T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKLAŞIM DOLGULARINDAN KAYNAKLI KÖPRÜ DEPLASMANLARININ ÜÇ BOYUTLU SAYISAL MODELLERLE ANALİZİ

Osman Onur GÜRLER

DANIŞMAN
Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma, 4.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. M.Kubilay KELEŞOĞLU(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Aykut ŞENOL
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Eğitim ve öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen başta Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU Hoca'm olmak üzere Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK, Prof.Dr. İlknur BOZBEY, Dr. Sinan SARĞIN ve tüm öğretmenlerime teşekkürü bir borç bilirim.

Üniversite yıllarım boyunca bana desteğini esirgemeyen ailem ve sevgili eşim İnş. Müh. Funda Nur GÜRLER'e, dostluğu ve desteğini her daim yanımda bulduğum İnş. Müh. Hidayet Kemal UYAR'a teşekkür ederim.

Haziran 2019 Osman Onur GÜRLER

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiv**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **5**
2.1. DOLGULARIN ÜZERİNE İNŞAA EDİLDİKLERİ TEMEL ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN TASARIMA ETKİSİ 5
2.1.1. Zeminin İncelenmesi 5
2.1.2. Temel Zeminin Davranışının İncelenmesi 7
2.1.2.1. Oturma Analizi 7
2.1.2.2. Stabilite Analizleri 11
2.1.3. Temel Zeminin Güçlendirilmesi 13
2.1.3.1. Kötü Zeminin Uzaklaştırılması ve Yer Değiştirme 14
2.1.3.2. Yerinde Sıkıştırma Yöntemleri 15
2.1.3.3. Dolgu Kazıkları (Sürtünme Kazıkları) 22
2.2. YAKLAŞIM DOLGULARININ TASARIMI 23
2.2.1. Yaklaşım Dolgusu Çeşitleri 23
2.2.1.1. Geleneksel Yaklaşım Dolguları 23
2.2.1.2. Hafif Dolgular *25*
2.2.1.3. Geleneksel Yaklaşım Dolguları ve Hafif Dolgular İçin Tasarım Konuları 26
2.2.1.4. Dolgu Alın Şevi Eğiminin Korunması 27
2.2.2. Mekanik Olarak Stabilize Edilmiş Dolgular 28
2.2.2.1. Stabilize Yöntemleri 28
2.2.2.2. Mekanik Olarak Stabilize Edilmiş Dolguların Tasarım Konuları 32
2.3. KÖPRÜ KENAR AYAKLARI TASARIMI 33

2.3.1. Kenar ayak tipleri 33
2.3.1.1. Konsol Köprü Kenar Ayağı 33
2.3.1.2. Kısa Konsol ve ya Derin Temelli Köprü Kenar Ayağı 34
2.3.1.3. Payandalı Köprü Kenar Ayağı 35
2.3.2. Entegre Köprü Kenar Ayağı 36
2.3.3. Mekanik Olarak Stabilize Edilen Köprü Kenar Ayakları 37
2.3.4. Köprü Ayakları Temelleri 38
2.3.4.1. Sığ Temeller 38
2.3.4.2. Sığ Temel Dolgu Materyelleri 38
2.3.4.3. Derin Temeller 39
2.3.5. Performans Kriterleri Tolere Edilebilir Deplasmanlar 41
2.3.6. Geri Dolgu Spesifikasyonları 42
2.3.7. Drenaj Önlemleri 42
2.4. YAKLAŞIM DÖŞEMELERİNİN TASARIMI 43
2.4.1. Yaklaşım Döşemesi ve Köprü Arası Bağlantılar 44
2.5. KENAR AYAĞI / DOLGU YAPIM SIRALAMASI 45
3. MALZEME VE YÖNTEM 47
3.1. SURTEES KÖPRÜSÜ 47
3.1.1. Proje Alanının Jeolojik Tanımlaması 49
3.1.2. Surtees Köprüsü Yapısal Detayları 52
3.1.3. Hesaplanan Geoteknik Parametreler Hakkında 54
3.1.4. Köprüde Oluşan Ek Gerilmeler 56
3.2. PLAXIS 3D PROGRAMI İLE SONLU ELEMANLAR VAKAA ANALİZLERİNİN YAPILMASI 60
3.2.1. Vakanın Plaxis 3D Programı ile Modellenmesi 60
3.2.2. Zemin Tabakalarının Tanımlanması 61
3.2.3. Yapısal Elamanların Tanımlanması 67
3.2.4. İnşaat Aşamalarının Tanımlanması ve Başlangıç Gerilmelerinin Oluşturulması 69
4. BULGULAR 74
4.1. VAKAA ANALİZİ İLE HESAPLANAN DEPLASMANLARIN RAPOR EDİLMİŞ DEPLASMANLAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI 74
4.2. PERMABİLİTE KATSAYISININ VE HESAPLANAN İLAVE BOŞLUK SUYU BASINÇLARININ VAKAA ANALİZİNE ETKİLERİ 87
4.2.1. Batı Dolgusu Konsolidasyon Süreci 87
4.2.2. Doğu Dolgusu Konsolidasyon Süreci 90

5. TARTIŞMA VE SONUÇ 93
KAYNAKLAR 98
EKLER 104
ÖZGEÇMİŞ 105

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Zemin parametrelerinin belirlenmesi adına sahada yapılabilecek saha deneyleri temsili gösterimi. 6

Şekil 2.2 : Zemine köprü ve yaklaşım dolgularının getireceği ek gerilme dağılımları. [2] 7

Şekil 2.3: Steinbrenner's metot ile üniform yük altında temel altında oluşacak gerilmenin hesaplanması. [6].....8

Şekil 2.4: Kum zemine oturan sığ temeller üzerindeki köprü ayakları için tipik oturma - zaman eğrisi. 10

Şekil 2.5: Sonlu elemanlar hesaplamaları yapabilen Plaxis 3D programı ile yapılmış oturma analizinden alınmış ekran görüntüsü.....11

Şekil 2.6: Dairesel kayma düzlemini varsayan limit denge çözüm şeması.....12

Şekil 2.7: Plaxis 2D programı Sonlu elemanlar yöntemi ile dayanım azaltma katsayısına dayalı yapılmış analiz çıktısı. 12

Şekil 2.8: Uzun dönem oturmalara karşı güvenlik faktörü karşılaştırması. [7] 13

Şekil 2.9: Dip taraması uygulaması. 14

Şekil 2.10: Temel zemininde birincil ve ikincil oturmaların tamamlanması için ön yükleme yapılması.....16

Şekil 2.11: Prefabrik fitil kanallarının kurulumu için ekipman. [20].....17

Şekil 2.12: Düşey ve yatay drenler ile dolgunun konsolidasyon oturmalarının sağlanması. 18

Şekil 2.13: Dinamik kompaksiyon uygulaması saha görünümü. 19

Şekil 2.14: Vibro-kompaksiyon için uygun tane büyüklüğü aralıkları. 21

Şekil 2.15: Taş Sütün uygulaması şematik görünümü. 22

Şekil 2.16: Köprü yaklaşımı için dolgu kazıkları. [27].....23

Şekil 2.17: Yanal hareketlerin meydana gelebileceği yaklaşım dolgusunun tipik kesiti. 24

Şekil 2.18: Doğal zeminin basamaklanması. [28].....25

Şekil 2.19: Köprüde alın şevi korumasının zarar görmesi ile oluşabilecek hasarlar. 27

Şekil 2.20: Güçlendirilmiş dolgunun şematik diyagramı.....29

Şekil 2.21: Mekanik olarak stabilize edilmiş duvar örnekleri.....30

Şekil 2.22: Dört farklı duvar tipi için maliyet karşılaştırması. [30].....32

Şekil 2.23: Tipik konsol köprü kenar ayağı. 34

Şekil 2.24: Kısa konsol ve kazıklı köprü kenar ayağı şematik gösterimi. 35

Şekil 2.25: Tipik payandalı köprü kenar ayağı görünümü.....36

Şekil 2.26: Tipik entgre köprü kenar ayağı.....36

Şekil 2.27: Mekanik olarak stabilize edilmiş köprü kenar ayağı. 38

Şekil 2.28: Temel tipi seçim akış şeması. [35] 40

Şekil 2.29: Geokompozit dren şematik çizimi. 43

Şekil 2.30: Yol kaplaması ve yaklaşım döşemesi arası bağlantı detayları. ([28], [34]).....44

Şekil 2.31: Entegre köprü kenar ayağı bağlantı detayı. ([34], [36]) 45

Şekil 2.32: Entegre olmayan köprü ayağı ve yaklaşım döşemesı detayı. ([34], [36]) 45

Şekil 2.33: Tavsiye edilen dolgu köprü ayağı inşat sıralaması. 46

Şekil 3.1: Sahanın Plan Görünümü. [39] 47

Şekil 3.2: Yapım öncesini gösterir belediye kayıtları. [40] 48

Şekil 3.3: Araştırma sondajlarında yapılmış SPT sonuçları. [39] [41] 49

Şekil 3.4: Jeolojik kesit. [39] 50

Şekil 3.5: Yapım öncesi saha çalışmalarına binaen oluşturulan jeolojik kesit. [39].....51

Şekil 3.6: Surtees Köprüsü yapısal elemanlarının isimlendirilmesi ve bağlantı tipleri şematik çizimi.....52

Şekil 3.7: Batı köprü kenar ayağı temel altı kazık yerleşim planı. 53

Şekil 3.8: Doğu köprü kenar ayağı temal altı kazık yerleşim planı. 53

Şekil 3.9: E ayağında oluşan yatay hareketler. 58

Şekil 3.10: a) doğu dolgusu tarafında yürüyüş yolunda meydana gelen hasarların ardından tamirat yapılmış hali, b) yapılan tamirat sonrası oluşan kot farkı. [39] 58

Şekil 3.11: Batı kenar ayağında oluşan yatay deplasmanlar. 59

Şekil 3.12: C ve D akslarında imal edilmiş eksantrik köprü ayak kolonları. 60

Şekil 3.13: Plaxis 3D sayısal modeli. 61

Şekil 3.14: Halcrow Group tarafından 2008'de yapılan saha çalışması sondaj planı. [52] 61

Şekil 3.15: Saha çalışmalarına ait sondaj yerleşim planı ve sondajlardan elde edilen jeolojik kesit. [52] 62

Şekil 3.16: Plaxis 3D nümerik modelinde tanımlanan zeminlerin kesit görünümü. 63

Şekil 3.17: Plaxis Pekleşen Zemin bünye modeli girdileri ve tanımlamaları. [53] 63

Şekil 3.18: Lineer elastik-mükemmel plastik bünye modeli gerilme şekil değiştirme grafiği. [53] 64

Şekil 3.19: Plaxis 3D modeli özel bağlantı elemanlarının gösterimi. 67

Şekil 3.20: Özel bağlantı elemanlarının şematik gösterimi. 68

Şekil 3.21: Yapısal elemanlar; a) doğu köprü kenar ayağı, b) köprü orta ayakları, c) batı köprü kenar ayağı Plaxis 3D nümerik model detayları. 69

Şekil 3.22: Başlangıç gerilme koşullarının oluşturulması. 70

Şekil 3.23: 1. Kademe batı dolgusunun yapılması. 70

Şekil 3.24: 2. Kademe batı dolgusunun yapılması. 71

Şekil 3.25: 3. Kademe batı dolgusunun yapılması. 71

Şekil 3.26: Batı dolgusunun konsolidasyonu (365 gün). 71

Şekil 3.27: 1. Kademe doğu dolgusunun yapılması. 71

Şekil 3.28: 2. Kademe doğu dolgusunun yapılması. 72

Şekil 3.29: 3. Kademe doğu dolgusunun yapılması ve kenar ayak imalatı. 72

Şekil 3.30: Kazık elemanların imalatının yapılması. 72

Şekil 3.31: Köprü tabliyesinin aktif edilmesi. 72

Şekil 3.32: Servise alınmadan önce beklenmesi. 73

Şekil 3.33: Geçen yıllara göre konsolidasyon analizlerinin yapılması. 73

Şekil 4.1: Batı Dolgusunda yapım süreci boyunca konsolidasyon öncesi oluşan oturma miktarı 75

Şekil 4.2: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında oluşan toplam deplasman miktarı. 75

Şekil 4.3: Batı Dolgusununda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında oluşan oturma miktarı.....76

Şekil 4.4: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında original Zemin seviyesinden 4 m altında oluşan oturma miktarı. 76

Şekil 4.5: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında original Zemin seviyesinden 4 m altında oluşan yatay deplasman miktarı.....77

Şekil 4.6: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında original Zemin seviyesinden 4 m altında oluşan yatay deplasman miktarı için oluşturulan çizgisel kesit.....77

Şekil 4.7: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında toplam deplasman miktarı ve yönelimi.....78

Şekil 4.8: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında oluşan yatay deplasman miktarı ve yönelimi. 78

Şekil 4.9: Köprü E orta ayağı yatay deplasman miktarı ve görünümü. 79

Şekil 4.10: Köprü E orta ayağı kazıkları yatay deplasman miktarı ve görünümü. 79

Şekil 4.11: Köprü E orta ayağı hizasından alınan kesitte oluşan oturma miktarı ve görünümü.....80

Şekil 4.12: Köprü E orta ayağı hizası normalinden alınan kesitte oluşan oturma miktarı ve görünümü.....80

Şekil 4.13: Köprü yapımı tamamlanmasından 1982 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizi sonucunda oluşan oturmaları gösterir model boyuna kesiti. 81

Şekil 4.14: 1991 ve 1995 yıllarında tespit edilen oturmalardan etkilenmiş alanların genişliğini gösterir analiz toplam deplasman çıktısı. 82

Şekil 4.15: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, model boyuna kesiti yatay deplasman sonuç çıktısı görünümü. 83

Şekil 4.16: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, model boyuna kesiti yatay deplasmanların yönelim görünümü. 83

Şekil 4.17: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, F ayağı hizasından alınan çizgisel düşey kesiti yatay deplasman sonuç çıktısı görünümü.....84

Şekil 4.18: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, köprü döşemesi ve kenar ayaklarında oluşan yatay deplasman görünümü. 84

Şekil 4.19: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, köprü döşemesi ve doğu kenar ayağında oluşan yatay deplasman görünümü. 85

Şekil 4.20: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, köprü döşemesi ve batı kenar ayağında oluşan yatay deplasman görünümü. 85

Şekil 4.21: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, köprü döşemesi ve doğu kenar ayağında oluşan yatay deplasman yakın görünümü.....86

Şekil 4.22: Batı dolgusu üzerinde yer alan A kenar ayağı ile köprü tabliyesinin farklı yatay deplasman yaptığının gösterir analiz görünümü. 87

Şekil 4.23: Batı dolgusu inşa sonunda oluşan ilave boşluk suyu basınçları tam model görünümü.....88

Şekil 4.24: Batı dolgusu inşa sonunda oluşan ilave boşluk suyu basınçları batı dolgusu model görünümü.....88

Şekil 4.25: Batı dolgusu bir yıl beklenilmesi sonunda sönümlenen ilave boşluk suyu basınçları tam model görünümü. 89

Şekil 4.26: Batı dolgusu bir yıl beklenilmesi sonunda sönümlenen ilave boşluk suyu basınçları batı dolgusu model görünümü. 89

Şekil 4.27: 1980 yılında inşa sonunda oluşan ilave boşluk suyu basınçlarının ekran görünümü.....90

Şekil 4.28: 2000 yılına kadar yapılan konsolidasyon analizi sonunda ilave boşluk suyu basınçları ekran görünümü. 91

Şekil 4.29: 2008 yılına kadar yapılan konsolidasyon analizi sonunda ilave boşluk suyu basınçları ekran görünümü. 91

Şekil 4.30: ilave boşluk suyu basınçlarının maksimum 10 kPa kalana kadar sönümlenmesine kadar yapılan konsolidasyon analizi sonunda ilave boşluk suyu basınçları ekran görünümü. 92

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Dinamik kompaksiyon için katman uygunluğu. [21] 20

Tablo 2.2: Hafif Dolgu Materyalleri. [29] 26

Tablo 2.3: Geosentetik tipleri ve fonksiyonları. 28

Tablo 3.1: Tabakaların jeolojik tanımlamaları ve tabaka kotları. [39] 50

Tablo 3.2: Geoteknik ortalama parametreler. [39] 54

Tablo 3.3: Gri alüvyon için hesaplanan sıkışma parametreleri. [39] 54

Tablo 3.4: Köprü yapımı ve gözlemleri kronolojik sıralaması. [39] 56

Tablo 3.5: Laboratuvar değerleri ile hesaplanan permabilite değerleri. 65

Tablo 3.6: Plaxis 3d vakaa analizleri için seçilen permeabilite değerleri. 65

Tablo 3.7: Yatay ve düşey permeabilite katsayıları arasındaki ilişki. [52] 66

Tablo 3.8: Pekleşen Bünye Modeline Sahip Birimlerin Malzeme Parametreleri. 66

Tablo 3.9: Mohr-Coulomb Bünye Modeline Sahip Birimlerin Malzeme Parametreleri. 67

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

γ	:	kayma deformasyonu
G	:	kayma modülü
τ	:	kayma gerilmesi
Gmax	:	maksimum kayma modülü
Gsec	:	sekant kayma modülü
Gt	:	tanjant kayma modülü
Gur	:	yükleme boşaltma kayma modülü
G0	:	başlangıç kayma modülü
AL	:	histeresis döngü ilmek alanı
AT	:	histeresis döngü üçgen alanı
ρ	:	zemin yoğunluğu
Vs	:	kayma dalgası hızı
σ0'	:	efektif normal gerilme
e	:	boşluk oranı
H	:	gerilme geçmişi
S	:	doygunluk derecesi
A	:	titreşim genliği
F	:	titreşim frekansı
T	:	zamana bağlı etkiler (ikincil konsolidasyon)
K	:	sıcaklık
OCR	:	aşırı konsolidasyon oranı
Aij	:	ij düzleminde boyutsuz rijitlik katsayısı
f(e)	:	boşluk oranı fonksiyonu
pα	:	referans basınç
$(K2)_{max}$	:	zemin cinsine göre değişen malzeme sabiti
D50	:	ortalama dane boyutu
Cu	:	üniformluk katsayısı
γρ	:	referans kayma deformasyonu
Dr	:	daneli zeminlerin nisbi sıkılığı
σvc	:	efektif konsolidasyon gerilmesi
gh	:	hiperbolik deformasyon
a	:	eğiklik katsayısı
n	:	çevrim sayısı
τy	:	göçmede kayma gerilmesi
R	:	ramberg-osgood eğrisinin korelasyon sayısı
Πα	:	atmosferik basınç
ΠI	:	plastisite indisi
k	:	plastisite indisine bağlı değişen üssel indis
e	:	boşluk oranı
gtv	:	hacimsel eşik kayma deformasyon
gt	:	doğrusal olmayan eşik deformasyonu

Vp	:	zemin tabakalarına ait sıkışma dalgası hızı
ν	:	poisson oranı
λR	:	rayleigh dalga boyu
Qu	:	nihai kazık kapasitesi
Qp	:	kazık ucunun yük taşıma kapasitesi
Qs	:	sürtünme direnci
Nc, N_q, N_γ	:	taşıma kapasitesi faktörleri
c	:	kohezyon
Ap	:	kazık ucu alanı
qp	:	birim uç direnci
L	:	kazık gerçek gömü uzunluğu
Lb	:	taşıyıcı tabaka içindeki kazık uzunluğu
D	:	kazık çapı
S	:	merkezden merkeze kazıklar arası mesafe
Ø	:	
c_u	:	kazık ucunun altındaki zeminin drenajsız kohezyonu
Q_u	:	nihai kazık kapasitesi
d_c, d_q	:	Şekil faktörleri
K_0	:	sükunetteki toprak basıncı katsayısı
I_{rr}	:	zemin için azaltılmış rijitlik indeksi
I_r	:	rijitlik indeksi
E_s	:	young modülü
r_o	:	kazık şaftının yarıçapı
D	:	kazık çapı
η	:	grup verimliliği
$Q_{g(u)}$	:	grup kazığı nihai yük taşıma kapasitesi
r_m	:	maksimum etki yarıçapı
A_{kg}	:	kazık grup alanı
A_{kk}	:	kazıkların toplam enkesit alan
γ	:	kayma deformasyonu
G	:	kayma modülü
τ	:	kayma gerilmesi
G_{max}	:	maksimum kayma modülü
G_{sec}	:	sekant kayma modülü
G_t	:	tanjant kayma modülü
G_{ur}	:	yükleme boşaltma kayma modülü
G_0	:	başlangıç kayma modülü
A_L	:	histeresis döngü ilmek alanı
A_T	:	histeresis döngü üçgen alanı
ρ	:	zemin yoğunluğu
V_s	:	kayma dalgası hızı
σ_0'	:	efektif normal gerilme
e	:	boşluk oranı

H	:	gerilme geçmişi
S	:	doygunluk derecesi
A	:	titreşim genliği
F	:	titreşim frekansı
T	:	zamana bağlı etkiler (ikincil konsolidasyon)
K	:	sıcaklık
OCR	:	aşırı konsolidasyon oranı
$\mathbf{A_{ij}}$	:	ij düzleminde boyutsuz rijitlik katsayısı
f(e)	:	boşluk oranı fonksiyonu
$\mathbf{p_\alpha}$	:	referans basınç
$\mathbf{(K_2)_{max}}$	:	zemin cinsine göre değişen malzeme sabiti
$\mathbf{D_{50}}$	:	ortalama dane boyutu
$\mathbf{C_u}$	:	üniformluk katsayısı
$\boldsymbol{\gamma_r}$	:	referans kayma deformasyonu
$\mathbf{D_r}$	:	daneli zeminlerin nisbi sıkılığı
$\boldsymbol{\sigma_{vc}}$	:	efektif konsolidasyon gerilmesi
$\boldsymbol{\gamma_h}$	:	hiperbolik deformasyon
a	:	eğiklik katsayısı
n	:	çevrim sayısı
$\boldsymbol{\tau_y}$	:	göçmede kayma gerilmesi
R	:	ramberg-osgood eğrisinin korelasyon sayısı
$\mathbf{P_a}$	:	atmosferik basınç
PI	:	plastisite indisi
k	:	plastisite indisine bağlı değişen üssel indis
e	:	boşluk oranı
$\boldsymbol{\gamma_{tv}}$	:	hacimsel eşik kayma deformasyon
$\boldsymbol{\gamma_t}$	:	doğrusal olmayan eşik deformasyonu
$\mathbf{V_p}$	:	zemin tabakalarına ait sıkışma dalgası hızı
ν	:	poisson oranı
$\boldsymbol{\lambda_R}$	:	rayleigh dalga boyu
$\mathbf{Q_u}$	:	nihai kazık kapasitesi
$\mathbf{Q_p}$	:	kazık ucunun yük taşıma kapasitesi
$\mathbf{Q_s}$	:	sürtünme direnci
$\mathbf{N_c, N_q, N_\gamma}$	:	taşıma kapasitesi faktörleri
c	:	kohezyon
$\mathbf{A_p}$	:	kazık ucu alanı
$\mathbf{q_p}$	:	birim uç direnci
L	:	kazık gerçek gömü uzunluğu
$\mathbf{L_b}$	:	taşıyıcı tabaka içindeki kazık uzunluğu
D	:	kazık çapı
S	:	merkezden merkeze kazıklar arası mesafe
Ø	:	
$\mathbf{c_u}$	:	kazık ucunun altındaki zeminin drenajsız kohezyonu
$\mathbf{Q_u}$	:	nihai kazık kapasitesi
$\mathbf{d_c, d_q}$	:	Şekil faktörleri
$\mathbf{K_0}$	:	sükunetteki toprak basıncı katsayısı

I_{rr}	:	zemin için azaltılmış rijitlik indeksi
I_r	:	rijitlik indeksi
E_s	:	young modülü
r_o	:	kazık şaftının yarıçapı
D	:	kazık çapı
η	:	grup verimliliği
$Q_{g(u)}$	:	grup kazığı nihai yük taşıma kapasitesi
r_m	:	maksimum etki yarıçapı
A_{kg}	:	kazık grup alanı
A_{kk}	:	kazıkların toplam enkesit alan
γ	:	kayma deformasyonu
G	:	kayma modülü
τ	:	kayma gerilmesi
G_{max}	:	maksimum kayma modülü
G_{sec}	:	sekant kayma modülü
G_t	:	tanjant kayma modülü
G_{ur}	:	yükleme boşaltma kayma modülü
G_0	:	başlangıç kayma modülü
A_L	:	histeresis döngü ilmek alanı
A_T	:	histeresis döngü üçgen alanı
ρ	:	zemin yoğunluğu
V_s	:	kayma dalgası hızı
σ_0'	:	efektif normal gerilme
e	:	boşluk oranı
H	:	gerilme geçmişi
S	:	doygunluk derecesi
A	:	titreşim genliği
F	:	titreşim frekansı
T	:	zamana bağlı etkiler (ikincil konsolidasyon)
K	:	sıcaklık
OCR	:	aşırı konsolidasyon oranı
A_{ij}	:	ij düzleminde boyutsuz rijitlik katsayısı
f(e)	:	boşluk oranı fonksiyonu
p_α	:	referans basınç
$(K_2)_{max}$	:	zemin cinsine göre değişen malzeme sabiti
D_{50}	:	ortalama dane boyutu
C_u	:	üniformluk katsayısı
γ_r	:	referans kayma deformasyonu
D_r	:	daneli zeminlerin nisbi sıkılığı
σ_{vc}	:	efektif konsolidasyon gerilmesi
γ_h	:	hiperbolik deformasyon
a	:	eğiklik katsayısı
n	:	çevrim sayısı
τ_y	:	göçmede kayma gerilmesi

R	:	ramberg-osgood eğrisinin korelasyon sayısı
P_a	:	atmosferik basınç
PI	:	plastisite indisi
k	:	plastisite indisine bağlı değişen üssel indis
e	:	boşluk oranı
γ_{tv}	:	hacimsel eşik kayma deformasyon
γ_t	:	doğrusal olmayan eşik deformasyonu
V_p	:	zemin tabakalarına ait sıkışma dalgası hızı
ν	:	poisson oranı
λ_R	:	rayleigh dalga boyu
Q_u	:	nihai kazık kapasitesi
Q_p	:	kazık ucunun yük taşıma kapasitesi
Q_s	:	sürtünme direnci
N_c, N_q, N_γ	:	taşıma kapasitesi faktörleri
c	:	kohezyon
A_p	:	kazık ucu alanı
q_p	:	birim uç direnci
L	:	kazık gerçek gömü uzunluğu
L_b	:	taşıyıcı tabaka içindeki kazık uzunluğu
D	:	kazık çapı
S	:	merkezden merkeze kazıklar arası mesafe
Ø	:	
c_u	:	kazık ucunun altındaki zeminin drenajsız kohezyonu
Q_u	:	nihai kazık kapasitesi
d_c, d_q	:	Şekil faktörleri
K_0	:	sükunetteki toprak basıncı katsayısı
I_{rr}	:	zemin için azaltılmış rijitlik indeksi
I_r	:	rijitlik indeksi
E_s	:	young modülü
r_o	:	kazık şaftının yarıçapı
D	:	kazık çapı
η	:	grup verimliliği
$Q_{g(u)}$	:	grup kazığı nihai yük taşıma kapasitesi
r_m	:	maksimum etki yarıçapı
A_{kg}	:	kazık grup alanı
A_{kk}	:	kazıkların toplam enkesit alan

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKLAŞIM DOLGULARINDAN KAYNAKLI KÖPRÜ DEPLASMANLARININ ÜÇ BOYUTLU SAYISAL MODELLERLE ANALİZİ

Osman Onur GÜRLER

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

Özellikle akarsu kıyısında inşa edilen köprülerde, servis koşulları altında istenilen tasarım düzeyinin sağlanması için yaklaşım dolgularında oluşacak, kısa ve uzun dönem zemin hareketlerinin belirlenmesi çok önemlidir. Yüksek sıkışabilirliğe sahip, düşük mukavemetli alüvyonel akarsu çökelleri hem köprü orta ayaklarında ve dilatasyonlarda, hem de köprü kenar ayakları üzerinde yıkıcı hasarlara neden olabilir. Bu çalışmada bu tipi hasarların en iyi örneklerinden bir tanesi olan Surtees Köprüsü'nün inşat süreci çalışılmıştır.

Surtees Köprüsü doğu ve batı olarak tanımlanan iki yaklaşım dolgusu arasına inşa edilmiştir. 1978 yılında doğu dolgusu yapıldıktan sonra bir yıl beklenilerek oturmalar gözlemlenmiş, takiben 1980 yılında batı dolgusunun yapımı ve köprünün inşası tamamlanmıştır. Surtees Köprüsü beş açıklıklı ve altı akslı olarak tasarlanmıştır. Orta ayak akslarında dört adet başlık kirişi ile birleştirilmiş düşey kolon ile desteklenmektedir. Toplam altı adet orta ve kenar

ayağından, köprünün ortasını destekleyen iki ayak ile doğu dolgusu üstünde yer alan köprü ayağı köprü döşemesi ile rijit olarak bağlantılanmıştır. Köprünün dolgulara oturan iki ayağı temeli altında kazıklarla desteklenmiş istinat yapıları olarak teşkil edilmiş olup, doğu tarafında köprü ile ayağı arasında kayıcı mesnet tipi bağlantı yapılmıştır. Zamanla doğu dolgusu altında oluşan aşırı oturmalardan ötürü köprü batıya doğru deplase olmuştur. Bu durum köprü ayaklarında ek gerilmelere sebep olarak kalıcı hasara neden olmuş ve tamir edilmiştir.

Bu çalışmada, yukarıda tanımlanan süreçler üç boyutlu sayısal modeller kullanılarak irdelenmiş ve köprüdeki aşırı deplasmanların tasarım aşamasında tahmin edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Yapılan analizler neticesinde, yapısal elemanlardaki deplasmanların yaklaşık olarak tahmin edilebildiği, konsolidasyon sürecinde tabaka geçişlerindeki ilave boşluk suyu basınçlarının tespitinde zorluklar bulunduğu söylenebilir. Bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar kullanılarak, köprü kenar ayakları arkasında oluşması beklenen yatay toprak basıncı değerleri ile ilgili bir takım değerlendirmeler yapılması da hedeflenmektedir.

Haziran 2019, 127 sayfa.

Anahtar kelimeler: Üç boyutlu sayısal modelleme, Yaklaşım Dolguları, Köprü ayakları, Konsolidasyon oturması

SUMMARY

M.Sc. THESIS

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS OF BRIDGE DISPLACEMENTS CAUSED BY APPROACH EMBANKMENTS

Osman Onur GÜRLER

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

It is vitally important to determine the short and long term ground movements that will occur in the approach embankments in order to provide the desired design level under the service conditions, especially in the bridges built along the river shore. Alluvial creek deposits which have high compressibility with low strength can cause destructive damage on both the bridge mid-piers and dilatations, as well as on the bridge edge piers. In this study, the construction process of the Surtees Bridge, one of the best examples of this type of damage, was studied.

The Surtees Bridge was built between east and west approach embankments. After the western embankment was completed in 1978, settlements were observed for one year then the construction of the eastern embankment and the construction of the bridge were completed in 1980. The Surtees Bridge is designed with five spans with six axles. Mid spans supported by four vertical piers which connected with beam as a pier row. Three of six pier rows are rigidly connected with bridge deck which are, two pier rows supporting the middle span of the bridge

and eastern edge pier over the eastern fill. The edge piers formed as retaining structures supported by embedded piles under two foundations placed on the embankments, and a sliding type connection is made between the bridge deck and the pier on the west side. Over time, the bridge has been displaced westward due to the extreme settlements that formed under the eastern fill. This caused additional stresses on the bridge piers causing permanent damage and repairs.

In this study, the processes described above were investigated using three-dimensional numerical models and whether excessive displacements in the bridge could be predicted in the design phase. As a result of the analysis made, it can be said that there are difficulties in determining the excess pore pressure transition in the between layers during the consolidation process, in which the displacements in the structural elements can be estimated approximately. By using the results obtained in this study, it is aimed to make some evaluations about lateral soil pressures values which are expected to occur behind bridge edge piers.

June 2019, 127 pages.

Keywords: Three-dimensional numerical analysis, Approach embankments, Bridge piers, Consolidation settlement

1. GİRİŞ

Özellikle akarsu kıyısında inşa edilen köprülerde, servis koşulları altında istenilen tasarım düzeyinin sağlanması için yaklaşım dolgularında oluşacak, kısa ve uzun dönem zemin hareketlerinin belirlenmesi çok önemlidir. Yüksek sıkışabilirliğe sahip, düşük mukavemetli alüvyonel akarsu çökelleri hem köprü orta ayaklarında ve dilatasyonlarda, hem de köprü kenar ayakları üzerinde yıkıcı hasarlara neden olabilir. Bu çalışmada bu tip hasarların en iyi örneklerinden bir tanesi olan Surtees Köprüsü'nün inşat süreci çalışılmıştır.

Surtees Köprüsü doğu ve batı olarak iki yaklaşım dolgusu arasına inşa edilmiştir. 1978 yılında doğu dolgusu yapıldıktan sonra bir yıl beklenilerek oturmalar gözlemlenmiş, takiben 1980 yılında batı dolgusunun yapımı ve köprünün inşası tamamlanmıştır. Surtees Köprüsü beş açıklıklı ve altı akslı olarak tasarlanmıştır. Orta ayak akslarında dört adet başlık kirişi ile birleştirilmiş düşey kolon ile desteklenmektedir. Toplam altı adet orta ve kenar ayağından, köprünün ortasını destekleyen iki ayak ile doğu dolgusu üstünde yer alan köprü ayağı köprü döşemesi ile rijit olarak bağlantılanmıştır. Köprünün dolgulara oturan iki kenar ayağı, temeli altında kazıklarla desteklenmiş istinat yapıları olarak teşkil edilmiş olup, doğu tarafında köprü ile ayağı arasında kayıcı mesnet tipi bağlantı yapılmıştır. Zamanla doğu dolgusu altında oluşan aşırı oturmalardan ötürü köprü batıya doğru deplase olmuştur. Bu durum köprü ayaklarında ek gerilmelere sebep olarak kalıcı hasara neden olmuş ve tamir edilmiştir.

Köprü ayaklarındaki göreceli oturma, çok rastlanan bir problem olan köprü tabliyesi ile kenar ayak arasında tümseğe, açısal çarpılmalara, hatta stabilite problemlerine neden olur. Problem genellikle dolgunun yükü altında temel zeminin oturması veya yaklaşma dolgusunun yetersiz kompaksiyonundan kaynaklı oturmalardan kaynaklanır. Köprü yaklaşımlarının başarılı tasarımı, inşası ve bakımı, geoteknik, yol kaplama ve köprü tasarımı ile inşat ve bakım konularında uzman mühendisler arasında işbirliğini gerektirir.

Dolgu ve köprü ayağı altındaki temel zemin birimlerinin hareketleri, köprü yaklaşımlarının performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Dolguların altında yer alan yumuşak zeminlerin inşat sonrası konsolidasyona bağlı oturması, dolgu oturmasının temel nedenlerindendir. Yumuşak zemin katmanlarının yanal yer değiştirmeleri de dolgu oturmasına katkıda bulunabilir ve buna ek olarak, sığ temellere oturan ayaklar veya kazıklar üzerine

kurulmuş olan köprü ayaklarının yanal hareketinin başlıca nedeni olabilir. Öte yandan, nispeten sıkıştırılamaz olan zemin birimleri servis koşulları adına çok az problem yaratır.

