karşı çıkan tesir değerleri incelenmektedir. Şekil 5.46'da üç boyutlu Plaxis3D'den alınan +74,40 kotuna ait eğilme moment sonuçları verilmektedir. Bu plan üzerine kıyas için kullanılacak bölge isimleri yerleştirilmiştir.



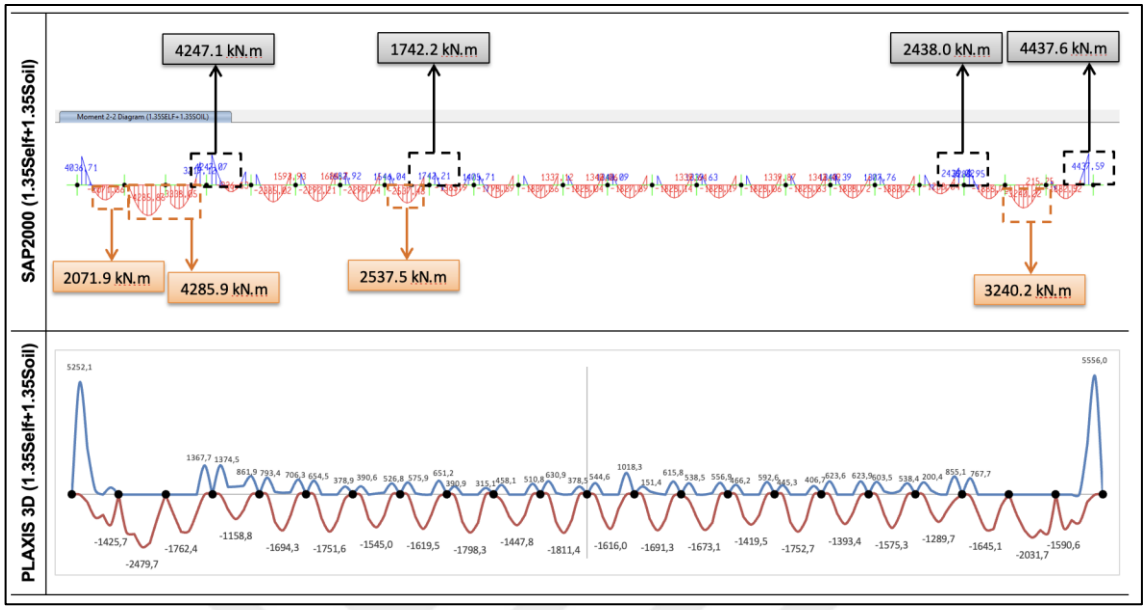
Şekil 5.46. Plaxis3D moment sonuçları genel gösterimi

Plaxis3D'den elde edilen yükler faktörsüz olup doğru bir kıyas yapılabilmesi için SAP2000'den alınan faktörlü yüklerle kıyaslanmalıdır. Bu nedenle incelenen kat özelinde, kat dört parçaya bölünmüş, her bölge için detaylı sonuçlar hazırlanmıştır. Şekil 5.47'de kat planında yer alan tüm bölgelere yer verilmiştir.



Şekil 5.47. SAP2000 moment sonuçları genel gösterimi

Üst kuşak kirişi, M-moment, kN.m



Şekil 5.48. Üst kuşak kirişi, M- Moment, kN.m, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil

Sunulan sonuçlar Çizelge 5.30 özelinde yüzdece kıyası yapılmış olup iç ve dış momentlerin paralellik göstermediği görülmüştür. Kuşak kirişi üst bölgesinin detaylandırıldığı Şekil 5.48'de verilen okumalar kıyas yapmak için farklı dört noktadan alınmıştır. Sonuçlar hem iç moment hem de dış momentte kıyaslanmıştır. Bu durumda üç boyutlu Plaxis analizinden elde edilen sonuç Çizelge 5.30'da dış momentlerin ilgili kotta %42 ile %68 oranında azalma gösterirken bir bölgede %25 artış gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.30. Üst kuşak kirişi dış moment kıyası

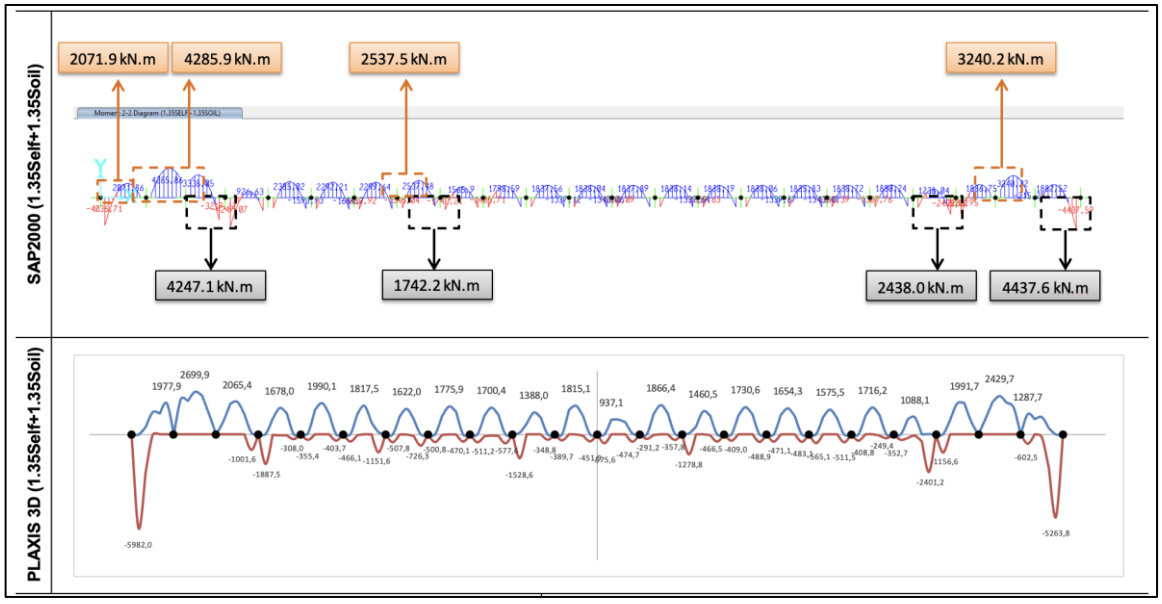
	+75,40 Kotu Üst Kuşak Kirişi Dış Momentler (1,35Self+1,35Soil)			
SAP2000	4247,1	1742,2	2438,0	4437,6
Plaxis 3D	1374,5	1018,3	855,1	5556,0
Sonuç	%68 ↓	%42 ↓	%65 ↓	%25 ↑

Çizelge 5.31'de ise görüleceği üzere aynı kotta iç momentler %29 ile %42 arasında azaldığı görülmüştür.

Çizelge 5.31. Üst kuşak kirişi iç moment kıyası

	+75,40 Kotu Üst Kuşak Kirişi İç Momentler (1,35Self+1,35Soil)			
SAP2000	2071,9	4285,9	2537,5	3240,2
Plaxis 3D	1425,7	2479,7	1798,3	2031,7
Sonuç	%31 ↓	%42 ↓	%29 ↓	%38 ↓

Alt kuşak kirişi, M- moment, kN.m



Şekil 5.49. Alt kuşak kirişi, M- Moment, kN.m, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil

Kuşak kirişi alt bölgesinin detaylandırıldığı Şekil 5.49'da verilen okumalar kıyas yapmak için farklı dört noktadan alınmış olup hem iç momentte hem de dış momentte üç boyutlu Plaxis analizinden elde edilen sonuç Çizelge 5.32 ve Çizelge 5.33'te de görüleceği üzere %2 ile %56 arasında azalma gösterirken bir bölgede %19 artış gözlemlenmiştir.

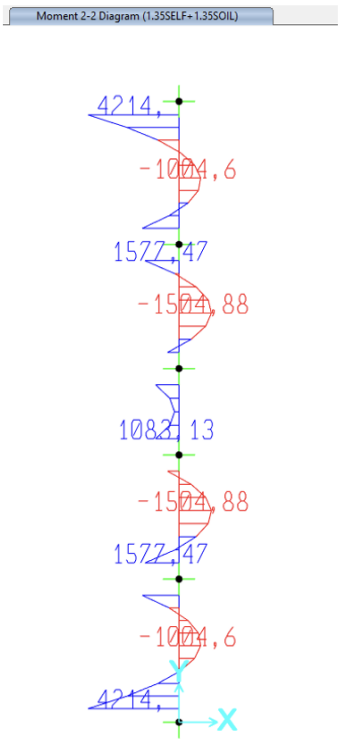
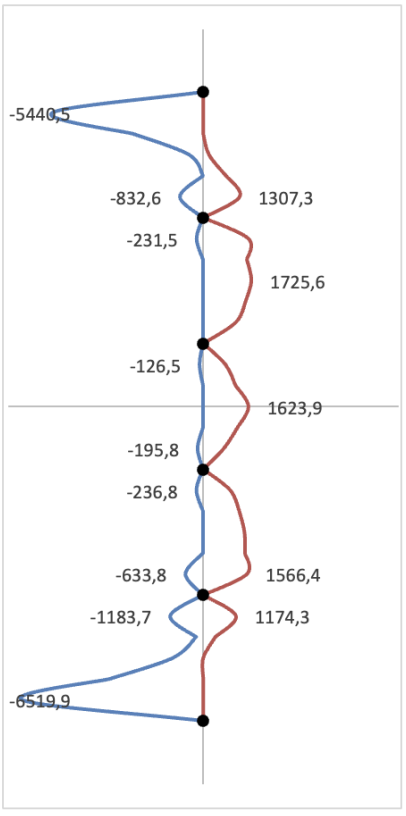
Çizelge 5.32. Alt kuşak kirişi dış moment kıyası

	+75,40 Kotu Alt Kuşak Kirişi Dış Momentler (1,35Self+1,35Soil)			
SAP2000	4247,1	1742,2	2438,0	4437,6
Plaxis 3D	1887,5	1528,6	2401,2	5263,8
Sonuç	%56 ↓	%12 ↓	%2 ↓	%19 ↑

Çizelge 5.33. Alt kuşak kirişi iç moment kıyası

	+75,40 Kotu Alt Kuşak Kirişi İç Momentler (1,35Self+1,35Soil)			
SAP2000	2071,9	4285,9	2537,5	3240,2
Plaxis 3D	1977,9	2699,9	1990,1	2429,7
Sonuç	%31 ↓	%42 ↓	%22 ↓	%25 ↓

Sol kuşak kirişi, M- moment, kN.m

SAP2000 (1.35Self+1.35Soil)	PLAXIS 3D (1.35Self+1.35Soil)
	

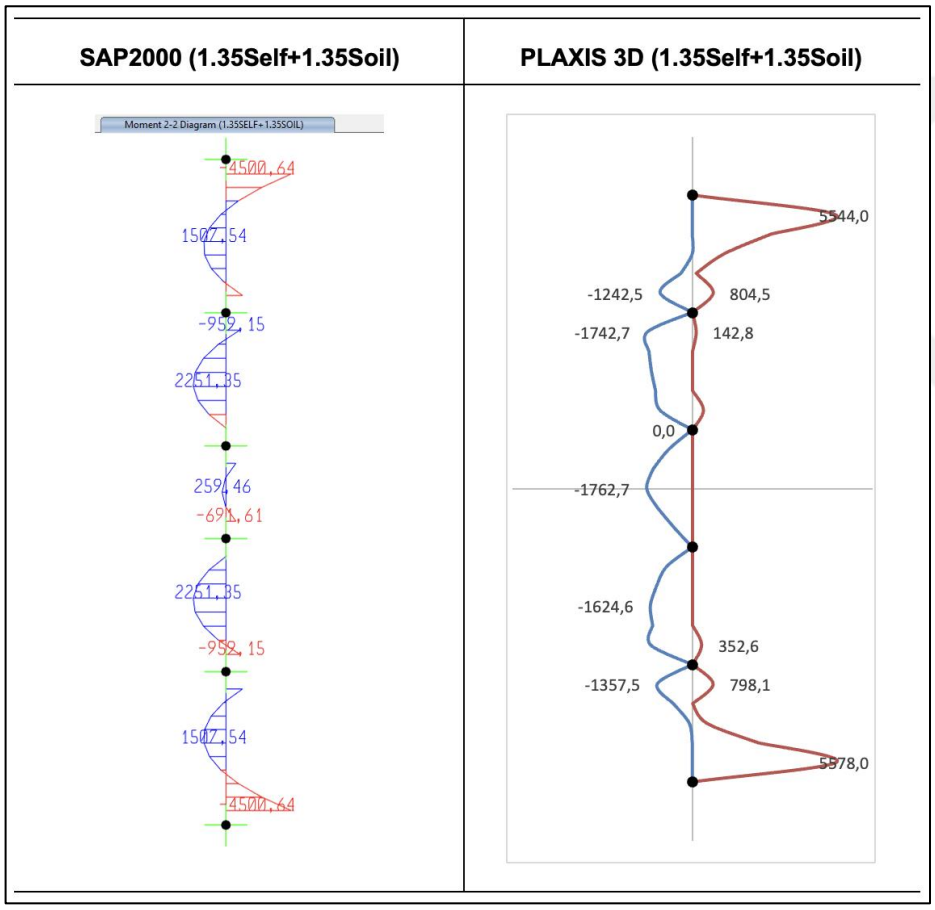
Şekil 5.50. Sol kuşak kirişi, M- moment, kN.m, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil

