

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TÜNELLERİN SAYISAL ANALİZ İLE MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BUSE ŞEYDA HOCAOĞLU

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. NAZİLE URAL

BİLECİK, 2022

10444157

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TÜNELLERİN SAYISAL ANALİZ İLE MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BUSE ŞEYDA HOCAOĞLU

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. NAZİLE URAL

BİLECİK, 2022

10444157

BEYAN

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

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

Buse Şeyda Hocaoğlu

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Bu tez yeterlilik çalışmamda, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Prof. Dr. Nazile URAL' a, program desteği veren Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü hocalarından olan Doç. Dr. Sedat SERT'e değerli katkıları ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Savunma proje sunumu sırasında değerli proje danışmanım Sayın Prof. Dr. Nazile URAL' a çalışmamın son haline gelmesindeki değerli katkıları adına teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına değerli aileme teşekkür ederim.

Buse Şeyda Hocaoğlu

2022

ÖZET

TÜNELLERİN SAYISAL ANALİZ İLE MODELLENMESİ

Dünya nüfusunun ve ihtiyaçların çoğalmasıyla birlikte ulaşım ihtiyacı artmıştır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda yeryüzü şekilleri nedeniyle ulaşımın zor olduğu bölgelere tünel iki tarafı açık kazılar (tünel) yapılmaya başlanmıştır. Tünel projeleri planlanırken en önemli etken doğadır. Bu yüzden planlama yapılırken, doğaya güvenilir bir şekilde yön vermek olan mühendisliğin en temel amacını göz önünde bulundurmalıyız. Karmaşık ve öngörmesi zor olan tünel projelerinin daha kolay çözülmesi ve modelin görsel olarak hazırlanması için sonlu elemanlar metodları ile çözümler yapılmaya başlanmıştır. Bu metodlar sayesinde geoteknik problemleri daha kolay belirlenmiş ve kısa sürede çözülür hale gelmiştir. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemlerinden biri olan Plaxis 2D ile ikiz tünellerin çeşitli parametreler ile dinamik analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda çıkan değerler grafikler ile yorumlanıp, karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda zemin modeline, analizden ne istenildiğine göre karar verilmesinin doğru olacağı saptanmıştır. Tüneller üzerinde bulunan bina yükünün düşey deformasyonları bir miktar azalttığı görülmüştür. Yeraltı su seviyesi incelendiğinde yeraltı su seviyesi aşağılara indikçe yatay deformasyon artarken düşey deformasyon ve boşluk suyu basıncında tam tersi durum gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Elemanlar Yöntemi, Tünel, Plaxis2D, Mohr Coulomb, Hardening Soil, Hardening Soil Small Strain.

ABSTRACT

MODELING OF TUNNELS WITH NUMERICAL ANALYSIS

With the increase in the world population and needs, the need for transportation has increased. In line with these needs, tunnel excavations (tunnels) with open two sides have been started to be made in areas where access is difficult due to landforms. Nature is the most important factor when planning tunnel projects. Therefore, while planning, we must consider the most fundamental purpose of engineering, which is to steer nature reliably. Solutions with finite element methods have been started to be made in order to solve complex and difficult to predict tunnel projects more easily and to prepare the model visually. Thanks to these methods, geotechnical problems can be determined more easily and solved in a short time. In this study, dynamic analysis of twin tunnels with various parameters was performed with Plaxis 2D, which is one of the finite element methods. The values obtained as a result of the analyzes were interpreted with graphics and compared. As a result of the comparisons, it was determined that it would be correct to decide on the soil model according to what is requested from the analysis. It has been observed that the building load on the tunnels slightly reduces the vertical deformations. When the groundwater level is examined, the horizontal deformation increases as the groundwater level goes down, while the opposite situation is observed in the vertical deformation and pore water pressure.

Keywords: Finite Element Method, Tunnel, Plaxis2D, Mohr Coulomb, Hardening Soil, Hardening Soil Small Strain.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xiii
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Genel.....	1
2.TÜNELLER.....	3
2.1. Tanımlar.....	3
2.2. Tünel Çeşitleri.....	4
2.2.1. Ulaştırma Tünelleri.....	4
2.2.1.1. Demiryolu Tünelleri.....	4
2.2.1.2. Karayolu Tünelleri.....	4
2.2.1.3. Metro Tünelleri.....	5
2.2.1.4. Yaya Tünelleri.....	5
2.2.2. Hizmet Tünelleri.....	6
2.2.2.1. Kanalizasyon Tünelleri.....	6
2.2.2.2. Alt Yapı Tünelleri.....	6
2.2.2.3. Enerji ve Su Tünelleri.....	7
2.3. Güzergâh Seçimi.....	7
2.4.Tünel Açma Yöntemleri.....	7
2.4.1. Alman Tünel Açma Yöntemi.....	7

2.4.2. Eski Avusturya Yöntemi	8
2.4.3. İngiliz Tünel Açma Yöntemi	8
2.4.4. Amerikan ve İtalyan Tünel Açma Yöntemleri	8
2.4.5. Belçika Yöntemi	8
2.4.6. Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu	8
2.4.7. ADECO-RS Metodu	9
2.5. Tünel Uygulamaları İnşa Yöntemleri	9
2.5.1. Aç-Kapa Metotla Tünel Yapımı	9
2.5.2. Klasik Metotlarla Tünel Yapımı.....	9
2.5.3. TBM Tünel İnşa Metodu	9
2.5.4. Batırma Metoduyla Tünel Yapımı	10
2.6. Tünelcilikte Zemin İyileştirilmesi	10
2.6.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	10
2.6.2. Yeraltı Su Seviyesini Düşürme	11
2.6.2.1. Yüzeysel Pompalama	11
2.6.2.2. Derin Kuyular.....	11
2.6.3. Elektro-Osmoz.....	12
2.6.4. Zemin Dondurulması.....	12
2.6.5. Enjeksiyon Teknikleri	12
2.6.5.1. Permeasyon (Sızdırma-Emdirme) Enjeksiyonu.....	13
2.6.5.2. Kompaksiyon Enjeksiyonu.....	13
2.6.5.4. Jet-Grouting.....	14
3. LİTERATÜR.....	15
4. SONLU ELEMEN YÖNTEMLERİ.....	48
4.2. Zemin Metaryal Modelleri.....	53
4.2.1. Mohr-Coulomb.....	53

4.2.2. Pekleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model)	54
4.2.3. Hardening Soil Small Strain Model	54
5. ANALİZ ÇALIŞMASI.....	56
5.1. Analiz Hakkında Genel Bilgi.....	56
5.2. Proje Şemaları.....	64
5.3. Analizlerin Karşılaştırması ve Sonuçları	76
5.3.1. Analizlerde Zemin Modellerinin Karşılaştırılması.....	76
5.3.2 Analizlerde Bina Yükünün Etkisinin Karşılaştırılması	81
5.2.3 Analizlerde YASS Karşılaştırılması.....	85
6. SONUÇ VE TARTIŞMALAR	90
KAYNAKÇA	92
EKLER.....	96

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3. 1. Analizler sonucu dış yüklü model için elde edilen en büyük deplasmanlar	18
Tablo 3. 2 Analizler sonucu iç yüklü model için elde edilen en büyük deplasmanlar	18
Tablo 5. 1. Mohr coulom zemin malzeme özellikleri.....	57
Tablo 5. 2. Hardening soil zemin malzeme özellikleri.....	57
Tablo 5. 3. Hardenin soil small zemin malzeme özellikleri	58
Tablo 5. 4. Uygulamada kullanılan plate özellikleri	59

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1. Tünel	3
Şekil 2. 2. Tünel elemanları	3
Şekil 2. 3. Demiryolu tünelleri en kesit şekilleri.....	4
Şekil 2. 4. Karayolu tüneli en kesit şekli.....	4
Şekil 2. 5. Ankara metro tüneli	5
Şekil 2. 6. Amsterdam yaya ve bisikletli tüneli	5
Şekil 2. 7. Kanalizasyon tüneli en kesit şekli.....	6
Şekil 2. 8. Gaz ve elektrik tünelleri en kesit şekilleri	6
Şekil 2. 9. Derin kuyu kesiti.....	11
Şekil 2. 10. Hareketli yeraltı suyunun donmaya etkisi	12
Şekil 2. 11. Enjeksiyon tekniklerinin şematik gösterimi	13
Şekil 3. 1. Çayeli tüneli 152+240 lokasyonu analizlerinde kullanılan sonlu elemanlar ağı	15
Şekil 3. 2. Püskürtme beton kaplama üzerinde etkiyen moment ve normal kuvvet dağılımı. ..	16
Şekil 3. 3. İki boyutlu analizlerde kullanılan model	16
Şekil 3. 4. Üç boyutlu analizlerde kullanılan model	17
Şekil 3. 5. Birinci çalışma model	19
Şekil 3. 6. Birinci çalışma toplam deformasyonu	19
Şekil 3. 7. İkinci çalışma model ve toplam deformasyonu.	20
Şekil 3. 8. İkinci çalışma model ve toplam deformasyonu.	20
Şekil 3. 9. Üçüncü çalışma model ve toplam deformasyonu	21
Şekil 3. 10. Üçüncü çalışma model ve toplam deformasyonu	21
Şekil 3. 11. Dördüncü çalışma model ve toplam deformasyonu.	22
Şekil 3. 12. Dördüncü çalışma model ve toplam deformasyonu.	22
Şekil 3. 13. Beşinci çalışma model ve toplam deformasyonu	23

Şekil 3. 14. Beşinci çalışma model ve toplam deformasyonu	23
Şekil 3. 15. Altıncı çalışma modeli	24
Şekil 3. 16. Uygulama modellenmesi	25
Şekil 3. 17. Bina ve kazının olmadığı durumdaki deformasyon	25
Şekil 3. 18. Tünelde sonra kazının yapılması durumdaki deformasyon	26
Şekil 3. 19. Destekli kazıdan sonra tünellerin açılması durumdaki deformasyon	26
Şekil 3. 20. Model geometrisi	27
Şekil 3. 21. Birinci model geometrisi	28
Şekil 3. 22. Düşey deplasman	28
Şekil 3. 23. Yatay deplasman	29
Şekil 3. 24. İkinci model geometrisi	29
Şekil 3. 25. Düşey deplasman	30
Şekil 3. 26. Yatay deplasman	30
Şekil 3. 27. 3. Model geometrisi	31
Şekil 3. 28. Düşey deplasman	31
Şekil 3. 29. Yatay deplasman	32
Şekil 3. 30. Sonlu elemanlar modeli	33
Şekil 3. 31. İlk aşama sonrası toplam yer değiştirme	33
Şekil 3. 32. Tünelin açılması durumunda toplam yer değiştirme	34
Şekil 3. 33. Bina temellerinde oluşan meydana gelen oturmalar	34
Şekil 3. 34. İstinat duvarında oluşan yanıl yer değiştirmeler	35
Şekil 3. 35. İstinat duvarında meydana gelen oturmalar	35
Şekil 3. 36. Güzergah zemin kesiti	36
Şekil 3. 37. 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli	38
Şekil 3. 38. Uygulaması yapılan tünel kesiti	39
Şekil 3. 39. 3 boyutlu model geometrisi	40

Şekil 3. 40. 2 boyutlu plaxis modeli.....	42
Şekil 3. 41. Çözüm sonucu oluşan deformasyon geometrisi	42
Şekil 3. 42. Sonlu elemanlar modeli	43
Şekil 3. 43. Çalışma yapılan problemin modellenmesi.....	44
Şekil 3. 44. Düşey deplasmanlar	44
Şekil 3. 45. 2 boyutlu modelleme	45
Şekil 3. 46. 3 boyutlu modelleme	45
Şekil 3. 47. Yatay deplasman karşılaştırma grafiği	46
Şekil 3. 48. Düşey deplasman karşılaştırma grafiği.....	46
Şekil 3. 49. Dairesel ve dikdörtgen tünel modelleri.....	47
Şekil 3. 50. Maksimum oturma ve moment karşılaştırma grafikleri	47
Şekil 4. 1. Düğümler ve gerilme noktaları	50
Şekil 4. 2. Project properties penceresi	51
Şekil 4. 3. Programdaki kısımlar.....	51
Şekil 4. 4. Geometrinin oluşturulduğu pencere.....	51
Şekil 4. 5. Yapısal elemanların özelliklerinin girildiği penceresi	52
Şekil 4. 6. Tünel geometrisinin oluşturulması	52
Şekil 4. 7. Hesap penceresi	52
Şekil 4. 8. Hesap penceresi	53
Şekil 5. 1. Zemin tabakaları	56
Şekil 5. 2. Uygulamadaki ikiz tüneller.....	56
Şekil 5. 3. Uygulamadaki bina şeması	56
Şekil 5. 4. Sınır koşullarının belirlenmesi.....	59
Şekil 5. 5. Uygulama modelindeki sınırlar	59
Şekil 5. 6. Mesh küçültme sınırının belirlenmesi.....	60
Şekil 5. 7. Bina altında küçülte sınırının belirlenmesi	60

Şekil 5. 8. Uygulamadaki beton tabakaları	61
Şekil 5. 9. Sorun çıkan modellerde tünel kaplama uygulamaları.....	61
Şekil 5. 10. Tünel çapları	62
Şekil 5. 11. -3 metrede yeraltı su seviyesi.....	62
Şekil 5. 12. -42 metrede yeraltı su seviyesi.....	62
Şekil 5. 13. Bina yükü etkimeyen tünelin uygulama modeli	63
Şekil 5. 14. Bina yükü etkileyen tünelin uygulama modeli	63
Şekil 5. 15. 36 metre derinlikteki tünel modeli.....	63
Şekil 5. 16. 38 metre derinlikteki tünel modeli.....	63
Şekil 5. 17. 40 metre derinlikteki tünel modeli.....	64
Şekil 5. 18. y36r7s3 uygulama modeli.....	64
Şekil 5. 19. y36r7s3b uygulama modeli.....	65
Şekil 5. 20. y36r7s42 uygulama modeli.....	65
Şekil 5. 21. y36r7s42b uygulama modeli.....	66
Şekil 5. 22. y36r13s3 uygulama modeli.....	66
Şekil 5. 23. y36r13s3b uygulama modeli.....	67
Şekil 5. 24. y36r13s42 uygulama modeli.....	67
Şekil 5. 25. y36r13s42b uygulama modeli.....	68
Şekil 5. 26. y38r7s3 uygulama modeli.....	68
Şekil 5. 27. y38r7s3b uygulama modeli.....	69
Şekil 5. 28. y38r7s42 uygulama modeli.....	69
Şekil 5. 29. y38r7s42b uygulama modeli.....	70
Şekil 5. 30. y38r13s3 uygulama modeli.....	70
Şekil 5. 31. y38r13s3b uygulama modeli.....	71
Şekil 5. 32. y38r13s42 uygulama modeli.....	71
Şekil 5. 33. y38r13s42b uygulama modeli.....	72

Şekil 5. 34. y40r7s3 uygulama modeli.....	72
Şekil 5. 35. y40r7s3b uygulama modeli.....	73
Şekil 5. 36. y40r7s42 uygulama modeli.....	73
Şekil 5. 37. y40r7s42b uygulama modeli.....	74
Şekil 5. 38. y40r13s3 uygulama modeli.....	74
Şekil 5. 39. y40r13s3b uygulama modeli.....	75
Şekil 5. 40. y40r13s42 uygulama modeli.....	75
Şekil 5. 41. y40r13s42b uygulama modeli.....	76
Şekil 5. 42. 7 metre çaplı tünelde analiz için seçilen noktalar	77
Şekil 5. 43. 13 metre çaplı tünelde analiz için seçilen noktalar	77
Şekil 5. 44. Zemin modeli karşılaştırılmasında yatay deformasyon	78
Şekil 5. 45. Zemin modeli karşılaştırılmasında düşey deformasyon	79
Şekil 5. 46. Zemin modeli karşılaştırılmasında boşluk suyu basıncı	80
Şekil 5. 47. Bina yükünün etkisinin karşılaştırılmasında ki yatay deformasyon	82
Şekil 5. 48. Bina yükünün etkisinin karşılaştırılmasında ki düşey deformasyon	83
Şekil 5. 49. Bina yükünün etkisinin karşılaştırılmasında ki boşluk suyu basıncı	84
Şekil 5. 50. Yeraltı su seviyesinin karşılaştırılmasında ki yatay deformasyon.....	86
Şekil 5. 51. Yeraltı su seviyesinin karşılaştırılmasında ki düşey deformasyon	87
Şekil 5. 52. Yeraltı su seviyesinin karşılaştırılmasında ki boşluk suyu basıncı.....	88

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

m: Metre

cm: Santimetre

TBM: Tunnel Digging Machine

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

MC: Mohr Coulomb

HS: Hardening Soil

HSS: Hardening Soil Small Strain Model

YASS: Yeraltı Su Seviyesi

y: Tünel derinliği

r: Tünel çapı

s: Yeraltı su seviyesi

s: Zemin sönüm etkisi

b: Bina yükü

V_{unsat} : Doymamış birim hacim ağırlığı

V_{sat} : Doymuş birim hacim ağırlığı

E50: Gerilme şekil değiştirme eğrisinde secant modülü

V_{ref} : Yeraltısu referans seviyesi

V_{nu} : poisson oranı

C_{ref} : kohezyon oranı

ϕ : İçsel sürtünme oranı

Ψ : Genleşme açısı

R: Yüzey elemanı faktörü

E50,ref: Referans gerilme şekil değiştirme ödometre elastisite modülü

Eoed: Referans gerilme şekil değiştirme ödometre elastisite modülü

Eu: Boşaltma anındaki rijitlik kat sayısı

m: Gerilmeye bağlı rijitlik katsayısı

Vur: Yükleme boşaltma için poisson oranı

Pref: Referans gerilme

K0nc: Normal konsolide durum için sükunetteki toprak basıncı katsayısı

$\gamma_{0,7}$: $G_s=0,722G_0$ olan kesme gerilimi

G0ref : Kesme Modülü

EA: Normal rijitlik

EI: Eğilme rijitliği

W: Eleman ağırlığı

1.GİRİŞ

1.1. Genel

Türkiye’de ve dünyada teknolojinin artması ve insanoğlunun uzak mesafelere daha çabuk ulaşabilmesi için tünellere ihtiyaç duyulmaktadır. Tüneller, ulaştırma yapılarının yeryüzünden geçirilmesi imkansız veya ekonomik bakımdan olumsuz olan durumlar için kazılan iki ucu açık mühendislik yapılarıdır (Erbeyoğlu vd., 2017: 47).

İnsanlar hayatlarını sürdürebilmek, geliştirebilmek ve diğer insanlarla etkileşim halinde olabilmek için tünellere ihtiyaç duymuştur. Tünellerin, yaşam için ne kadar önemli olduğu geçmişe de bakılarak anlaşılabilir. M.Ö 4000 yıllara dayanan, Babiller’in insan eli ile açtığı, Fırat’ın altından geçen su altı tünelinin dünyadaki ilk tünel olduğu tahmin edilmektedir. Bu tünel aç kapat yöntemi ile yapılmıştır. 1000 metre boyunda 4,5 metre genişliğinde ve 3.6 metre yükseklikte yapıldığı düşünülmektedir. Ülkemizde de su getirmek için çok eskilere dayanan galeriler ve tüneller mevcuttur. Silifke’nin kuzeydoğusunda bulunan Aksıfat Galerisi bunlardan sadece biridir. M.Ö 300 yıllarında açılan, 1,5-2,0 m çapında ve 45 km uzunluğunda olan bu galeri günümüzde hala kullanılmaktadır (Canik, 1997: 42).

Karadaki ilk tünel bir demiryolu tünelidir. Bu tünel 1826 yılında Fransa’da Raonne–Andressieux ve 1826–1829 yılları arasında İngiltere’de Liverpool–Manchester arasında açılmıştır. 1857 yılında ilk defa kayaların hidrolik kuvvetlerle delinmesiyle Mont Cenis Tüneli inşa edilmiştir. Kaya mekaniğinin 1950’lerden sonra hızla gelişmesi ve bununla birlikte geliştirilen analitik yöntemler tünellerin tasarımı için bilimsel bakış açısına getirmiştir.

Tünel açılması için gereken nedenleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- 1) Yüksek eğimlere sahip olan dağlık arazilerde ulaşımın sağlanabilmesi,
- 2) Güzergâhı kısaltarak her açıdan ekonomiklik sağlanması,
- 3) Güzergâhta çığ, toprak kaymaları, kaya yuvarlanmaları gibi olayların önüne geçmek
- 4) Akarsu ve boğazlar üzerindeki ulaşımı aksatmadan suların altından ulaşımın sağlanması,
- 5) Gaz, elektrik ve telefon hatlarının tesisatları için galeri ihtiyacı,
- 6) Yolların genişletilmesi mümkün olmayıp trafik akışının sağlanamadığı yerlerde yeni yollara ihtiyaç duyulması,
- 7) Nüfusun artışı ile toplu taşımanın yetersiz kalması ve daha kısa sürede ulaşımın ihtiyaç haline gelmesi halinde metronun gerekli duyulması (Emiroğlu, 2010: 3).

Dünyanın ikinci Türkiye’nin ilk en uzun çift tüplü tüneli Ovit Tünelidir. Ovit Dağı Tüneli, Türkiye’de Rize-Erzurum arasındaki kara yolunda bulunmaktadır. Toplam uzunluğu

14,346 kilometre olan yolun 1,710 kilometresi aç-kapat, 12,636 kilometresi ise tünel kazısıdır. Cankurtaran Tüneli Artvin Hopa ve Borçka ilçeleri arasında bulunan, 5228 metre uzunluğu ile Türkiye'nin en uzun ikinci çift tüplü tnelidir (Takvim, 2018). Norveç'teki Laerdal Tüneli tek tüplü dünyanın en uzun karayolu tnelidir. (Hürriyet, 2018).

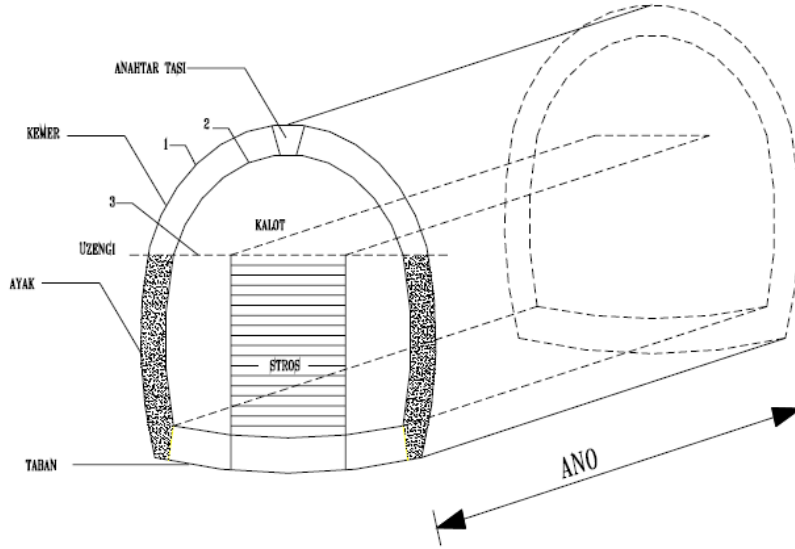
Marmaray'da Boğaz'ın altındaki kısımlar batırma tp tünel olarak inşa edilmiştir. Bu tünelin uzunluğu yaklaşık olarak 1,4 kilometredir. Marmaray tünelleri bugüne kadar inşa edilen batırma tp tünelleri arasında en derine yapılmış tünellerdir. Bu tünelleri en derin oldukları noktada deniz seviyesinin 58 metre altındadır (Ocak, 2013: 31). 7 Kasım 2019'da in'den gelen ve Avrupa'ya giden bir yük treni Marmaray Tüneli'nden geçen ve tüneli kullanan ilk yük treni olmuştur (CNN Türk, 2019).

Gotthard Tüneli, Alp Dağları'nda kazılan asıl amacı Kuzey ve Güney Avrupa'daki nakli kısıltmak olan 57 kilometre uzunluğundaki, 2300 metre derinlikteki bir tüneldir. Tünel 4 büyük kazı makinesiyle açılmıştır. Toplamda açılması 17 yıl sürmüştür (Euronews, 2016).

2.TÜNELLER

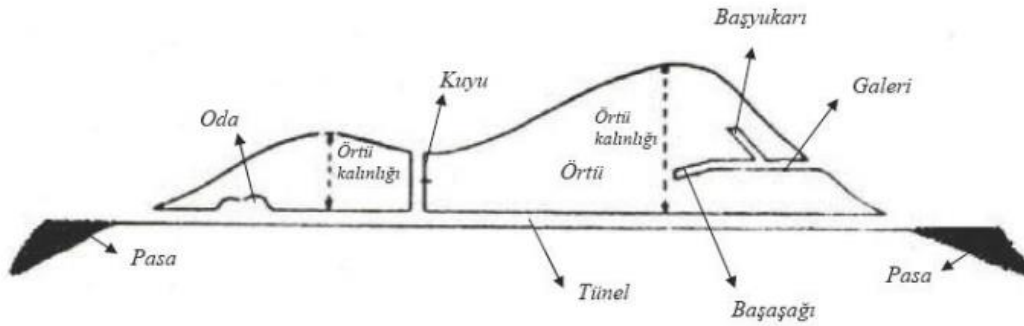
2.1. Tanımlar

Yeraltında yapılan açık uçlarından biri giriş diğeri çıkış olan boşluklara tünel, sadece bir açık ucu olanlara galeri denmektedir. Dik olarak yapılan kazılara baca (şaft), aşağıya eğimli olanlara baş aşağı, yukarıya doğru olanlara baş yukarı diye adlandırılmaktadır.. Daire veya daireye yakın şekildeki geniş alanlara oda (bekletme ya da dinlenme odası), tünelin üstündeki zemine örtü ve bunun kalınlığına da örtü kalınlığı denir (Osmanoğlu, 2007:3). Şekil 2.1' de verildiği gibi tünelin alt kısmına taban, yan kısımlarına ayak, üst kısmına da tavan ya da kemer denir. Üzengi kemerin ayaklarla birleştiği noktaya denir. Bu noktanın bulunduğu seviyenin altında kalan kısma stros adı verilmektedir (Şekil 2.2) (Osmanoğlu, 2007:4).



Şekil 2. 1. Tünel

Kaynak: (Osmanoğlu, 2007:4)



Şekil 2. 2. Tünel elemanları

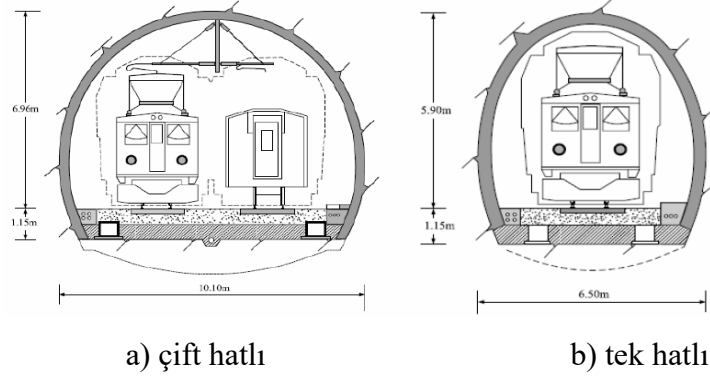
Kaynak: (Osmanoğlu, 2007:4)

2.2. Tünel Çeşitleri

2.2.1. Ulaştırma Tünelleri

2.2.1.1. Demiryolu Tünelleri

Demiryolu tünelleri en önemli ulaştırma tünelleridir. Çünkü demiryolu kullanımıyla beraber birçok dalda (madencilik, ticaret, askeri vb.) ilerleme kaydedilmiştir. Tek hatlı demiryollarında 4,5 - 6 m genişlikte, çift hatlı demiryollarında ise 8 - 9 metrelik bir genişlikte açılırlar (Şekil 2.3). Demiryolu tünelleri dağlık arazilere, nehir, su kanalları ve boğaz altlarında inşa edilebilir (Emiroğlu, 2010: 16).



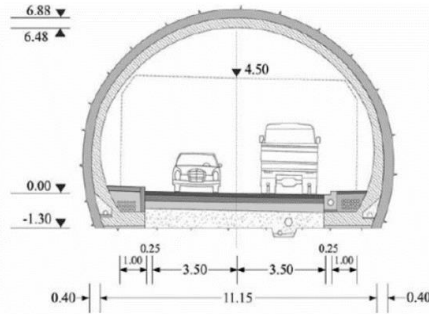
Şekil 2. 3. Demiryolu tünelleri en kesit şekilleri

Kaynak: (Öztürk ve Durmuş, 2008:12)

2.2.1.2. Karayolu Tünelleri

Karayolu tünelleri, çoğunlukla yanlarında 1'er metrelik iki yaya yoluna sahip 6 m'lik otoyollardan oluşur. Kemer yüksekliği 4,30 metreden az olmamakla birlikte genellikle 5-6 metredir. (Şekil 2.4).

Tüneller genel olarak tam elips, sepet kulpu veya kemer şeklinde olurlar. Eğer tünel satha çok yakın ise o zaman betonarme döşemeli dikdörtgen kesit tercih edilmektedir. (Osmanoğlu, 2007:4).



Şekil 2. 4. Karayolu tüneli en kesit şekli

Kaynak: (Öztürk, 2007:7)

2.2.1.3. Metro Tünelleri

Şehir içerisindeki trafik yoğunluğunu azaltmak amacıyla metro tünelleri ihtiyaç haline gelmiştir. Demiryolu tünellerinden boyutları ile ayrılırlar (Şekil 2.5). Ayrıca diğer ulaşım yollarından farklı kotlarda konumlandırılırlar. En önemli özellikleri, hızlı ve yüksek sayıda insan taşıyabilmeleriyle birlikte sefer aralıklarının az olmasıdır. Sefer aralıkları için tavsiye 10 dakikadır.

Metro kelimesi ‘metropolitan’ veya ‘metropolis’ kelimelerinin kısaltılmış halidir. Dünyada genellikle metro denmektedir (Emiroğlu, 2010: 16).



Şekil 2. 5. Ankara metro tüneli

Kaynak: (TRT Haber, 2018)

2.2.1.4. Yaya Tünelleri

Trafik yoğunluğunun fazla olduğu yerlerde küçük kesimli eğimi fazla olan tünellerdir. Yaya tünelleri yaya trafiği olmaması için genişliği 3 m’den, yüksekliği 2.50 m’den daha küçük olmamalıdır. Daire veya dikdörtgen olarak tasarlanabilir (Şekil 2.6) (Emiroğlu, 2010: 16).



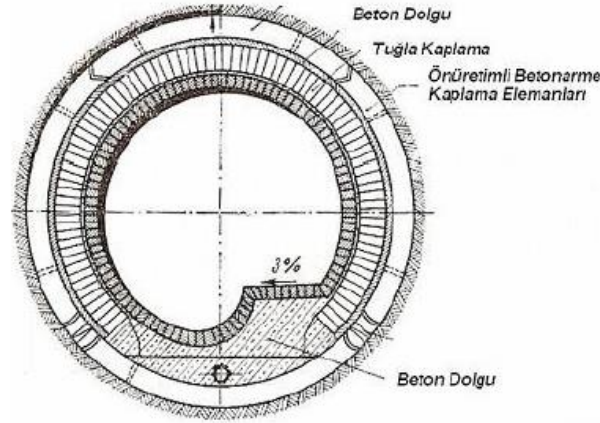
Şekil 2. 6. Amsterdam yaya ve bisikletli tüneli

Kaynak: (Yeşilodak, 2019)

2.2.2. Hizmet Tünelleri

2.2.2.1. Kanalizasyon Tünelleri

Atık suların arıtma tesislerine ulaştırılmasında kanalizasyon tünelleri kullanılmaktadır. Bu tünellerde iç yalıtım çok önemlidir. Çünkü atık suların içinde bulunan kimyasallar, tünel duvarlarına zarar verebilirler ve sızıntılara yol açabilirler. Bu yüzden tünel duvarlarında aside karşı dayanım kazandıran kimyasal maddeler karıştırılmış tuğla kullanılmaktadır (Şekil 2.7) (Emiroğlu, 2010: 15).

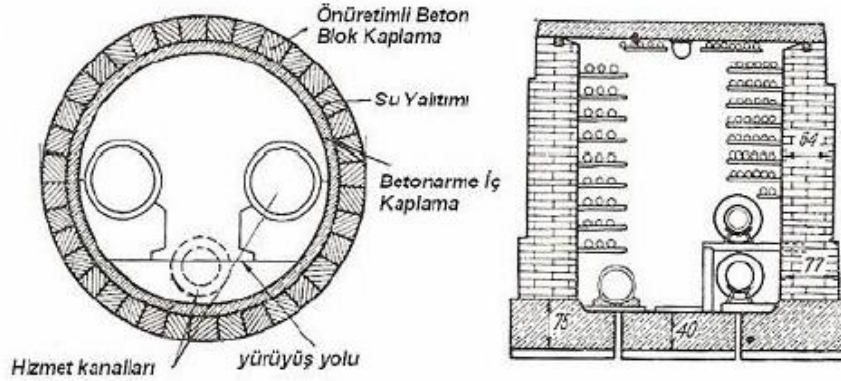


Şekil 2. 7. Kanalizasyon tüneli en kesit şekli

Kaynak: (Öztürk, 2007:9)

2.2.2.2. Alt Yapı Tünelleri

Alt yapı tünelleri enerji, gaz, su, telefon kabloları ve diğer kabloların yerleştirilmesi gibi kamu hizmetlerinin sağlanması için yapılır (Şekil 2.8). Boyutları genellikle yaya tünelleri kadardır. Farkı, eğimi çok olan giriş rampası yerine düşey shaftlar kullanılmasıdır (Emiroğlu, 2010: 15).



Şekil 2. 8. Gaz ve elektrik tünelleri en kesit şekilleri

Kaynak: (Öztürk, 2007:9)

2.2.2.3. Enerji ve Su Tünelleri

Barajlarda toplanan suyun tribün merkezine aktararak hidroelektrik enerji üretmek amacıyla inşa edilen tünellerdir. Tünelin içerisinde büyük su basıncı oluşur. Dairesel veya at nalı kesitli tünellerin tercih edilmesi daha uygun olmaktadır (Emiroğlu, 2010: 15).

2.3. Güzergâh Seçimi

Tünel güzergâhını seçerken en önemli kriter, bir sorun yaratmaması durumunda tünel ekseninin tek yönde ve doğrultuda olmasını sağlamaktır. Tünel güzergâhı seçerken dikkat edilecek hususları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

1) Geoteknik raporlarının incelenmesi sonucunda, zemin iyileştirmesi gereken zeminlerden, çalışma süresi ve maliyeti arttıracak durumlardan olabildiğince kaçınılmalıdır.

2) Tünel yapılacak yerin giriş ve çıkış kısımları, bir engel olmadığı sürece yerlerini değiştirerek sağlam kayaya denk getirilmelidir.

3) Tünel eksenlerinin fay bölgelerindeki kırılmalara dik doğrultuda yapılması sağlanmalıdır.

4) Özellikle sıcaklığı, basıncı ve debisi yüksek olarak çıkan suların bulunduğu zeminlerden mümkün olduğunca kaçınılmalıdır.

5) Uzun sürecek tünel projeleri için olabildiğince şantiye sayısının arttırmak işin süresini azaltacağından tünel inşaatı için gerekli olan kuyular güzergaha yakın yerlere açılmalıdır.

6) Güzergah üzerinde bulunan vadilerin geçilebilmesi için köprü veya viyadükler kullanılmalıdır.

7) Doğrusal olmayan tüneller olabildiğince büyük yarıçaplı yaylı tasarlanmalıdır (Öztürk, 2007:15-16).

8) Şehir içinden geçecek tünellerin zemin yüzeyine yakın olması durumunda yapılara zarar vereceğinden güzergah yolların altından geçirilmelidir.

9) Su yollarının altından geçişte gemi gabarilerine dikkat ederek güzergah hesaplamaları yapılmalıdır (Öztürk, 2007: 17).

2.4. Tünel Açma Yöntemleri

2.4.1. Alman Tünel Açma Yöntemi

Bu yöntemde kesitin sağında ve solunda birer adet toplamda iki adet yan ayak galerisi yapılmaktadır. Yan ayak galerilerinden sonra tavan galerisi kazısına başlanmaktadır. Bu işlemler sırasında büyük deformasyonların önüne geçilmesi için çekirdek bölümde ahşap elemanlar kullanılmaktadır. Önce tavan kazısı ve kaplaması tamamlanır, son olarak çekirdek

kısım da açılıp kaplaması yerleştirilerek tünel tamamlanmaktadır. Çalışma alanlarının çok dar olması zaman kaybının fazla olmasına neden olur. Bu durum Alman Yönteminin en negatif özelliğidir. Yan galerilerin açılması sırasında zemin özelliklerinin bilinmesi ve buna uygun çalışması ise en yararlı özelliklerindedir (Polat, 2010: 11).

2.4.2. Eski Avusturya Yöntemi

Tercih edilen tünel tipi kısa ve geniş olanlardır. Yukarıdan aşağıya doğru olan kazı yönüne uygun tavan ve tabanlarda galeriler açılmaktadır. Tüm kesit kazısı bittikten sonra kaplama işlemine geçilir. Maaliyeti arttıran taş duvar kullanılması nedeniyle fazla tercih edilmemektedir (Polat, 2010: 13).

2.4.3. İngiliz Tünel Açma Yöntemi

Diğer yöntemlerden farklı olarak kazı işlemine ortadan başlanılmaktadır. Orta kısım açıldıktan sonra bu kısımlara ahşap destek konulmaktadır. Kazı ilerledikçe destekler arttırılarak tünel açma işlemi devam etmektedir. Ahşap desteklerin kullanılmasıyla beraber ekonomikleşen bu yöntem birçok zemin tipinde uygulanabildiği için çok tercih edilmektedir (Saticı ve Topal, 2015: 48).

2.4.4. Amerikan ve İtalyan Tünel Açma Yöntemleri

Bu yöntemlerde büyük kesitlerde kazı yaparak ilerlenmektedir. Tünel stabilitesini sağlamak açısından kazı boşluk hemen doldurulmaktadır (Saticı ve Topal, 2015: 48).

2.4.5. Belçika Yöntemi

Bu yöntemde ilk olarak tavan galerisi ve sonrasında tavan kaplaması uygulaması gerçekleştirilmektedir. Tavan kısa sürede kaplandığından basınç dengesi korunmaktadır. Tavan taban kaplamalarının çabuk yapılmasının gerekmesi dar çalışma alanlarında işi zorlaştırmaktadır (Polat, 2010: 12).

2.4.6. Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu

Günümüzde çok yaygın kullanılan bu yöntem Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) kaya ortamına kendisini taşıması prensibi ile çalışır. Tünel etrafını saran zeminin ilk sağlamlığını koruyarak uygulanması amaçlanmıştır. Bu sayede zemin boşluğu çevreleyen yük değil yük taşıyan bir duruma geçmektedir. Bu yöntem ile tünelciliğe yeni bir bakış açısı gelmiştir. Bu nedenler diğer yöntemler ile bir benzerlik göstermemektedir.

NATM'nin Leopold Müller tarafından geliştirilen 22 prensipli bir uygulamadır. Bu metotta kazı şekli ne kadar yuvarlak seçilirse o kadar iyi sonuçlar elde edilir. Ülkemizde yapılan

birçok tünelde NATM metodu kullanılmaktadır. NATM tahkimat elemanları iksa, püskürtme beton ve kaya bulonlarından oluşmaktadır (Polat, 2010: 14).

2.4.7. ADECO-RS Metodu

Türkçeye “Kaya ve Zeminlerde Kontrollü Deformasyon Analizi” şeklinde çevrilen bu yöntem Lunardi tarafından ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde tünelin aşamalı kazılması uygulanmıştır. Lunardi’ye göre ayna mutlaka desteklenmelidir. Kazı ayna davranışı sıkışan zeminlerde tünel kazısı için önemlidir. Deformasyonlar bir kere başlarsa duramayacağı için deformasyon başlamadan destekleme yapılması bu yöntemle önerilmektedir (Saticı ve Topal, 2015: 49-50).

2.5. Tünel Uygulamaları İnşa Yöntemleri

İnşaat teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak tünel uygulama yöntemleri de gelişmektedir. Günümüzde tünel uygulamaları, kullanılan inşaat yöntemleri açısından dört grup halinde incelenebilir. Bu gruplar;

- Aç-kapa metotla inşa edilen tüneller,
- Klasik metotla inşa edilen tüneller
- TBM Tünel Delme Makinesi ile inşa edilen tüneller
- Batırma Tünel yöntemi olarak sıralanabilirler (Ünlütepe ve Messing, 2005: 149).

2.5.1. Aç-Kapa Metotla Tünel Yapımı

Sığ tüneller için bu metot kullanılır. İlk olarak tünel kazısı yapılır ve sonrasında kaplama yerleştirilerek tünel tamamlanır (Arkoç, 2017).

2.5.2. Klasik Metotlarla Tünel Yapımı

(NATM) “Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu” en yaygın kullanılan yöntemdir. Zemin etütleri sayesinde tünel inşaat detayları belirlenmektedir. Uygulama sırasında yapılan gözlemler ile uygulamaya uygun kazı destekleri ve inşa tipi yeniden gözden geçirilerek uygun hale getirilir. Bunlar sayesinde tünel en emliyetli şekilde inşa edilmektedir (Ünlütepe ve Messing, 2005: 150).

2.5.3. TBM Tünel İnşa Metodu

TBM (Tunnel Digging Machine) metodu ile inşa edilmesi düşünülen silindirik şema TBM makineleri ile uygulanmaktadır.

Bu makine ile zemin koşullarına göre kazıcı kafa malzemeyi dışarı atmaktadır. Makinenin formu sayesinde kazılan zeminin stabilitesi korunmaktadır. Makine ilerledikçe

stabilitenin korunması için çok sayıda pistonlar aynaya basınç uygulamaktadır. Lojistik lokomotifler ile segment parçaları makinanın erektör sistemi ile kazısı tamamlanan bölümde yerleştirilmektedir (Ünlütepe ve Messing, 2005: 153-154).

2.5.4. Batırma Metoduyla Tünel Yapımı

Tersanede üretilen birçok eleman kullanılarak uygulanan bir yöntemdir. Bu elemanlar kanalın içine batırılır ve tünelin bitmiş haline göre bağlanmaktadır. Yüzer yapılan olarak inşa edilen batırma tüneller örtü tabakaları ile kaplanmıştır. İnşası biten tünellerin yüzmelerinin engellenmesi için yeteri kadar ağırlık eklenmelidir. Bu tüneller 100 m uzunluğunda prefabrike olarak üretilen parçalar ile oluşmaktadır. Elemanların uç kısımlarına geçici setler bulunmakta ve bu sayede kuruyken yüzmeleri sağlanmaktadır. Elemanlar gemiler ile denize eklenmekte ve sonrasında montajları sağlanmaktadır (Rayhaber, 2013)

2.6. Tünelcilikte Zemin İyileştirilmesi

2.6.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri

Tünel uygulamalarında zemin iyileştirilmenin amacı, kazı programının sorunsuz ve güvenli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktır. Tünelcilikte zemin iyileştirme uygulamaları genellikle aşağıdakilerden bir ya da birkaçı ile beraber ele alınır:

- Zemin suyu seviyesinin drenaj ile düşürülmesi
- Tünel su akmasının basınçlı hava ile engellenmesi
- Enjeksiyon ya da dondurma yöntemi ile zemin stabilizasyonu

Zemin iyileştirmesinde zemin suyunu kontrol etmeye yarayan yöntemler:

- Well-point yöntemi ile seviye düşürme
- Elektro osmoz
- Zeminin Dondurulması
- Enjeksiyon

Zemin iyileştirme yöntemleri genellikle çok pahalı uygulamalardır. Bu nedenle öncelikle güzergah değişimi yoluna başvurulur. İyileştirme yöntemleri uygulandığı alandaki duruma bağlı olarak yüzeyden ve aynadan yapıldığı gibi tünel boyunca veya kısa parçalar içinde yapılabilir. Tünelciliğin, zemin iyileştirme yönteminin seçimi ilk olarak arazi araştırmaları ve zemin altı koşulları içeren durumlarda yapılmış test sonuçlarına dayandırılır (Osmanoğlu, 2007: 50-51).

2.6.2. Yeraltı Su Seviyesini Düşürme

Yeraltı su seviyesini düşürme yöntemi tünel açma işlemi başlamadan önce kullanılan en ekonomik su kontrol yöntemidir. Bu yöntem uygulanacak tünelin her iki tarafında açılan sondaj deliklerinden suyun yüzeysel veya dalgıç pompalar ile çekilip su seviyesinin yapay olarak düşürülmesini içermektedir. Bu işlemin esas amacı tünel güzergâhı boyunca etkili olan su basıncının pikini düşürmek ya da yok etmektir (Osmanoğlu, 2007: 53).

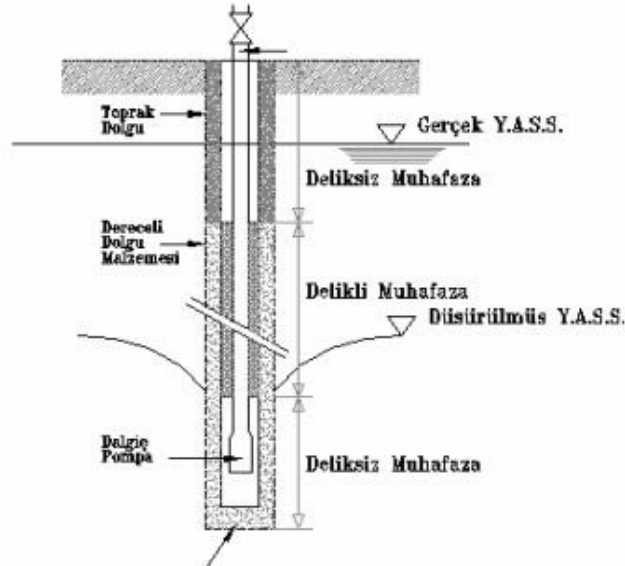
Hangi çeşit ve kapasitede pompa kullanılması gerektiği tünel derinliğine, suyun düşürülmek istenen seviyesine ve zemin permeabilitesine göre değişiklik gösterir. Yüzeysel pompaların kullanım alanı, dalgıç pompalarla karşılaştırıldığında düşük emişli başlıklardan dolayı daha kısıtlıdır. Bu yüzden dalgıç pompaların maliyeti yüksektir (Osmanoğlu, 2007: 53).

2.6.2.1. Yüzeysel Pompalama

Yüzeysel pompalar, kumlu ve çakıllı zeminlerde 5–6 m derinlikte çalışma yapmak için uygundur. Aç-kap tünel uygulamaları için daha uygun bir yöntemdir (Osmanoğlu, 2007: 53-54).

2.6.2.2. Derin Kuyular

Dalgıç pompaları yüzeysel pompalamaya göre daha büyük derinliklerde zemin suyu seviyesinin düşürülmesine olanak sağlar. Dalgıç pompaların tünelcilikte kullanım sahası daha geniştir. Derin kuyu kesiti Şekil 2.9 de gösterilmiştir (Osmanoğlu, 2007: 54).



Şekil 2. 9. Derin kuyu kesiti

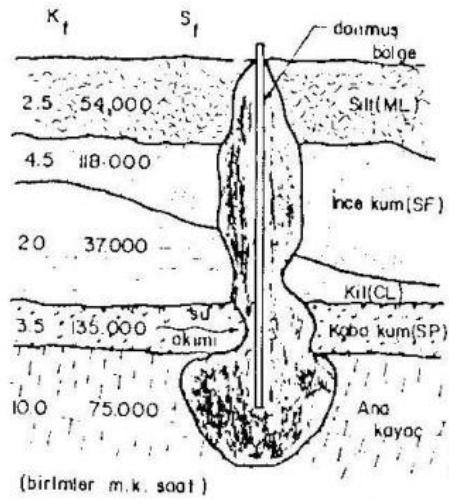
Kaynak: (Osmanoğlu, 2007: 54)

2.6.3. Elektro-Osmoz

Drenajı ve konsolidasyonu sağlamak amacıyla kullanılan Elektro-Osmoz, ince daneli zeminlerde kullanılmaktadır. Bu yöntemin amacı zemin deformasyon ve mukavemeti iyileştirmektir. siltli zeminlerin drenajı ve konsolidasyonu için uygulanan bir metottur. Siltli ve siltli kil gibi ince daneli zeminlere doğru akım uygulandığında boşluk suyunun anottan (+) katota (-) doğru hareket ettirilmesine elektro-osmoz denir (Ayan, 2009: 38).

2.6.4. Zemin Dondurulması

Dondurma metodu geçici olarak kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Akma ve göçme eğiliminde olan zeminleri bir süreliğine dondurarak kullanılan bir iyileştirme yöntemidir. Böylece zemin boşluklarında bulunan buzun katılığı, zeminin katılığı ve kayma mukavemeti artırılmış olur (Şekil 2.10). Hareketli zemin suyunun olduğu zeminlerde bu yöntem kullanılmamaktadır (Ayan, 2009: 42).

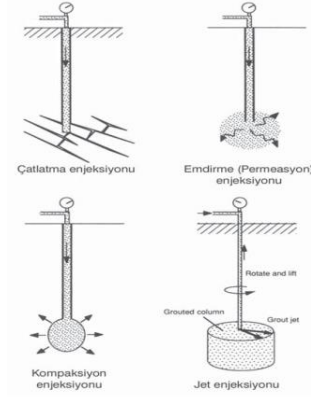


Şekil 2.10. Hareketli yeraltı suyunun donmaya etkisi

Kaynak: (Ayan, 2009: 43)

2.6.5. Enjeksiyon Teknikleri

Akışkan malzemelerin boşluklara enjekte edilmesiyle uygulanan bir yöntemdir. Bu uygulamada amaç zeminin gerilme-deformasyon ve dayanım gibi mekanik özellikleri ile geçirimsizlik gibi mühendislik özellikleri değiştirilerek zeminin iyileştirilmesidir (Şekil 2.11) (Tunçdemir, 2004: 60).



Şekil 2. 11. Enjeksiyon tekniklerinin şematik gösterimi

Kaynak: (Osmanoğlu, 2007: 67)

2.6.5.1. Permeasyon (Sızdırma-Emdirme) Enjeksiyonu

Enjeksiyonun düşük basınç ile verildiği bu yöntemde zemin hacmi ve yapısında değişiklik olmamaktadır. Enjeksiyon malzemesi zamanla sertleşerek zeminin mekanik ve hidrojeolojik özelliklerini değiştirmektedir. Yeni çimento karışımları üzerinde çalışmalar yapılarak normal portland çimentoları ile permeasyonu mümkün olmayan zeminler enjekte edilebilmeye başlanmıştır. Bu sayede daha ince daneli zeminlerin de iyileştirilmesi mümkün olmuş ve hem çevresel koruma hem de ekonomik açıdan olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Tunçdemir, 2004: 60).

2.6.5.2. Kompaksiyon Enjeksiyonu

1980 yılında toplanan ASCE Enjeksiyon Komitesi, kompaksiyon enjeksiyonunu 25 mm'den daha az çökme değeri olan kumlarda zemini sıkıştırarak yüksek basınçta enjeksiyon uygulamasıdır. Kompaksiyon enjeksiyonunda çok katı bir enjeksiyon malzemesi ve çok yüksek basınçlar (3.5 MPa'a kadar) gerekmektedir. Bu nedenle zeminin orijinal yapısı bozulmaktadır. Zemin dane çapına bağlı olarak permeasyon enjeksiyon malzemeleri belirlenmektedir. Bunun yanı sıra kompaksiyon enjeksiyonu her zemin için aynıdır (Tunçdemir, 2004: 62).

2.6.5.3. Çatlama Enjeksiyonu

Çatlama enjeksiyonu diğer enjeksiyon tekniklerine göre daha yenidir. Bu uygulamada zemin vizkoziteli çimento enjeksiyonu ile yüksek basınçlarda (4 MPa) çatlattılması söz konusudur. Bu uygulama genellikle düşük geçirimsizliğe sahip, ince daneli zeminlerin stabilizasyonunda uygulanmaktadır. Tünel kazı esnasında meydana gelen oturmaları önemeye yönelik bir uygulamadır. Çatlama enjeksiyonu ile ağaç dallarına benzer şekilde çimento

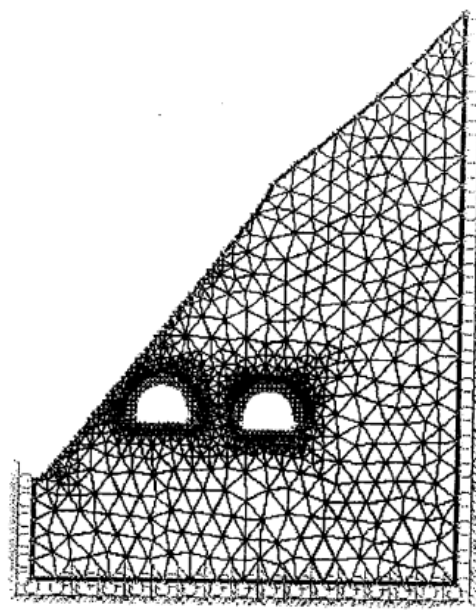
kanalları oluşarak zemin kontrollü bir şekilde ve bölgesel olarak sıkıştırılmaktadır (Tunçdemir, 2004: 63).