Sonuç olarak, yeraltı koşulları hakkında yeterli bilgi elde etmek ve dolgu ve köprü temellerinin üzerine inşa edileceği zemin birimlerinin, dolgu ve köprü yüklerini ne kadar taşıyabileceğini analiz etmek son derece önemlidir. Saha araştırmasının büyüklüğü ve türü, projeye özgü saha çalışmalarını tanımlamak adına, yapılması düşünülen tetkiklerin, geoteknik mühendisi tarafından ele alınması önem arz etmektedir.

Bir temel zeminin öngörülen davranışı, köprü yaklaşım elemanlarının tatmin edici performansı için yetersiz olduğunda, zemin oturmalarını sınırlamak adına, dolgu ve köprü ayağı yükleri azaltılabilir; dolgu ve köprü ayağı yüklerini zayıf zeminden/zeminlerden daha sert katmanlara aktararak veya temel zemininin mühendislik parametrelerine bağlı özelliklerini geliştirerek istenilen performans elde edilebilir. Zayıf temel zemini yüzeye yakınsa dolgu malzemesi ile değiştirilebilir veya yerinde kompaksiyon ya da zemin güçlendirme ile iyileştirilebilir.

Çoğu köprü-yaklaşımı dolgusu genel olarak kompaksiyonun sağlanması için silindirlenerek inşa edilir. Köprü ayağında sadece az miktarda oturma tolere edilebileceğinden, köprü ayağının oturacağı zemin dolgularında uygun seçilmiş zemin malzemesini ve arttırılmış kompaksiyon gereksinimlerini belirlemek iyi bir ek önlemdir. Dolguların tasarımında, stabilite ve oturma dikkate alınmalıdır. Dolgunun ideal kompaksiyon koşulları da mutlaka hesaplanmalıdır. Güçlendirilmiş dolgular ve mekanik olarak stabilize edilmiş duvarlar, derin kaymalara, daha dik yan eğimlere ve göreceli deformasyonlara karşı daha fazla stabilite sağlamak için silindirlenerek oluşturulmuş dolguların yerine kullanılabilir. Köprüler, kenar ayaklarında geleneksel köprü ayakları (tam boy, sığ temelli veya payanda tipi), köprü döşemesi ile entegre köprü ayakları veya mekanik stabilize edilmiş zemin duvarları üzerinde desteklenebilir.

Köprü ayakları için güvenli ve ekonomik bir temel tipinin seçiminde, yapısal yüklerin, çevresel faktörlerin, zemin etüdünde karşılaşılan koşulların, performans kriterlerinin, inşat yöntemlerinin ve ekonomik etkenlerin dikkate alınmasını gerektirir. Bütün köprülerde köprü ayaklarının ve temellerinin hareket etmesi olasıdır. Köprü ayağı tasarım sürecinin bir parçası olarak, öngörülen hareketler, köprünün güvenliğini ve işlevini korumak adına regülasyon tolerans limitleri ile karşılaştırılmalıdır. Ayrıca, köprü ayağının farklı oturmasını ve yaklaşma dolgusunun oturmasını dikkate almak gereklidir.

Köprünün güvenliği ve işlevi, köprü ayaklarının ve yaklaşım dolgularının inşa sonrası hareketlerinden etkilenir. Köprü üstyapısının yapılmasından önce meydana gelen hareketler, performans veya bakım maliyetlerini etkilemez. İnşaat sonrası hareketleri en aza indirgemek için yapım sıralaması ve inşa fazları arasında geçen süreler önem taşımaktadır. Bu özellikle yumuşak, sıkışabilir, kohezyonlu zeminler üzerinde inşat açısından oldukça önemlidir. Köprü ayakları, dolgu inşası sıralaması ve dolgu katmanlarının inşası, inşat sonrası oturmayı en aza indirmek için dikkat edilerek planlanmalıdır.

Köprü-yaklaşım oturmasının başlıca nedenlerinin aşağıdakilerden biri veya daha fazlası olduğu sonucuna varılmıştır:

- Dolgu temel zeminin zamana-bağlı konsolidasyon oturmaları
- Yaklaşım dolgusunun zamana-bağlı konsolidasyon oturmaları
- Standart sıkıştırma ekipmanının kısıtlı erişiminin neden olduğu, köprü ayağı dolgusunun kötü şekilde sıkıştırılması
- Köprü ayağı yüzeyinde zemininin erozyona uğraması, ve dolgunun, köprü ayağının geri dolgusunun kötü drenajı

Bahsedilen faktörlerin hepsi dolgu oturmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, temel zeminin yanal deplasmana bağlı hareketi ve köprü ayağının düşeyde açısal olarak dönmesi, dolgunun ek hareketine neden olabilir. Bununla birlikte, büyük köprü-yaklaşımı problemleri, doğrudan yaklaşım döşemesi ve köprü ayağının göreceli oturması ile ilgilidir. Bu nedenle, yaklaşım döşeme tasarımı ve köprü ayağı ile temel tipi seçimi de köprülerin genel performansı etkiler.

Surtess Köprüsü, Tees Nehri alüvyonel zeminleri üzerinde ve nispeten uzun bir sürede inşa edilmiş bir köprüdür. Doğu ve batı taraflarındaki kenar ayakların herbirinde farklı geoteknik problemlerle karşılaşılmış ve köprü servis ömrü boyunca sürekli olarak tadilat geçirmek zorunda kalmıştır.

Bu çalışmada, Surtees Köprüsü'nün inşat aşamaları yukarıda tanımlanan esaslar ve süreçler dikkate alınarak üç boyutlu sayısal modeller kullanılarak irdelenmiş ve köprüdeki aşırı deplasmanların tasarım aşamasında tahmin edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Yapılan analizler neticesinde, yapısal elemanlardaki deplasmanların makul seviyelerde tahmin edilebildiği anlaşılmıştır. Köprünün inşatı sırasında yaşanan bekleme sürelerini tanımlayan konsolidasyon aşamalarında tabaka ara yüzlerinde hesaplanan ilave boşluk suyu basınçlarında

ciddi salınımlar ve çok yüksek değerler hesaplanmaktadır Bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar kullanılarak, köprü kenar ayakları arkasında oluşması beklenen yatay toprak basınçları ile ilgili bir takım değerlendirmeler yapılması da hedeflenmektedir.

2. GENEL KISIMLAR

Dolgu ve köprü ayağı altındaki temel zemininin hareketleri, köprü yaklaşımlarının performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Yumuşak görece normal konsolide temel zeminlerinin inşat sonrası konsolidasyonu genel olarak dolgu oturmasının temel nedeni olarak kabul edilmektedir. Yumuşak katmanların yanal yer değiştirmeleri de dolgu oturmasına katkıda bulunabilir ve buna ek olarak, temel üstü ayaklar veya kazıklar üzerine kurulmuş olan köprü ayaklarının yanal hareketinin önemli bir nedeni olabilmektedir. Öte yandan, nispeten sıkıştırılamaz (örneğin sert killer, kumlar, çakıllar veya kaya) zeminler çok az problem yaratır. Sonuç olarak, zemin koşulları hakkında yeterli bilgi elde etmek ve temel zeminin dolgu ve köprü yüklerine tepkisini analiz etmek son derece önemlidir.

2.1. DOLGULARIN ÜZERİNE İNŞAA EDİLDİKLERİ TEMEL ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN TASARIMA ETKİSİ

Bu bölüm, zemin etüdü araştırmaları, laboratuvar testleri ve oturma analizleri de dahil olmak üzere, temel zeminlerinin geoteknik incelemesinin gerekliliklerini ele almaktadır. Ayrıca, temel zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılabilen yöntemler sunulmaktadır.

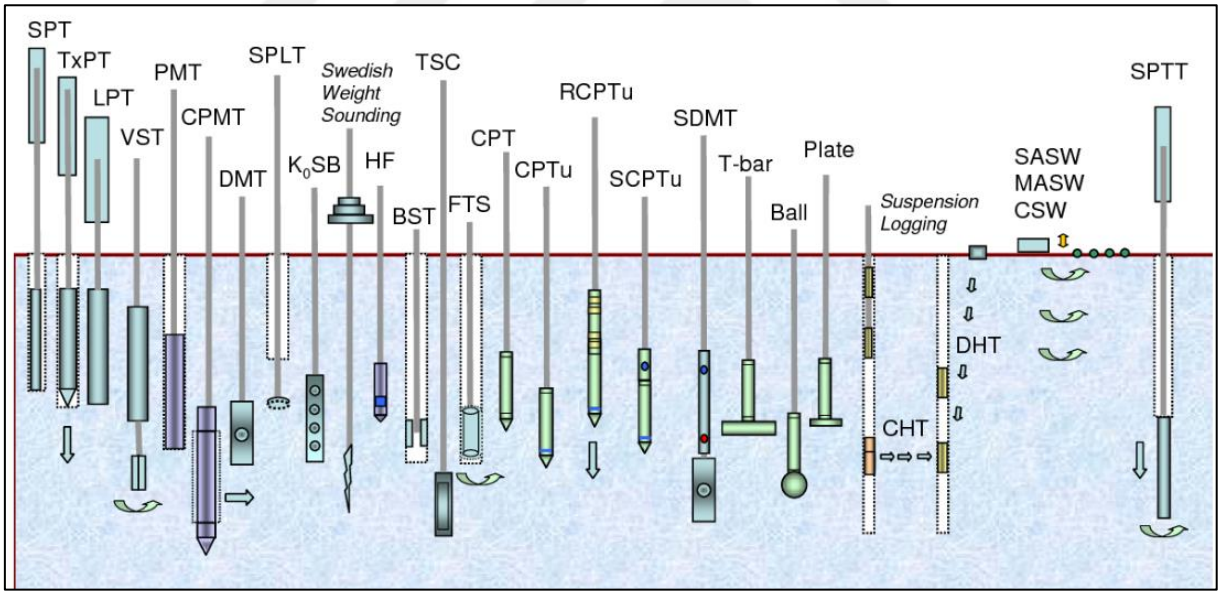
2.1.1. Zeminin İncelenmesi

Başarılı bir geoteknik proje için yeterli bir saha araştırması gerekli bir önkoşuldur. Bir çok ulaşım dairesinin zemin etüdü hakkında yayınladığı şartnameler bulunmakta olup metodoloji ile ilgili kılavuzlar ve çok kapsamlı bilgiler genellikle ulaşım idaresi zemin etüdü el kitabında sunulmaktadır. (örn. AASHTO)

Köprü yaklaşımları için zemin etüdü, köprü yapısının diğer elemanlarının gereksinimlerinin araştırılmasıyla bütünleştirilmelidir. Keşif programının boyutu ve türü, önerilen projenin büyüklüğüne ve saha koşullarının karmaşıklığına bağlı olmalıdır. Araştırma tüm zemin katmanlarının derinliği, kalınlığı ve sınıflandırması hakkında bilgi vermelidir. Kritik tabakaların mukavemeti, sıkıştırılabilirliği ve geçirgenliği belirlenmelidir. Örselenmemiş numunelerin alınması, ~~kohezyonlu~~ zeminlerin genellikle mukavemet ve sıkıştırılabilirlik özelliklerinin laboratuvar testleri ile değerlendirmesi için gereklidir. Bununla birlikte, numune alınması zor olan kohezyonsuz zeminler ve bazen çok yumuşak kohezyonlu zeminler için zemin özelliklerinin yerinde değerlendirilmesi, çeşitli tipte sondaj deneyleri ile yapılır. Kayaların

derinliği kadar tipi ve kalitesi de belirlenmelidir. Son olarak, yeraltı sularının yükselmesi de rapor edilmelidir. Dolgu altında olan kohezyonlu birimlerin değerlendirilmesi için gerekli olan konsolidasyon deneyi de dahil olmak üzere, mukavemet ve sıkışabilirliğin laboratuvar değerlendirmesi daha sonra yapılacak olan hesaplamalarda kullanılan nümerik bünye modellerinin parametre seçimleri için önem arz etmektedir.

Projeye özgü saha koşulları için, saha araştırmasının kapsamı ve türü, bir geoteknik mühendis tarafından değerlendirilerek belirlenmelidir. AASHTO zemin etüdü el kitabı [1], yapılar ve dolgular için sondaj konumu, adedi ve derinlikleri için rehber olarak alınabilir. AASHTO zemin etüdü el kitabına göre 4.5 m'den daha yüksek dolgular için, önerilen yatayda sondaj aralığı maksimum 60 m'dir, düzensiz koşullar veya sıkıştırılabilir zeminle karşılaşıldığında aralık 30 m düşürülmesi önerilmektedir. Her köprü ayağı için, en az iki sondaj önerilir ve köprü ayağının uzunluğu 30 m'yi geçtiği veya kanat duvarlarının 6 m 'den daha geniş olduğu durumlarda ek sondajlar önerilmektedir.

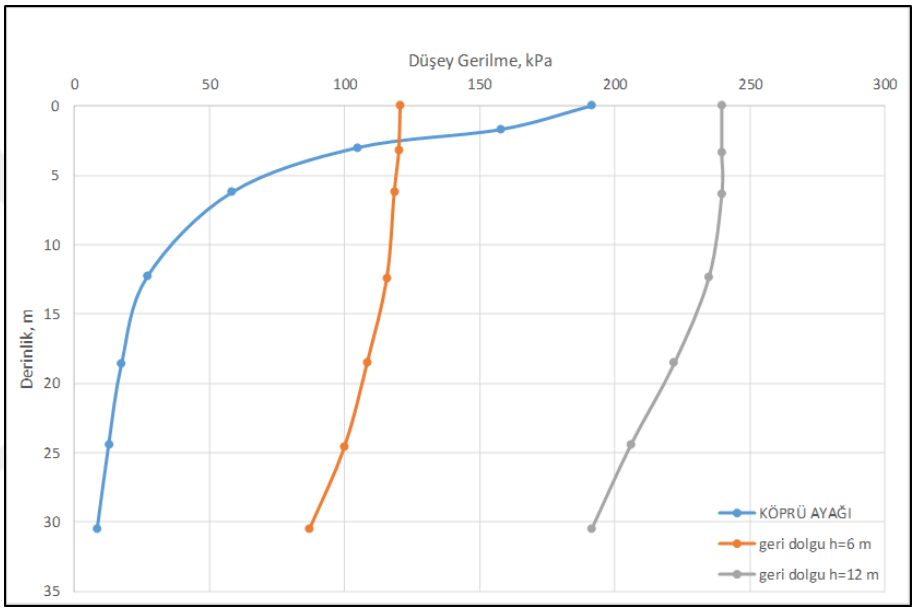


Şekil 2.1: Zemin parametrelerinin belirlenmesi adına sahada yapılabilecek saha deneyleri temsili gösterimi.

Sondajların derinliği için genel öneri, temelin direkt olarak kaya birim üzerine oturmaması ya da mukavemetli bir zemine rastlanmadığı sürece, zemine yüklenecek temel yüklerinden kaynaklanan net gerilme artışının, bu derinlikteki efektif gerilme düzeyinin yüzde onundan daha az olduğu derinliktir. Bu kriter, yaklaşım dolgusu sondajları için kullanılmalıdır. Ancak, köprü ayakları için, özellikle eğer köprü ayaklarının desteklenmesi için derin temeller

düşünülüyorsa veya olağanüstü jeolojik özellikler (örn, çözelti boşlukları veya madenler tünel boşlukları) bekleniyorsa, tüm sondajların kayaya nüfuz etmesi, belirlenen sondajların kayaçların 3 ila 6 m içerisine kadar devam ettirilmesi önerilmektedir.

Sondajların derinliği ve yeri göz önünde bulundurulduğunda, çok sığ derinliklerin haricinde, dolgu yüklemesinin neden olduğu gerilme artışının, genellikle, yapısal yüklerden kaynaklanandan önemli ölçüde daha büyük olacağı belirtilmelidir. Bu durum, Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 : Zemine köprü ve yaklaşım dolgularının getireceği ek gerilme dağılımları. [2]

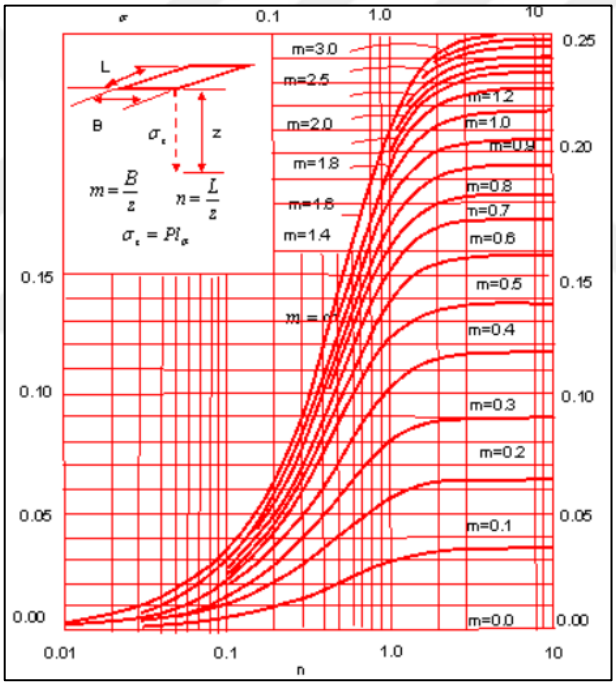
2.1.2. Temel Zeminin Davranışının İncelenmesi

Dolgu temel zeminin hem sıkışma davranışı hem de global stabilitesi dikkate alınmalıdır. Yumuşak kil temel zemininin hareketinin her iki yönüyle de ilgili iyi bir tartışma Bjerrum [3] tarafından sunulmuştur.

2.1.2.1. Oturma Analizi

Temel zeminin öngörülen oturmasının hesaplanması çok önemli ve nispeten basit bir prosedürdür. Zeminin sıkışabilirlik özellikleri, uygulanan yüklerin neden olduğu gerilme artışlarının oluşturduğu düşey gerilimi hesaplamak için kullanılır. Dolgunun ve köprünün ölü yükleri temel zeminini etkileyen birincil yüklerdir ve Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, çok sığ derinliklerin dışında genellikle dolgunun ağırlığından ötürü oluşan ek yükler baskın olan

yüklemedir. Temel zeminindeki gerilme artışı, dolgunun, dolgu tabanında hareket eden bir trapezoid sürşarj olduğu düşünülerek, Boussinesq elastik teorisinden hesaplanabilir. Bozozuk ve Lo [4], bu varsayımın dolgu içindeki gerilme dağılımı etkilerini göz ardı ettiğini ve dolgunun merkezinin altındaki düşey gerilimi olduğundan fazla gösterdiğini kaydetmiştir. Perloff ve diğ. [5] tarafından geliştirilen ve bu etkiyi açıklayan elastik gerilme dağıtım çözümünün kullanılmasını önermektedirler. Bununla birlikte, mevcut uygulama, basit trapezoid sürşarj kullanımı ile ortaya konan hataları, uygun zemin özelliklerinin seçimi ile ilişkili potansiyel hatalarla karşılaştırıldığında, konservatif, kabul edilebilir ve minör olarak görülmektedir. Günümüz şartlarında sonlu elemanlar yöntemi ile bahsedilen yöntemlerden kaynaklı hatalar minimize edilmektedir.



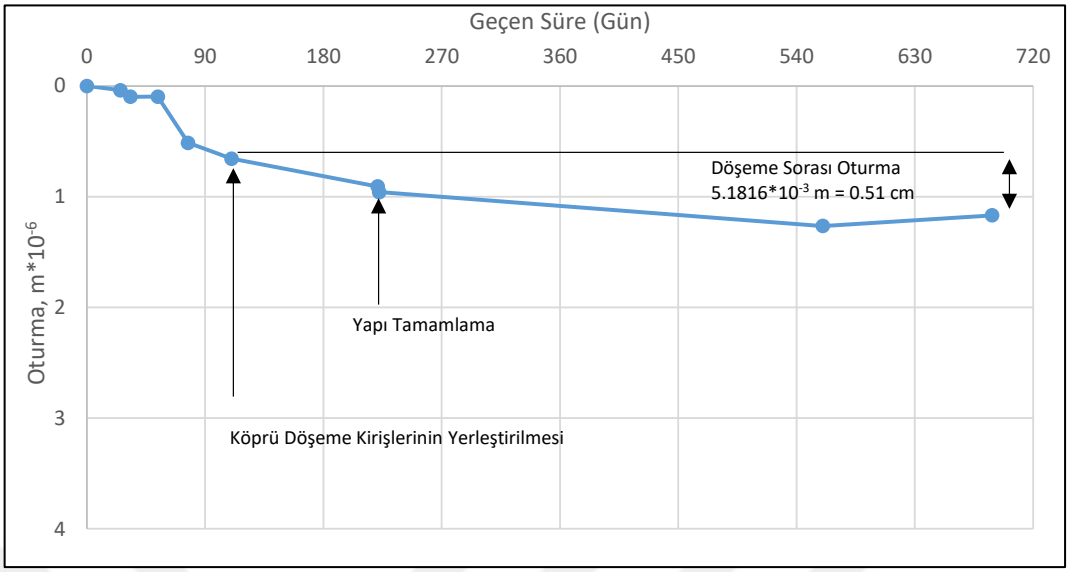
Şekil 2.3: Steinbrenner's metot ile üniform yük altında temel altında oluşacak gerilmenin hesaplanması. [6]

Oturma üç bileşenden oluşur: Ani oturma, birincil konsolidasyon oturması ve ikincil konsolidasyon oturması. Ani oturma, yükün uygulaması ile eşzamanlı olarak gerçekleşir ve bu nedenle, kaplama sisteminin son tesviye ve yapımından önce meydana gelmektedir; sonuç olarak, genellikle köprü-yaklaşım problemlerinin kaynağı olarak gösterilmemektedir. Bununla birlikte, hem birincil hem de ikincil konsolidasyon oturması, inşat süresinin haricinde devam etmesi muhtemel, zamana bağlı süreçlerdir. Köprü yaklaşımı tasarımı ve yapım prosedürleri için zamana bağlı oturmaların hem büyüklük hem de konsolidasyon oranı önemlidir.

Kohezyonlu zeminler için, önkonsolidasyon basıncı ve yükleme/boşaltma indeksleri genellikle laboratuvar konsolidasyon testleriyle belirlenir ve birincil, ikincil konsolidasyonun büyüklüğünü hesaplamak için kullanılır. İkincil konsolidasyon etkilerini de içeren oturma hesaplaması için prosedürler günümüz programlarınca zemin geçirgenliği ve önceden tanımlı zamana bağlı olarak, yükleme ile oluşturulmuş ilave boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesine bağlı deplasmanların oluşturulmasıdır. Ek olarak analitik hesaplamalar ile ikincil kontrol yapılması iyi bir tasarım yaklaşımı olmaktadır. Analitik hesaplamalar için genel yaklaşım Bjerrum [3] tarafından sunulmuştur. İkincil konsolidasyon (creep) sıklıkla küçüktür ve ihmal edilir; bununla birlikte, bazı zeminler (örn. organik veya hassas killer) için, uzun süreli ikincil konsolidasyon, tesisin faydalı ömrü boyunca köprü-yaklaşım problemlerine katkıda bulunan oturmalara neden olabilir [7].

Konsolidasyon testi verileri birincil konsolidasyon oranını hesaplamak için kullanılır. Bu hesaplama, inşat aşamasında oluşacak sıkıştırma miktarını tahmin etmek ve özel inşat sıralamasını veya prosedürlerini (örn. Ön yüklemeler, geçici sürşarjlar, drenler ve katmanlayarak dolgu yapımı vb.) kullanarak inşat sonrası oturmayı en aza indirme fizibilitesini değerlendirmek için kullanılır. Bununla birlikte, konsolidasyon oranına ilişkin tahminler nihai oturma tahminlerinden daha az güvenilirdir. Bu nedenle, eğer konsolidasyon oranı inşat programlarında kritik öneme sahipse, inşat sırasında konsolidasyon sürecini izlemek ve kontrol etmek için enstrümantasyonun kurulması esastır.

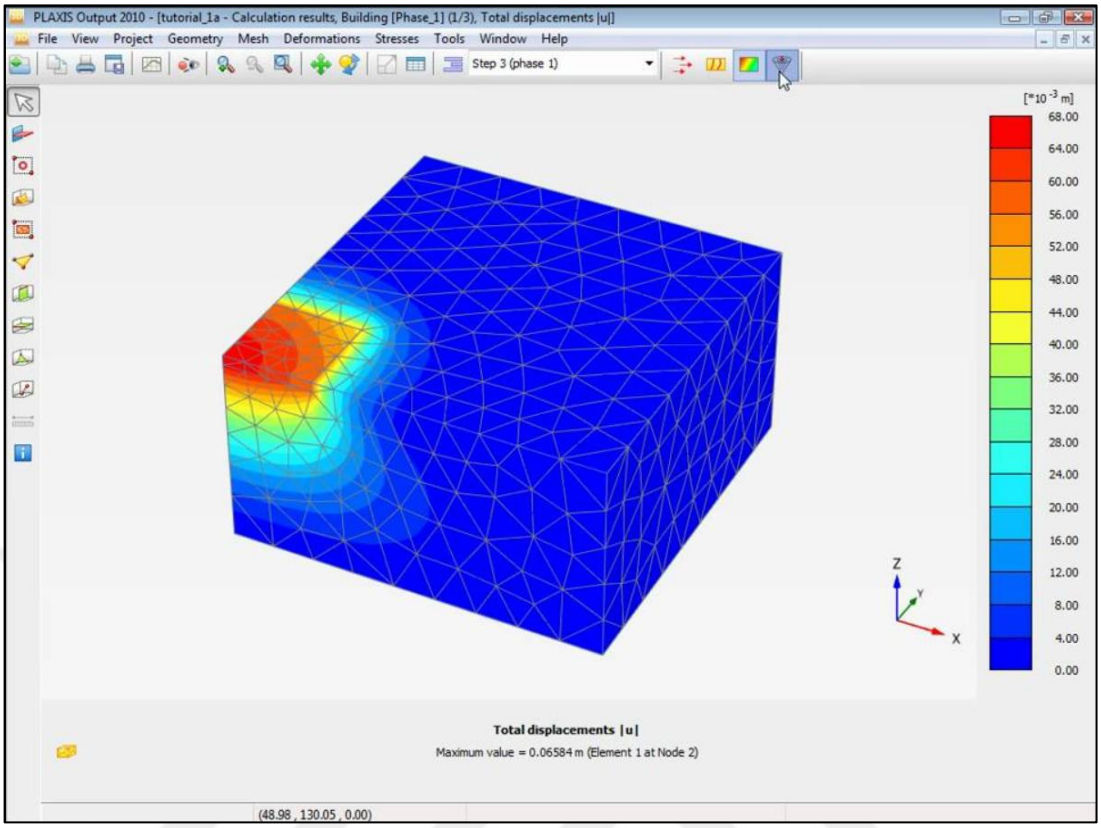
Kohezyonsuz zeminler genellikle normal veya hafif ölçüde aşırı konsolide killerden daha az sıkıştırılabilir zeminlerdir. Ayrıca, sıkışma oranı çok hızlıdır ve inşat sırasında birincil konsolidasyon genellikle tamamlanacaktır. Sonuç olarak, kohezyonsuz temel zeminlerinin, köprü yaklaşımlarında önemli inşat sonrası oturma sorunlarına neden olması muhtemel değildir. Kum üzerindeki yüzeysel temellerle desteklenen 10 köprüye ait 21 köprü ayağı ve temel ayağının incelendiği, Federal Karayolu İdaresi (FHWA) tarafından yapılan bir çalışmada [8], köprü döşemesinin inşasından sonra gözlemlenen toplam oturmanın 19 mm olduğu ancak ortalamanın 6 mm daha az olduğu bildirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen tipik bir zaman-oturma kaydı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Kum zemine oturan sığ temeller üzerindeki köprü ayakları için tipik oturma - zaman eğrisi.

Kum ve çakıl temelli zeminlerin sıkıştırılmasını hesaplamak genellikle gerekli değildir. Bir dolgu altındaki gevşek kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılmasının tahmin edilmesinin gerekli olduğu nadir durumlarda metodoloji iyi oluşturulmamıştır. Kohezyonsuz zeminlerde sığ temellerin oturmasının hesaplanması için çok sayıda yöntem önerilmiştir, ancak çoğu, dolgu yüklemelerinin geometrisine kolayca uyarlanamayan ampirik yöntemlerdir. Bu ampirik yöntemlerden birkaç tanesi (ör. Schmertmann [9], [10] ve Hough [11]) dolgu yüklemeleri için uygun görünmektedir.

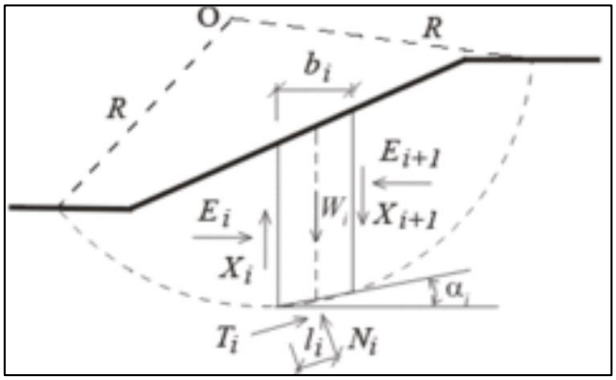
Günümüzde tabakalı ve monotonik olmayan yüklemelere sahip geoteknik problemlerinin çözümünde etkili bir araç olarak sonlu elemanlar veya sonlu farklar programları kullanılmaktadır. Her yükleme için zemin elemanın davranışını gerilme değişimine bağlı olarak materyal özelliklerinin güncellenerek problemin çözülmesiyle inceleyebilmemize olanak sağlayan gelişmiş zemin bünye modelleri mevcut olup mekanik hesaplamaların hidrolik etkilerini de kapsamasını sağlayabilmekteyiz. Elbette ampirik yaklaşımlar ile nümerik yaklaşımın birbiri ile tamamen uyuşması beklenemese de benzerlik göstermesi mertebe bakımından önemlidir.



Şekil 2.5: Sonlu elemanlar hesaplamaları yapabilen Plaxis 3D programı ile yapılmış oturma analizinden alınmış ekran görüntüsü**.**

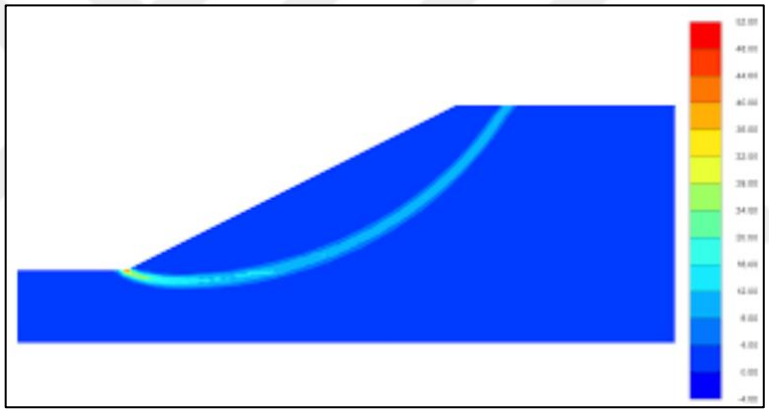
2.1.2.2. Stabilite Analizleri

Eğer dolgu yükleri, temel zeminlerin kayma mukavemetine yaklaşan gerilmeler üretiyorsa, bu zeminler yanal olarak yer değiştirebilir, bu da büyük hareketlere ve dolgunun bozulmasına neden olabilir. Temel, turba, marn, inorganik, organik alüvyon ve kil de dahil olmak üzere yumuşak kohezyonlu zemin olduğu zaman, temel zeminindeki bu kayma dikkatle incelenmelidir. Ancak, derin basal kaymalar genellikle kum, çakıl ve iç sürtünmeden kayma mukavemeti geliştiren diğer materyallerde oluşmaz. Kaymaya karşı güvenlik faktörü, limit denge kavramlarına dayanan geleneksel eğim stabilite analizleriyle belirlenebilir. Dairesel, doğrusal veya kompozit kayma yüzeylerini varsayan yöntemler, literatürde yaygın şekilde mevcuttur (Bkz., [12]- [13]). Ayrıca, bu yöntemler için gerekli hesaplamalar, geliştirilmiş çok çeşitli bilgisayar yazılımları ile gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.6: Dairesel kayma düzlemini varsayan limit denge çözüm şeması.

Bilgisayar programları, çok sayıda tasarım alternatifini araştırmayı mümkün kılar, ancak kritik tasarım koşulları için bilgisayar sonuçlarının manuel kontrollerini yapmak iyi bir tasarım yaklaşımıdır.

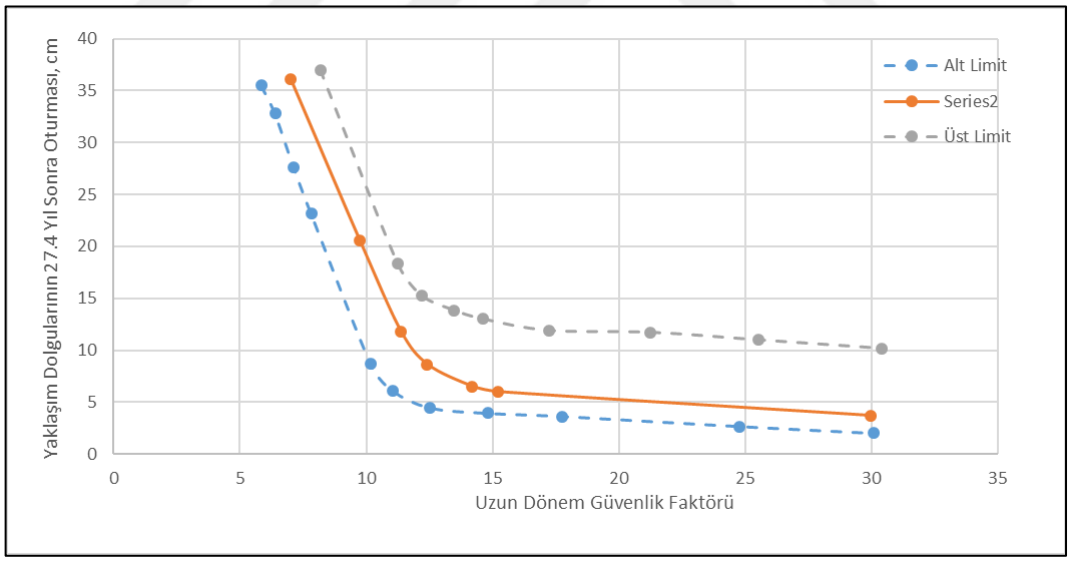


Şekil 2.7: Plaxis 2D programı Sonlu elemanlar yöntemi ile dayanım azaltma katsayısına dayalı yapılmış analiz çıktısı.