Kuşak kirişi sol bölgesinin detaylandırıldığı Şekil 5.50'de verilen okumalar kıyas yapmak için farklı dört noktadan alınmış olup iç momentte üç boyutlu Plaxis analizinden elde edilen sonuç Çizelge 5.34'te de görüleceği üzere %15 ile %55 arasında artış gösterirken bir bölgede %25 azalış gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.34. Sol kuşak kirişi iç moment kıyası

	+75,40 Kotu Sol Kuşak Kirişi İç Momentler (1,35Self+1,35Soil)			
SAP2000	4214,0	1577,5	1504,9	1083,1
Plaxis 3D	6519,9	1183,7	1725,6	1623,9
Sonuç	%55 ↑	%25 ↓	%15 ↑	%50 ↑

Sağ kuşak kirişi, M- moment, kN.m



Şekil 5.51. Sağ kuşak kirişi, M- Moment, kN.m, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil

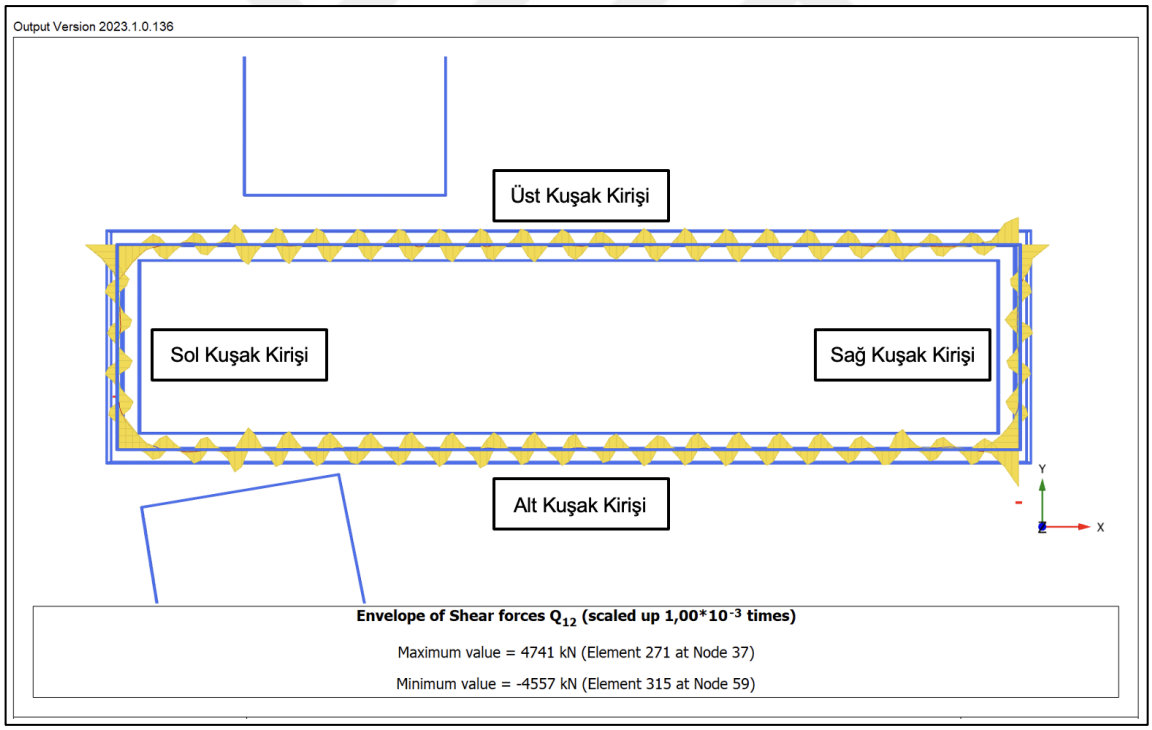
Kuşak kirişi sağ bölgesinin detaylandırıldığı Şekil 5.51'de verilen okumalar kıyas yapmak için farklı dört noktadan alınmış olup iç momentte üç boyutlu Plaxis analizinden elde edilen sonuç Çizelge 5.35'te de görüleceği üzere %24 ve %580 artış gösterirken diğer iki bölgede %18 ve %23 azalış gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.35. Sağ kuşak kirişi iç moment kıyası

	+75,40 Kotu Sağ Kuşak Kirişi İç Momentler (1,35Self+1,35Soil)			
SAP2000	4500,6	1507,5	2251,4	259,5
Plaxis 3D	5578,0	1242,5	1742,7	1762,7
Sonuç	%24 ↑	%18 ↓	%23 ↓	%580 ↑

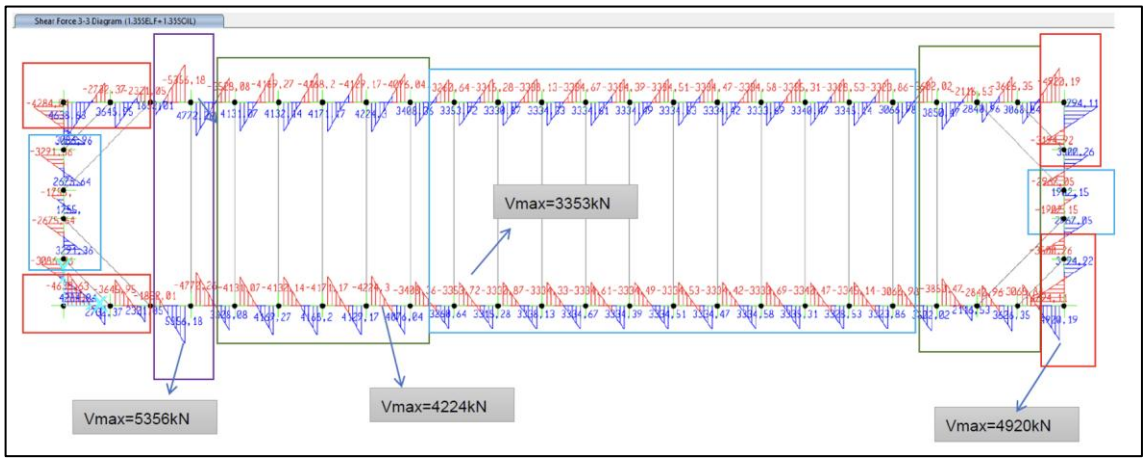
+75,40 kotu kesme kuvveti sonuçları

Sonuçları kıyaslanacak olan kuşak kirişi kotu için alınan yük kabulleri (zemin basınçları) aynıdır. Bu doğrultuda sistemin kesmeye karşı çıkan tesir değerleri incelenmektedir. Şekil 5.52'de üç boyutlu Plaxis3D'den alınan +74,40 kotuna ait kesme kuvveti sonuçları verilmektedir. Bu plan üzerine kıyas için kullanılacak bölge isimleri yerleştirilmiştir.



Şekil 5.52. Plaxis3D kesme kuvveti sonuçları genel gösterimi

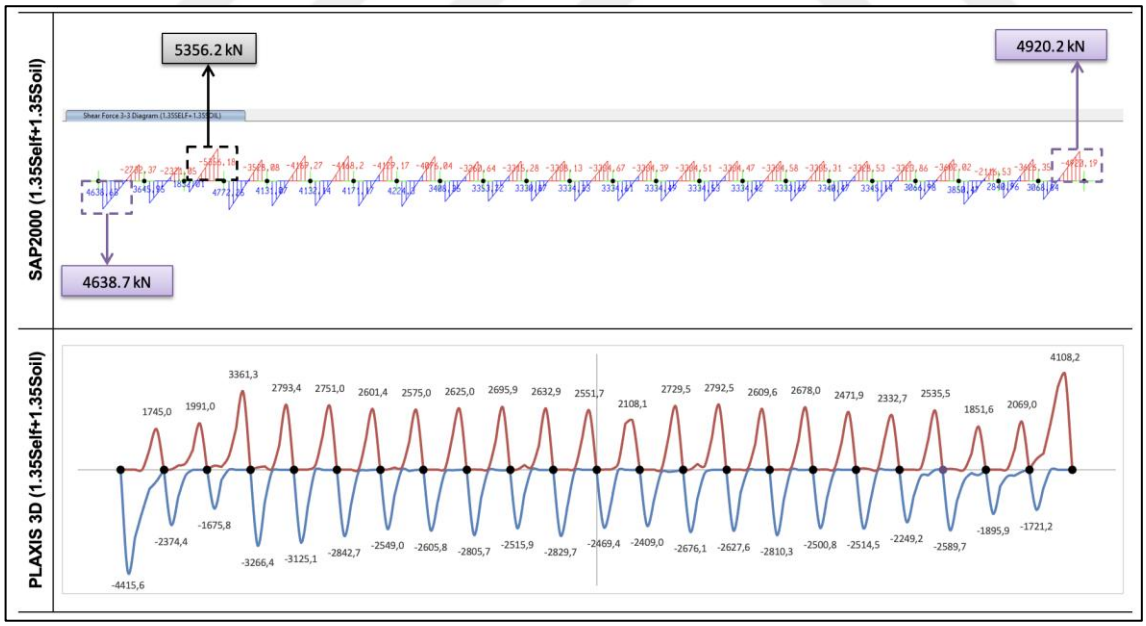
Plaxis3D'den elde edilen yükler faktörsüz olup doğru bir kıyas yapılabilmesi için SAP2000'den alınan faktörlü yüklerle kıyaslanmalıdır. Bu nedenle incelenen kat özelinde, kat dört parçaya bölünmüş, her bölge için detaylı sonuçlar hazırlanmıştır. Şekil 5.53'te kat planında yer alan tüm bölgelere yer verilmiştir.



Şekil 5.53. Plaxis3D kesme kuvveti sonuçları genel gösterimi

Alınan genel gösterim şekillerinin detaylı incelenmesi adına kat planındaki yerlerine göre bölünmüş hali ile sırası ile sunulan tablolar özelinde yüzdece kıyası yapılmış olup kesme kuvvetlerinin paralellik göstermediği görülmüştür.