2.6.5.4. Jet-Grouting

Su kullanılarak enjeksiyon yapılan bu enjeksiyon türünde delgi için kullanılan tijlerin ucundan çimento şerbeti zemine doldurulmaktadır. Bu sırada tijler belirli hızla dönerek karıştırma tekniği uygulanmaktadır. Bunun sonucunda yüksek dayanımlı ve geçirimsizliği düşük kolonlar elde edilmekte ve bu yönüyle diğer tüm enjeksiyon türlerinden ayrılmaktadır. Ülkemizde de yaygın olarak kullanılan jet enjeksiyonunun, bir zemin iyileştirme tekniği olarak dünyanın birçok bölgesinde, özellikle de Japonya, Avrupa ve ABD’de uygulanıyor olmasına rağmen halen bir tasarım standardı bulunmamaktadır (Tunçdemir, 2004: 63-64).

3. LİTERATÜR

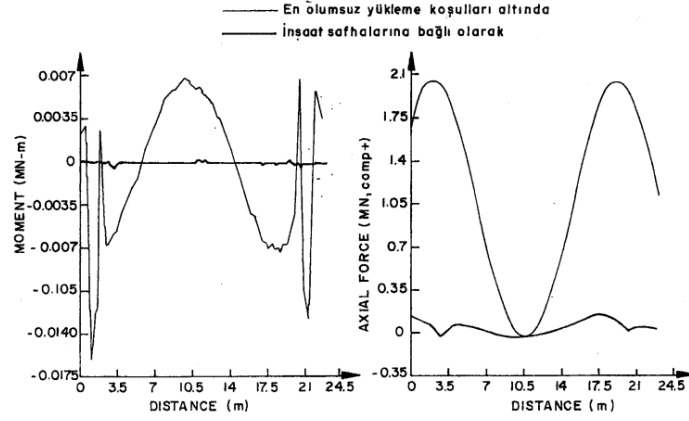
Bakır, Tutluoğlu ve diğerleri (1998), çalışmalarında Çayeli-Ardeşen-Hopa devlet yolunda bulunan Çayeli tünelinin sonlu elemanlar metodu kullanılarak PHASE2 ile analizini yapmışlardır (şekil 3.1).



şekil 3. 1. Çayeli tüneli 152+240 lokasyonu analizlerinde kullanılan sonlu elemanlar ağı

Kaynak: (Bakır vd, 1998:368)

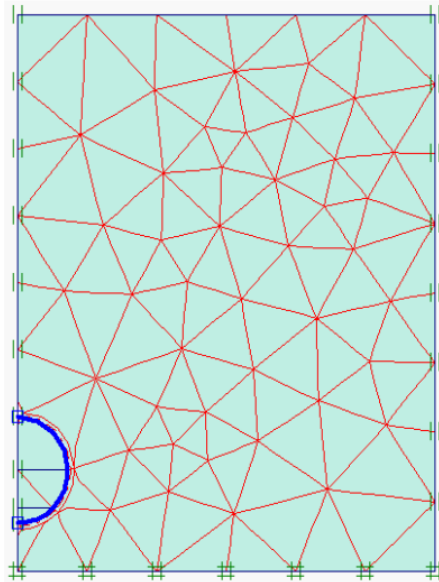
152+240 lokasyonunda olan püskürtme betonlu kesit için en olumsuz şartları göz önüne alarak uygulama yapılmıştır. Birçok kaya mekaniği deneyleri yapılarak sonuçlarının ortalama değerleri kullanılmıştır. Zemin araştırmaları sonucunda kazıda ilerleme ve destek sistemlerine karar verilmiştir. Lokal bulonlama ve 10 cm püskürtme betonun uygun olabileceği varsayılmıştır. Bazı bölümlerde tavan ve yan duvara hasır elik uygulaması öngörölmüştür. En olumsuz ve inşaat safhalarındaki etkileri görebilmek için öncelikle tünel olmadığı durum için modelleme yapılmıştır. Püskürtme betonunun en olumsuz etkisini görebilmek için tünel tam olarak açılıp püskürtme beton eklenmiştir. İnşaat safhalarına bağlı ve en olumsuz durum için analiz yapılıp karşılaştırıldığında inşaat safhalarına uygun olarak modellendiğinde kaplamadaki normal kuvvetler ve momentlerin düşük kaldığı ve güvenlik kat sayısının 2.5 kat arttığı görölmüştür (şekil 3.2). İnşaat safhalarına göre yapılan modellemeler, yüksek maliyetli yapılar için ekonomi ve güvenlik arasındaki dengeyi sağlayabilen bir çözümdür (Bakır vd, 1998: 366-371).



Şekil 3. 2. Püskürtme beton kaplama üzerinde etkiyen moment ve nomal kuvvet dağılımı

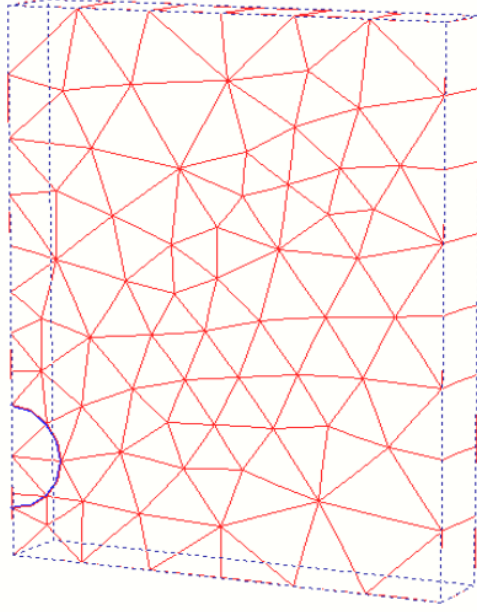
Kaynak: (Bakır vd, 1998:371)

Ak (2005) çalışmasında kazı çapı 9 metre olan silindirik bir tünel için iç ve dış basınçlı yükleme sonuçları karşılaştırmıştır. Bu tünelde geçici destek sistemi olarak püskürtme beton kalıcı olarak da beton kaplama kullanılmıştır. Ak çalışmasında 2 ve 3 boyutlu plaxis programını kullanmıştır (Şekil 3.3), (Şekil 3.4). Einstein ve Schwartz tarafından “Dış Yükleme Koşulu” tanımlanan yükleme biçimine uygun olarak yapıya etkiyen dış yükü tanımlamıştır. Analizde dış yükleme için yeraltı suyunun yokluğunu kabul etmiştir. 2 ve 3 boyutlu modellerde oluşan maksimum deplasmanları karşılaştırmıştır (Ak, 2005: 23).



Şekil 3. 3. İki boyutlu analizlerde kullanılan model

Kaynak: (Ak, 2005: 26)



Şekil 3. 4. Üç boyutlu analizlerde kullanılan model

Kaynak: (Ak, 2005: 27)

Eksenel ve eğilme momentlerine bakıldığında 2 ve 3 boyutluda benzer sonuçlar elde ettiğini görmüştür. Modele 40 cm beton kaplaması tanımlanmış ve en yüksek 40 kPa su basıncı sağlayacak şekilde iç basınç yüklemesi yapılmıştır. Bu modelde destek elemanları eklenip sonradan iç yükleme yapılmıştır. Yükleme sonrasında maksimum toplam ve düşey deplasman tünelin taç bölgesinde, yatay deplasman üzengi bölgesinde olduğu tespit edilmiştir. 2 ve 3 boyutlu program sonuçlar analiz edilmiştir. İç yükleme altında eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti incelendiğinde eksenel kuvvet ve eğilme momentinin önemli ölçüde arttığı gösterilmiştir. (Ak, 2005: 39).

Ak, yaptığı çalışma sonucunda incelediği modellemelerden kazılan malzeme özelliklerine, kazının kaç kademede gerçekleştiğine, geçici destek sisteminin sonuç üzerindeki etkisine, rijit destek sistemi üzerinde etkisine bağlı olduğu sonucuna varmıştır. Aynı zamanda dış yüklemde yatay deplasmanlar tünelin eksenine doğruyken, iç yüklemde tam tersi yönde olduğunu görmüştür. İç yüklemde destek sistemindeki kuvvette önemli artış olduğu görülmüştür. Dış yüklü modelleme sonuçları doğrultusunda tünelin kazı yüzeyi geçici destekleme elemanlarıyla desteklenmeli ve kazı kademeli olarak gerçekleşmeli sonucuna varmıştır. İç yüklemeli model sonucuna göre 40 cm kaplama betonun yeterli olduğu görülmüştür (Şekil 3.5), (Şekil 3.6). (Ak, 2005: 56-57).

Tablo 3. 1. Analizler sonucu dış yüklü model için elde edilen en büyük deplasmanlar

Deplasman tipi	Değer	
	2-Boyutlu	3-Boyutlu
Toplam deplasman (mm)	5,17	5,13
Yatay deplasman (mm)	-0,688	-0,685
Düşey deplasman (mm)	-5,17	-5,13

Kaynak: (Osmanoğlu, 2007:110)

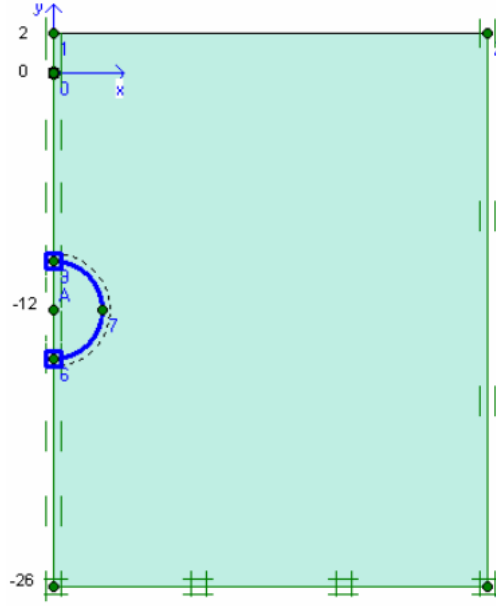
Tablo 3. 2 Analizler sonucu iç yüklü model için elde edilen en büyük deplasmanlar

Deplasman	Değer	
	2-Boyutlu	3-Boyutlu
Toplam Deplasman (mm)	2,05	2,04
Yatay Deplasman (mm)	0,860	0,861
Düşey Deplasman (mm)	-2,05	-2,04

Kaynak: (Osmanoğlu, 2007:110)

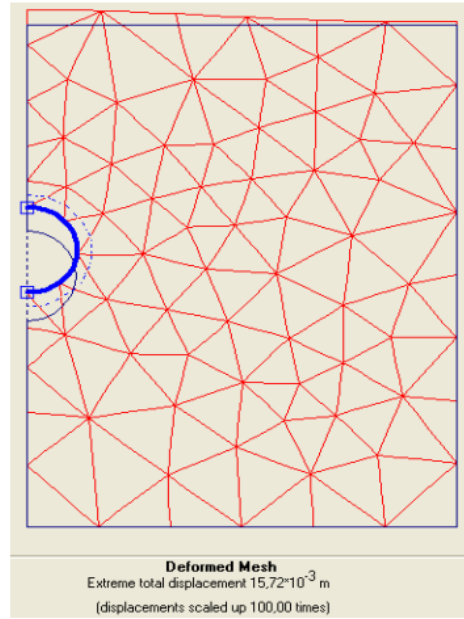
Osmanoğlu (2007) yaptığı çalışmada tüneller ile ilgili kapsamlı bilgi verip, tünellerin geçtiği bölgeler üzerindeki yapılaşma çalışmalarının etkisi sonlu eleman programlarından biri olan Plaxis 2D ile incelenmiştir. Osmanoğlu bu çalışmada 6 farklı durumu ele almıştır:

1.Şekil 3.5 de gösterilen türü kil ve -2 kotunda YASS bulunan bir zemin içindeki 2,5 metre yarıçaplı tünel durumu, Şekil 3.6' de de deformasyon sonucu verilmiştir (Osmanoğlu, 2007: 78).



Şekil 3. 5. Birinci çalışma model

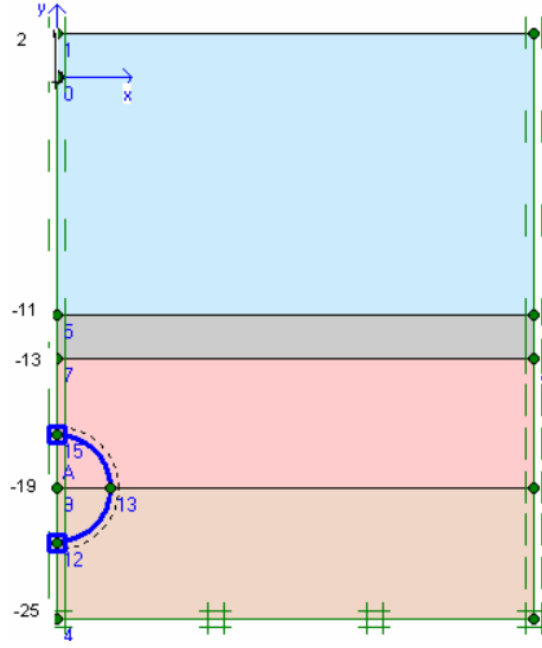
Kaynak: (Osmanoğlu, 2007:78-83)



Şekil 3. 6. Birinci çalışma toplam deformasyonu

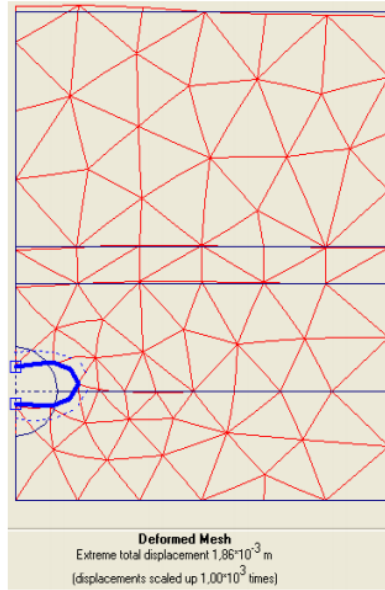
Kaynak: (Osmanoğlu, 2007:78-83)

2. 13 metre kil 1,2 metre kum 1,6 metre kil 2,6 metre kum şeklinde 2 zemin türü mevcut olan ve YASS –2 kotunda olan bir zeminde 2,5 metre çaplı tünel durumu (Şekil 3.7), ve deformasyon sonucu (Şekil 3. 8) verilmişti. (Osmanoğlu, 2007: 87).



Şekil 3. 7. İkinci çalışma model ve toplam deformasyonu

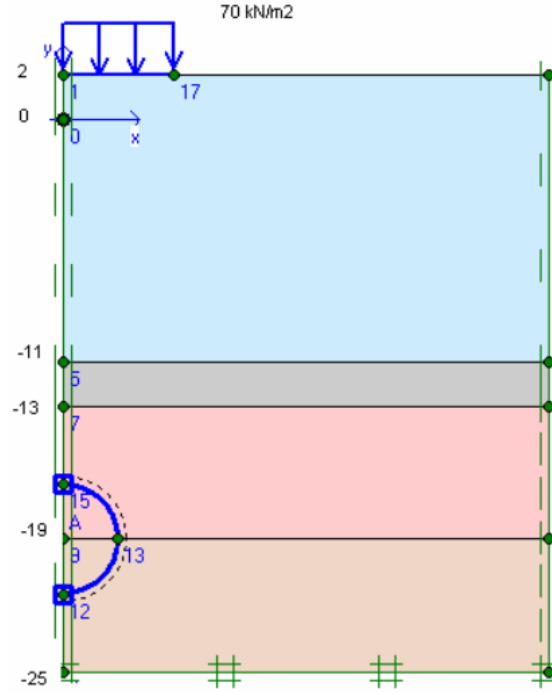
Kaynak: (Osmanoğlu, 2007:87-92)



Şekil 3. 8 İkinci çalışma model ve toplam deformasyonu.

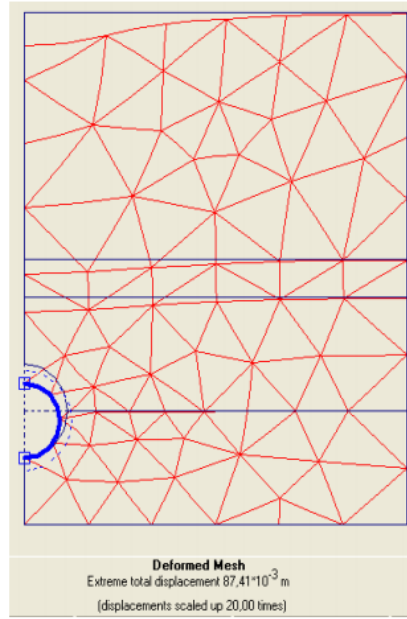
Kaynak: (Osmanoğlu, 2007:87-92)

3. 2. Modeline 70 kN/m^2 bina yükü eklemiş haldeki tünel durumu (Şekil 3.9), ve deformasyon sonucu (Şekil 3.10) verilmiştir (Osmanoğlu, 2007:96).



Şekil 3. 9. Üçüncü çalışma model ve toplam deformasyonu

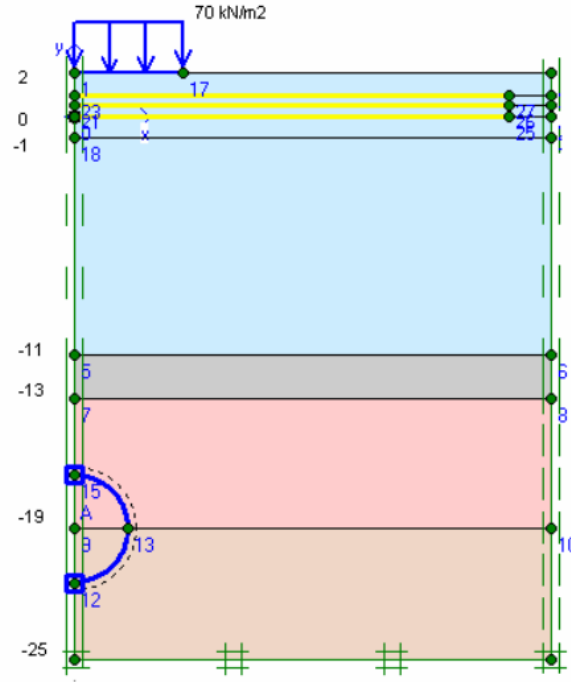
Kaynak: (Osmanoğlu, 2007:97-98)



Şekil 3. 10. Üçüncü çalışma model ve toplam deformasyonu

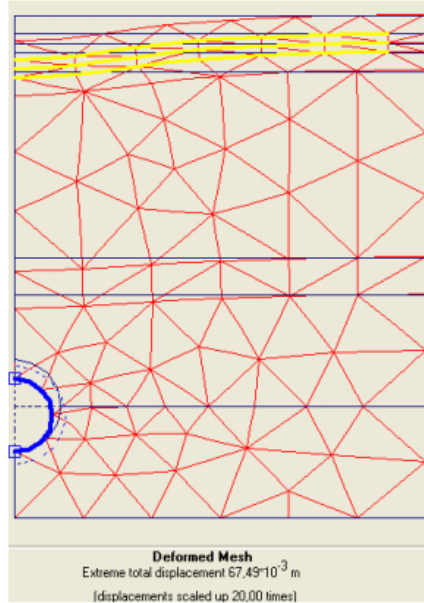
Kaynak: (Osmanoğlu, 2007: 97-98)

4. Zemin yüzeyindeki deformasyonu küçültmek için bina ve tünel arasında 50 cm ara ile 3 sıra geogrid kullanılan durum (Şekil 3.11). Şekil 3.12' de deformasyon sonucu verilmiştir. (Osmanoğlu, 2007:101).



Şekil 3.11. Dördüncü çalışma model ve toplam deformasyonu

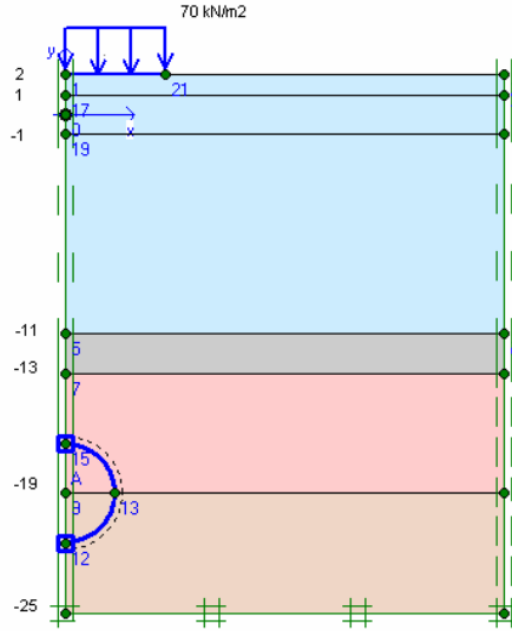
Kaynak: (Osmanoğlu, 2007:101-103)



Şekil 3.12. Dördüncü çalışma model ve toplam deformasyonu

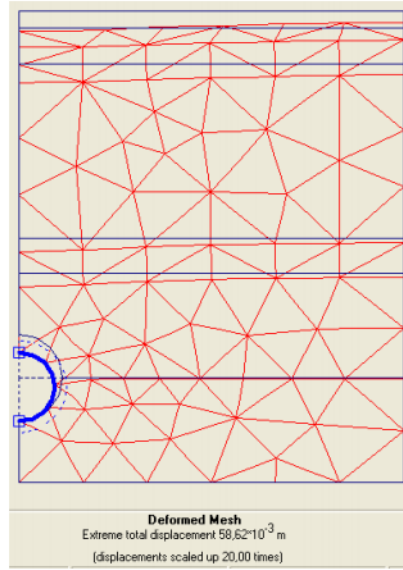
Kaynak: (Osmanoğlu, 2007: 101-103)

5. Geogrid yerine 2 metre kalınlığında zemin enjeksiyonu yapılan durum (Şekil 3.13). Şekil 3.14' da deformasyon sonucu verilmiştir. (Osmanoğlu, 2007:105).



Şekil 3. 13. Beşinci çalışma model ve toplam deformasyonu

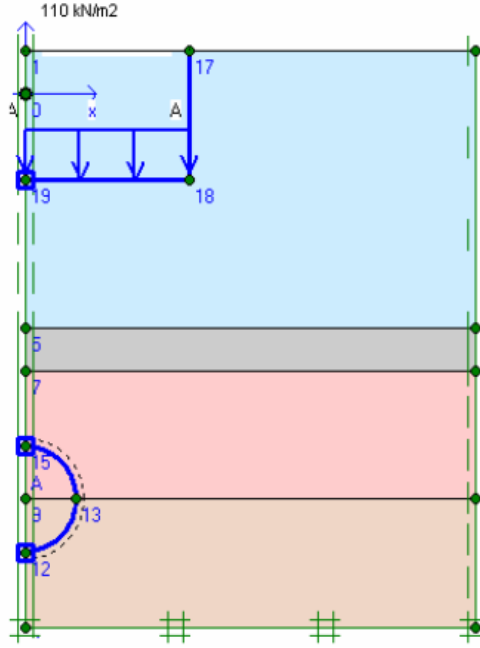
Kaynak: (Osmanoğlu, 2007: 105-107)



Şekil 3. 14. Beşinci çalışma model ve toplam deformasyonu

Kaynak: (Osmanoğlu, 2007: 105-107)

6. 110 kN/m² yüke sahip iki kat bodrumlu binanın zemin ve tünele etkisi durumu Şekil 3.15' de verilmiştir (Osmanoğlu, 2007:109).

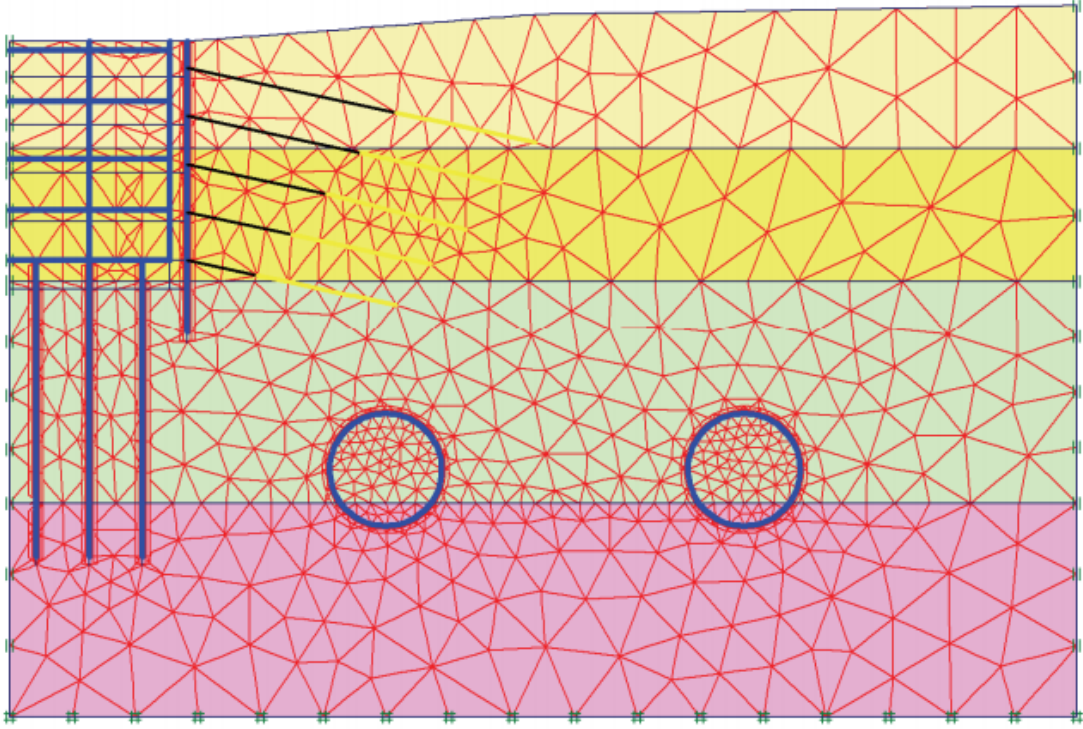


Şekil 3. 15. Altıncı çalışma modeli

Kaynak: (Osmanoğlu, 2007: 109)

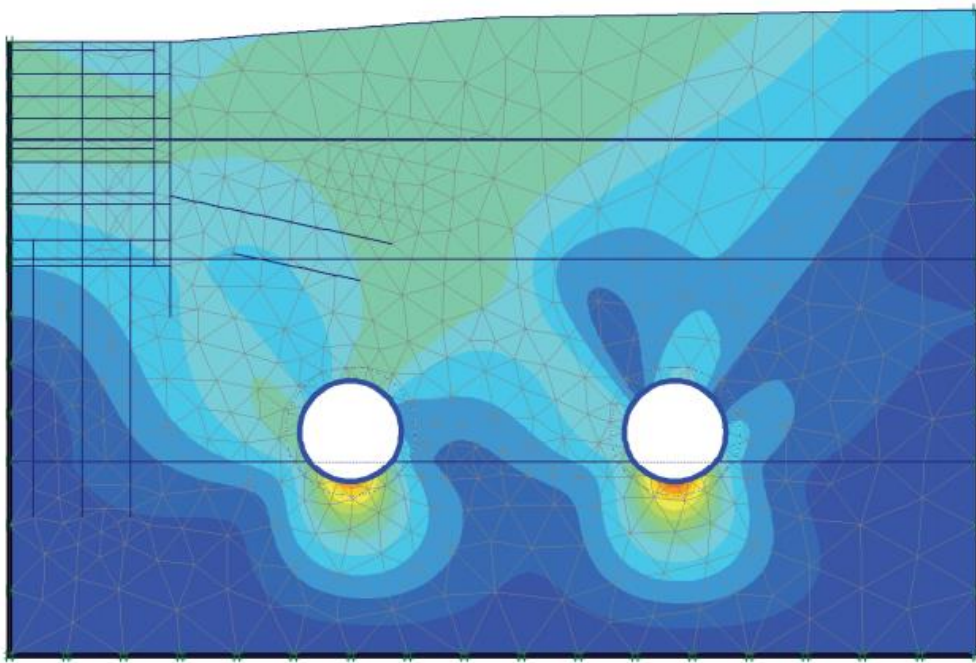
Bu durumların sonuçları karşılaştırıldığında bina yükü uygulanmadan önce yapılan iyileştirme çalışmalarının zemin yüzeyinde oluşabilecek deformasyonları daha küçük değerlere indirdiği görülmüştür. Bunun yanı sıra bu iyileştirmeler tünel kaplamasında fazla etki yaratmamıştır. Yapılan iyileştirmeler karşılaştırıldığında zemin enjeksiyonunun geogrid uygulamasından daha etkili olduğu görülmüştür (Osmanoğlu, 2007: 116-117).

Berilgen, Özaydın ve diğerleri (2009), yaptıkları çalışmalarda Maltepe’de inşa edilecek konutların yapımı planlanan temel kazısının en yakın konumda olan metro tünellerinde oluşabilecek etkiler ve iksa sistemi incelenmiştir. Bu çalışmada Plaxis V9,2 programı kullanılmıştır (Şekil 3.16). İnşa edilecek konut temel kazısı 14 metre derinlikte temel kazısı planlanmıştır. Temel kazısı ile metro tüneli arasında minimum 8 metre kalmaktadır. Temel kazısında destek amacıyla fore kazıklar ve ankrajlar uygulanmıştır. Mevcut durumda tünel kazısı ve temel kazısından sonra açılan tünel olmak üzere iki durum analiz edilmiştir. Tünel kaplamasında ortaya çıkan yer değiştirmeler oldukça küçüktür. Tünelin mevcut durumda açılması ile kazı sonrasında tünel açılması sonucunda oluşacak yer değiştirmeler neredeyse aynıdır. Normal kuvvet dağılımı inşaat önceliğinden etkilenmemiştir. Kesme kuvveti ve moment dağılımı bir miktar değişmiştir (Şekil 3.17) (Şekil 3.18) (Şekil 3.19). Sonuç olarak bu uygulama için inşaat sırasının bir önemi olmadığı gösterilmiştir (Berilgen vd, 2009: 225-234).



Şekil 3. 16. Uygulama modellenmesi

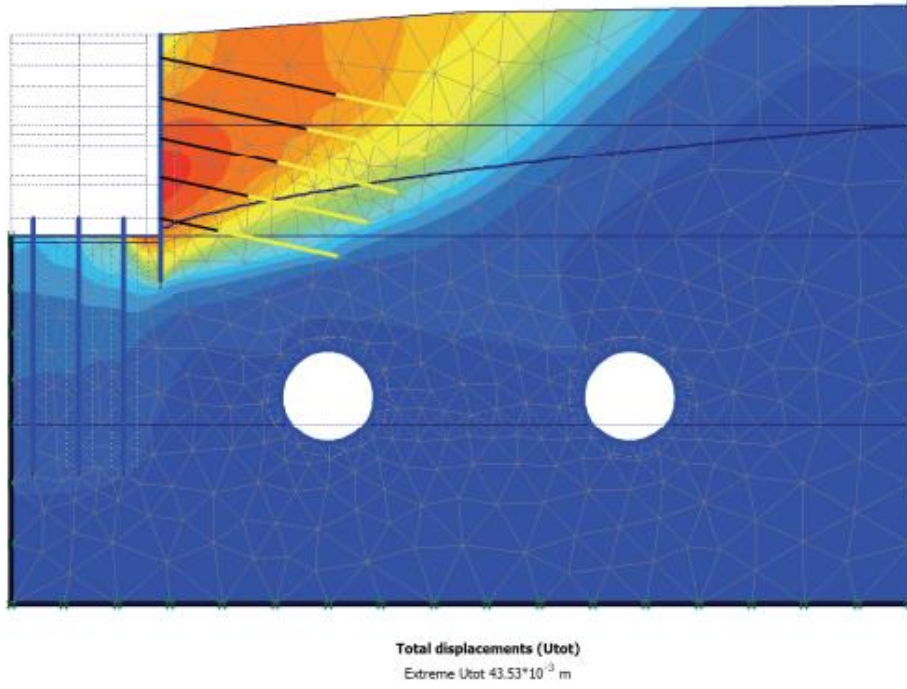
Kaynak: (Berilgen vd, 2009: 228)



Total displacements (Utot)
Extreme Utot $2.43 \cdot 10^{-3}$ m

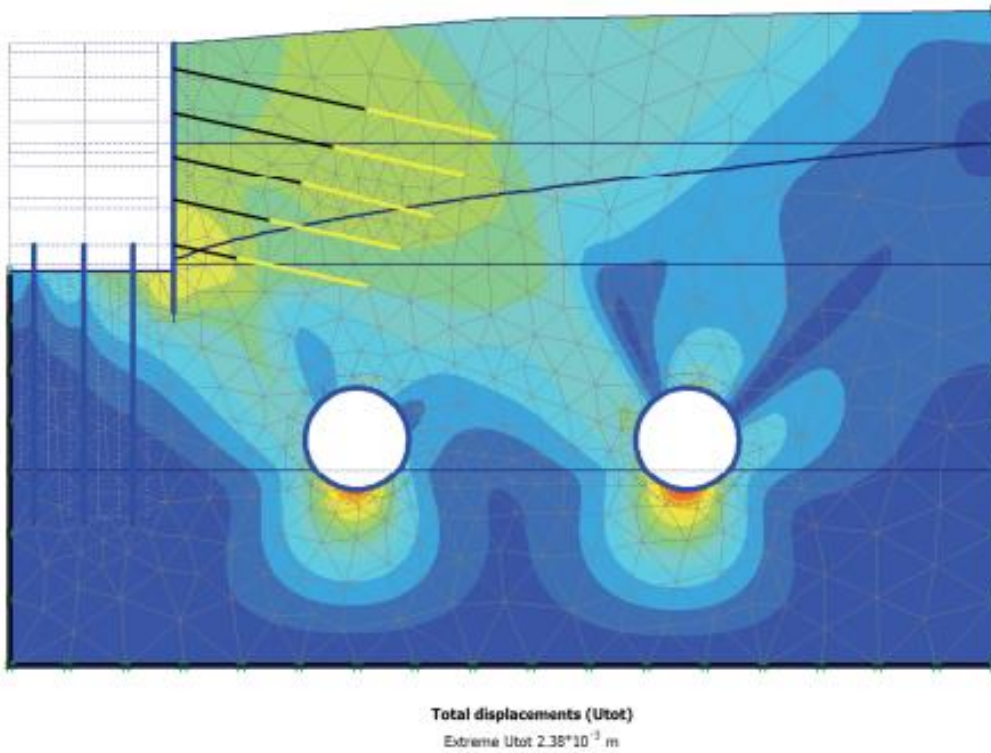
Şekil 3. 17. Bina ve kazının olmadığı durumdaki deformasyon

Kaynak: (Berilgen vd, 2009: 230)



Şekil 3. 18. Tünellerde sonra kazının yapılması durumdaki deformasyon

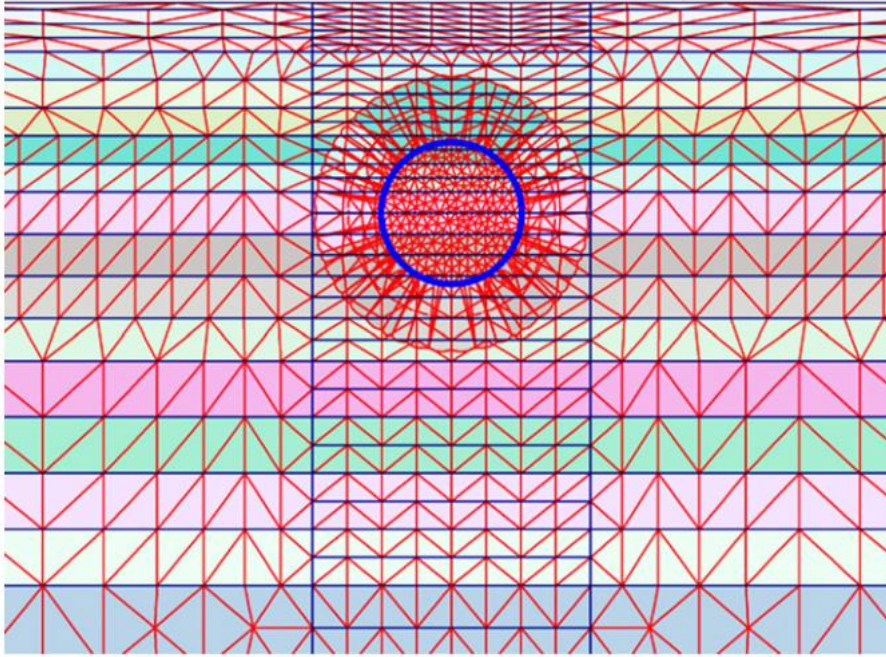
Kaynak: (Berilgen vd, 2009: 231)



Şekil 3. 19. Destekli kazıdan sonra tünellerin açılması durumundaki deformasyon

Kaynak: (Berilgen vd, 2009: 231)

Amorosi ve Boldini (2009), çalışmalarında killi zeminde . Wang'ın yarı statik 1D yaklaşımını ve sonlu elemanlar metodu ile analizi ele alarak kil zeminde sığ tünel analizi yapmıştır (Şekil 3.20). Analizler sonucunda tünel kaplamasındaki yatay sismik hareketlerin etkilerini incelemişlerdir. Karşılaştırmalı bir analiz yapmak için dinamik aşamasında seçtiği visko-elastik modeli önce lineer izotropik elastik olarak modellemiştir. Modellemede incelenecek tünelin etkisini daha iyi görebilmek için bu kısımdaki ağı 8 kat daha küçük elemanlara ayırmıştır. Analizler sonucunda ne kadar statik 1D yaklaşımın avantajları olarak sayısal prosedürler ile sofistike çalışmalar olmadan güvenilir sonuçlar alınmasını görünse de toprak plastisitesini hesaba katan sonlu eleman programında zemin tünel arasındaki etkileşimler sismik etki sırasında ve sonrasında daha gerçekçi sonuçlar vermiştir. Hem zemin hem de tünel kaplamasındaki dinamik etkiler için elastoplastik zemin davranışı daha gelişmiş sonuçlar verdiği için bu yöntemin seçilmesinin daha doğru bir karar olduğu belirlenmiştir (Amorosi ve Boldini, 2009: 1059-1072).



Şekil 3. 20. Model geometrisi

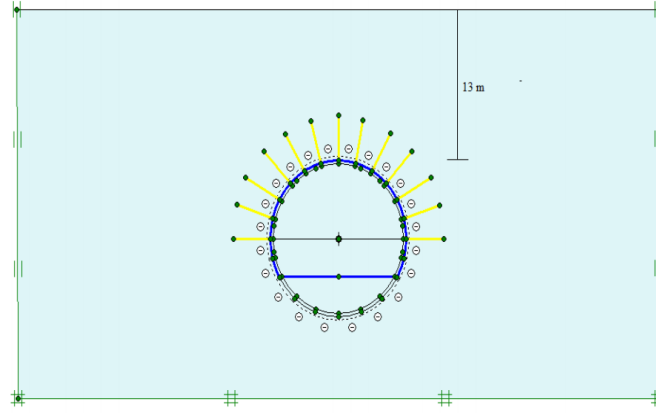
Kaynak: (Amorosi ve Boldini, 2009: 1063)

2010 yılında yapmış olduğu çalışmada Polat tünel açma metodlarını ayrıntılı bir şekilde inceleyip, Arhavi tüneline Plaxis 8.2 programı ile modellemiştir.

Arhavi tüneli için yapılan sondaj çalışmalarını detaylı şekilde incelenmiş ve bu incelemeler sonucunda güzergah 4 homojen bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgelerin ayrı ayrı geomekanik parametreleri, KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) , NATM Uygulamalı Yer

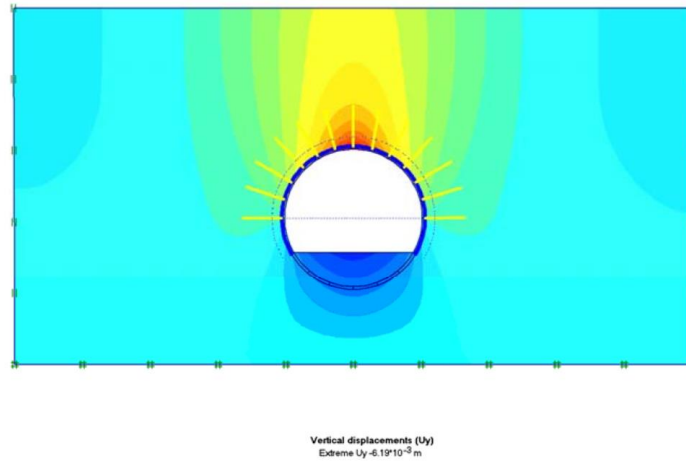
Altı Tünel İşleri Teknik Şartnamesine göre önerilen destekleme elemanları tablo halinde verilmiştir. Polat, 4 homojen bölgeyi en iyi temsil eden 3 adet en kesit oluşturup bunları modellemiştir.(Polat, 2010:83)

1. Model : 15 cm püskürtme betonu, kaya bulonu ve çelik iksa kullanılmıştır. Örtü kalınlığı 12,57 m Yeraltı su seviyesinin etkisi yoktur (Şekil 3.21). Tünel kazısı sonrasında etrafındaki kayalarda maksimum düşey yabancı saha 6,19 mm ve tünel kaplamasında saptanan maksimum düşey deplasman 5,40 mm bulunmuştur (Şekil 3.22). Yatay deplasman Şekil 3.23’ de verilmiştir. Uygulama sonucunda destekleme elemanlarının tahkiki yapılmıştır. Tahkikler AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) yönetmeliğine uygun yapılmıştır. Bu tahkik sonucunda seçilen püskürtme betonu ve çelik iksaların üzerine gelen iç kuvvetlerin tahkimatın taşıma kapasitesinin altında kaldığı görülmüştür. Bulonlar ise emniyetli sınırlar içerisinde kalmıştır (Polat, 2010: 96).



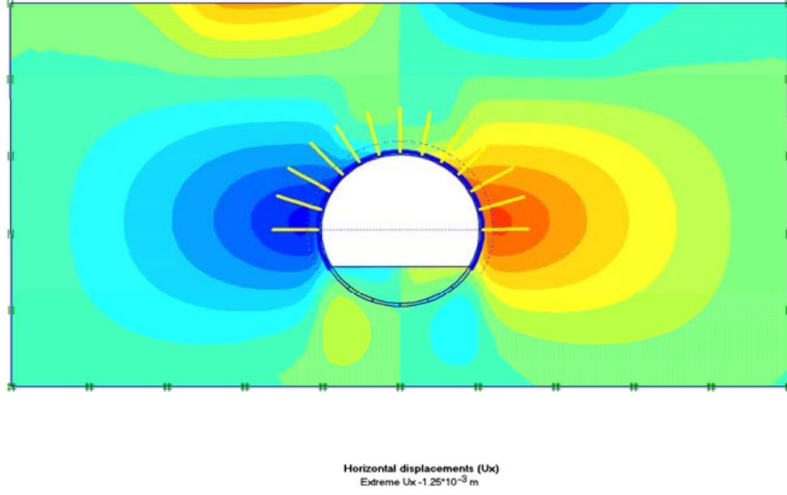
Şekil 3. 21. Birinci model geometrisi

Kaynak: (Polat, 2010: 96)



Şekil 3. 22. Düşey deplasman

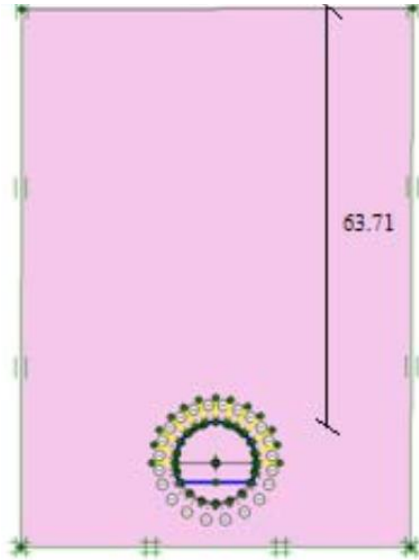
Kaynak: (Polat, 2010: 98)



Şekil 3. 23. Yatay deplasman

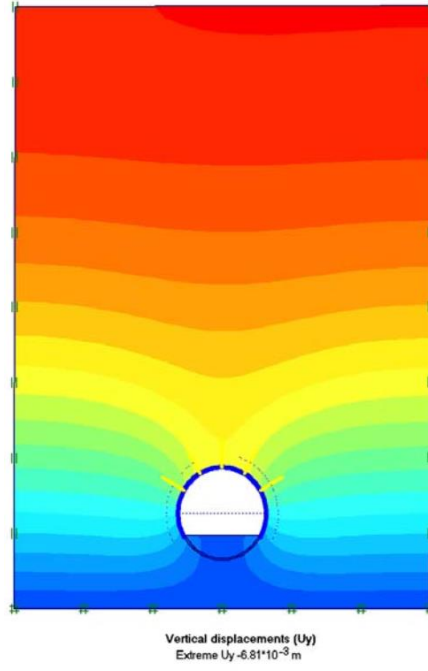
Kaynak: (Polat, 2010: 101)

2. Model : 25 cm püskürtme betonu, kaya bulonu ve çelik iksa kullanılmıştır. Örtü kalınlığı 63,71 m Yeraltı su seviyesinin etkisi yoktur (Şekil 3.24). Tünel kazısı sonrasında tünellerde oluşan maksimum düşey deplasman 6,81 mm ile tünel tavanında görülmüştür (Şekil 3.25). Yatay deplasman Şekil 3.26' de verilmiştir. Uygulama sonucunda destekleme elemanlarının tahkiki yapılmıştır. Tahkikler AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) yönetmeliğine uygun yapılmıştır. Bu tahkik sonucunda seçilen püskürtme betonu ve çelik iksaların tahkimatı güvenli çıkmıştır. Bulonlar da emniyetli sınırlar içerisinde kalmıştır (Polat, 2010: 110).



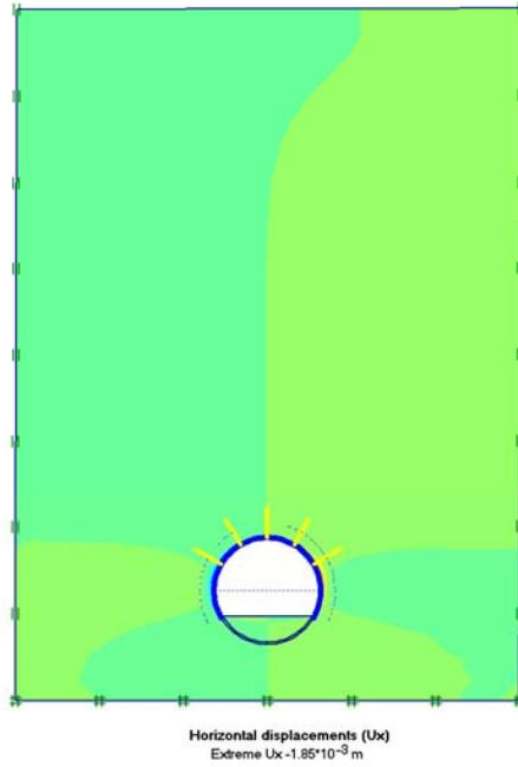
Şekil 3. 24. İkinci model geometrisi

Kaynak: (Polat, 2010: 110)



Şekil 3. 25. Düşey deplasman

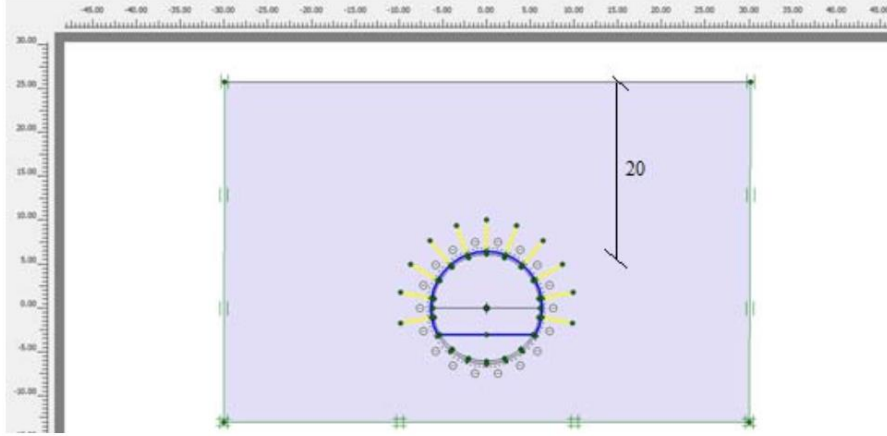
Kaynak: (Polat, 2010: 114)



Şekil 3. 26. Yatay deplasman

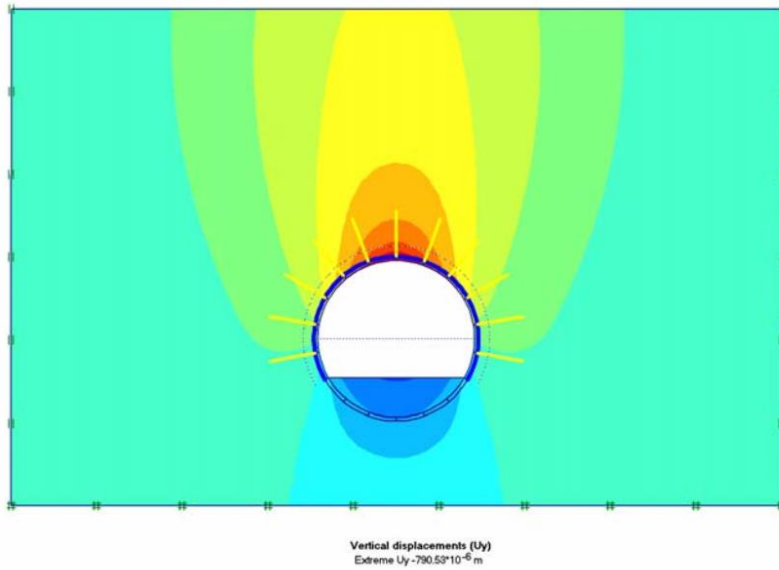
Kaynak: (Polat, 2010: 115)

3. Model : 20 cm püskürtme betonu, kaya bulonu ve çelik iksa kullanılmıştır. Örtü kalınlığı 20 m Yeraltı su seviyesinin etkisi yoktur (Şekil 3.27). Tünel kazısı sonrasında tünellerde oluşan maksimum düşey deplasman 0,79 mm ile tünel tavanında görülmüştür. (Şekil 3.28). Yatay deplasman Şekil 3.29’ da verilmiştir.Uygulama sonucunda destekleme elemanlarının tathiki yapılmıştır. Tahkikler AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) yönetmeliğine uygun yapılmıştır. Bu tahkik sonucunda seçilen püskürtme betonu ve çelik iksaların tahkimatı güvenli çıkmıştır. Bulonlar da emniyetli sınırlar içerisinde kalmıştır (Polat, 2010: 122).