Yumuşak kohezyonlu zeminler üzerindeki dolgular için, inşat sonunda elde edilen durum stabilite için en kritik tasarım durumdur çünkü temel zemini zamanla konsolide olacak ve rijitlik ve mukavemet adına daha güçlü olacaktır. Bu koşulun incelenmesi için analizi, zemininin drenajsız mukavemetini kullanarak toplam gerilme açısından yürütmek uygun ve yerindedir. Genel olarak, konsolide edilmemiş drenajsız (UU) üç eksenli basınç testleri önerilmekle birlikte, sahada hali hazırdaki mukavemet profilleri için, yerinde Vayne Testi, CPT, SPT testleri uygulanmalıdır. Nümerik hesaplamalara drenajlı mukavemet parametrelerinden toplam gerilme koşullarının hesaplanabildiği göz ardı edilmemelidir. Bunun için hesaplarda baz alınması adına CU üç eksenli testler de yapılmalıdır. Bazı durumlarda, ölçülen mukavemet bozulma,

anizotropi veya şekil değiştirme hızı etkileri için ölçülen değerler bu koşulları göz önüne alacak şekilde düzeltilmelidir. [ör. Bjerrum'un Vayne testi sonuçları için düzeltme faktörü [3]].

Ulaşım kurumlarının çoğu, karayolu dolgularında geçici durumlarda 1,25 ile 1,3 arasında bir güvenlik faktörünü zorunlu tutmaktadır. Bununla birlikte, güvenlik faktörü 1,5'den daha az olduğunda, dolgu topuğu yakınındaki yumuşak temel zeminlerinde büyük kayma gerilmelerinin gelişebileceği dikkate alınmalıdır. Bu durum, yumuşak zemin tabakasında yanal deformasyon veya elastik deformasyon meydana gelmesi, dolgu oturmasına ve köprü ayaklarının hatta kazıklarla desteklenmiş köprü ayaklarının dahi hem yanal hem de düşey hareketlerine neden olabilmektedir. Konvansiyonel hesaplarda bu durum mutlaka tasarım aşamasında dikkatlice ele alınmalıdır. Bu hareketlerin büyüklüğünü tahmin etmek için nispeten karmaşık sonlu elemanlar analizleri gereklidir ([14], [15]) ve bu tür hesaplamaların güvenilirliği, temel zemini temsil etmek için seçilen deformasyon modüllerine çok duyarlıdır. Konvansiyonel analitik hesaplamalarda bu durum daha çok temel zeminin uzun süreli stabilitesi için en az 1.5 güvenlik faktörü sağlanarak en aza indirilir.



Şekil 2.8: Uzun dönem oturmalara karşı güvenlik faktörü karşılaştırması. **[7]**

2.1.3. Temel Zeminin Güçlendirilmesi

Bir temel zeminin yanal yada düşey hareketi, köprü yaklaşımının performansı için yetersiz olduğunda, dolgu ve köprü ayağı yüklerini azaltarak, dolgu ve köprü ayağı yüklerini zayıf zeminden daha sert katmanlara aktararak veya temel zemininin mühendislik özelliklerini

geliştirerek yeterli performans seviyesine getirilebilir. Köprü yerinin değiştirilmesi veya dolgunun yerine sanat yapılarının tercih edilmesi, düşünülebilecek diğer alternatiflerdir.

Çoğu doğal zemin, geoteknik yapı performansı için uygun olmayabilir ancak daha az deplasman tolerans gereksinimleri olan başka uygulamalar için uygun olabilmektedir. Benzer bir şekilde, uygun olmayan doğal zemin, genellikle, bu uygulama ile ilgili zemin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesiyle belirli bir uygulama için uygun hale getirilebilir. Rijitlik, mukavemet ve geçirgenlik köprü yaklaşım elemanlarının desteklenmesi için en önemli mühendislik özellikleridir. Temel zemininin bu özelliklerinin bir veya daha fazlasının iyileştirilmesi, sıklıkla, köprü yaklaşımları için en uygun maliyetli tasarım alternatifidir. Bununla birlikte, son 20 yılda birçok yeni ve inovatif zemin iyileştirme tekniği geliştirilmiştir. Köprü yaklaşımı temelleri için en uygun görünen zemin iyileştirme teknikleri, aşağıdaki bölümlerde kısaca açıklanmıştır.

2.1.3.1. Kötü Zeminin Uzaklaştırılması ve Yer Değiştirme

Uygun olmayan malzeme yüzeyde veya yüzey yakınında bulunduğunda, uzaklaştırılması ve uygun dolgu ile değiştirilmesi en yaygın kullanılan iyileştirme prosedürüdür. Basit kazı yöntemleri, uygun olmayan tabaka nispeten 3 m 'den daha az kalınlıkta olduğunda ve su tablasının üzerinde olduğunda en etkilidir yöntemdir. Dere kenarlarında su seviyesinin altında dip sıyırması kullanılabilir, bununla birlikte, dip tarama makinesi atıklarının imhası önemli bir çevresel sorun haline gelebilir.



Şekil 2.9: Dip taraması uygulaması**.**

Organik katmanlar ve çok yumuşak killer bazen yer değiştirme yöntemleri ile uzaklaştırılır. Dolgu, yumuşak temel zemininin dayanabileceği gerilim üzerinde bir gerilme yaratacak yükseklikte serilerek yumuşak zeminin yana ve önüne doğru hareketi ile dolgu malzemesi ile yumuşak zemin malzemesi yer değiştirilir. Yer değiştirme yönteminde, yumuşak malzemenin dolgu içindeki ceplerde sıkışmasını önlemek ve yumuşak katmanda oluşabilecek çamur dalgası hareketleri çok dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir. Yumuşak zemininin mühendislik parametreleri kalitesindeki değişiklikler, muntazam yer değiştirmeyi sağlamayı ve uygun olmayan malzemenin tamamen çıkarılmasını çok zorlaştırır. Bu belirsizlikler nedeniyle, yer değiştirme yöntemleri, günümüzde mevcut olan diğer alternatiflerin çoğundan daha az arzu edilir. Bu durum, özellikle yol dolgularında daha sıkı kalite kontrol gerektiren köprü-yaklaşım temel zeminleri için geçerlidir.

Tüm uzaklaştırma ve yer değiştirme prosedürlerinin başarısı aynı zamanda ariyet gerecinin doğru yerleştirilmesine de bağlıdır. Uygun miktarlarda uygun malzeme bulunmalı ve dolgu, Bölüm 2.2'de ele alınacak olan dolgu inşatı için belirlenen kriterlere uygun olarak sıkıştırılmalıdır. Uygun olmayan malzeme su altından çıkarılırsa, kazılmış alandan suyu boşaltmak veya dolgu suyunu yerleştirmek için özel prosedürler gerekebilir. tamamlayıcı işlem (örneğin, sürşarj ve bekleme süreleri) de gerekli olabilir.

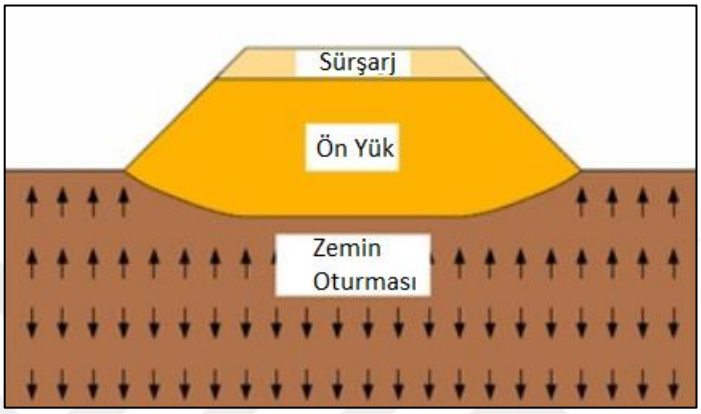
2.1.3.2. Yerinde Sıkıştırma Yöntemleri

Uygun olmayan temel malzemesinin uzaklaştırılması pratik veya ekonomik olmadığında, uygunsuz malzeme genellikle yerinde sıkıştırma ile iyileştirilebilir. Kohezyonlu zeminler için en eski ve en yaygın olarak kullanılan sıkıştırma yöntemi konsolidasyon işlemidir. Dinamik kompaksiyon ve kompaksiyon kazıkları da dahil olmak üzere diğer sıkıştırma prosedürleri de kullanılmaktadır.

Ön Yükleme

Önyükleme, kalıcı yaklaşım eleman bileşenlerinin yapımından önce yumuşak temel zeminlerinin konsolidasyonu ile rijitlik ve mukavemet parametrelerini iyileştiren bir süreçtir. Köprü yaklaşımlarında, temel zeminlerinin iyileştirilmesi için yaklaşım dolgusunun ağırlığı kullanılır. Kalıcı yol ve köprü bileşenlerinin son tesviyesi ve inşası, temel zemininin konsolidasyon miktarı istenen yüzdeye ulaşıncaya kadar ertelenmelidir.

Bu süreç, birincil ve ikincil oturmanın neden olduğu inşat sonrası oturmayı azaltmak veya ortadan kaldırmak için etkin bir şekilde kullanılabilir. Ancak, gerekli bekleme süreleri inşat programları ve maliyetleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bir yıl genellikle kabul edilebilir maksimum bekleme süresidir ve sıklıkla çok daha kısa bekleme periyotları istenir. Geçici sürşarjlar veya düşey drenler bazen erteleme sürelerini kısaltmak için kullanılabilir.

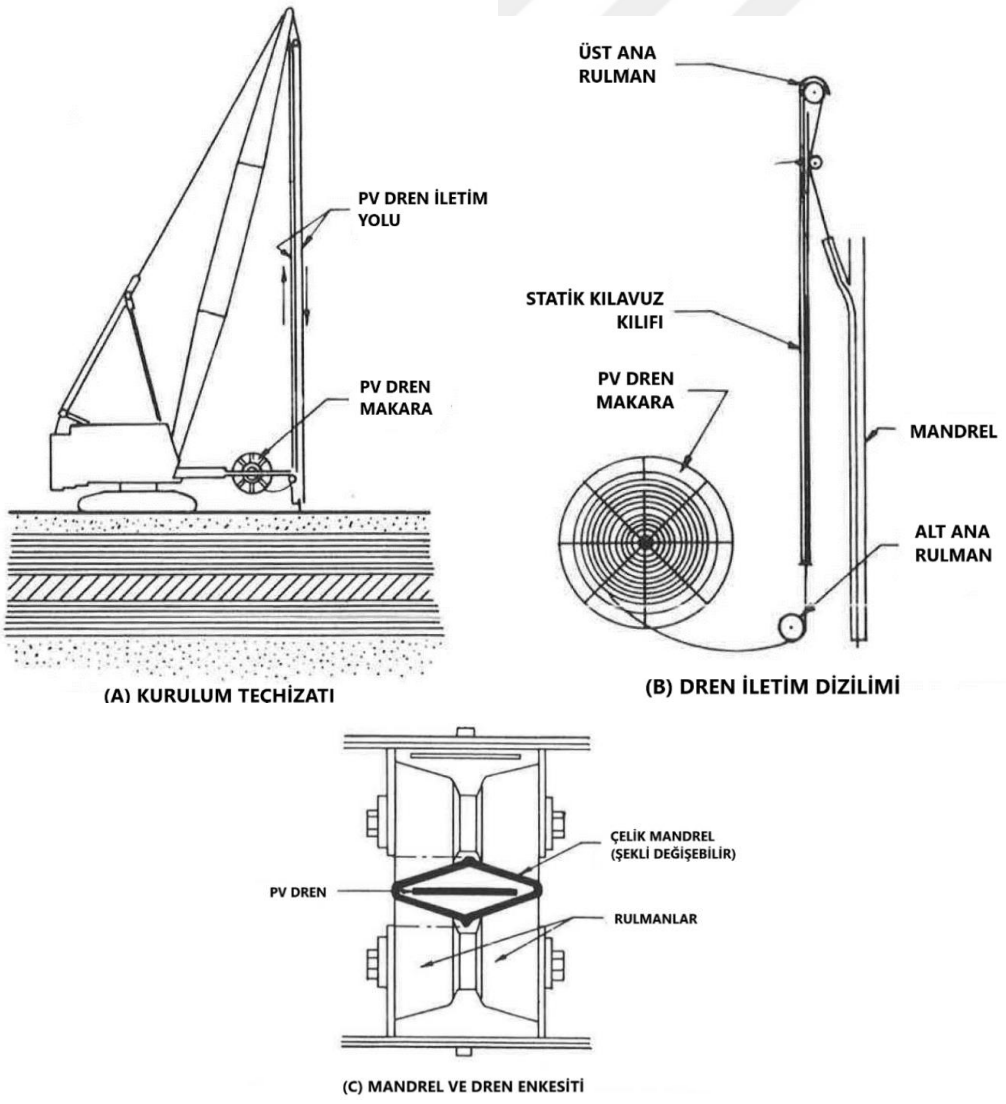


Şekil 2.10: Temel zemininde birincil ve ikincil oturmaların tamamlanması için ön yükleme yapılması.

Önyükleme tasarımındaki temel husus, hem geçici hem de son tasarım yükleri altında birincil ve ikincil konsolidasyonun tamamlanma büyüklükleri ve oranlarıdır [16]. Temel zemininin rijitlik artışı ve konsolidasyon ile mukavemet artış oranı da değerlendirilmelidir. Geçici yükler temel zemine aşırı yüklenirse, çok büyük kaymalar ve kontrolsüz yanal yer değiştirmeler meydana gelebilir.

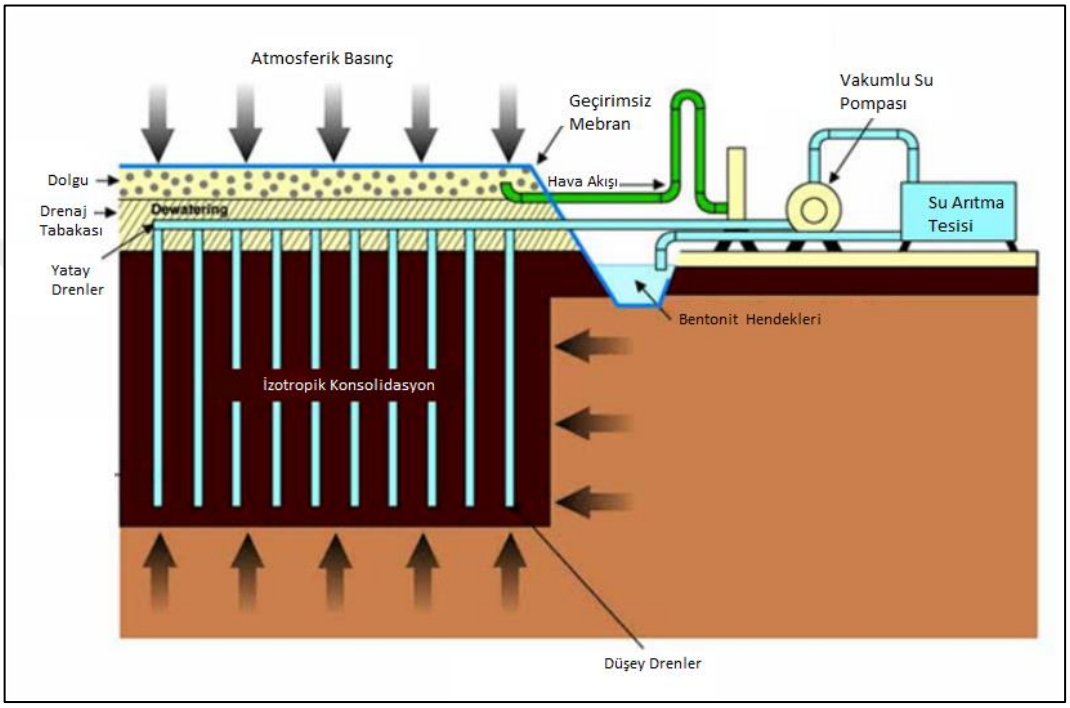
Sürşarjlar dolgunun, son tasarım yüksekliğinin üzerinde bir yüksekliğe inşa edilmesiyle üretilen geçici yüklemelerin, genellikle konsolidasyon hızını artırdığı düşünülmektedir. Geçici yük ne kadar büyükse, konsolidasyon hızı da o kadar fazladır. Dolgunun inşası sonrasında bekleme sürecinden önce ek olarak, uzun süreli inşat sonrası kayma veya ikincil oturmayı azaltmak için sürşarjlar tasarlanabilir. Maksimum uygulanabilir sürşarj büyüklüğü yeterli stabilitenin sağlanması ile sınırlandırılır. Geçici bir sürşarjın yerleştirilmesi ve ardından uzaklaştırılması, hafriyat masraflarını artırır. Bazı durumlarda, dolgu eğimlerinin azaltılması veya temel zemininin stabilitesini korumak için dolgu topuklarına banket monte etmek gerekli olabilir; bu da inşat maliyetlerini de arttırır. Bu nedenle, her bir proje için geçici sürşarj maliyetleri, daha kısa bir bekleme süresinin sağlayacağı avantajlara karşı dikkatli bir şekilde tartılmalıdır. Bu gibi durumlarda proje yönetimi uzmanlarından destek alınabilir.

Düşey drenler birincil konsolidasyon hızı, yumuşak az-geçirgen temel zeminlerinde karelajlı olarak teşkil edilen düşey drenler kurularak hızlandırılabilir. Düşey kum sütunları bu amaçla uygulamada başarıyla kullanılmaktadır [17]. Günümüzde kum drenleri esas olarak sentetik bir geotekstil ceketle kaplanmış bir plastik merkezden oluşan prefabrike düşey fitil drenlerle değiştirilmiştir. Şekil 2.11'da gösterildiği gibi özel makine tahrikli bir mandrel, bu drenleri yumuşak zeminlerde çok çabuk bir şekilde ([18]- [19]) minimum bozulma ile monte etmek için kullanılır.



Şekil 2.11: Prefabrik fitil kanallarının kurulumu için ekipman. [20]

Ön yükleme performans değerlendirmesi, dikkatli bir geoteknik analiz gerektirir. Zemin profili açıkça tanımlanmalı ve tüm sıkıştırılabilir tabakaların mukavemeti, sıkıştırılabilirliği ve geçirgenliği laboratuvar testleri veya yerinde testlerle değerlendirilmelidir. Tasarım hesaplamaları, stabilite analizlerini, birincil ve ikincil konsolidasyon miktar ve hız tahminlerini içermelidir.



Şekil 2.12: Düşey ve yatay drenler ile dolgunun konsolidasyon oturmalarının sağlanması.

Saha ölçüm enstrümantasyonu ve yakın inşat denetimi zorunludur. Sahadaki gerçek oturma miktarı ve hızlarının tahmininde yer alan pek çok belirsizlik nedeniyle, inşat yapım hızı veya bekleme süreleri genellikle sahada gerçekleşen konsolidasyonunun ilerlemesi izlenerek belirlenmelidir. Basit projelerde, sadece dolgu yüzeyinin oturmasını izlemek yeterli olabilir.

Stabilitenin büyük önem taşıdığı daha karmaşık projelerde, dolgu ve temel zeminlerinde boşluk suyu basıncı ve hem yatay hem de düşey hareketler izlenmelidir.

Dinamik Kompaksiyon

Dinamik kompaksiyon, zemin yüzeyinden belirli bir yüksekte olan ağırlığın tekrar tekrar düşürülmesi ile uygulanır. Tipik olarak, 6 ila 30 ton arasında değişen ağırlıklar 9 ila 23 m yüksekliğinden düşürülür. Ağırlık önceden belirlenmiş bir ızgara deseni üzerinde her noktaya birkaç kez düşürülür (bkz. Şekil 2.13). Bazen, istenilen iyileştirme düzeyine ulaşmak adına

alana birkaç kez işlemin tekrarlanması gereklidir. Dinamik kompaksiyon yaygın olarak 12 m derinliklerde etkilidir.



Şekil 2.13: Dinamik kompaksiyon uygulaması saha görünümü.

Sıkıştırma derinliği esas olarak çarpma enerjisine, sıkıştırılan katman türüne ve suya doygunluk derecesine bağlıdır. Bu faktörler hakkında iyi bir tartışma Lukas [21] tarafından sunulmaktadır. Dinamik kompaksiyon birçok çeşitli katmanlara uygulanmıştır ve dinamik kompaksiyonla iyileştirme için çeşitli katmanların uygunluğu Tablo 2.1'de özetlenmiştir. En uygun katmanlar, su tablasının üstünde veya altında bulunan iri taneli geçirgen zeminlerdir. Kısmen doygun yarı geçirgen malzemeler (ör., alüvyonlu zeminler) de zorlukla da olsa sıkılaştırılabilir; bununla birlikte, su tablasının altında bu zeminlerin sıkıştırılması daha zor hale gelir çünkü uygulama sırasında ilave boşluk suyu basınçları oluşur ve bünyedeki su tahliye olmadığından sıkıştırma yapılamaz. Dinamik kompaksiyon genellikle kil ve organik katmanlar gibi doygun geçirgen olmayan materyallerde etkisizdir.

Köprü yaklaşımlarının inşat sonrası küçük diferansiyel oturmalara duyarlılığı nedeniyle, köprü yaklaşımlarında dinamik kompaksiyon ile sıkılaştırılmak istenen zemin gevşek, temiz, kaba taneli katmanların sıkılaştırılması ile sınırlandırılmalıdır.

Derin katmanlarda dinamik kompaksiyonun etkinliğini değerlendirmek için hem işlem öncesi hem de sonrası yerinde test yapılması gerekir. Standart penetrasyon testleri (SPT) ve konik penetrasyon testleri (CPT) en sık kullanılan test metotlarıdır. Dilatometreler ve basınç ölçerler de sıklıkla kullanılmaktadır. Sismik testler ve diğer jeofizik kayıt teknikleri zaman zaman kullanılmaktadır. ([21], [22], [23]).

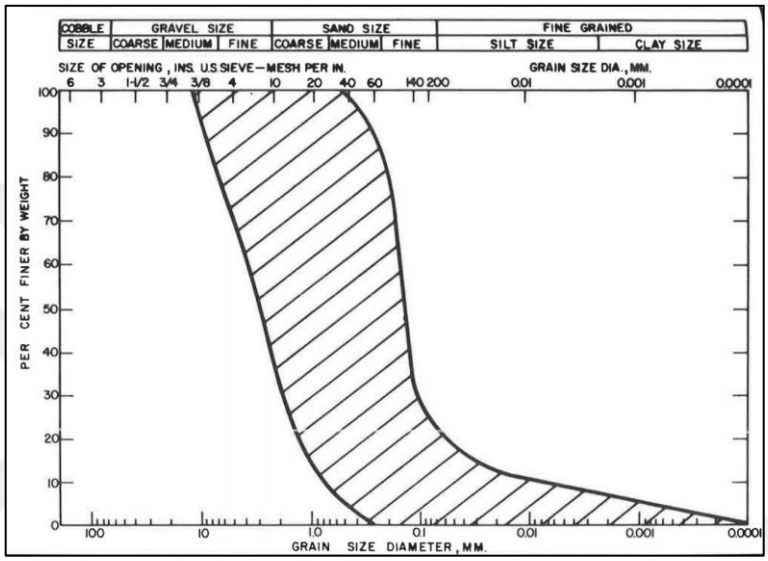
Tablo 2.1: Dinamik kompaksiyon için katman uygunluğu. [21]

Genel Zemin Tipi	**Dolgu Sınıflandırması**	**AASHTO Sınıflaması**	**Olası Zeminin suya Doygunluk Derecesi**	**Dinamik Kompaksiyon için Uygunluk**
75 µm (No. 200) eleğinden % 0 geçen, aşınmış kaya parçaları ile kum tane büyüklüğü arasındaki geçirgen katmanlar	Bina molozu Aşınmış kaya parçaları Kırık beton	A-1-a A-1-b A-3	Yüksek veya düşük	Mükemmel
%35'ten fazla alüvyon içermeyen geçirgen katmanlar	Ayrışmış çöpler	A-1-a A-2-4 A-2-5	Yüksek Düşük	İyi Mükemmel
Yarı geçirgen zemin katmanları, genellikle alüvyonlu, % 25'ten az kil içeren PI<8 zeminler	Uçucu kül Maden atığı	A-5	Yüksek Düşük	Orta İyi
Geçirimsiz zemin katmanları, genellikle killi zeminler, PI>8	Kil dolgu Maden atığı	A-6 A-7-5 A-7-6 A-2-6	Yüksek Düşük	Tavsiye edilmez Ortadan küçüğe doğru iyileştirmeler; su içeriği esneklik limitinden daha az olmalıdır
Kağıt, organik katman, metal ve odun içeren çeşitli dolgular	Yakın tarihli belediye çöplüğü	Yok	Düşük	Orta; ayrışmaya bağlı uzun dönem oturma. Dolguda kullanımı sınırlı
Son derece organik tortular, turba organik alüvyonlar	Yok	Yüksek	Yeterli granüler dolgu eklenmediği ve organic ile granülü karıştırmak için enerji uygulanmadığı sürece önerilmez.	

Vibrokompaksiyon ile İyileştirme

Katman olarak derinde bulunan gevşek kohezyonsuz zeminler, sıklıkla vibrokompaksiyon veya vibroflotasyon yöntemleri ile sıkılaştırılabilir.İstenen işlem derinliğine içi boş bir titreşim sondası yerleştirilir ve sonda genellikle su veya hava jetleri ile üretilen titreşim ile çalıştırılır. Sonda yüzeye doğru çıkartılırken granüler geri dolgu maddesi eklenir ve titreşimle granüler

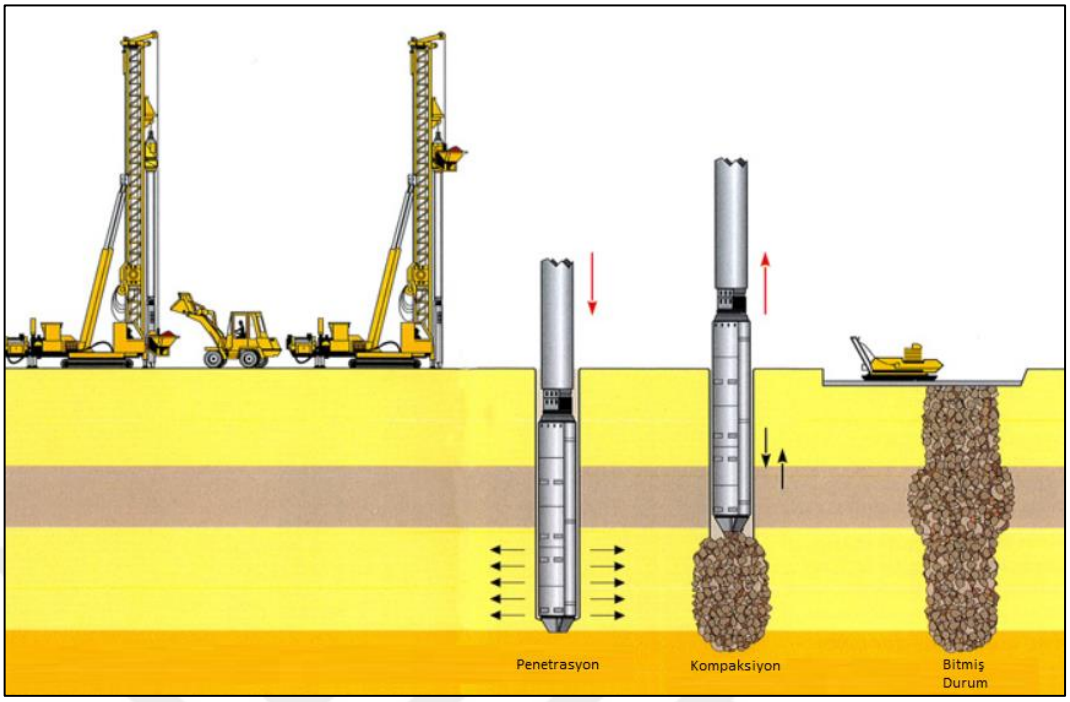
malzeme sıkıştırılarak yerinde sıkıştırılmış dolgu sütunu bırakılır. Sonda, etkili sıkıştırma için genellikle 1 ila 3 m aralıklarla yerleştirilmelidir. Vibrokompaksiyonun dikkate alınması gereken tane büyüklüğü aralıkları Şekil 2.14'da gösterilmiştir. Vibrokompaksiyon en fazla yüzde %20'den az ince tane içeren suya doygun kumlarda etkilidir. Bu tür zeminler için, sıkıştırma rutin olarak 15 m derinliklerde kullanılmasına rağmen ve bazı durumlarda 30 m'ye yaklaşan derinliklere kadar kullanılabilmektedir. ([22], [24], [25]).



Şekil 2.14: Vibro-kompaksiyon için uygun tane büyüklüğü aralıkları.

Taş Sütunlar

Yumuşak ince-taneli katmanları güçlendirmek için taş sütunlar kullanılır. Kohezyonsuz zeminlerin vibrokompaksiyonu için kullanılana benzer bir ekipman, daha sonra titreşimle sıkıştırılan taşla doldurulacak silindirik bir delik oluşturmak için kullanılır. Çok yumuşaktan sert zeminlere kadar, foraj genellikle yer değiştirmesiz derin karıştırma yöntemleri ile oluşturulurken, yer değiştirme yöntemleri daha rijit zeminlerde yaygın olarak kullanılır. [24]. Taş kolonlar, kendilerini çevreleyen yumuşak zemine göre önemli ölçüde rijit ve mukavemetli olan düşey bir sütun (tipik olarak 2, 0.6, 0.9 m çapta) olarak teşkil edilir. Taş kolonlar temel altı kazık gibi işlev görür.

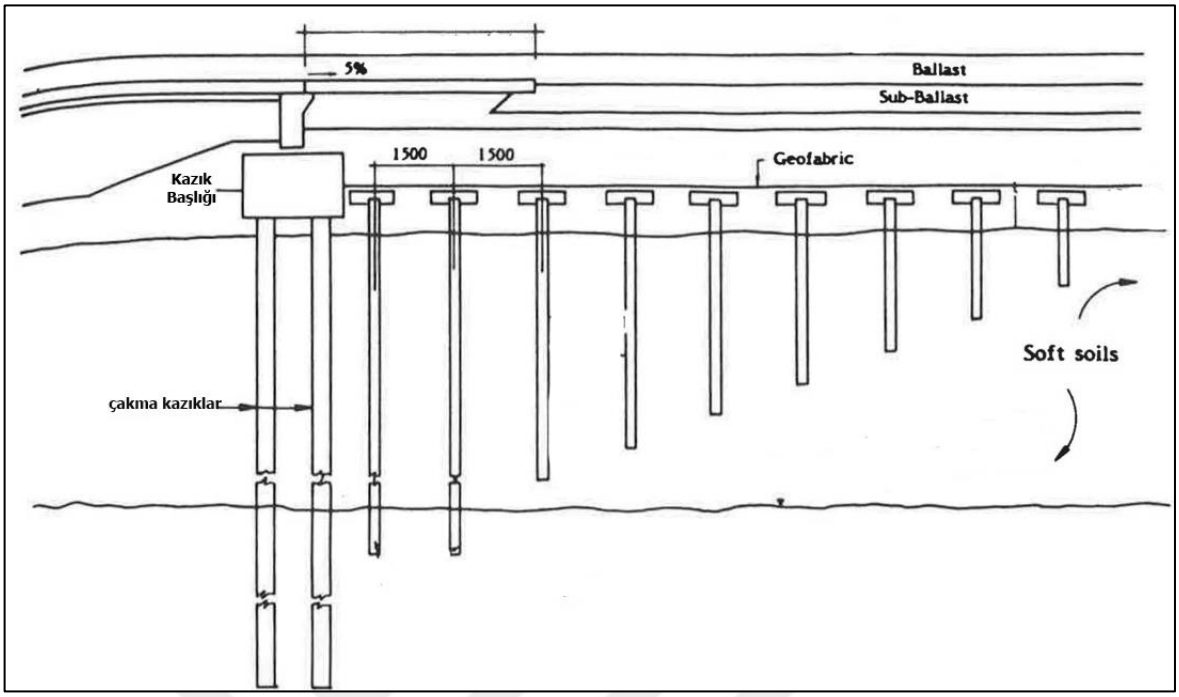


Şekil 2.15: Taş Sütün uygulaması şematik görünümü.

Bu uygulama, bazı durumlarda köprü ayaklarını, mekanik olarak stabilize edilmiş duvarları desteklemek için kullanılmaktadır. Karayolu uygulamaları için taş sütunların tasarımı ve yapımına ilişkin detaylar Barksdale ve Bachus [26] tarafından sunulmaktadır.

2.1.3.3. Dolgu Kazıkları (Sürtünme Kazıkları)

Dolgu yüklerini yumuşak kil katmanlarına yanal sürtünmeye bağlı olarak taşıtmak amacıyla sıklıkla kullanılan ancak benzerlerine göre pahalı olan bir yöntemdir. Küçük çaplı çakma ahşap yada yerinde dökme mikro kazıklar en yaygın olarak kullanım tipleridir; ancak prekast beton kazıklar da, özellikle uygulanan yükler nispeten büyük durumlarda olduğunda kullanılır. Dolgu yükü, yüzeysel sürtünme ile ya da grup kazıkları için geniş kazık başlığı ile doğrudan kazığa aktarılabilir. Yaklaşım dolgu oturmasının azaltılması, dolgu kazıklarının özel bir uygulaması olarak gösterilmektedir [27]. Köprü ayakları ile yaklaşım döşemesi arasında yaklaşım döşemesine doğru kazık boyları azaltılarak, köprü ayağından kazıklarla desteklenmeyen yol dolgusuna doğru kademeli bir geçiş sağlanır (bkz. Şekil 2.16). Tasarım önerileri Brom ve Wong'da [27] bulunabilir.



Şekil 2.16: Köprü yaklaşımı için dolgu kazıkları. [27]

2.2. YAKLAŞIM DOLGULARININ TASARIMI

2.2.1. Yaklaşım Dolgusu Çeşitleri

Yaklaşım dolgu çeşitleri kısaca geleneksel yaklaşım dolguları, hafif dolgular ve mekanik olarak stabilize edilen dolgular olarak gruplanabilir. Her dolgu çeşidine ait değerlendirmeler ileriki bölümlerde verilecektir.

2.2.1.1. Geleneksel Yaklaşım Dolguları

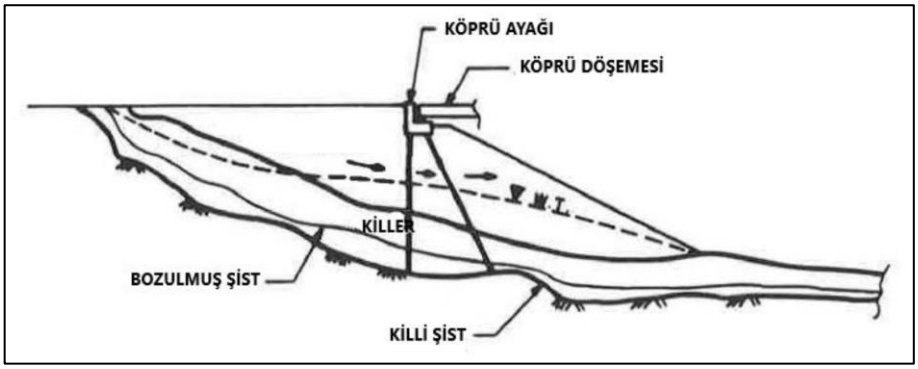
Çoğu köprü yaklaşımı dolguları geleneksel silindir ile sıkıştırma yapılarak sıkı ve rijit katmalar oluşturulmasıyla dolgu oluşturma prosedürleri ile inşa edilir. Yarma kazılarından veya sahaya yakın uygun bir depo alanından alınan dolgu malzemeleri, dolgu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, köprü ayağında görece az bir oturma tolere edilebileceğinden, özellikle köprü ayağının temeli altında ya da yakın bölgelerinde kullanılacak materyallerin rijitlik, mukavemet ve kompaksiyon gereksinimlerini belirlenmesi önemli bir husustur. Yaklaşım dolgusu, zemin tipine ve kompaksiyon ekipmanına bağlı olarak genellikle 0.15 ila 0.6 m serim kalınlıkları arasında sıkıştırılır. Daha kalın serimler sadece temiz granüler dolguların titreşimli kompaksiyonu için kullanılmalıdır ancak pratik göstermiştir ki bu tür zeminlerde bile, köprü ayağına yakın kesimlerde ince serimler tercih edilmelidir. Çoğu

karayolları ajansı dolgu için AASHTO T 99 Kompaksiyon Testinde elde edilen maksimum kuru yoğunluğun yüzde 90 ile 95 olmasını ve hatta köprü yaklaşımları için yüzde 95 ila 100 olmasını şart koşmaktadır. Daha ağır ve titreşimli silindirlerin kullanımı sıklıkla daha az sayıda serim adedi veya daha kalın serim tabaka kalınlığı ile gerekli sıkıştırmayı elde etmeyi mümkün kılmaktadır.