Üst kuşak kirişi, V- kesme kuvvetleri, kN



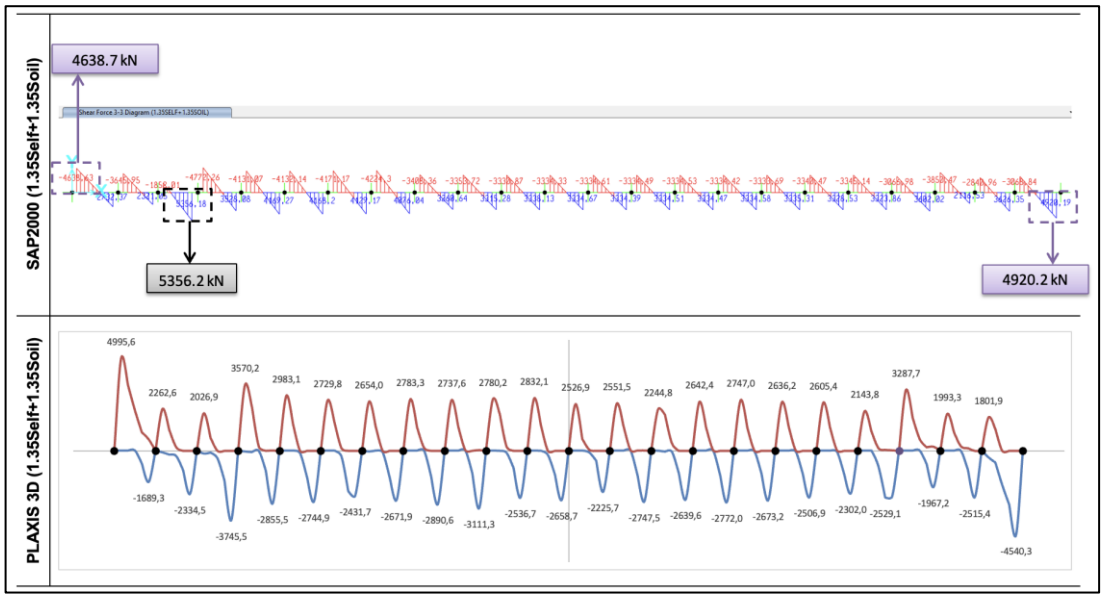
Şekil 5.54. Üst Kuşak Kirişi, V, kN, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil

Kuşak kirişi üst bölgesinin detaylandırıldığı Şekil 5.54'te verilen okumalar kıyas yapmak için farklı üç noktadan alınmış olup üç boyutlu Plaxis analizinden elde edilen sonuçların Çizelge 5.36'da da gösterildiği gibi %5 ile %37 arasında azalma gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.36. Üst kuşak kirişi kesme kuvveti kıyası

+75,40 Kotu Üst Kuşak Kirişi Kesme Kuvveti (1,35Self+1,35Soil)			
SAP2000	4638,7	5356,2	4920,2
Plaxis 3D	4415,6	3361,3	4108,2
Sonuç	%5 ↓	%37 ↓	%17 ↓

Alt kuşak kirişi, V- kesme kuvvetleri, kN



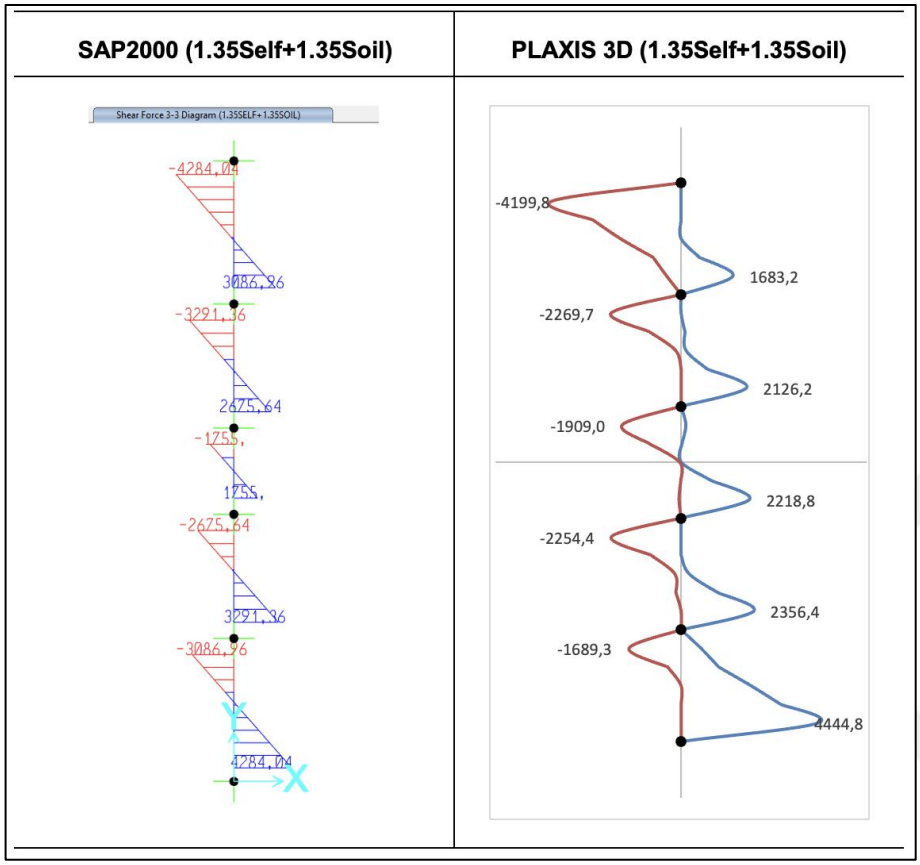
Şekil 5.55. Alt kuşak kirişi, V, kN, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil

Kuşak kirişi üst bölgesinin detaylandırıldığı Şekil 5.55'te verilen okumalar kıyas yapmak için farklı üç noktadan alınmış olup üç boyutlu Plaxis analizinden elde edilen sonuçların Çizelge 5.37'de de gösterildiği gibi %8 ile %30 arasında azalma görülürken diğer okumada %8 kesme kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.37. Alt kuşak kirişi kesme kuvveti kıyası

+75,40 Kotu Üst Kuşak Kirişi Kesme Kuvveti (1,35Self+1,35Soil)			
SAP2000	4638,7	5356,2	4920,2
Plaxis 3D	4995,6	3745,5	4540,3
Sonuç	%8 ↑	%30 ↓	%8 ↓

Sol kuşak kirişi, V- kesme kuvvetleri, kN



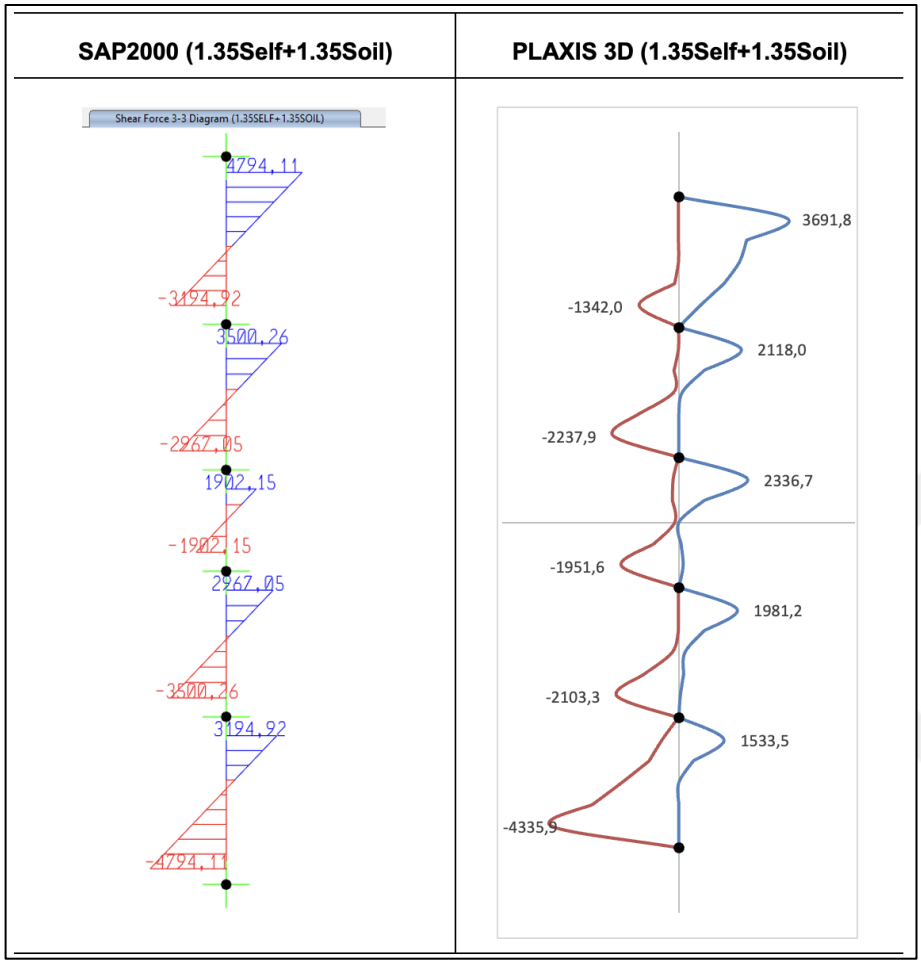
Şekil 5.56. Sol kuşak kirişi, V, kN, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil

Kuşak kirişi sol bölgesinin detaylandırıldığı Şekil 5.56'da verilen okumalar kıyas yapmak için farklı iki noktadan alınmış olup üç boyutlu Plaxis analizinden elde edilen sonuçların Çizelge 5.38'de de görüleceği gibi bir bölge için %28 azalma gösterdiği görülürken diğer okumada %4 kesme kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.38. Sol kuşak kirişi kesme kuvveti kıyası

+75,40 Kotu Sol Kuşak Kirişi Kesme Kuvveti (1,35Self+1,35Soil)		
SAP2000	4284,0	3291,4
Plaxis 3D	4444,8	2356,4
Sonuç	%4 ↑	%28 ↓

Sağ kuşak kirişi, V- kesme kuvvetleri, kN



Şekil 5.57. Sağ kuşak kirişi, V, kN, kombinasyon: 1,35Self+1,35Soil

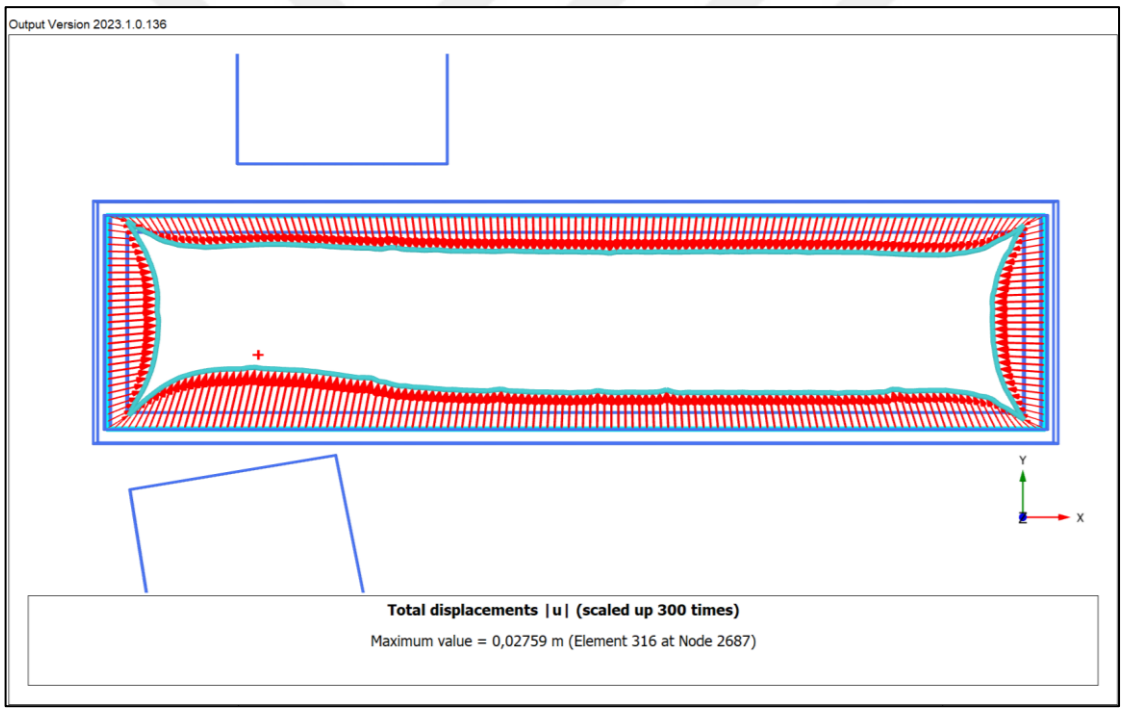
Kuşak kirişi üst bölgesinin detaylandırıldığı Şekil 5.57'de verilen okumalar kıyas yapmak için Çizelge 5.39 oluşturulmuş ve farklı iki noktadan alınmış olan iki okuma için üç boyutlu Plaxis analizinden elde edilen sonuçlarda %10 ile %25 oranında azalma gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.39. Sağ kuşak kirişi kesme kuvveti kıyası