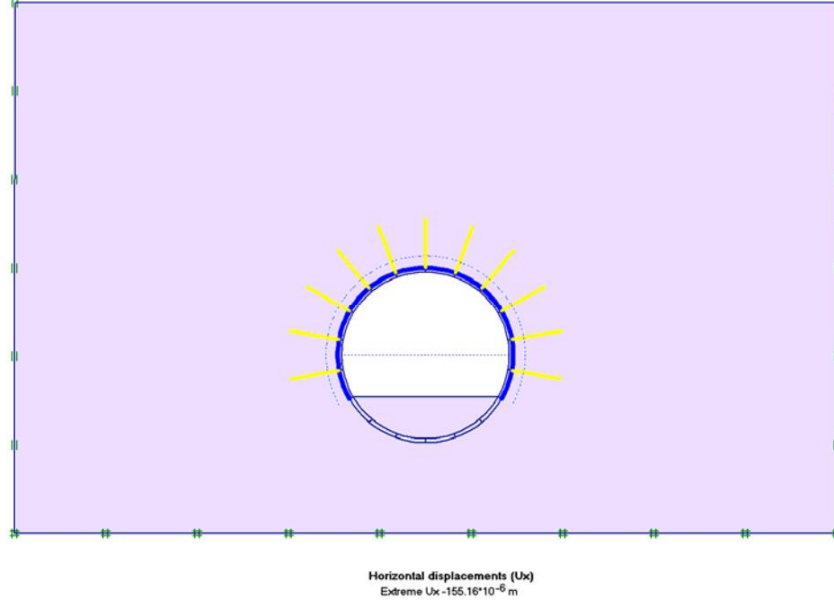
Şekil 3. 27. 3. Model geometrisi

Kaynak: (Polat, 2010: 122)



Şekil 3. 28. Düşey deplasman

Kaynak: (Polat, 2010: 122)

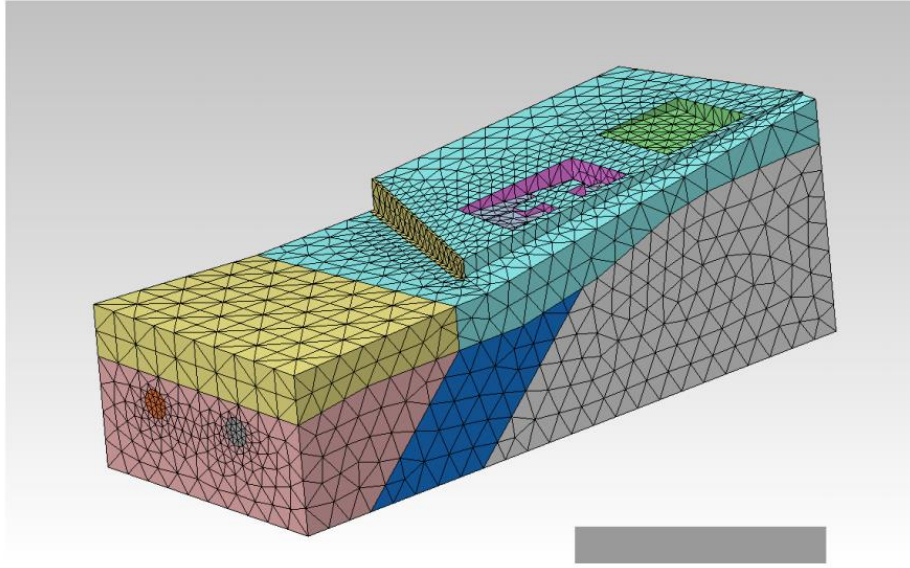


Şekil 3. 29. Yatay deplasman

Kaynak: (Polat, 2010: 133-134)

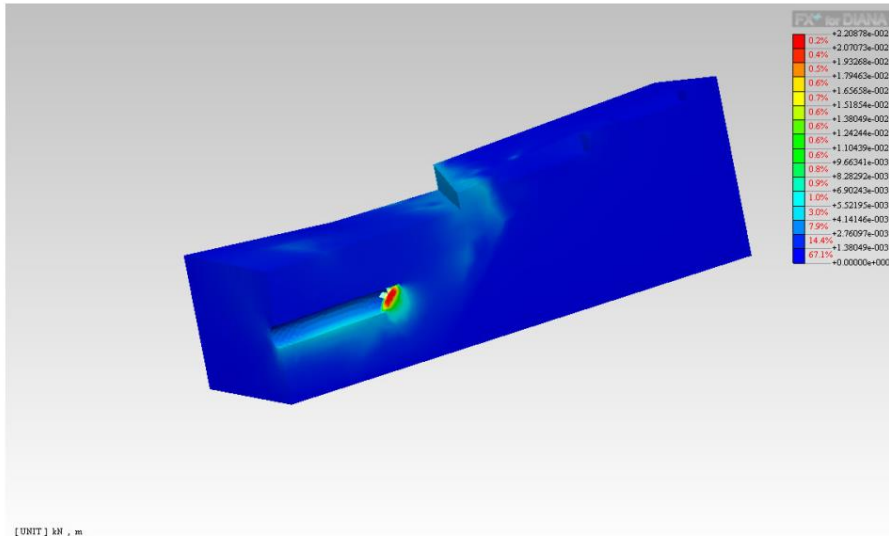
Yapılan bu 3 modelde bulunan maksimum deplasmanlar ve gerilme değerleri incelenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda Arhavi tüneli için kaya sınıfı B1, B2, B3 güzergahta öngörülen tahkimat sisteminin yeterli olduğu görülmüştür. Bazalt ve Tüfit özelliği barındıran kayalarda güvenli tarafta kalabilmek için belirlenen kazı sınıfları ve bunlara karşılık gelen tahkimatlar uygulanmıştır. Tünelde oluşan maksimum deplasman da 7 mm bulunmuştur. Modelleme çalışmasında gerilmelerin yönelimleri ve yığılma noktaları belirlenip özel dikkat edilmesi gereken bölgeler belirlenmiştir (Polat, 2010: 122).

Özener ve Berilgen (2010), bu çalışmalarında Kadıköy-Kartal metro tünel kazı güzergahında bulunan bina ve istinat duvarında oluşacak etkileri DIANA modeli ile nümerik olarak incelemişlerdir (Şekil 3.30). İncelenen bina 2 kat bodrum, zemin ve 3 normal kattan oluşuyor. Hat 2 tüneli 2 aşamada Hat 1 tüneli tek kazıyla açılmıştır. Bina sahasında bulunan beton konsol olarak yapılan istinat duvarının davranışı incelenmiştir. İstinat duvarında oluşacak düşey ve yatay deplasmanlar çalışmaya eklenmiştir (Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33, Şekil 3.34, Şekil 3.35). Tünellerin açılmasından kaynaklanan binalardaki olumsuzluklar için tünel için bu bölgeden geçerken TBM tarafından alınan basınçları uygulanması gerektiği, binanın tekil temelden radye temele dönüştürülmesi bodrum perdelerinin iyileştirilmesi önerilmiştir (Özener ve Berilgen, 2010: 403-410).



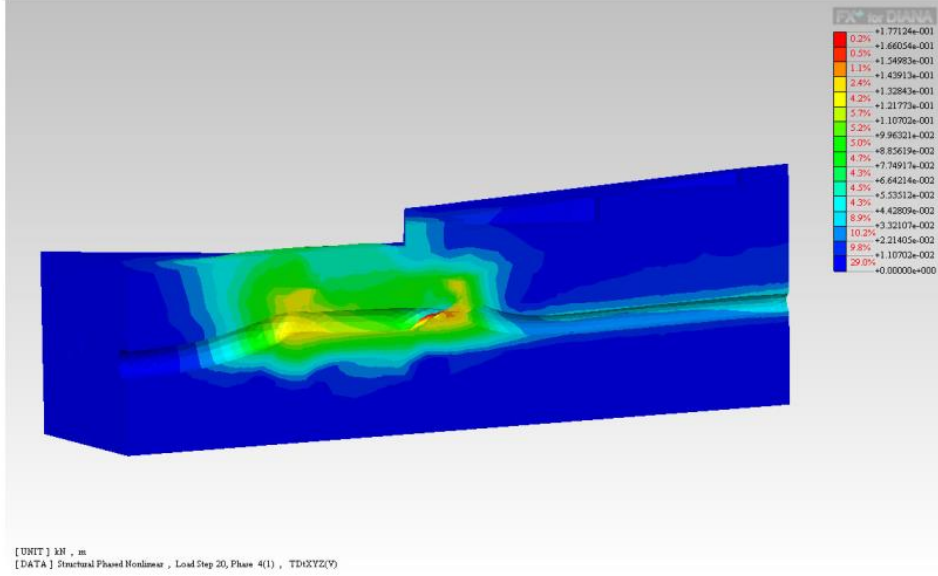
Şekil 3. 30. Sonlu elemanlar modeli

Kaynak: (Özener ve Berilgen, 2010: 406)

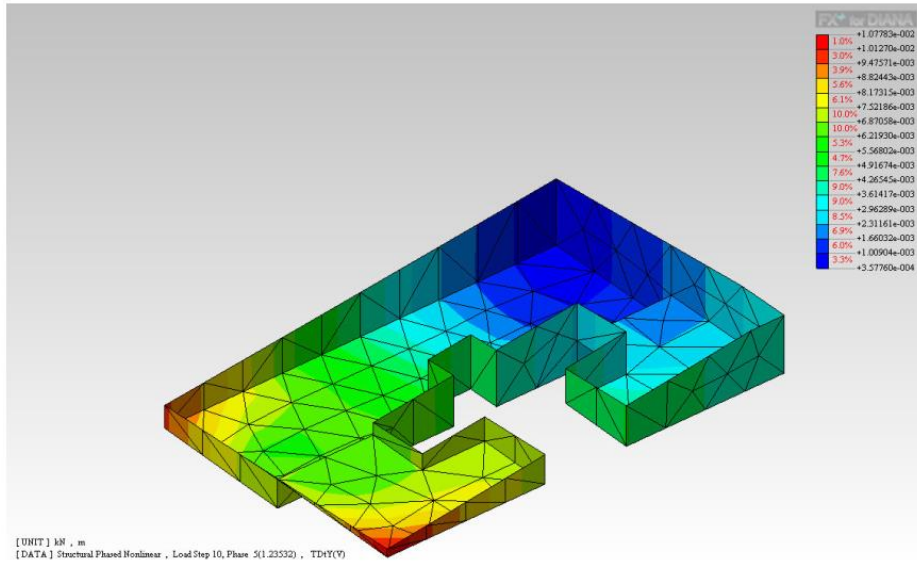


Şekil 3. 31. İlk aşama sonrası toplam yer değiştirme

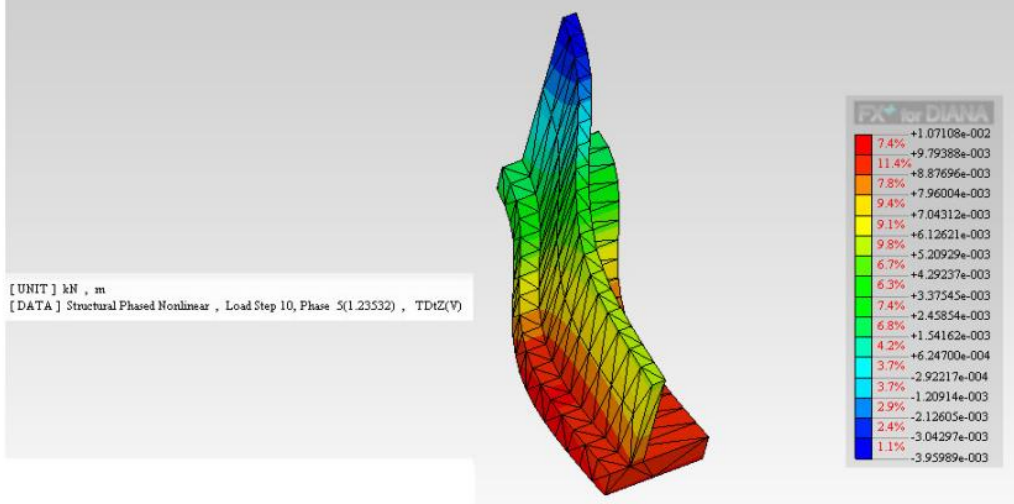
Kaynak: (Özener ve Berilgen, 2010: 407)



Şekil 3. 32. Tünelin açılması durumunda toplam yer değiştirme
Kaynak: (Özener ve Berilgen, 2010: 408)

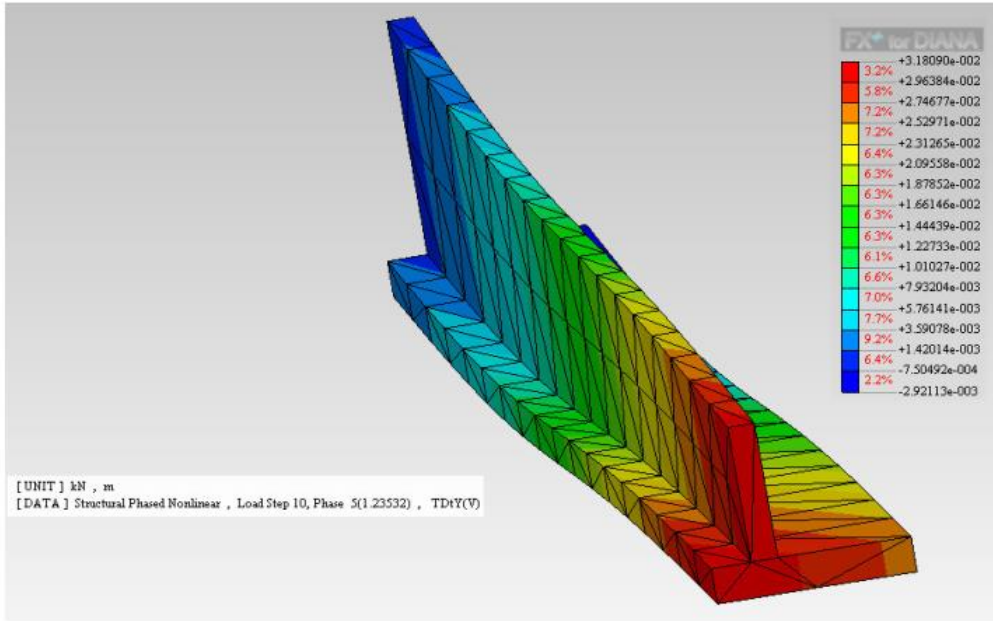


Şekil 3. 33. Bina temellerinde oluşan meydana gelen oturmalar
Kaynak: (Özener ve Berilgen, 2010: 408)



Şekil 3. 34. İstinat duvarında oluşan yanıl yer değıştirmeler

Kaynak: (Özener ve Berilgen, 2010: 409)

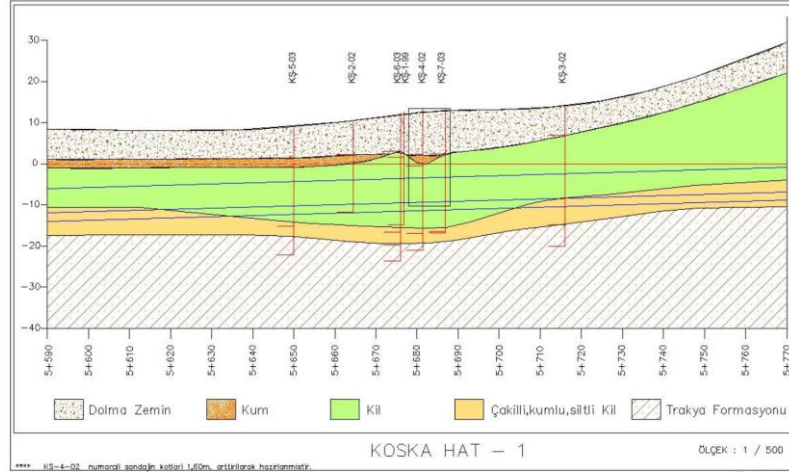


Şekil 3. 35. İstinat duvarında meydana gelen oturmalar

Kaynak: (Özener ve Berilgen, 2010: 409)

Yıldırım, Toğrol ve diğerleri (2010), İstanbul metrosu Yenikapı-Unkapanı hattındaki kil tabakanın tünel eksenı üzerindeki yapılar etkisi ele alınmış ve bu etkileri önlemek için çeşitli öneriler anlatılmıştır. Hat üzerinde yeraltı su tabakası 4 ile 10 metre arasında bulunmuştur. Çalışma hattında 100 metrelik kil zeminin bulunduğu kısımda gerekli ve yeterli iyileştirmelerin yapılarak tünelin açılabilmiş detaylı şekilde açıklanmıştır. Tünel çalışması sırasında Koska Palas apartmanındaki deformasyonların artmasıyla bu bina yıkılmış ve zeminde iyileştirme

çalışmaları yapılmıştır (Şekil 3.36). 9 metre boyunda jet-groundlar inşa edilerek kil tabakası taştılandırılmıştır. Hatta bulunan Pamir apartmanı ve Onur oteli altından geçen tünelin tavanının stabilizesini sağlaması için 216 metre uzunluğunda 11 adet çimento enjeksiyonu yapılmıştır. Tünel kazılırken hat 1 tünel aynasına 30 adet her iksada şaşırtmalı olacak şekilde süren çakılmıştır. Tünelin alt ve üst yarı birleşim yerlerinde 5 metre kaya bulonu uygulanmıştır. Pamir apartmanının altına geldiğinde karşılaşılan boşluklar nedeniyle çift sıra hasır çekil ve püskürtme beton uygulaması yapılmıştır (Yıldırım vd, 2010: 757-762).



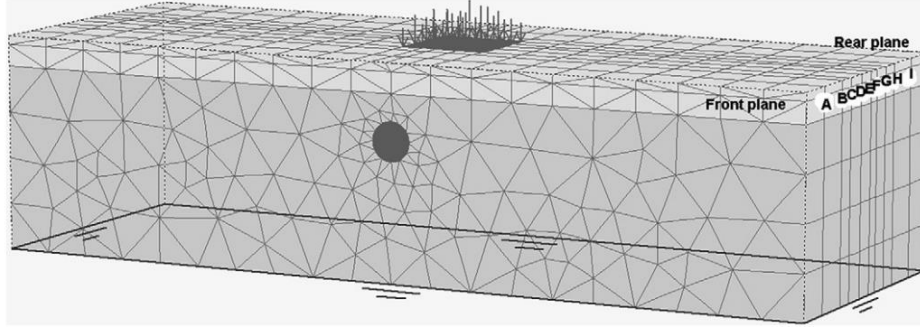
Şekil 3. 36. Güzergah zemin kesiti

Kaynak: (Yıldırım vd, 2010: 758)

Fraldi ve Guarracino (2011), çalışmalarında analitik ve sayısal yöntemleri incelemiştir. Sayısal yöntemlerin karmaşık tünel yapıları için daha hassas sonuçlar verse de analitik yöntemlerin fikir edinmek ve ön tespit için basit ve hızlı bir çözüm olduğu görülmüştür. Terzaghinin 1946 yılında yapmış olduğu deneyler ve araştırmalar sonucu geliştirdiği analitik yöntemler basit olması nedeniyle hala kullanılmaktadır. Fakat çok karmaşık problemlerle karşılaşıldığı zaman bu yöntemler yeterli görülmediğinden sayısal analizle kullanılmaktadır. Sayısal analizlerde modelin doğru oluşturulması sonucun daha gerçekçi çıkmasını sağlamaktadır. Çalışmada sayısal analizleri incelemek için üç farklı program ele alınmıştır: Examine2D by Rocscience (2009), ANSYS11(2009) ve PLAXIS8 (2002). Bu programlar hem öğrenci eğitimler için hem de mühendis uygulamaları için yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Examine2D sonlu elemanlar programı kaya zeminde açılacak tünellerin analizi için kullanılan bir sayısal yöntemdir. ANSYS sonlu elemanlar programı hem küçük hem büyük deformasyon problemlerin elasto-plastik analizleri için kullanılır. Plaxis programı pratik çözümü bulmayı sağlayan bir programdır. Dünya çapında geoteknik mühendisleri tarafından en çok kabul gören programdır. Bu programları karşılaştırmak için 3.75 metre yarıçaplı bir tünel modeli

çözümlemesi yapmıştır. ANSYS ve Plaxis programı karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların Plaxisten %10 daha büyük olduğu görülmüştür. Araştırma sonucunda analitik yöntemin doğru ve hızlı bir şekilde kılavuz olabileceği görülmüştür. (Fraldi ve Guarracino, 2011: 507-516)

Maleki, Sereshteh ve diğerleri (2011), bu çalışmanın amacı bitişik nizamdaki iki yapı ve tünelin etkisini incelemektir. Bu inceleme için 3 boyutlu sonlu elemanlar metotlarından biri olan Plaxis programı kullanılmıştır (Şekil 3.37). Plaxisin avantajı olarak oluşturulan ağ çok küçük boyutlarda hazırlanabilmektedir. Bununla birlikte modellemede hassas olan kısım ayrılarak daha küçük eleman boyutlarına getirilebilir. Tünel ve yapı etkileri 2 farklı yöntemle incelenebilirliği ele alınmıştır. Birincisi daha basit olan analitik yöntemler diğeri ise sayısal yöntemler. Bu çalışmada model olarak Tahran metrosunun 1 numaralı hattının 7. meydan istasyonu kullanılmıştır. Litolojik bileşimi kum, çakıl, parke taşı ve kilden oluşmaktadır. Analizler sonucunda tünel merkezinden 6 metre ötede yatay yer hareketlerinin yapıları etkilediği görülmüştür. Tünelin derinliği 17.7 metre yapıların genişliği 100 metredir. Yapı 15, 30, 60 metre genişlikte 4 katlı olacak şekilde düşünülmüştür. Karşılaştırma amacıyla yeşil alan analizlere dahil edilip 100 metre alınmıştır. Mevcut binanın değerlerinin hesaplaması zor olacağından basit bir yöntem olan eşdeğer kiriş yöntemi kullanılmıştır. Bu durumu karşılaştırmak için SAP programını ile gerekli değerler bulunarak Plaxis programında kullanılmıştır. Bu iki durum karşılaştırıldığında eşdeğer kiriş yönteminin gösterdiği sonuç çok yüksek çıktığı görülmüştür. SAP programından alınan değerlerle yapılan modellemenin gerçeğe daha yakın çıktığı görülmüştür. Bu çalışmaların sonucunda tünel yapı etkileşiminde yapının sertliği tünel açma işlemini etkilediği görülmüştür. Sertlik ihmal edildiğinde gerçekçi sonuçlarla karşılaşılmadığı görülmüştür. Aynı şekilde yapı yükünün etkisi de çok etkilemektedir. Binaların genişlikleri kıyaslandığında fazla genişliğin oturmayı azalttığı görülmüştür. Bitişik bina geometrisinin oluşturulmasında incelenen eşdeğer kiriş yöntemi ve SAP programından alınan değerler ile yapılan gerçek durum, eşdeğer kiriş yönteminin pratik amaçlar için kullanılabileceğini göstermiştir (Maleki vd, 2011: 524-533).



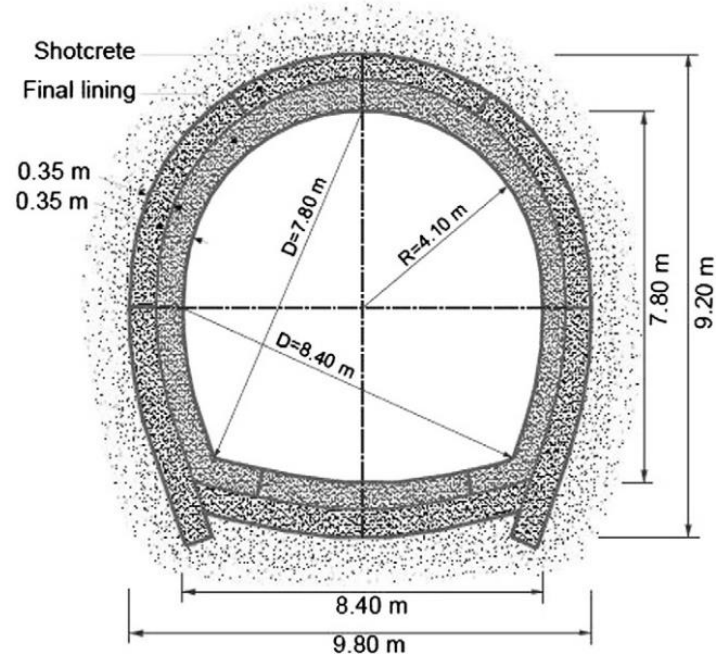
Şekil 3. 37. 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli

Kaynak: (Maleki vd, 2011: 525)

Fasihnikoutalab ve diğerleri (2012), yaptıkları çalışmada Tahran metrosunun 4. hatını analiz etmek için sonlu elaman programlarında biri olan Plaxis programını kullanmışlardır. Tünelin modellenecek zemini 3 katmandan oluşmaktadır. Sırasıyla GW iyi derecelendirilmiş çakıl, GM siltli çakıl, GW dir. Yeraltı su seviyesi tünelin altında kaldığından boşluk suyu basıncı etkili değildir. Modelde aşamalı kazı uygulanmış kazıdan sonra destek elemanları uygulanmıştır. Model 2 aşamalı olarak çözülmüştür. Çözüm sonucundan toplam yer değiştirmenin çoğunlukla tünel tavanında olduğu görülmüştür. Analiz sonucunda tünelde kullanılan kaplama betonunun yeterli olduğu görülmüştür. 25, 30 ve 35 cm kalınlıklarda tünel kaplama kalınlıkları analizleri yapılmış. 30 cm kalınlıktaki değerlerin uygun çıktığı bulunmuştur (Fasihnikoutalab vd, 2012: 451-461).

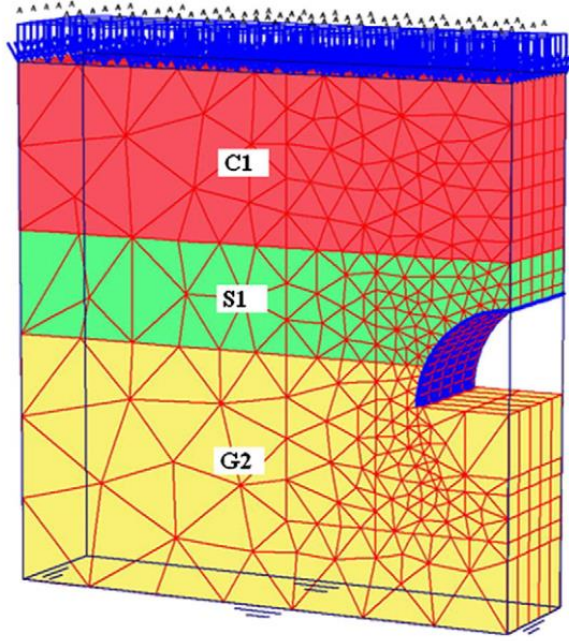
Denghan ve diğerleri (2012), çalışmalarında geri analiz yapark jeolojik özelliklerin ve destek elemanların tayininin yapılmasını incelemiştir (Şekil 3.38). Modelleme için Plaxis 3D sonlu elemanlar programı kullanılmıştır (Şekil 3.39). Araştırma için Karaj metrosu ele alınmıştır. Karaj metrosu toplamda 25 kilometreden oluşan bir tüneldir. Tünel çevresindeki zemin 6 katman olarak tayin edilmiştir. Tünel avusturya tünel açma yöntemi uygulanarak 3 aşamada açılmıştır. Tünel yüksekliği 7,8 metre genişliği 8,4 metredir. Örtü kalınlığı 6-12 metre arası değişmektedir. Destek elemanı olarak 35 cm püskürtme beton ve 120 cmm aralıklarla çelik çerçeveli kirişler kullanılmıştır. Zemin malzemesi dane boyut analizleri sonucunda üç katman olarak kil-silt, kum ve çakıl tayin edilmiştir. Bu analizde Plaxis programının kullanılma amacı farklı tünel tipleri modellenebilmesi, zeminlerin katmanlar halinde eklenebilmesi ve yapım aşamalarının kademeli olarak eklenebilmesidir. Model kesiti 25 m genişlik, 25 m yükseklik ve 30 m derinlik şeklinde uygulanmıştır. Düzenli araç trafiği olacağından trafik yükü olarak 40 kPa değer girilmiştir. Uygulamada mohr coulomb zemin davranış modeli kullanılmıştır. Hesaplama aşaması olarak öncelikle tünel içerisi boşaltılıp tünel kaplaması aktif

edilmiştir. Tünelin simetrik olması nedeniyle yarısı için çözüm sağlanmıştır. Bu sayede çözüm süresi kısaltılmıştır. Tünel stabilitesini sağlamak için kazı 4 aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda geri analizlerin daha ekonomik ve süre bakımından tasarruflu olduğu görülmüştür. Analiz sonucu arazi ve laboratuvar değerleri ile karşılaştırıldığında Karaj metrosu tarafından sonuçlar doğrulanmıştır. Bu sonuca bakarak geriye yönelik analizlerin tasarıma kıyasla daha ekonomik ve hızlı olduğu düşüncesinin yanında zemin değerlerinin güvenilirliği gösterilmiştir. Özellikle stabilizite ve destek sistemi analizler için oldukça güvenli olduğu görülmüştür (Denghan vd, 2012: 141-149).



Şekil 3. 38. Uygulaması yapılan tünel kesiti

Kaynak: (Denghan vd, 2012: 143)



Şekil 3. 39. 3 boyutlu model geometrisi

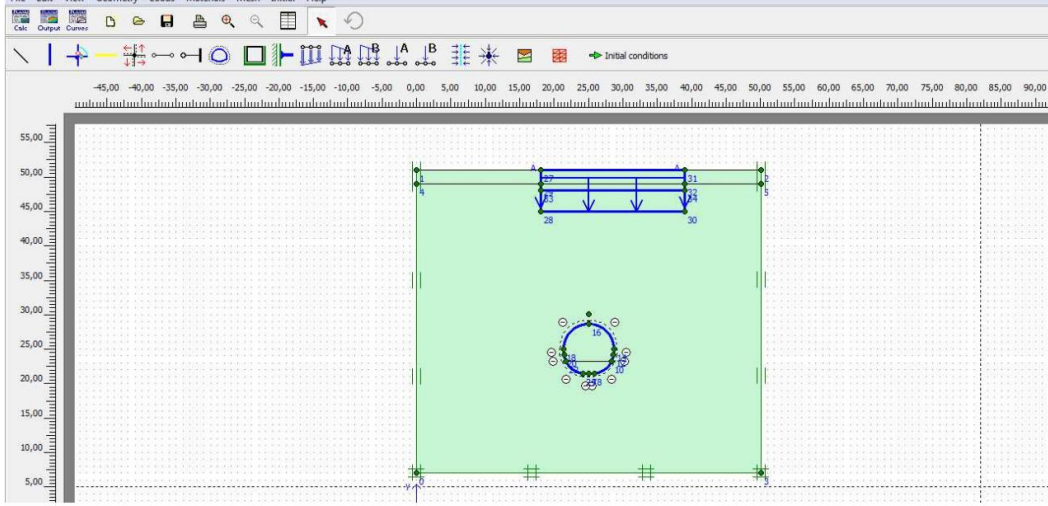
Kaynak: (Denghan vd, 2012: 147)

Elavenil ve Vanuvamalai (2012), çalışmalarında Hindistanın ulaşım sorununu çözmek için yapılan bir tünel projesini sonlu elemanlar programlarından biri olan Plaxis 2D ile analiz etmişlerdir. Solaiyan ve Arunachalam modellemelerini tünel derinliği ve tünel kaplamasındaki etkiyi görecekle şekilde yapmışlardır. Uygulamada drenajlı ve drenajsız olmak üzere gevşek, orta ve sıkı zemin kullanılmıştır. Aynı zamanda derinlik artırılarak da çeşitli modeller yapılmıştır. Bu modellerden karşılaştırmalı grafikler oluşturulmuştur. Tünel kaplamalarına bağlı derinlik karşılaştırması yapıldığında tünel kaplama kalınlığı arttıkça yer değiştirmenin de kademeli şekilde arttığı görülmüştür. Eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti zalmıştır. %15 gevşek, orta, sıkı kil ve sıkı kum bulunan zeminin modellenmesi sonucunda kaplama kalınlıklarının artmasına bağlı olarak yer değiştirme değeri azalıp, eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti artmıştır. Zemin modeli terse çevrilip %15 gevşek, orta, sıkı kum ve sıkı kil bulunan zeminin modellenmesinde ise yer değiştirme değeri, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti artmış, eğilme momenti azalmıştır. Zemin modelinde sırasıyla %15 orta kil, %85 sıkı kum ve sıkı kil kullanıldığında yer değiştirme kademeli olarak azalıp, eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti artmıştır. İncelenen modellerde kaplama kalınlığının kalınlaşmasıyla yer değiştirmenin azaldığını fakat diğer değerlerin arttığı gözlemlenmiştir. Tünel kaplamasının artmasının eğilme momentinde hatalara yol açtığı görülmüştür (Elavenil ve Vanuvamalai, 2012: 161-167).

Kaşıkcı (2014), metro tünellerinin inşaatının üst yapıya etkisini incelemiştir. Tünel-zemin ilişkisinin deneysel metotlarla tahmin edilmesini, analitik metotlarla tahmin edilmesini ve sayısal analiz ile tahmin edilmesini araştırmacıların çalışmaları sonucunda buldukları formül ve grafikleriyle birlikte incelemiştir. Kaşıkcı, farklı tünel tipleri, farklı zemin tabakaları ve farklı özelliklerdeki binalar seçip Plaxis 2D programında modellemiştir. Analiz sonucunda hasar seviyelerinin tespiti için Mair tarafından geliştirilen Üç Aşamalı Hasar Değerlendirme Yöntemini kullanmıştır (Kaşıkcı, 2014: 1-2).

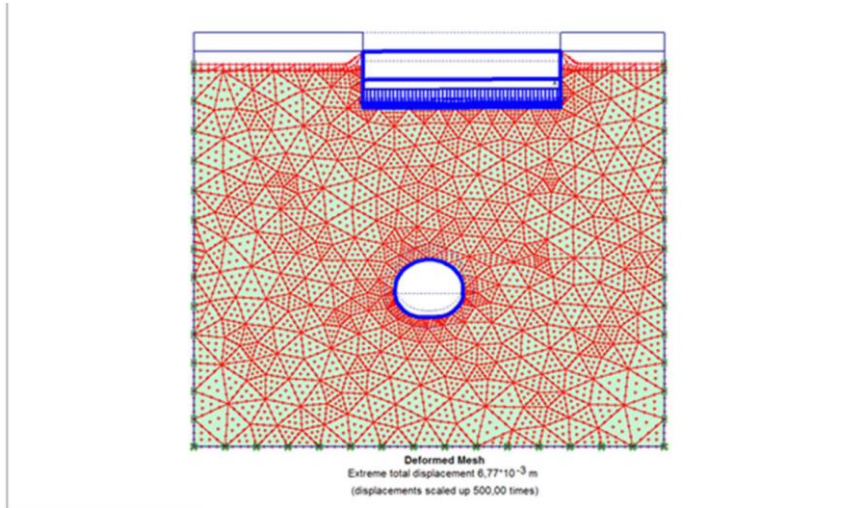
Mair tarafından belirlenen üç aşamalı değerlendirmenin birinci aşaması zemin oturması büyüklüğü ve eğim parametresine bağlıdır. Değerlendirmede hasarlar 0'dan 5'e kategoriye ayrılmıştır. Hasar seviyesinin ihmal edilebilmesi için oturma değeri 10 mm'den küçük açılmalı dönmenin 1/5000 den küçük olması gerekmektedir. İkinci aşamada yapılara etkiyen yatay ve kesme deformasyonları tahmin edilir. Yapının oturmasına müsaade eden rijitlik olmadığı kabul edilir fakat gerçekte yapının rijitlik katkısından dolayı değerlendirilebilir hasar kategorisinden küçüktür. 3. aşama değerlendirmesinde hasar seviyesi ortanın üzerinde olan yapılar değerlendirilir. 3. Aşama saha ziyareti ile başlar ve risk değerlendirmesi yapılır. Saha ziyaretinden sonra orta derece riskli çıkan binalar için Addenbrook tarafından önerilen detaylı çalışma yapılır (Kaşıkcı, 2014: 37-54).

Kaşıkcı Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile modeller oluşturmuştur (Şekil 3.40). Modellerinde garovak ve killi zemin olmak üzere iki farklı zemin türü kullanmıştır. Üç farklı bina karşılaştırması yapıp bunları grafik olarak eklemiştir. Binaların hasar düzeylerinin 1/500 den küçük olduğunu gösterip ihmal edilebilir bölgede olduğunu belirtmiştir. Kaşıkcı, Üç farklı zemin (kaya, kireçtaşı karışımı, kil karışımı) profilinin karşılaştırması için modeller oluşturmuştur. Modeller tek tip tünel ile yapılmıştır. Bu üç modele destek elemanı olan kaya bulonları da eklenerek grafikleri karşılaştırılmıştır. Kaşıkcı, çalışması sonucunda bina çeşitlerinin hasar düzeyinin ihmal edilebilir seviyede olduğunu görmüştür. Zemin tipleri karşılaştırmasında kil zeminlerde deformasyonların daha fazla çıktığını gözlemleyip her zemine uygun farklı özelliklere sahip tüneller yapılması gerektiğini belirtmiştir (Şekil 3.41). Aynı zaman da destek elemanlarının deformasyon değerlerini düşürdüğünü gözlemlemiştir. Zemine göre uygun tasarlanan ve destek elemanları kullanılan tünellerde deformasyonun düşeceği belirtilmiştir (Kaşıkcı, 2014: 37-54).



Şekil 3. 40. 2 boyutlu plaxis modeli

Kaynak: (Kaşıkçı, 2014: 38)

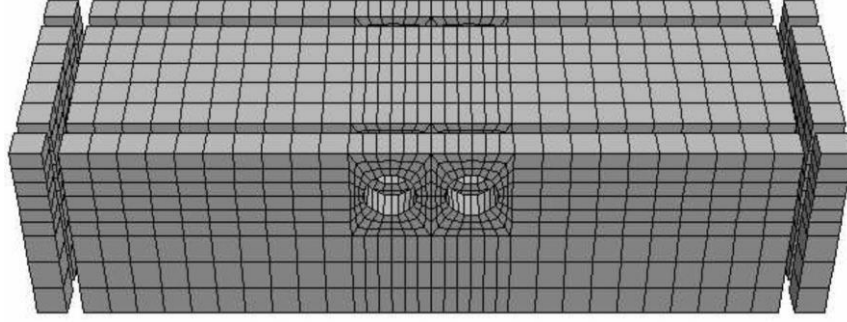


Şekil 3. 41. Çözüm sonucu oluşan deformasyon geometrisi

Kaynak: (Kaşıkçı, 2014: 43)

Unutmaz (2015), çalışmasında tünellerin çevresindeki zeminin deprem sırasında ve sonrasında nasıl etkilendiğini incelemiştir. Bu inceleme için FLAC-3D programını kullanmıştır. Unutmaz, 2 farklı tünel çapı, 2 farklı tünel derinliği, 2 farklı tünel et kalınlığı, 4 farklı deprem ivme kaydı kombinasyonlarını kullanarak modeller oluşturmuştur (Şekil 3.42). Bu modellerin analizleri sonuçlarından birinde en yüksek kesme dalga hızına sahip zeminde maksimum ivme değerine ulaşıldığı görülmüştür. Derinlik etkisi karşılaştırıldığı zaman sığ tünellerin yüzey ivmesinin sonucunun derin tünellere göre daha fazla çıktığı görülmüştür. Deprem ivmesinin yönü değiştirilip bakıldığında x yönünde olanın y yönünde olana göre daha yüksek ivme verdiği

görülmüştür. Tünel çapları analizi için yapılan modeller sonucunda kesin bir yargıya varılmamıştır. Analizler sonucuna göre sıvılaşmayı en çok etkileyen parametrenin tünel derinliği olduğu görülmüştür. Sığ tünellerde sıvılaşmanın daha fazla olduğu grafikler yardımıyla gösterilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde tünellerin mümkün olduğu kadarıyla derine yapılması gerektiği çıkarılmıştır (Unutmaz, 2015).



Şekil 3. 42. Sonlu elemanlar modeli

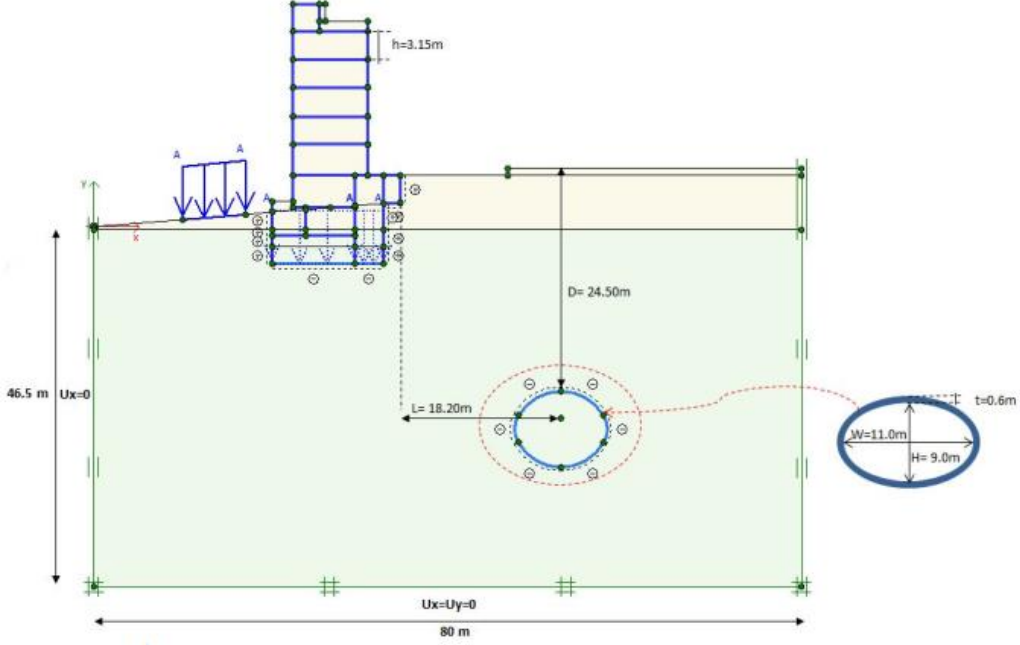
Kaynak: (Unutmaz, 2015)

Balkaya, Erken (2014), çalışmalarında, mevcut olan bir tünelin yakınına inşa edilecek bir yapının etkisini gözlemlemiştir. İnceleme için sonlu elemanlar programlarından biri olan Plaxis programını kullanmıştır (Şekil 3.43). İnşa edilecek yapı zeminden 25 metre aşağıda bulunan metronun koruma sınırı dahilindedir. Balkaya ve Erken analizlerini 6 adımda yapmışlardır.

1. Geostatik zemin koşullarının belirtilmesi
2. Metro tünelinin oluşturulması
3. İnşa edilecek binaya komşu bina yükünün girilmesi
4. 1. Bodrum kat kazısı
5. 2. Bodrum kat kazısı
6. Binanın inşa edilmesi

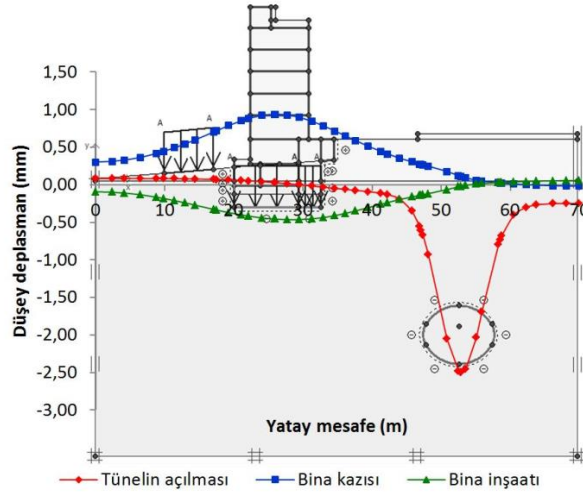
Analiz ardından tünel kazısından hemen sonra zeminde oturma gözlenmiştir. Bina kazısıyla birlikte zeminde kabarma meydana gelmiş fakat bina tamamlandıktan sonra bir miktar oturma gerçekleştiğinden zeminde meydana gelen olayların tüneli etkilemediği görülmüştür. Bina inşa edilmeden önceki ve sonraki tünel kaplamasındaki gerilme ve deplasmanlar karşılaştırıldığında düşey yer değiştirmenin 0.2 mm arttığı, yatay yer değiştirmenin 0.1 mm arttığı görülmüştür (Şekil 3.44). Kayma gerilmesi, aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momentinde değişiklik görülmemiştir. Analizdeki bu sonuçlar

değerlendirildiğinde inşa edilecek bina ve tünel arasındaki mesafenin yeterli olduğu görülmüştür (Balkaya ve Erken,2014: 289-291).



Şekil 3.43. Çalışma yapılan problemin modellenmesi

Kaynak: (Balkaya ve Erken,2014: 290)

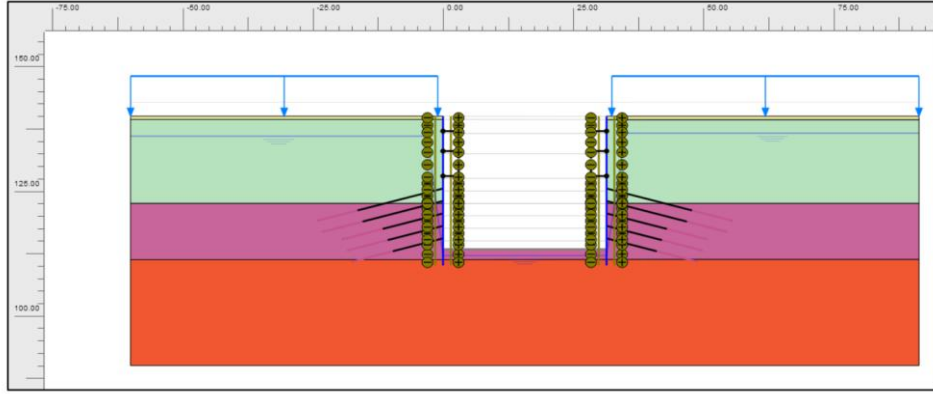


Şekil 3.44. Düşey deplasmanlar (Balkaya ve Erken,2014: 291)

Kaynak: (Balkaya ve Erken,2014: 291)

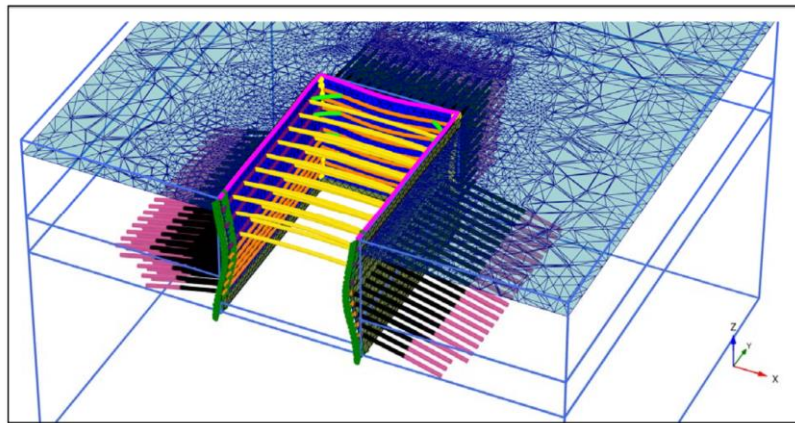
Aktaş, Aracı ve diğerleri (2018), yaptıkları çalışmada metro istasyonu destekleme elemanlarını 2D ve 3D olarak modelleyerek analizlerini yapıp bu analizler sonucunda 2 boyutlu ve 3 boyutlu modellemelerin karşılaştırmasını yapmışlardır (Şekil 3.45), (Şekil 3.46). Metro istasyonu derin kazısı 128 metre uzunlukta ve 30 metre genişliktedir. Kazıyı desteklemek için

perde sistemi olarak oluşturulan delgi kazıları ve kuşak kirişlerinin öngermeli ankraj ve içten destekler ile desteklendiği bir sistem tasarlanmıştır. Araştırması yapılan kısımda 27 tane kafes çelik ve köşelerde toplam 32 tane diyagonal çelik boru destek tanımlanmıştır. Analizlerde yatay yönde yer değiştirmelerin farkları ve 2D modellerde gösterilemeyen ya da yeterli olmayan destek elemanların 3D olarak modellenmesi sonuçlarına bakılmıştır. destek elemanların yeteri kadar gösterilebildiği 2D modelleme ile 3D modellemede yatay yer değiştirme karşılaştırıldığında 2D modelde daha fazla çıktığı görülmüştür. 2D için yeterli olmayan model karşılaştırıldığında yatay yer değiştirmenin 3D modelden daha az olğu görülmüştür. Bunun sebebinin 3D modelde köşe çelik boru destekteklerinin tanımlanabilmesi olduğu belirtilmiştir. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesiyle 2D tasarımın fazla güvenli tarafta kaldığı görülmüştür (Şekil 3.47), (Şekil 3.48) (Aktaş vd, 2018).



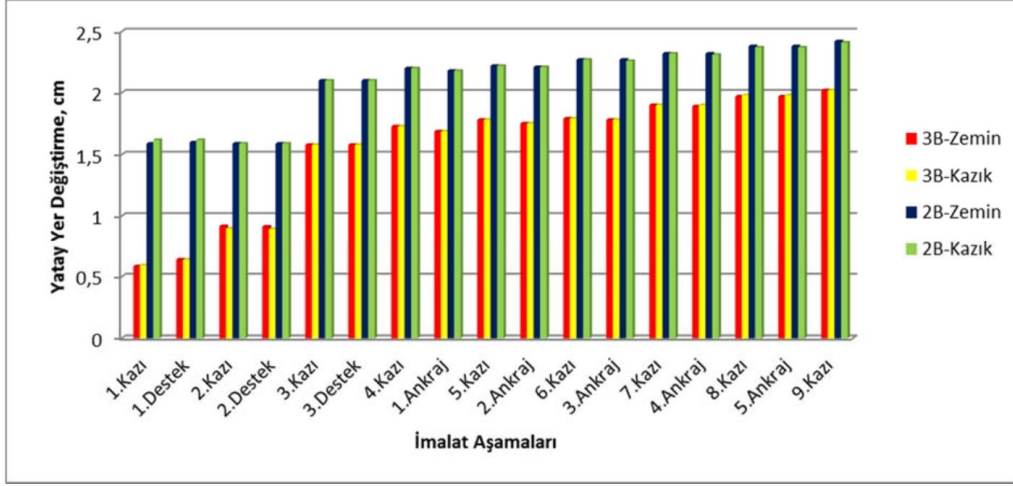
Şekil 3. 45. 2 boyutlu modelleme

Kaynak: (Aktaş vd, 2018)



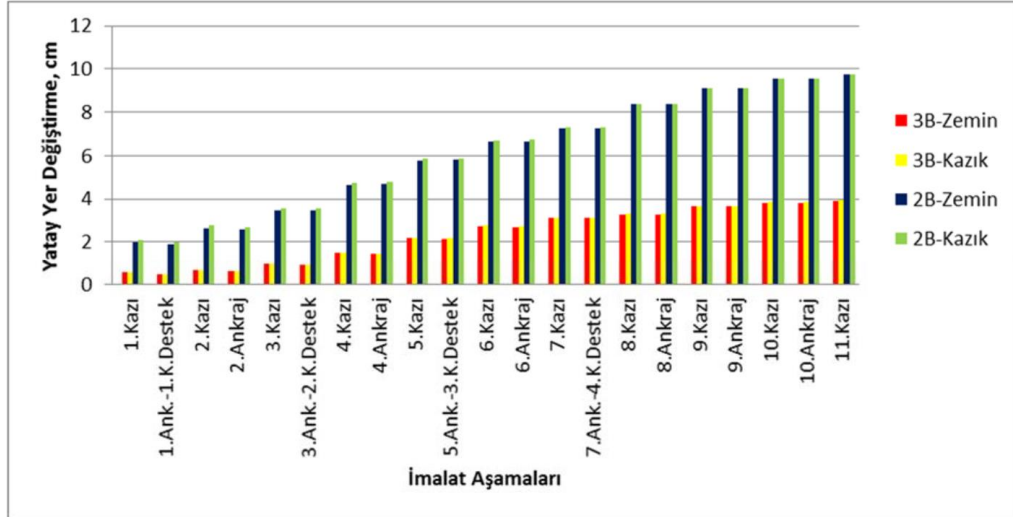
Şekil 3. 46. 3 boyutlu modelleme

Kaynak: (Aktaş vd, 2018)



Şekil 3. 47. Yatay deplasman karşılaştırma grafiği

Kaynak: (Aktaş vd, 2018)

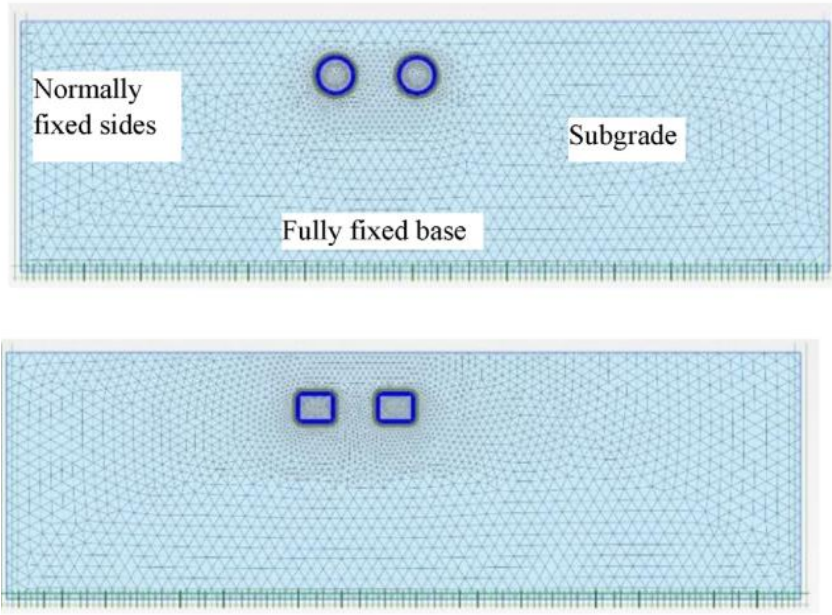


Şekil 3. 48. Düşey deplasman karşılaştırma grafiği

Kaynak: (Aktaş vd, 2018)

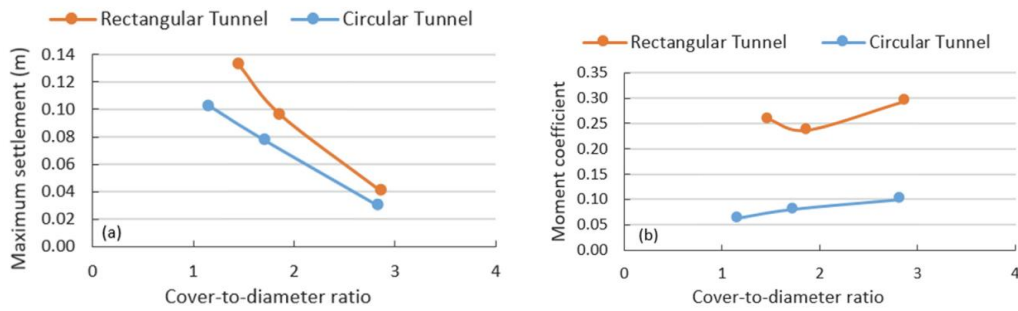
Michael ve Hadi (2019), yaptıkları bu çalışmada çoğunlukla karşılaşılan dairesel tünel ve nadir görülen dikdörtgen tüneller karşılaştırılmıştır (Şekil 3.49). Tüneller ikiz tünel olarak Plaxis 2D programında modellenmiştir. Modellemede 6 ve 15 düğümlü denemeler yapılmış oturma ve momentlerde bir değişiklik görülmediğinden çözüm süresi daha kısa olan 6 düğüm noktası uygulanmıştır. Tünel gömme derinliği 0.8d, 1.3d, 1.7d, 2.5d, 3.3d, 4.2d, ve 5.0d. arasında modeller uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda 1d gömme derinliğine kadar olan modellerde dikdörtgen kesitli tünelleri dairesel kesitlere göre maksimum yüzey oturmasının daha az olduğu sonuçlanmıştır. Fakat dikdörtgen tünellerde moment neredeyse 3 kat fazla çıkmıştır. Bunu azaltmak için daha fazla kaplama malzemesi ve desteğe ihtiyaç duyulur.