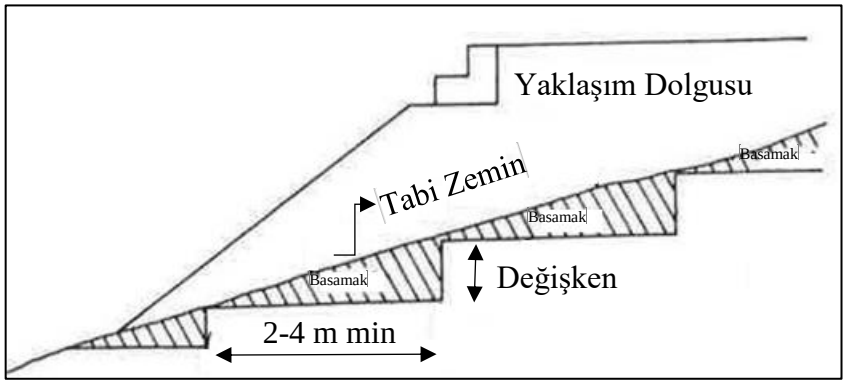
Mevcut yoğunluk gerekliliklerine göre sıkıştırıldığında, genellikle ihmal edilebilir bir oturma düzeyine sahip stabil bir dolgu üretilir. Daha yüksek kaliteli malzemeler, dolgu yüklerinin en yüksek olduğu dolgunun tabanına yakın yerleştirilir. Daha düşük kaliteli malzemeler, dolgunun üst kısımlarına yerleştirilir ve yol kaplama alt tabakası olacak şekilde kullanılır.

Şişme potansiyeli olan geri dolgular mutlaka kullanılmak zorunda ise genellikle, aşırı düşey gerilmenin şişmeye eğilimlerini kısıtladığı, dolgunun dibine yakın kesimlere yerleştirilmelidir. Özellikle yüksek dolgular için, yaklaşım dolgularında sıkıştırılabilir kohezyonlu malzemeler kullanılması zorunlu olduğunda, dolgu performansının dikkatle değerlendirilmesi için konsolidasyon testleri ve oturma analizleri yapılmalıdır. Köprü ayağı ve üst yapı tamamlanmadan önce bekleme süreleri gerekebilir.

Yaklaşım dolgusunun eğimli bir temel üzerine inşa edilmesi durumunda, dolgunun Şekil 2.17’de [7] olduğu gibi eğimli zemin yüzeyinden aşağı doğru kayma eğilimi olabilir. Temel toprağı nispeten geçirimsiz ise, kayma dolgu tabanı boyunca suyun birikmesinden dolayı gelişebilir. Bu gibi durumlarda, temel zemini Şekil 2.18'da gösterildiği gibi, basamaklanmalıdır. İnşaat ekipmanlarının çalışma payı da düşünülerek basamaklar en az 2,4 m genişlikte olmalıdır. Ayrıca, dolguda fazla suyun birikmesini önlemek için granül dolgulu ve delikli boru, basamaklar boyunca yerleştirilmelidir.



Şekil 2.17: Yanal hareketlerin meydana gelebileceği yaklaşım dolgusunun tipik kesiti.



Şekil 2.18: Doğal zeminin basamaklanması. [28]

2.2.1.2. Hafif Dolgular

Hafif dolgu, genellikle yumuşak, oturma potansiyeli yüksek temel zeminleri üzerine oturan dolgunun ağırlığını azaltmak için kullanılır. Azaltılmış dolgu yükü stabiliteyi arttırır ve temel zemininin oturmasını azaltır. Bununla birlikte, hafif dolgu yüksek mukavemet, rijitlik ve düşük sıkıştırılabilirliğe sahip olmadır. Harden [29], hafif dolguda bulunması gereken şartlar için:

- 1000 kg/m3'den az kütle birim hacim ağırlığına sahip olmalıdır
- yüksek elastisite modülü ve yüksek iç sürtünme açısına sahip olmalıdır
- balastlanma ve kimyasal bozulmaya karşı iyi stabilite ve dirence sahip olmalıdır
- Donmaya karşı dirençli olmalıdır.
- Betonarme elemanları için zararlı etkilere sahip olmamalıdır
- Çevre duyarlılığına uygun olmalıdır.

Kullanılabilirlik ve maliyet dikkate alınması gereken diğer faktörlerdir.

Dolgular için kullanılmış olan materyallerin bir listesi, Harden [29]'den modifiye edilmiş olan Tablo 2.2'de verilmiştir. Düşük yoğunluklu hafif beton veya bloklar halinde üretilen genişletilmiş EPS polistiren çok mukavemetli ve hafif malzemeler olmasına karşın maliyet açısından proje öncelikleri göz önünde bulundurularak fayda getirileri incelenmelidir.

Tablo 2.2: Hafif Dolgu Materyalleri. [29]

Materyal	Yaklaşık Birim Ağırlık (kN/m3)	Yorumlar
Ağaç kabuğu (çam ve köknar)	8 - 10	Atık malzeme, sıkıştırılması zor olduğundan nispeten nadiren kullanılır. Yeraltı sularını kirleten kabuktan sızan su riski, başlangıçta su içinde depolanan materyal kullanılarak azaltılabilir veya ortadan kaldırılabilir ve daha sonra aylarca hava ile kurutulabilir. Sıkıştırıldığında gevşek hacim oranının yüzde 50'si kadardır. Kabuk dolgusunun uzun süreli oturması, sıkıştırılmış kalınlığın yüzde 10'una kadar çıkabilir.
Talaş (çam ve köknar)	8 - 10	Normalde kalıcı yeraltı su seviyesinin altında kullanılan, ancak asfalt veya plastik örtü ile kapatılan yan eğimlere sahip olan dolgular için zaman zaman kullanılmış olan atık malzeme.
Turba Hava ile kurutulmuş; öğütülmüş Bahçe balyası Sıkıştırılmış balya	 3 - 5 2 8 - 10	İrlanda'da mevcut yolları onarmak için çakıl dolguları turba balya ile değiştirmenin özellikle yararlı olduğu ispatlanmıştır.
Yakıt külü, mıcır, cüruf vb.	10 - 14	Toz haline getirilmiş yakıt külü gibi atık maddeler genellikle maksimum taşma seviyesinin en az 0,3 m (1 ft) üzerine yerleştirilir. Bu tür malzemeler, zaman içinde güvenlik faktöründe önemli bir artışa neden olan çimentolama özelliklerine sahip olabilir. Bazı durumlarda, ör. fırın cürufu, materyaller zamanla suyu emer ve yoğunlukta bir artışa neden olur.
Hurda gözenekli beton	10	Malzeme sıkıştırıldığında önemli hacim düşüşü oluşur. Aşırı sıkıştırma, malzemeyi toz haline getiri.
Düşük yoğunluklu gözenekli beton	6	Bu, Portland çimentosu, su ve "Elastlzell" ve "Geocell" ticari isimleriyle bilinen bir köpüren ajandan üretilen, yeni bir deneysel hafif dolgu malzemesidir. Materyal yerinde dökülür.
Genişletilmiş kil veya şist (hafif agrega)	3 - 10	Farklı üretim işlemleriyle bazı çeşitlilikler üretilebilir ise de, bu malzemenin yoğunluk, direnç ve sıkıştırılabilirlik gibi fiziksel özellikleri, genellikle hafif bir dolgu olarak kullanım için çok iyidir. Malzeme nispeten pahalıdır, ancak yüksek standart yollar oluşturmak için diğer tekniklere kıyasla ekonomik olabilir. Genişletilmiş kilin üzerindeki yol kaplaması kalınlığı genellikle 0,6 m (2ft) mertebesindedir.
Genişletilmiş polistiren	0.2 - 1	Bu şimdiye kadar sadece Amerika Birleşik Devletleri ve Norveç'te kullanılan ancak performansının çok tatmin edici olduğu kanıtlandığı ve kullanımının arttığı süper hafif bir malzemedir. Norveç'te malzeme bloklarda kullanılır. Kaplamanın kalınlığı, trafik yükleme koşullarına bağlı olarak 0,5 ile 1 m arasında değişmektedir. Kaplamayla birlikte, deformasyonu azaltmak ve yağa vb karşı koruma sağlamak için doğrudan polistiren üzerine dökülen betonarme bir levhadır. Malzeme çok pahalıdır, ancak çok düşük yoğunluk, özel durumlarda ekonomik hale getirebilir.

2.2.1.3. Geleneksel Yaklaşım Dolguları ve Hafif Dolgular İçin Tasarım Konuları

Geleneksel zemin dolgularının analizi ve tasarımı, stabilite ve oturmanın dikkate alınmasını içerir. Yan şev eğimleri, genellikle uygun bir güvenlik faktörü aralığı olan 1.25 ila 1.3 sağlamak şekilde seçilmelidir. Stabilite hesaplamaları, bölüm 2.1.2.2'de tarif edilen klasik limit denge ya da mukavemetin azaltılması ile kontrol edilen sonlu elemanlar/farklar yöntemleri ile yapılmalıdır. Genellikle iki yöntemin karşılaştırılması önerilmektedir.

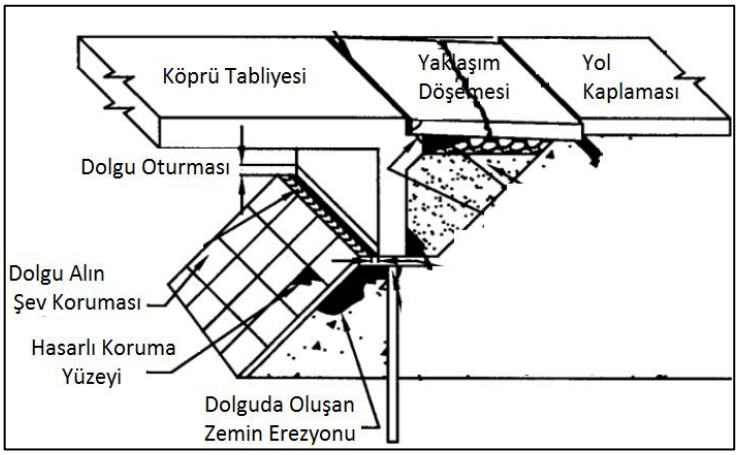
Dolgunun sıkıştırılması, Bölüm 2.1.2.1'de tartışılan oturma analizi klasik çözüm yöntemleri ile de hesaplanmalıdır. Bu durumda, dolgunun sıkıştırılması, dolgu yüzeyinin öngörülen

oturmasını elde etmek üzere temel zemininin sıkıştırılmasına eklenmelidir. Uygun malzemelerin sıkıştırılması ve kompaksiyonu ile elde edilen kil zeminlere oturan mühendislik dolgularında oturma probleminin oluşması beklenmez veya küçük mertebelerde kalmaktadır. Öncelikli tasarım endişesi kil birimlerin zamana bağlı konsolidasyon oturmasıyla köprü ayak temellerinin farklı oturmasına neden olmasının kısıtlanması olmalıdır.

Dolgu şevlerinin erozyon ve drenaj koşulları için alınacak önlemler ikincil tasarım önlemleri olarak göze alınmalıdır. Direkt olarak oturma veya stabiliteye etkileri olmasa da zamanla drene olamayan suyun yaratacağı ek yüklerin veya erozyona bağlı kayıpların stabilite ve oturmaya etkisi azımsanamayacak kadar yüksektir.

2.2.1.4. Dolgu Alın Şevi Eğiminin Korunması

Bir köprü yapısının altındaki dolgu alın şevi eğimi, özellikle erozyona ve hasara karşı hassastır. Akarsu geçişlerinde, akan su ile erozyona maruz kalmaktadır. Diğer yerlerde, dolgu alın şevi eğimi köprünün ve yolun drenajı ile tahrip olabilir. Ek olarak, köprü yapısının altında güneşten faydalanılamadığından bitki örtüsü muhafaza etmek çoğu zaman zordur. Sonuç olarak, dolgu alın şevi eğimi için erozyona dayanıklı bir yüzey teşkil etmek gereklidir.



Şekil 2.19: Köprüde alın şevi korumasının zarar görmesi ile oluşabilecek hasarlar.

Dolgu alın şevi eğimi korumasında yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında beton döşemeler ve yol kaplama blokları, çakıl, riprap ve ağır taş kalkanı bulunur. Yol kaplama blokları ve riprap, harç ile doldurulmuş veya doldurulmamış olabilir. Çoğu durumda, bu materyallerin tümü, dolgu alın şevi eğiminin tatmin edici bir şekilde korunmasını sağlar. Dolgu alın şevi eğimindeki ana hasarın nedeninin, yapıdan gelen yoğun miktarlarda su akışı veya

dolgudan çıkan sızıntı akışının olduğunu göstermektedir. Şekil 2.19'da alın şevinde oluşabilecek tipik bir hasar tariflenmiştir. Yolların kışın tuzlanmasından kaynaklanan tuzlu su akışı, püskürtme beton uygulaması ile muhafaza edilen dolgu alın şevi eğiminin bozulmasını hızlandırabilir. Bu nedenle, köprü yaklaşımı için drenaj önlemlerinin, dolgu alın şevi eğimindeki su akışını en aza indirecek şekilde tasarlanması esastır.

2.2.2. Mekanik Olarak Stabilize Edilmiş Dolgular

2.2.2.1. Stabilize Yöntemleri

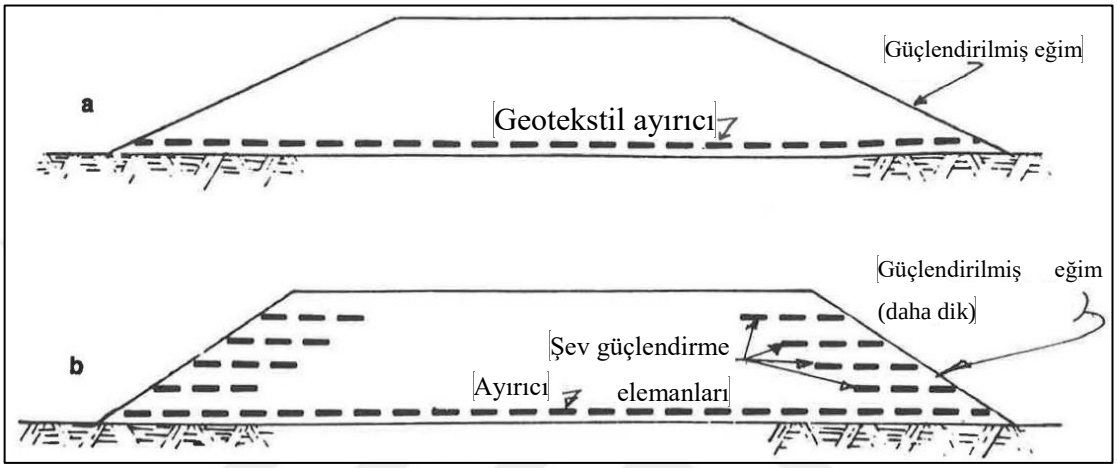
Zemin dolgularının güçlendirilmesi, önemli geoteknik tasarım ve inşat gelişmelerinden biridir. Geçmiş uygulamalarda dolgu stabilizesini sağlamak amacıyla şerit metallerin dolgu içine teşkili ile dolgunun kayma dayanımına takviye olacak şekilde kullanılmıştır. Günümüzde ise, geoteknik uygulamalar için özel olarak "geosentetik" adı verilen çok çeşitli sentetik polimer ürünleri geliştirilmiştir. Tablo 2.3, başlıca geosentetik türlerini ve bu ürünlerin hangi fonksiyona yönelik geliştirildiği listelemektedir. Dolgulardaki güçlendirmelerin tipik kullanımı Şekil 2.20'te gösterilmiştir. Şekil 2.20a'da, dolgunun alt kısmında tek bir güçlendirme tabakası gösterilmiştir. Bu durumda, tipik olarak, yumuşak temel zeminlerinden dolguyu ayırmak için ara yüz boyunca serbest drenaja izin verecek şekilde bir geotekstil tabakası kullanılır. Geotekstilin gerilme direnci ayrıca dolgu ve temel toprağı boyunca toptan kaymaya karşı güvenliği artırır. Toptan kaymaya karşı stabilite, güçlendirmenin birincil fonksiyonu ise, o zaman geogridler veya çelik hasır da kullanılabilir.

Tablo 2.3: Geosentetik tipleri ve fonksiyonları.

Tip	Fonksiyon
Geogridler	Güçlendirme
Geotekstiller	Güçlendirme
	Ayırma
	Filtreleme
	Drenaj
Geokompozitler, Geonetler	Drenaj
Geomembranlar	İzolasyon

Şekil 2.20b'de, geotekstil elemanların şevlerin stabilizesini sağlamak amacıyla kullanımı gösterilmiştir. Bu güçlendirme ile daha yüksek yatay gerilmelere dayanım arttırılarak şevin

stabilitesini arttırılmış olunur, böylece daha dik tasarımlı şevlerin kullanılmasına olanak sağlanır. Güçlendirme maliyeti, kazı azaltılmasıyla ve istimlak sınırı gereklilikleri ile dengelenir. Bu son faktör, kentsel alanlarda, özellikle mevcut köprü yaklaşımları için genişleme ve iyileştirme projeleri için önemlidir. Günümüzde çok çeşitli güçlendirme sistemleri mevcuttur.



Şekil 2.20: Güçlendirilmiş dolgunun şematik diyagramı.

Genel olarak, aşağıdaki seçenekler mevcuttur:

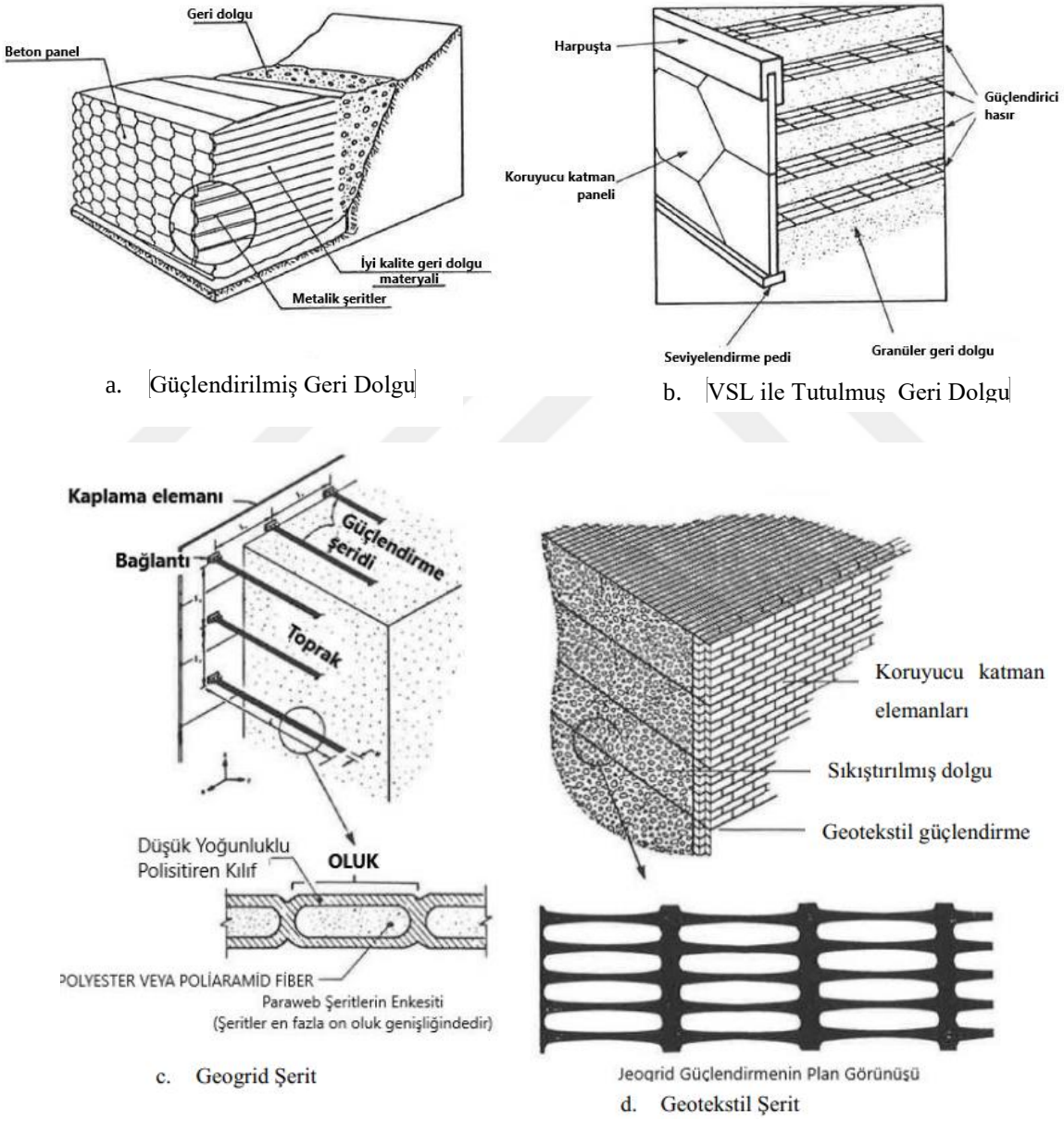
- Metal veya plastik şeritler
- Metal veya plastik dikdörtgen ızgaralar
- Kesintisiz geotekstil tabakaları

Şeritler kullanılarak tabaka güçlendirilmesi, teorik olarak güçlendirme elemanı ile zemin arasında sürtünmeye dayalı yük aktarımı esasına dayanır. Yeterli sürtünme direncini sağlamak için iyi dereceli granüler dolgu gereklidir. Izgara güçlendirme sistemleri için, yük aktarımı, ızgaranın enine olan elemanlarına karşı pasif zemin basıncı ve zemin ile ızgara arasındaki yatay yüzeyler arasında sürtünme ile sağlanmaktadır.

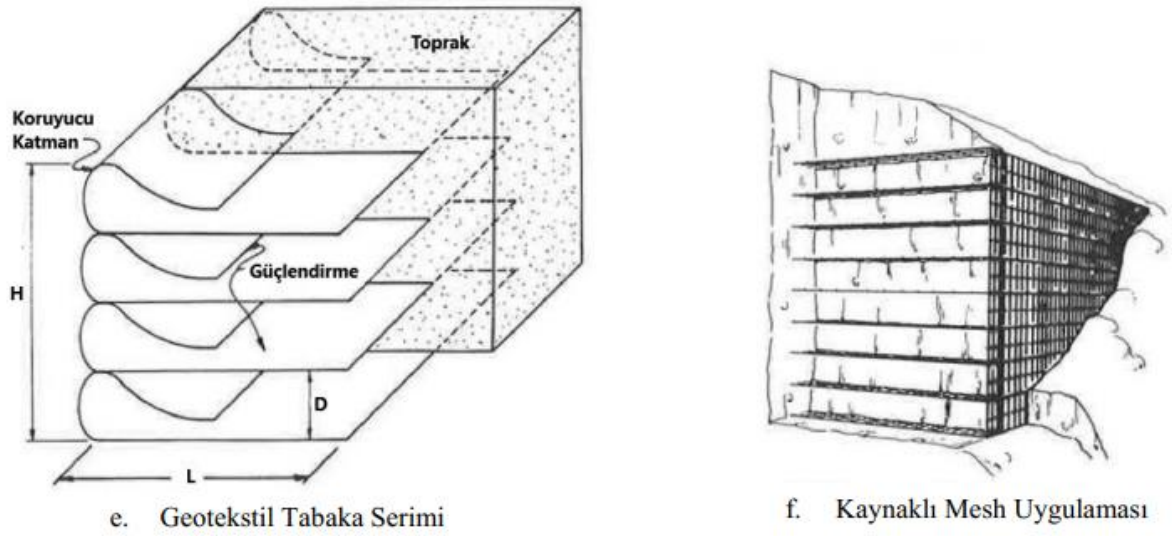
Güçlendirme elemanlarında eksenel deformasyon modülü kapasite sığasının yüksek olması kullanılan malzeme miktarı ile direkt ilişkilidir ve ekonomi adına tercih sebebi olabilmektedir. Çelik ve polimer geogridler zemine göre rijit olduğundan düşük kayma gerilme düzeylerinde dahi mobilize olabilmektedir. Diğer yandan, geotekstiler çok sünektir ve kayma gerilme direncinin harekete geçirilmesi için büyük deformasyonlar gerektirir. Bununla birlikte, geotekstilin sünekliği, daha kırılgan malzemelerin aşırı kayma gerilmesi düzeylerinde ortaya

çıkması daha olası olan felakete yol açan stabilite göçmelerine karşı güvenlik sağlar. Her iki güçlendirme türü de çoğu ulaşım acentesi tarafından kullanılmaktadır.

Koruyucu kaplama katmanı elemanları, duvar yüzüne yerleştirilir. Prekast beton paneller, prefabrik metal plakalar, kaynaklı tel örgü ve püskürtme betonlar da dahil olmak üzere birçok koruyucu katman elemanı mevcuttur. Birkaç duvar sisteminin örnekleri Şekil 2.21'de gösterilmiştir.



Şekil 2.21: Mekanik olarak stabilize edilmiş duvar örnekleri.

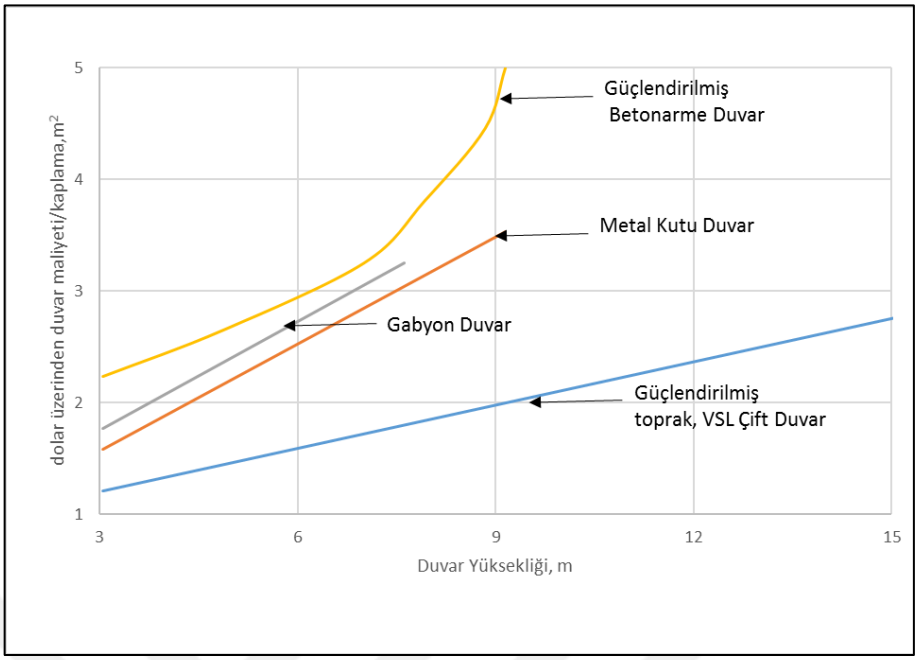


e. Geotekstil Tabaka Serimi

f. Kaynaklı Mesh Uygulaması

Şekil 2.21 (devam): Mekanik olarak stabilize edilmiş duvar örnekleri.

Mekanik olarak stabilize edilmiş duvarlar, geleneksel şevli sistemlere ve betonarme istinat duvarlarına göre birçok potansiyel avantaj sunmaktadır. Özellikle sınırlı alanlarda ani kot farkları olan durumlarda veya zor erişime sahip alanlarda etkilidirler. Koruyucu kaplama katmanı, iç güçlendirme ile desteklendiği için, minimal bir temel alanı gereksinimi vardır. Zemin duvarı sistemi geleneksel bir betonarme duvardan daha esnektir ve bu nedenle daha büyük diferansiyel deformasyonları tolere edebilir. Bununla birlikte, duvar boyunca oturmadaki beklenmedik farklılıklar, koruyucu katman elemanlarına ve bağlantılara zarar verebilir. Koruyucu katman, estetik mimari kaygılara binaen seçilebilir. İnşaat prosedürleri basit ve hızlıdır ve sınırlı bir çalışma alanı içerisinde gerçekleştirilebilir. Bu faktörlerin kombinasyonu genellikle mekanik olarak stabilize edilmiş duvarı en ekonomik alternatif yapar. Mitchell ve Villet [30], mekanik stabilize duvarın maliyet etkinliğinin duvar yüksekliği ile arttığını ileri sürmektedir. Christopher ve diğ. [31], geleneksel betonarme duvarlar yerine mekanik olarak stabilize duvarların kullanılmasının 3 ila 4.5 m 'den yüksek duvar yükseklikleri için yüzde 25 ila 50 oranında tasarruf sağlayabileceğini öne sürmektedir. Mekanik olarak stabilize edilmiş duvarın kullanılması, derin bir temel ihtiyacını ortadan kaldırdığından, daha büyük tasarruflar sağlanabilir. Çeşitli duvar tipleri için bazı karşılaştırmalı maliyetler Şekil 2.22'te gösterilmiştir.



Şekil 2.22: Dört farklı duvar tipi için maliyet karşılaştırması. [30]

2.2.2.2. Mekanik Olarak Stabilize Edilmiş Dolguların Tasarım Konuları

Güçlendirilmiş dolguların ve mekanik olarak stabilize edilmiş duvarların tasarımı, hem iç hem de dış stabiliteyi dikkate almalıdır. İç stabilite, zemin ve güçlendirme elemanları arasındaki yük transferinin gelişimini ve güçlendirmenin elemanlarının gerekli büyüklüğünün ve aralığının belirlenmesini dikkate alır. Duvarlar için, güçlendirme elemanlarının gerekli çekme kapasitesi belirlenmelidir. Etkin iç yük transferini sağlamak için iyi dereceli temiz daneli dolgu kullanılması esastır. Mekanik olarak stabilize edilmiş dolgular için mevcut FHWA esasları, dolguların maksimum 6 plastisite indisine (PI) ve %75 sıkıştırma (No. 200) elek boyutundan geçen en fazla yüzde 15 ince malzeme içeren daneli malzeme ihtivasını gerektirir. İzin verilen maksimum parçacık boyutu metalik güçlendirme için 100 mm ve geosentetik elemanlar için 19 mm'dir [31]. Dış stabilitenin değerlendirilmesi kavramsal olarak geleneksel şevler ve istinat duvarlarının analizlerine benzer. Sınır denge koşullarında önceden tanımlı göçme yüzeylerinin stabilitesi araştırılmakta ve çeşitli potansiyel göçme türleri incelenmektedir. Güçlendirilmiş şevler için, potansiyel kayma yüzeylerinin güvenlik faktörleri analiz edilir ve potansiyel göçme yüzeyinden geçen herhangi bir güçlendirme elemanının direnci analize dahil edilir. Duvarlar için, yanal kayma, aşırı dönme ve temel taşıma göçmesine karşı güvenlik faktörleri göz önünde bulundurulur. Ayrıca, güçlendirilmiş bölgeyle kesişmeyen genel bir göçme kaması da dikkate alınmalıdır. Hemen hemen tüm mekanik güçlendirme sistemleri patentlidir ve her sisteme özgü

tasarım varsayımları farklılık gösterir. Çeşitli tipteki güçlendirilmiş dolguların ve duvarların analiz ve tasarım detayları, birçok tasarım örneğini içeren NCHRP Raporunda [30] bulunabilir.

Mekanik olarak stabilize edilmiş bir köprü yaklaşımının analizi ve tasarımı, aynı zamanda, dolgunun potansiyel oturmasını da dikkate almalıdır. Oturmayı öngörmek için kullanılan yöntemler, temel olarak, geleneksel güçlendirilmemiş dolgularla aynıdır. Güçlendirme, dolgu-köprü ayağı sisteminin toplam ağırlığının önemli ölçüde azaltılmasına izin vermedikçe, güçlendirme sistemlerinin oturma üzerinde çok az etkisi vardır.

2.3. KÖPRÜ KENAR AYAKLARI TASARIMI

Köprü ayakları, köprü üst yapısından gelen ölü ve canlı yükleri destekler ve aynı zamanda yaklaşım dolgusunun yanal toprak basınçlarına maruz kalır. Birçok köprü ayağı tipi yaygın olarak kullanılır ve tasarım yükleri, kullanılan köprü ayağı tipine ve yapım sıralamasına bağlıdır.

2.3.1. Kenar ayak tipleri

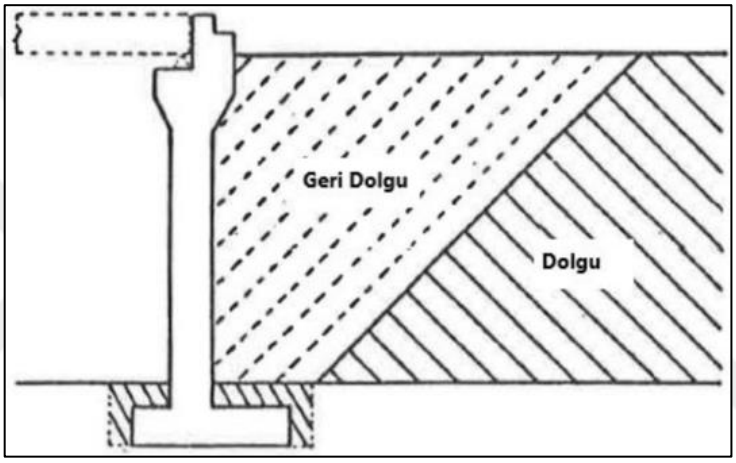
Konvansiyonel köprü ayakları, üstyapıya, köprü ayağı ile döşeme arasındaki nispi harekete izin veren genleşme derzine sahip elemanlar aracılığıyla destek sağlar. Genleşme derzi, döşemedeki termal gerilimleri ve köprü ayağının potansiyel yanal hareketlerini sönümler. Konsol, kısa konsol ve payandalı köprü kenar ayakları birçok yerde kullanılmaktadır ve son yıllarda bu yapılar önemli ölçüde değişmemiştir.