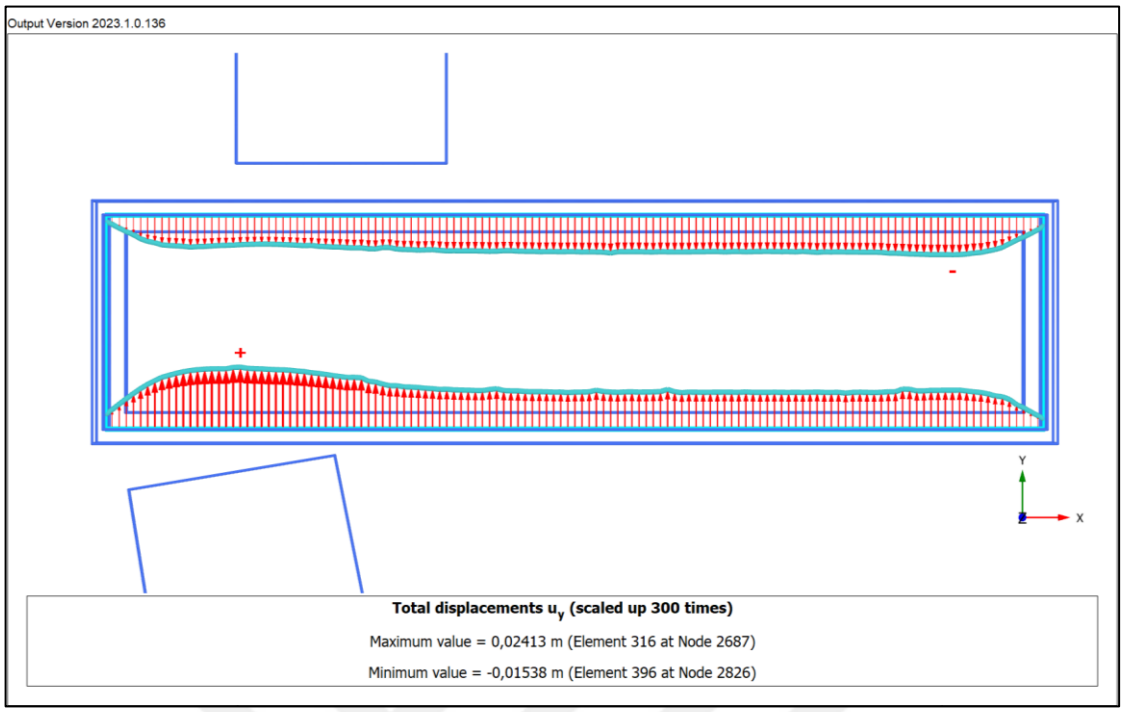
+75,40 Kotu Sağ Kuşak Kirişi Kesme Kuvveti (1,35Self+1,35Soil)		
SAP2000	4794,1	2967,1
Plaxis 3D	4335,9	2237,9
Sonuç	%10 ↓	%25 ↓

5.3.5. Plaxis3D yatay deplasman sonuçları

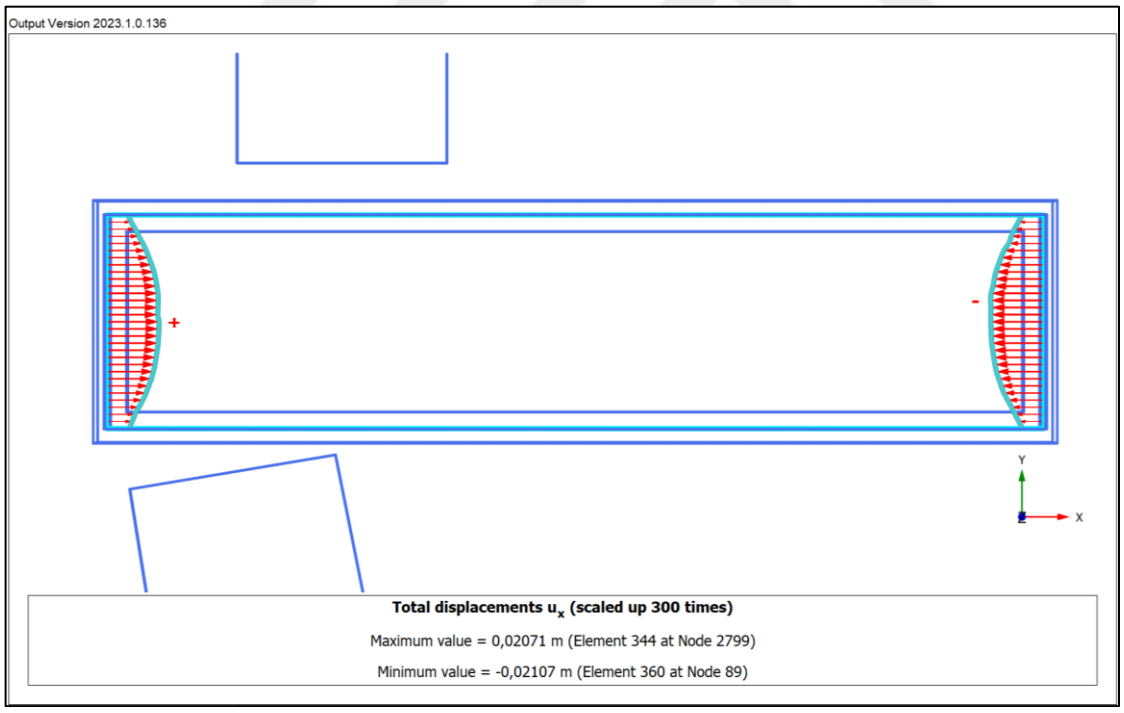
Sonlu elemanlar analiz yöntemi bütün girdileri gerçeğe uygun girildiği taktirde saha okumaları ile paralel sonuç vermesi beklenen bir analiz yöntemidir. Beklenen iksa deplasman davranışının genel kabullerle paralellik göstermesi elde edilen tüm sonuçların doğruluğunu kabul etmekte önemli bir kontrol noktasıdır. Diğer bir değişle iksa davranışının ana kontrol noktası yatay ve düşey deplasmanıdır. Bunun nedeni deplasman zeminin itki kuvvetinin bir tepkisidir ve elde edilen moment, kesme kuvveti ya da strut eksenel kuvvetleri kazığın hareketini gösteren ve sistem davranışını yorumlamanın en temel bileşenidir. Şekil 5.58'de metro istasyonuna ait toplam deplasman verilirken Şekil 5.59 ve Şekil 60'ta kazıdan kaynaklı oluşan uzun yön, kısa yön yatay deplasmanlar yer almaktadır.



Şekil 5.58. Plaxis3D uzun ve kısa cephe kazık deplasman davranışı



Şekil 5.59. Plaxis3D uzun cephe kazık yatay deplasman davranışı

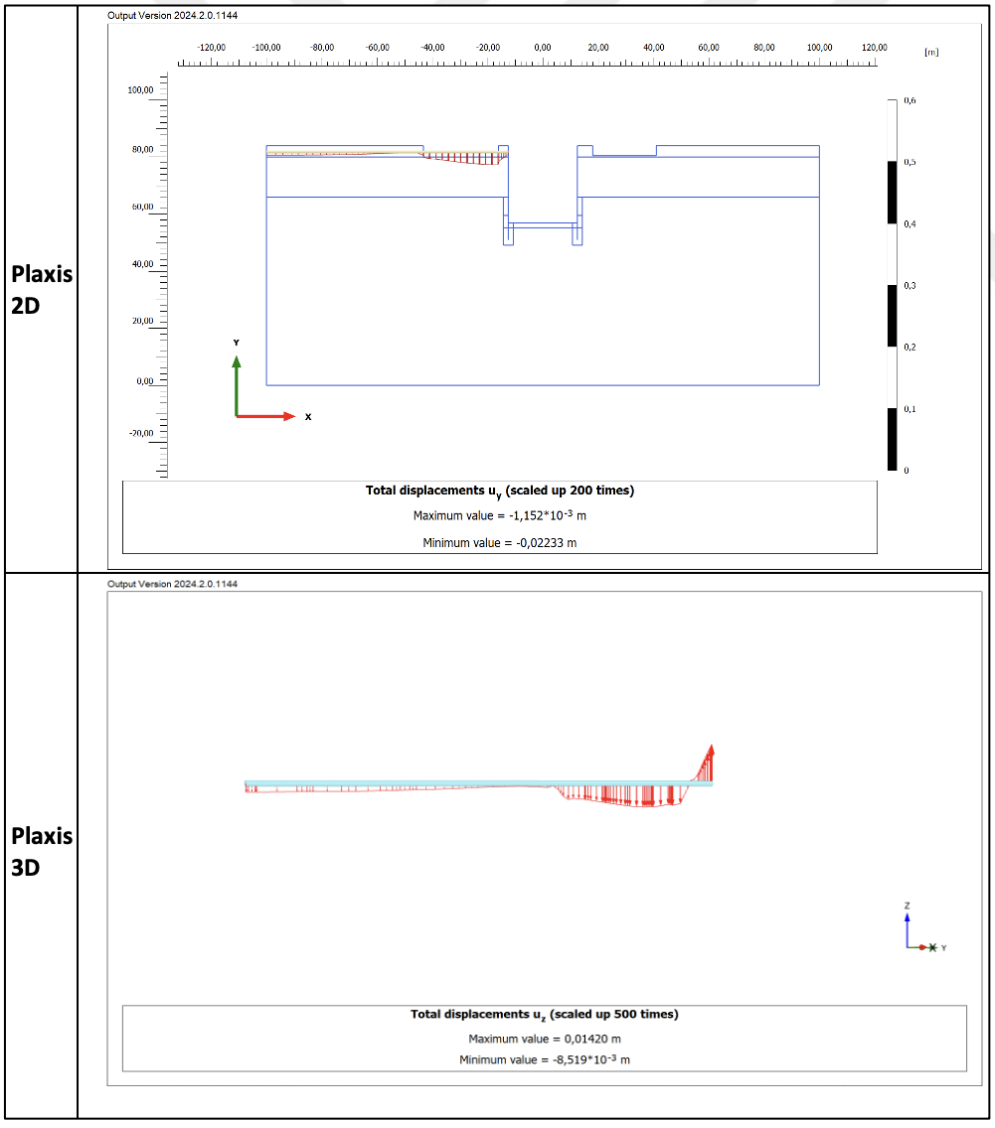


Şekil 5.60. Plaxis3D kısa cephe kazık yatay deplasman davranışı

5.3.6. Çevre bina oturması

İksa sistemine komşu yapılar her durumda riskli olan kazıları son derece kritik duruma getirmektedir. Bu nedenle derin kazı yaparken her ne kadar iksa elemanlarının tasarımına bakılsa da sistemin iç stabilitesinin olması kadar komşu yapı etkileşimi de kontrol edilerek iksa davranışı ile yorumlanmalıdır. Bu başlık altında incelenecek olan durum A-A kesitinde yer alan mevcut yapı/binaların iksa kazısından sonra oluşturduğu düşey oturma miktarları ve bunlara ait analiz farklılığının tespitine yöneliktir. A-A kesitinin sol aksında yer alan bina oturma değerleri Plaxis2D ve Plaxis3D'den alınan verilere göre kıyaslanmaktadır.

A-A kesiti sol aksı



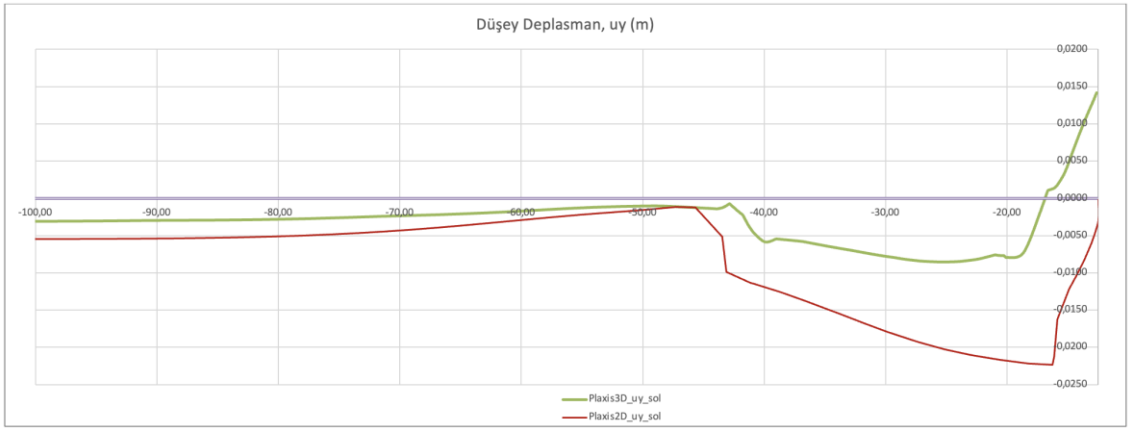
Şekil 5.61. Bina düşey oturma değerleri (A-A analiz kesiti sol aks)

A-A Analiz Kesiti sol aksında yer alan düşey oturma miktarları Şekil 5.61'de incelendiğinde 2B analizde 5,43E-03 m oturma görülmüş olup aynı değer 3B analiz sonucunda 3,55E-03 m'dir. Bu durumda elde edilen verilerde Çizelge 5.40'ta da görüldüğü gibi 3B analiz %35 oranında daha az düşey oturma sonucu vermektedir.