Merkezler bir tutularak üç farklı boyut modellendirilmiştir. Tünel kazı boyutu arttıkça dikdörtgen modellerde dairesele göre daha fazla oturma meydana gelmiştir. Modellerin kendi şekillerinde değerlendirilmesi sonucunda büyük kesitin daha fazla oturmaya neden olduğu görülmüştür. Tüneller arası mesafeler incelendiğinde dikdörtgen modellerin dairesel modellere göre daha yakın inşa edilebileceği görülmüştür (Şekil 3.50). Michael ve Hadi çalışmalarının sonucunda sığ tüneller için dikdörtgen tünellerin oluşturacağı oturma oranının daha az çıktığını göstermişlerdir. Tünel boyutlarının artmasının her iki şekil tünelde de oturma ve moment artışı yaratacağını görmüşlerdir (Michael ve Hadi, 2019: 328-339).



Şekil 3. 49. Dairesel ve dikdörtgen tünel modelleri

Kaynak: (Michael ve Hadi, 2019: 331)



Şekil 3. 50. Maksimum oturma ve moment karşılaştırma grafikleri

Kaynak: (Michael ve Hadi, 2019: 333)

4.SONLU ELEMAN YÖNTEMLERİ

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık mühendislik problemlerinin detaylı bir şekilde çözülmesinde aktif kullanılan bir yöntemdir. İlk kez 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için kullanılmıştır. Daha sonrasında uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Zamanla çözüm teknikleri geliştirilerek günümüzde bir çok problemin pratik çözümü haline gelmiştir. Metodun birçok mühendislik alanında kullanılmasının sebebi bir bilgisayar programının sadece giriş verilerini değiştirerek istenilen problemin çözümü için kullanılabilmesidir (Cansız,2014:27). Sonlu elemanlar yöntemi, problemdeki elemanları uygun bir şekilde ayırarak elemanların üzerindeki iç ve dış kuvvetlerin minimum olmasını daha sonra da bu elemanların birleştirilmesi sağlayan bir yöntem uygulamaktadır. Bu yöntemin avantajlarından biri de sınır şartlarının problemin çözüm sırasına göre başlangıçta hesaplara dahil edilmesidir. Bu sayede farklı sınır şartlarını probleme uygularken en başta yapılan yoğun hesapların tekrarına gerek kalmamaktadır (Osmanoğlu, 2007: 41).

Sonlu elemanlar yöntemi geoteknik mühendisliğinde 1996 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemini Reyes ve Deene (1996), yeraltında kayada kazı uygulamasında; Cloung ve Woodward (1967), dolguda gerilmeleri, yanal ve düşey hareketleri belirlemek amacıyla kullanmıştır (Osmanoğlu, 2007: 41).

Geoteknik mühendisliği problemlerinde, sonlu elemanlar yöntemlerinde analizin daha gerçekçi olabilmesi için aşamalı yükleme ve aşamalı kazı yapılmaktadır. Bu analizler sonucunda problemlerdeki boşluk suyu basınçları, zemin suyu akışı, yanal ve düşey yer değiştirmeler, gerilmeler v.b. belirlenmektedir. Non-lineer zemin davranışı sonlu elemanlar analizinde modellenmesi gerekmektedir. Bunun için başlangıç gerilme durumu, zeminin nonlinear gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri ile yükleme aşamaları arasındaki bekleme süreleri analizde gerçeğe yakın olarak belirlenmelidir (Osmanoğlu, 2007: 42).

Sonlu elemanlar ağı tünel yapılarının modellenmesinde önemli bir araçtır. Klasik taşıyıcı sistemlerde belirli sayıda elemanın gene belirli sayıdaki düğüm noktalarından birbirleriyle bağlanmasıyla oluşmaktadır. Her elemanın kuvvet deformasyon özelliğinden yola çıkılarak statik özellikleri belirlenmektedir. Sürekli ortamda ise, sonsuz sayıda düğüm noktası mevcuttur ve bu durum çözümü zorlaştıran bir çok düğüm noktasının varlığına neden olur. Sonlu elemanlar yöntemi, belirli sayıdaki düğüm noktalarının birbirine bağlanan birim elemanlara bölünebileceği varsayımından hareket eder. Birim elemanların kenarları boyunca etki gösteren gerilmeler “fiktif kuvvet” olarak düğüm noktalarına bindirilirlir. Bu şekilde

sürekli ortamı, nümerik yoldan ifade etme imkanı sağlar. Sonlu elemanlar yöntemi ile kaplama ve zeminin tüm özellikleri dikkate alındığı için, kaplama ve zeminin birbirlerini olan etkisi gerçeğe yakın bir şekilde ifade etmek mümkün oluyor. Kompozit sistemde her elemanın aldığı yük, hesap akışının gerçek bir sonuç olarak belirlenmektedir. Bunun sonucunda, zeminde oluşabilecek kemerlenmeleri, yüklerin akışını ve aktarmalarını, sonlu elemanlar analizinde takip etmek ve sonuçları doğrultusunda tedbirler almak mümkün olmaktadır (Osmanoğlu, 2007: 42).

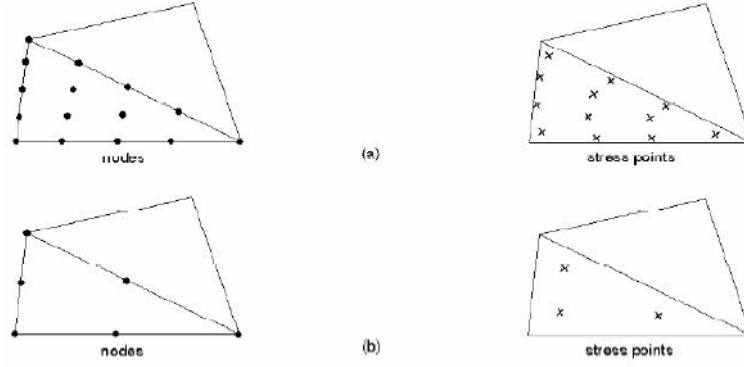
4.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Kullanıldığı Programlar

Günümüzde birçok alanda sonlu elemanlar programları kullanılmaktadır. Örnek olarak; zemin mekaniği, akışkanlar mekaniği, uçak mühendisliği, nükleer mühendislik, kaya mekaniği vb. Günümüzde birçok sonlu eleman programı mevcuttur. Problemler için en gerçekçi sonuç verecek program seçilerek çalışılabilmektedir. Bu programlara; Plaxis 2D/3D, Flac 2D/3D, ABAQUS, Diana, Midas GTS şeklinde örnekler verilebilir. Bu çalışmada kullanılacak olan Plaxis 2D programı ayrıntılı şekilde anlatılmıştır.

4.1.1. Plaxis Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar programlarından biri olan Plaxis 2D/3D geoteknik mühendisliği problemlerinin analizi için geliştirilmiş bir programdır. Bu program, projelerin tasarımında ihtiyaç duyulan deformasyon ve stabilize analizleri, gerilme-şekil değiştirme, zemin yapı etkileşimi, yükleme durumları, taşıma gücü, konsolidasyon, akım ağı, zemin dinamiği konularında ve malzemenin çeşitli olduğu durumlarda kullanılmaktadır ve neredeyse gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir (Osmanoğlu, 2007: 44).

Sonlu elemanlar yöntemine göre, sürekli olan bir ortam birçok elemana ayrılır. Her bir eleman üzerindeki düğüm noktaları bir serbestlik derecesine sahiptir. Plaxis programında sonlu elemanlar ağının oluşturulması sırasında hücreler 6 veya 15 düğüm noktalı üçgen elemanlara ayrılırlar (Şekil 4.1). Gerilmelerin ve göçme yüzeylelerinin daha gerçekçi hesaplanabilmeleri için biraz daha fazla zaman olsa bile 15 düğüm noktalı elemanın seçilmesi daha doğrudur. Sonlu elemanlar hesabı sırasında deplasmanlar düğüm noktalarında hesaplanır (Osmanoğlu, 2007: 45).

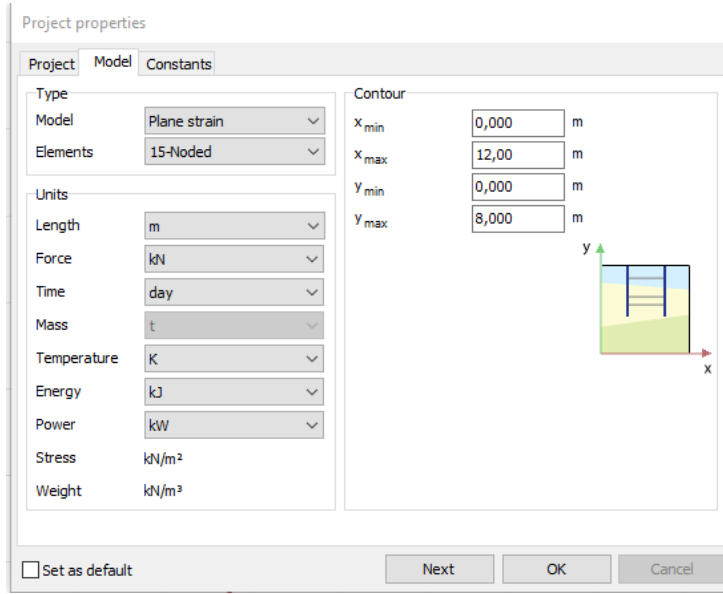


Şekil 4. 1. Dügümler ve gerilme noktaları

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manual, 2019: 21)

Plaxisde Material Sets ana başlığı altında zemin ve yapısal elemanların özellikleri (Soil & Interface, Anchor, Beam ve Geotextile) tanımlanabilir. Plaxis programında zemin özelliklerini belirlemek amacı ile zemin mekaniği problemlerinin analizinde çok kullanılan Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil (Model-HS), Soft Soil Creep (Model-SSC) gibi birkaç tane zemin modeli bulunmaktadır (Plaxis 2D Reference Manual, 2019).

Öncelikle programda, analizi istenen durumun sınırları ve geometrisi oluşturulur. Sınırların belirlenmesi için program açıldığında karşılaşılan project properties penceresindeki model kısmına değerler girilir(Şekil 4.2.). Programda 5 kısım bulunmaktadır: soil, structures, mesh, flow conditions ve staged construction (Şekil 4.3). Soil kısmında bulunan “ Create borehole” butonu ile geometrik şekil ve yer altı su seviyesi tanımlanır ayrıca bu pencereden materials kısmından zemin özellikleri de geometriye atanabilir(Şekil 4.4). Geometri oluşturulduktan sonra projede bulunan yapısal elemanlar structures kısmından eklenir. Material sets butonundan her eleman çeşiti için özellikler girilir ve bu özellikler elemanlara atanabilir (Şekil 4.5). Structures kısmında tünel için ayrı bir tunnel butonu bulunur. Bu buton yardımıyla tünel şekli, çapı, bulunacağı konumu ve malzeme özellikleri girilir (Şekil 4.6). Projede bulunan elemanlar tanımlandıktan sonra 3. mesh kısmına geçilir. Bu kısımda zeminimizin sonlu elemanlar ağı belirlenir. Refine mesh butonu ile ağ büyütülebilir veya coarsen mesh butonu ile küçültülebilir. 4. kısımda YASS görüntülenir. 5. kısım hesaplama kısmıdır. Burada projede belirlendiği gibi sırasıyla kademeli olarak yapılacaklar belirtilir. Tamamlanıp son haline gelindikten sonra analizini daha iyi yorumlamak için select points for curves butonundan projeden noktalar seçilir. Seçim tamamlandıktan sonra calculate butonu ile hesaplamaya geçilir. Hesap bittikten sonra view calculation results butonu ile sonuçlar görüntülenir istenirse açılan penceredeki curves butonundan grafikler çizilir (Şekil 4.7) .



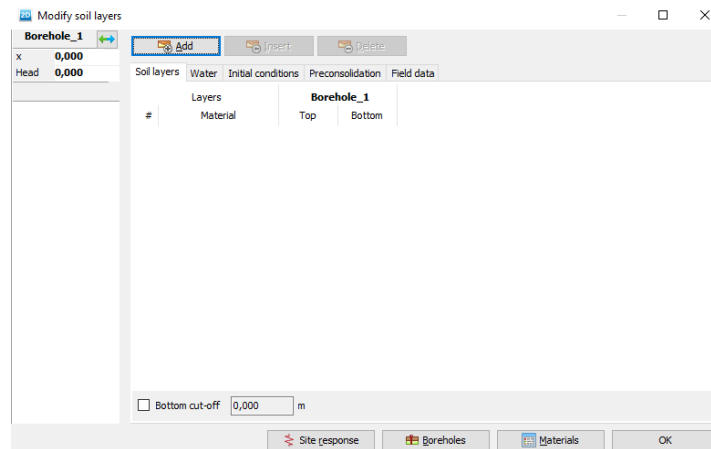
Şekil 4. 2. Project properties penceresi

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manual, 2019)



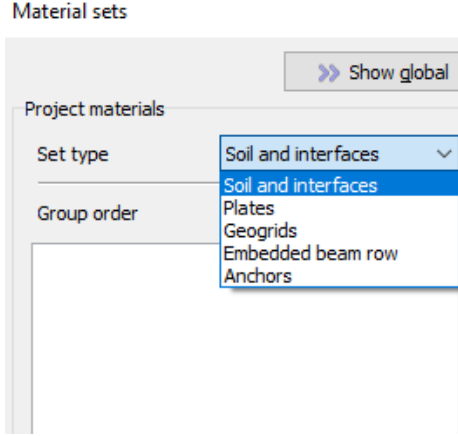
Şekil 4. 3. Programdaki kısımlar

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manual, 2019)



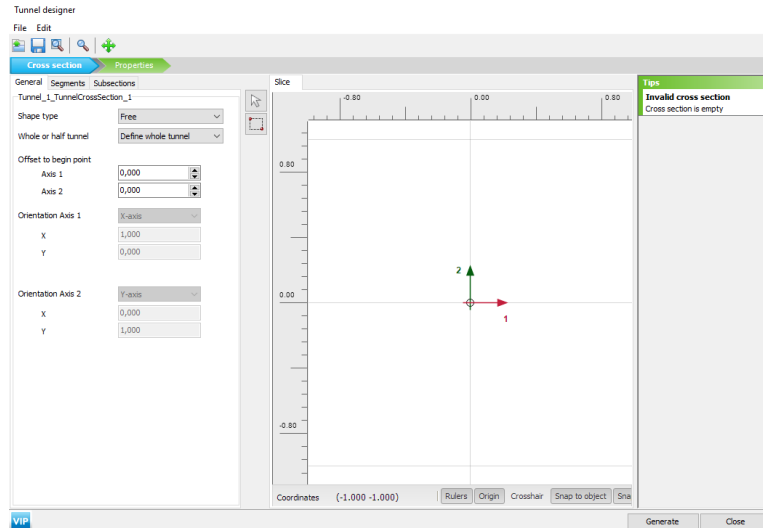
Şekil 4. 4. Geometrinin oluşturulduğu pencere

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manual, 2019)



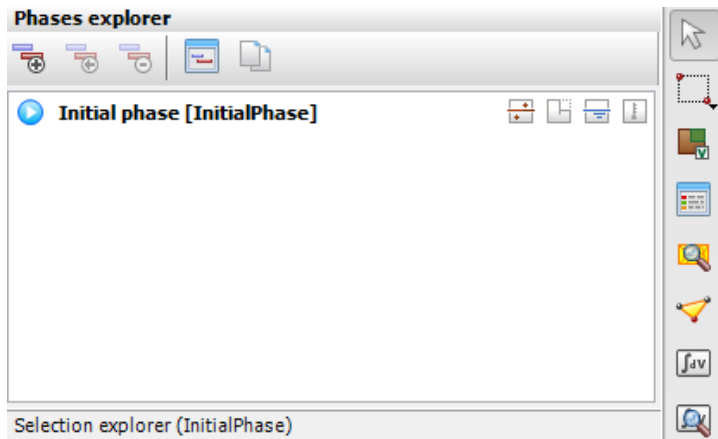
Şekil 4. 5. Yapısal elemanların özelliklerinin girildiği penceresi

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manual, 2019)



Şekil 4. 6. Tünel geometrisinin oluşturulması

Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manual, 2019)



Şekil 4. 7. Hesap penceresi

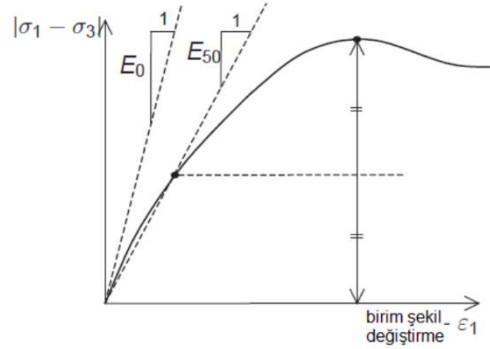
Kaynak: (Plaxis 2D Reference Manual, 2019)

4.2. Zemin Metaryal Modelleri

4.2.1. Mohr-Coulomb

Mohr-Coulomb, zeminin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin birinci bölgesinde elastik, ikinci bölgesinde ise plastik bir malzeme olduğu varsayımına dayanan bir zemin modelidir. Bu model zemin katmanlarının rijitliklerinin derinlikle ilişkisi olmadığını kabul edip, ortalama bir rijitlik parametresi kullandığından deformasyon değerleri doğru çıkmamakta ancak nispeten hızlı analizler gerçekleştirilmektedir. Bu model gevşek kumlar ve aşırı konsolide kil davranışını da iyi modelleyemez ve yükleme-boşaltma durumları için bir ayırım yapılamaz. Bu sebeple kazı problemlerinde genellikle kullanılmamaktadır. Daha çok limit analiz problemlerinde kullanılır. Bunlara örnek olarak toprak dolgu barajların, şevlerin, istinat duvarlarının analizleri verilebilir. Ayrıca yüzeysel temel projelerinin taşıma gücü hesaplarında kullanılması da uygundur. Mohr-Coulomb modelde zemin, elastisite modülü, poisson oranı, elastik parametreleri ile içsel sürtünme açısı, kohezyon ve dilatasyon açısı plastik parametreleriyle ifade edilir (Bahadır ve Onur, 2017: 585).

Mohr Coulomb zemin modeli için rijitliğin belirlenmesinde E_0 , E_{50} ve E_{ur} olmak üzere üç farklı rijitlik parametresi rol oynamaktadır. Üç eksenli basınç deneylerinde elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tanjant modülü E_0 ile gösterilirken sekant modülü E_{50} ile gösterilmektedir (Şekil 4.8). Lineer elastik aralığı geniş malzemelerde E_0 kullanımı gerçekçi sonuçlar vermediğinden zemin yükleme durumu için genellikle E_{50} modülü kullanılmaktadır (Şengün, 2013: 42).



Şekil 4. 8. Hesap penceresi

Kaynak: (Şengün, 2013: 42)

4.2.2. Pekleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model)

Pekleşen zemin (Hardening soil) modeli elastik teori yerine plastik teoriyi kullanır. Bu teoride hesaplanan plastik şekil değiştirmeler çoklu yüzey (multi surface) akış kriterine göre hesaplanmaktadır. Pekleşen zemin modeli gerilmeye bağlı rijitlik değerlerini dikkate almaktadır. Bu modelde, kohezyolu ve kohezyonsuz zeminlerde doğru sonuçlara ulaşılmaktadır. Fakat çok aşırı konsolide killerin zemin davranışları çok karmaşık olduğundan incelerken dikkat edilmelidir (Bahadır ve Onur, 2017:585). Pekleşen zemin modeli için kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ), poisson oranı (ν), dilatasyon açısı (Ψ), üstel parametre (m), referans gerilme (p^{ref}) ve nihai gerilme oranı (Rf), üç eksenli yükleme modülü (E_{50}), üç eksenli (E_{ur}) parametreleri kullanılmaktadır (Şengün, 2013: 47).

Pekleşen zemin modelinde üç farklı rijitlik parametresi kullanılır. Bundan dolayı zeminin yükleme-boşaltma durumları gerçek davranışa daha yakın modellenir. Pekleşen zemin modellerinde hesaplanan rijitlik parametrelerinde gerilmeye (yükleme seviyesi) bağlı rijitlik değeri için girilen üs değeri (m), kum ve siltler için genellikle 0.5~1, yumuşak zeminler için genellikle 1 alınmaktadır (Bahadır, 2018: 51).

İlk yükleme sırasında gerilme-şekil değiştirme davranışı nonlineerdir. E_{50} , ilk yüklemedeki gerilmeye bağlı olarak hesaplanan rijitlik modülüdür. E_{50}^{ref} modülü $p_{ref}=100$ kPa referans gerilmesine karşılık gelen sekant rijitliğidir (Bahadır, 2018: 52).

$$E_{50}^{ref}; E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos\phi - \sigma'_3 \sin\phi}{c \cos\phi + p^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad 4.1$$

E_{ur}^{ref} zeminin üç eksenli basınç deneyinde yük boşalması sırasındaki rijitliğini ifade etmektedir. PLAXIS standart ayarlarında $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$ olarak hesaplanır (Bahadır, 2018: 52).

$$E_{ur}^{ref}; E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos\phi - \sigma'_3 \sin\phi}{c \cos\phi + p^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad 4.2$$

E_{oed}^{ref} zeminin ödometre deneyinde p_{ref} basıncına karşılık gelen teğet modülü ifade etmektedir (Bahadır, 2018: 53).

$$E_{oed}^{ref}; E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos\phi - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \sin\phi}{c \cos\phi + p^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad 4.3$$

4.2.3. Hardening Soil Small Strain Model

Hardening soil small strain model (Hsmall) küçük birim deformasyon rijitliğinde zeminin artan rijitliğini de dikkate almaktadır. HS model parametrelerinin yanında Hsmall

modelde başlangıç birim deformasyon geçmişi modülü, küçük birim deformasyon kayma modülü (G_0^{ref}) ve kayma modülünün küçük deformasyon kayma modülüne göre %70 azalması durumundaki birim deformasyon seviyesi olarak γ_{70} hesaplanır (Bahadır, 2018: 56-57).

$$\gamma_{70} \approx \frac{1}{9G_0} [2c'(1 + \cos 2\phi') - \sigma'_1(1 + K_0)\sin 2\phi'] \quad 4.4$$

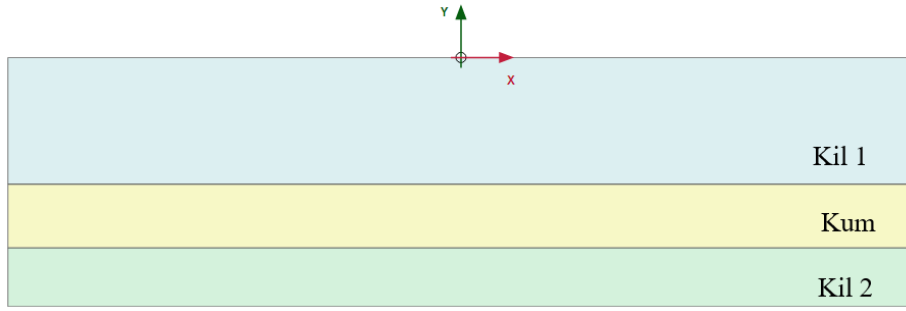
$$G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad 4.5$$

γ_{70} değerini kumlar için $1.10^{-4} - 2.10^{-4}$ killer için $5.10^{-5} - 1.10^{-4}$ aralığında olduğunda uygun sonuç verildiği Zimmermann ve çalışma arkadaşları tarafından ortaya konulmuştur. Yamashita ve arkadaşları ise kil, kum ve yumuşak kaya gibi çeşitli zeminler üzerinde yaptıkları üç eksenli ve çevrimli testlerde bu değerleri $10^{-5} - 10^{-3}$ aralığında hesaplamışlardır. Bu model küçük deformasyonlar gösteren çoğunlukla dolgu malzemesi olarak kullanılan granüler zeminlerde ve aşırı konsolide olmuş killerde kullanılması daha uygundur (Bahadır ve Onur, 2017: 586).

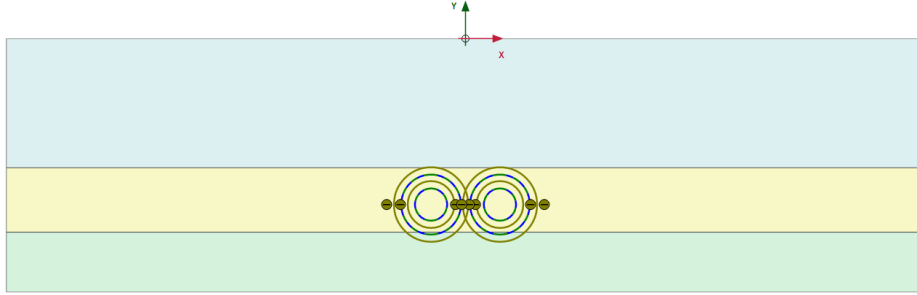
5. ANALİZ ÇALIŞMASI

5.1. Analiz Hakkında Genel Bilgi

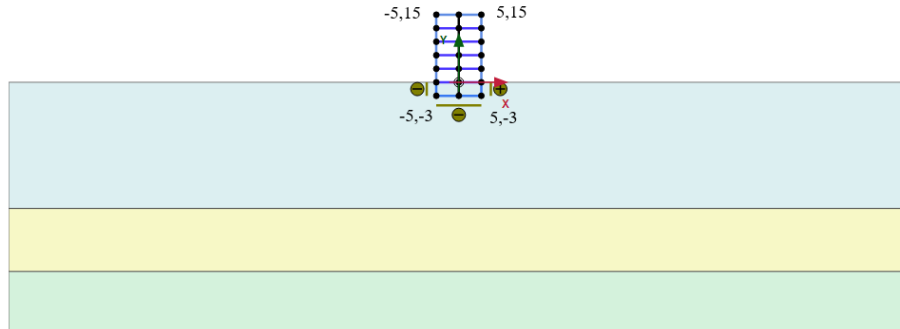
Bu tezde Plaxis 2D programı kullanılarak ikiz tünellerin (Şekil5.2) belirli parametreleri değiştirilerek bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Projeler dinamik etki altında çözülmüştür. Modellemeler hepsinde aynı zemin şeması kullanılmıştır. Zemin yüzeyinden (0 kotu) 28 metre aşağısına kadar 1. kil tabakası, -28 kotundan aşağıya 14 metre (-42 kotu) kum tabakası, -42 kotundan aşağıya 13 metre (-55 kotu) 2. kil tabakası bulunur (Şekil 5.1). Zemin malzeme özellikleri Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'te verilmiştir. Bazı modellerde kullanmak için 1 i bodrum olmak üzere 6 katlı bina eklenmiştir (Şekil 5.3). Binada kullanılan parametreler tablo 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5. 1. Zemin tabakaları



Şekil 5. 2. Uygulamadaki ikiz tüneller



Şekil 5. 3. Uygulamadaki bina şeması

Tablo 5. 1. Mohr coulom zemin malzeme özellikleri

Name		Kil 1	Kum	Kil 2	Unit
Model		MC	MC	MC	
Type of material behaviour		Undrained	Undrained	Undrained	
Unit weight above phreatic line	γ_{unsat}	15	18	16	kN/m ³
Unit weight below phreatic line	γ_{sat}	18	19	18,5	kN/m ³
Secant stiffness in standard drained triaxial test	E_{50}	2434	43800	43810	kN/m ²
Young's modulud inc.	E_{inc}	786	750	945,7	kN/m ²
Reference level	γ_{ref}	0	-28	-42	kN/m ²
Poisson's ratio	ν_{nu}	0,33	0,33	0,33	
Cohesion	c_{ref}	15	1	22	kN/m ²
Friction angle	ϕ	25	35	28	°
Dilatancy parameter	ψ	0	5	0	°
Interface strength	R	0,9	0,67	0,9	

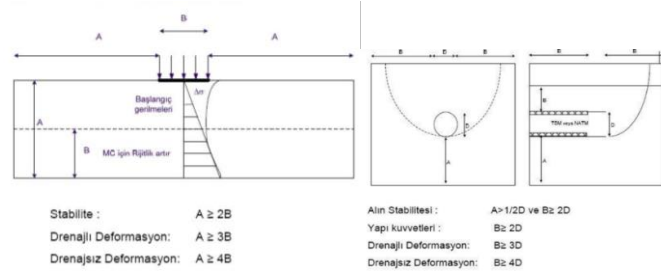
Tablo 5. 2. Hardening soil zemin malzeme özellikleri

Name		Kil 1	Kum	Kil 2	Unit
Model		HS	HS	HS	
Type of material behaviour		Undrained	Undrained	Undrained	
Unit weight above phreatic line	γ_{unsat}	15	18	16	kN/m ³
Unit weight below phreatic line	γ_{sat}	18	19	18,5	kN/m ³
Secant stiffness in standard drained triaxial test	$E_{50,ref}$	10000	30000	14000	kN/m ²
Tanget stiffness for primary oedometer loading	$E_{oed,ref}$	10000	30000	14000	kN/m ²
Unloading/ reloading stiffness	$E_{u,ref}$	30000	90000	42000	kN/m ²
Power for stress-level dependency of stiffness	m	1	0,5	1	
Cohesion	c_{ref}	15	1	22	kN/m ²
Friction angle	ϕ	25	35	28	°
Dilatancy parameter	ψ	0	5	0	°
Poisson's ratio	ν_{ur}	0,2	0,2	0,2	
Reference pressure	p_{ref}	100	100	100	
K0- value for normal consolidation	k_0^{nc}	0,5774	0,4264	0,531	
Interface strength	R	0,9	0,67	0,9	

Tablo 5. 3. Hardenin soil small zemin malzeme özellikleri

Name		Kil 1	Kum	Kil 2	Unit
Model		HSsmall	HSsmall	HSsmall	
Type of material behaviour		Undrained	Undrained	Undrained	
Unit weight above phreatic line	γ_{unsat}	15	18	16	kN/m3
Unit weight below phreatic line	γ_{sat}	18	19	18,5	kN/m3
Secant stiffness in standard drained triaxial test	$E_{50,ref}$	10000	30000	14000	kN/m2
Target stiffness for primary oedometer loading	$E_{oed,ref}$	10000	30000	14000	kN/m2
Unloading/ reloading stiffness	$E_{u,ref}$	30000	90000	42000	kN/m2
Power for stress-level dependency of stiffness	m	1	0,5	1	
Cohesion	c_{ref}	15	1	22	kN/m2
Friction angle	ϕ	25	35	28	°
Dilatancy parameter	ψ	0	5	0	°
Shear strain at which $G_s=0,722G_0$	$\gamma_{0,7}$	5×10^{-5}	2×10^{-4}	7×10^{-5}	
Shear modulus at very small strains	G_0^{ref}	90000	180000	126000	kN/m2
Poisson's ratio	ν_{nu}	0,2	0,2	0,2	
Reference pressure	p_{ref}	100	100	100	
K0- value for normal consolidation	k_0^{nc}	0,5774	0,426	0,531	
Interface strength	R	0,9	0,67	0,9	

Proje için hazırlanan şema sınır koşulları doğrultusunda hesaplanarak seçilmiştir (Şekil 5.4 a,b), (Şekil 5.5). Eleman küçültme sınırlandırılması deneme yanılma yolu ile toplamda 8 farklı durum için (200, 120, 100, 80, 60, 50, 40, 30 metre) incelenip grafikleri karşılaştırılması durumunda 50 metre seçilmiştir (Şekil 5.6 a,b,c,d,e,f,g,h). Dinamik etkinin eleman boyutlarının büyük kalmasından dolayı düzgün etki etmediğinden coarseness factor 0,08839 seçilmiştir. Dinamik etkinin binanın alt kısmındaki elemanlar büyük kaldığı için etki etmediğinden zeminden 10, 15, 20 metre derinliğe kadar elemanlar daha küçük duruma getirilmiştir. Sonuç olarak 10 metre seçilmiştir (Şekil 5.7). Bu kısımdaki coarseness factor 0,03125 seçilmiştir. Tünel ve yapı arasındaki mesafe diğer çalışmalardan yola çıkılarak en az etki yaratması için 26 metre seçilmiştir.

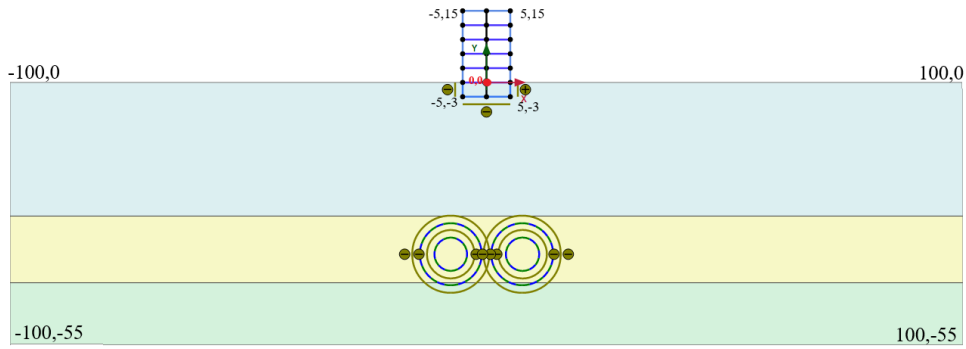


a. Yüzeysel Temeller

b. Tüneller

Şekil 5. 4. Sınır koşullarının belirlenmesi

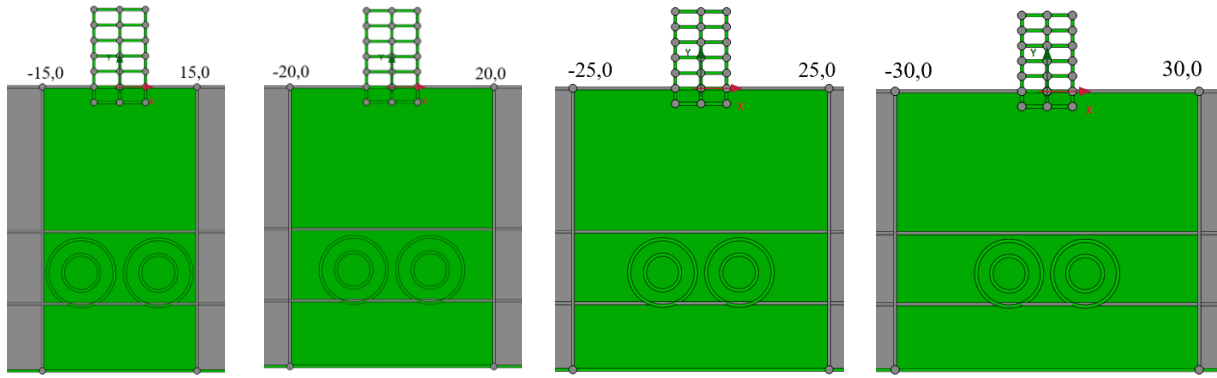
Kaynak : (Brinkgreve, 2005)



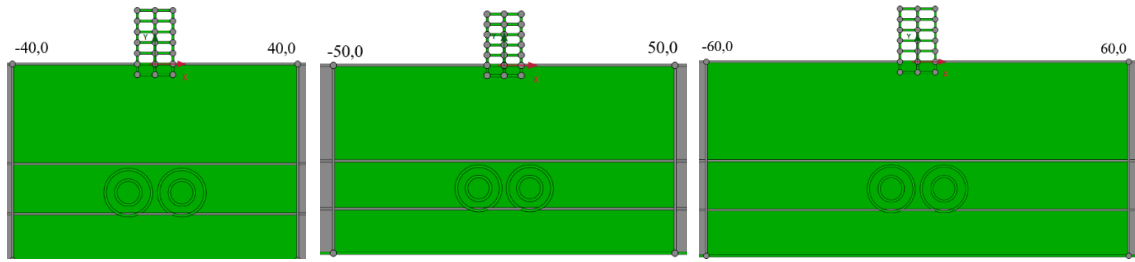
Şekil 5. 5. Uygulama modelindeki sınırlar

Tablo 5. 4. Uygulamada kullanılan plate özellikleri

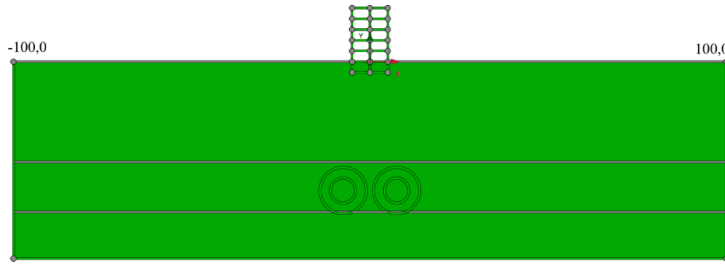
Parametreler		Bina Dış İskelet	Bina İç İskelet	Bodrum Çevresi	Tünel	Deprem etkidiği yüzey çizgisi	Unit
Type of behaviour	Material type	Elastik	Elastik	Elastik	Elastik	Elastik	
Normal Stiffness	EA	9000000	9000000	12000000	14000000	1000	kN/m
Flexural rigidity	EI	67500	67500	160000	143000	1	kNm ² /m
Unit weight	w	4,8	3,6	14,4	8,4	0,499	kN/m/m
Poisson's ratio	v	0	0	0,23	0,15	0	-



a.30 metre küçültme b.40 metre küçültme c.50 metre küçültme d.60 metre küçültme

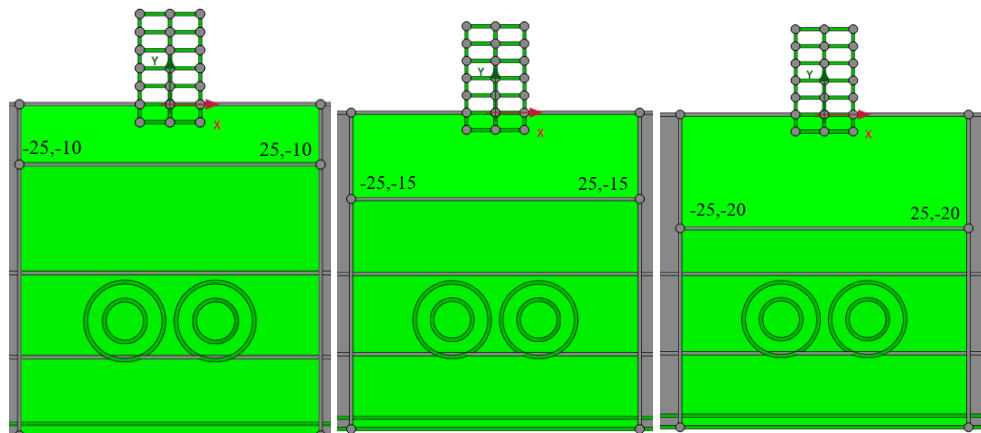


e.80 metre küçültme f.100 metre küçültme g.120 metre küçültme



h.200 metre küçültme

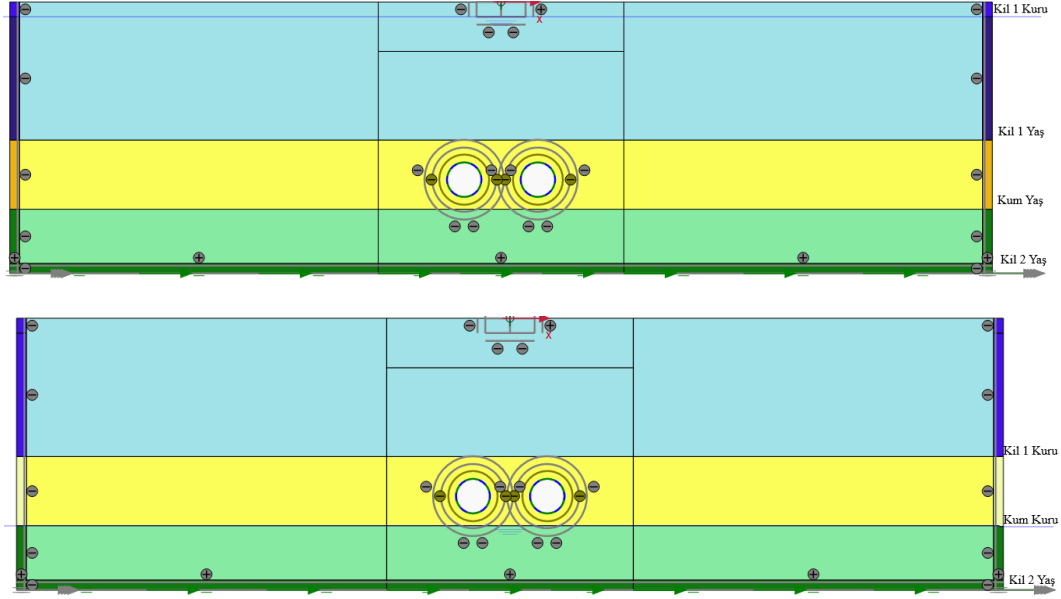
Şekil 5. 6. Mesh küçültme sınırının belirlenmesi



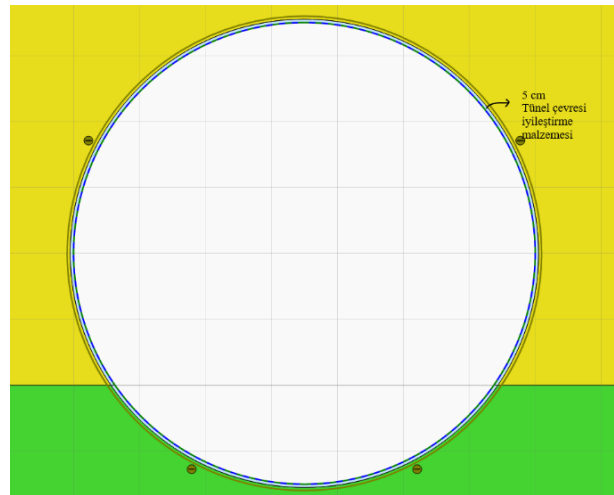
a.10 metre küçültme b.15 metre küçültme c.20 metre küçültme

Şekil 5. 7. Bina altında küçülte sınırının belirlenmesi

Projelerin uzun vadedeki sonucu bulunmak istendiğinden drenajlı çözüm gerçekleştirilmiş. Deprem ani bir gelişme olup drenaja izin vermediğinden parametreler drenajsız girilip hesaplama bölümünde deprem hariç diğer fazlar drenajlı olarak seçilmiştir. . Dinamik analiz kısmında yakınsama problemi ortaya çıkmıştır (Error kod 39). Bu durum için Plaxis'in önerdiği model çevreleme yöntemi kullanılmıştır (Şekil 5.8). Tün analizler için model çevrelemesi yapılmış bununla beraber 6 adet analizde meydana gelen yakınsama sorunundan dolayı tünel çevresinde de aynı yöntem izlenmiştir.

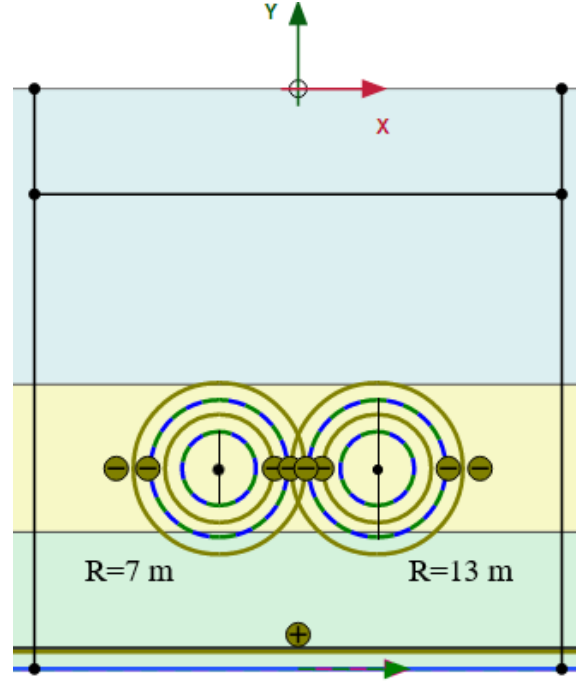


Şekil 5. 8. Uygulamadaki beton tabakaları

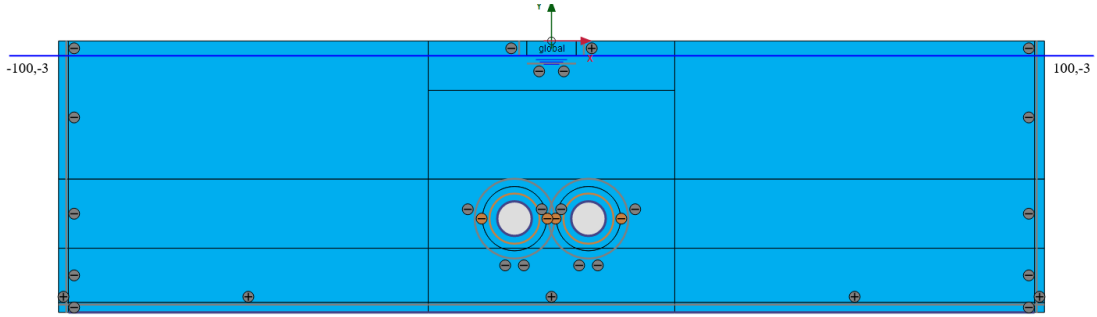


Şekil 5. 9. Sorun çıkan modellerde tünel kaplama uygulamaları

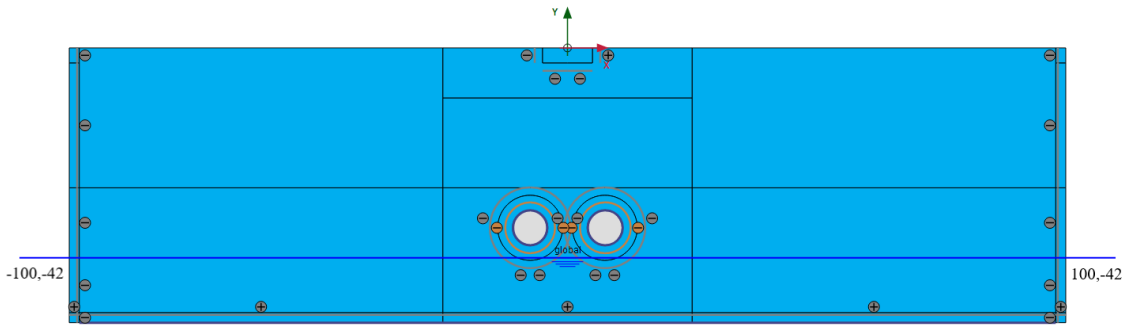
Uygulamalarda yeraltı su seviyesi(YASS), tünel çapı, tünel konumu, üzerine etkiyen yük, zemin modeli ve zemin sönümü değiştirilerek karşılaştırma yapılmıştır (Şekil5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16).



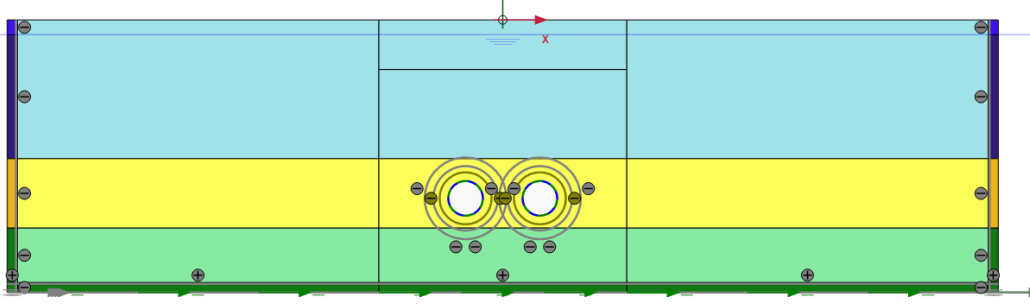
Şekil 5.10. Tünel çapları



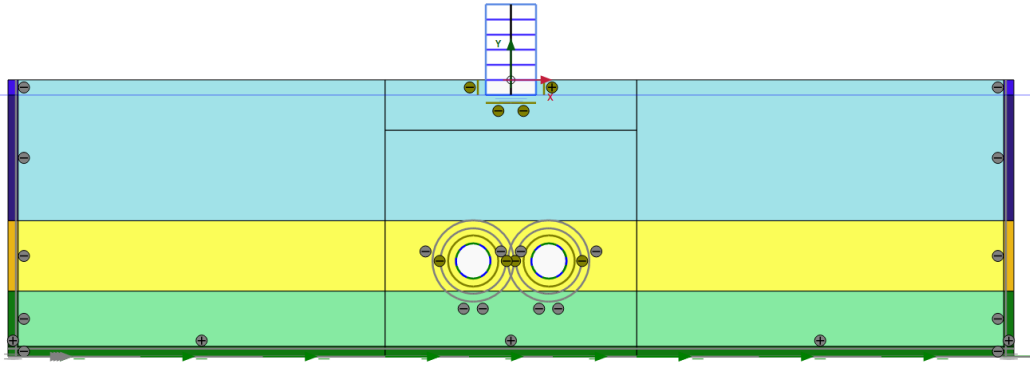
Şekil 5.11. -3 metrede yeraltı su seviyesi



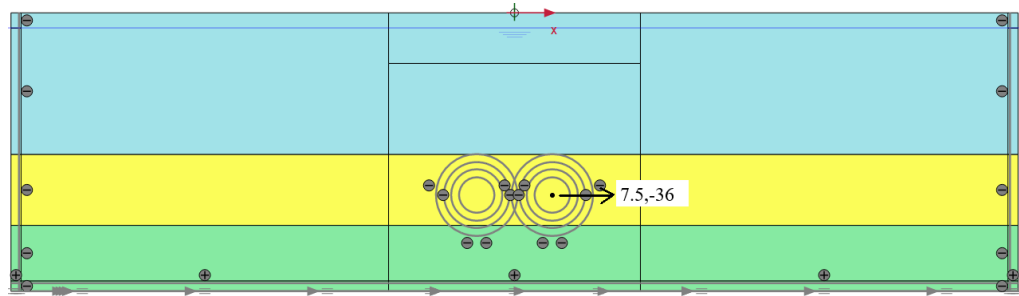
Şekil 5.12. -42 metrede yeraltı su seviyesi



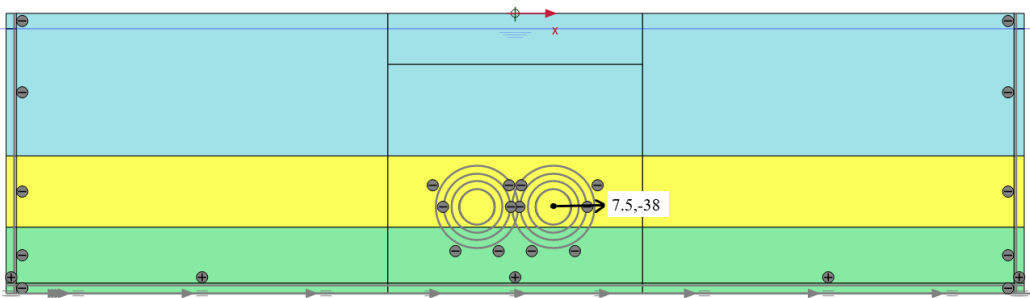
Şekil 5.13. Bina yükü etkimeyen tünelin uygulama modeli



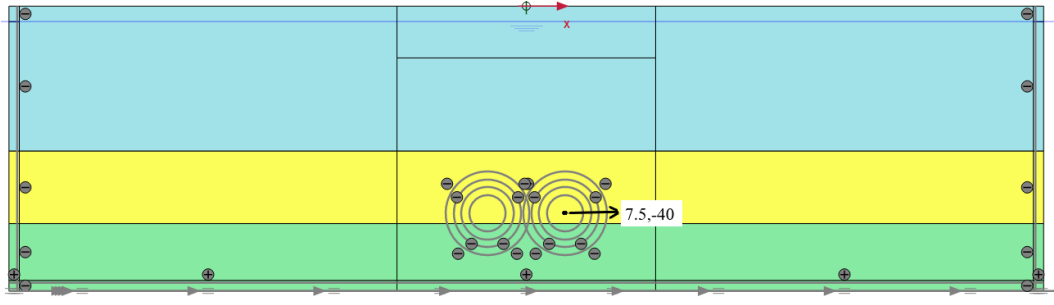
Şekil 5.14. Bina yükü etkileyen tünelin uygulama modeli



Şekil 5.15. 36 metre derinlikteki tünel modeli



Şekil 5.16. 38 metre derinlikteki tünel modeli

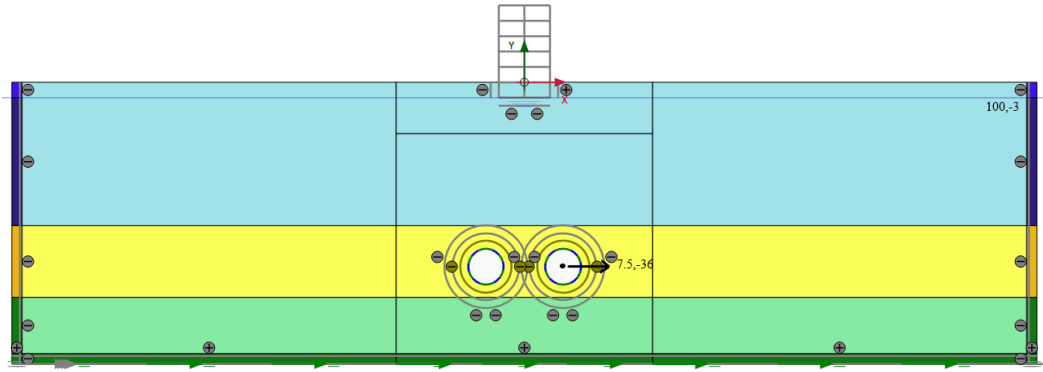


Şekil 5. 17. 40 metre derinlikteki tünel modeli

Modelleme (0,0) noktasından simetrik olduğundan çözüm aşamasında sadece yarısı kullanılmıştır. Şeması değişik olan modeller aşağıda verilmiştir.