2.3.1.1. Konsol Köprü Kenar Ayağı

Konsol köprü kenar ayağı, her iki tarafında yaklaşım dolgusunun tüm yüksekliğini koruyan (Şekil 2.23) kanat duvarlarının bulunduğu, konsol olarak çalışan bir duvardır. Bu tip bir köprü kenar ayağı, köprü için gerekli mesnet açıklık uzunluğunu en aza indirir. Ancak, özellikle yumuşak temeller üzerindeki dolgular veya yüksek yaklaşım dolguları için bazı önemli dezavantajları vardır. Köprü kenar ayağı dolgunun önünde yapılmalıdır. Köprü ayağı ve kanat duvarları arasındaki kısıtlı alanda geri dolgu yapılması ve geri dolgunun sıkıştırılması zordur. Dolguyu sıkıştırmak için ağır ekipman kullanılıyorsa, duvar yanal olarak kayabilir ya da düşey açısal dönmeye maruz kalabilir. Ayrıca yapılacak dolgunun ağırlığı, yumuşak temel zeminin

konsolidasyon oturmasına neden olabilecek ve dolgu ile köprü kenar ayağının inşat sonrasında oturmasına katkıda bulunabilecektir.

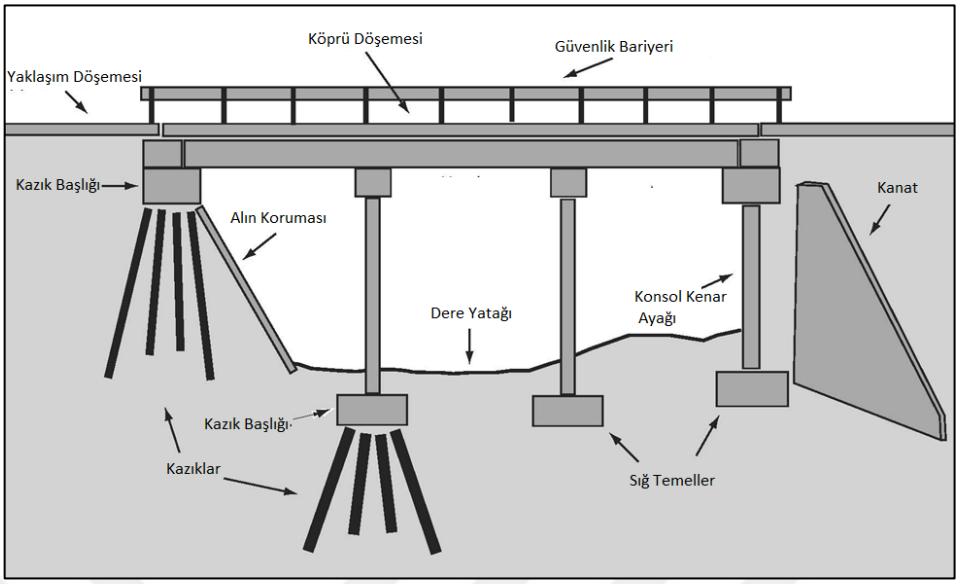
Konsol köprü kenar ayakları, yaklaşım dolgusunun yüksekliğince uyguladığı yanal toprak basınçlarını belirli bir güvenlikle karşılayacak şekilde tasarlanmalıdır. Geleneksel olarak yanal basınçlar, Rankine toprak basınç teorisi veya eşdeğer hidrostaik basınçların hesaplanması ile elde edilir. Konsol kenar ayağı temel seviyesinde etkiyen ilgili yanal kuvvet ve aşırı dönme momenti, sırasıyla, duvar yüksekliğinin karesi ve küpü ile orantılı olduğundan, duvarın yapısal tasarım gereksinimleri ve maliyeti, yükseklik ile mislince artar.



Şekil 2.23: Tipik konsol köprü kenar ayağı.

2.3.1.2. Kısa Konsol ve ya Derin Temelli Köprü Kenar Ayağı

Kısa konsol ve ya derin temelli köprü kenar ayağı, dolgunun tamamlanmasından sonra inşa edilen nispeten kısa bir köprü kenar ayağıdır. Dolgu, köprü ayağı ile desteklenmeksizin inşa edilir ve eğer gerekli olursa, köprü kenar ayağı inşatı, dolgu yüklerinin neden olduğu oturmalar tamamlanıncaya kadar ertelenebilir. Böylece, inşat sonrası oturmalar minimize edilebilir. Köprü kenar ayağı, dolguda sığ temeller üzerinde veya çakma kazıklarla ya da dolgu boyunca inşa edilmiş yerinde dökme kazıklarla, Şekil 2.24'de gösterildiği gibi desteklenebilir. Kısa konsol köprü kenar ayağı nispeten kısa olduğundan ve dolgunun üst kısmında yer aldığından, yanal toprak basıncı konsol kenar ayaklarına kıyasla, yanal gerilme bakımından daha azdır.

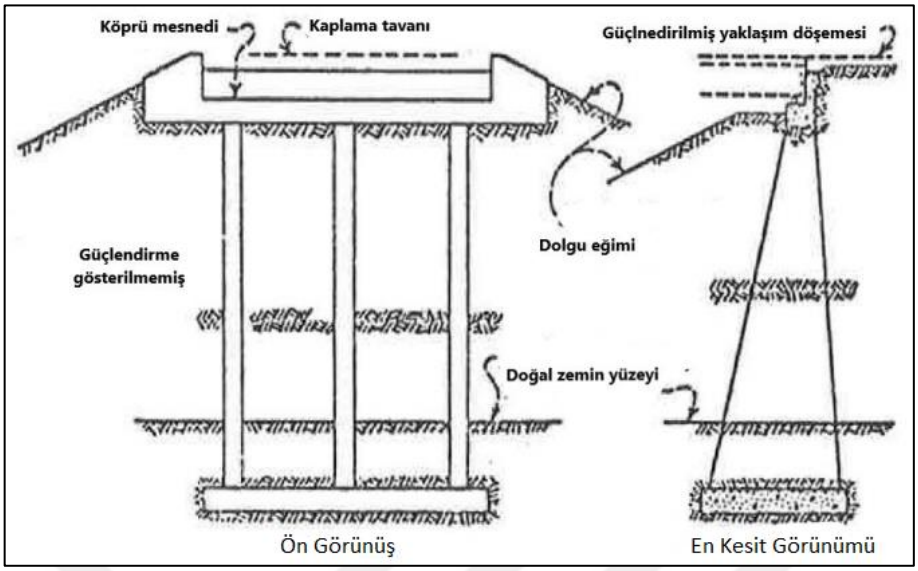


Şekil 2.24: Kısa konsol ve kazıklı köprü kenar ayağı şematik gösterimi.

2.3.1.3. Payandalı Köprü Kenar Ayağı

Payandalı köprü kenar ayağı, konsol köprü kenar ayağına benzer, konsolun belirli aralıklarla payandalarca desteklendiği kenar ayak tipidir. Payandalar arası zemin yüzeyi serbest olduğundan payandalarca desteklenmez. Konsol köprü kenar ayaklarında olduğu gibi, bu tip kenar ayakları yaklaşım dolgusundan önce yapılmalıdır. Dolgu, dengesiz zemin basıncını ve köprü ayağının yanal hareketini ve açısal dönmesini en aza indirmek için payandaların her iki tarafına aynı anda yerleştirilir.

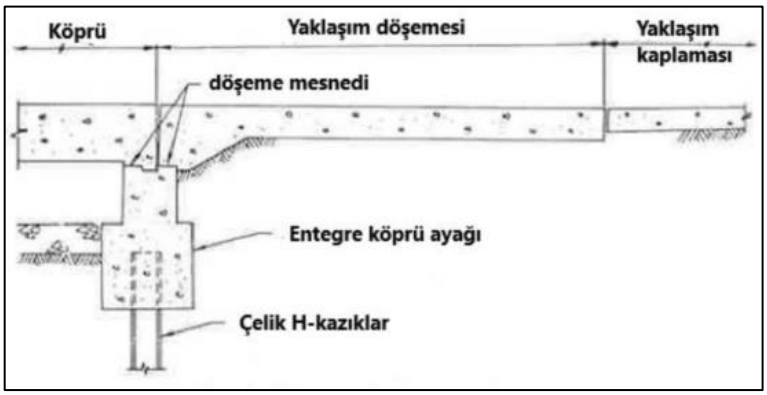
Bununla birlikte, payandaların aralarındaki dolguların düzgün bir şekilde sıkıştırılması çok zordur. Dolgu alın şevi, kaplama, riprap vb. malzemeler ile korunmadığı sürece, erozyona karşı da çok hassastır. Payandalı köprü kenar ayağında payandalar arası boşluklarından ötürü yanal toprak basınçları, konsol köprü kenar ayağına göre daha az, kısa konsol köprü kenar ayağına göre daha büyüktür. Köprü ayağının inşatından sonra yerleştirilen dolgunun ağırlığı, yumuşak temel zeminin konsolidasyon oturmasına neden olacak ve dolgu ile köprü kenar ayağının inşat sonrasında oturmasına katkıda bulunacaktır.



Şekil 2.25: Tipik payandalı köprü kenar ayağı görünümü.

2.3.2. Entegre Köprü Kenar Ayağı

Entegre köprü kenar ayağı, genleşme derzleri olmayan üst yapıya rijit şekilde bağlı olan kısa konsol köprü kenar ayaklarıdır. Bağlantı, termal gerilmelerin köprü döşemesinden köprü ayağına tam olarak aktarılması için tasarlanmıştır. Döşeme için hareketli mesnet ile genleşme derzlerinin ortadan kaldırılmasının inşat ve bakım maliyetlerini düşürdüğü bilinmektedir. Farklı ulaşım ajansları tarafından çeşitli tasarımlar kullanılmaktadır, ancak hemen hemen hepsi, entegre köprü ayaklarının desteklenmesi için ayak altında kazıkları gerektirir. Tipik bir entegre köprü kenar ayağı detayı, Şekil 2.26'de gösterilmiştir.



Şekil 2.26: Tipik entgre köprü kenar ayağı.

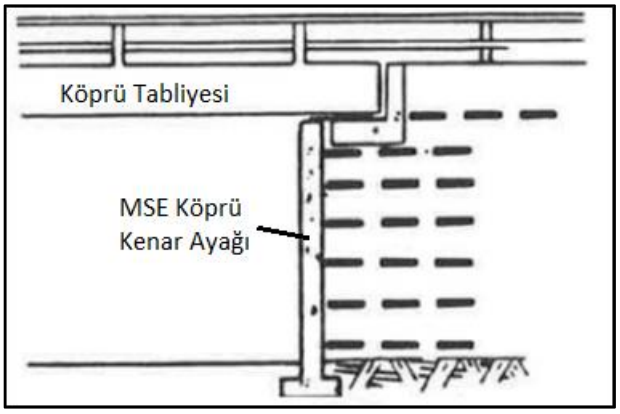
Entegre köprü kenar ayaklarının, erken dönem uygulamalarında genellikle açıklık olarak 30 m ve daha kısa olan nispeten kısa olarak tabir edilebilir köprülerde kullanımına izin verilmekte idi

[32]. Bugün entegre köprü ayakları için, izin verilen köprü açıklıkları önemli ölçüde artmıştır. Greimann ve ark. [32], sırasıyla 90 m ve 150 ila 180 m uzunluğunda, sürekli çelik ve beton köprüler için entegre köprü ayaklarının başarılı kullanımını örneklemişlerdir. Entegre köprü ayakları ile teşkil edilen kenar ayakları genellikle köprü döşemesindeki termal gerilmelere yanıt olarak köprü ayağının açısal yanal hareketi ile bu etkiyi sönümlemektedir. Buna bağlı olarak yaklaşım kaplamalarının çatlaması ve çökmesi görülmektedir. ([33], [34]).

Çoğu geri dolgu materyalleri tamamen elastik olmadığından, tekrarlı etkiler, geri dolgu ile köprü ayağı arasında boşluklar yaratır, bu da geri dolguların aşınmasına, dolguda boşalmalara ve geri dolgunun oturmasına neden olmaktadır. Döşeme çatlaklarından geri dolguya giren yeraltı suyu veya yüzey suyu, erozyon sürecini hızlandırır.

2.3.3. Mekanik Olarak Stabilize Edilen Köprü Kenar Ayakları

Mekanik olarak stabilize edilmiş duvarlar köprü kenar ayağı olarak da kullanılabilirler. Köprünün oturduğu temel direkt olarak güçlendirilmiş geri dolgu üzerine inşa edilebilir. Şekil 2.27'de şematik olarak gösterildiği gibi. Mekanik olarak stabilize edilmiş duvar dizayn prosedürleri köprü kenar ayağı olarak kullanıldığında da tasarım olarak geçerlidir. Özellikle kenar ayak yüklerinin artmasından dolayı geri dolgunun üst bölümlerinde daha fazla güçlendirme elemanı kullanılması gereklidir. Ancak duvar yüzeyi kaplama elemanı köprü yüklerini taşıyıcı özelliği olmadığından bu yüklerden çok fazla etkilenmez. Birçok farklı dizayn yaklaşımı bulunsa da tasarım prosedürleri FHWA-NHI-10-024 ve FHWA-NHI-10-025 şartnamelerinde bulunabilir. Mekanik olarak stabilize edilmiş köprü kenar ayakları büyük miktarda deformasyonları tolere edebildiğinden kazıklı temel ayakları ya da temel zemini olan yumuşak zeminlerin güçlendirilmesi uygulamasından daha ekonomik bir alternatiftir. Mekanik olarak stabilize edilmiş köprü kenar ayaklarının geniş çapta kullanımının ana nedeni yapım yöntemi ve işçiliğinin basit ve hızlı olmasıdır. Özellikle şehir içindeki uygulamalarda bu hız ve kolaylık ile yapımından dolayı tercih sebebidir.



Şekil 2.27: Mekanik olarak stabilize edilmiş köprü kenar ayağı.

2.3.4. Köprü Ayakları Temelleri

Köprü ayakları sığ temeller, çakma kazıklar ya da yerinde dökme betonarme kazıklar ile desteklenebilirler. Güvenilir ve ekonomik bir temel tasarımı için yapısal yükler, çevresel faktörler, zemin koşulları, performans kriterleri, yapım metotları ve ekonomik fraksiyonlar değerlendirilmelidir. Temel tasarımı mutlaka taşıma kapasitesi, limit yatay ve düşey deplasmanlar ve bu deplasmanların ne kadar tolere edilebilecekleri dikkate alınmalıdır. Ayrıca var ise yaklaşım dolguları tasarımda mutlaka dikkate alınmalıdır.

2.3.4.1. Sığ Temeller

Sığ temeller genellikle en ekonomik tasarım çözümüdür. Ancak her sığ temelin lokal olarak tasarım performans öngörüsünün yapılmasının zorluğundan dolayı ulaşım idarecilerince günümüzde pek tercih edilmemektedir. Yine de belirtilmelidir ki derin temellere göre uygun şekilde tasarım yapıldığında mislince ekonomi yapılmasına olanak tanır.

2.3.4.2. Sığ Temel Dolgu Materyelleri

Genel olarak sığ temeller temel ile tabi zemin arasına yerleştirilen mühendislik dolgusu üzerine inşa edilirler. Bu dolgular materyal olarak kum, çakıl, kil ve kayaya kadar birçok farklı yapıda olabilirler.

Kum ve Çakıl

Granüler zeminler üzerine yapılan sığ temellerin dizayn kriteri dolgunun taşıma kapasitesinden daha çok tolere edilebilir oturma sınır koşuluna dayalıdır. Bu noktada güvenilir bir oturma

hesabı önem taşımaktadır. Burada hesap metodolojisi olarak birden fazla yöntem verilebilir, ancak çalışılmış vakalarda görülmüştür ki ortalama hesap değerleri ile ölçülen değerler genellikle örtüşmektedir. Sığ temeller su içerisinde ya da dere yatağında kullanıldığında granüler malzemenin oyulması mutlaka irdelenmelidir.

Kohezyonlu Zeminler

Kil materyal üzerinde teşkil edilecek temeller için hem taşıma kapasitesi hem de oturma kriterleri mutlaka tasarıma konu edilmelidir. Sahada testler yapılarak drenajsız kayma dayanımı profili elde edilmeli, birçok laboratuvar deneyi ile konsolidasyona bağlı oturmaların hesaplanması için gerekli parametreler elde edilmelidir. Özellikle normal konsolide killer üzerine inşa yapılacak ise öncelikle yaklaşım dolgusu inşası ya da ön yükleme dolgusu ile belirli bir süre beklenmesi genel olarak iyi bir pratik örneğidir. Bu gibi tasarım durumlarında köprü kenar ayağı olarak kısa konsol köprü kenar ayaklarının tercih edilmesi yapım sıralaması olarak dolgu yapımını ve ardından köprü kenar ayağının yapımını gerektireceğinden yaklaşım dolgusu ile bir süre beklenmesi doğal bir gereklilik olacaktır.

Kaya Birimler

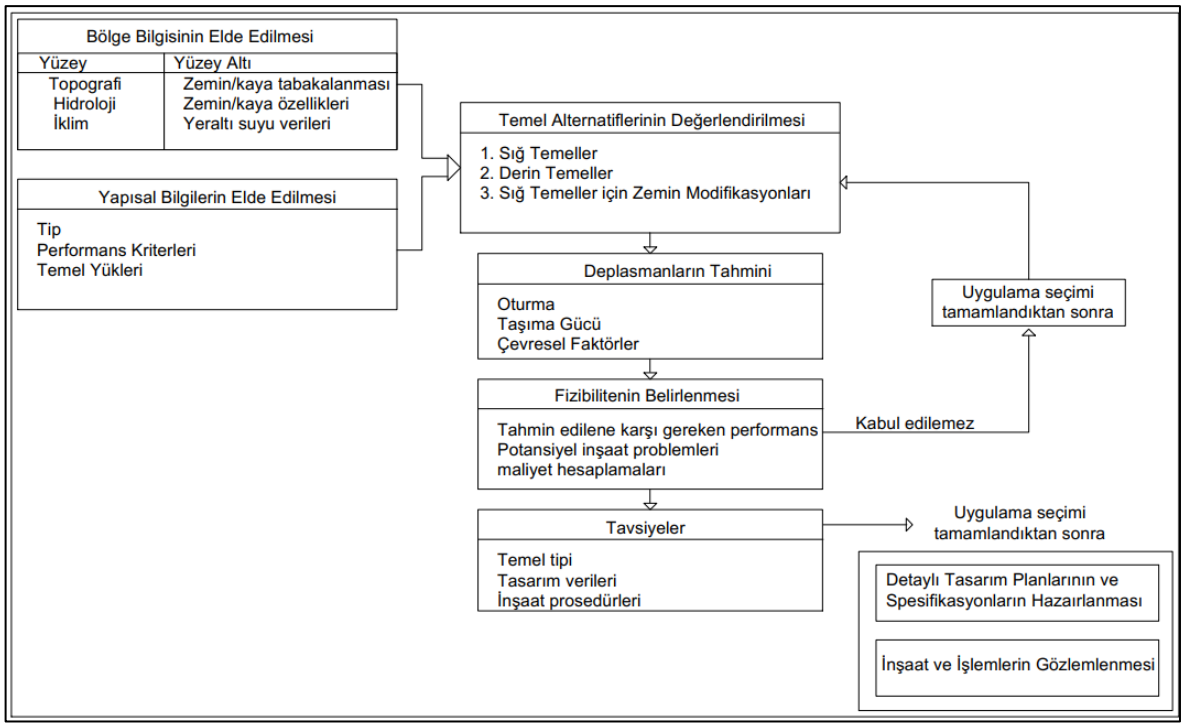
Sığ temellerin kaya üzerinde yapılacağında gerekli tasarım parametreleri genel olarak kayanın taşıma kapasitesi ile ilişkilendirilmelidir. Kaya kalitesi tanımlaması sistemine (RQD) bağlı olarak kayaya ait mühendislik parametreleri elde edilerek tasarıma konu edilir. Genel olarak kaya dolgu ile temel arasına kompakte edilmiş çakıl tabakası serilmesi kaya parçaların yüzeyinden dolayı oluşacak hafif dönmelerin önüne geçmek için iyi bir uygulamadır. Özelikle şişebilen kaya tiplerinden olan şist üzerinde sığ temellerin yapılması için ek tasarım önlemlerinin alınması gerekebilir. Ayrıca süreksizliklerin oryantasyonu sığ temelin stabilizesi açısından şevli yüzeylerde kritik olabilir. Bu potansiyel problemlerden dolayı saha araştırması oldukça önem kazanmaktadır. Mutlaka saha forajları kaya içerisine 3m ve daha fazla olacak şekilde uzatılmalıdır. Özelikle yüksek yapı yüklerine sahip köprüler için sondaj boyları, temel boyutlarının min. 2 katı kadar temel seviyesinden aşağıya uzatılması gerekir.

2.3.4.3. Derin Temeller

Ön tasarım performansı sığ temellerin yeterli olmadığı durumlarda köprü ayak yüklerini sağlam birimlere iletmek amacı ile derin temeller kullanılır. Çakma kazıklar ya da yerinde dökme

kazıklar kullanılabilir. Derin temellerin tasarımda mutlaka yaklaşım dolgu yükleri, yapısal yükler ile birlikte dikkate alınmalıdır. Özelikle derin temeller etrafında bulunan dolgu materyal rijitliğinden çok daha fazla rijitliğe sahip oldukları için farklı oturma gözlenmesi çok olasıdır. Burada yapım sıralaması çok önemli bir faktör olarak derin temellerin performansına etki etmektedir. Genel olarak derin temelllerin yapımından önce yaklaşım dolgularının yapılmalıdır.

Kazıklar derin temellerde en çok kullanılan yapısal elemanlardır. Taşıyıcı olan zemin birimine kadar çakılarak ya da yerinde dökülerek oluşturulurlar. Bazı durumlarda profil kazıkları dolgu ile etkileşimi en aza indirmek adına boş foraj yapılarak, foraj içerisine yerleştirilip beton dökülerek teşkil edilebilirler. Küçük çaplı köprüler için çakma ahşap kazıkların kullanıldığı da görülmektedir. Kazıkların taşıma gücü kazık ucu ve kazık boyunca yüzeyinde oluşan sürtünme ile meydana gelir. Kazık uçları mukavemetli taşıyıcı birim zemine soketli olduğu durumlarda taşıyıcılığı sadece kazık ucu sağlamaktadır. Yumuşak zeminlerde ise bu durum taşıma gücünün büyük bölümünün kazık yüzeyince gelişen sürtünme ile karşılandığı görülmektedir. Özellikle yumuşak zeminlerde kazığı çevreleyen zeminin oturması durumunda kazıkta tasarım kapasitesini olumsuz etkileyecek negatif çevresel sürtünme oluşabilir. Bu durum mutlaka irdelenmelidir. Kazıkların taşıma gücü klasik taşıma gücü teorisi, dinamik dalga analizleri veya saha yükleme testleri ile hesaplanabilir.



Şekil 2.28: Temel tipi seçim akış şeması. [35]

Taşıma kapasitesinin hesaplanması özellikle üç aşmada kontrol edilmelidir. Ön tasarımda öngörülen taşıma gücü ile ön boyutlamalar yapılarak yapıma yönelik tasarım şablonu oluşturulmalıdır. İkinci aşamada sahada mutlaka tasarımda öngörülen değerler verifiye edilmelidir. Son aşamada ise sahada imal edilmiş kazıkların kalite kontrolü yapılmalıdır. Çok büyük projelerde birinci ve ikinci aşama koordineli olarak tek bir aşama olarak ele alınmalıdır. Derin temellerde kullanılan kazıkların düşey taşıma kapasitelerinin tahkikinin yanı sıra yatay kapasitelerinin tasarıma konu edilmesi önemlidir.

2.3.5. Performans Kriterleri Tolere Edilebilir Deplasmanlar

Tüm köprü ayakları ve temelleri mutlaka deplasmana maruz kalır. Köprü ayağı dizayn prosedürlerinin bir parçası da ön görülen deplasmanların tolere edilebilir limitler ile karşılaştırılmasına dayalıdır. Önemli ölçüde yatay ve düşey hareketlerin köprünün güvenliğine ve servis performansına olumsuz etkisi olacaktır. Özellikle yaklaşım dolgusu ile köprü kenar ayağının göreceli farklı oturması tasarımda ayrıca irdelenmelidir.

Bir ulaşım ajansı için tolere edilebilir deplasmanlar genel olarak ortaya çıkan deplasman, maliyetli tamirata yada bakıma yada yapım yöntemine mal olacak ise kaçınılmalıdır düşüncesine dayalıdır. Genel anlamda birçok ulaşım ajansının regülasyonları incelendiğinde düşey deplasmanlar için 10 cm, yatay deplasmanlar için 5 cm tolere edilemeyen deplasman miktarı olarak geçmektedir. Tolere edilen deplasman sınıfları içerisinde betonarme köprüler, çelik köprülere göre daha çok ek gerilmelere maruz kalmaktadır. Çok açıklıklı köprüler tek açıklıklı köprülere göre yatay ve düşey deplasmanlardan daha çok etkilenmektedir.

Regülasyonlara göre ayaklardaki göreceli oturma açıklık genişliği artıkça artmaktadır. Açısal dönme göreceli oturmaya bağlı olarak bir diğer kıstas olarak karşımıza çıkmaktadır. Burada izin verilebilir açısal dönme göreceli oturma miktarının açıklık genişliğine bölünmesi ile elde edilen bir ifadedir. Bu ifade çok açıklıklı köprüler için genel olarak 1/250, tek açıklıklı köprüler için ise 1/200 değerini geçmemesi gerektiği regülasyonlarca belirtilmektedir. Açısal dönme için ifade edilen bu değerler binalar için kullanılan tolere dilebilir oturma değerleri ile uyuşmaktadır.

Bahsi geçen açısal dönme kriteri köprü tabliyesi ile yaklaşım kaplaması arasında oluşacak göreceli oturmayı kapsamaz. Genellikle bu elemanlar arasında oluşacak 12 mm ve üzeri göreceli oturmalar köprü giriş ve çıkışlarında trafik konfor düzeyini etkileyecek tümseklere neden olur ve bakım yapılması ihtiyacını ortaya çıkartır. Tasarım açısından bu kısıt bakım

maliyetlerinin köprü tasarımını farklılaştırma maliyetlerinden daha az olması durumunda geçerlidir. Aksi bir durumda ise bu kısıt tolere edilebilir olarak tanımlanabilir.

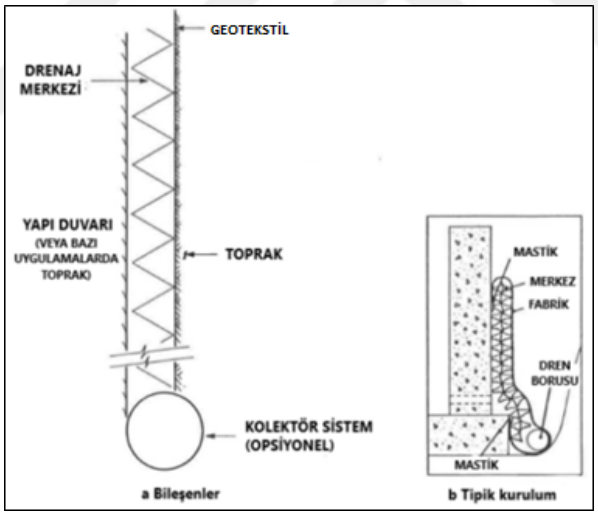
2.3.6. Geri Dolgu Spesifikasyonları

Köprü ayaklarının arkasındaki ve altındaki yapısal dolgu, özel malzemeler ve yerleştirme prosedürleri gerektirir. Dolgu, yaklaşım dolgusunun ve kaplama sisteminin inşat sonrası oturmasını önlemek için iyi bir şekilde sıkıştırılmalıdır. Çeşitli ulaşım ajanslarının yoğunluk gereksinimleri AASHTO T 99 maksimum yoğunluğunun yüzde 95'inden, AASHTO T 180 maksimum yoğunluğuna kadar değişmektedir. Genellikle, köprü ayağı ve kanat duvarlarının yakınındaki kompaksiyon, köprü ayağının hasar görmesini veya hareket etmesini önlemek için küçük titreşimli silindirler veya elle çalıştırılan vibrasyonlu plakalar ya da pnömatik sıkıştırıcılarla gerçekleştirilmelidir. Geri dolgu seçiminde hem stabilite hem de drenaj dikkate alınmalıdır. 75 μm (No. 200) elekleğinden geçen malzeme miktarı % 5'ten daha az olan, iyi dereceli geçirgen dolgu malzemesi kullanımı idealdir. Bu tür malzemeler küçük titreşimli kompaktörler ile kolaylıkla sıkıştırılabilir, buna karşılık, kohezyonlu dolgular için gerekli sıkıştırma yoğunluğuna ulaşmak ekonomik olarak ek harcamalar gerektirebilir. Ayrıca kohezyonsuz dolguların kullanılması, geri dolgunun inşat sonrası sıkışma olasılığını en aza indirecek, geri dolgu drenajını kolaylaştıracak ve donma problemlerini ortadan kaldıracaktır. Geri dolgu fasılalar ile yerleştirilmeli ve 150 ila 200 mm kalınlıklarda sıkıştırılmalıdır.

2.3.7. Drenaj Önlemleri

Köprü ayağının arkasında hidro-statik su basıncının gelişmesini önlemek için önlemler alınmalıdır. Ayrıca, drenaj önlemleri alınarak, geri dolgu ve dolgu alın şevi erozyonunun önüne geçilmelidir. Oluklar veya döşemeli hendekler gibi yüzey drenleri, suyu köprü ayağı ve geri dolgudan uzaklaştıracak şekilde tasarlanmalıdır. Kenar ayakları için alınacak iç drenaj önlemleri, geri dolgu tipi ve temel zemin türüne bağlıdır. Eğer hem geri dolgu hem de temel zemini geçirgen ise, ek bir drenaj gerekli olmayabilir. Eğer geçirgen geri dolgu, geçirimsiz malzeme ile yapı arasında teşkil edilmiş ise drenaj sularını yaklaşım dolgusunun yanlarına veya köprü ayağındaki dren deliklerine taşımak için, geçirgen dolgunun dibinde 100 - 150 mm çapında delikli yatay drenler gereklidir. Geri dolgu malzemesinin derecesine bağlı olarak, geri dolgu malzemesinin aşınmasını ve dren tıkanmasını önlemek için delikli boru etrafında bir geotekstil filtre kullanılması da gerekli olabilir. Yarma içerisindeki teşkil edilmiş geçirgen geri

dolguya gelebilecek yeraltı suyunu tahliye etmek için benzer önlemler gerekli olabilir. Köprü ayağının arkasından drenaj için özel önlemler alınmalıdır. Bu amaçla geokompozit drenler olarak adlandırılan birçok prefabrik drenaj sistemi geliştirilmektedir. Geokompozit drenaj, bir geotekstil kumaş ve yarı sert bir plastik merkezden oluşur. Sıklıkla geokompozit, suyu nihai deşarj noktalarına aktaran bir kolektör borusuna bağlanır. Tipik bir sistemin şematik çizimi Şekil 2.29'da gösterilmektedir. Geotekstil kumaş açık drenaj merkezini geri dolgudan ayırır, geri dolgu ve açık merkez arasında bir hidrolik filtre görevi görür. Drenaj merkezinin katı kısmı geotekstili destekler ve yer çekimi ile suyun serbest dolaşımı için kesit alanının daralmamasına imkân tanır. Prefabrik geokompozit drenaj, köprü ayağı duvarlarına kolayca monte edilen tabakalar halinde üretilmektedir. Bir kompozit drenin iki önemli özelliği, geotekstilin hidrolik özellikleri ve merkezin basınç dayanımıdır. Geotekstil, katı zemininin geçişini kısıtlarken suyun girmesine izin veren bir filtre görevi görmelidir. Geotekstilin tıkanması, sistemin etkinliğini açıkça azaltacaktır. Merkezin basınç dayanımı, geotekstile karşı yanal zemin basıncının neden olduğu merkezdeki açık akış alanının daralmasını önlemek için gereklidir.



Şekil 2.29: Geokompozit dren şematik çizimi.

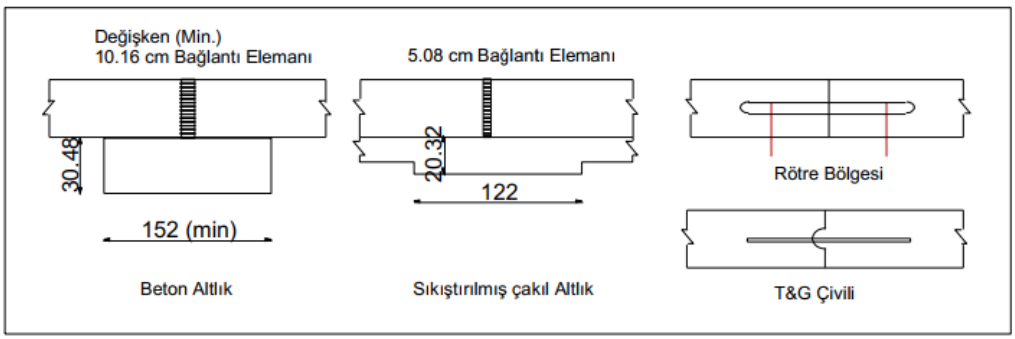
2.4. YAKLAŞIM DÖŞEMELERİNİN TASARIMI

Yaklaşım döşemeleri köprü döşemesi ile mevcut yol kaplaması arasında sürüş olarak yumuşak bir geçiş sağlaması amacı ile yapılan köprü elemanıdır. Yaklaşım döşemesi köprü kenar ayağı yakınında temel zemin desteğinin azalmasını karşılayacak şekilde tasarlanır. Köprü ile yaklaşım döşemesi arasındaki bağlantılar tekrarlı termal yüklemelerin ve köprü döşemesi, köprü kenar ayağı ya da yol kaplamasında oluşabilecek deplasmanlara dayanabilecek şekilde

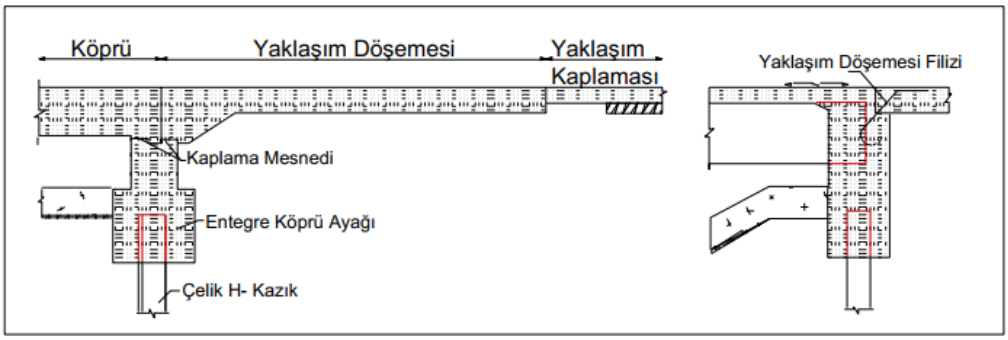
tasarlanması istenir. Birçok ulaşım dairesi betonarme yaklaşım döşemelerini kullanmayı tercih eder. Kenar ayağına bağlantılanması ya da genişleme derzi ile kullanılması tasarım kararı olarak değişkenlik gösterse de genellikle rijit bağlantılanmış yaklaşım döşemeleri performans açısından daha kullanışlıdır. Çoğu betonarme yaklaşım döşemesi 6 ile 12m uzunluğunda olup üniform kalınlığa sahiptir. Konik ya da değişken kesitli yapılara sahip yaklaşım döşemeleri kenar ayak yakınında dayanım olarak daha iyi bir performans sağlayabilir. Döşeme genişlikleri ise genellikle köprü genişliğine eşittir. Döşeme altında permeabilitesi yüksek bir taban teşkil edilip döşeme bir tarafından kenar ayağına bağlantılanır. Permeabiltesi yüksek bir taban oluşturulması ya da boyuna kenar drenleri ya da ikisinin beraber kullanımı yaklaşım döşemesi destek sistemi için kritik önem arz eder. Deplasman performansı açısından yaklaşım döşemesinin kazıklar ile desteklenmesi yaygın bir kullanım örneğidir.