Çizelge 5.40. Bina düşey oturma değerleri

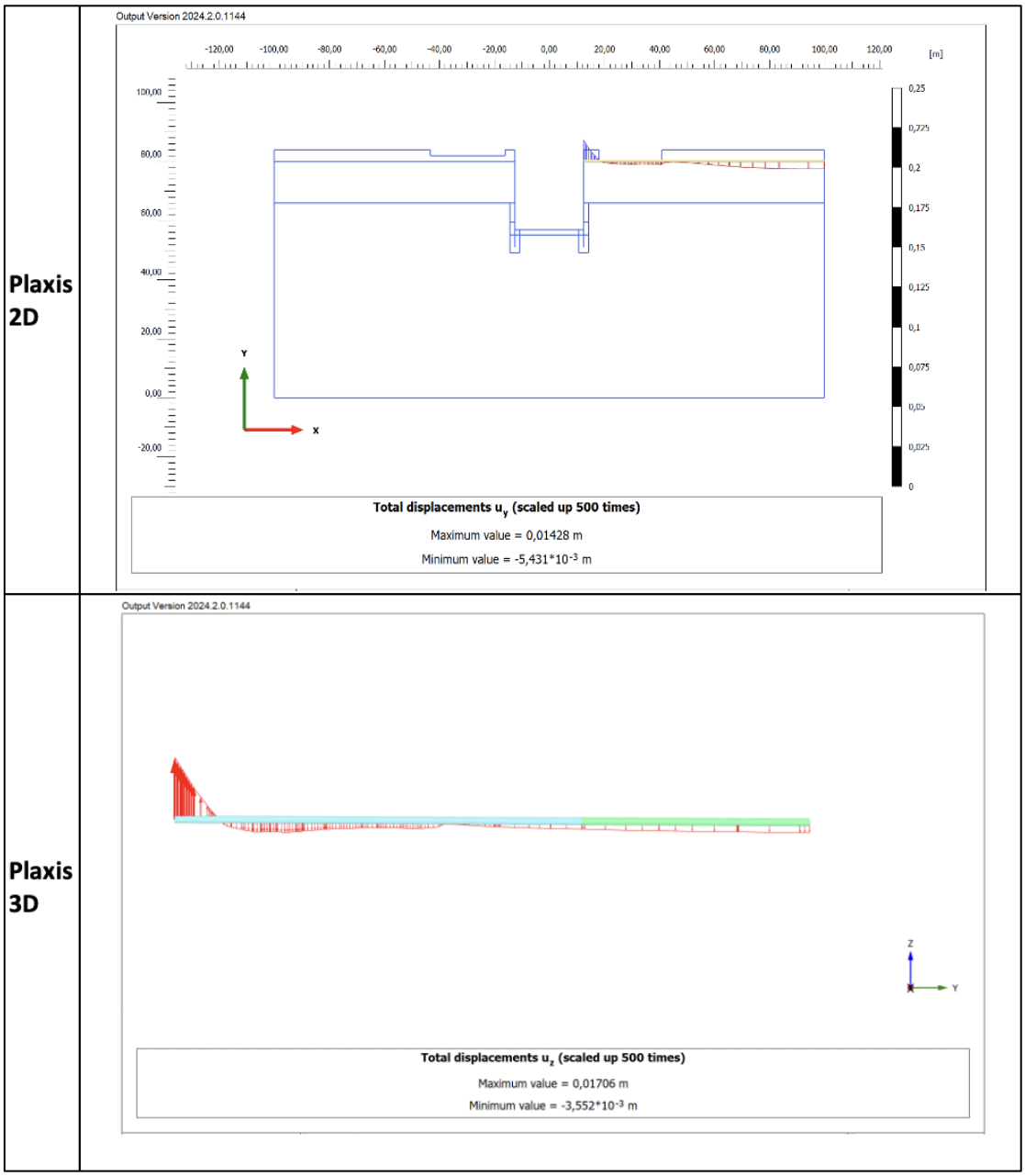
	Düşey Deplasman (m)
Plaxis 2D	5,43E-03
Plaxis 3D	3,55E-03
Sonuç	%35 ↓

A-A kesitinin sol aksında yer alan bina oturma değerleri Plaxis2D ve Plaxis3D'den alınan verilere göre Şekil 5.60'ta üst üste yazdırılmış ve sonuçları bu doğrultuda sunulmaktadır.



Şekil 5.62. A-A analiz kesiti sol aks kıyas gösterimi

A-A kesiti sağ aksı



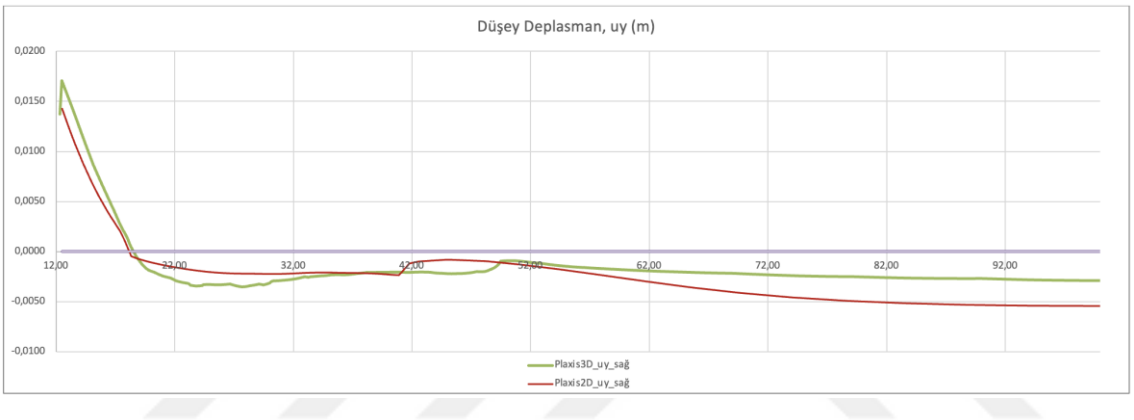
Şekil 5.63. Bina düşey oturma değerleri (A-A analiz kesiti sağ aks)

A-A Analiz Kesiti sağ aksında yer alan düşey oturma miktarları Şekil 5.63'te incelendiğinde 2B analizde 0,02233 m oturma görülmüş olup aynı değer 3B analiz sonucunda 0,01420 m'dir. Bu durumda elde edilen verilerde Çizelge 5.41'de de görüldüğü gibi 3B analiz %36 oranında daha az yatay deplasman sonucu vermektedir.

Çizelge 5.41. Bina düşey oturma değerleri

	Düşey Deplasman (m)
Plaxis 2D	0,02233
Plaxis 3D	0,01420
Sonuç	%36 ↓

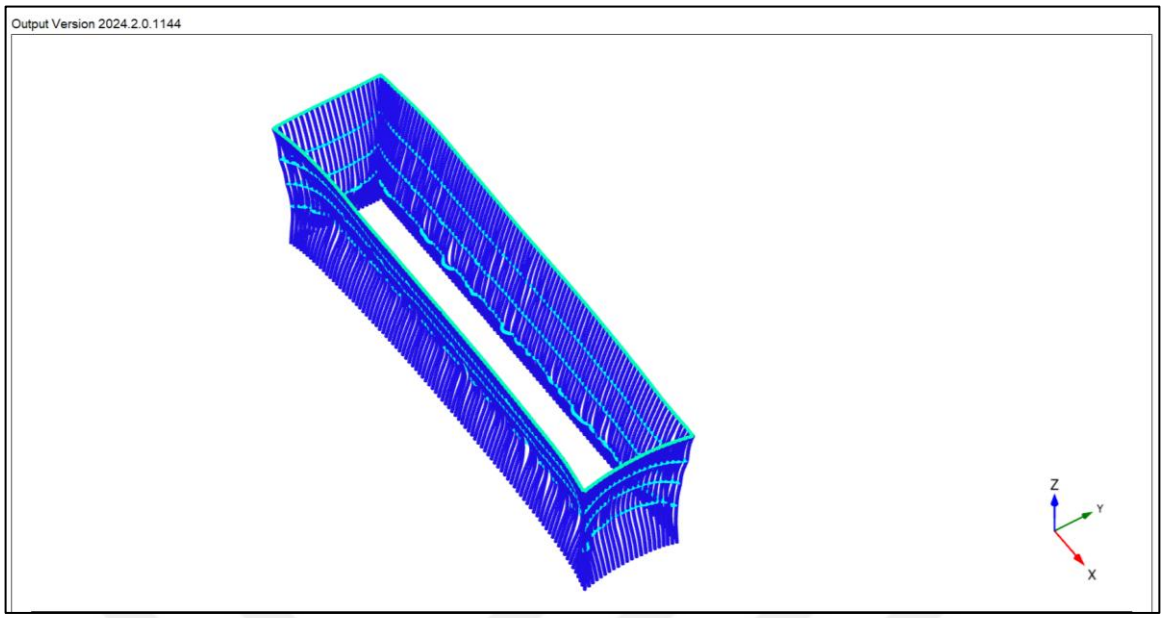
A-A kesitinin sağ aksında yer alan bina oturma değerleri Plaxis2D ve Plaxis3D'den alınan verilere göre Şekil 5.64'te üst üste yazdırılmış ve sonuçları bu doğrultuda sunulmaktadır.



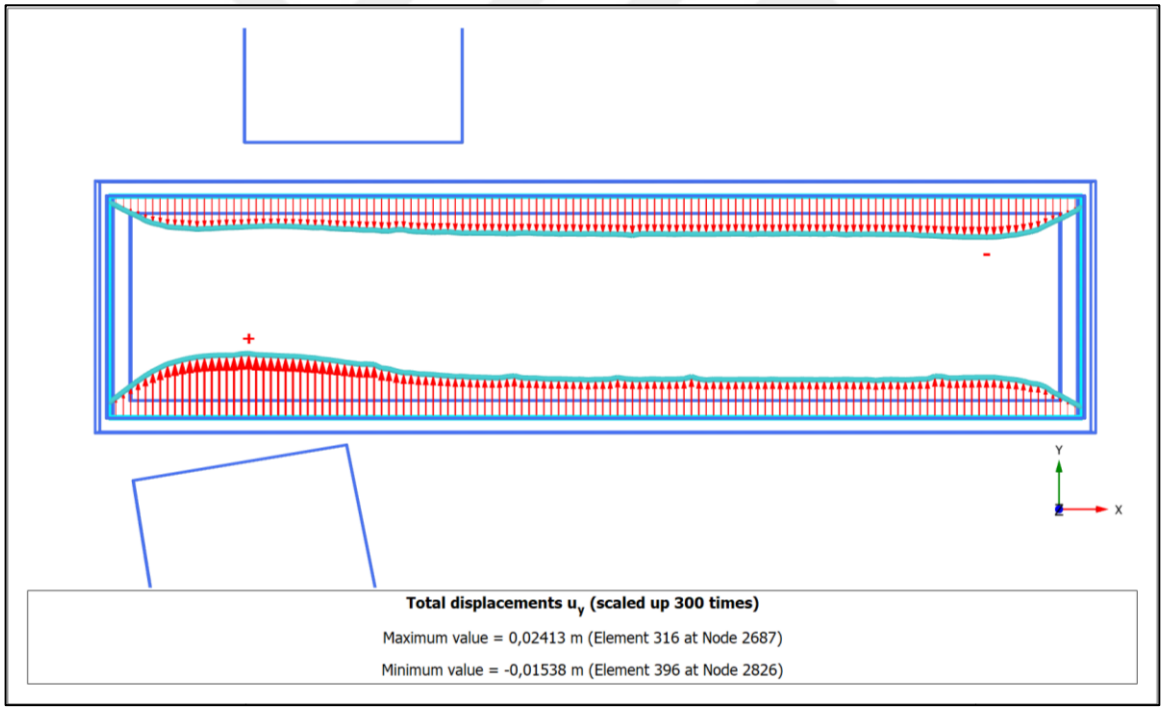
Şekil 5.64. A-A analiz kesiti sağ aks kıyas gösterimi

Çevre yapılarda meydana gelen oturmalar yapı kendi yapı-zemin etkileşiminden kaynaklanan beklenen düşey ve yatay oturma limitlerine ulaştı ise doğru orantılı olarak yanında yapılan kazıdan etkilenmektedir. Bu durumda metro istasyonu, şaft yapıları, tünel yapıları gibi nitelikli kazıların yapılması mevcuttaki oturmaları tetikleyerek beklendiğinden daha fazla bir miktarda oturma değerleri alınmasına neden olabilir. Bu çalışma sırasında oluşan yatay deplasmanların iksa davranışı ile olan ilişkisini görmek için Şekil 5.65 ve Şekil 5.66'da verilen kazık deformasyonları incelenmiştir.