5.2. Proje Şemaları

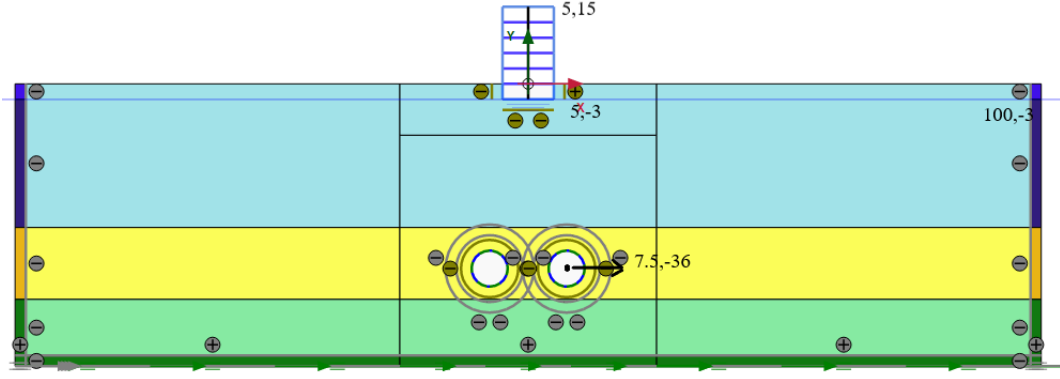
Şema 1: 7 metre çaplı tünellerin ($r=7$), -36 metre derinlikte ($y=36$) ve YASS -3 metre ($s=3$) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.'17 de verilmiştir.



Şekil 5. 18. y36r7s3 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

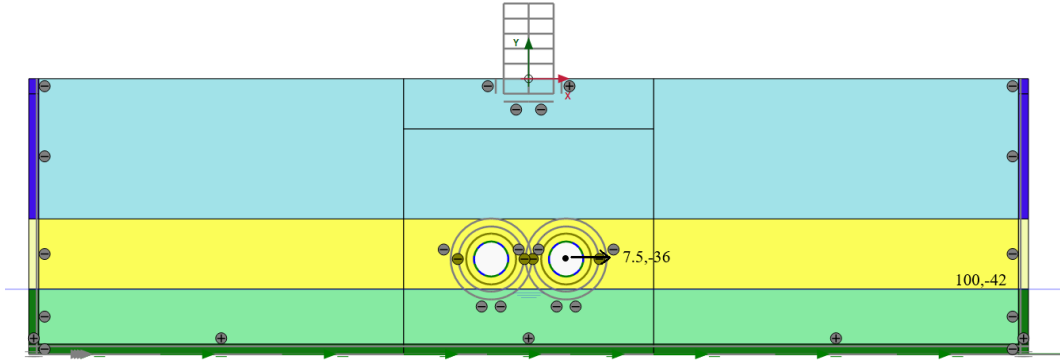
Şema 2: 7 metre çaplı tünellerin ($r=7$), -36 metre derinlikte ($y=36$), YASS -3 metre ($s=3$) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.18'de verilmiştir.



Şekil 5. 19. y36r7s3b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

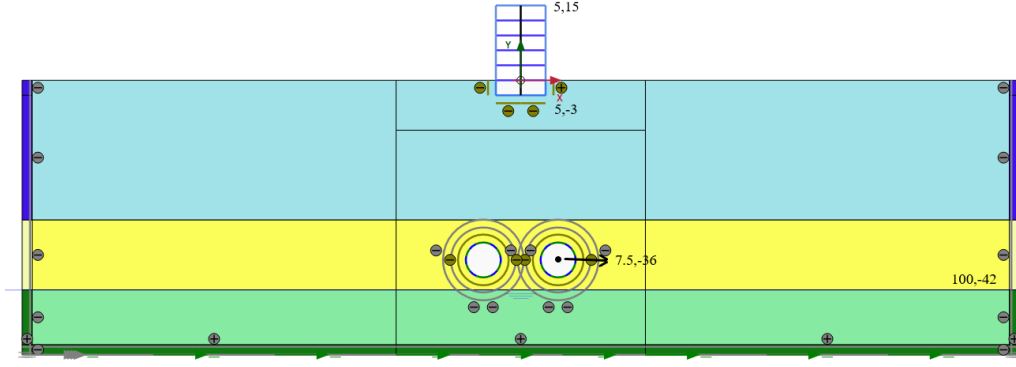
Şema 3: 7 metre çaplı tünellerin ($r=7$), -36 metre derinlikte ($y=36$) ve YASS -42 metre ($s=42$) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5. 20. y36r7s42 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

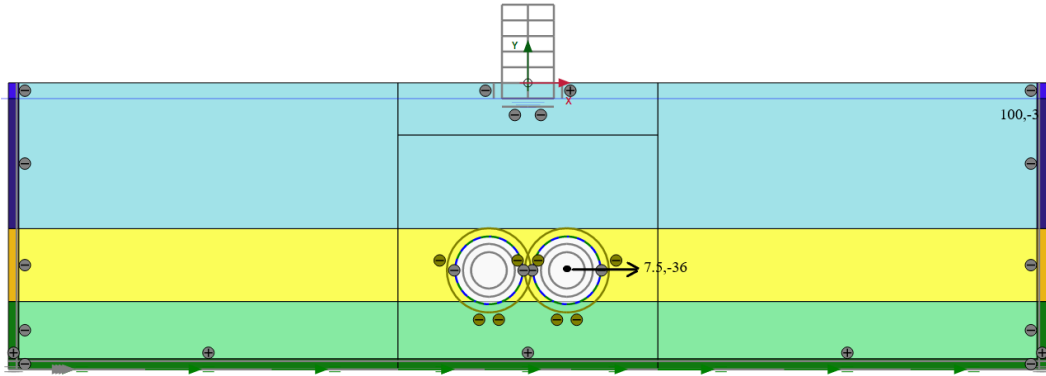
Şema 4: 7 metre çaplı tünellerin ($r=7$), -36 metre derinlikte ($y=36$), YASS -42 metre ($s=42$) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.20'de verilmiştir.



Şekil 5. 21. y36r7s42b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

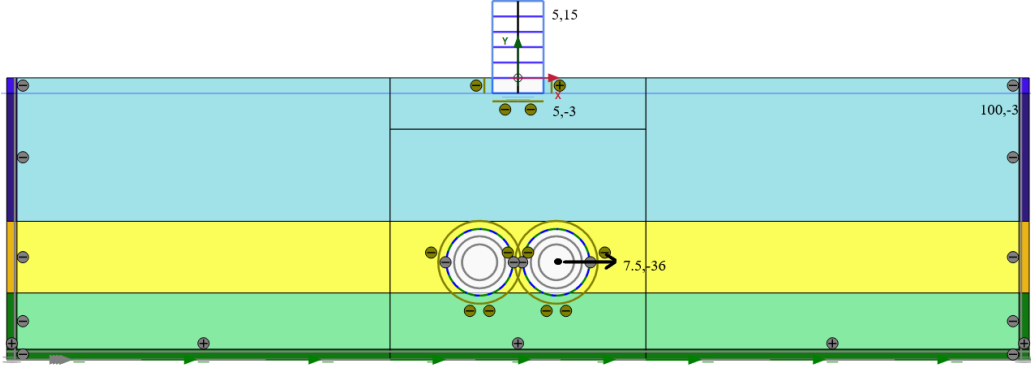
Şema 5: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -36 metre derinlikte ($y=36$) ve YASS -3 metre ($s=3$) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5. 22. y36r13s3 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

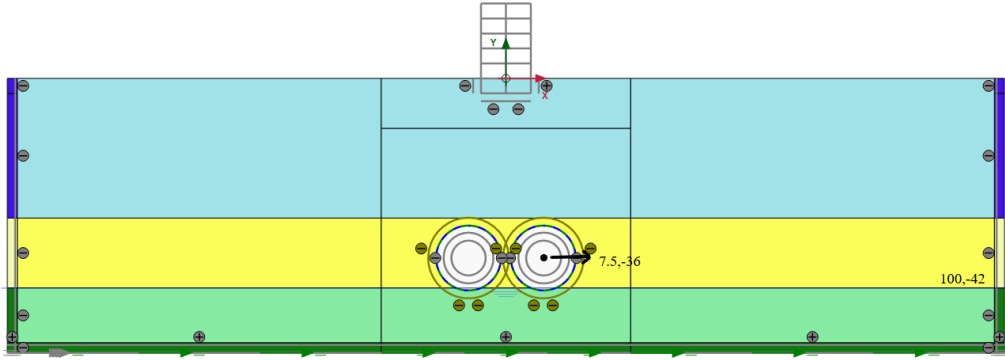
Şema 6: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -36 metre derinlikte ($y=36$), YASS -3 metre ($s=3$) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5. 23. y36r13s3b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

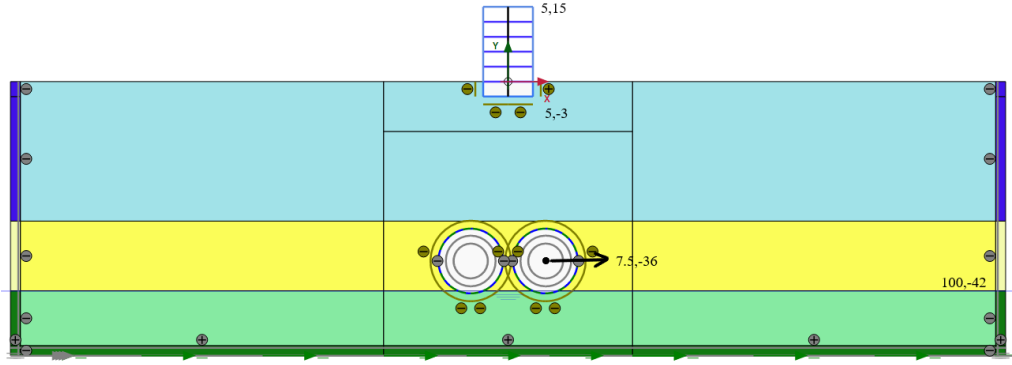
Şema 7: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -36 metre derinlikte ($y=36$) ve YASS -42 metre ($s=42$) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.23'te verilmiştir.



Şekil 5. 24. y36r13s42 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

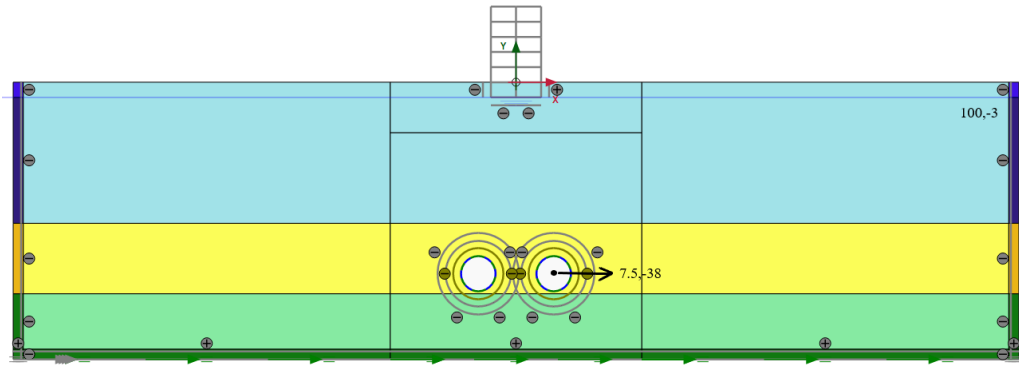
Şema 8: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -36 metre derinlikte ($y=36$), YASS -42 metre ($s=42$) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5. 25. y36r13s42b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

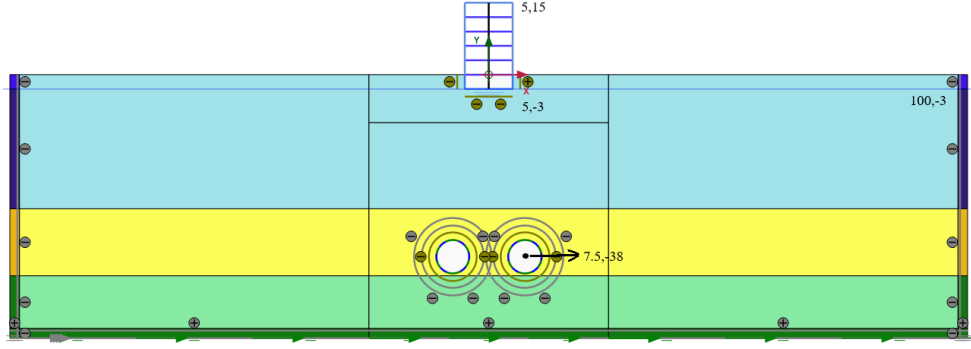
Şema 9: 7 metre çaplı tünellerin (r=7), -38 metre derinlikte (y=38) ve YASS -3 metre (s=3) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5. 26. y38r7s3 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

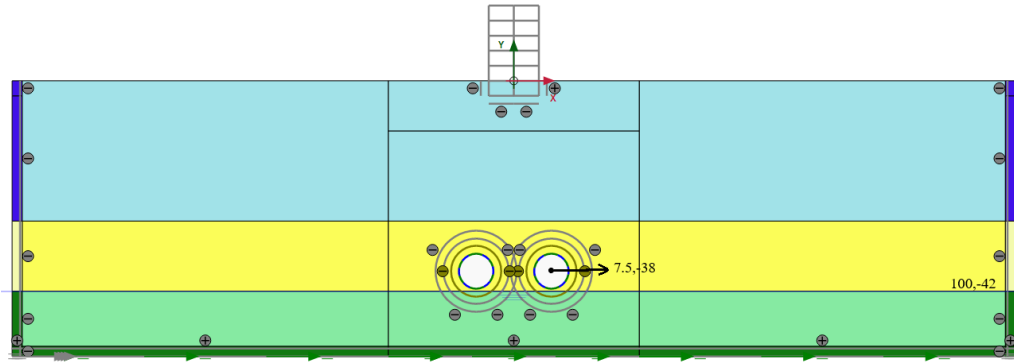
Şema 10: 7 metre çaplı tünellerin (r=7), -38 metre derinlikte (y=36), YASS -3 metre (s=3) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.26'da verilmiştir.



Şekil 5. 27. y38r7s3b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

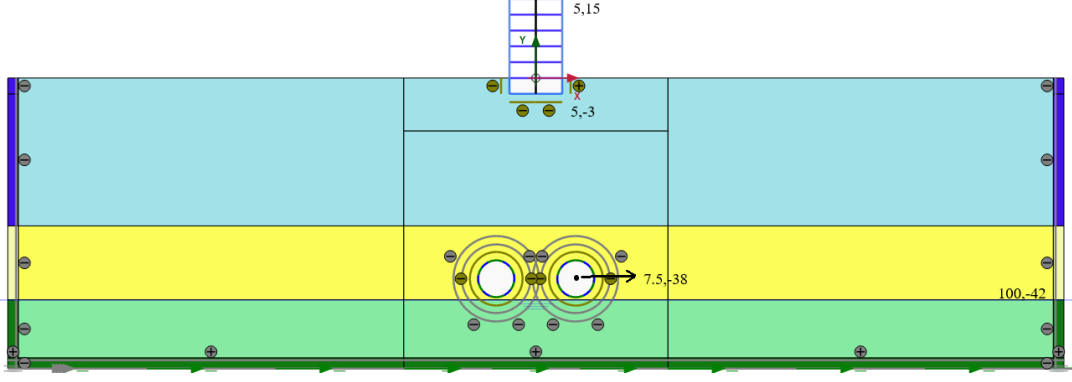
Şema 11: 7 metre çaplı tünellerin ($r=7$), -38 metre derinlikte ($y=38$) ve YASS -42 metre ($s=42$) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.27'de verilmiştir.



Şekil 5. 28. y38r7s42 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

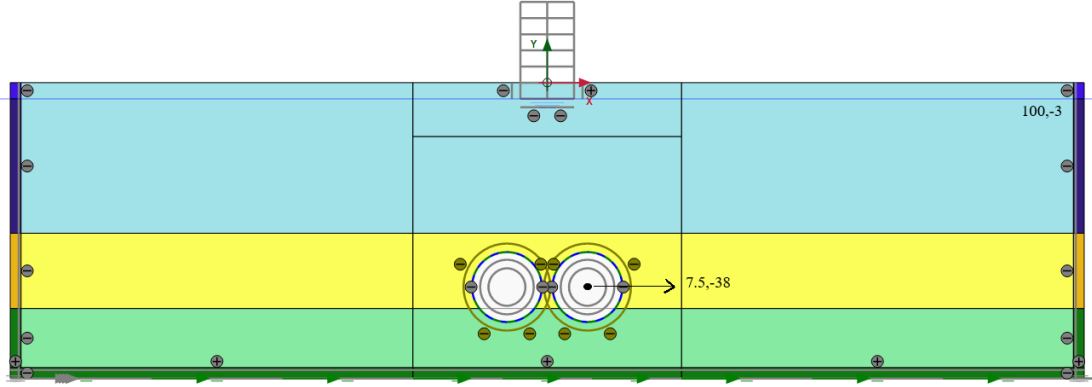
Şema 12: 7 metre çaplı tünellerin ($r=7$), -38 metre derinlikte ($y=38$), YASS -42 metre ($s=42$) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.28'de verilmiştir.



Şekil 5. 29. y38r7s42b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

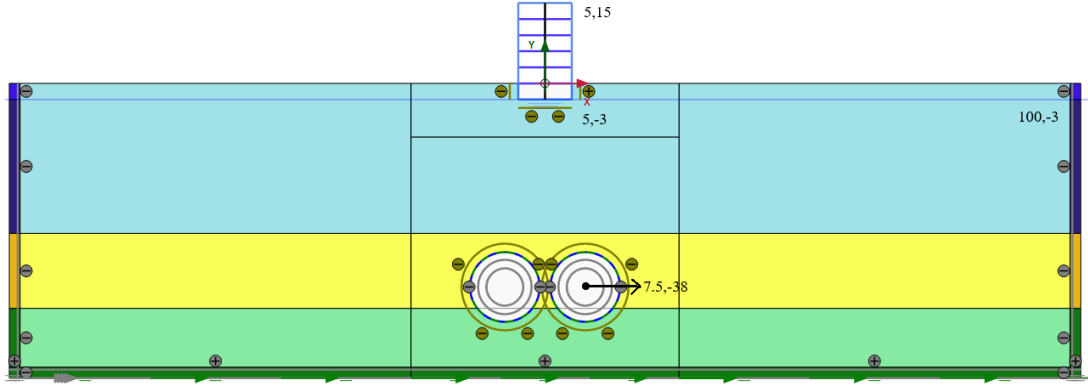
Şema 13: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -38 metre derinlikte ($y=38$) ve YASS -3 metre ($s=3$) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.29'da verilmiştir.



Şekil 5. 30. y38r13s3 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

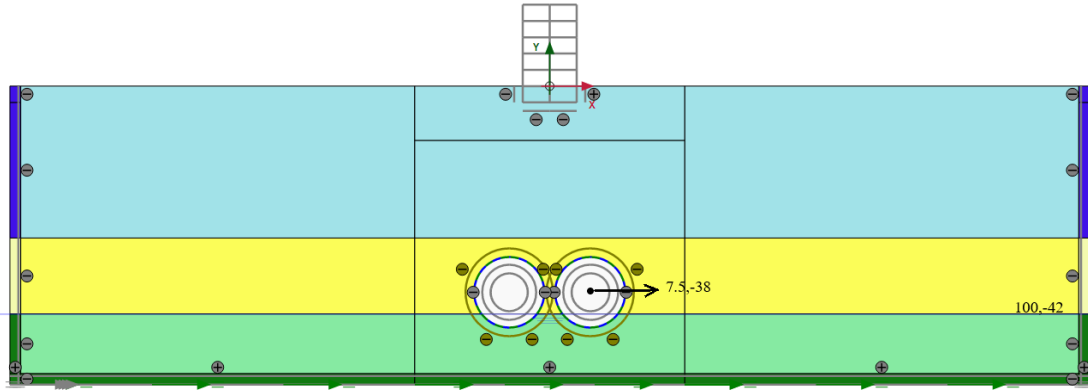
Şema 14: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -38 metre derinlikte ($y=38$), YASS -3 metre ($s=3$) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.30'da verilmiştir.



Şekil 5. 31. y38r13s3b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

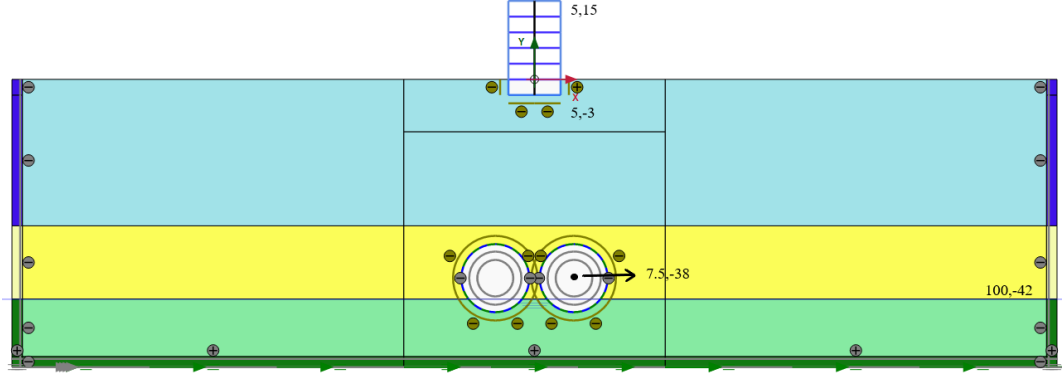
Şema 15: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -38 metre derinlikte ($y=38$) ve YASS -42 metre ($s=42$) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.31'de verilmiştir.



Şekil 5. 32. y38r13s42 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

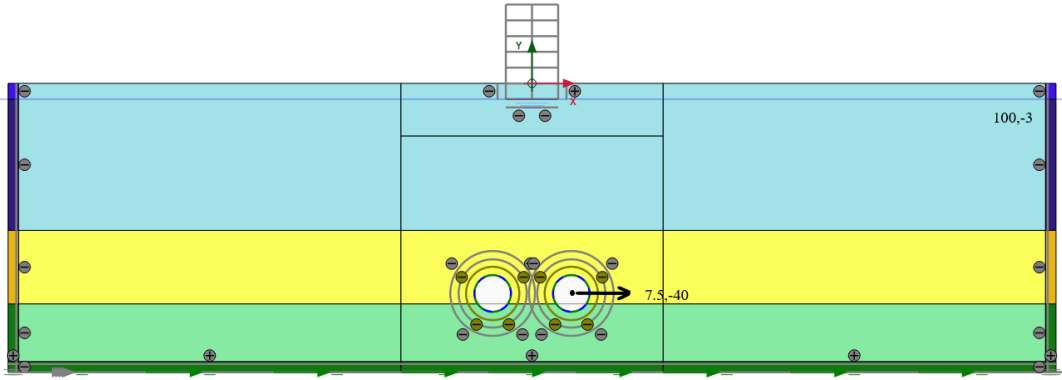
Şema 16: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -38 metre derinlikte ($y=38$), YASS -42 metre ($s=42$) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.32'de verilmiştir.



Şekil 5.33. y38r13s42b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

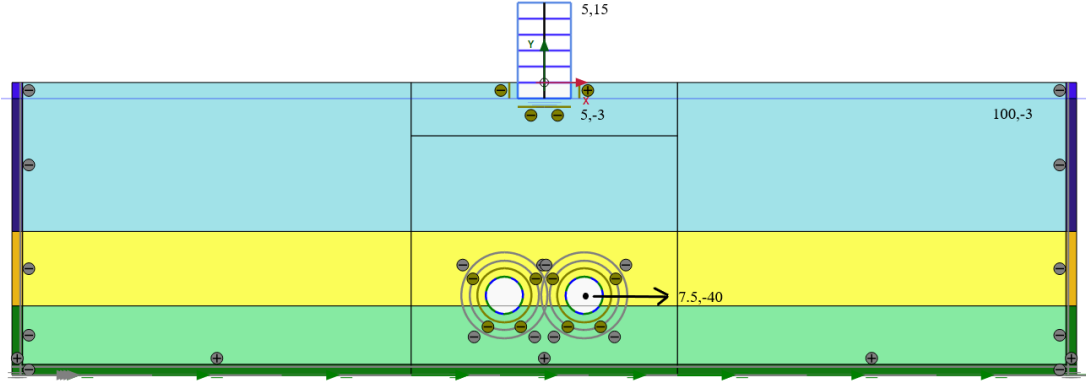
Şema 17: 7 metre çaplı tünellerin ($r=7$), -40 metre derinlikte ($y=40$) ve YASS -3 metre ($s=3$) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.33'de verilmiştir.



Şekil 5.34. y40r7s3 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

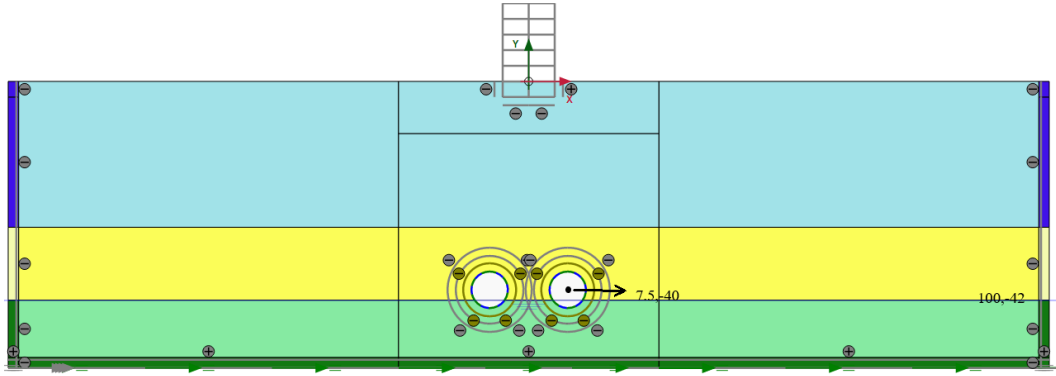
Şema 18: 7 metre çaplı tünellerin ($r=7$), -40 metre derinlikte ($y=40$), YASS -3 metre ($s=3$) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.34'te verilmiştir.



Şekil 5. 35. y40r7s3b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

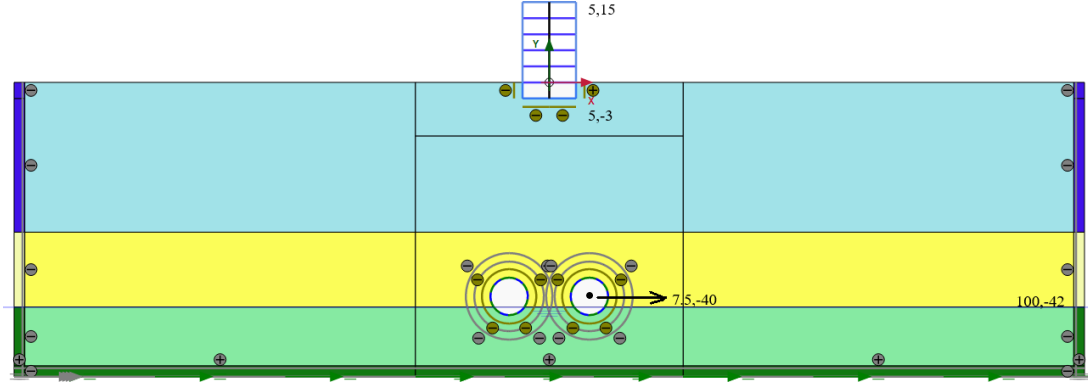
Şema 19: 7 metre çaplı tünellerin ($r=7$), -40 metre derinlikte ($y=40$) ve YASS -42 metre ($s=42$) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.35'te verilmiştir.



Şekil 5. 36. y40r7s42 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

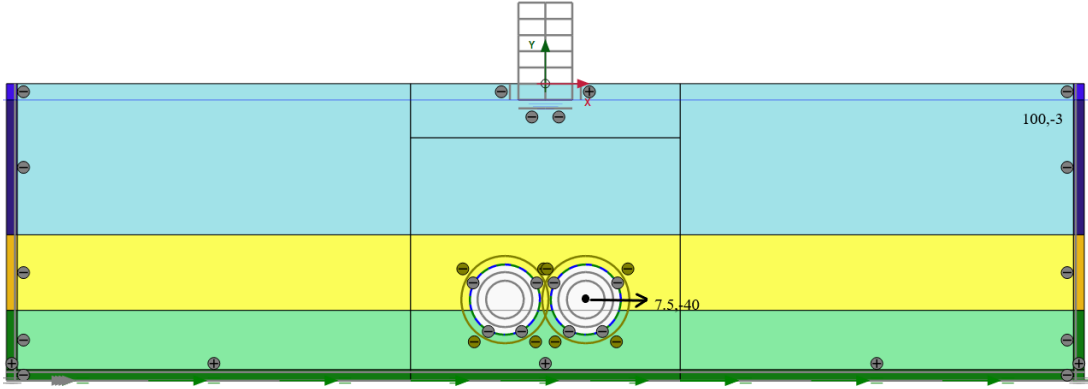
Şema 20: 7 metre çaplı tünellerin ($r=7$), -40 metre derinlikte ($y=40$), YASS -42 metre ($s=42$) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.36'da verilmiştir.



Şekil 5. 37. y40r7s42b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

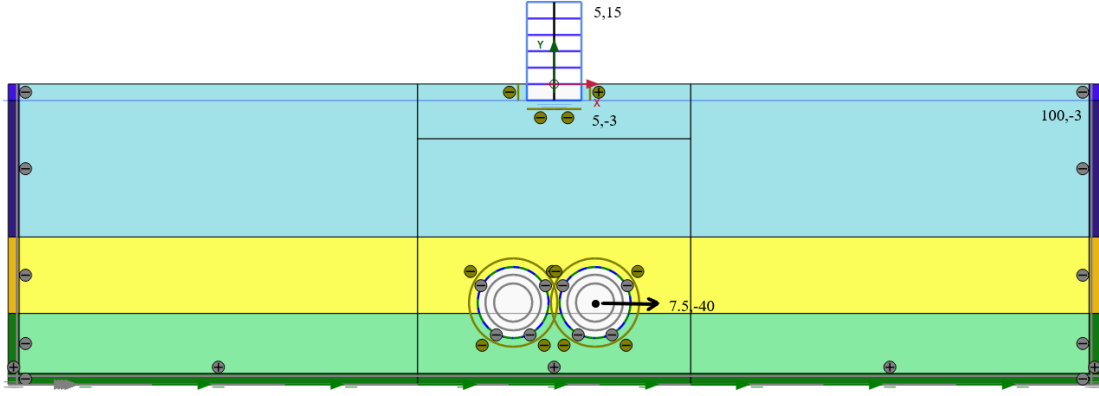
Şema 21: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -40 metre derinlikte ($y=40$) ve YASS -3 metre ($s=3$) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.37’de verilmiştir.



Şekil 5. 38. y40r13s3 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

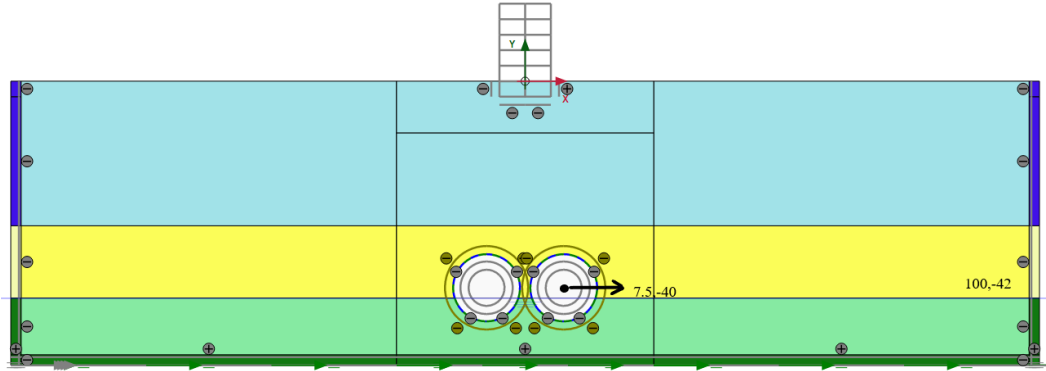
Şema 22: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -40 metre derinlikte ($y=40$), YASS -3 metre ($s=3$) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.38’de verilmiştir.



Şekil 5. 39. y40r13s3b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

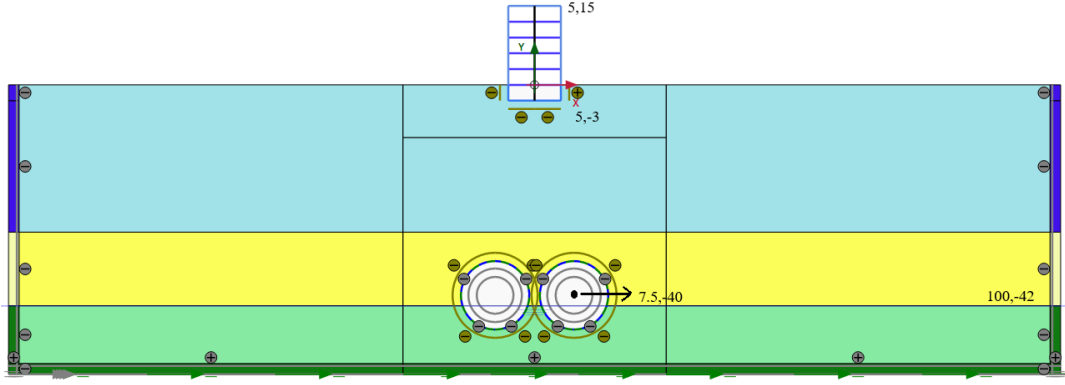
Şema 23: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -40 metre derinlikte ($y=40$) ve YASS -42 metre ($s=42$) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.39’da verilmiştir.



Şekil 5. 40. y40r13s42 uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

Şema 24: 13 metre çaplı tünellerin ($r=13$), -40 metre derinlikte ($y=40$), YASS -42 metre ($s=42$) ve bina (b) parametrelerinde çözülen modellerin şeması şekil 5.40’da verilmiştir.



Şekil 5. 41. y40r13s42b uygulama modeli

Bu şema ile 3 farklı zemin modeli (MC, HS, Hss), ve dinamik etkilerin sönümlenerek nasıl etki yarattığını görmek için sönüm etkisi (s) varken ve yokken durumları modellenmiştir.

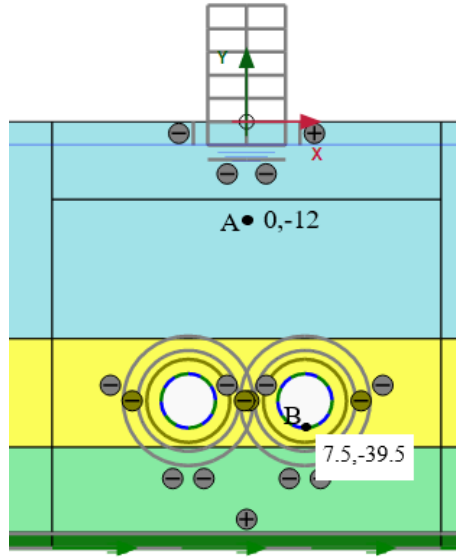
Analizlerde çözüm aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle binanın bulunduğu analizlerde bina yükü etki ettirilmiştir. İkinci aşama olarak binanın etkisi sıfırlanıp tüneller aktif edilmiştir. Son olarak da deprem etkisi için dinamik aşama eklenmiştir.

5.3. Analizlerin Karşılaştırması ve Sonuçları

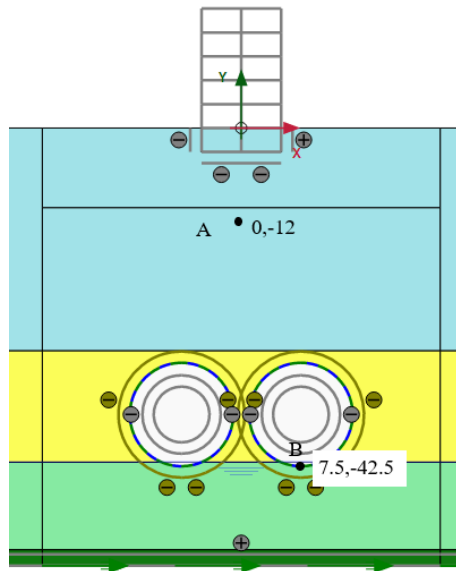
5.3.1. Analizlerde Zemin Modellerinin Karşılaştırılması

Zemin modelleri olarak mohr coulomb, hardening soil ve hardening soil small seçilip bu modellerde 36 metre derinlikteki, YASS 3 metre için tünel analizlerinde karşılaştırılmıştır. Yatay deformasyon, düşey deformasyon ve su basıncı grafikleri analiz modellerine göre aşağıda verilmiştir.

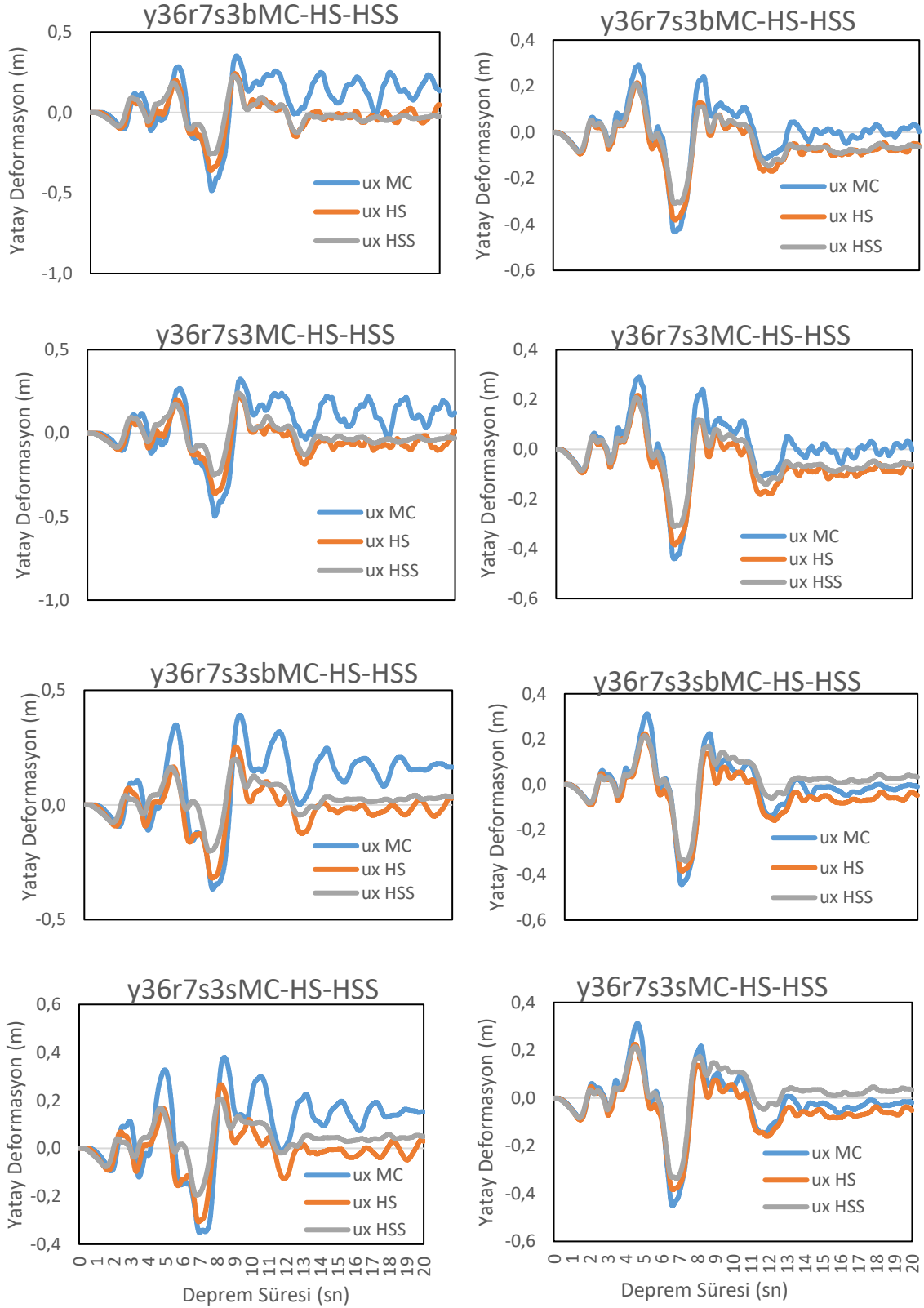
Analiz sonuçları için iki adet nokta (A, B) seçilmiştir. Bunlardan birincisi tünel ve zemin yüzeyi arasında, diğri ise tünelin zemin yüzeyine en uzsk noktasıdır (Şekil 5.44, Şekil 5.45).



Şekil 5. 42. 7 metre çaplı tünelde analiz için seçilen noktalar



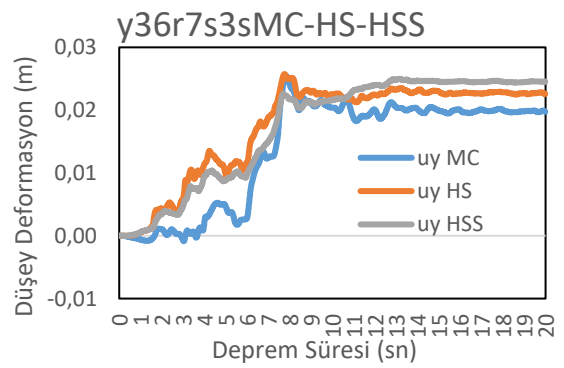
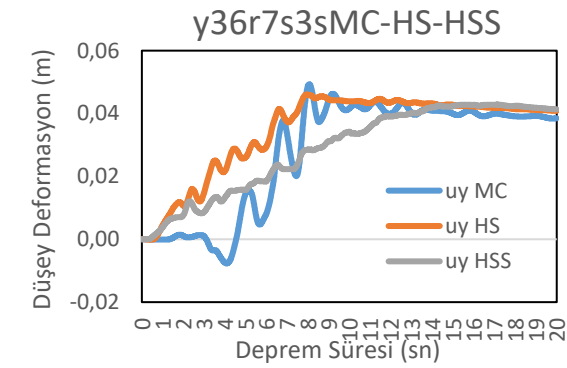
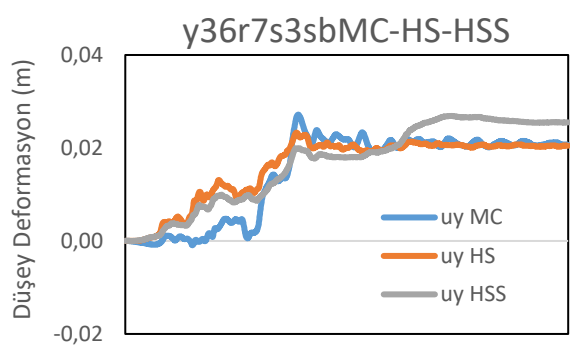
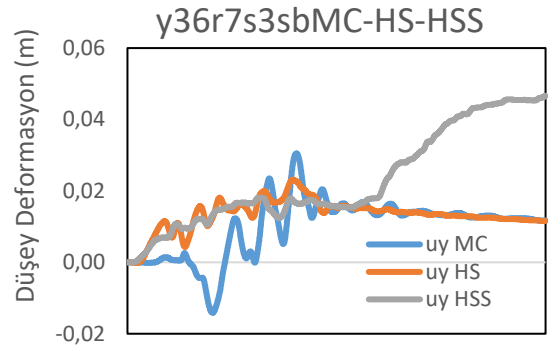
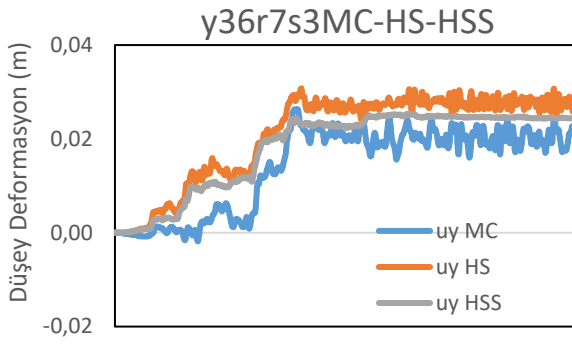
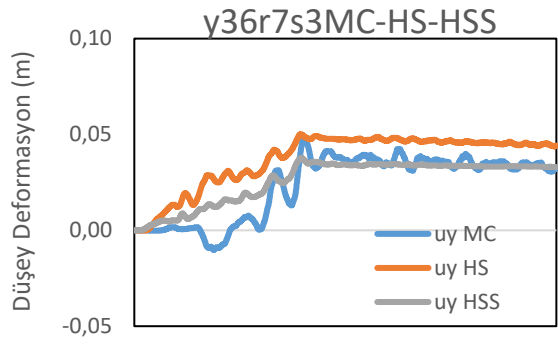
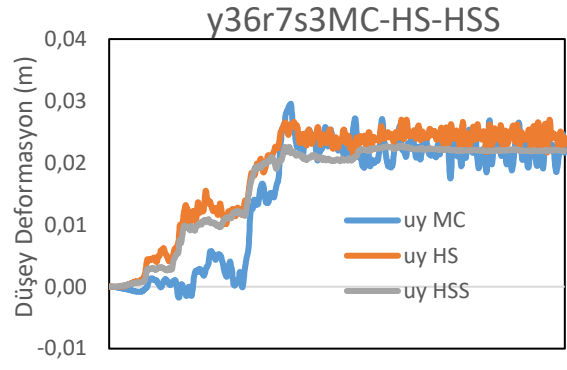
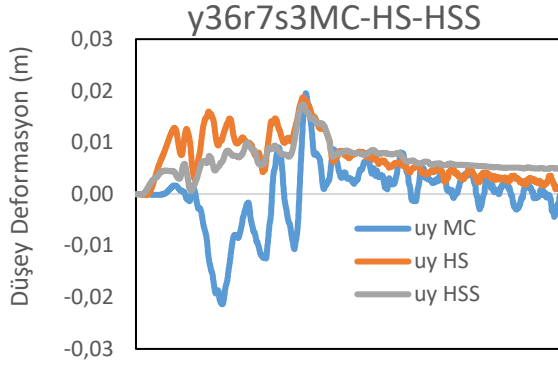
Şekil 5. 43. 13 metre çaplı tünelde analiz için seçilen noktalar



A noktası yatay deformasyon grafiği

B noktası yatay deformasyon grafikleri

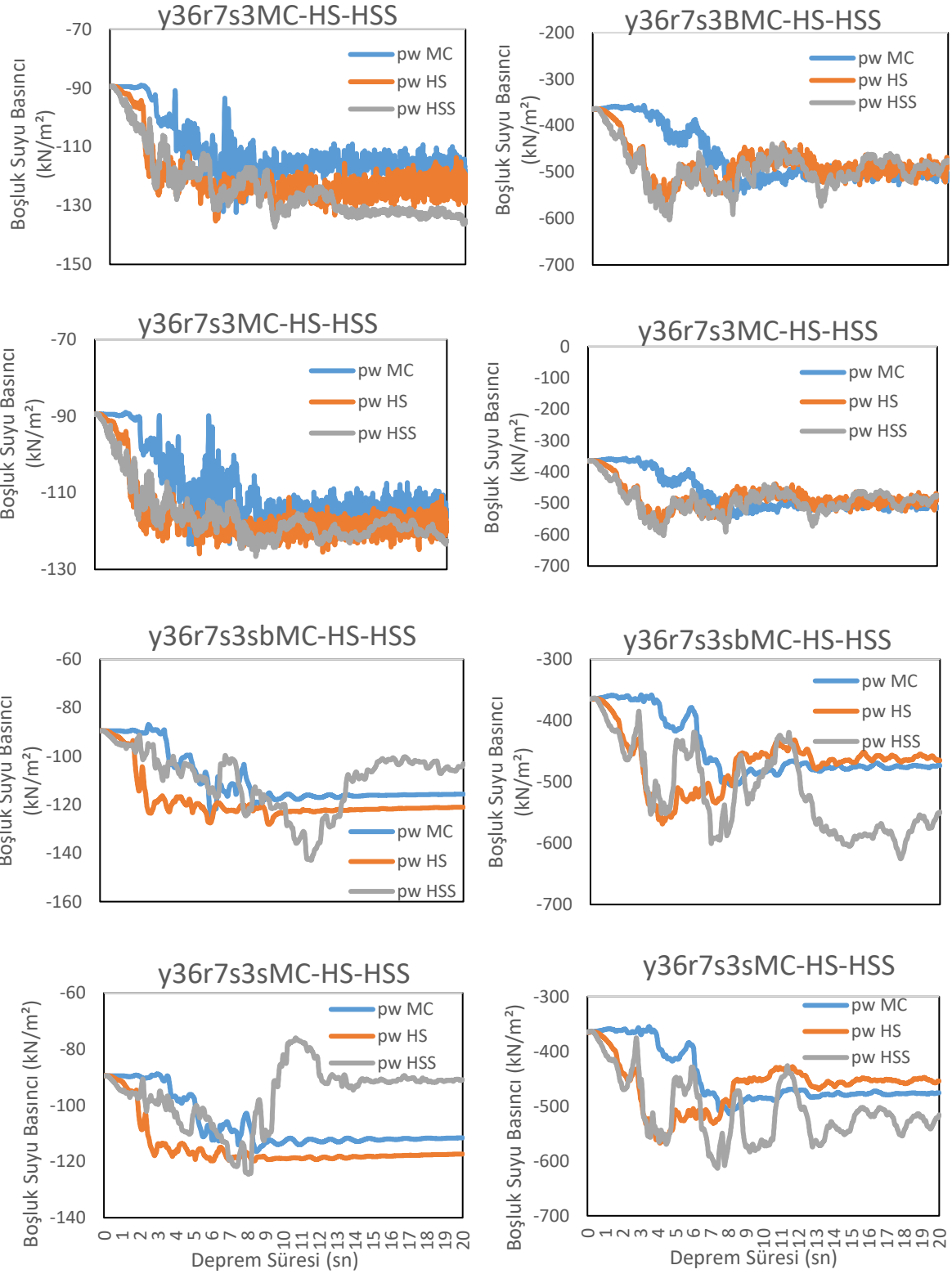
Şekil 5. 44. Zemin modeli karşılaştırılmasında yatay deformasyon



A noktası düşey deformasyon grafiği

B noktası düşey deformasyon grafikleri

Şekil 5. 45. Zemin modeli karşılaştırılmasında düşey deformasyon



A noktası boşluk suyu basıncı grafiği

B noktası boşluk suyu basıncı grafikleri

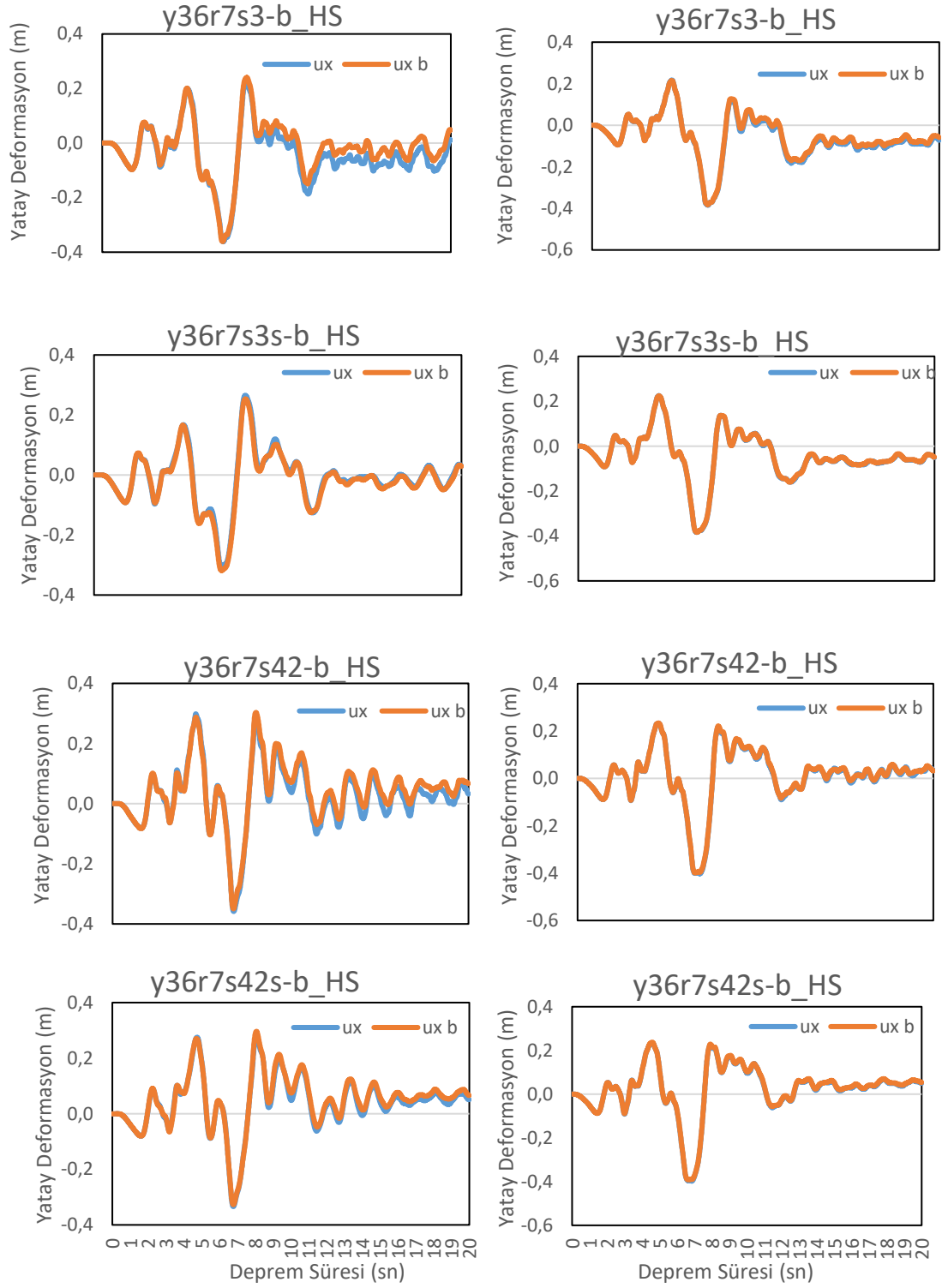
Şekil 5. 46. Zemin modeli karşılaştırılmasında boşluk suyu basıncı

Zemin modelleri için toplamda 48 grafiğin karşılaştırması yapılmıştır. Bu grafiklerin 24 tanesi Şekil 5.44, 5.45, 5.46 ' da verilmiştir. Geri kalan grafikler ekler kısmında mevcuttur. Bu grafiklerden yola çıkarak MC modelin ani değişimleri göze çarparken HS ve HSS modellerinde daha birbirine yakın ve tutarlı sonuçlar görülmüştür. Bölüm 4.2. den de yola çıkarak MC zemin modelinin daha hızlı çözümünün gerçekleştiği için daha çok ön fikir oluşması için uygulanabilecek bir seçim olduğu görülmüştür. HS ve HSS modellerinin daha gerçekçi sonuçlar verdiği uygulama anlamında bu modellerinde seçilmesinin daha doğru olacağı görülmüştür.