2.4.1. Yaklaşım Döşemesi ve Köprü Arası Bağlantılar

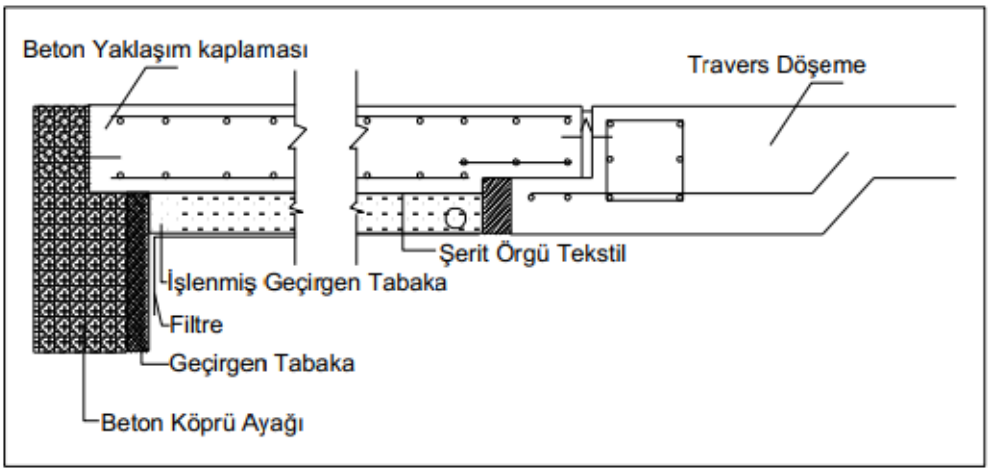
Köprü ve döşeme arasındaki bağlantı istenilen performans limitleri arasında kalabilmek adına oldukça önemlidir. Bu bağlantılar hem trafik yüklerini aktarırken hem de tekrarlı termal gerilmeleri ve kaplamanın rötre gerilmelerini karşılamalıdır. Ayrıca herhangi bir döküntü ya da su girişini engelleyecek şekilde tasarlanmalıdır. Bazı tipik bağlantı detayları entegre ya da entegre olmayan kenar ayakları için Şekil 2.30, Şekil 2.31 ve Şekil 2.32'de sunulmuştur. Çoğunlukla bağlantılar döşeme ile köprü döşemesi arasında röletif hareket olmasına izin verir. Ancak az görülse de bu durumun kısıtlandığı tasarımlar da mevcuttur. Bağlantılar birçok değişik materyal ile doldurulabilir. Bu materyallere elastomerler, asfalt veya keçe malzemelerini örnek gösterebiliriz. Özelikle burada suya dayanıklı bağlantı tasarımı ve önemi tüm ulaşım daireleri tarafından önemsendiği belirtilmelidir.



Şekil 2.30: Yol kaplaması ve yaklaşım döşemesi arası bağlantı detayları. ([28], [34])



Şekil 2.31: Entegre köprü kenar ayağı bağlantı detayı. ([34], [36])

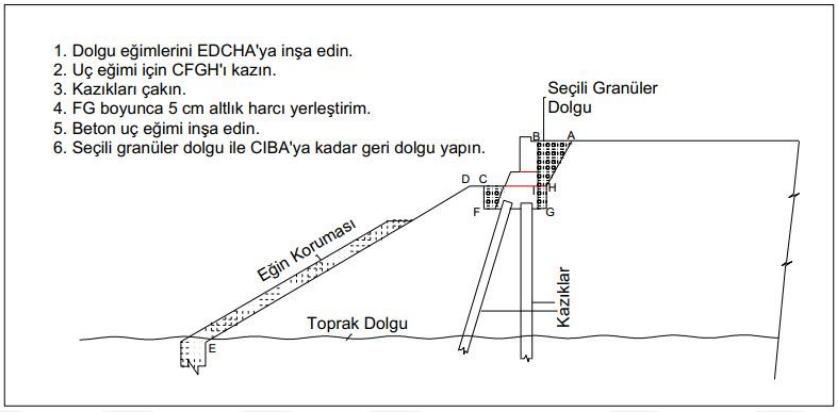


Şekil 2.32: Entegre olmayan köprü ayağı ve yaklaşım döşemesi detayı. ([34], [36])

2.5. KENAR AYAĞI / DOLGU YAPIM SIRALAMASI

Köprünün fonksiyonelliği ve güvenliği yapım sonrası kenar ayaklarında ya da yaklaşım dolgularında meydana gelen deplasmanlardan direkt olarak etkilenir. Yapım öncesinde ortaya çıkan deplasmanlar köprü yapısını etkilemediğinden ötürü performans ya da bakım masraflarına yol açmaz. Bundan ötürü genellikle yapım sıralaması ve proje yönetimi yapım sonrası deplasmanların minimize edilmesine yönelik çalışılır. Bu genel yaklaşım özelikle yumuşak sıkıştırılabilir kohezyonlu zeminler üzerinde teşkil edilecek yaklaşım elemanları için önemlidir. Öncelikle yaklaşım dolgusunun yapılıp konsolidasyon oturmalarının tamamlanmasının beklenmesi ve buna müteakip köprü kenar ayağı ve diğer köprü yaklaşım elemanlarının imalatına başlanması yaygın bir uygulamadır. Kaya, sıkı kumlar ve siltler ya da sert killer için böyle bir bekleme süresine ihtiyaç duyulmaz. Bekleme periyodunun düşürülmesinin gerekli olduğu durumlarda prefabrike drenler ya da geçici ek şürşajlar veya bu ikisinin beraber kullanımı ile konsolidasyon süreci kısaltılabilir. Bu yöntemlerin yapım sonrası

oturmalarını önemli ölçüde azaltıldığı raporlanmıştır ([37], [38]). Köprü kenar ayak temelleri için sığ temeller kullanıldığında yaklaşım dolgusu ve kenar ayak oturmaları göreceli olarak üniform olacaktır. Eğer derin temeller kullanılmış ise dolgu ve temel arasında göreceli farklı oturmalar beklenmelidir. Ancak bir bekleme periyodunu ardından derin temeller inşa edilirse kazıklarda oluşabilecek negatif sürtünme minimize edilebilir. Ayrıca yapım sonrası yatay deplasmanlarda minimize edildiğinden kazıklar üzerinde oluşabilecek ek yanal gerilmelerin önüne geçilmiş olur. Kısa konsol bir köprü kenar ayağı için tipik kesit ve yapım sıralaması Şekil 2.33'de verilmiştir.



Şekil 2.33: Tavsiye edilen dolgu köprü ayağı inşat sıralaması.

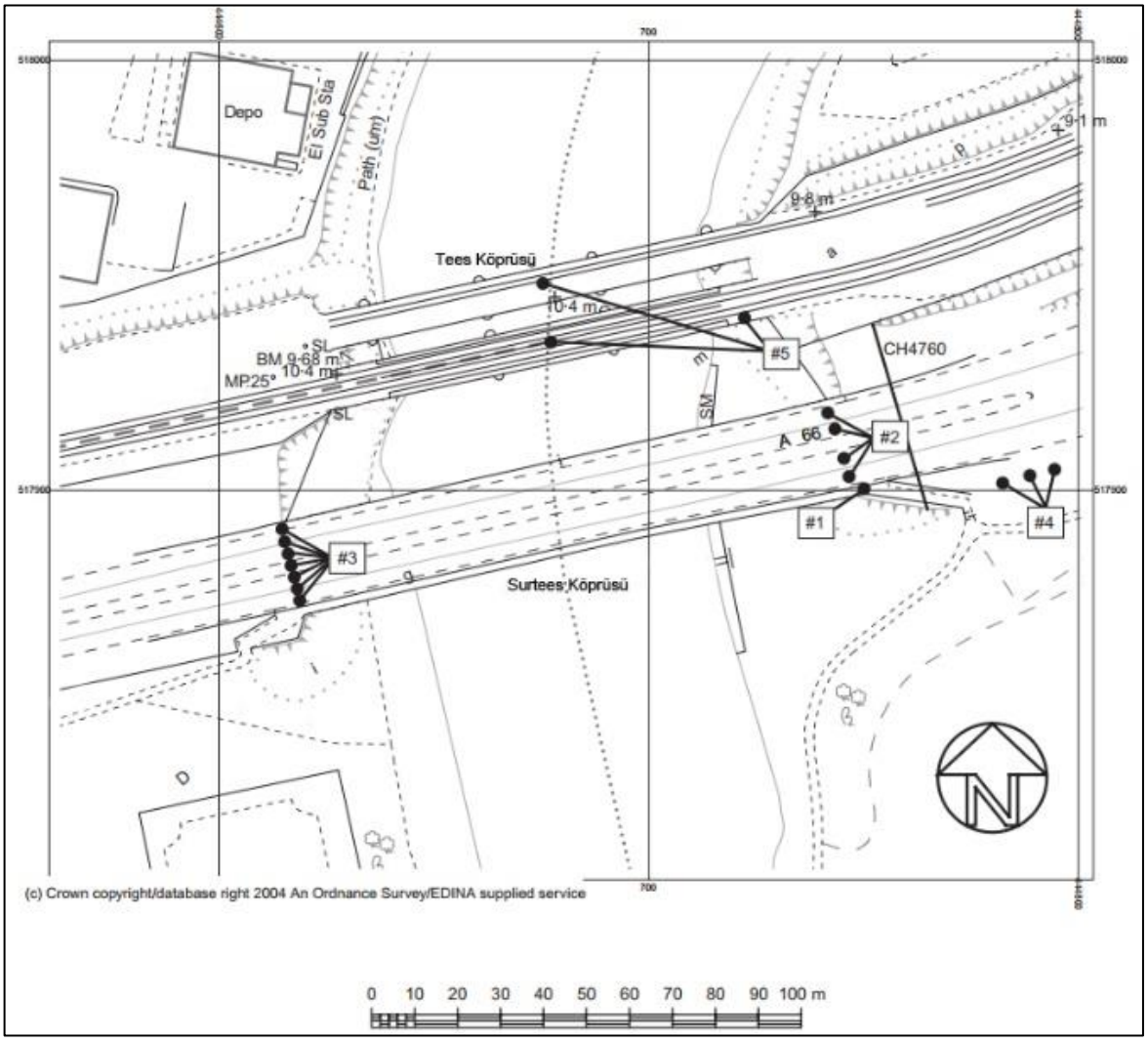
Yaklaşım dolguları yumuşak zemin birimleri üzerine yapılacağı zaman bütün dolguyu bir anda yapmak temel zeminlerinde kaymaya ya da toptan göçmeye neden olabilir. Böyle durumlarda dolgu aşamalı olarak belirli kalınlıklarda ve bekleme süreleri olacak şekilde imal edilir. Bu uygulama ile yumuşak temel zeminin konsolidasyon ile kayma dayanımı artacaktır. Bu gibi durumlarda genişletilmiş saha ve laboratuvar araştırmaları gereklidir.

Tasarım açısından üç tip analiz gerekliliği bulunmaktadır. Öncelikle saha profilinde var olan drenajsız kayma dayanımı ile yapılacak stabilite analizleri ile maksimum dolgu yüksekliğinin belirlenmesi gerekir. Konsolidasyon hızı her aşamada verilen dolgu yükü için belirlenebilmedir. Son olarak ise konsolidasyon ile drenajsız kayma dayanımı artışı mutlaka irdelenmelidir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. SURTEES KÖPRÜSÜ

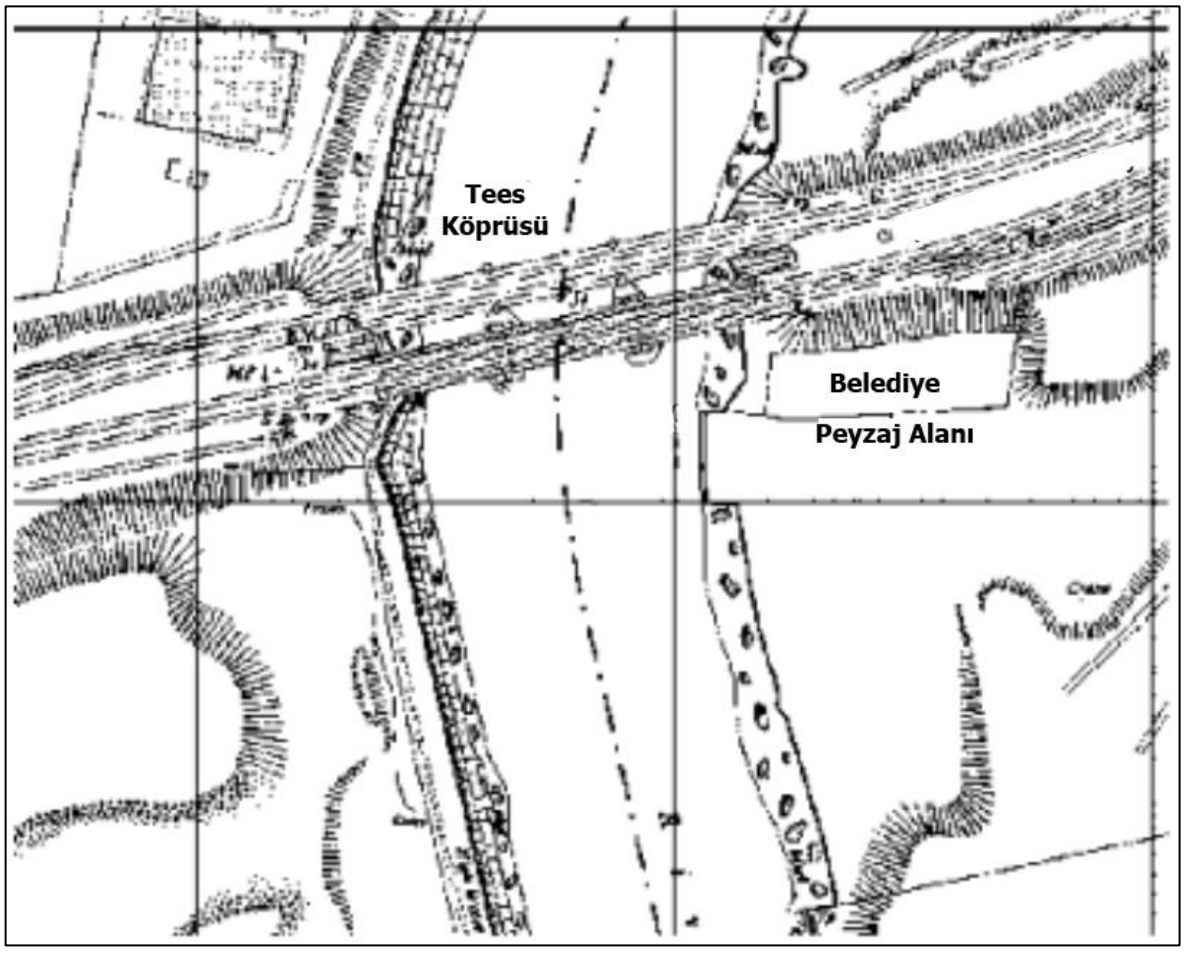
Surtees Köprüsü A66 karayolunun Tees nehri üzerinde geçişini sağlayan, Thornaby Tren İstasyonunun yaklaşık olarak 1 km güney batısında yer alan ulusal grid referansı NZ 446 178 olan köprüdür. Surtees Köprüsü nehrin memba tarafında yer alıp, demir yolu köprüsünün güneyinde yer alır (Bkz. Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Sahanın Plan Görünümü. [39]

Surtess Köprüsü, doğu yaklaşım dolgusu altında tarihi belediye kayıtlarına göre Viktorya demir yolu dolguları olduğu bilinmektedir. Bu dolgular nehirden yüksek bir konumda olup demiryolunun kotuna kadar yükseltildiği bilmektedir (Bkz. Şekil 3.2). Surtees Köprüsünün

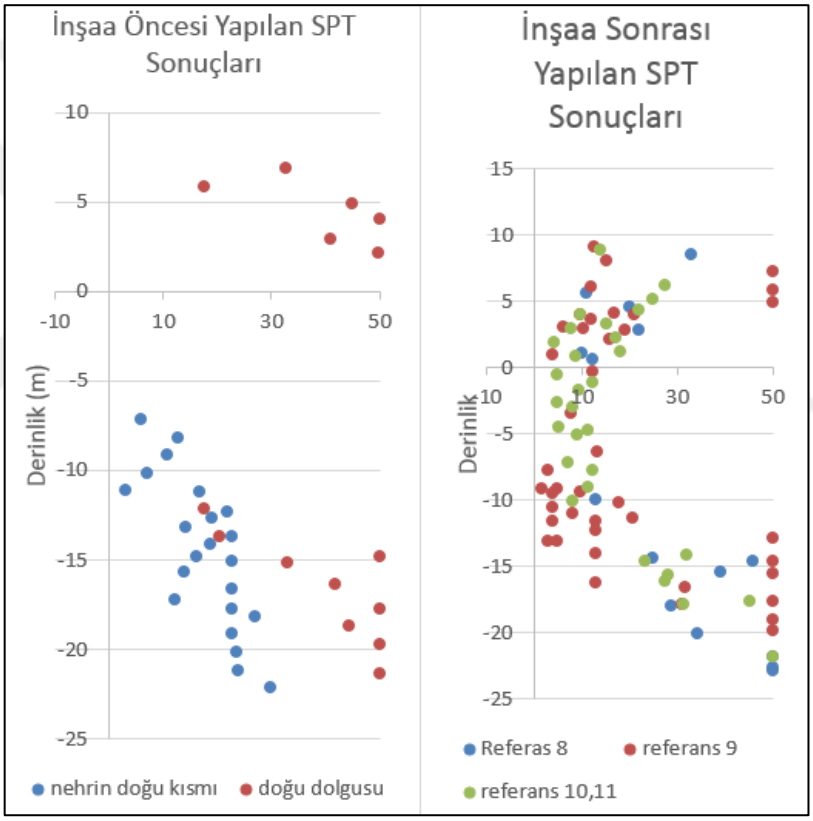
yapımı 1980- 1982 yılları arasında olup batı yaklaşım dolgusu 1978'de imzalanmış olan iş kontratına binaen 1980'den önce yapıldığı bilinmektedir. Batı dolgusu üç aşamada yapılmış olup, 18-24 ay periyodunda oturmaların gerçekleşmesi beklenilmiştir. Doğu yaklaşım dolgusunun yapımı ile ilgili bilgi kısıtlıdır. Ancak yüklenici sözleşmesine göre köprü yapımı ile eş zamanlı olarak 1980'de başladığı söylenebilir. Doğu dolgusunun yapımında, demiryolu dolgularının hangi oranda kullanıldığı ise bilinmemektedir. Bunun nedeni ise Şekil 3.2'de görüleceği üzere doğu dolgusu ile demiryolu dolgularının arasında belediyeye ait peyzaj alanının bulunmasıdır. Bundan dolayı doğu dolgusunun yapılacağı alanda ne kadar demiryolundan kalma dolgunun olduğuna dair bir yargıya varılamamaktadır.



Şekil 3.2: Yapım öncesini gösterir belediye kayıtları. [40]

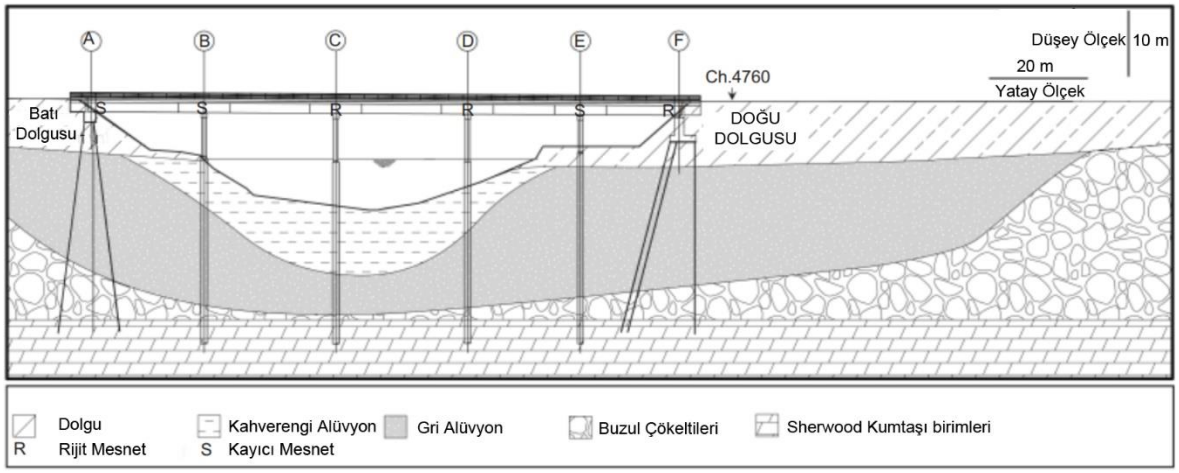
3.1.1. Proje Alanının Jeolojik Tanımlaması

değişik zamanlarda yapılmış en az altı adet zemin etüdü çalışmasının olduğu bilinmektedir. 1973'ten itibaren köprü yapımından önce gerçekleştirilmiş ([41], [42]) ve dört adet de devam eden oturmaların sebep olduğu köprü hasarı ve açılmalarından ötürü yapılan ([43]- [44]) zemin etüd çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmalar esnasında toplam olarak 49 adet sondaj yapılmıştır. Bu sondajlar köprü etrafında ve ilgili hasar yerlerinde olup tamamı SPT deneylerine dayalıdır. Doğu yaklaşım dolgusunun hemen etrafında yapılmış olan SPT çalışmaları Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3: Araştırma sondajlarında yapılmış SPT sonuçları. [39] [41]

Yapılan zemin etüdleri ve yayınlanmış olan jeolojik haritalar [45] ve bölgesel jeolojik çalışmalara [46] dayanarak oluşturulan zemin tabakalarının kesiti Şekil 3.4'de verilmiştir.



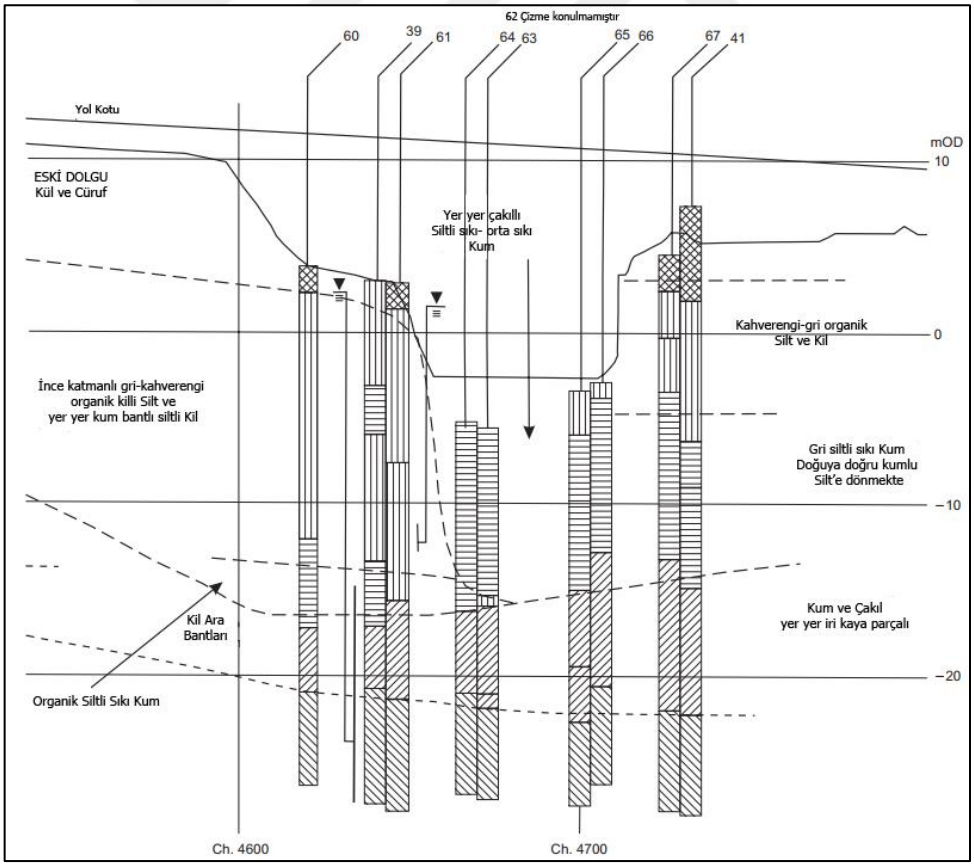
Şekil 3.4: Jeolojik kesit. [39]

Bu çalışmalar incelendiğinde alüvyonel depozitlerin buzul çökelleri üzerinde vadiyi kapladığı anlaşılmaktadır. Bu alüvyonel tabakalardan, kahverengi alüvyon olarak tanımlanan tabaka daha çok dere yatağında yer almakta olup gri alüvyon olarak tanımlanan tabakanın üzerinde yer almaktadır. Alüvyonel tabakaların altında bulunan buzul çökelleri tabakası doğu dolgusunun deniz seviyesine göre 15 m altında bulunmakta olup, batı ve doğu boyunca topografyanın yüzeylenmesi ile bu tabakada da yüzey seviyelerine kadar yükseldiği gözlenmiştir. Buzul çökellerinin altında ise kumtaşı ana kayaç deniz seviyesine göre 22 m derinliktedir. Daha öncesinde demiryolu köprülerinin yapımından kalan balast atıkları veya dolguları Surtees Köprüsü yaklaşım dolgularının üst kotunun altında olduğu bilinmektedir.

Tablo 3.1: Tabakaların jeolojik tanımlamaları ve tabaka kotları. [39]

Tabaka Adı	Tanımlama	Tabaka Başlangıç Kotları (Deniz Seviyesine Göre)
Viktorya Dolgusu	Orta sıkı gri kahverengi, kumlu çakıllı kil silt içerikli. Kumtaşı, kireçtaşı, cürufl ve klinker parçaları muhteva eden	3.5
Kahverengi Alüvyon	Yumuşak, ince tabakalı, kahverengi kumlu siltli Kil/ kumlu kill silt az miktarda organik toprak muhteva eden	2
Gri Alüvyon	Yumuşak, ince katmanlı, gri çok siltli Kil/ çok killi yer yer çakıl ve kumlu Silt	1.5
Buzul Çökelleri	ota-sıkı kahverengi siltli yer yer iri kaya parçalı Kum ve Çakıl	-14.5
Sherwood Kumtaşı	zayıf-orta mukavemetli, ara bantlı, kırmızı kahverengi, iyi-orta parçalı derecelenmiş Kumtaşı	-22

Yaklaşım dolgularının ve hali hazırdaki tabakalanmanın detaylı mühendislik tanımları ile sunumu Tablo 3.1'de verilmiştir. Köprü servis yaşamı boyunca nehrin akışına bağlı oyulmalar ya da erozyon rapor edilmemiştir. Demiryolu dolguları için kullanılan dolgular zamanla doğal tabakalarda ki efektif gerilmeleri artırmıştır. Demiryolu için yapılmış olan bu dolgular çok geniş bir alana yayılmaktadır. Ancak Surtees Köprüsünün yapımı sırasında çok azı yerinden kaldırılmıştır. Nehir su seviyesinin değişiminin çok az miktarda olduğu bilinmekte olup, bunun sebebi 1995 yılında yapılmış olan Tees Nehir Barajıdır. Yaklaşım dolgularının altında su tablasının değişimin çok az olduğu ve bundan dolayı Surtees Köprü proje alanındaki alüvyonel depozitlerin az derecede de olsa aşrı konsolide olduğu söylenilebilir. Başlangıç olarak yapılan zemin etütlerinde 10 adet sondaj yapılmış, bunlardan 3 adet sondajın batı dolgusu, 5 adet sondajın nehir yatağında, 2 adet sondajın doğu dolgusunda yapıldığı bilinmektedir. 1976'da sunulmuş olan geoteknik rapora [42] göre oluşturulmuş boyuna jeolojik kesit Şekil 3.5'da verilmiştir.



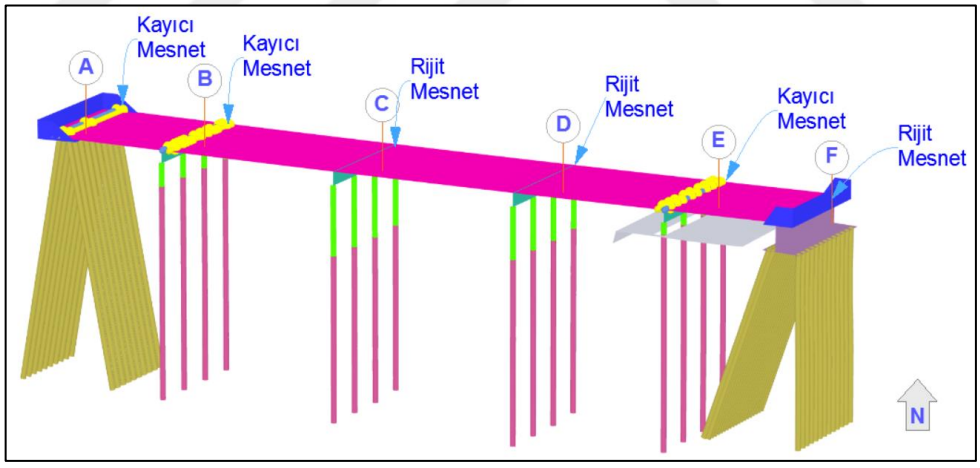
Şekil 3.5: Yapım öncesi saha çalışmalarına binaen oluşturulan jeolojik kesit. [39]

Yapım öncesinde doğu yaklaşım dolgusunun altındaki alüvyonel kil tabakası 7,5 m kalınlığında olduğu düşünülmüştür. Bu tabakanın altında ise 9 m kalınlığında alüvyonel siltli kum olduğu

ve bu tabakanın altında ise buzul çökellerinin olduğu belirtilmiştir. Bu varsayımlar Şekil 3.3'de sunulmuş olan kısıtlı SPT datası üzerinden türetilmiştir. Yapım öncesinde oluşturulan bu zemin modeli batı yaklaşım dolgusunun altında 14 m kalınlığında alüvyonel killerin olduğunu ortaya koymaktadır. Alüvyonel kil tabakalarının doğu ve batı yaklaşım dolgularının altındaki kayda değer kalınlık farkları tasarımcıların öncelikle batı dolgusunu yapıp doğu dolgusunun inşasına köprü inşası ile birlikte başlamalarının sebebi olarak görülmektedir.

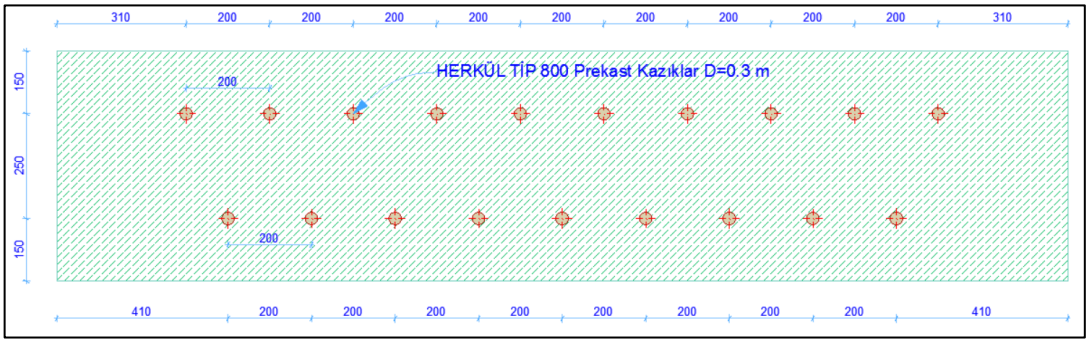
3.1.2. Surtees Köprüsü Yapısal Detayları

Surtees Köprü döşemesi orta açıklıkta dört adet ayak ile desteklenmiştir. Kenar ayaklarının arasındaki mesafe yaklaşık olarak 125m'dir. Yol kotu, deniz seviyesine göre +11m kotundadır. Köprü alın şevleri kaplama ile kaplanarak erozyona karşı koruma altına alınmıştır. Doğu dolgusu tarafında, batı dolgusuna nazaran daha geniş deniz seviyesine göre 5,5m kotunda nehir seti bulunmaktadır. Batı dolgusu tarafında ise nehir seti deniz seviyesine göre 3m kotundadır. Nehir su yüzeyi kotu 2.7 m seviyesinde olup Tees Nehir Barajı sayesinde su seviyesi sabitlenmiştir.



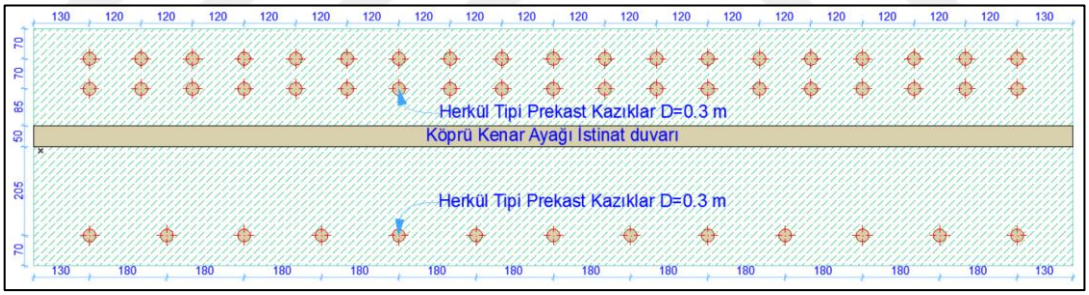
Şekil 3.6: Surtees Köprüsü yapısal elemanlarının isimlendirilmesi ve bağlantı tipleri şematik çizimi.

Şekil 3.6'de B'den E'ye kadar isimlendirilmiş olan dört orta ayaktan her biri 1.35m çapında yerinde dökme kazık ile desteklenmiş olup, kazıklar ana kayaya kadar soketlenmiştir. Batı dolgusu tarafındaki kenar ayak kazıklı temel üzerine oturtulmuş kısa konsol kenar ayak olup, yaklaşık olarak 8m kotundadır. Kenar ayak temeli 29 adet prekast çakma Herkül 800 tipinde 30 cm çapında kazıklardır. Bu kazıklar 2 sıra olarak teşkil edilmiştir. Nehir yatağına yakın olan sırada 9 adet kazık 1Y:5D eğim ile teşkil edilmiş olup, eğimin yönü nehre doğrudur. Diğer sıra kazıklar ise 10 adet olup 1Y:5D eğim ile teşkil edilmiş olup eğim kara tarafına doğrudur.



Şekil 3.7: Batı köprü kenar ayağı temel altı kazık yerleşim planı.