Elde edilen grafikler ve ölçümler sadece düşey deplasmanları içermektedir. Yatay deplasmanlar ilgili birimin kaya olmasından kaynaklı milimetre verisinden daha az elde dilmiş olup ihmal edilebilir olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.65. Plaxis3D deforme kazık davranışı üç boyutlu gösterimi

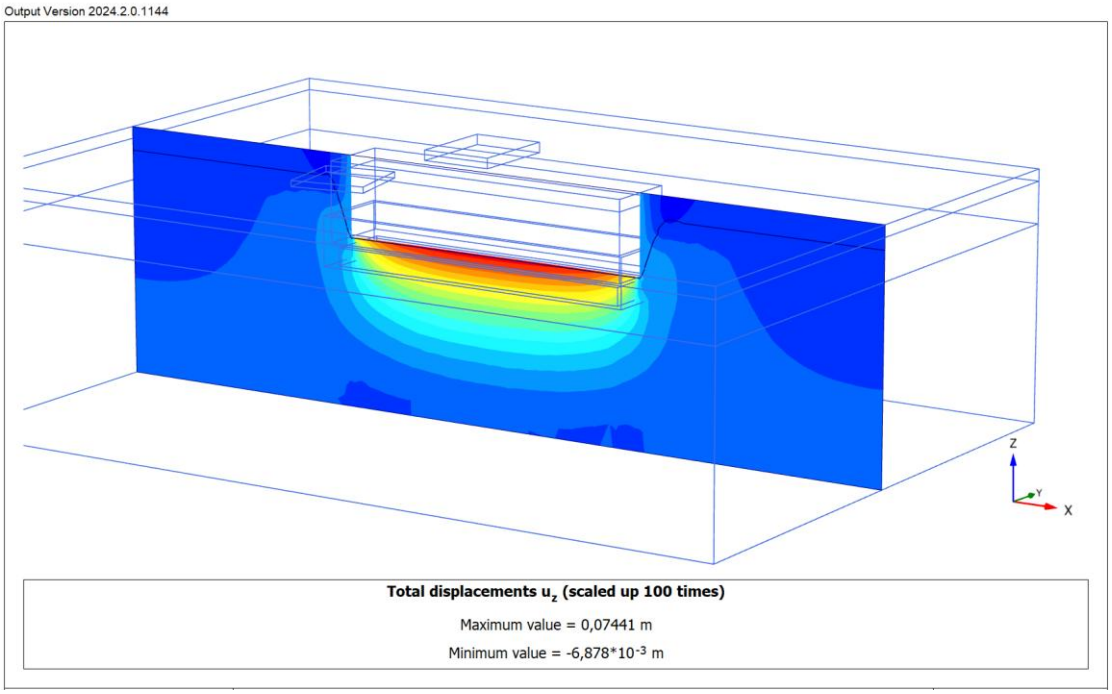


Şekil 5.66. Plaxis3D deforme kazık davranışı plan gösterimi

5.3.7. Güvenlik analiz sonuçları

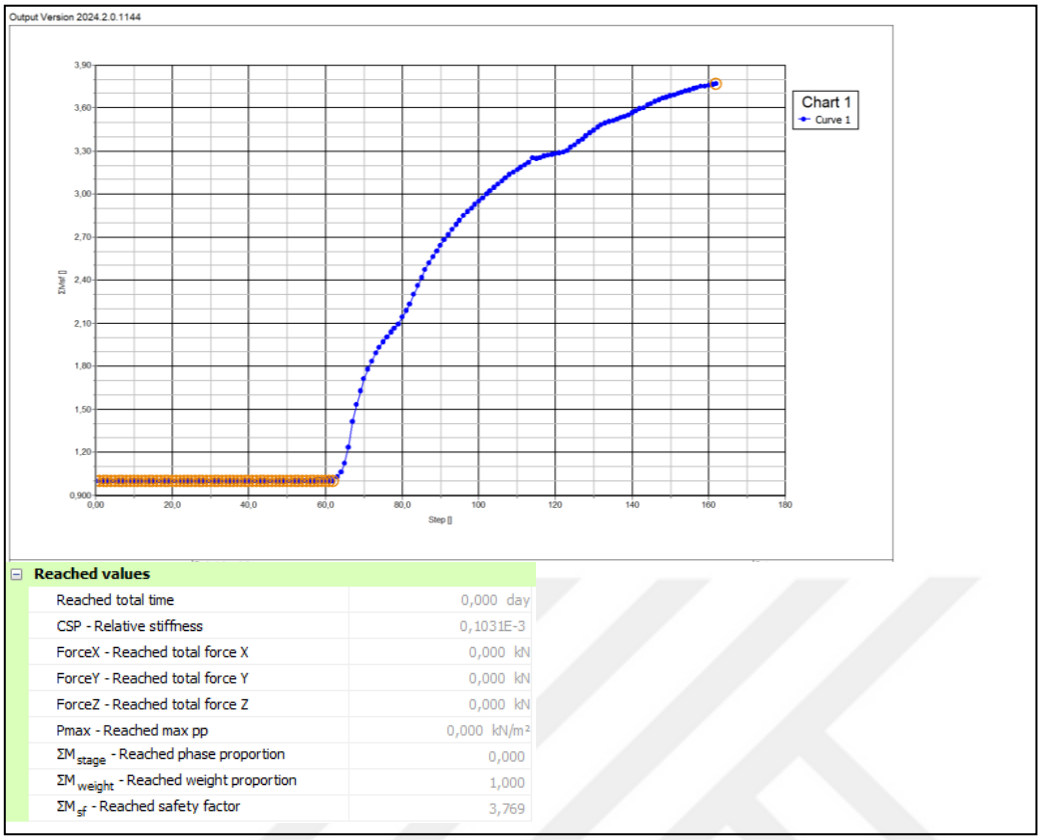
Derin kazılarda zeminin kaldırılması ve yerine yeni yapının konmasına kadar olan süreçte üzerinden kalkan zemin basıncının etkisi ile ferahlama/rahatlama olarak tanımlanan zemin davranışına geçer. Bu durumda zeminde geçici kazı sırasında taban stabilizasyon kontrolü yapılmalı, oluşan etkilere karşı güvenlik analizlerinde zemin tabakasında bir yenilme olmadığı kontrol edilmelidir. Zeminde karşılaşılması olası problemler arasında ilk olarak kontrol edilmesi gereken konu taban kabarması ve/veya oturma problemidir. Bu durumda oluşan yukarı ya da aşağı yönlü hareket geçici kazı süresince ara kademelerde de kontrol edilerek güvenli tutulmalıdır. Hem 2B analizlerde hem de 3B analizlerde kazı sonunda güvenlik analizi "safety" fazı eklenerek iksa güvenliğine bakılmıştır.

Şekil 5.67'de yer alan toplam düşey deplasman değeri 3B analizlerden elde edilmektedir. Alınan sonuç beklendiği gibi taban kabarması olarak görülmekte olup yaklaşık 7,5 cm'dir.



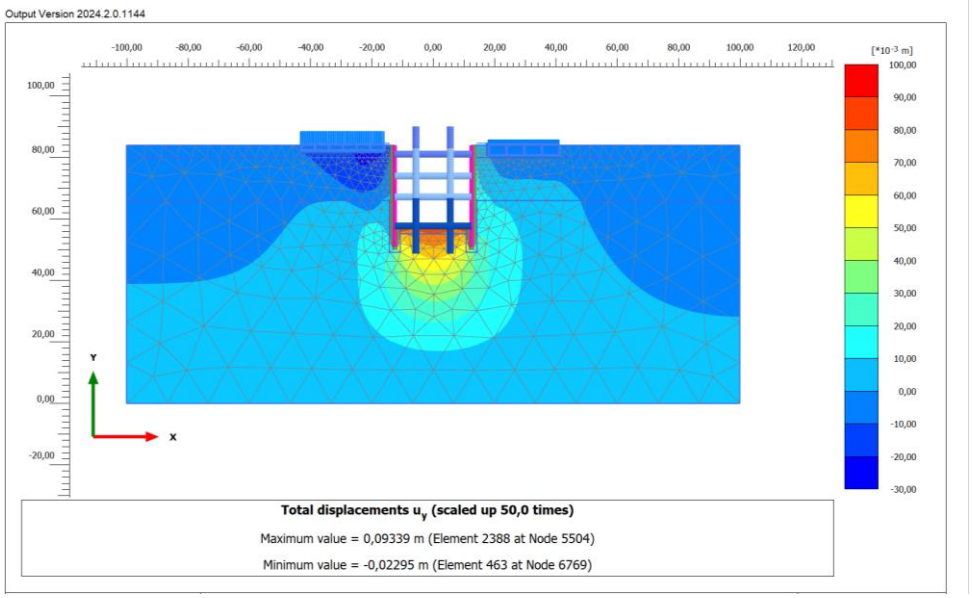
Şekil 5.67. Plaxis3D toplam düşey oturma/kabarma sonuç verisi

Alınan oturma sonrasında oluşan güvenlik analiz sonucundan elde edilen güvenlik katsayısı 3,769 olup ilgili sonuçlar Şekil 5.68'de verilmektedir.



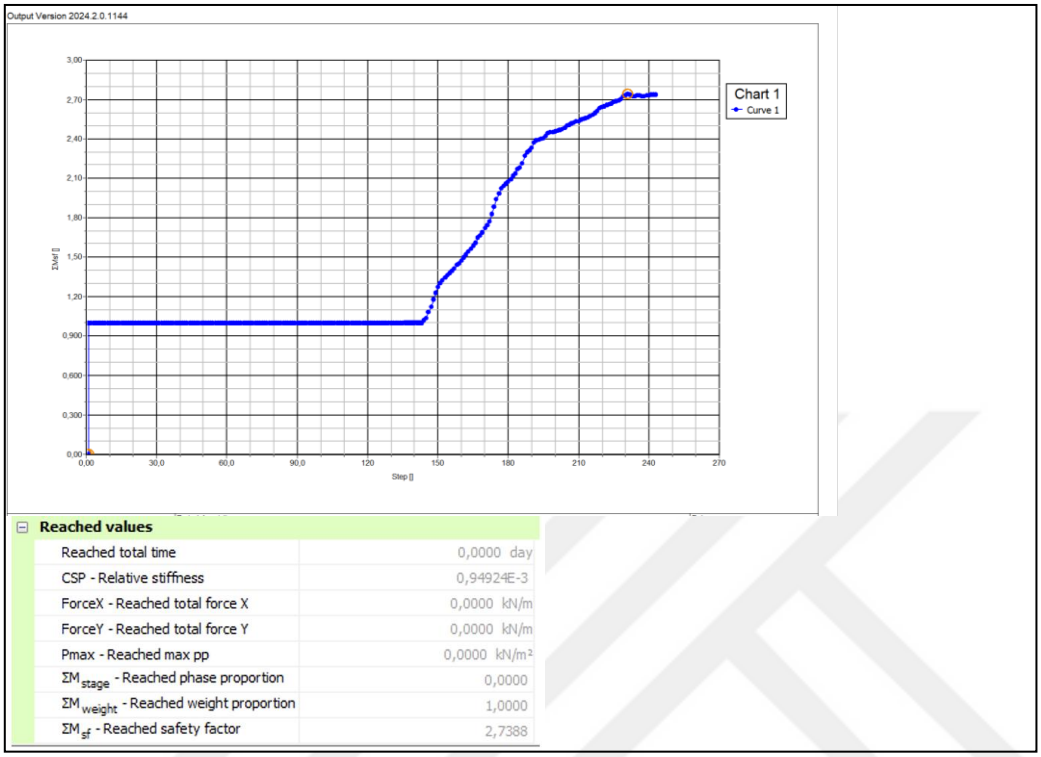
Şekil 5.68. 3B model güvenlik analiz sonuçları

Şekil 5.69'da yer alan toplam düşey deplasman değeri 2B analizlerden elde edilmektedir. Alınan sonuç beklendiği gibi taban kabarması olarak görülmekte olup yaklaşık 9,5 cm'dir.



Şekil 5.69. Plaxis2D toplam düşey oturma/kabarma sonuç verisi

Alınan oturma sonrasında oluşan güvenlik analiz sonucundan elde edilen güvenlik katsayısı 2,2788 olup ilgili sonuçlar Şekil 5.70'te verilmektedir.



Şekil 5.70. 2B model güvenlik analiz sonuçları

Bu bölümde bir metro istasyonunun derin kazısının iksa sistemi üzerine etkisi incelenmiş olup elde edilen sonuçları özetlenmiştir. Yapılan analizde düşey iksa elemanı olarak tasarlanan kazıklar ve yatay destek elemanı olan strutlara ait veriler hem iki boyutlu analizden hem de üç boyutta incelenmiştir. Sonlu eleman yönteminden yararlanarak gerçeğe en yakın kazı senaryosu Plaxis yazılımı ile simüle edilmiş olup alınan sonuç verileri birbiri ile kıyaslanmış, yüzdece farklılıkları ve benzer davranışları üzerinde durulmuştur.