5.3.2 Analizlerde Bina Yükünün Etkisinin Karşılaştırılması

Zemin yüzeyinde mevcut olan 1 metresi bodrum katlı bina yükünün etkisinin incelenmesi için yapılan analizler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için HS zemin modeli ve 7 m çaplı tünel şemaları seçilmiştir. Yatay deformasyon, düşey deformasyon ve su basıncı grafikleri analiz modellerine göre aşağıda verilmiştir.

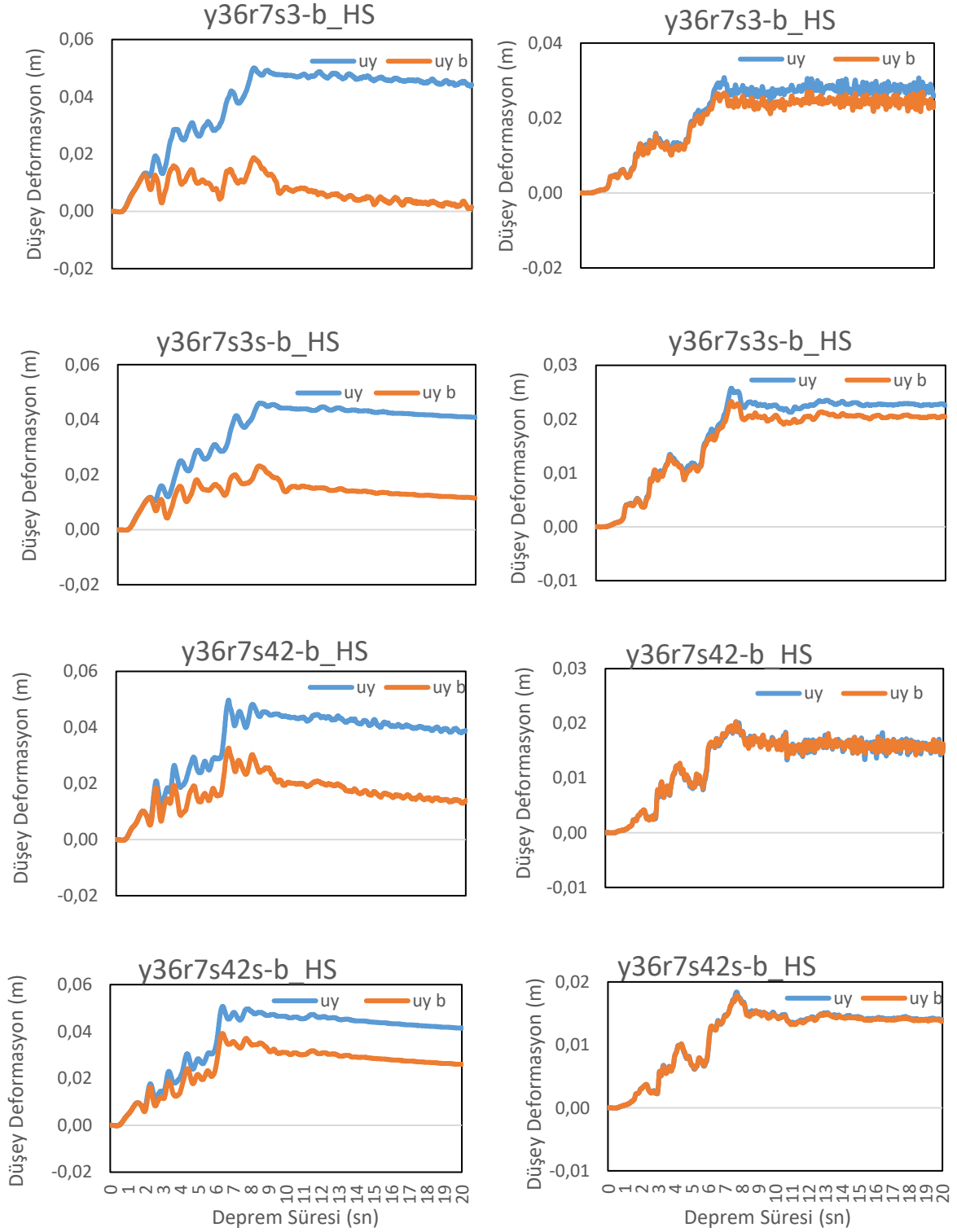
Analiz sonuçları için iki adet nokta (A, B) seçilmiştir bunlardan birincisi tünel ve zemin yüzeyi arasında, diğri ise tünelin zemin yüzeyine en uzsk noktasıdır (Şekil 5.44, Şekil 5.45).



A noktası yatay deformasyon grafiği

B noktası yatay deformasyon grafikleri

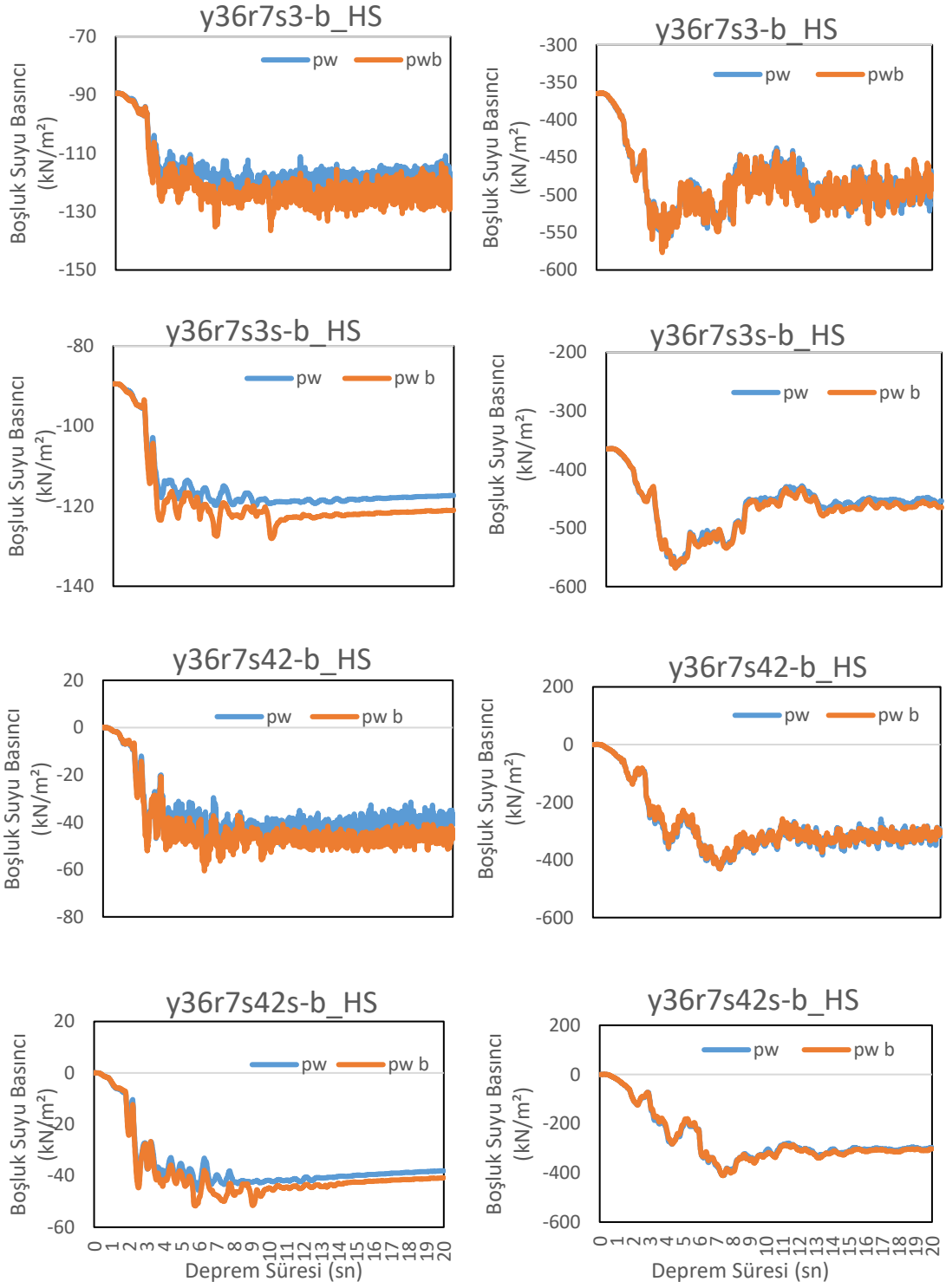
Şekil 5. 47. Bina yükünün etkisinin karşılaştırılmasında ki yatay deformasyon



A noktası düŖey deformasyon grafiği

B noktası düŖey deformasyon grafikleri

Ŗekil 5. 48. Bina yükünün etkisinin karŖılaŖtırılmasında ki düŖey deformasyon



A noktası boşluk suyu basıncı grafiği

B noktası boşluk suyu basıncı grafikleri

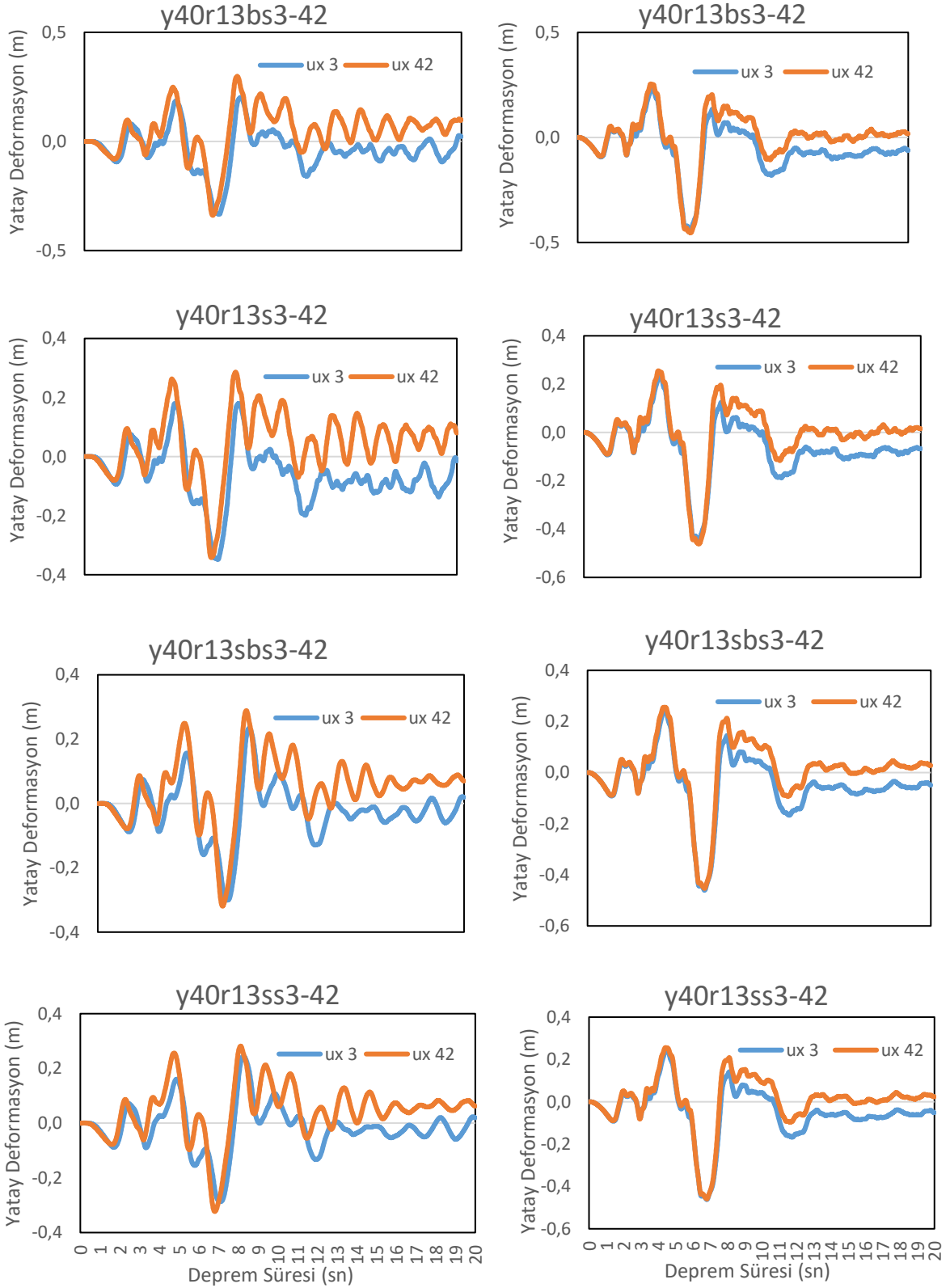
Şekil 5. 49. Bina yükünün etkisinin karşılaştırılmasında ki boşluk suyu basıncı

Bina etkisi için toplamda 72 grafiğin karşılaştırması yapılmıştır. Bu grafiklerin 24 tanesi Şekil 5.47, 5.48, 5.49 ‘ da verilmiştir. Geri kalan grafikler ekler kısmında mevcuttur. Yukarıdaki grafiklere bakılarak bina yükü genel olarak yatay deformasyonda ve boşluk suyu basıncında bir etki yaratmamıştır. Bunun yanı sıra düşey deformasyonları bina yükünün etkisi düşürmüştür. Analizlerde tünel açılmadan önce bina yükünün girilmesi zeminin bir miktar oturmasına neden olup daha sıkı bir zeminde tünel uygulaması olması bu sonuçları doğurmuştur.

5.2.3 Analizlerde YASS Karşılaştırılması

HS zemin modelinde çözümü gerçekleştiren 40 metre derinlikte bulunan 13 metre çaplı tünellerin YASS -3 metre ve -42 metre karşılaştırması yapılmıştır. Yatay deformasyon, düşey deformasyon ve su basıncı grafikleri analiz modellerine göre aşağıda verilmiştir.

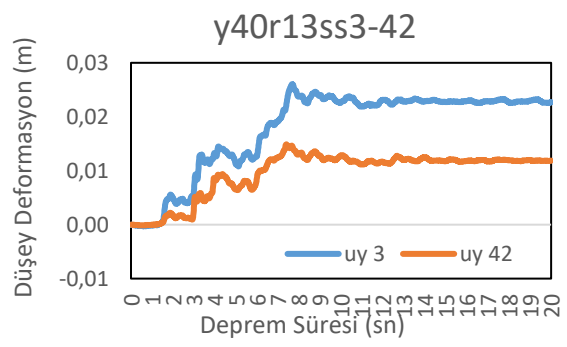
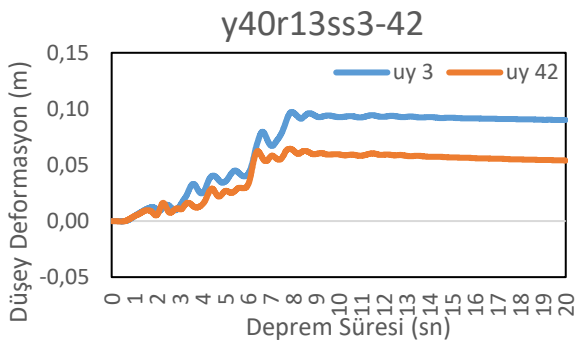
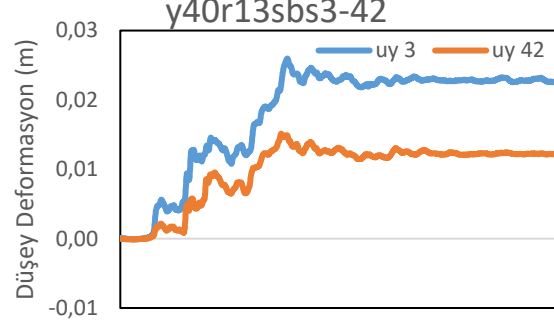
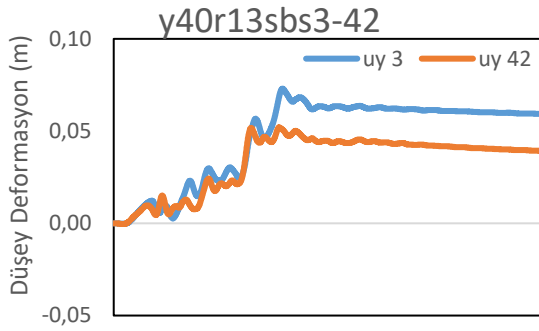
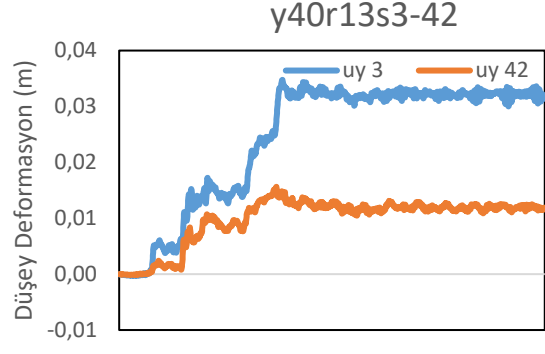
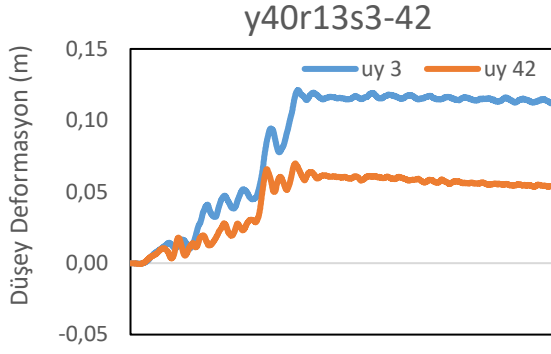
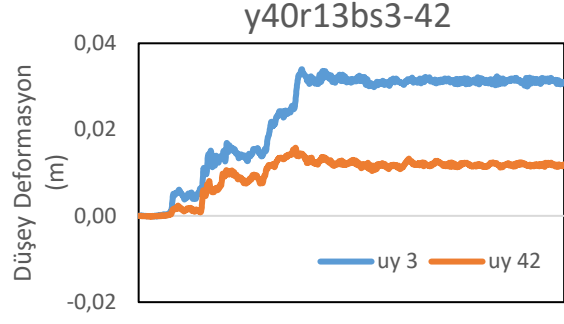
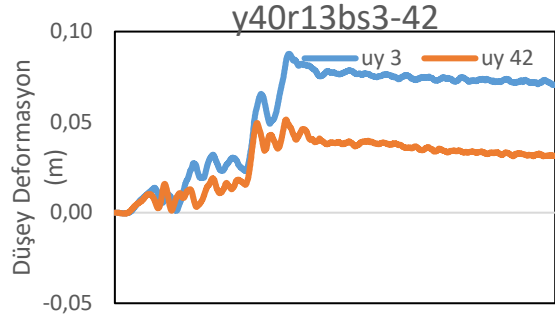
Analiz sonuçları için iki adet nokta (A, B) seçilmiştir bunlardan birincisi tünel ve zemin yüzeyi arasında, diğeri ise tünelin zemin yüzeyine en uzak noktasıdır (Şekil 5.44, Şekil 5.45).



A noktası yatay deformasyon grafiği

B noktası yatay deformasyon grafikleri

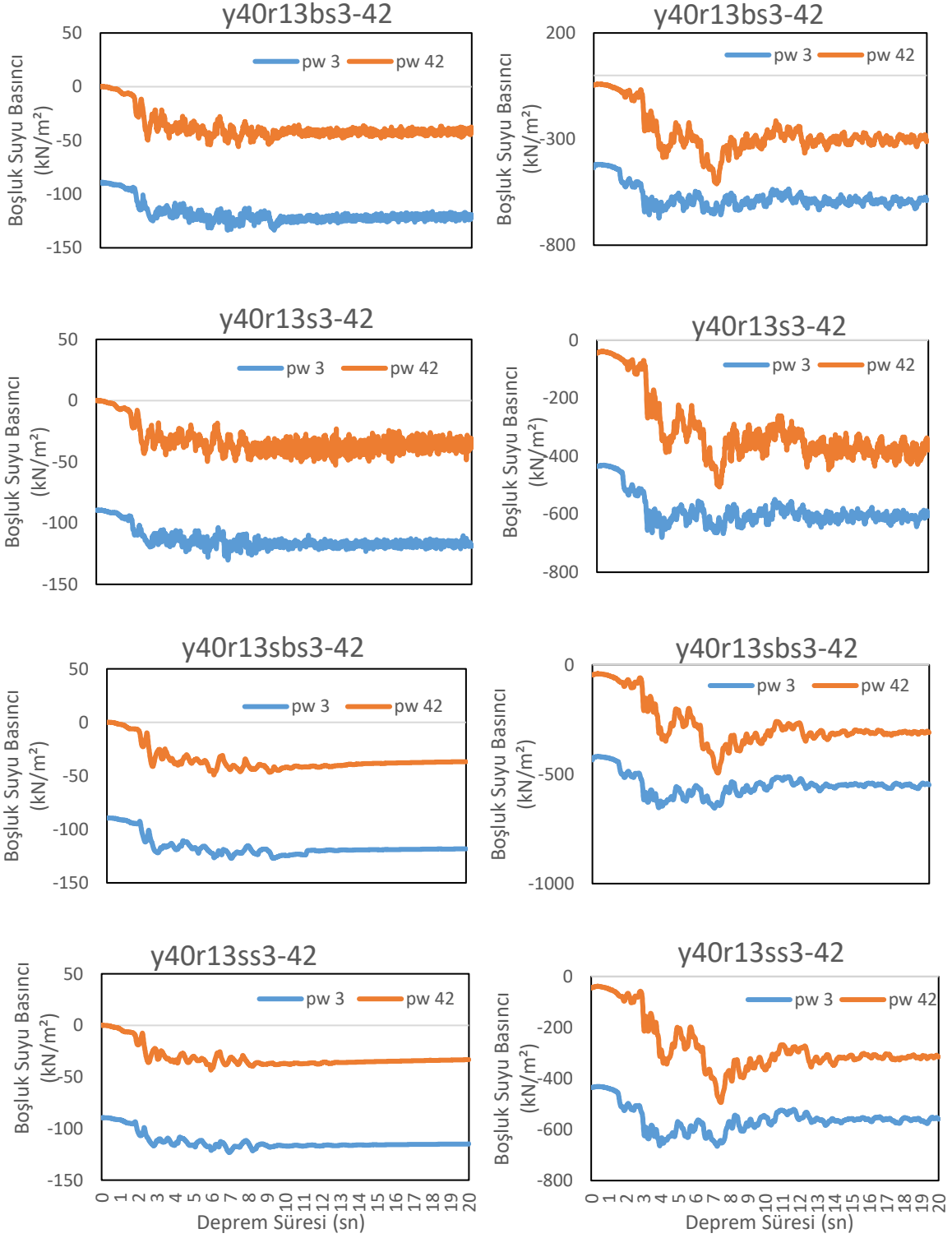
Şekil 5. 50. Yeraltı su seviyesinin karşılaştırılmasında ki yatay deformasyon



A noktası düşey deformasyon grafiği

B noktası düşey deformasyon grafikleri

Şekil 5. 51. Yeraltı su seviyesinin karşılaştırılmasında ki düşey deformasyon



A noktası boşluk suyu basıncı grafiği

B noktası boşluk suyu basıncı grafikleri

Şekil 5. 52. Yeraltı su seviyesinin karşılaştırılmasında ki boşluk suyu basıncı

Yeraltı su seviyeleri için toplamda 24 grafiğin karşılaştırması yapılmıştır. Bu grafiklerin 24 tanesi Şekil 5.50, 5.51, 5.52 ‘ da verilmiştir. Analizlerde karşılaştırmak için seçilen -3 metre YASS ve -42 metre YASS grafikleri yukarıda verilmiştir. Bu grafiklerden yola çıkarak yatay deformasyonlarda 42 metredeki YASS çok fazla olmasa da daha fazla olmuşken, boşluk suyu basıncı ve düşey deformasyonlarda 3 metredeki YASS daha fazla çıkmıştır. Bunun sebebi düşey gerilmelerin üzerinde bulunan ağırlıkla doğru orantılı olmasıdır.

6. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada sonlu eleman metodlarından biri olan Plaxis 2D kullanılarak birçok sayıda model üzerinde analizler yapılmıştır. Analizlerin yapıldığı zemin kil 1, kum ve kil 2 olarak üç kademe seçilmiştir. Zemin parametreleri formüller yardımı ile bulunup tablolar halinde zemin modellerine uygun olacak şekilde verilmiştir. Modellemelerde 3 farklı zemin modeli, 2 farklı tünel derinliği, 2 farklı tünel çapı, 2 farklı YASS, bina yükü ve zemin sönümlemesi kullanılmıştır. Bina yükü ve tünel kaplama parametreleri Plaxis 2019 Eğitim Klavuzu'ndan alınmıştır. Modeller dinamik analiz ile çözülüp deprem ivme kaydı olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi verileri kullanılmıştır. Dinamik etkinin model çevresinde daha düzgün etki etmesi amacıyla hazırlanan modeller zemin özellikleri değiştirilmeden beton ile çevrelenmiştir.

Eleman boyutu seçiminde daha detaylı bir çözüm için tünel çevresi daha küçük elemanlara bölünmüştür. Eleman boyutu seçimleri için çeşitli analizler yapılmış ve sınır değerleri belirlenmiştir. Bina çevresinde eleman boyutu büyüklüğünden kaynaklı çözümün gerçekleşmemesi nedeniyle çeşitli boyutlarda analizler sonucu bina çevresi eleman boyutu daha küçük seçilmiştir. Analizler sırasında ani sapmalar yaşanmasından dolayı sonuçlanamayan analizler için tünel kaplamasında ve tünel çevresindeki zeminlerde iyileştirmeler yapılmıştır. Analizler için 24 farklı şema oluşturulmuştur. Bu şemalarda analizi istenen parametreler değiştirilerek toplamda 144 analiz yapılmıştır.

Analiz karşılaştırması yapılabilmesi için biri zemin ve tünel arasından diğeri tünelin en alt noktasından olmak üzere iki nokta seçilmiştir. Bu iki noktanın yatay deformasyon, düşey deformasyon ve boşluk suyu basıncı sonuçlarından grafikler elde edilmiştir.

Zemin modelleri, YASS ve bina yükünün etkisi oluşturulan grafikler ile karşılaştırılmıştır.

Zemin modeli karşılaştırması için MC, HS ve HSS modelleri seçilmiştir. Bu zemin modellerin analizleri yeraltı su seviyesinin -3 metrede olduğu, 7 ve 13 çaplı tünellerin 36 metre derinlikteki konumunda, bina yükünün etkideği ve etkimeydiği, zeminin sönümlü olup olmadığı durumlar için yapılmıştır. Modellerin karşılaştırılmasının sonucunda MC modelinin tutarlı sonuçlar vermediği görülmüştür. HS ve HSS grafikleri hemen hemen birbirleri ile aynı düzeyde ilerlemişlerdir. Mohr Coulomb'da ortalama bir rijitlik değeri alındığından ve daha hızlı sonuç verdiği için ön izlem olarak kullanılması daha doğrudur. HS ve HSS da üç farklı rijitlik değeri

kullanıldığından daha gerçekçi sonuç vermektedir ve uygulama bazından bu modeller tercih edilmelidir.

Bina yükünün etkisini görebilmek için gerçekçi sonuçların elde edildiği HS zemin modeli seçilerek YASS 3-42 metre, tünel derinliği 36-38-40 metre, tünel çapı 7-13 metre ve zeminin sönümlü olup olmadığı durumlar için modellerin analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda ortaya çıkan grafiklere bakılarak yatay deformasyon ve boşluk suyu basıncında herhangi bir etki yaratmadığı fakat düşey deformasyonların değerlerinin bina etkisi ile düşürdüğü görülmüştür. Bu sonuçtaki en büyük etken binanın tünelden önce yapılıp zemini bir miktar sıkıştırmış olmasıdır.

YASS etkisini karşılaştırmak için -3 ve -42 metre seviyeleri seçilmiştir. Bu analizlerde HS zemin modeli seçilerek 40 metre derinlikte bulunan 13 metre çaplı tüneller kullanılmıştır. Analiz sonuçlarında çıkan grafikler karşılaştırıldığında yatay deformasyon -42 metre yeraltı su seviyesi bulunan durumlarda daha fazla çıkarken boşluk suyu basıncı ve düşey deformasyonlarda tam tersi çıkmıştır. Bunun sebebi düşey gerilmelerin üzerinde bulunan ağırlıkla doğru orantılı olmasıdır.

Bu analiz ve karşılaştırmalardan yola çıkarak;

Sonlu elemanlar programlarından biri olan Plaxis 2D kullanılmaya başlanmadan önce istediğimizin ön analiz mi veya gerçekçi sonuçlar elde etmek mi olduğu karar verilmeli ve buna uygun olarak zemin modeli seçilmelidir.

Analizlere hazırlık aşamasından eleman boyutu seçimi sonuçları etkilediğinden çeşitli çalışmalar sonucu en uygun eleman boyutları seçilmelidir.

Dinamik analiz için gerekli çalışmalar yapılıp modeller ve parametreler uygun seçilmelidir.

KAYNAKÇA

Ak, E. (2005). *Tünel Tasarımında Sonlu Elemanlar Metodu ile Gerilme ve Deformasyon Analizleri- Destek Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Aktaş, Ş. S. vd. (2018), Bir Metro İstasyonu Derin Kazısının 3- Boyutlu ve 2- Boyutlu Analizleri, *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı*, 26-28 Eylül, Cerrahpaşa & İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Amorosi, A., & Boldini, D. (2009). Numerical modelling of the transverse dynamic behaviour of circular tunnels in clayey soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29, 1059-1072

Arkoç, O. (2017). INS13204 GENEL JEOFİZİK VE JEOLJİ. [Erişim: 28.04.2021, <https://silo.tips/download/ins13204-genel-jeofzk-ve-jeoloj>]

Ayan, E. (2009). *Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bahadır, A. A. (2018). *Derin Kazı Destek Sistemlerinde Malzeme Modeli Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi- Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.

Bahadır, A. A., & Onur M. İ. (2018). Derin Kazı Analizlerinde Küçük Şekil Değiştirme Rijitliğinin Etkisi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5 (1), 96-106

Bakır, B. S. vd. (1998), Tünellerin Sonlu Elemanlar Metodu ile İnşaat Safhalarına Bağlı Olarak Analizi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi*, 22-23 Ekim, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Balkaya, M., & Erken, A. (2014), Komşu Bina Temel Kazısının Tünel Deformasyonlarına Etkisi Üzerine Bir Vaka Analizi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 2. Özel Konulu Sempozyumu*, 24 Nisan, Antalya.

Berilgen, M., Özaydın, K., & Yıldırım, S. (2009), Metro Tünellerine Komşu Bir Derin Kazısının Etkisinin Sayısal Analizlerle İncelenmesi , 6. *Geoteknik Sempozyumu*, 3-4 Aralık, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Canik, B. (1997). Mühendislik Jeolojisi Ders Notları. [Erişim: 18.03.2021, <https://dspace.ankara.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12575/9135?show=full>]

Cansız, B. (2014). *İksa Sistemlerinde Köşe Etkisinin İki Boyutlu Sonlu Eleman Analiz Yöntemi İle İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

CNN Türk (2019). *Çin'den Avrupa'ya Giden İlk Yük Treni Marmaray'dan Geçti*. [Erişim: 14.02.2021, <https://www.cnnturk.com/turkiye/cinden-avrupaya-giden-ilk-yuk-treni-marmaraydan-gecti?page=9>)]

Denghan, A. N. vd. (2012). 3-D stability analysis and design of the primary support of Karaj metro Tunnel:Based on convergence data and back analysis algorithm. *Engineering Geology* 141-142 , 141-149

Emiroğlu, A. (2010). *İstanbul (4. Levent-Hacıosman arası) Metro Tünelindeki Mühendislik Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Elavenil, S., & Vanuvamalai, A. (2012). Analysis of Tunnel for Different Subsoil Condition. *International Journal of Civil Engineering applications Research*, 1059-1072

Euronews (2016). *The Long Road to ,Build the New Gotthard Rail Tunnel*. [Erişim: 22.02.2021, <https://www.euronews.com/2016/06/01/the-long-road-to-build-the-new-gotthard-rail-tunnel>]

Erbeyoğlu, E. vd. (2017). Bahçe-Nurdağ (Fevzipaşa) Varyantı Tünel Geçişi Yapısal Tasarımı İncelemesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi* , 03, 47-56.

Fasihnikoutalab, M. H. vd. (2012). Numerical Stability Analysis of Tunnel by PLAXIS. *Researchgate*, 451-461

Fraldi, M., & Guarracino, F. (2011). Evaluation of impending collapse in circular tunnels by analytical and numerical approaches. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, 507-516

Hürriyet (2018). *Türkiyenin En Uzun Tüneli Bugün Açılıyor*. [Erişim: 05.02.2021, <https://www.hurriyet.com.tr/ekonomi/turkiyenin-en-uzun-tuneli-bugun-aciliyor-40866109>]

Kaşıkçı, B. (2014). *Metro Tünelleri- Üstyapı Etkileşimleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Meleki, M. vd. (2011). An equivalent beam model for the analysis of tunnel-building interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, 524-533

Osmanoğlu, D. (2007). *Tünellerde Zemin İyileştirilmesi ve Stabilitenin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Plaxis Programında Analiz Edilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özener, P., & Berilgen, M. (2010), Metro Tünellerine Komşu Bir Derin Kazının Etkisinin Sayısal Analizlerle İncelenmesi , *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi*, 30 Eylül- 1 Ekim, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul.

Öztürk, T. H. (2007). *Tünel ve Tasarım İlkeleri*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Öztürk, T. H., & Durmuş, A. (2008). Tünelere Toplu Bir Bakış ve Savunma Tünellerinin Türkiye için Önemi. *İstanbul Bülten* , 96, 11-17.

Plaxis 2D Reference Manual 2019

Polat, D. (2010). *NATM Metodu Kullanılarak Tünel Tasarımı ve Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Rayhaber (2013). *Marmaray Hakkında Merak Ettiklerimiz*. [Erişim: 10.03.2021, <https://rayhaber.com/2013/07/marmaray-hakkinda-merak-ettikleriniz/>]

Satıcı, Ö. & Topal, T. (2015). Tünel Açma Yöntemlerinin Mühendislik Jeolojisi ve Kayma Sınıflama Sistemleri ile Değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* , 39 (1), 45-57.

Şengün, E. (2013). *Oyuk Genişlemesi Probleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İki Boyutlu Sayısal Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Takvim (2018). *İşte Türkiye'ye Çağ Atılan Tüneller ve Projelerin Bazıları*. [Erişim: 12.02.2021, <https://www.takvim.com.tr/galeri/guncel/iste-turkiyeye-cag-atlanan-tuneller-ve-projelerin-bazilari/11>]

TRT (2018). *Milyonlarca Yolcunun Tercihi "Ankara Metrosu" 21 Yaşında*. [Erişim: 18.03.2021, <https://www.trthaber.com/haber/yasam/milyonlarca-yolcunun-tercihi-ankara-metrosu-21-yasinda-399224.html>]

Tunçdemir, F. (2004). Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniğiyle İyileştirilmesi. *Türkiye Mühendislik Haberleri* , 430, 59-64.

Unutmaz, B. (2015), Tünel Çevresi Zeminlerin Deprem Sonrası Davranışı, 6. *Geoteknik Sempozyumu*, 26-27 Kasım, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Uralakbulut. *Tarihte bugün 22 Kasım 1988: Dünyanın radara yakalanmayan ilk hayalet bombardıman uçağı (B-2 Spirit) ABD’de basına tanıtıldı.* [Erişim: 25.03.2021, https://www.uralakbulut.com.tr/wp-content/uploads/2014/01/Firat%e2%80%99in_Altından_4000_Yil_Once_Tünel_Acan_Babiller.pdf]

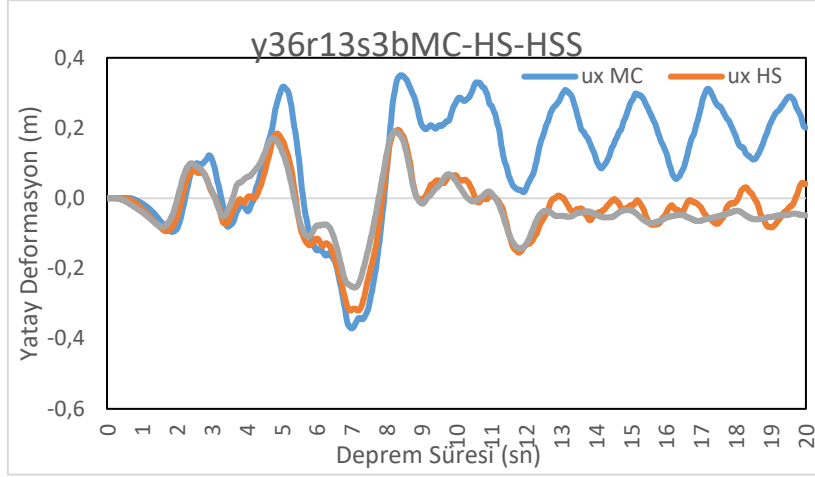
Ünlütepe A. & Messing M. (2005), Tünel Açma Uygulamalarında Son Yenilikler, 2. *Mühendislik Ölçemeleri Sempozyumu*, 23-25 Kasım, İTÜ, İstanbul.

Vinod, M., & Khabbaz, H. (2019). Comparison of rectangular and circular bored twin tunnels in weak ground. *Underground Space* 4, 328-339

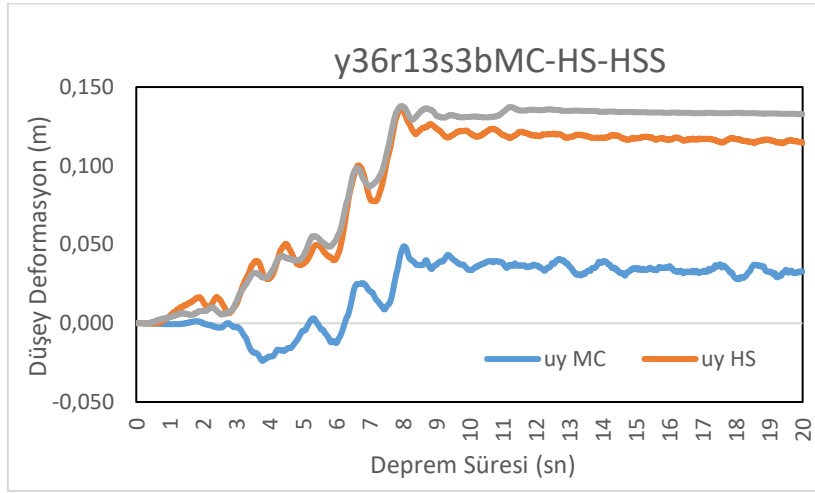
Yeşilodak. *Amsterdam'daki Bisiklet ve Yaya Tüneli Cuyperspassage Eski Şehir ile Yeni Şehiri Birbirine Bağlıyor.* [Erişim: 18.03.2021, <https://www.yesilodak.com/cuyperspassage-yaya-bisiklet-tuneli>]

Yıldırım, E. Ü. vd. (2010), Kil Zeminde Tünel Açılması: Koska Bölgesi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi*, 30 Eylül- 1 Ekim, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul.

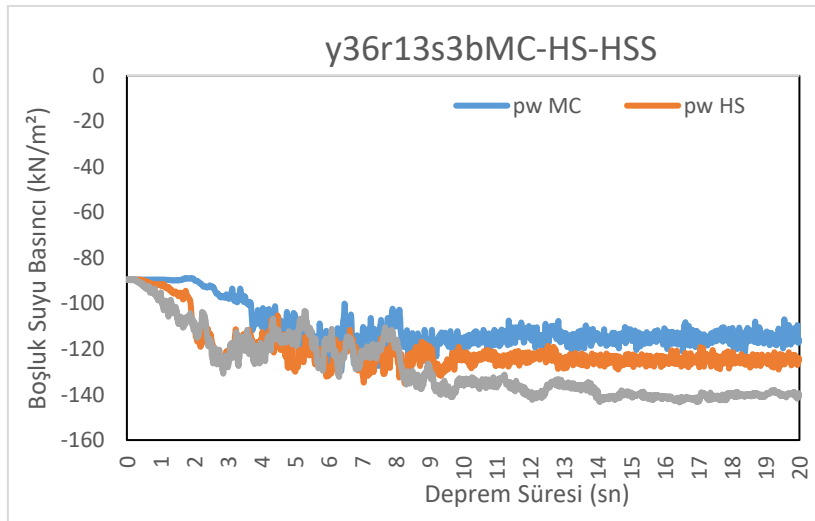
EKLER



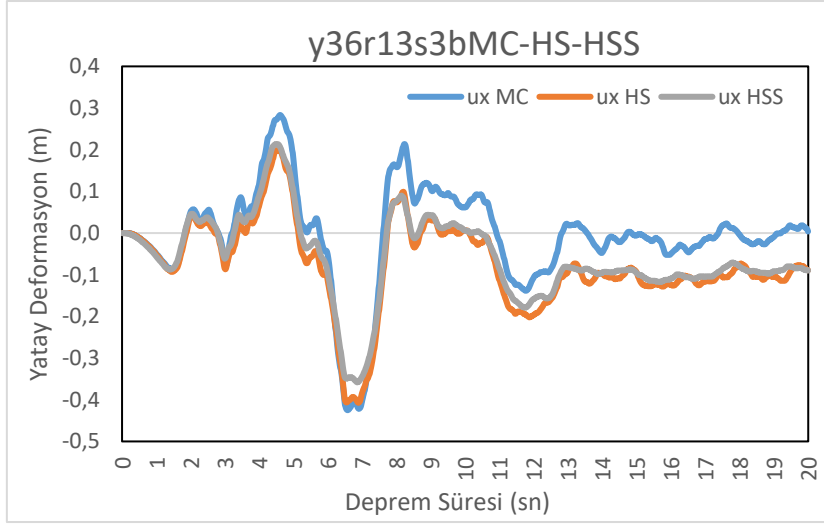
Ek 1. y36r13s3b modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



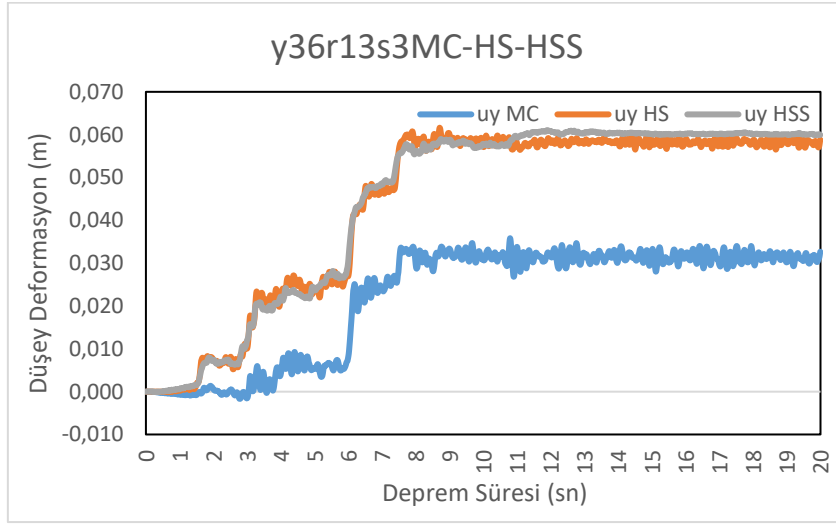
Ek 2. y36r13s3b modellerinde A noktasının düşey deformasyon grafiği



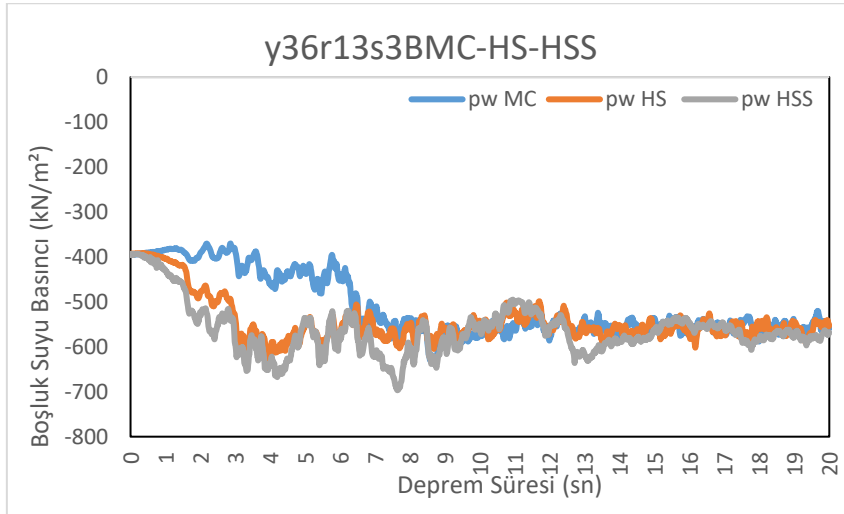
Ek 3. y36r13s13b modellerinde A noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



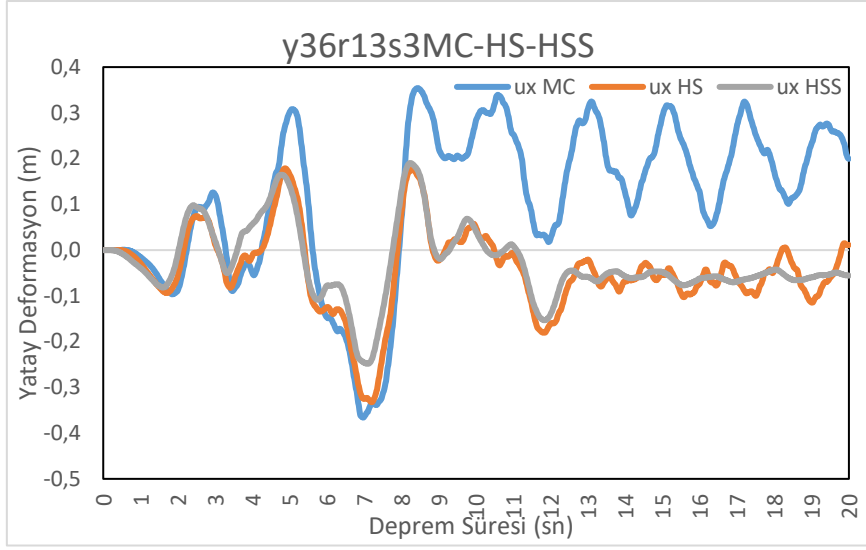
Ek 4. y36r13s3b modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



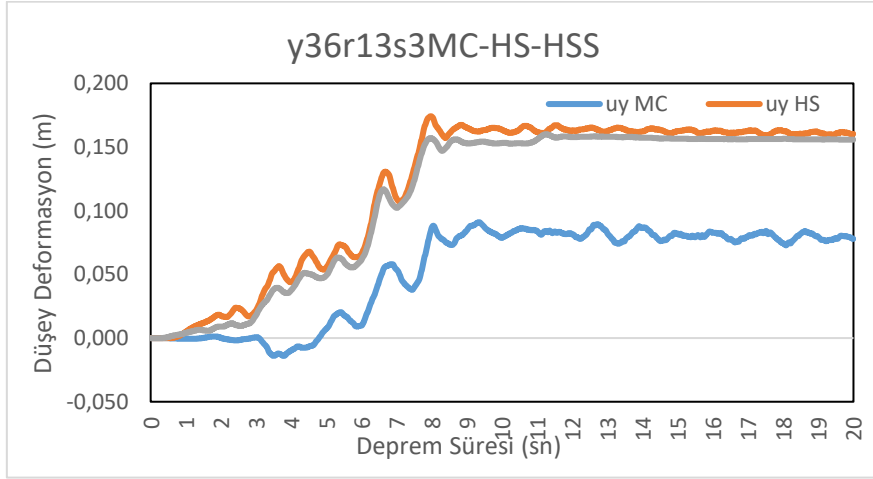
Ek 5. y36r13s3b modellerinde B noktasının düşey deformasyon grafiği