Şekil 3.6'de F olarak isimlendirilmiş doğu köprü kenar ayağı temeli 4,7m kotunda olup yine Herkül 800 tipinde 51 adet kazık ile desteklenmiştir. Bu kazıklar üç sıra halinde teşkil edilmiş olup 13 tanesi kara tarafında düşey olarak teşkil edilmiş, kalan 38 tane kazık ise iki sıra halinde 1Y:3D nehir yatağına doğru eğim ile nehir tarafına teşkil edilmiştir. Tüm bu kazıkların boylarının 30-33 m olduğu ve ana kayaya soketli olduğu düşünülmektedir. Doğu tarafında köprü döşemesi köprü kenar ayağına yatay olarak rijit bağlantılanmış olup orta ayaklarda ise Şekil 3.6'da C ve D olarak isimlendirilen orta ayaklar kazıkların burulma boyu düşünülerek aynı şekilde yatayda rijit olarak bağlanmıştır.



Şekil 3.8: Doğu köprü kenar ayağı temal altı kazık yerleşim planı.

Şekil 3.6'da S harfi ile etiketlenmiş olan ayaklarda kayıcı mesnet teşkil edilmiş olup, bu mesnet türü Şekil 3.6'da A, B ve E olarak etiketlendirilmiş köprü ayaklarında kullanılmıştır. A ile etiketlenen batı köprü kenar ayağı ile köprü döşemesi arasında genişleme derzi tipinde bir bağlantı yapılarak bu bağlantıda esnek plastik kullanılmıştır. Bu malzeme köprü elemanlarının termal genişlemelerine müsaade ederken aynı zamanda yüzeyden gelebilecek akıntı ve döküntülerinde bu derze dolmasının engellemektedir.

3.1.3. Hesaplanan Geoteknik Parametreler Hakkında

Her bir tabakaya ait jeolojik tanımlamalar Tablo 3.1'de sunulmuştur. Sahada ve laboratuvarda yapılan deneyler ışığında hesaplanan geoteknik parametreler Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'de özetlenmiştir. Tablo 3.2 sahada gerçekleştirilmiş 6 adet zemin incelemesine ait dataların ortalama değerlerinden oluşmaktadır. Bu tablolarda verilen buzul çökellerine ait oturma parametreleri dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır. Çünkü testlere konu edilen iki adet numune lokal olarak ince taneli zeminlerden alınmıştır.

Tablo 3.2: Geoteknik ortalama parametreler. [39]

Zemin Özellikleri	**Dolgu**	**Kahverengi Alüvyon**	**Gri Alüvyon**	**Buzul Çökelleri**
γ_n: kN/m^3	18.15	17.85	17.95	21.09
γ_{doy}: kN/m^3	18.16	17.89	18.10	20.88
D_{10}: μm	20	1	2	230
e_0	0.81	0.99	0.93	0.48
c_u: kN/m^2	98	27	38	140
Sıkışma Parametreleri				
m_v: m^2/MN	0.11	0.24	Bkz. Tablo 3.3	0.07
C_v: m^2/yıl	1.83	5.6	Bkz. Tablo 3.3	1.83
C_c	0.29	0.26	Bkz. Tablo 3.3	0.11
C_r	0.06	0.03	Bkz. Tablo 3.3	0.03

Tablo 3.3: Gri alüvyon için hesaplanan sıkışma parametreleri. [39]

	Yapım Öncesi Verileri ile Hesaplanan Değerler	Tüm Veriler ile Hesaplanan Değerler	
	Ortalama*	Ortalama	Medyan
mv: m2/MN	0.08	0.22	0.22
Cv: m2/year	10.9	12.31	2.74
Cc	0.22	0.29	0.26
Cr	0.03	0.04	0.03
* Yapım öncesi verileri sadece 2 adet olduğundan ortalama ve medyan değerleri birbirine eşittir.			

Gri alüvyon tabakasının sıkışması, doğu dolgusu için oturmalar bakımından baskın tabaka olmasından ötürü buzul çökellerinin oturmaya bağlı parametreleri sistemin deplasmanında az bir etkiye sahip olacaktır. Bundan dolayı Tablo 3.3'te gri alüvyon oturma parametreleri daha detaylı sunulmuştur. Tablo 3.3'te sunulan bu parametreler yapım öncesi testlere ait verilerin ve yapım öncesi ve sonrasını kapsayan tüm testlere ait verilerin değerlerinin ayrı ayrı sunulması ile oluşturulmuştur. Bu iki ayrı veri grubundan oluşturulan parametrelerin birbirine yakınlığı data dağılımının simetriye yakın olduğunu göstermektedir. Tablo 3.3'te sunulan bu verilerin medyan ortalama ve aritmetik ortalama değerlerinin birbirinden farklı olması ise değerlerin geniş bir aralıkta dağıldığını göstermektedir ([47], [48]).

Gri alüvyonun başlangıç boşluk oranı (e_0) ve hacimsel sıkışma (m_v) değerleri sığ derinliklerde kayda değer bir dağılım göstermektedir. Bu dağılımın sebebi demiryolu dolgularının yapımından dolayı çevre basıncının artması olarak gösterilebilir. Bundan dolayı sığ derinliklerde ölçülen değerler saha şartlarının tespitinde doğru bir perspektif vermediğinden dolayı hesaplamalarda göz önünde bulundurulmayacaktır. Gri alüvyon için yapım öncesi ölçülen hacimsel sıkışma değeri, tüm veri seti göz önüne alındığında aritmetik ve geometrik ortalama değerlerine nazaran çok düşük gözükmektedir. Bu durumun sebebi büyük olasılıkla hacimsel sıkışma değeri (m_v) hesaplanırken kullanılan gerileme artış adımlarının inşa öncesi deneylerinde 50kPa olarak alınıp inşa sonrası testlerde 100kPa ve üzerinde kullanılması olabilir. İnşa öncesi datasının Casagrande yapılandırılması kullanılarak [49] tekrar değerlendirilmesi ile gri alüvyonun çok az da olsa aşırı konsolide olduğu ve ön konsolidasyon basıncının mevcut sahada bulunan düşey gerilmeden 30 kPa daha fazla olduğu söylenilebilir. Hacimsel sıkışma katsayısının tanımı bir boyutlu konsolidasyon deneyinde efektif stresin (σ_v'), spesifik hacim ($1+e_0$) ile ilişkisinin eğimine eşittir. Tekrar sıkışma indisi (Cr), ile hacimsel sıkışma katsayısı' nın (m_v), arasındaki bağıntı Denk. 3.1'de verilmiştir [50].

$$m_v = \frac{Cr}{2.3 \times \sigma'_v \times (1 + e_0)} \tag{3.1}$$

Gri alüvyon aşırı konsolide olarak varsayılır ise Denk. 3.1'den elde edilecek hacimsel sıkışma katsayısı inşa öncesi hesaplanan değerlere çok yakın değerler olacaktır. İnşa sırasında ölçülen değerler aşırı konsolide olarak algılanmasına sebep olduğundan bu varsayıma dayalı bütün hesaplamalar oturmaların daha düşük olacağına dair hesaplamalara sebep olmuştur.

Gri alüvyona ait inşa sonrası verilerinden elde edilen sıkışma indisi (C_c) ve yeniden sıkışma indisi (C_r) yapım öncesi elde edilen verielerin ortalaması ve tüm elde edilen verilerin göz önüne alındığında benzerlik göstermektedir. Geri analizlerde sıkışma indisi (C_c) ve yeniden sıkışma indisi (C_r) oturmaların hesaplanması için direkt olarak ya da ilgili parametrelerin türetilmesinde kullanılması uygun olacaktır.

3.1.4. Köprüde Oluşan Ek Gerilmeler

Yüzeyde gözlemlenen aşırı oturmalar hakkında birçok rapor hazırlanmıştır. Detaylı kronoloji Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4: Köprü yapımı ve gözlemleri kronolojik sıralaması. [39]

İnşaat Öncesinde		
Ön zemin incelemesi	1973	Doğu dolgusu yanında bir adet sondaj
Detaylı zemin incelemesi	1975-1976	Doğu dolgusu yakınında ikisi derede olmak üzere dört adet sondaj ve bir arazi vane deneyi. Derede üç adet ilave sondaj. Batı dolgusuna yakın 3 sondaj ve bir arazi vane deneyi.
İnşaat Sırasında		
Batı dolgusu inşatı	Ocak-Mayıs 1978	Dolgu doğal zemin üzerine 4,3 m - 6,5 m - 8,0 m kotlarında serimler ile üç aşamada inşa edildi;
Batı dolgusunun gözlenmesi	Ocak 1980	Ekstansometreden 400 mm konsolidasyon oturması gözlendi, orijinal zemin seviyesinin 4 m altında inklinometrelerden 95 mm ila 140 mm arasında yatay deplasman ölçüldü.
Üstyapı inşasına başlanılması	1980	
İnşaat sırasındaki gözlemler	Kasım 1980	E ayağının etrafında 70 mm ile 115 mm civarında oturma gözlendi, ayağın öne doğru ötelendiği kaydedildi (kazıklar tamamlandıktan sonra 40 mm öne ötelenme gerçekleşti)
Köprü trafiğe açılır	1981	
İnşaat Sonrasında		
Denetim raporu	1982	Doğu dolgusunun arkasında dikkat çeken oturmalar gözlenmiş, izleme sistemi ile takip edilmesi ve düzeltilmesi önerilmiştir. E ayağındaki taşıma plakaları deplase olmuştur.
Denetim raporu	1986	B, C, D ayaklarının başlıklarında çatlaklar rapor edilmiştir. (B ve C tamir edildi)

Tablo 3.4: Köprü yapımı ve gözlemleri kronolojik sıralaması. [39]

Hava fotoğrafları	Mayıs 1991	Kaplama yüzeyindeki farklı renkler yol yüzeyinin her iki yaklaşım dolgusu tarafında da tamir edildiğini göstermektedir.
Zemin incelemesi	1992	Devam eden deplasmanların nedenlerinin araştırılması ve köprü genişletme çalışmaları için önerilerin oluşturulması.
Hava fotoğrafları	Temmuz 1995	Yüzey kaplamasında yenileme : Batı yaklaşım dolgusu tarafında geniş çaplı, doğu dolgusu tarafında ise 100 m'nin üzerinde
Görsel inceleme	2000	E ayağı gözle görülür biçimde şakülünden şaşmış.
Zemin incelemesi	2000	Hedeflerden biri batı ve doğu dolgularındaki hareketlerin takip edilmesi.
İnklinometrelerin okunması	Ağustos 2001	Ölçülen ötelenmeler, alüvyonel çökellerin oturmaları ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.
Zemin incelemesi	2002	Doğu dolgusundaki aşırı ve sürekli hareketlerin incelenmesi
Dilatasyon derzlerinin tamiri	2003	Denetlemeyi takiben tamirat kararı verilmiş.
Zemin incelemesi	2004	Zemin hareketlerinin halen devam ettiği belirtilmekte
Dilatasyon derzlerinin tamiri	2005	2003'te yapılan yetersiz çalışma sonrasında ilave tamirat yapılmıştır

1992 yılında gözlemlenen bu deplasmanların devamlı olup olmadığına dair endişelerin araştırılması için ek zemin araştırmalarının yapılmasına karar verilmiştir [43]. 2000 yılında yapılan gözlemlerde köprü döşemesinin, A ve B ayakları göz önünde bulundurulduğunda batı yönünde hareket ettiği tespit edilmiştir. C, D ve F ayaklarının bağlantı yapısından dolayı yatay kuvvetleri köprü döşemesine ilettiği göz önüne alınırsa, böyle bir hareketi tetikleyecek yatay kuvvetin C ve D ayaklarından köprü döşemesine iletilmesi pek olası değildir. Bu varsayımdan yola çıkılarak doğu yaklaşım dolgusunun yatay deplasmanları göz önüne alınırsa en çok yatay kuvvete maruz kalan F ayağının, köprüyü batı yönünde ittiği düşünülmüştür. Köprü döşemesinin batıya doğru hareketi nispeten E ayağının batıya olan hareketinden daha az olduğu anlaşılmaktadır.

Köprü kenar ayağı F ile E orta ayağının batıya olan hareketi Bullen ve Ortakları'nın hazırladığı 1993 tarihli raporda kayda geçirilmiştir [51]. A kenar ayağında oluşan hareketlerin birincil

sebebi genişleme derzi bağlantı noktasından dolayı olduğu söylenemez. Çünkü batı dolgusunda gözle görülür oturma meydana gelmemiştir.



Şekil 3.9: E ayağında oluşan yatay hareketler**.**

2005 yılında köprüde oluşan hasarlar için bir inceleme daha gerçekleştirilmiş olup, köprü de oluşan ek gerilmelere binaen oluşan hasarlar kayda geçirilmiştir. Şekil 3.1'de 1 numara ile gösterilen yerlerde doğu dolgusu üzerindeki yaya yürüyüş yolu üzerinde 20 cm yüksekliğinde bir basamak oluşmuş olup, daha önceki incelemelerde bu basamağa rastlanmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.10: a) doğu dolgusu tarafında yürüyüş yolunda meydana gelen hasarların ardından tamirat yapılmış hali, b) yapılan tamirat sonrası oluşan kot farkı. [39]

Ayrıca A kenar ayağında doğu dolgusunda meydana gelen yatay hareketlere binaen 10-15 cm kaymaların oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 3.11'de gösterildiği gibi genleşme derzinde çok az bir boşluğun kaldığı görülmektedir.



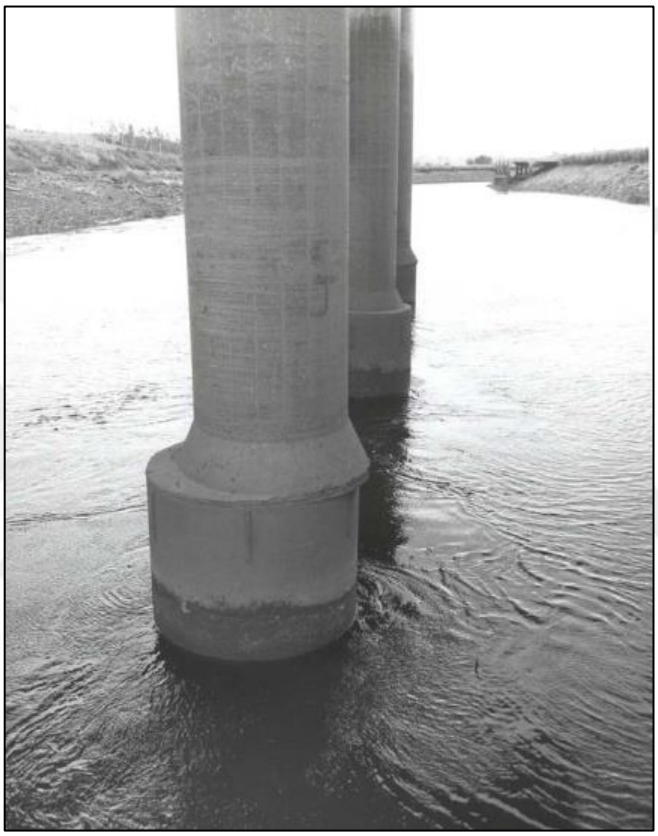
Şekil 3.11: Batı kenar ayağında oluşan yatay deplasmanlar.

Ayrıca Şekil 3.1'de 3 numara ile belirtilen yaklaşım döşemesi ile köprü döşemesi arasında ki bağlantı yerinde, yol kaplamasında yatay çekme çatlakları oluşmuştur. Şekil 3.1'de 4 numara ile belirtilen yerlerde yaklaşım dolgusunun güney şevinde yatay çekme çatlakları da gözlemlenmiştir.

2000 ve 2002 yıllarındaki araştırmalarda teşkil edilmiş olan inklometrelerin ölçümlerinden anlaşılacağı üzere gri alüvyonda yatay deplasmanların meydana geldiği ve bu deplasmanların yönünün nehir yatağı içine olduğu saptanmıştır. Daha rijit olan kum ve çakıl depozitlerinde bu hareketin gözlemlenmediği belirtilmelidir. Okumalardan doğu dolgusunun oturmaya devam ettiği anlaşılmaktadır.

Doğu dolgusu etrafında bulunan diğer köprü yapılarından Tees Demiryolu Köprüsünün doğu dolguları da bu oturmadan etkilenmiş olup Şekil 3.1'de 5 numara ile gösterilen lokasyonlarda tren trafik hızı düşürülmüş ve demiryolu köprüsünün doğu kenar ayağı güçlendirilmiştir.

Yapım sırasında C ve D akslarında yer alan bazı köprü ayak kolonları kolon aksına göre eksantrik olarak imal edildiği de tespit edilmiştir. (Bkz. Şekil 3.12)

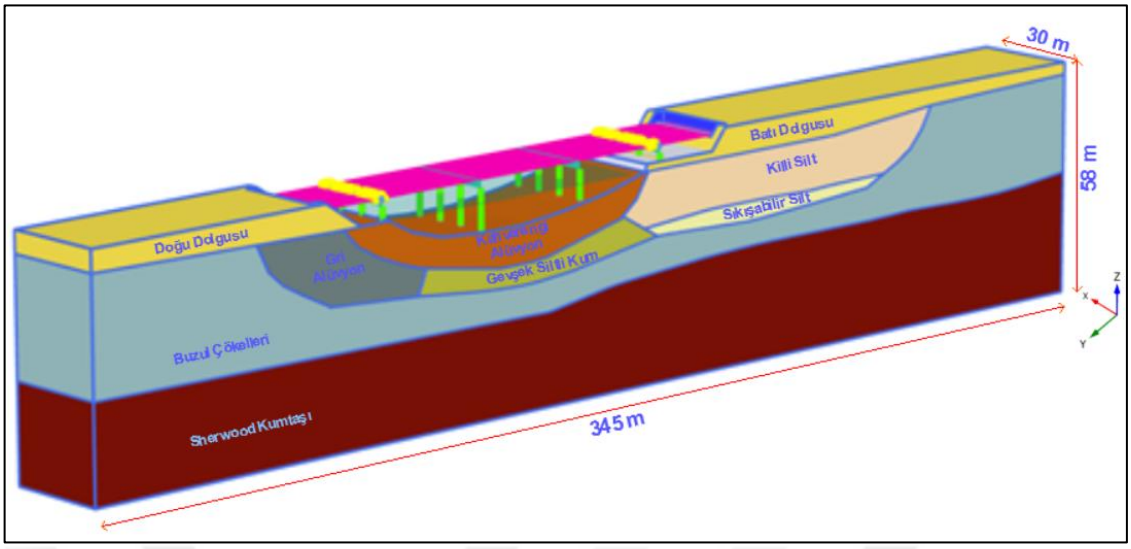


Şekil 3.12: C ve D akslarında imal edilmiş eksantrik köprü ayak kolonları.

3.2. PLAXIS 3D PROGRAMI İLE SONLU ELEMANLAR VAKAA ANALİZLERİNİN YAPILMASI

3.2.1. Vakanın Plaxis 3D Programı ile Modellenmesi

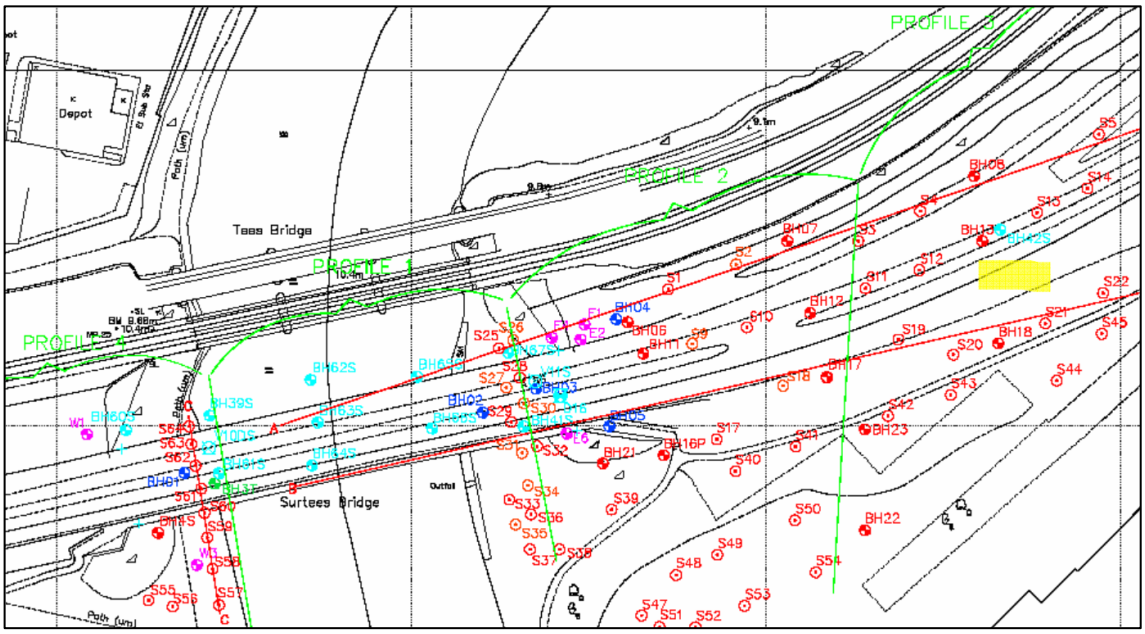
Üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinde Plaxis 3D (2013 ver.) programı kullanılmıştır. Surtees Köprüsünün yapım ve işletim ömrü boyunca geçirdiği evreler gözetilerek hazırlanan nümerik model Şekil 3.13'de verilmiştir. Geometrik olarak model genişliği x ekseninde 30 m genişliğinde, y yönünde 345 m uzunluğunda ve z yönünde 58 m derinliğinde oluşturulmuştur.



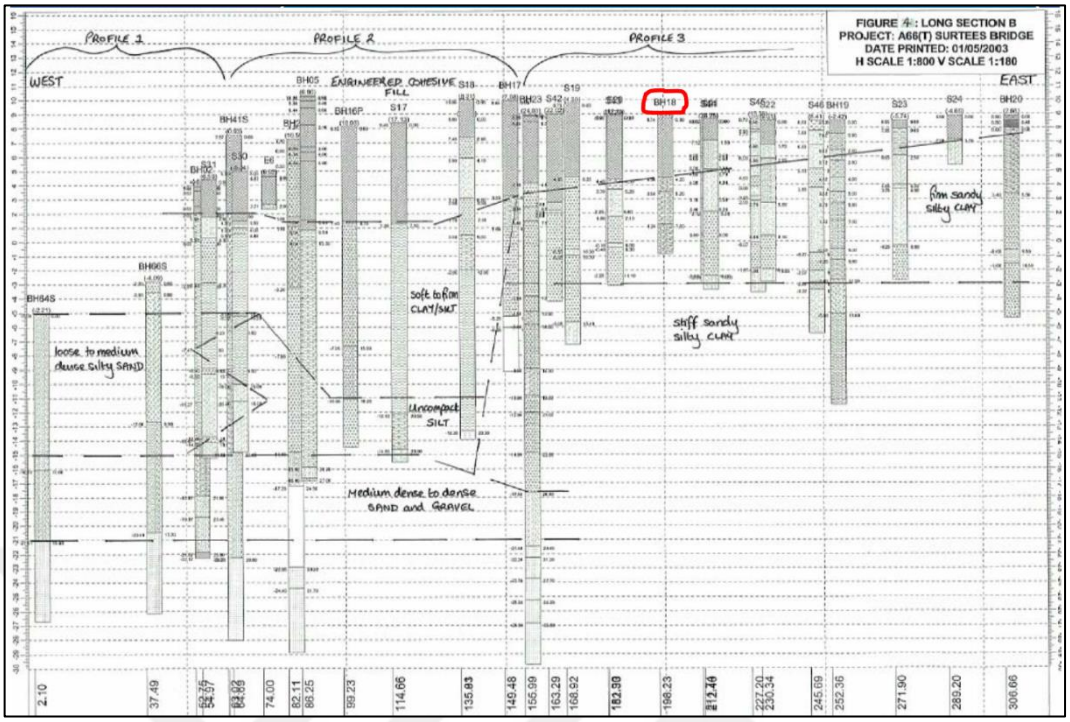
Şekil 3.13: Plaxis 3D sayısal modeli.

3.2.2. Zemin Tabakalarının Tanımlanması

Zemin tabakalarının tabakalanma eğilimleri, yatay hareketlerin ve oturma koşullarının yapılacak geri analizde, sahada tespit edilen olguların doğru yansıtabilinmesi adına jeolojik profilde belirtilen geometrik yönelimlere uygun olarak modele yansıtılmalıdır. Bunun için Surtees Köprüsü yenilenmesi sırasında Halcrow Group tarafından 2008'de yapılan ek sondajlar da dikkate alınarak doğu dolgusu zemin profili tekrar ele alınarak sahadaki tabakalanma modele yansıltılmıştır.



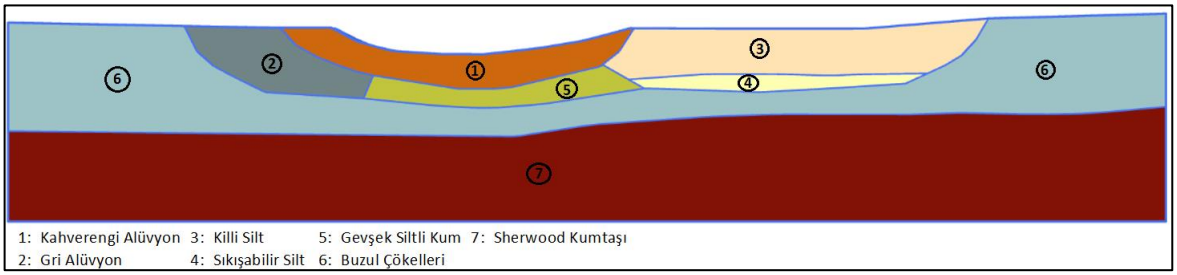
Şekil 3.14: Halcrow Group tarafından 2008'de yapılan saha çalışması sondaj planı. [52]



Şekil 3.15: Saha çalışmalarına ait sondaj yerleşim planı ve sondajlardan elde edilen jeolojik kesit. [52]

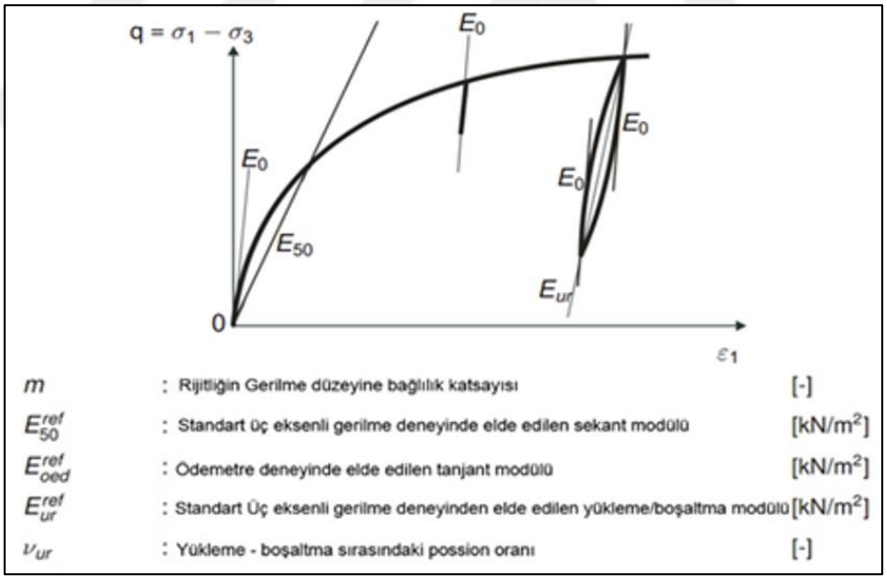
Halcrow Group tarafından 2008'de mevcut köprünün yürüklükte olan tasarım şartnamelerine uyguluğunun değerlendirilmesi adına bir rapor hazırlanmıştır [52]. Hazırlanan bu rapor için kapsamı saha deney çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İş bu saha çalışmalarına ait sondaj yerleşim planı ve sondajlardan elde edilen jeolojik kesit Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de verilmiştir. Yapım öncesi bulgulara dayalı oluşturulan jeolojik kesit (Bkz. Şekil 3.5) yapılan kapsamlı saha çalışması ile batı dolgusu alanında benzerlik gösterse de doğu dolgusu tarafında daha önce tanımlanmayan, dolgu altındaki kalın siltli kil tabakası altında yaklaşık 2 m kalınlığa sahip sıkışabilir silt tabakasının varlığına dikkat çekilmiştir. Doğu dolgusunun devam eden oturmalarının bu birime bağlanabileceği vurgulanmıştır. Hareket doğrultusu ve geometrik olarak tabakanın bulunduğu konum değerlendirildiğinde bu varsayımın haklılığı göz ardı edilememelidir. Hazırlanacak üç boyutlu modelde sıkışabilir silt tabakasının modellenmesi ve doğu dolgusu tarafında tabakaların yerleşiminin Halcrow Group tarafından hazırlanan bu raporda [52] belirtilmiş tabakalanma referans alınarak hazırlanması uygun görülmüştür.

Köprü yapımından sonra gözlenen hareketleri araştırmak adına yapılan incelemelere ait bulgulara göre, doğu dolgusunun oturduğu gri alüvyonel birim, ikincil etüt [41] verilerine dayanarak Killi Silt tabakası ve onun altında yer alacak Sıkışabilir Silt tabakası olarak tanımlanmıştır. Model kesit görünümü Şekil 3.16'da sunulmuştur.



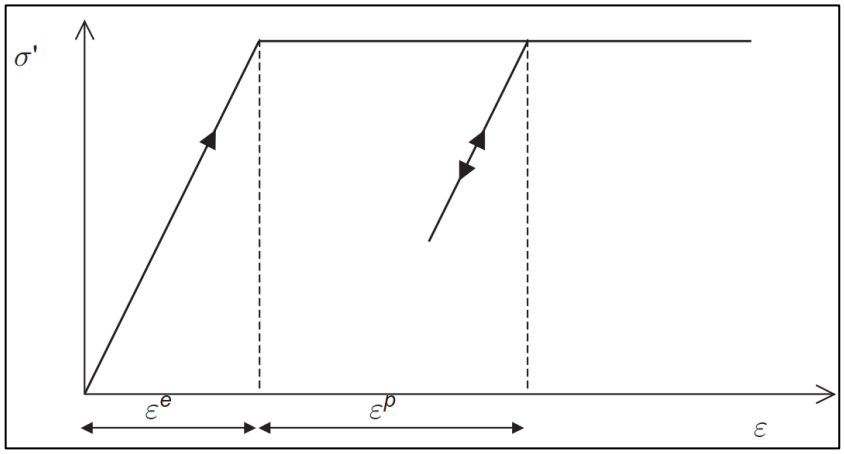
Şekil 3.16: Plaxis 3D nümerik modelinde tanımlanan zeminlerin kesit görünümü.

Halcrow Group tarafından hazırlanan bu raporda [52] yer alan zemin etüt araştırması temel alınarak nehir yatağındaki kahverengi alüvyonel birimin altındaki tabaka, Gevşek Siltli Kum tabakası olarak tanımlanmıştır. 1976'da sunulmuş olan geoteknik rapora [42] göre bu söz konusu tabakanın doğu dolgusu tarafına doğru silt ve kum içeriğinin arttığı belirtilmiştir. Dolgu ve Sherwood Kumtaşı birimleri lineer elastik-mükemmel plastik bünye modeli (Mohr-Coulomb (M-C)) ile tanımlanırken diğer birimler için pekleşen bünye modeli (Hardening Soil (HS)) seçilmiştir.



Şekil 3.17: Plaxis Pekleşen Zemin bünye modeli girdileri ve tanımlamaları. [53]

Pekleşen bünye modeli zeminin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışını, Şekil 3.17'de gösterildiği gibi matematiksel olarak rijitliğin gerilme düzeyine bağlılık katsayısı(m), Standart üç eksenli gerileme deneyinden elde edilen sekant modülü($E_{ref}50$), Ödeometre deneyinden elde edilen tanjant modülü (E_{refoed}), standart üç eksenli deneyinden elde edilen yükleme/ boşaltma modülü($E_{ref}ur$) ve Yükleme-boşaltma sırasında elde edilen Possion oranı(ν_{ur}) parametrelerine bağlı olarak tanımlar.



Şekil 3.18: Lineer elastik-mükemmel plastik bünye modeli gerilme şekil değiştirme grafiği. [53]

Lineer elastik-mükemmel plastik bünye modeli (Mohr-Coulomb(M-C)) gerilme düzeyi göçmeye ulaşmadıkça gerinimlerin sabit modüle bağlı olarak üretileceği bir bünye modelidir. Malzeme göçmeye ulaşmadıkça gerilme değişimlerinde elde edilen tüm deplasmanlar elastiktir ve geri alınabilir. Göçme yüküne ulaşıldığında ise oluşan gerinim plastik olarak oluşturulur ve geri alınamaz. Lineer elastik-mükemmel plastik bünye modeli (Mohr-Coulomb (M-C)) için gerilme şekil değiştirme grafiği Şekil 3.18'de verilmiştir.

Hesaplamaların yapılacağı Plaxis 3D yazılımında, gerilme değişimlerine bağlı olarak üretilecek ilave boşluk suyu basınçları konsolidasyon ile sönümlenir. Konsolidasyon ile sönümlenecek ilave boşluk suyu basınçları konsolidasyon sonucu oluşacak deplasmanlara çevrilir ve hesaplamalara yansıtılır. Sönümleme kavramı, tanımlanan zaman, düşey/yatay permabilite değerlerine bağımlı olarak Biot teorisini [54] baz alarak hapsolan suyun poroz alanda dalga teorisi ile hareket ettiği varsayımına dayalı olarak hazırlanan hesap algoritması ile hesaplanan ilave boşluk suyu gerilmelerinin nodal deplasmanlara çevrilmesidir. İş bu halde tanımlanacak permabilite değerleri kritik öneme sahip olmaktadır. Yapılan laboratuvar testleri ile saptanmış hacimsel sıkışma katsayısı (m_v), tekrar sıkışma katsayısı (C_r) ve başlangıç boşluk oranına bağlı olarak hesaplanan numunelerin alındığı derinlikteki efektif gerilme değerleri Denklem 3.2 ile hesaplanmış, bu gerilme altındaki permabilite değeri Denklem 3.3 ile saptanmıştır.

$$\sigma'_v = \frac{C_r}{2.3 * m_v * (1+e_0)}$$

Denk. 3.2

$$k = C_v * m_v * \gamma_w$$

Denk. 3.3

Hesaplamaların özet tablosu Tablo 3.5'de sunulmuştur.

Tablo 3.5: Laboratuvar değerleri ile hesaplanan permabilite değerleri.