Diğer bölümde ise elde edilen sonuçlar yorumlanarak üç boyut etkisinin iki boyutlu analiz üzerindeki davranışı incelenmiştir. İnceleme yapılırken istasyonun çevre yapılar ile etkileşimi ve iksa sistemine gelen farklı yüklerin kazık davranışına ve iç destek sistemi üzerine etkileri incelenirken, amaçlanan güvenli kazının tam kazı durumunda ve kazı sonundaki zemin gerilmeleri, çevre yapılarda görülen oturmaların 2B ve 3B'daki davranışı verilerek kıyaslanmıştır.

6. SONUÇLARIN YORUMLANMASI

Numerik analizlerde ele alınan ilk konu iksa elemanının deplasman incelemesi olup 2B model ile 3B analiz modellerinde ilk kontrol edilen sonuçtur. Sonuçlar göstermektedir ki A-A Analiz kesiti sol aksı ile sağ aks deplasman sonuçları kıyaslandığında kesitinin iki yanında da yapı olması nedeniyle benzer sonuçların elde edileceği düşünülse de sonuçlar incelendiğinde sol aks için 3B analizde elde edilen deplasman azalmasının %28'lik bir oranda olduğu görülürken sağ akstan elde edilen azalma değeri %13 olarak hesaplanmıştır. Kesite çevre yapıların uzaklıkları da düşünülerek bakıldığında kazıklarda oluşan deplasmanın yapılaşmanın daha yakın olduğu bölge özelinde parabolik olarak arttığı görülmüştür. Diğer bir değişle bina ağırlığının iksa cephesine daha yakın olduğu bölgede kazık deplasmanlarının artacağı tahmin edilse de bu artış oranının iki katından daha fazla olduğu görülmüş bu durum kazık ile mevcut yapı arasındaki mesafenin güvenlik amacının yanı sıra oluşacak deplasman değerleri açısından da beklendiğinden fazla dikkat edilmesi gerektiği sonucunu göstermektedir.

A-A Analiz kesiti sol aks olarak gösterilen kesit özelinde kesme kuvvetlerinden elde edilen yüzdece fark üç boyutlu analizlerde %22 daha az sonuç ile karşılaşırken, aynı değerlere verilen donatılara bakıldığında bu fark %45'e çıkmaktadır. Bu da gösteriyor ki gelen kuvvet %22 olmasına rağmen sayısal verinin uygulamada dönüştüğü sonatı karşılığı neredeyse 2 kata kadar etki göstermektedir. Bunun nedenlerinden biri donatı seçerken kullanılan malzeme katsayısı ve formüle girildiğinde çıkan donatı alanına bire bir uygun seçilen donatının olamaması (genelde biraz daha güvenli donatı alanı yönünde donatı verilmektedir), yönetmelikler ve genel betonarme kuralları gereğince minimum verilmesi gereken donatının verilmesi gibi etkenler olabildiği düşünülmektedir.

A-A Analiz kesiti sol aks olarak gösterilen kesit özelinde moment değerlerinden elde edilen yüzdece fark üç boyutlu analizlerde %19 iken, aynı değerlere verilen donatılara bakıldığında bu fark %24'e çıkmaktadır. Bu da gösteriyor ki gelen moment değerleri hem analiz verisi olarak hem de donatı seçiminden sonra elde edilen metraj açısından paralellik göstermektedir.

A-A Analiz kesiti sol aks olarak gösterilen kesit özelinde tasarıma esas oluşturulan kazık tesir kuvvetlerinde kesme kuvvetleri arasındaki fark %22 iken eğilme momentinde ise bu

değer %19 olarak görülmektedir. Bu durum sistemin hem kesme davranışı hem de eğilme davranışı üzerinde paralellik gösterdiği görülmüştür.

A-A Analiz kesiti sol aksı ile sağ aks kesme kuvveti sonuçları kıyaslandığında kesitinin sol aksından alınan sonuçlarda sol aksta meydana gelen azalmanın 3B analizde %22 iken, sağ aksta bu azalma %6 olarak görülmektedir. Bu sonuç beklenildiği gibi iksa cephesine daha yakın ve daha ağır bir yapının kesme kuvvetini beklendiği gibi etkilendiğini söylemektedir.

A-A Analiz kesiti sol aksı ile sağ aks moment sonuçları kıyaslandığında kesitinin sol aks sonuçları 3B analizlerinde %19 oranında bir azalma gösterirken, sağ aksta şaşırtıcı bir şekilde 3B analiz sonuçları %4 oranında moment artışı göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde 2B analiz sonuçlarında moment değerleri neredeyse aynı kalırken 3B analiz sonuçlarında ciddi bir artış görülmektedir.

Analiz sonuçlarından elde edilen veriler kıyaslandığında kazıklarda oluşan deplasman değerleri yapılaşmanın olduğu bölgede (A-A Analizi sol aksında) %28 oranında üç boyutlu modelin daha az sonuç verdiği görülürken; yapılaşmanın olmadığı bölgede (B-B Analizi sol aksında) %15 oranında üç boyutlu modelin daha az sonuç verdiği görülmüştür. Aynı durum 3B analizlerde kesme kuvvetleri açısından değerlendirildiğinde A-A analiz kesiti sol aksından elde edilen sonuçlarda %22 daha az sonuç verirken; B-B analiz kesiti sol aks verileri %22 daha az sonuç vermektedir. Moment değerleri açısından ise A-A analiz kesiti sol aksından elde edilen sonuçlarda %19 daha az sonuç verirken; B-B analiz kesiti sol aks verileri %23 daha az sonuç vermektedir. Bu durum gösteriyor ki deplasman değerlerine kıyasla elde edilen tesir kuvvetleri çevre yapılardan görece daha az oranda etkilenmektedir. Diğer bir değişle derin kazılardan edinilen sonuçlarda deplasman hassasiyeti daha belirgin sonuç vermekte olup kazık moment ve kesme kuvveti değerleri yapı varlığından mertebece aynı düzeyde etkilenmektedir.

Düşey iksa eleman sonuçlarına ek olarak yatay destek elemanı olan çelik strutlar hem 2B analizlerde hem de 3B analiz modelinden alınan eksenel kuvvetleri yönünden yüzdece sonuçları kıyaslanmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde başlık kirişi kotu ile son sıra kuşak kirişi kotunda yer alan strutlar birbirine paralel sonuç vermemesine rağmen ikinci ve üçüncü sıra kuşaklar aynı oranda değişim göstermektedir. Gelen eksenel yük üzerinden incelendiğinde ise oranların benzer çıktığı kotlarda dahi bina olan analiz kesiti ile

yapılaşmanın olmadığı analiz kesitin beklenildiği gibi yapılaşma olan cephede çelik strut yükleri %20 civarında daha az yüklenmektedir.

Kuşak kirişi analiz sonuçlarında genel kiriş eğilme davranışı paralellik gösterirken, değerler nümerik anlamda ciddi farklılıklar içermektedir. Özellikle iç ve dış momentlerde çıkan sonuçlar birbirlerinden oldukça yüzdelik farklılıklar içermektedir. Bu durumun analizde aynı kabullerle ilerlense dahi modellemelerin farklı yazılım tabanlı programlarda farklı sonuçlar alınabileceğini göstermektedir. Sonuçlar nümerik olarak farklı sayı değerlerinde olsa da eğilme davranışı modellerin birbirini desteklediğini göstermektedir.

Kuşak kirişi analiz sonuçlarında genel olarak görülen davranış köşe noktalarda oluşan mesnet momentlerinin hem SAP2000'den alınan sonuçlarda hem de Plaxis3D'de alınan sonuçlarda kat bazında çıkan momentlerden en az bir buçuk kat daha fazla olduğu görülmektedir.

Kuşak kirişi analiz sonuçlarında genel olarak görülen kesme kuvveti davranışında ise sonuçlar birbirinden oldukça farklı olup elde edilen sonuçlardan bir korelasyona ulaşılmamıştır. Yapılan farklı analizler kendi içinde de tutarsız sonuçlar vermektedir.

Plaxis3D modeli deplasman davranışı incelendiğinde uzun cephe ve kısa cephede yer alan kazıkların köşe etkisi ile istasyon köşe noktalarında deplasmanın sıfırlandığını, orta bölümlerde ise yapılaşmanın fazla olduğu bölgelerde daha fazla olmak üzere davranışın beklenildiği gibi eğildiği görülmüştür. Bu da iki boyutta analiz yaparken en başta kabul edilen "plain strain" davranışın uygun metot olduğunu göstermektedir. Ancak üç boyutlu model çıktıları gösteriyor ki iki boyutlu modeller istasyon genelini yansıtırken köşe bölgelerde elde edilen sonuçlar köşe etkisi ile daha az deplasman yapmakta olup elde edilen sonuçlar gerçeğe göre oldukça güvenli tarafta kalmaktadır.

Plaxis3D modeli deplasman davranışı incelendiğinde uzun cephede yer alan yapılaşma sonucunda beklenildiği gibi bina ağırlığına göre oluşan iksa deplasman değerleri birbirinden farklı olup 9 katlı yapının olduğu yerde oluşan yatay deplasmanın 6 katlı yapının olduğu yere kıyasla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Bina oturma değerlendirmesi yapmak amacı ile elde edilen sonuçlar kıyaslanmış olup sonuçların hem sağ aksta hem de sol aksta yüzdece neredeyse aynı olduğu gözlemlenmektedir. Diğer bir değişle mevcut bina 3B analiz yapıldığında her iki iksa cephesinde de %35- %36 oranında daha az sonuç vermektedir. Bu da göstermektedir ki zemin yüzey davranışı 3B analizde daha hassas hesaplanmakta olup düşey oturmalar 2B analiz yapıldığında daha güvenli tarafta kalacak sonuçlar vermektedir.

Bina oturma değerleri incelendiğinde elde edilen düşey oturma miktarları ile iksa yatay davranışı olarak alınan üç boyutlu kazık yatay deplasman değerlerinin aynı olduğu görülmüş olup beklenildiği gibi derin kazılarda oluşan deplasman değerlerinin yapılaşma olan kesitlerde doğru orantılı olarak etki ettiği sonucuna varılmıştır.

Elde edilen güvenlik analiz sonuçları sistem çözümünün güvenli olduğunu göstermekte olup elde edilen 3B analizden elde edilen nihai zemin kabarması 7,441 cm iken 3,769 olarak alınan güvenlik katsayısı, 2B analiz modelinde 9,339 cm ve 2,7388 olduğu görülmüştür. Aynı zemin verileri ile modellenen bu iki analiz modelinde, nihai sonuçlardan yola çıkarak sistemde oluşan zemin kabarmasının güvenlik analiz sonucunu aynı doğrultuda etkilediğini ve kabarmanın az olduğu modellemede sonuçların daha güvenilir olduğu göstermektedir. Bu durumda üç boyut etkisinin zemin kabarmasını sınırlandırdığı sonucunu doğrulamaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma en sık tercih edilen derin kazı yöntemi olan aç-kapa imalat yönteminin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümünün iki boyutta ve üç boyutta incelenmesinin ardından sonuçlarının kıyaslanmasını amaçlamaktadır. Bu kıyas yapılırken Plaxis2D ve Plaxis3D analiz programları kullanılmıştır.

İlk olarak derin kazılar hakkında genel bilgi verilerek, literatürde yer alan önceki çalışmalar sunulmuştur. Bir sonraki bölümde sonlu elemanlar yöntemi olarak ele alınan kavram incelenmiş bu çalışma kapsamında da kullanılan Plaxis2D ve Plaxis3D analiz programı hakkında bilgi verilmiştir. Aynı bölümde incelenen diğer bir başlık ise bünye modelleri ve bu bünye modellerinin hangi tip zeminler için uygun olduğu bilgileri sunulmaktadır.

Sonrasında ele alınan kavram derin kazı kavramı ve iksa davranışı olarak sunulmaktadır. Bu başlık derin kazılar olarak ele alınan kavramda nasıl bir yöntem ile güvenli kazı yapılmasının gerekliliğini anlatırken derin kazılarda sıklıkla kullanılan iksa sistemi kavramını ele almaktadır. İksa sitemi kavramı olarak bahsi geçen metotların detaylarına yer verilen alt başlıklar içerik olarak en sık karşılaşılan iksa sistemleri ve iksa davranışı hakkında detaylandırılmıştır.