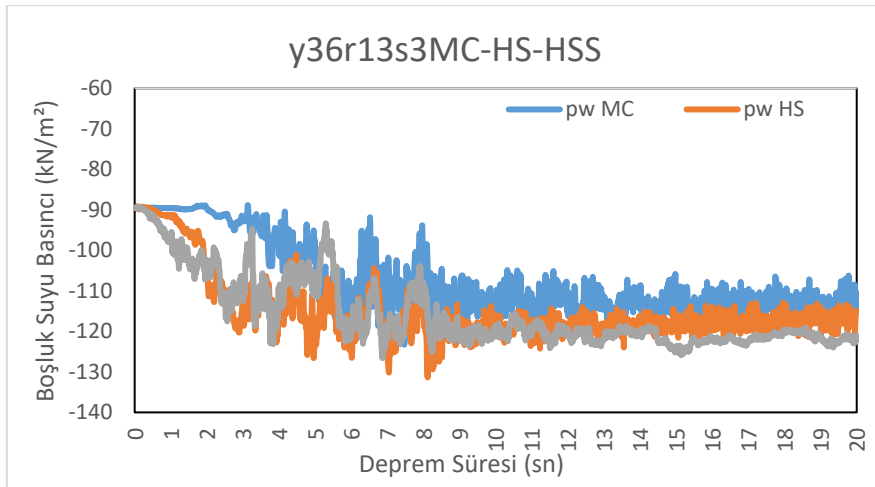
Ek 6. y36r13s13b modellerinde B noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



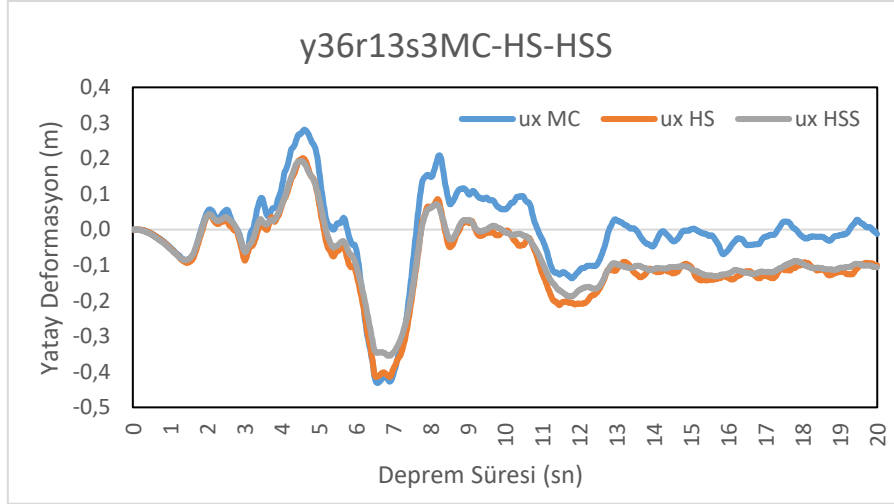
Ek 7. y36r13s3 modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



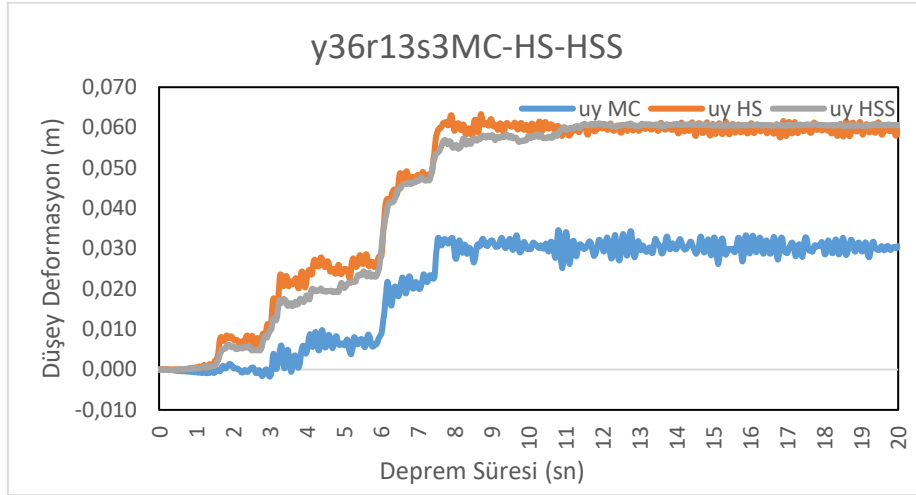
Ek 8. y36r13s3 modellerinde A noktasının düşey deformasyon grafiği



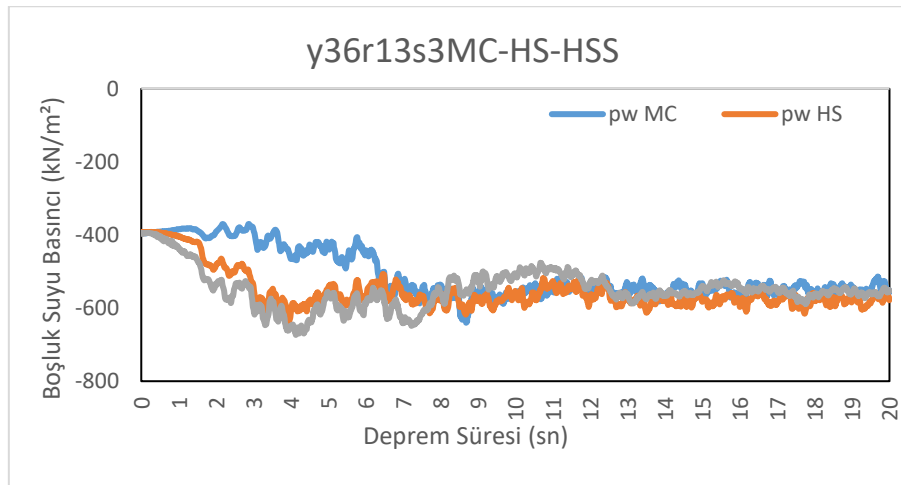
Ek 9. y36r7s13 modellerinde A noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



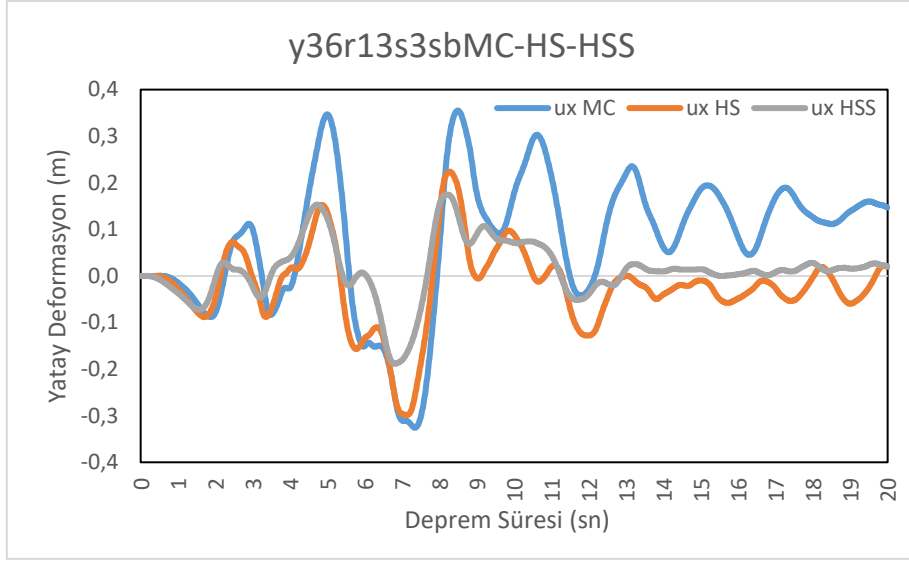
Ek 10. y36r13s3 modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



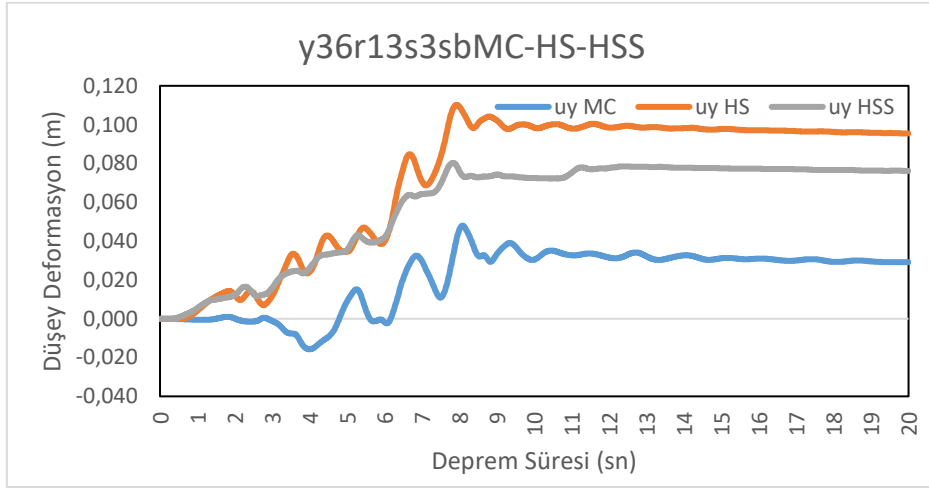
Ek 11. y36r13s3 modellerinde B noktasının düşey deformasyon grafiği



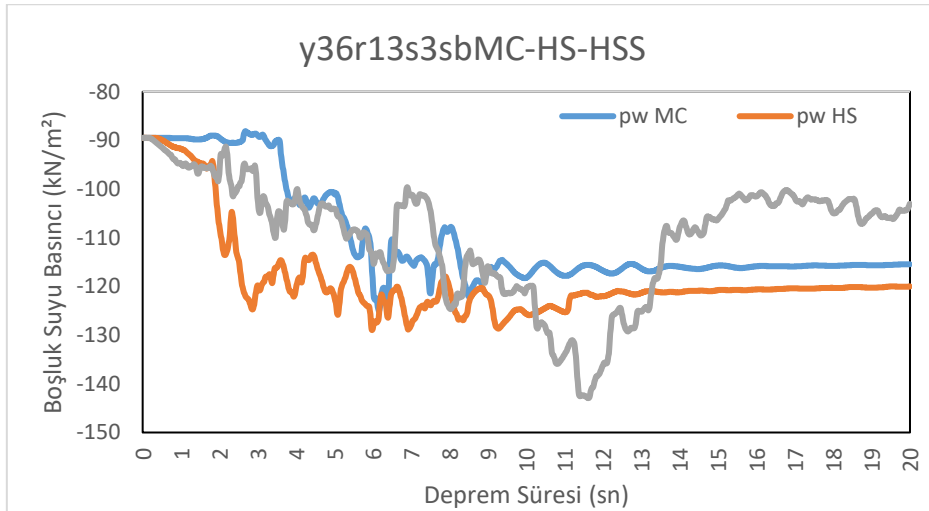
Ek 12. y36r13s3 modellerinde B noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



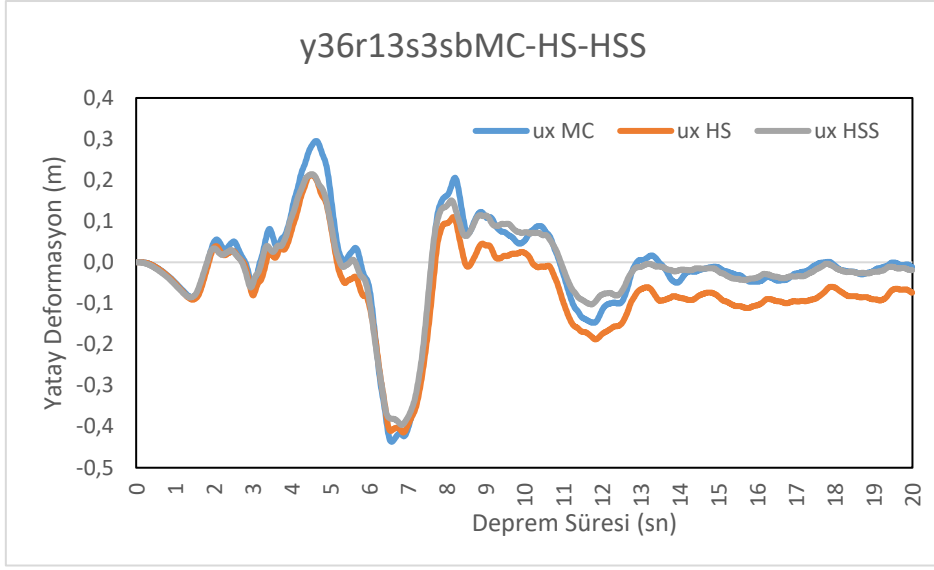
Ek 13. y36r13s3sb modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



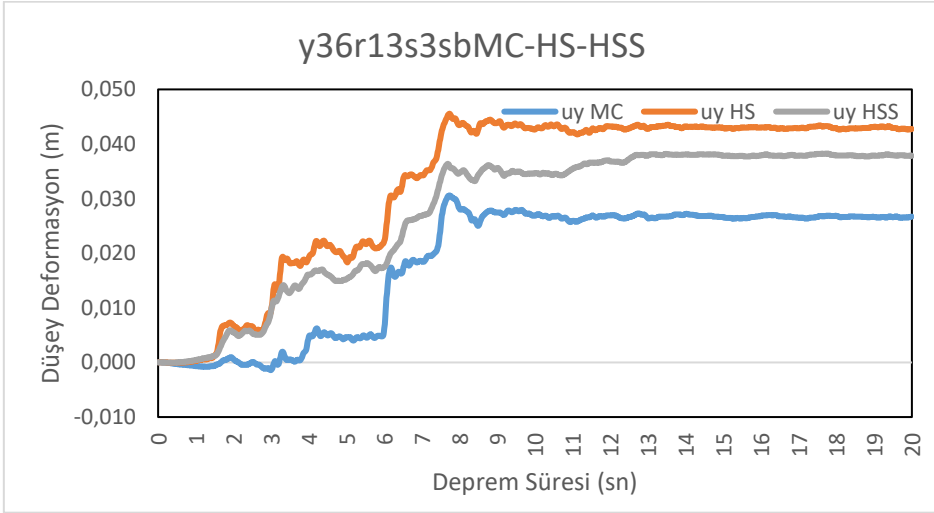
Ek 14. y36r13s3sb modellerinde A noktasının düşey deformasyon grafiği



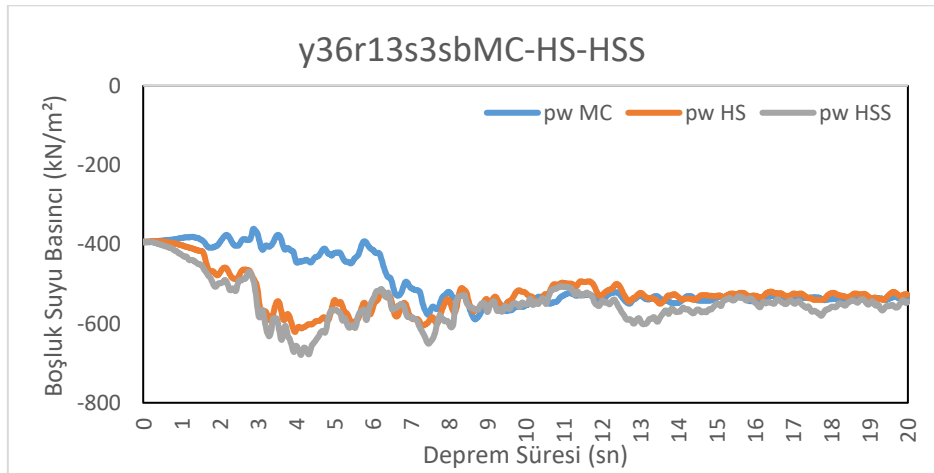
Ek 15. y36r13s3sb modellerinde A noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



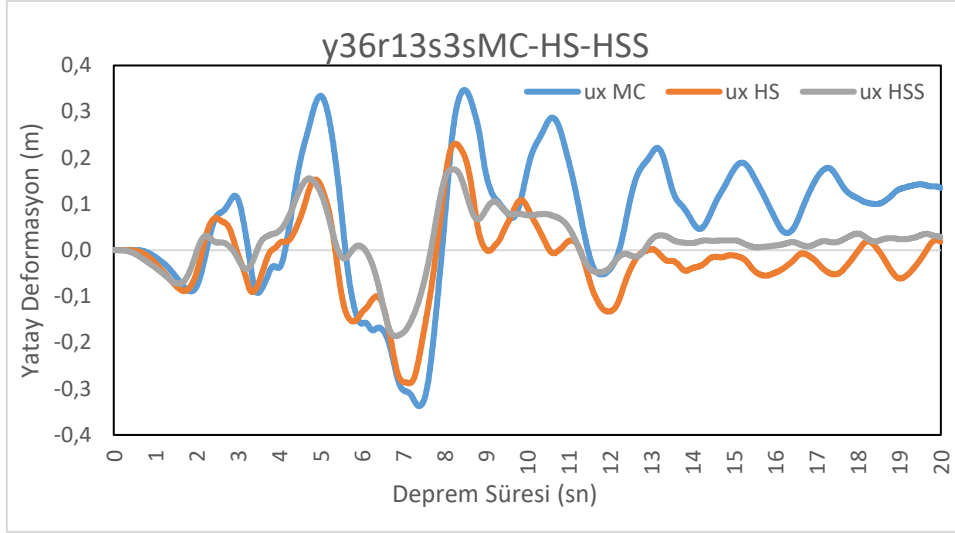
Ek 16. y36r13s3sb modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



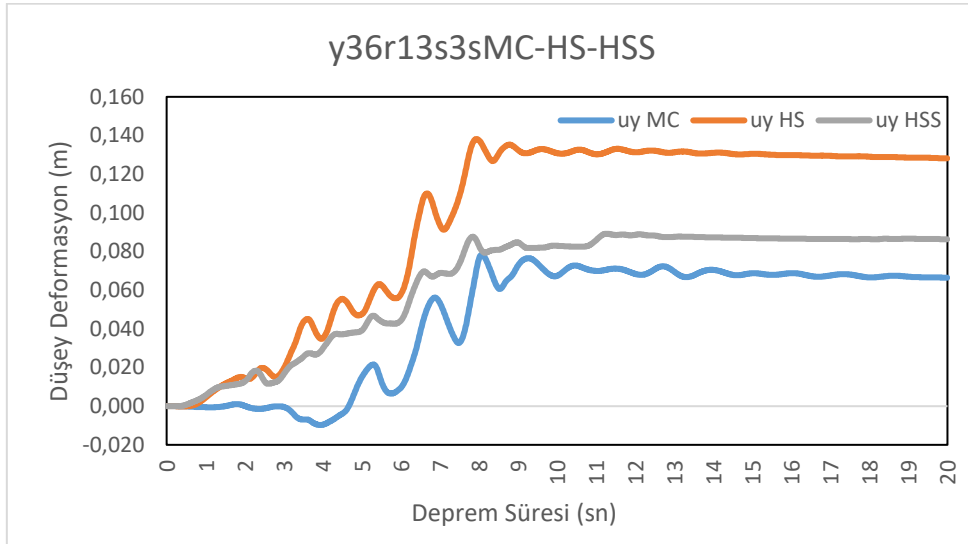
Ek 17. y36r13s3sb modellerinde B noktasının düŖey deformasyon grafiği



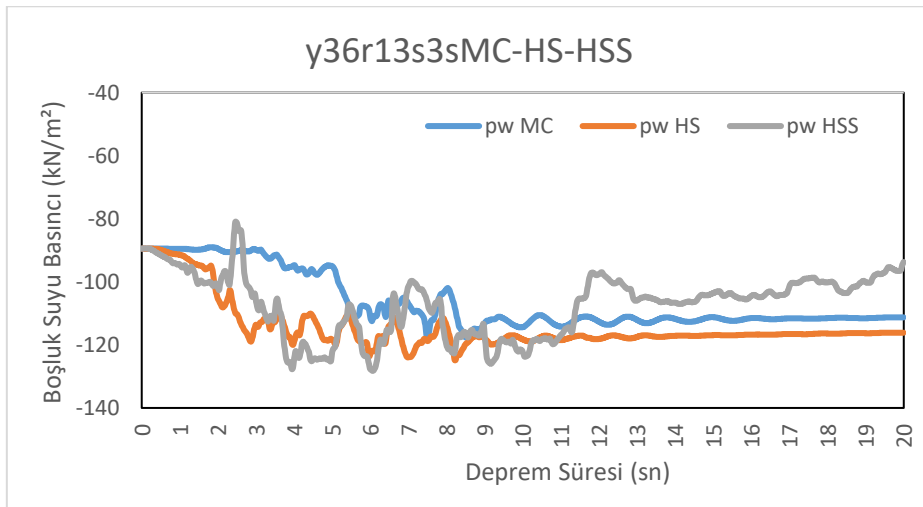
Ek 18. y36r13s3sb modellerinde B noktasının boŖluk suyu basıncı grafiği



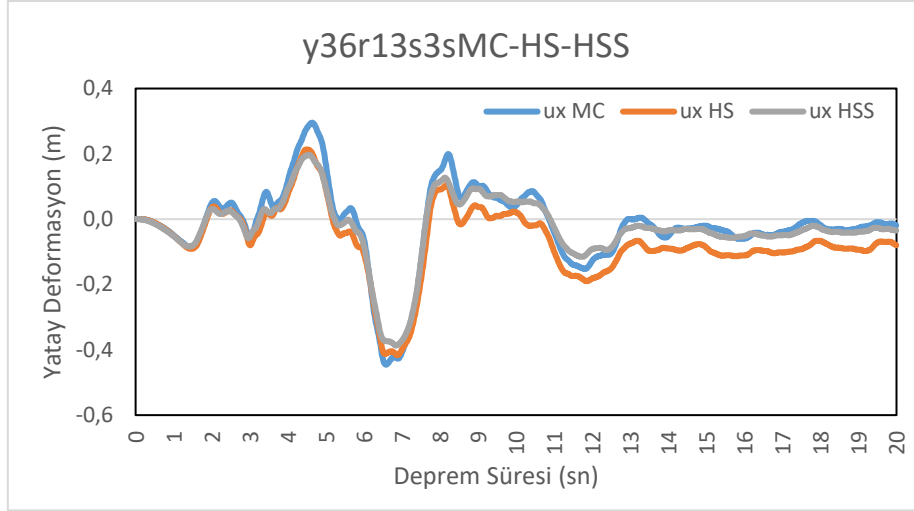
Ek 19. y36r13s3s modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



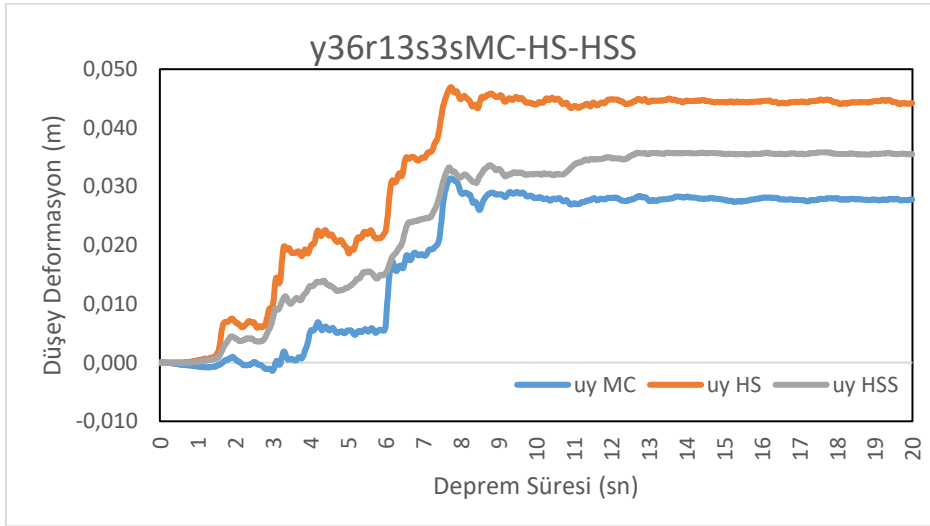
Ek 20. y36r13s3s modellerinde A noktasının düŖey deformasyon grafiği



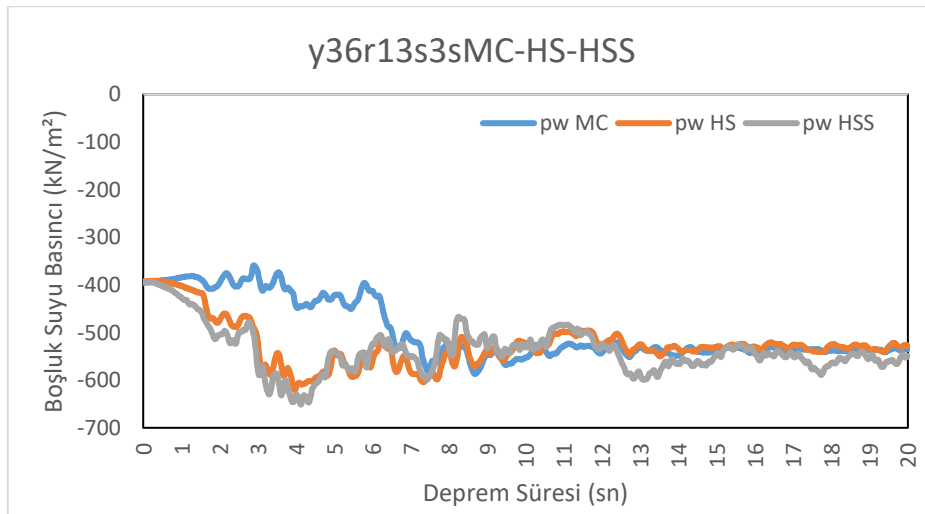
Ek 21. y36r13s3s modellerinde A noktasının boŖluk suyu basıncı grafiği



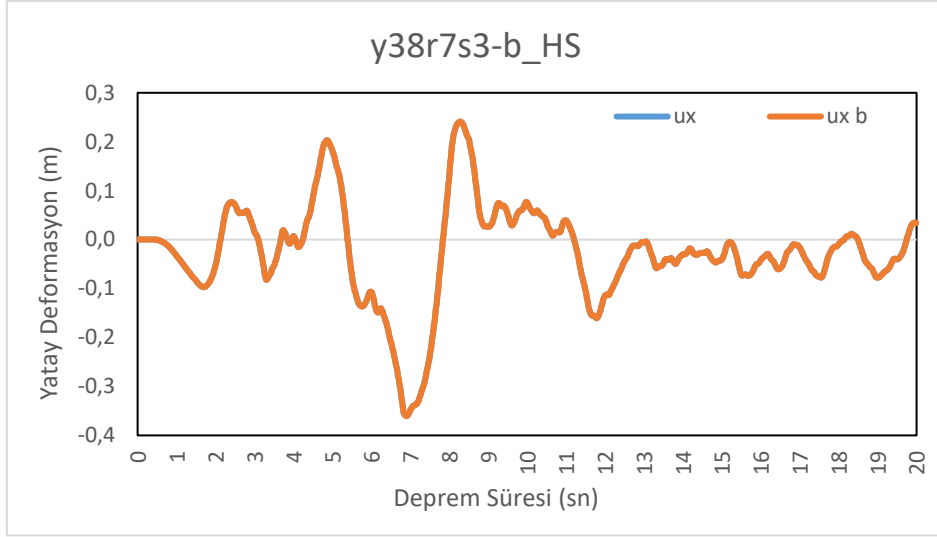
Ek 22. y36r13s3s modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



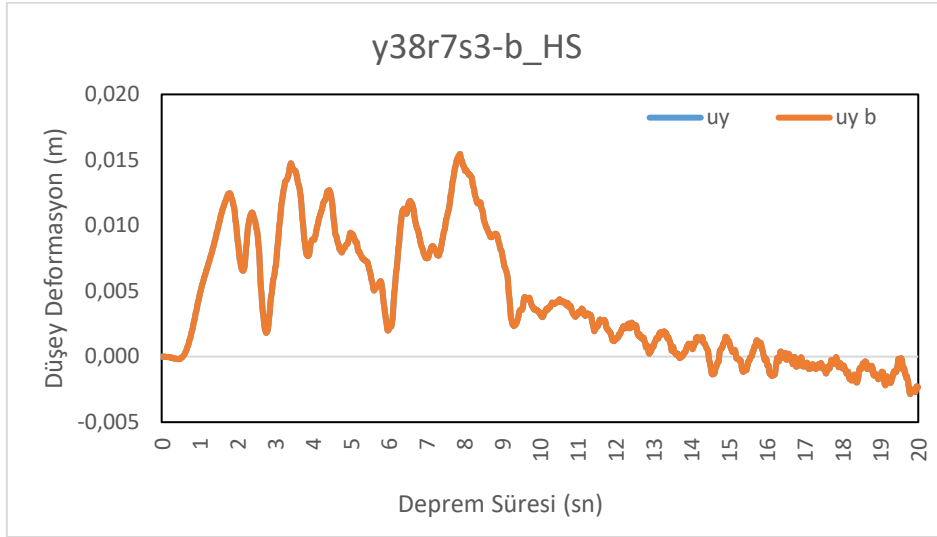
Ek 23. y36r13s3s modellerinde B noktasının düşey deformasyon grafiği



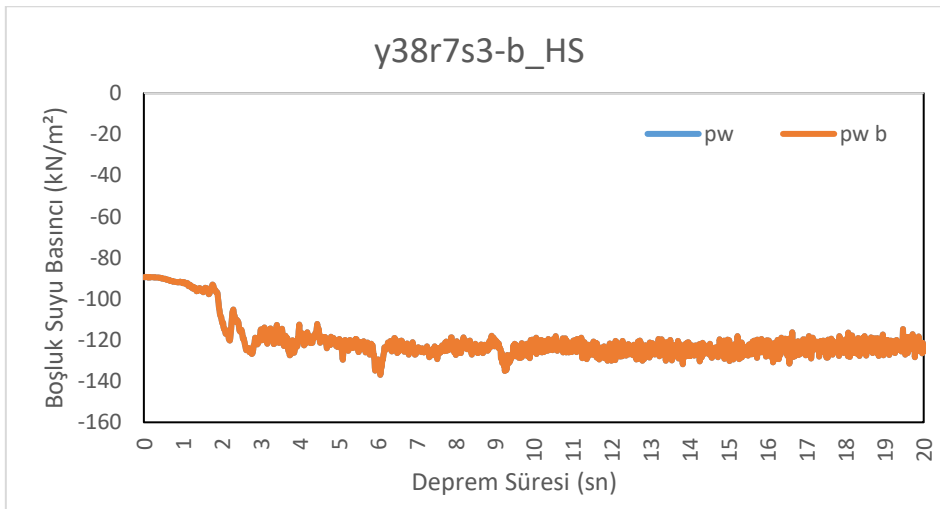
Ek 24. y36r13s3s modellerinde B noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



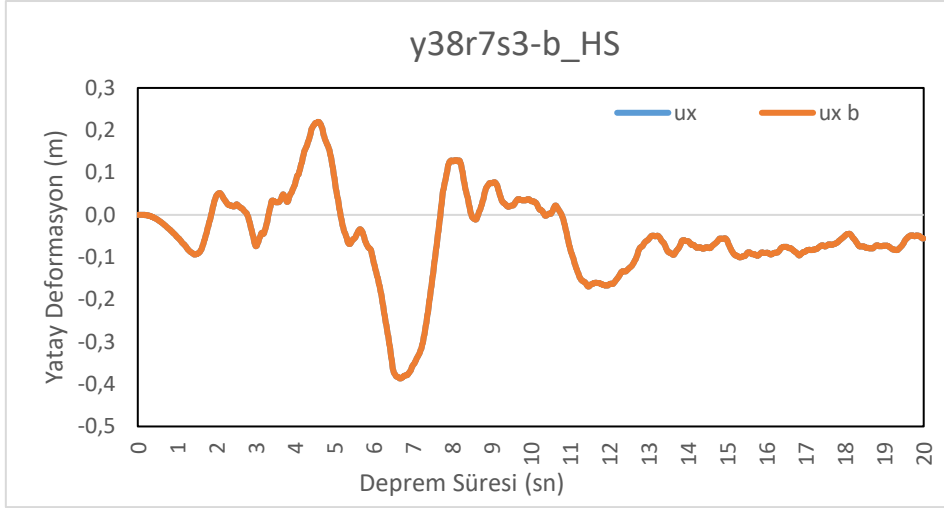
Ek 25. y38r7s3 ve y38r7s3b modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



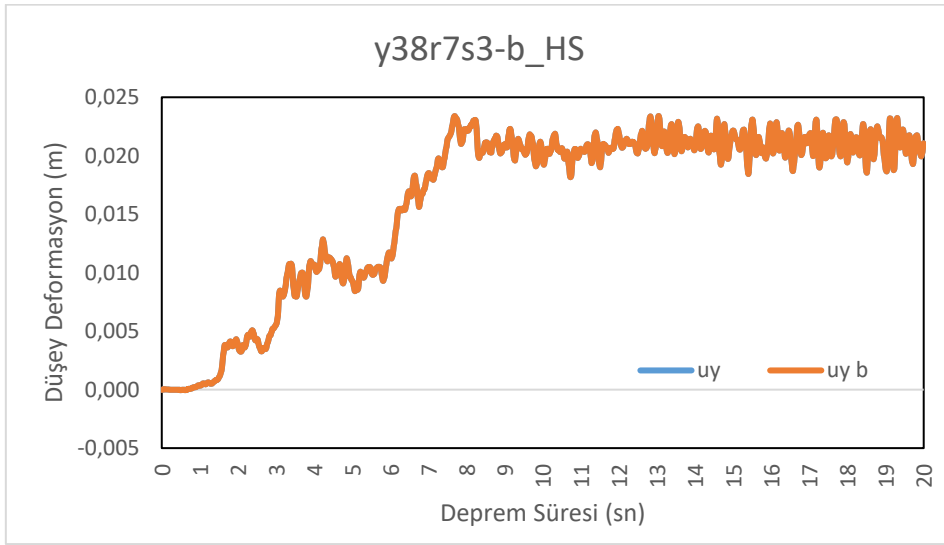
Ek 26. y38r7s3 ve y38r7s3b modellerinde A noktasının düŖey deformasyon grafiği



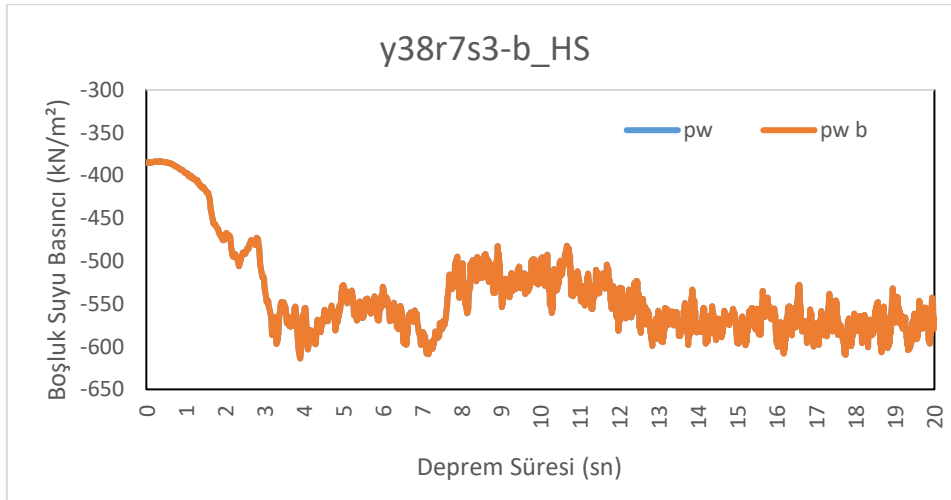
Ek 27. y38r7s3 ve y38r7s3b modellerinde A noktasının boŖluk suyu basıncı grafiği



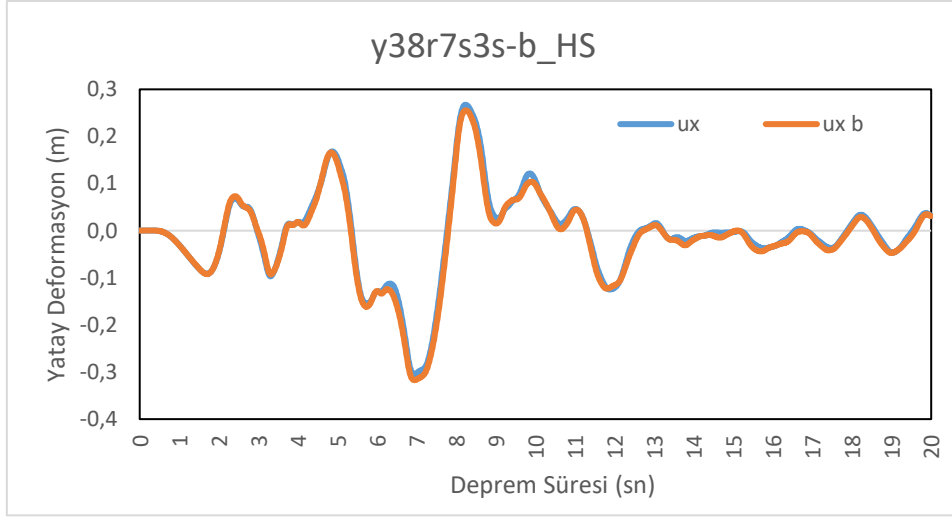
Ek 28. y38r7s3 ve y38r7s3b modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



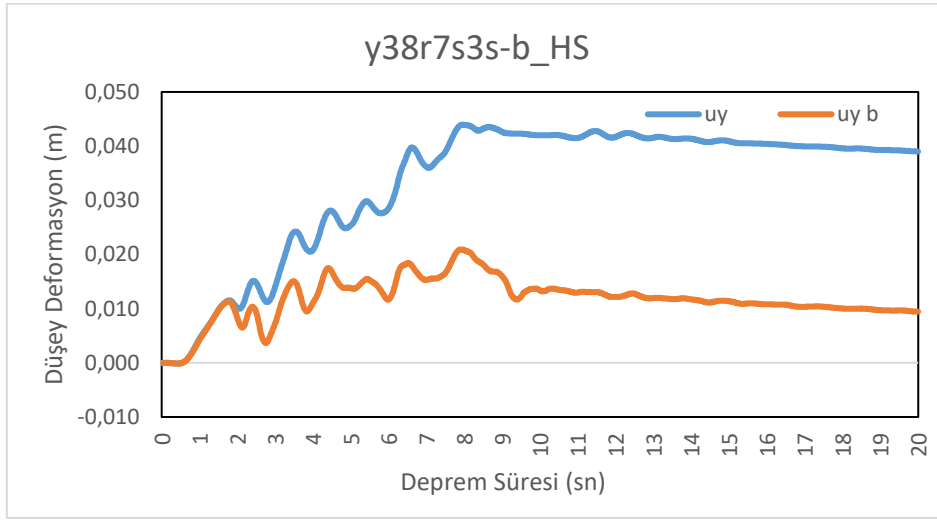
Ek 29. y38r7s3 ve y38r7s3b modellerinde B noktasının düşey deformasyon grafiği



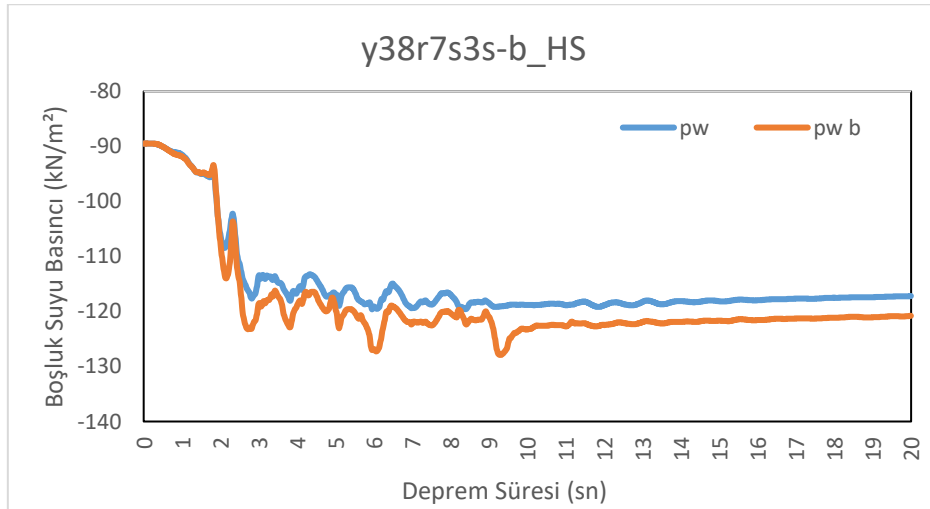
Ek 30. y38r7s3 ve y38r7s3b modellerinde B noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



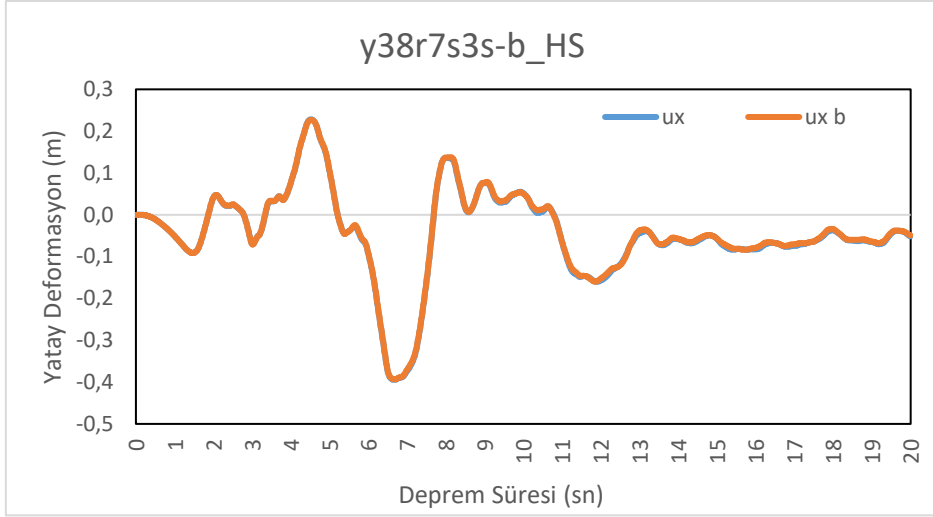
Ek 31. y38r7s3s ve y38r7s3sb modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



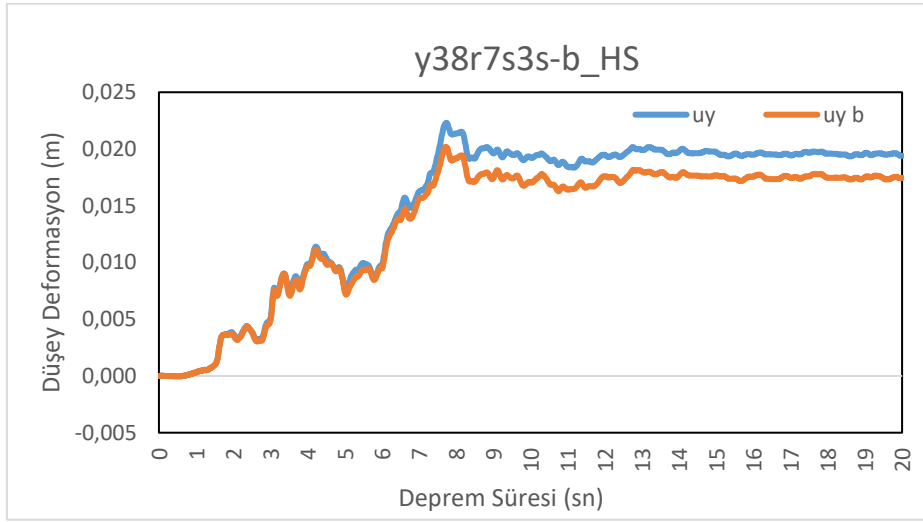
Ek 32. y38r7s3s ve y38r7s3sb modellerinde A noktasının düŖey deformasyon grafiği



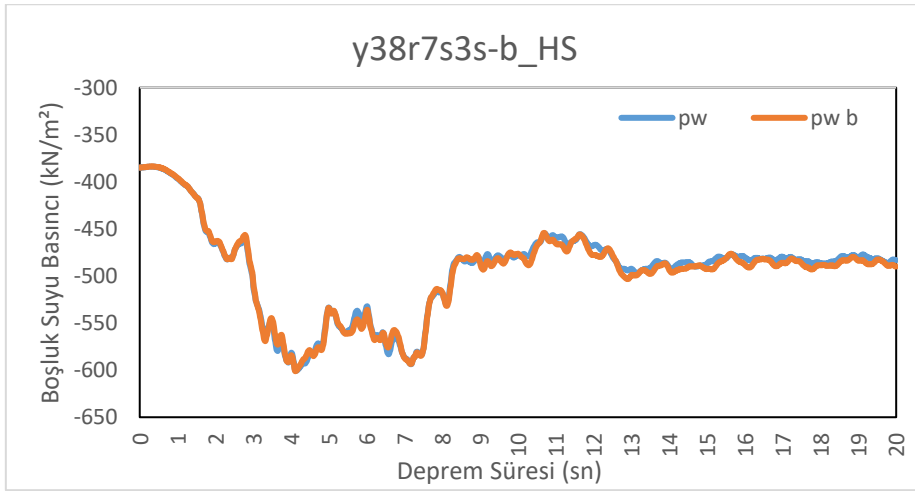
Ek 33. y38r7s3s ve y38r7s3sb modellerinde A noktasının boŖluk suyu basıncı grafiği



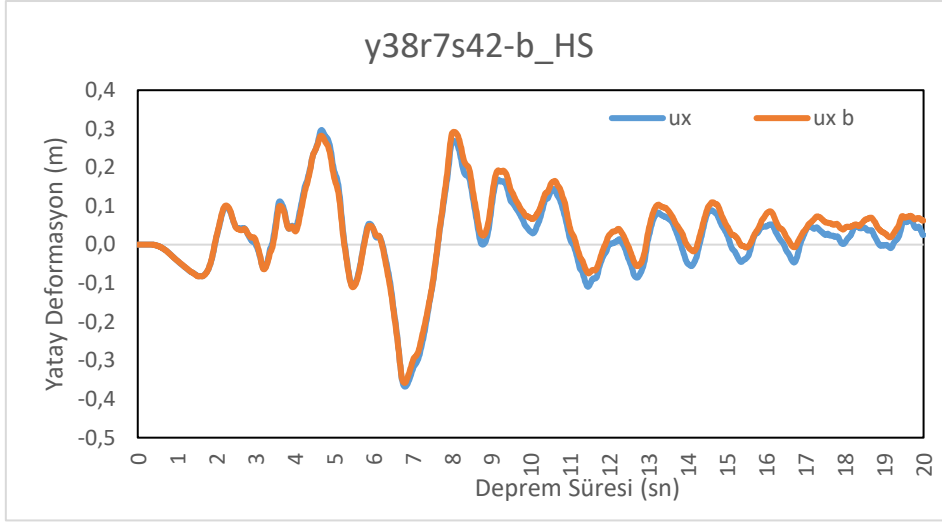
Ek 34. y38r7s3s ve y38r7s3sb modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



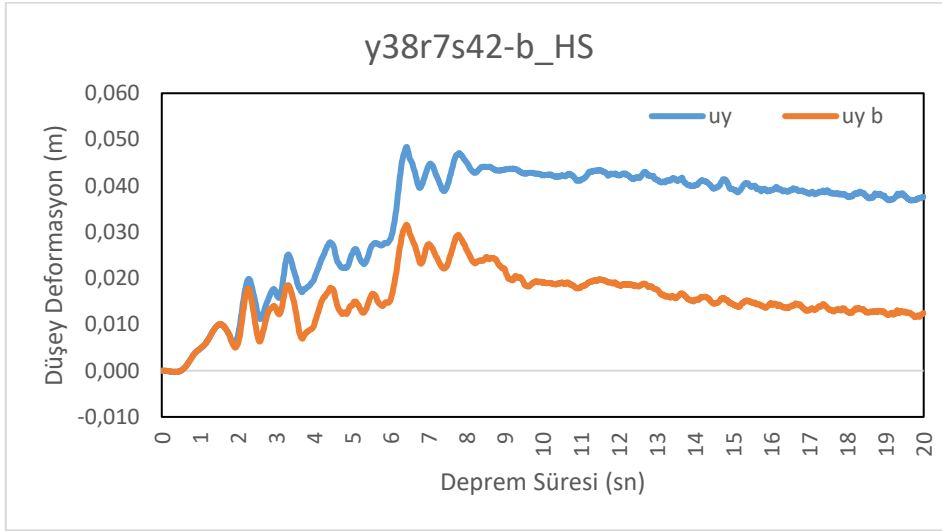
Ek 35. y38r7s3s ve y38r7s3sb modellerinde B noktasının düşey deformasyon grafiği



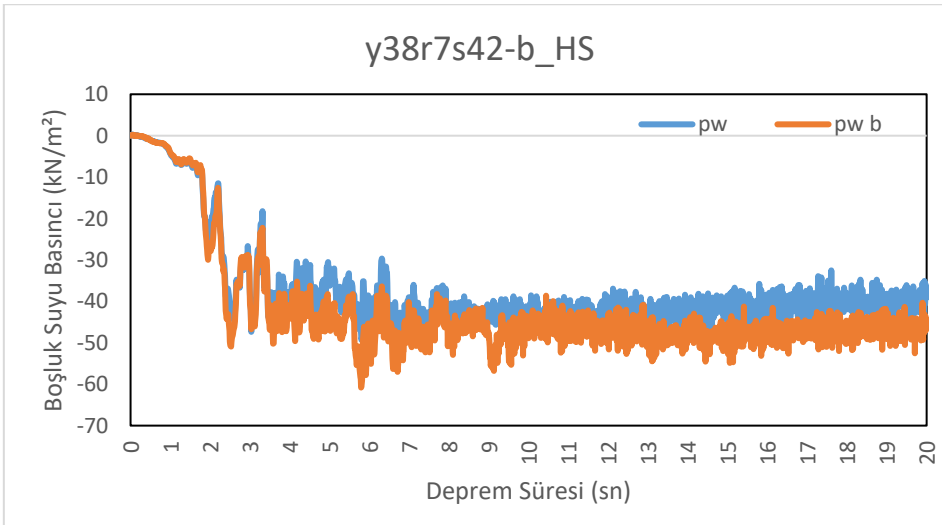
Ek 36. y38r7s3s ve y38r7s3sb modellerinde B noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



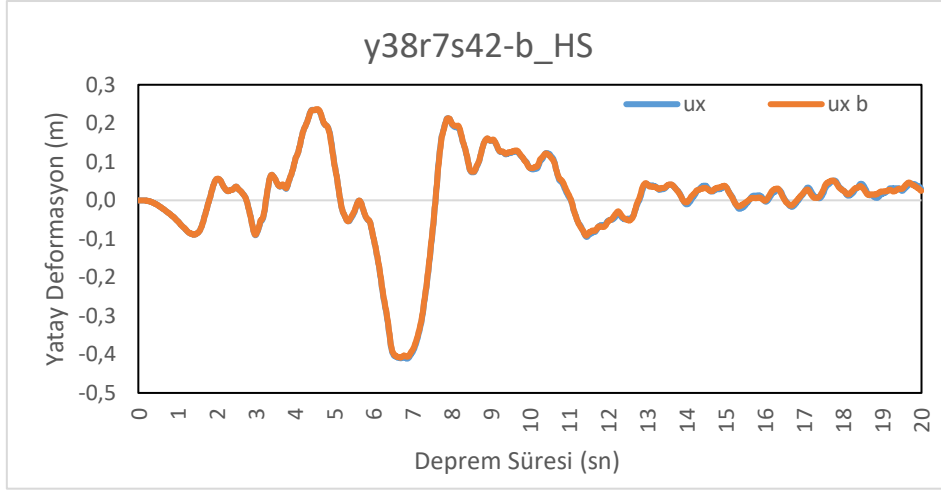
Ek 37. y38r7s42 ve y38r7s42b modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



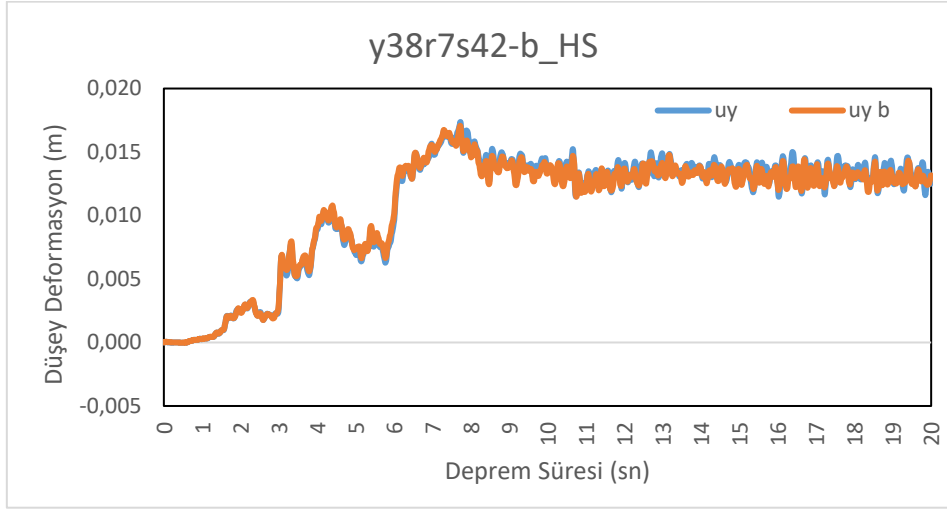
Ek 38. y38r7s42 ve y38r7s42b modellerinde A noktasının düşey deformasyon grafiği



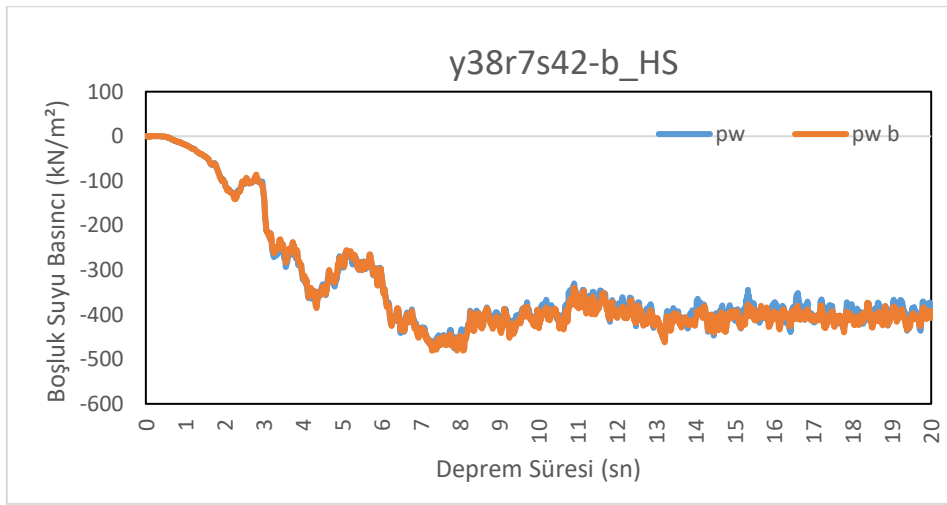
Ek 39. y38r7s42 ve y38r7s42b modellerinde A noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



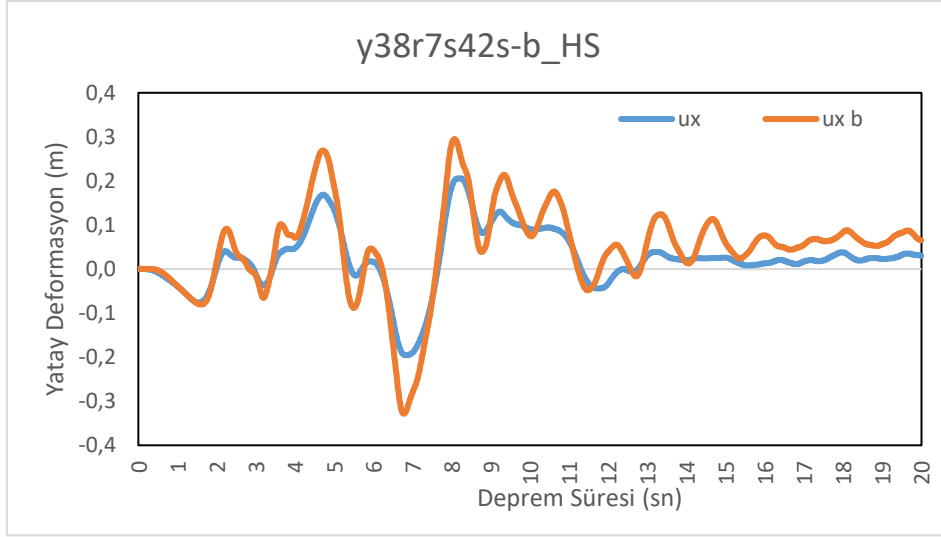
Ek 40. y38r7s42 ve y38r7s42b modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



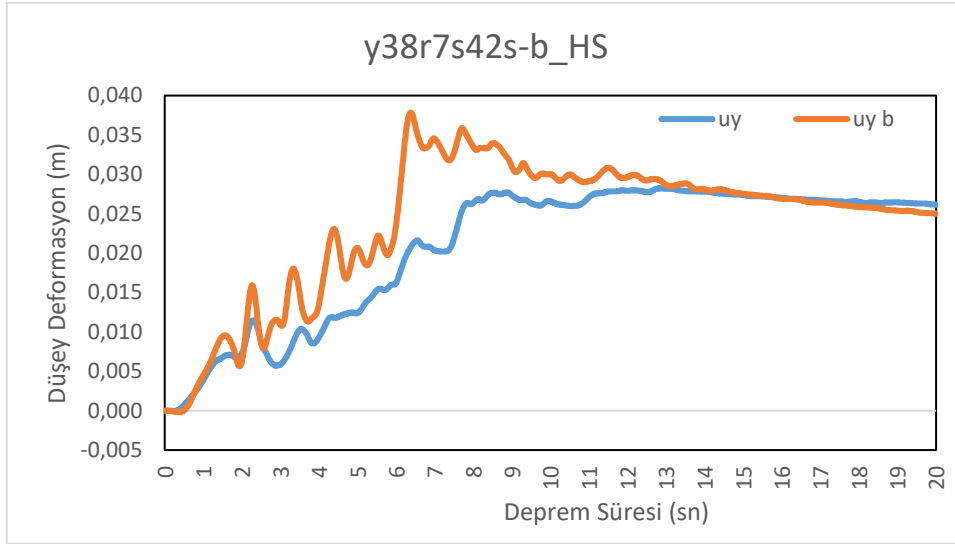
Ek 41. y38r7s42 ve y38r7s42b modellerinde B noktasının düşey deformasyon grafiği



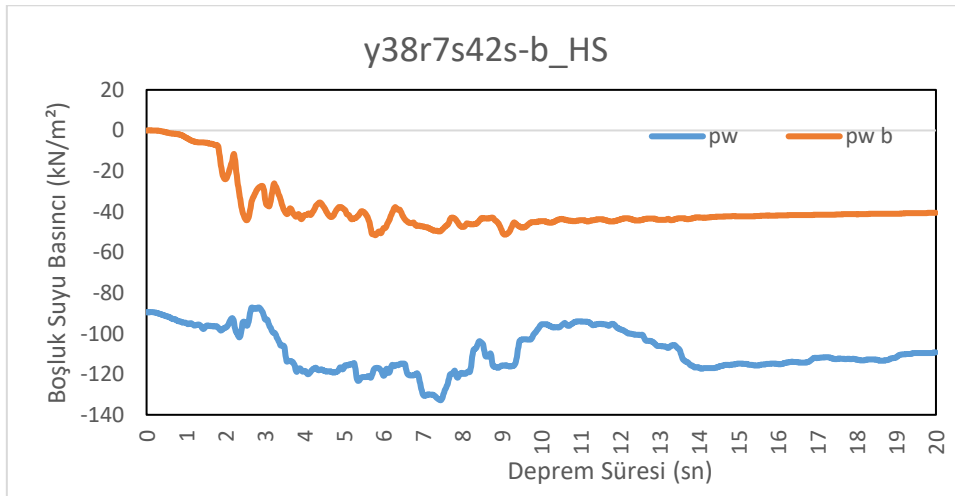
Ek 42. y38r7s42 ve y38r7s42b modellerinde B noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



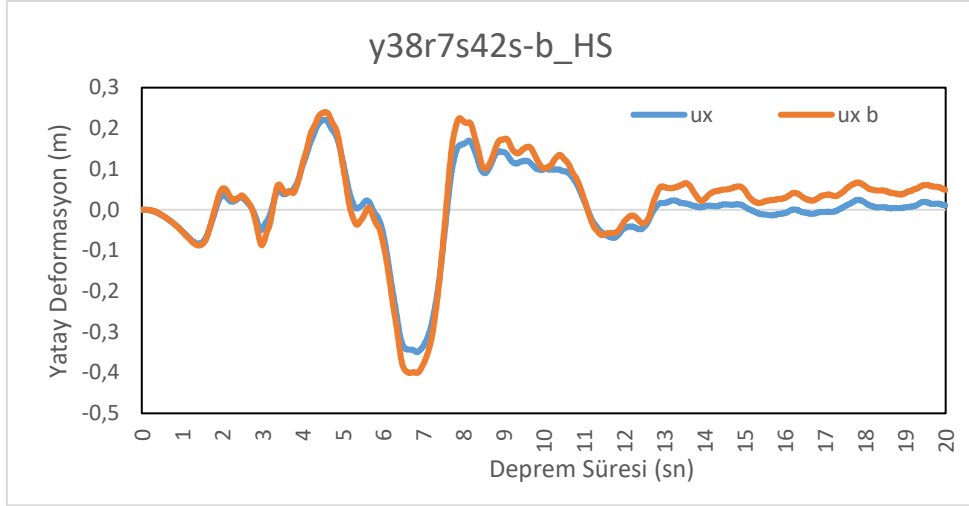
Ek 43. y38r7s42s ve y38r7s42sb modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



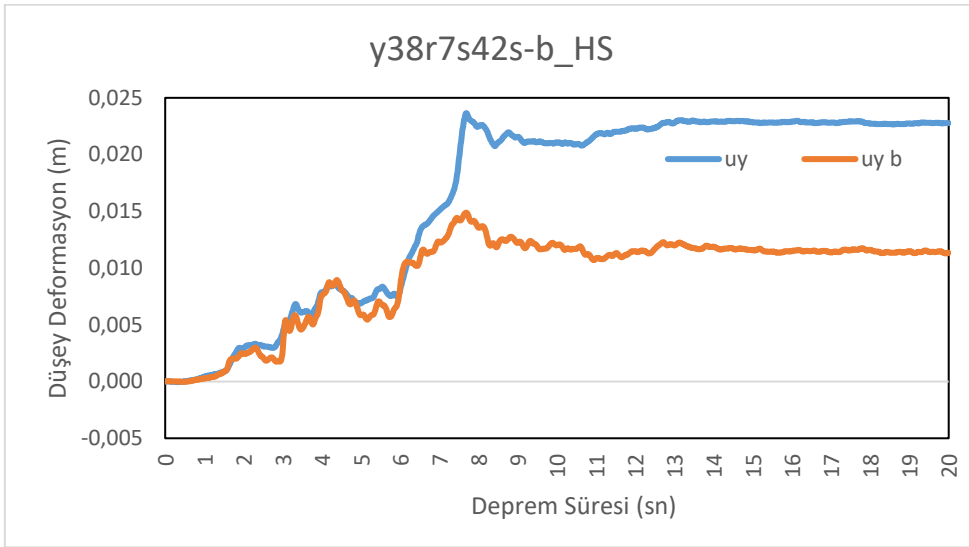
Ek 44. y38r7s42s ve y38r7s42sb modellerinde A noktasının düşey deformasyon grafiği



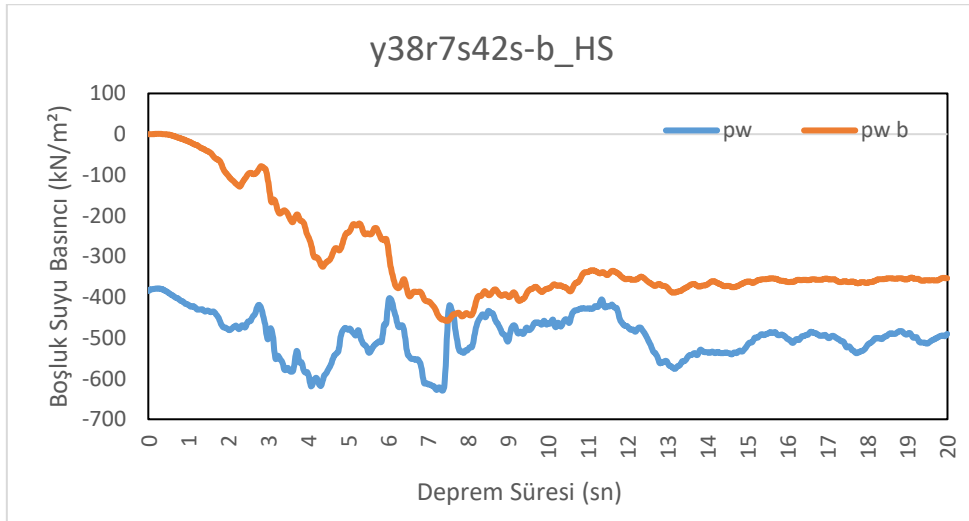
Ek 45. y38r7s42s ve y38r7s42sb modellerinde A noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



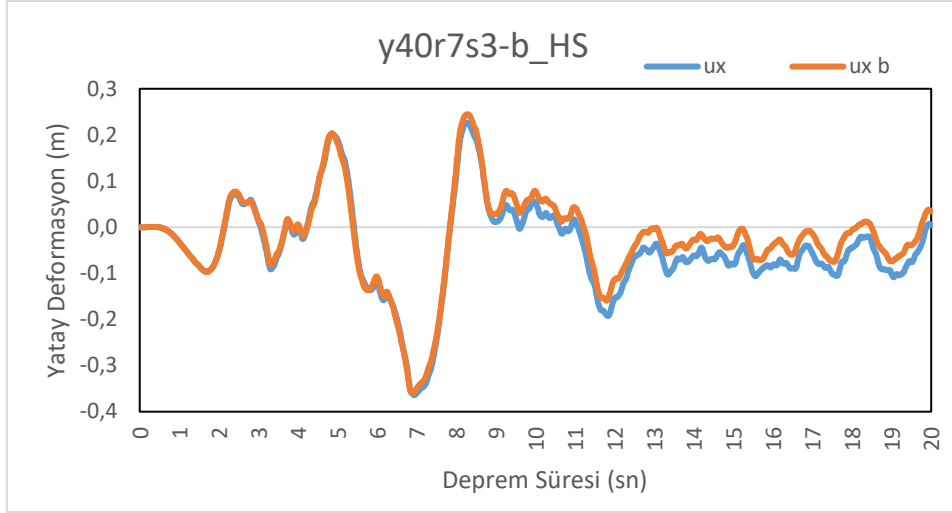
Ek 46. y38r7s42s ve y38r7s42sb modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



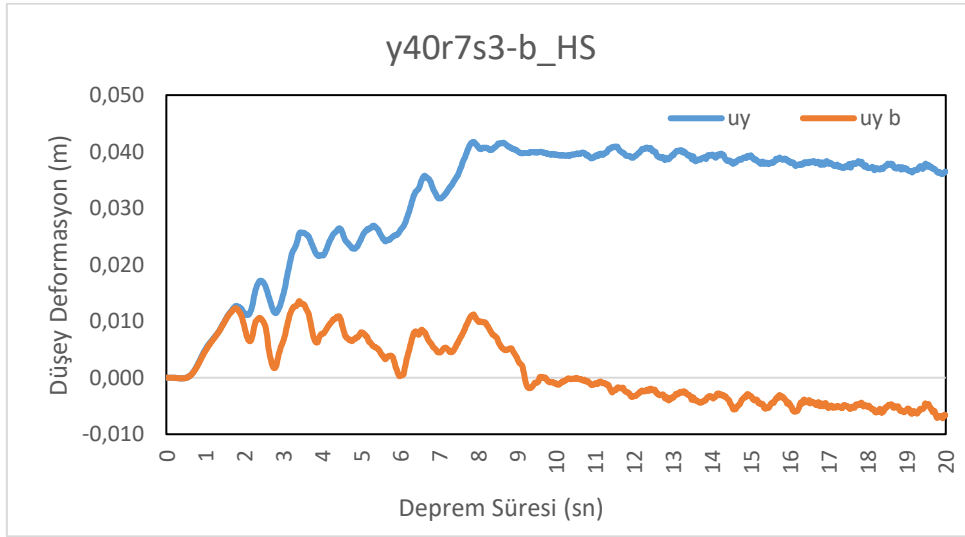
Ek 47. y38r7s42s ve y38r7s42sb modellerinde B noktasının düŖey deformasyon grafiği



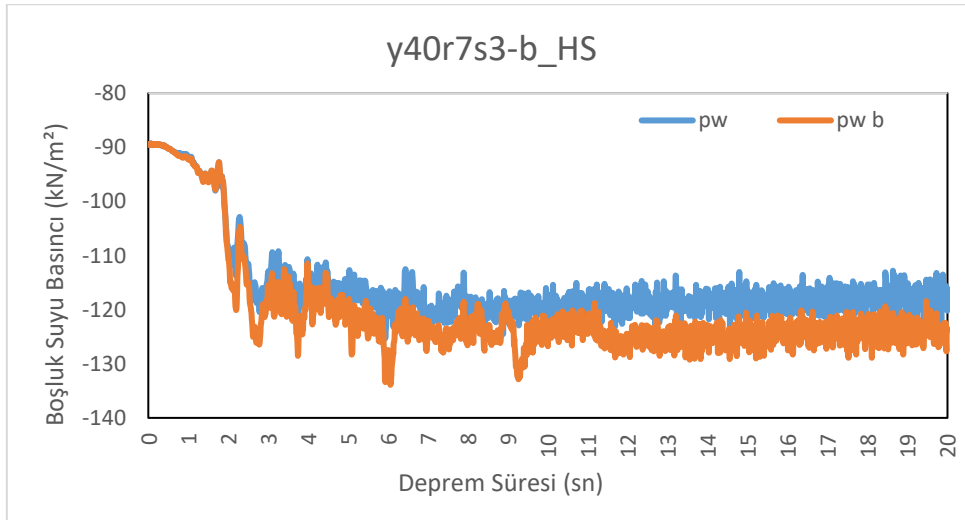
Ek 48. . y38r7s42s ve y38r7s42sb modellerinde B noktasının boŖluk suyu basıncı grafiği



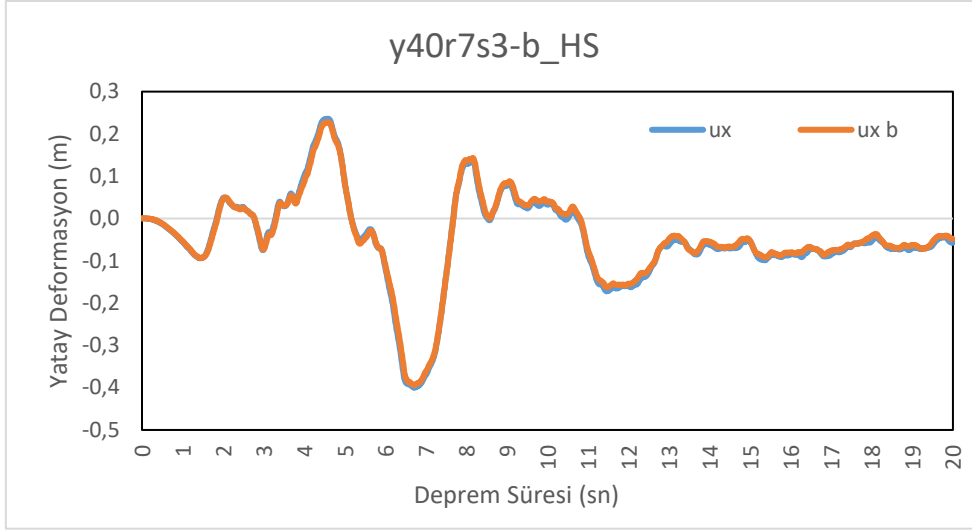
Ek 49. y40r7s3 ve y40r7s3b modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



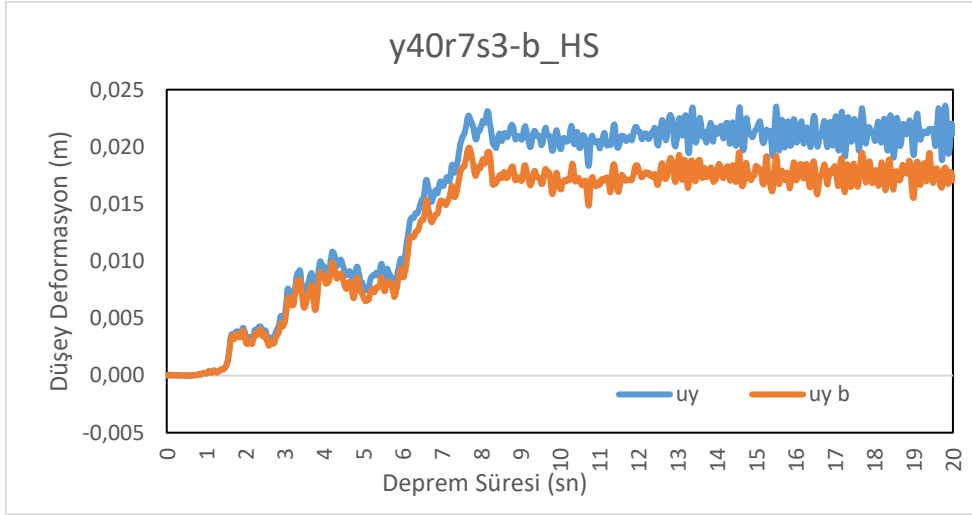
Ek 50. y40r7s3 ve y40r7s3b modellerinde A noktasının düŖey deformasyon grafiği



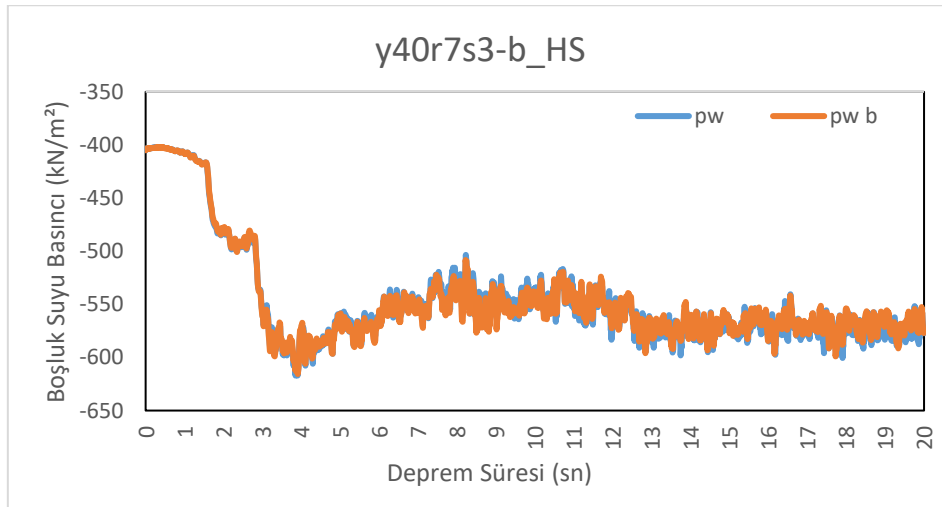
Ek 51. y40r7s3 ve y40r7s3b modellerinde A noktasının boŖluk suyu basıncı grafiği



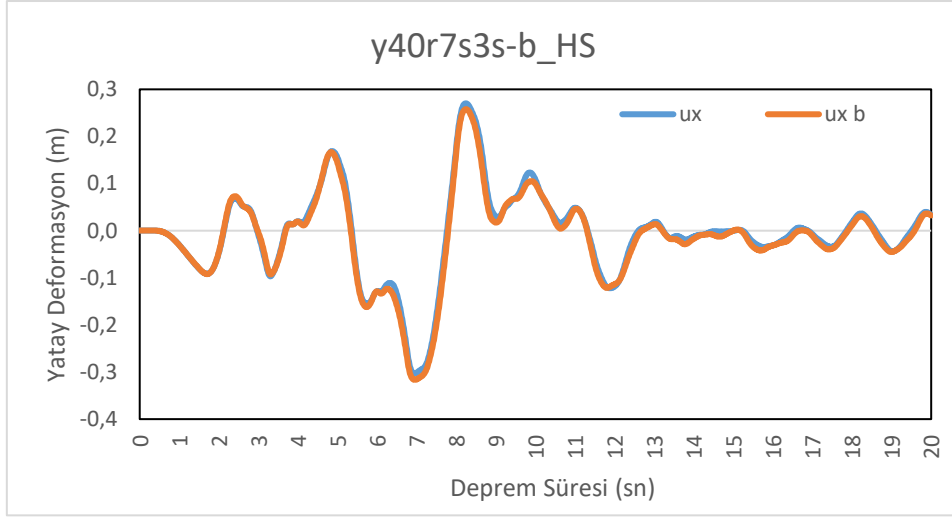
Ek 52. y40r7s3 ve y40r7s3b modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



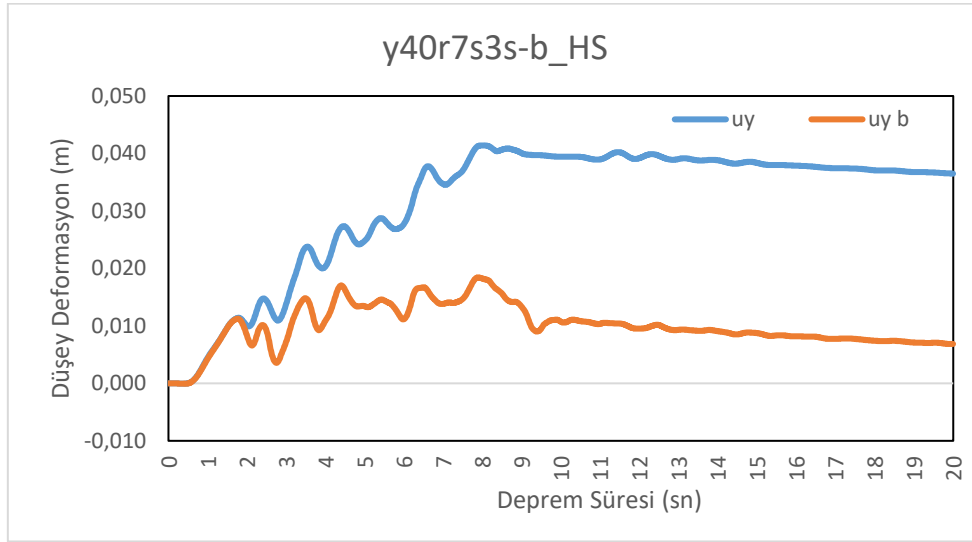
Ek 53. y40r7s3 ve y40r7s3b modellerinde B noktasının düşey deformasyon grafiği



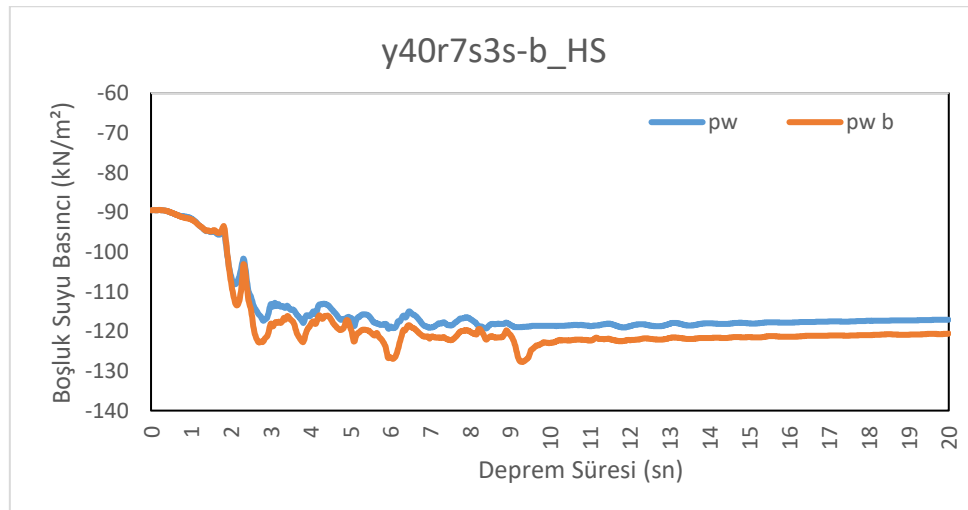
Ek 54. y40r7s3 ve y40r7s3b modellerinde B noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



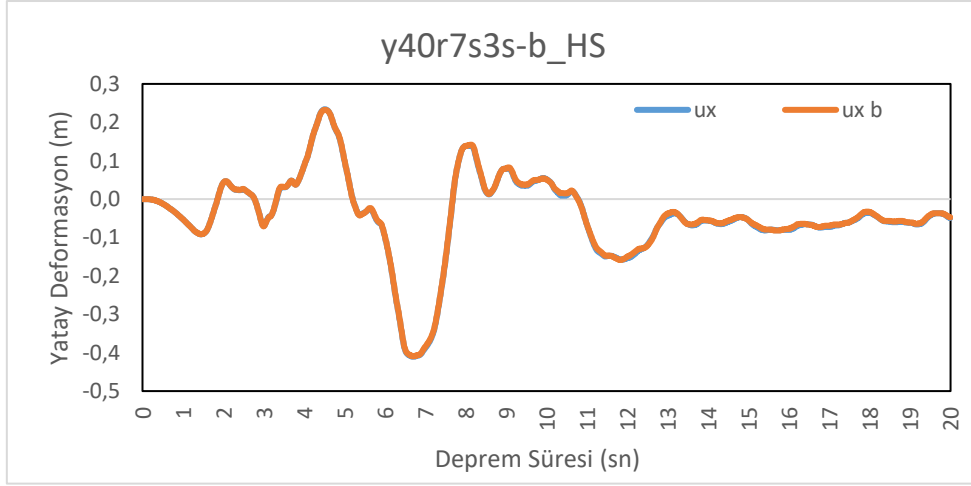
Ek 55. y40r7s3s ve y40r7s3sb modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



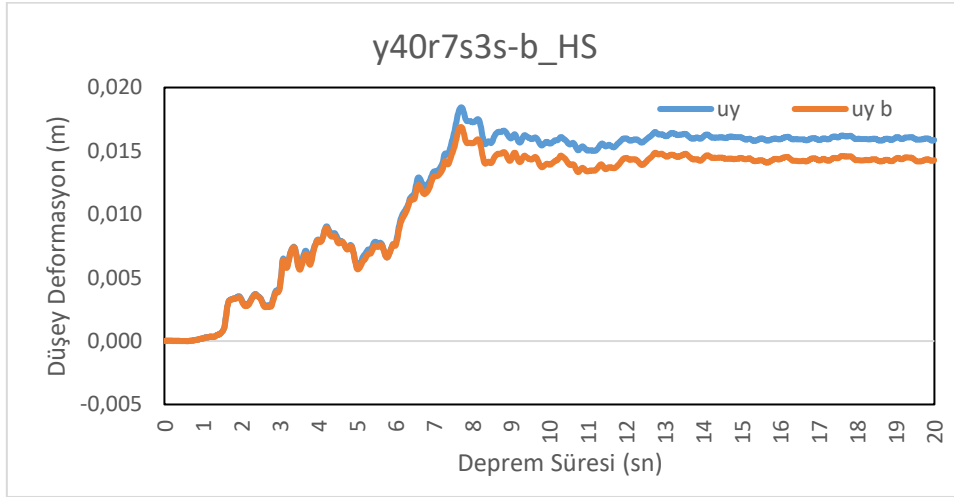
Ek 56. y40r7s3s ve y40r7s3sb modellerinde A noktasının düŖey deformasyon grafiği



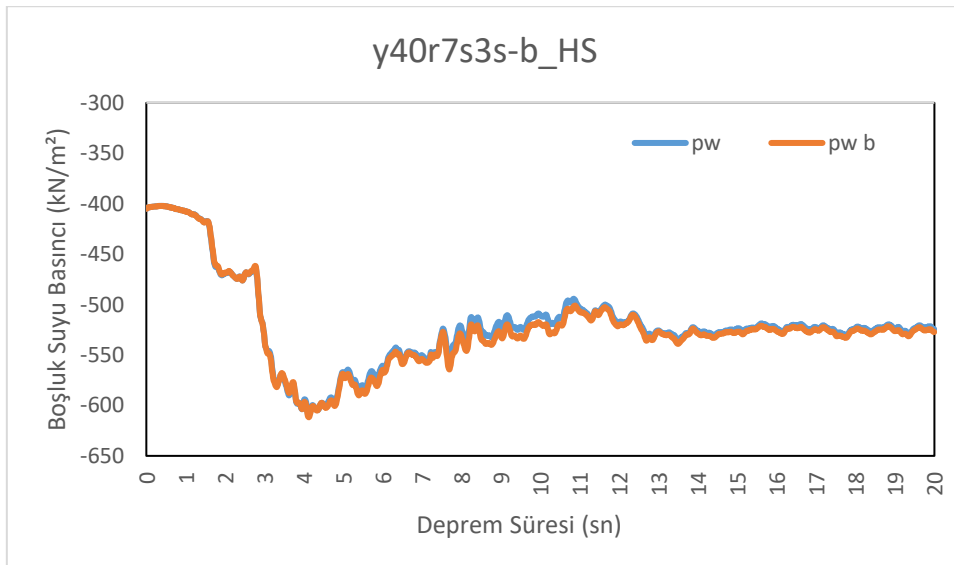
Ek 57. y40r7s3s ve y40r7s3sb modellerinde A noktasının boŖluk suyu basıncı grafiği



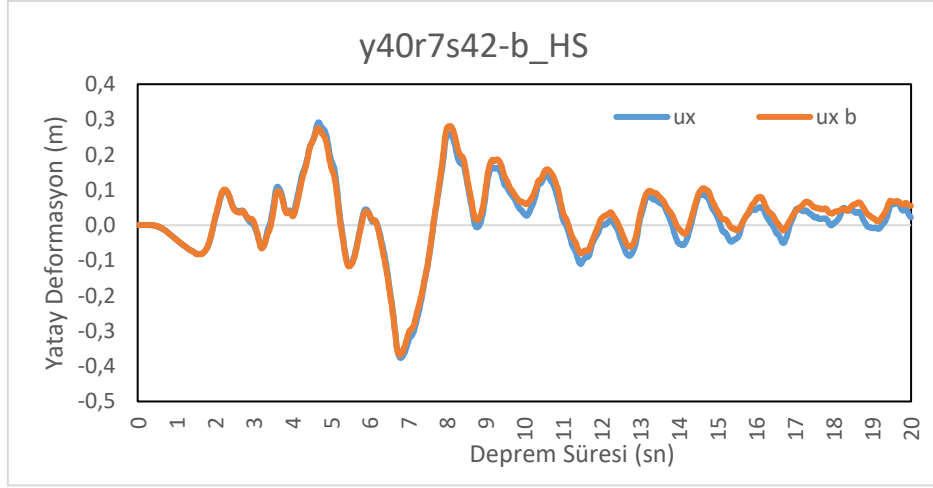
Ek 58. y40r7s3s ve y40r7s3sb modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



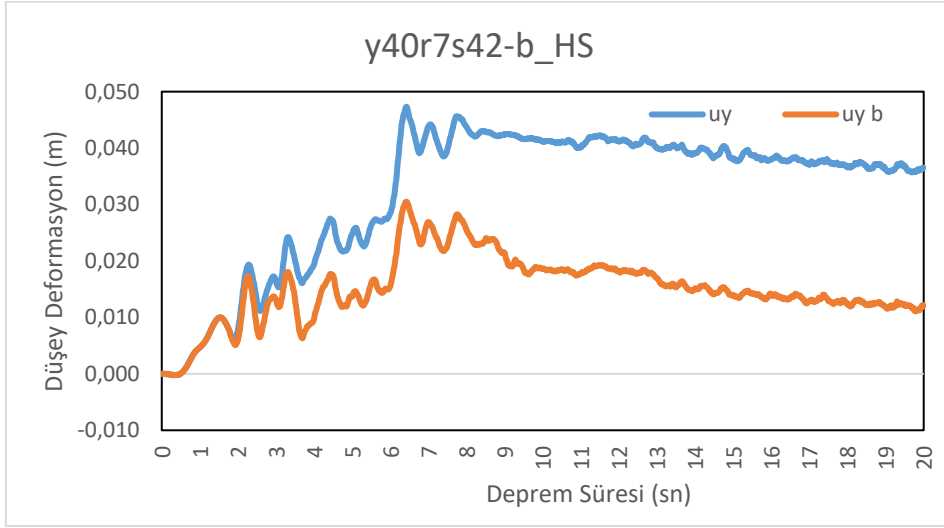
Ek 59. y40r7s3s ve y40r7s3sb modellerinde B noktasının düŖey deformasyon grafiği



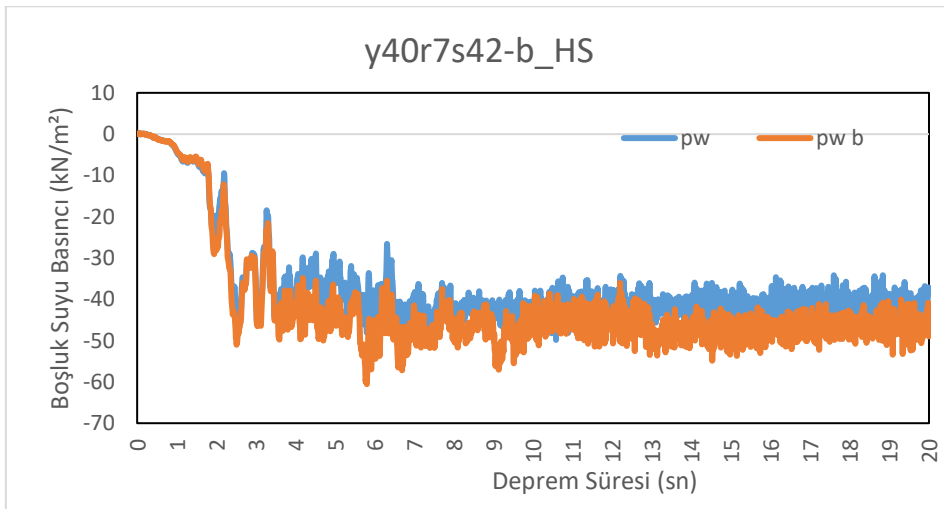
Ek 60. y40r7s3s ve y40r7s3sb modellerinde B noktasının boŖluk suyu basıncı grafiği



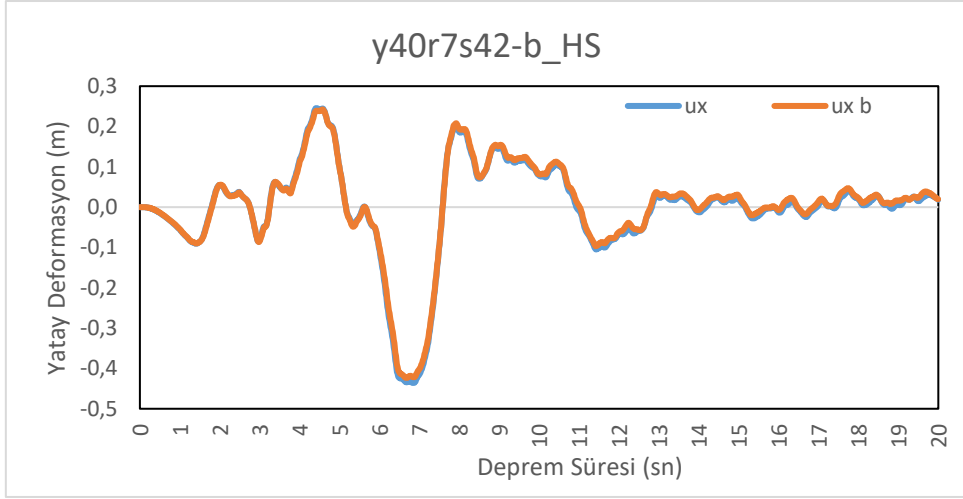
Ek 61. y40r7s42 ve y40r7s42b modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



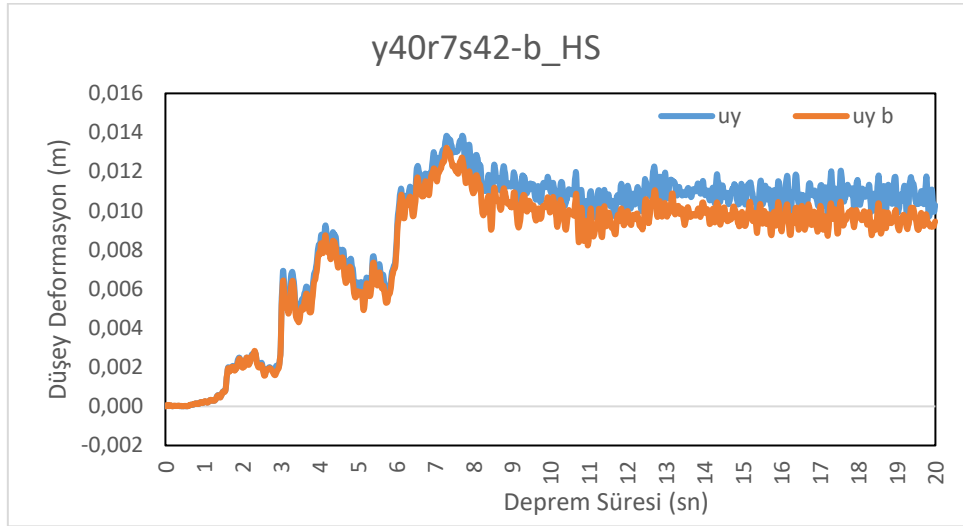
Ek 62. y40r7s42 ve y40r7s42b modellerinde A noktasının düŖey deformasyon grafiği



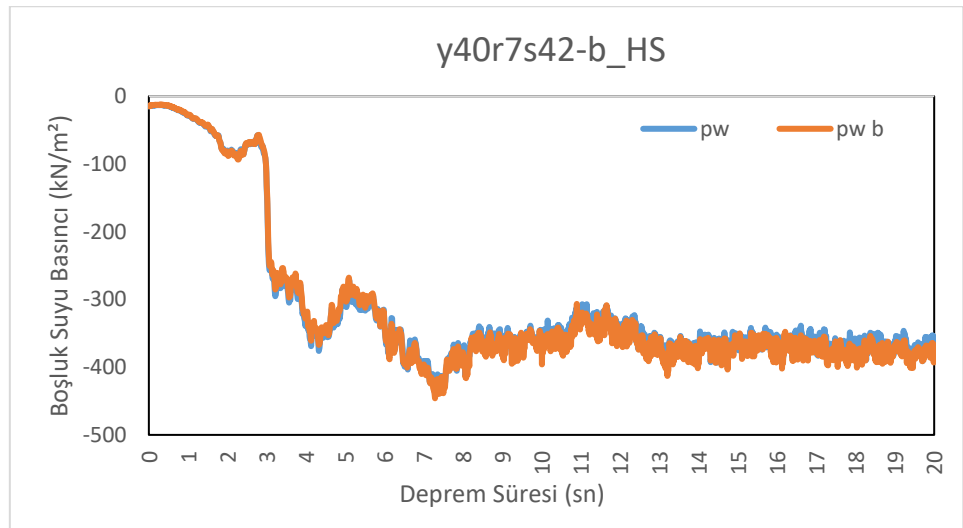
Ek 63. y40r7s42 ve y40r7s42b modellerinde A noktasının boŖluk suyu basıncı grafiği



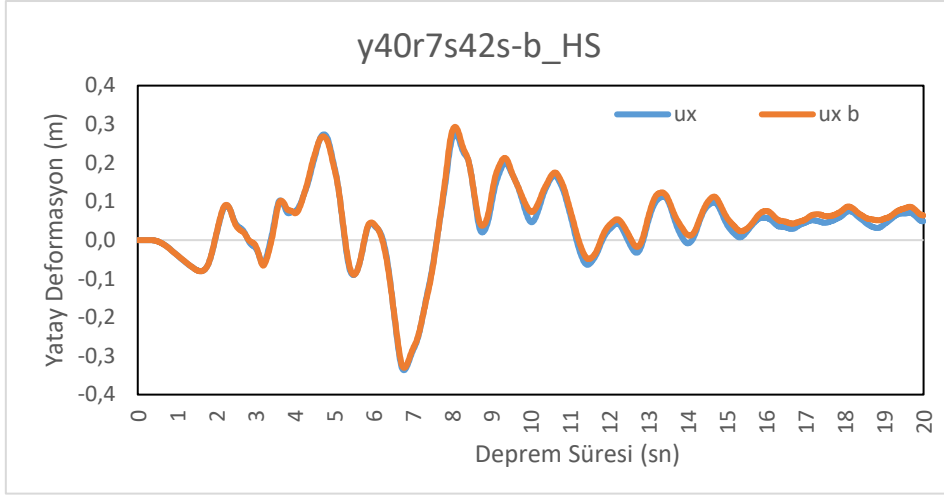
Ek 64. y40r7s42 ve y40r7s42b modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



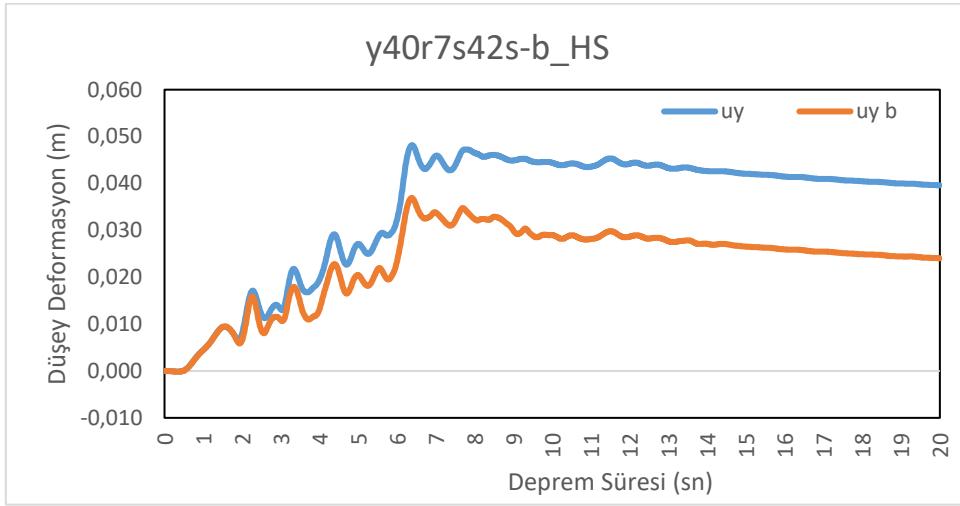
Ek 65. y40r7s42 ve y40r7s42b modellerinde B noktasının dişey deformasyon grafiği



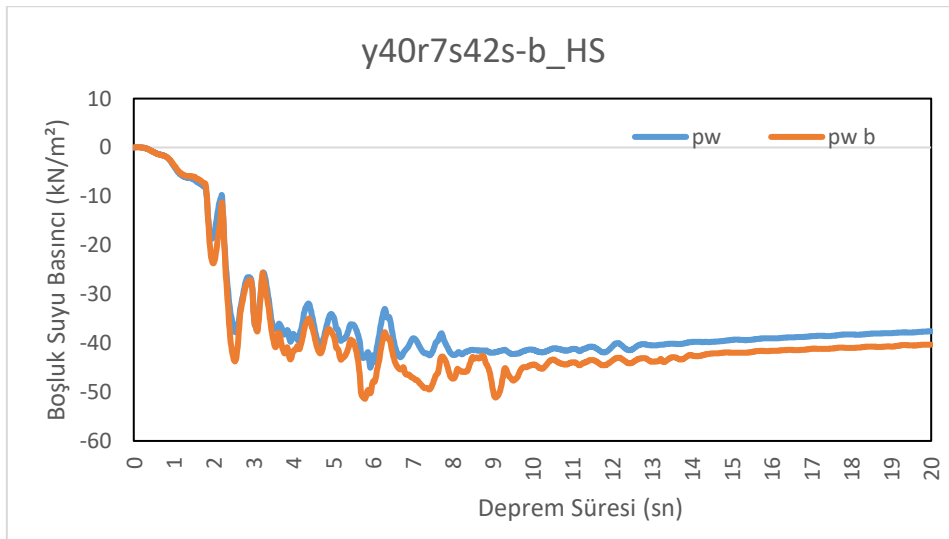
Ek 66. y40r7s42 ve y40r7s42b modellerinde B noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



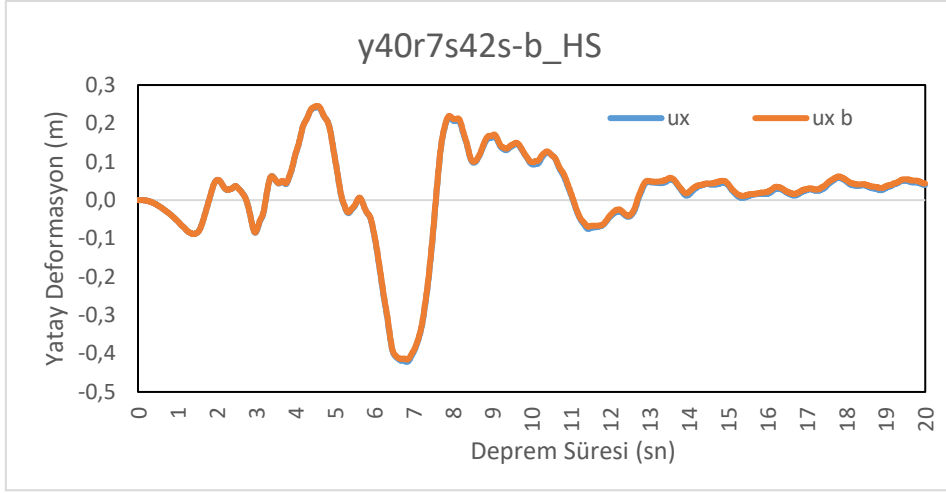
Ek 67. y40r7s42s ve y40r7s42sb modellerinde A noktasının yatay deformasyon grafiği



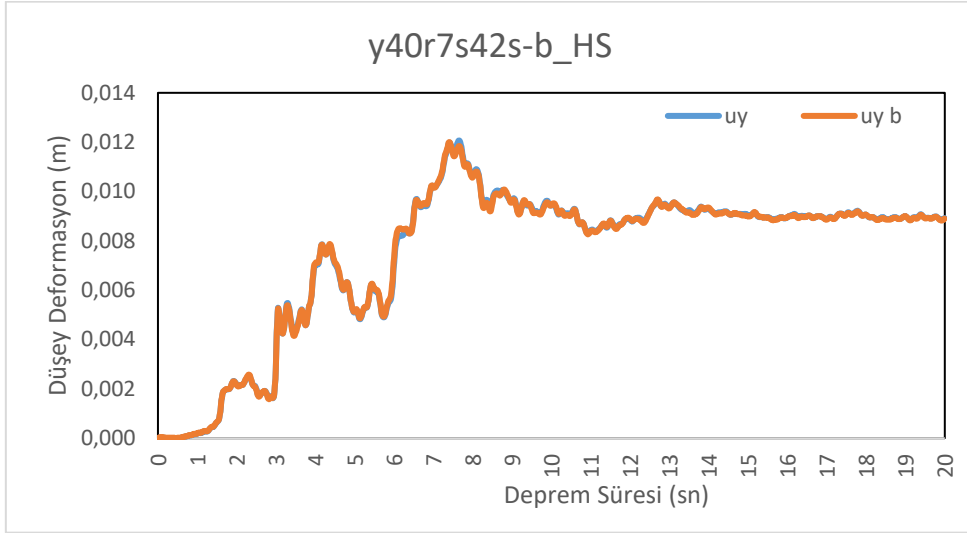
Ek 68. y40r7s42s ve y40r7s42sb modellerinde A noktasının diişey deformasyon grafiği



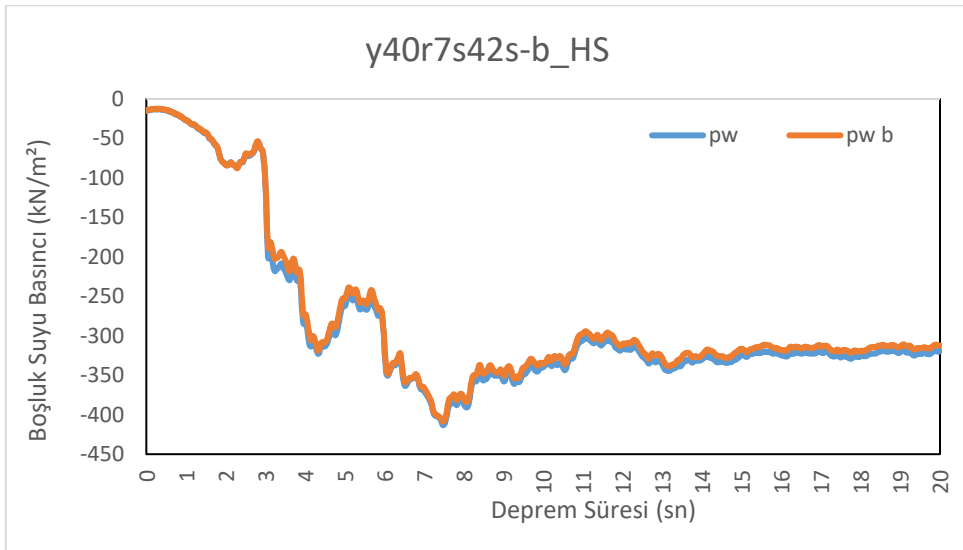
Ek 69. y40r7s42s ve y40r7s42sb modellerinde A noktasının boşluk suyu basıncı grafiği



Ek 70. y40r7s42s ve y40r7s42sb modellerinde B noktasının yatay deformasyon grafiği



Ek 71. y40r7s42s ve y40r7s42sb modellerinde B noktasının düşey deformasyon grafiği



Ek 72. y40r7s42s ve y40r7s42sb modellerinde B noktasının boşluk suyu basıncı grafiği