Son olarak ele alınan en genel konu ise bir örnek derin kazı sisteminde örnekleme yapılarak metro istasyonunun çözümlenmesine dair yapılan çalışmanın sunulmasıdır. Bu başlık altında sırası ile sonlu eleman girdileri verilirken, modellemede dikkat edilen ve sonucu gerçeğe en yakın alabilmek için yapılan kabulleri içermektedir.

Çalışma kapsamında ele alınan metro istasyonu tipik bir kırıklı kayanın yüzeye doğru zeminleşmesi ile oluşan ara zemin geçişlerinin olduğu en üst tabakada da dolgu olarak tanımlanan niteliksiz bir yüzey zemini içeren bölgeyi temsil etmektedir. Yeraltı su seviyesi yüzeyden sekiz metre aşağıda alınmıştır.

İksa çözümünü gerçekçi kılan diğer bir çalışma adımı ise modellemede büyük etki sağlayan kazı adımlarının belirlendiği kazının aşamalı bir şekilde modellere dahil edilmesine dikkat eden bölüm her iki analiz yönteminde de aynı sıralama yapılmasını, bu sıralama esnasında

birebir uygulamaya esas olması gerektiği üzerinde durularak çalışmanın tutarlılığı sağlanmıştır.

Analiz modellerinin hem iki boyutta hem de üç boyutta yapılması elde edilen sonuçların kıyaslanması ve oransal yakınsamalar ile bir sonuç elde edilmesini amaçlayan son bölüm ise 2B ve 3B analiz çalışmaları başlığı altında detaylandırılmış, elde edilen sonuçlar özelinde oluşan çıktılar detaylıca irdelenmiştir.

Genel olarak yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar kısmi başlıklar halinde incelenmiş ve çıkarımlar yapılarak yorumlanmıştır. Analiz sonuçları anlaşılabilir kıyaslamaların yapılabilmesi amacıyla kesitler özelinde karşılaştırmaları içermekte, bu karşılaştırmalarda her alt başlık özelinde detaylandırılarak ele alınmıştır. Kesitler alınırken çevre yapılaşmasına dikkat edilmiş olup yapının olduğu bölge analiz kesiti (A-A analiz kesiti) ile yapılaşmanın olmadığı analiz kesiti (B-B analiz kesiti) olarak ayrı iki kavram üzerinden irdelenmektedir.

A-A Analiz kesiti sol aksı ile sağ aks moment sonuçları kıyaslandığında kesitinin sol aks sonuçları 3B analizlerinde bir azalma gösterirken, sağ aksta şaşırtıcı bir şekilde 3B analiz sonuçları moment artışı göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde 2B analiz sonuçlarında moment değerleri neredeyse aynı kalırken 3B analiz sonuçlarında ciddi bir artış görülmektedir. Maksimum momentin görüldüğü bölge aynı kalırken sayısal sonuçların mertebesel olarak artması tasarımını etkileyen yönde farklıdır. Bu durum iki boyutlu analizlerin genel istasyon çözümlerindeki basitleştirmeyi doğru yaparken üç boyutlu davranıştaki bölgesel farklılıkları genel çalışma prensibi olarak simüle edemeyeceğini göstermektedir.

Elde edilen deplasman değerlerine ek olarak incelenen diğer bir sonuç tesir kuvvetlerinin kıyaslanmasıdır. Çoğu literatür çalışması iksa elemanının yatay ve düşey hareketini incelerken iksa elemanında meydana gelen tesir kuvvetleri üzerindeki farkı incelememektedir. Bu çalışma sonuçlarında amaçlanan asıl etki deplasmanlara ek olarak bu tesir kuvvetlerinin ve yatay destek elemanının analiz boyutuna göre kıyasının irdelenmedir. Alınan her sonuç kıyaslanarak elde edilen sonuçlar oransal olarak sunulmuş olup bu problem özelinde varılan çıkarımın genel derin kazı iksa davranışına etkisi incelenmiştir.

Alınan sonuçlarda dikkat çeken en önemli etkiler kazık deplasmanı ve buna bağlı oluşan tesir değerleri (eğilme momenti ve kesme kuvveti) beklendiği gibi paralellik gösterirken; iç destek elemanı olarak kullanılan göğüsleme kirişi/kuşak kirişi tesir kuvvetlerinde aynı etki gözlenmemiştir. Burada sonuçların birbirine yakınsamama nedeninin 2B analizlerinde iç destek siteminin modellenememesinden kaynaklı elde edilen sonuçların SAP2000 programı ile çözülmesini gerekli kılmaktadır. Bu durumda farklı çözüm kabullerine dayanan iki program çıktıları sistemin genel davranışında paralellik gösterse de sayısal verilerden elde edilen sonuçlarda farklılıklara neden olabileceği düşünülmektedir. SAP2000 programı zemin etkisini verilen yayılı yükten alırken, Plaxis3D içeriğinde bulunan zemin bünye modelleri sayesinde karmaşık davranışa sahip olan zemin ya da kayanın daha gerçekçi olarak modellenebilmesine imkân sağlamaktadır. Bu durumun çıktılar üzerindeki farklılıklara neden olabileceği de diğer etkenlerden biri olarak düşünülmektedir.

Elde edilen sonuçlar yalnızca bu zemin-kaya birimine ait, yeraltı suyunun ve kazı derinliğinin aynı olduğu, ilgili kazı destek sistemi için geçerlidir. Sonuçlar sayısal veriler üzerinden yorumlanmış aynı özellik göstermeyen derin kazılar için sonuçlar aynı değerleri yansıtmayacaktır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda iksa sistemindeki karmaşık yapıya dair incelenen bölgelerin sayısı artırılabilir, istasyonun kısa cephesinden alınan bir kesiti hem 2B hem de 3B analizlerde kıyaslamalara dahil edilerek aynı kabuller üzerinden gidildiğinde dahi kısa cephe ve uzun cephenin benzer sonuçlara sahip olup olmadığı irdelenerek kritik olarak görülen kesitin her bölgeyi aynı kabullerle tipleştirmenin uygunluğu teyit edilebilir. Buna ek olarak istasyona bağlanan tünellerin kısa cephe üzerindeki kazıklara olan etkisi irdelenerek bu durum hem 2B analizde bir sistem kesit üzerinde kontrol edilirken hem de 3B analizde bu durum tünel boşluğu modele dahil edilerek aynı başlıklar üzerinde yüzdece oransal bir yakınsama olup olmadığı sonucuna varılabilir. Bu çalışmalar özellikle köşe etkisi olarak da tanımlanabilen istasyon köşe birleşim bölgelerinde yapılacak olan analizlerle sayıca arttırılarak doğruluğu ve gerçekliği kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

Ansys. *Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) Nedir?* Ansys: https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-finite-element-analysis adresinden alındı. Erişim Tarihi: 29.04.2025

Bentley. (2023, 28 Eylül). *How the Past 30 Years of PLAXIS History Pave the Way for a Promising Future*. Seequent: https://www.seequent.com/how-the-past-30-years-of-plaxis-history-pave-the-way-for-a-promising-future/ adresinden alındı. Erişim Tarihi: 23.04.2025

Berilgen, P. D. (2014, 16 Ekim). *Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Yöntemler Ve Program Kullanımı.* TMMOB-Geoteknik Meslekiçi Eğitim Kursu: http://imoistanbul.org/imoarsiv/geoteknik-kurs-notlari-2016/2.hafta/mehmet-berilgen-Say%C4%B1sal_Yontemler-2016.pdf adresinden alındı. Erişim Tarihi: 03.05.2025

Bowles, J. E. (1986). *Engineering Properties of Soils and Their Measurement.* New York: McGraw-Hill Book Company, 118-120.

Bozkurt, S. ve Akbas, S. O. (2023). Finite element-based geotechnical risk analysis for anchor-supported deep excavations. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(8), 470-485.

Bryson, L.S., Finno, R.J. (2002). Response of Building Adjacent to Stiff Excavation Support System in Soft Clay. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 10-20.

BS 8081. (1989). *British Standart Code of Practice for Ground Anchorages.* Londra: The British Standards Institution.

Calışan, O. (2009). *Ankara Kilinde Yapılan 20 m Derinliğinde Bir Kazının Geri Analizi*. Prof. İsmet Ordemir'i Anma Toplantısı ve 5. Odtü Geoteknik Mühendisliği Sempozyumu*,* Ankara, 1-12.

Chang-Yu Ou, B.-Y. S.-W. (2000). Three-dimensional deformation behavior of the Taipei National Enterprise Center (TNEC) excavation case history. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(2), 438-448.

Chang-Yu, O. a. (2006). *Fundamentals of Deep Excavations.* London: CRC Press, 225-235.

D.O'Rourke, W. C. (1990). *Construction induced movements of in situ wall*. Specialty Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, 435-470.

Daş, A. (2020, 4 Mayıs). *İksa Sistemlerinde İçten Destek Sağlayan - Boru Destekler*. İnşaport: https://www.insaport.com/haberler/iksa-sistemlerinde-icten-saglayan-boru-destekler/ adresinden alındı Erişim Tarihi: 05.05.2025

Demir, D. G. (2025). Derin Kazılar ve İksa Yöntemleri. *Ders Notları*. Samsun, Türkiye: Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 10-15.

Ergun, P. D. (2016). *Derin kazı projelerinin ilkeleri: bir özet.* Ankara: ODTÜ Basım İşliği, 8-20.

Federal Highway Administration. (1999). *Geotechnıcal engineering circular no. 4.* Washington: FHWA-IF-99-105, 36-45.

FHWA-NHI 18-024. (2018). *Drilled shafts: construction procedures and design methods.* New York: Federal highway Administration, 70-85.

Geotech. (2025). *Top-down construction method*. Retaining Structures: https://www.geotech.hr/en/top-down-construction-method/ adresinden alındı Erişim Tarihi: 04.05.2025

Hoek, E., Carranza-Torres, C. ve Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edıtıon. *Proc. NARMS-TAC Conference*, 267-273.

Hsii-Sheng Hsieh, C.C. W.Y. (2003). *Use of jet grouting to limit diaphragm wall displacement of a deep excavation.* Journal Of Geotechnıcal And Geoenvironmental Engineering, 146-157.

Huvaj, Y. D. (2017). *Geoteknik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi - Temel Bilgiler*. Geoteknik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi - Temel Bilgiler -. Ankara, Çankaya, Türkiye: TMMOB-İnşaat Mühendisleri Odası, 3-20.

ISSMGE. (2017, Nisan). *Field measurements of ground movements associated with circular shaft construction.* International Society For Soil Mechanics And Geotechnical Engineering: https://www.issmge.org/uploads/publications/6/86/2017_035.pdf adresinden alındı. Erişim Tarihi: 08.05.2025

Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları. (2022). *Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları.* Ankara: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 15-135.

KDYY. (2023). *Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği -KDYY- Tasarım El Kitabı.* Ankara: Yapı İşleri Genel Müdürlüğü, 40-65.

Kılıç, D. D. (2017). *Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Analizler Notları.* TMMOB-Geoteknik Meslekiçi Eğitim Kursu: http://imoistanbul.org/imoarsiv/geoteknik-kurs-notlari-2017/2-3%20aral%C4%B1k/havvanur-kilic-1.pdf adresinden alındı Erişim Tarihi: 20.04.2025

Koutsoftas, F. W. (2000). Deformations during cut-and-cover construction of muni metro turnback project. *Geotechnical. Geoenvironmental Engineering Journal*, 126(4), 344-359.

Kung, G. (2009). Comparison of excavation-induced wall deflection using top-down and bottom-up construction methods in Taipei silty clay. *Computers and Geotechnics*, 36(3), 373-385.

Mana ve Clough. (1981). Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay. *ASCE*, 185-200.

Megson, D. (2019). *Introduction to Aerospace Materials.* Cambridge: Woodhead Publishing,1-14.

Ou, C.-Y. ve Hsieh, P.-G. (2011). Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(6), 1004-1017.

Peck, B. R. (1969). Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(3), 225-325.

Suched Likitlersuang, C. S. (2021). Influence of the spatial variability of soil shear strength on deep excavation: A case study of a Bangkok underground MRT station. *International Journal of Geomechanics*, 21(2), 756-773.

The Constructor. (2021). *Methods of Excavation Used for Deep Foundation Construction*. The Constructor Building ideas: https://theconstructor.org/practical-guide/excavation-methods-deep-foundations/21157/ adresinden alındı Erişim Tarihi: 14.05.2025

Yüksel Proje. (2007). *Geoteknik Tasarım Esasları.* Ankara: T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü, 43-52.

Zdravkovic, L. ve Potts D. M. (2005). Modelling of a 3D excavation in finite element analysis. *Geotechnique*, 55(7), 497-513.



Gazili olmak ayrıcalıktır