Zemin Brimleri	Hacimsel Sıkışma Katsayısı	Sıkışma İndisi	Su Birim Hacim Ağırlığı	Tekrar Sıkışma İndisi	Başlangıç Boşluk Oranı	Düşey Permabilite	Efektif Gerilme
	m_v	C_v	γ_{su}	C_r	e_0	kz	σ'_v
	m2/MN	m2/yıl	kN/m3	-	-	m/s	kN/m2
Buzul Çökelleri	0.07	1.83	9.807	0.03	0.48	3.98099E-11	125.9023
Gri Alüvyon	0.08	10.9	9.807	0.03	0.93	2.70993E-10	84.47849
Kahverengi Alüvyon	0.24	5.6	9.807	0.03	0.99	4.17677E-10	27.31047
Viktorya Dolgusu	0.11	1.83	9.807	0.06	0.81	6.25583E-11	131.0244

Özellikle dolgu malzemeleri ve buzul çökelleri için hesaplanan değerler Zemin etütleri hesaplanan düşey sıkışma katsayısı ve gerilme düzeyi baz alınarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu parametreler ilaveten yatay permeabilite katsayıları literatüre ve ön analizler ile vakaa gelişimini doğru modellenmesine uygun olacak şekilde seçilmesi uygun görülmüştür. Yatay permabilte değerleri Tablo 3.7'de sunulduğu üzere hesaplanan düşey permeabilite katsayısının yaklaşık iki katı olduğu düşünülerek kullanılmıştır. Kullanılan permeabilite parametreleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6: Plaxis 3d vakaa analizleri için seçilen permeabilite değerleri.

Zemin Birimleri	Düşey Permabilite	Düşey Permabilite	Yatay Permabilite	Yatay Permabilite
	kz m/s	kz m/gün	kx=ky m/s	kx=ky m/gün
Buzul Çökelleri	3.98E-11	3.44E-06	1.20E-10	1.03E-05
Gri Alüvyon	2.71E-10	2.34E-05	8.14E-10	7.03E-05
Kahverengi Alüvyon	4.18E-10	3.61E-05	1.25E-09	1.08E-04
Viktorya Dolgusu	6.26E-05	5.41	6.26E-05	5.41
Killi Silt	3.98E-11	3.44E-06	1.20E-10	1.03E-05
Sıkı Siltli Kum	1.32E-07	0.113615	2.63E-07	0.22723
Sherwood Kumtaşı	6.94E-06	0.6	6.94E-06	0.6
Sıkışabilir Silt	3.98E-11	3.44E-06	1.20E-10	1.03E-05

Tablo 3.7: Yatay ve düşey permeabilite katsayıları arasındaki ilişki. [53]

Parametre açıklamaları	Semboller
Düşey sıkışma katsayısı	$c_v = k/(m_{vX}\gamma_w)$
permabilite katsayısı	K
Su birim hacim ağırlığı	Yw
Hacimsel sıkışma katsayısı	m_v
Düşey permabilite katsayısı	kv
Yatay permabilite katsayısı	kh = 2 to 10 k_v

Tasarım parametreleri, saha ve laboratuvar testlerinden elde edilen bulgular çerçevesinde seçilerek tanımlanmıştır ve Tablo 3.8 ve Tablo 3.9.'da sunulmuştur.

Tablo 3.8: Pekleşen Bünye Modeline Sahip Birimlerin Malzeme Parametreleri.

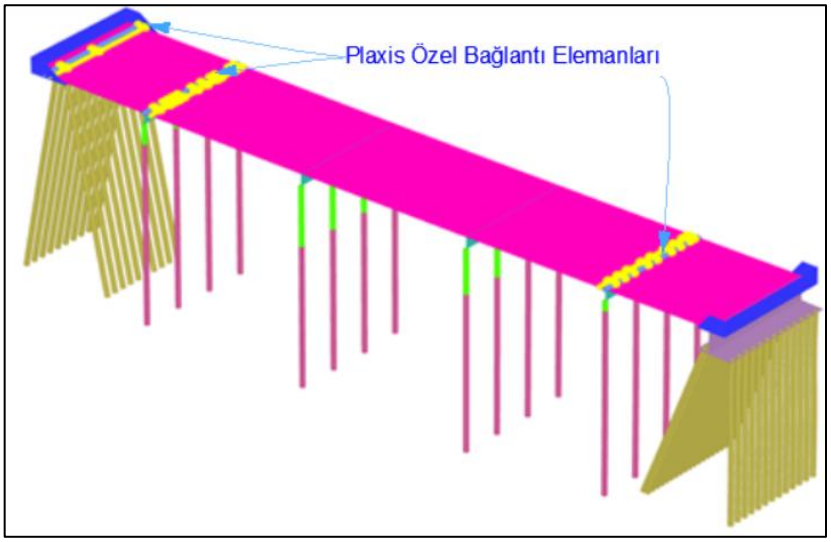
	Killi Silt	Buzul Çökelleri	Gri Alüvyon	Kahverengi Alüvyon	Gevşek Siltli Kum	Sıkışabilir Silt
Drenaj Tipi	Undrained A	Undrained B	Undrained B	Undrained B	Undrained B	Undrained A
Doğal Birim Hacim Ağırlığı γ_n	17.95	28.05	17.95	17.85	17.95	17.95
Suya Doygun Birim Hacim Ağırlığı γ_d	18.10	21.09	18.10	17.89	18.10	18.10
Başlangıç Boşluk Oranı e_{int}	1	0.48	0.93	0.99	0.93	1.2
Deviatorik ref. modülü, E_{50}ref (MPa)	2.396	30	2.134	4.576	10	2.108
Sıkışma referans modülü, E_{oed}ref (MPa)	1.917	30	1.707	1.76	10	1.687
	Killi Silt	Buzul Çökelleri	Gri Alüvyon	Kahverengi Alüvyon	Gevşek Siltli Kum	Sıkışabilir Silt
Drenajsız Kayma Mukavemeti, Su (kPa)	-	140	38	27	38	-
Tablo 3.5: Pekleşen Bünye Modeline Sahip Birimlerin Malzeme Parametreleri (devamı)						
Drenajlı Kayma Mukavemeti, c' (kPa)	0.1	-	-	-	-	0.1
Kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)	26	-	-	-	-	24

Tablo 3.9: Mohr-Coulomb Bünye Modeline Sahip Birimlerin Malzeme Parametreleri.

	Sherwood Kumtaşı	Victorian Dolgusu
Drenaj Tipi	Drained	Drained
Doğal Birim Hacim Ağırlığı γ_d	19	18.15
Suya doygun Birim Hacim Ağırlığı γ_d	21	18.16
Başlangıç Boşluk Oranı e_{int}	0.5	0.81
Elastik Deformasyon modülü, E (MPa)	60	45
Poisson oranı, ν	0.25	0.3
Drenajlı Kayma Mukavemeti, c' (kPa)	1	1
Kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)	38	34
Dilatasyon Açısı ψ' (°)	8	4

3.2.3. Yapısal Elamanların Tanımlanması

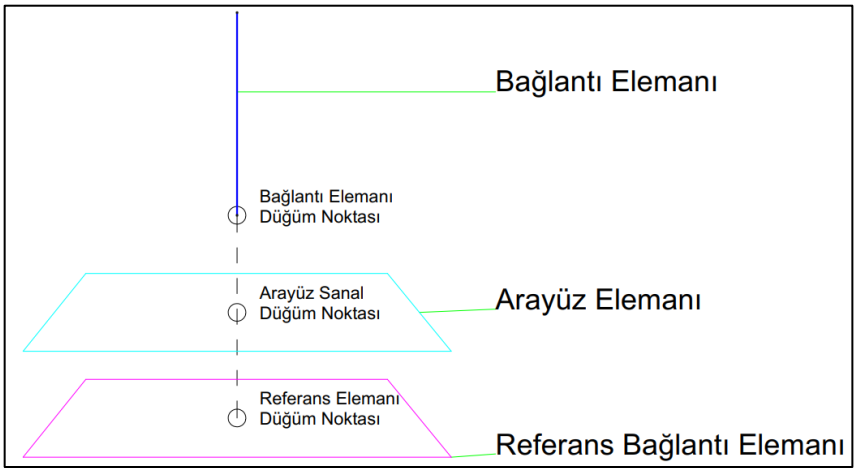
Köprü kenar ve orta ayakları için gömülü olarak teşkil edilen kazık yapısal elemanları, Plaxis modelinde gömülü kazık elemanlar olarak tanımlanmıştır. Kazıkların zemin ile teması olmayan kısımları ise kiriş elemanları olarak tanımlanmıştır. Batı dolgusunda kenar ayağı temeli kazıklar ile desteklenmiş olup köprü platformu ile olan kayıcı mesnet tipi bağlantısı Plaxis özel bağlantı elemanları kullanılarak tanımlanmıştır.



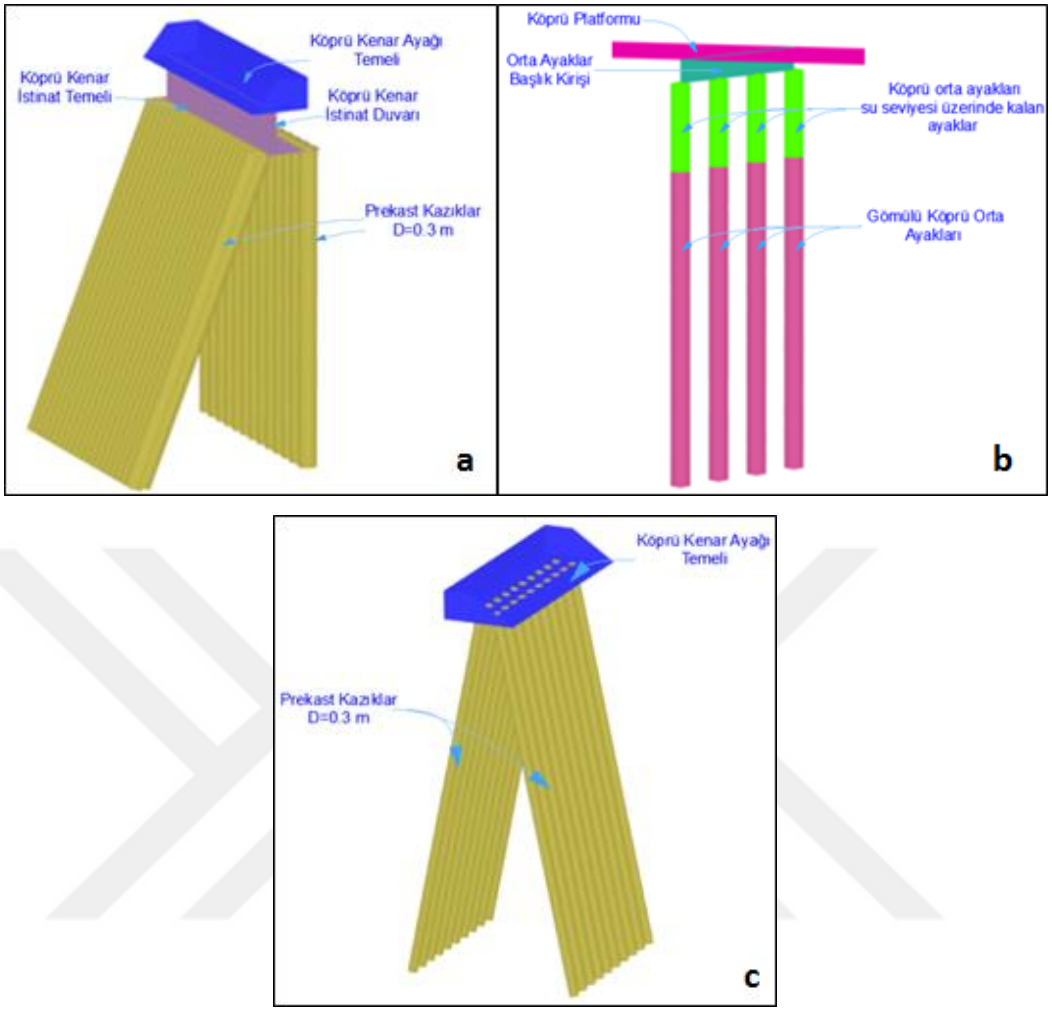
Şekil 3.19: Plaxis 3D modeli özel bağlantı elemanlarının gösterimi.

Plaxis 3D programında aksi belirtilmedikçe tüm bağlantılar rijit olarak tanımlanmaktadır. Bağlantı noktasında serbestlik derecelerinden herhangi birinde serbestlik tanımlanması gerektiğinde yapısal elemanlara özel bağlantı elemanları tanımlanması gerekmektedir. Özel bağlantı elemanı ile herhangi bir serbestlik derecesini serbest bırakılması için bağlantı noktasını paylaşacak yapısal elemanlar tanımlanmalıdır. Bu elemanlardan serbestliği kullanacak bağlantı elemanı bağlantılandığı referans bağlantı elemanı ile yapısal düğüm noktası paylaşımı olmalıdır.

Referans elemanına mutlaka sanal düğüm noktası yaratılması adına bir arayüz elemanı atanmalıdır. Atanan arayüz elamanı, atandığı referans elemanın tüm yapısal düğüm noktalarına karşılık gelecek sanal düğüm noktaları oluşturarak, kullanıcı tanımlı arayüz katsayısı ile etkileşim parametrelerini bu sanal noktalara uygulayabilmeye imkan sağlamaktadır. Özel bağlantı noktası örneğinde ise oluşturulan sanal düğüm noktalarından, referans ve bağlantı elemanın ortak kullandığı düğüm noktalarındaki kuvvet paylaşımı kullanıcı tanımına göre gerçekleştirilir. Özel bağlantı elemanlarının şematik gösterimi Şekil 3.20'de verilmiştir. Programda özel bağlantı noktaları Şekil 3.19'da gösterildiği gibi sarı renkli noktalar olarak gösterilir.



Şekil 3.20: Özel bağlantı elemanlarının şematik gösterimi.



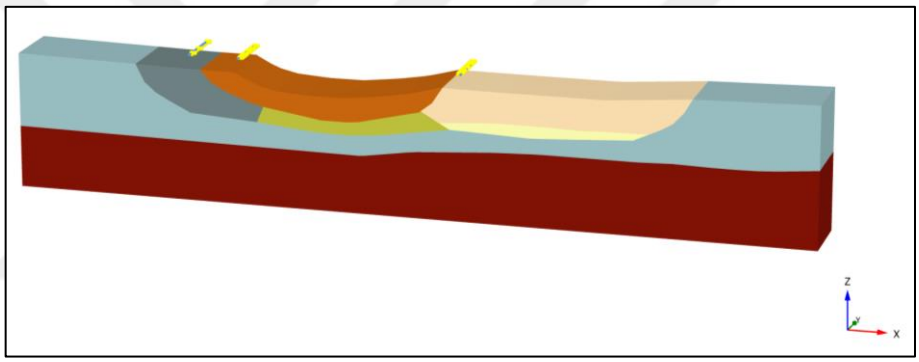
Şekil 3.21: Yapısal elemanlar; a) doğu köprü kenar ayağı, b) köprü orta ayakları, c) batı köprü kenar ayağı Plaxis 3D nümerik model detayları.

Köprü orta açıklık ayakları için başlık kirişi düzlemsel eleman olarak tanımlanarak B ve E akslarında köprü platformu bağlantısı özel bağlantı elemanları ile kayıcı mesnet olarak modellenmiştir. Doğu köprü kenar ayağında yer alan istinat yapısı düzlem elemanlar ile teşkil edilmiştir.

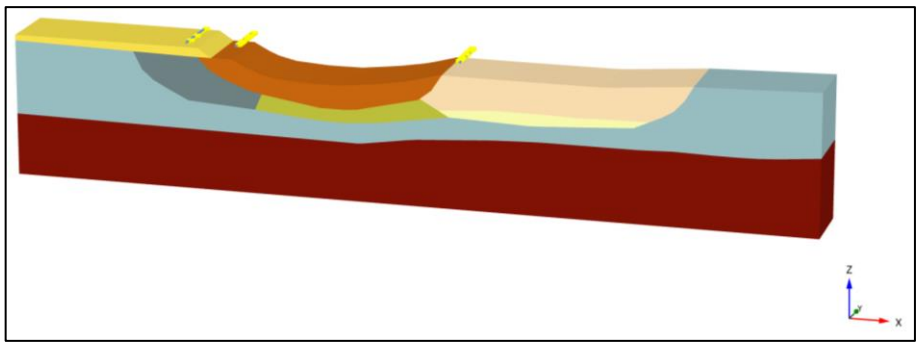
3.2.4. İnşaat Aşamalarının Tanımlanması ve Başlangıç Gerilmelerinin Oluşturulması

Analiz aşamaları sırası ile; (1) Başlangıç gerilme koşullarının oluşturulması, (2) 1. Kademe batı dolgusunun yapılması (m), (3) 2. Kademe batı dolgusunun yapılması (m), (4) 3. Kademe batı dolgusunun yapılması (m), (5) Batı dolgusunun konsolidasyonu (365 gün), (6) 1. Kademe doğu dolgusunun yapılması (m), (7) 2. Kademe doğu dolgusunun yapılması ve kenar ayak imalatı (m), (8) 3. Kademe doğu dolgusunun yapılması (m), (9) Kazık elemanların imalatının yapılması, (10) Köprü tabliyesinin aktif edilmesi, (11) Servise alınmadan önce beklenmesi (60

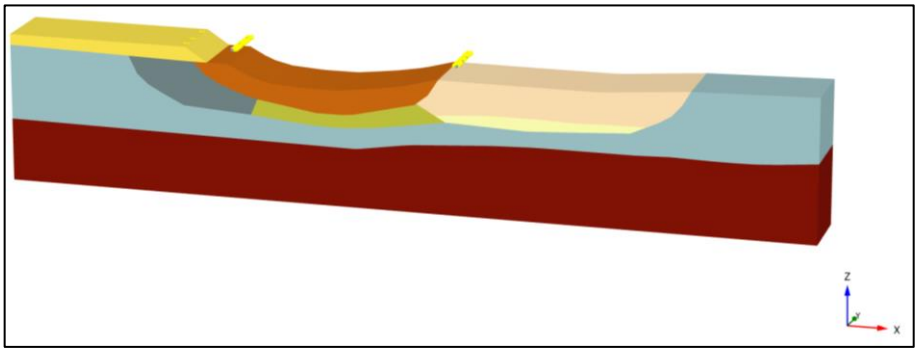
gün), (12) 1982 Yılına kadar geçen sürede konsolidasyon analizinin yapılması, (13) 1986 Yılına kadar geçen sürede konsolidasyon analizinin yapılması, (14) 1991 Yılına kadar geçen sürede konsolidasyon analizinin yapılması, (15) 1993 Yılına kadar geçen sürede konsolidasyon analizinin yapılması, (16) 1995 Yılına kadar geçen sürede konsolidasyon analizinin yapılması, (17) 2000 Yılına kadar geçen sürede konsolidasyon analizinin yapılması, (18) 2002 Yılına kadar geçen sürede konsolidasyon analizinin yapılması, (19) 2003 Yılına kadar geçen sürede konsolidasyon analizinin yapılması, (20) 2004 Yılına kadar geçen sürede konsolidasyon analizinin yapılması, (21) 2008 Yılına kadar geçen sürede konsolidasyon analizinin yapılması (22) tüm ilave boşluk basınçları sönümlene kadar konsolidasyon analizinin yapılması olarak tanımlanmıştır. **Şekil 3.22**'ten **Şekil 3.33**'e kadar analiz aşamalarının Plaxis ekran görüntüleri sunulmuştur.



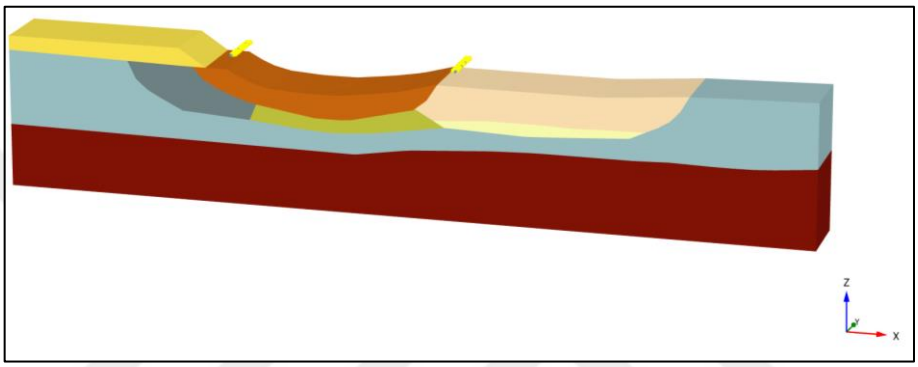
Şekil 3.22: Başlangıç gerilme koşullarının oluşturulması.



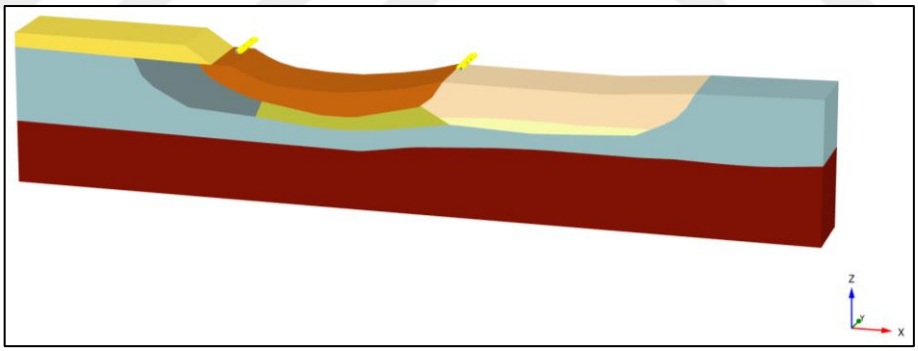
Şekil 3.23: 1. Kademe batı dolgusunun yapılması.



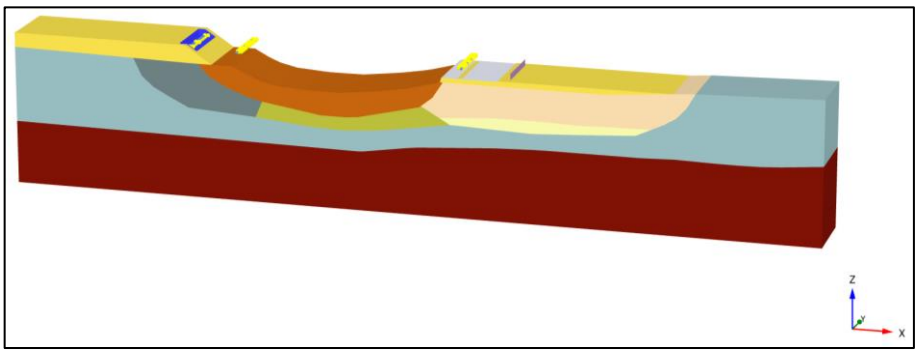
Şekil 3.24: 2. Kademe batı dolgusunun yapılması.



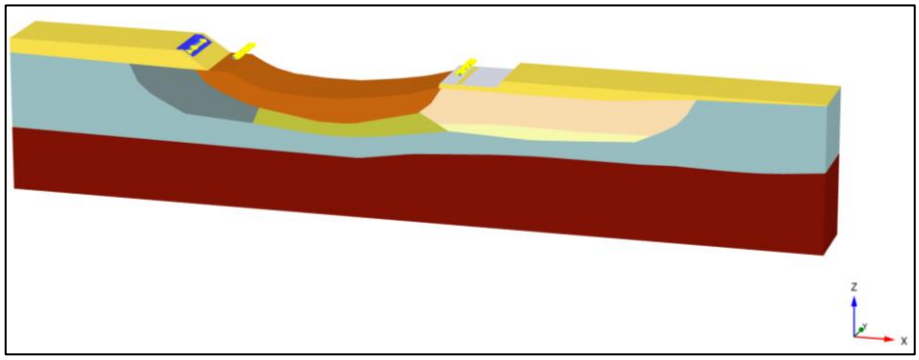
Şekil 3.25: 3. Kademe batı dolgusunun yapılması.



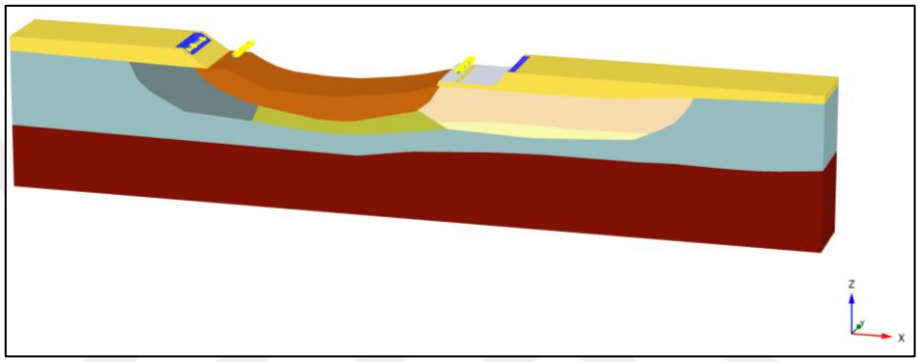
Şekil 3.26: Batı dolgusunun konsolidasyonu (365 gün).



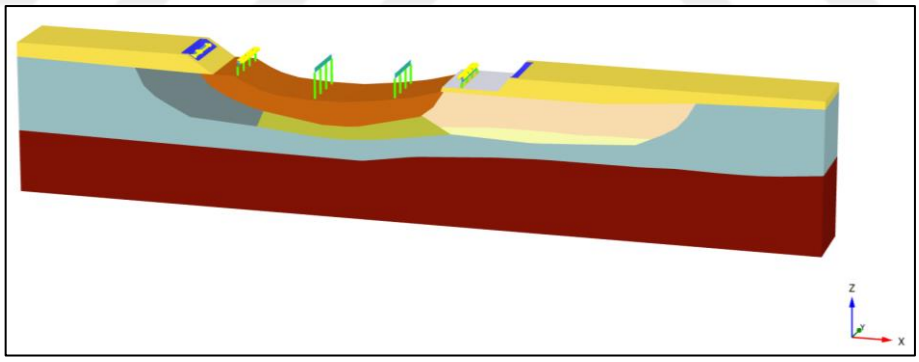
Şekil 3.27: 1. Kademe doğu dolgusunun yapılması.



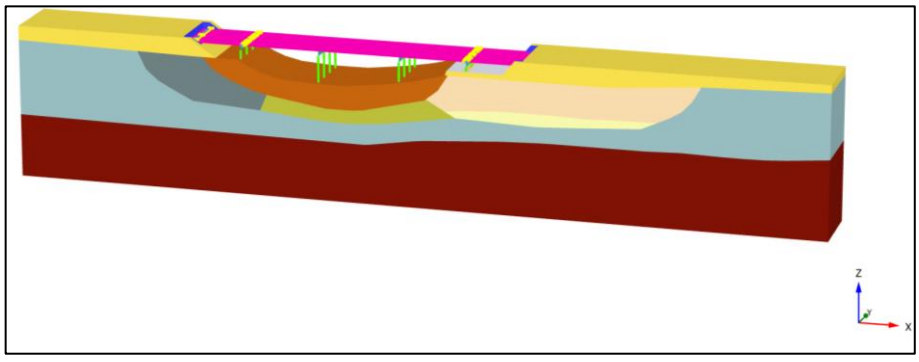
Şekil 3.28: 2. Kademe doğu dolgusunun yapılması.



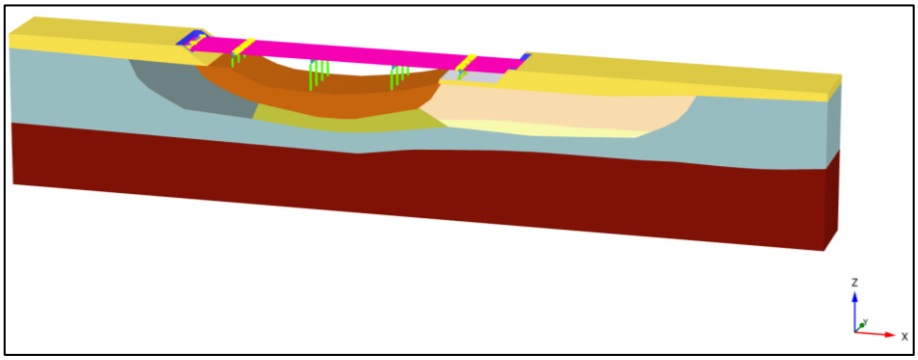
Şekil 3.29: 3. Kademe doğu dolgusunun yapılması ve kenar ayak imalatı.



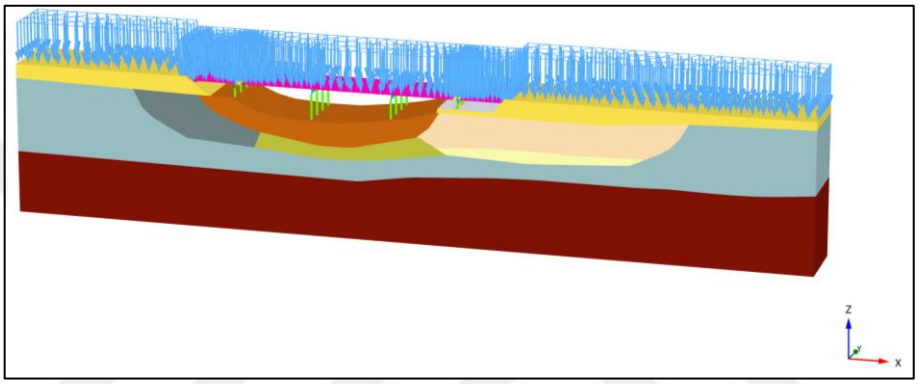
Şekil 3.30: Kazık elemanların imalatının yapılması.



Şekil 3.31: Köprü tabliyesinin aktif edilmesi.



Şekil 3.32: Servise alınmadan önce beklenmesi.



Şekil 3.33: Geçen yıllara göre konsolidasyon analizlerinin yapılması.

4. BULGULAR

Bu Bölümde Surtees Köprüsü'nün servis ömrü boyunca yaklaşım dolgularında meydana gelen oturmaları ve gözlemlenip rapor edilmiş köprü elemanlarında ve yaklaşım dolgularında meydana gelen hasarları Plaxis 3D (versiyon 2013) programı ile gerçekleştirilmiş vaka analizin sonuçları sunulacaktır.

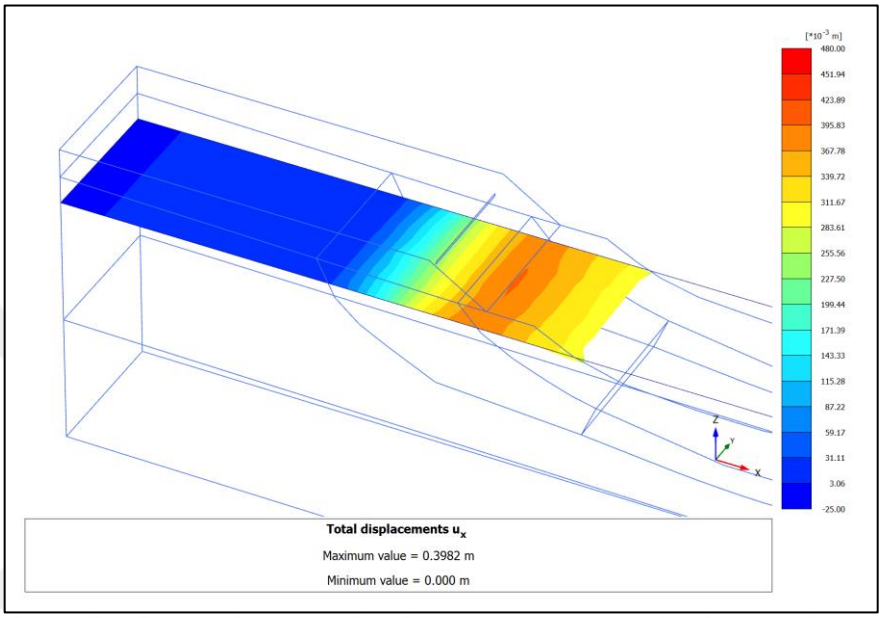
Yapılan analizlerde Bölüm 3.2.4'de sunulan inşa aşamalarından 1'den 4 numaralı inşa aşamasına kadar ve 6'dan 10 numaralı inşa aşamalarına kadar olan inşa aşamaları için sabit su tablası seviyesine göre hidrostatik gerilmelerin oluşturulduğu, drenajsız malzemeler için ilave boşluk suyu basınçlarının Skempton parametrelerine göre oluşturulduğu, kısa dönem koşulları altında mekanik çözümleme kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Söz edilen kısa dönem inşa aşmaların haricinde kalan aşamalar, yapının servis süresince ya da yapı imalatında bekleme süresi olarak geçen zamanda zeminlerin ve dolguların konsolidasyon oturmalarını hesaplamak adına, zamana bağlı konsolidasyon analizlerinin yapıldığı analizler olarak tanımlanmıştır. Konsolidasyon analizlerinde Skempton parametrelerine, sabit seviyeli su tablasına ve gerilme değişimlerine bağlı olarak programca oluşturulmuş ilave boşluk suyu basınçları, her zemin için bölüm 3.2.2'de sunulduğu üzere her zemin için tanımlamış permabilite katsayısı değerlerine ve geçen zaman esas alınanarak sönümlendiğinde oluşacak deplasmanlar hesaplanmaktadır.

4.1. VAKAA ANALİZİ İLE HESAPLANAN DEPLASMANLARIN RAPOR EDİLMİŞ DEPLASMANLAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI

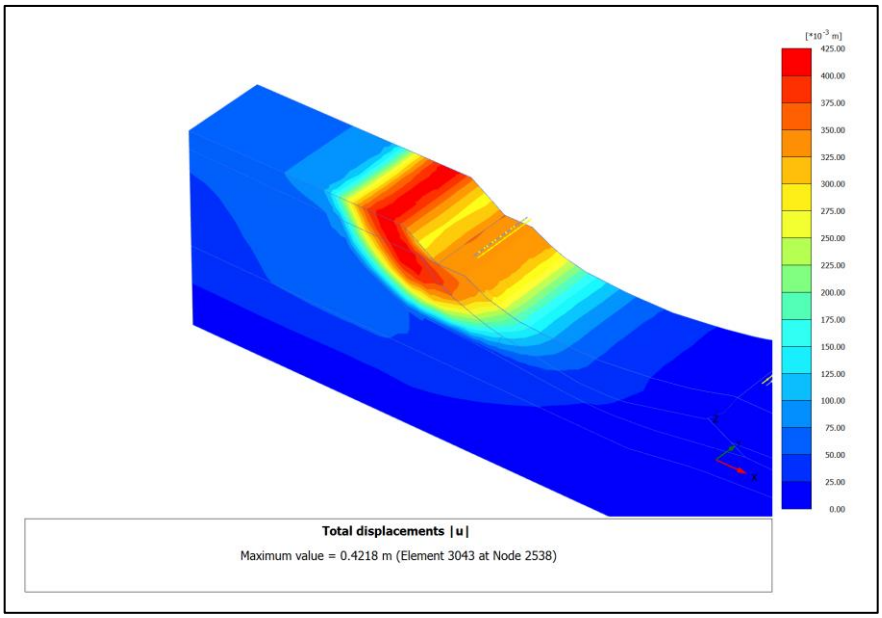
Surtees Köprüsü'nün yapımında karşılaşılan problemlerin geri analizi yapıldığında batı dolgusunun yapılıp 1 yıl süreyle konsolidasyon oturmalarının tamamlanmasına karşılık gelen (5) numaralı aşama sonuçları incelendiğinde vakada ekstansometreden gözlenen 400 mm konsolidasyon oturması değerlerine yakın, 32.5 cm değeri elde edildiği görülmüştür.

Orijinal zemin seviyesinin 4 m altında inklinometrelerden 95 mm ila 140 mm arasında yatay deplasman ölçüldüğü bilinmekte olup bu değerin okunduğu konum net olarak belirtilmemiştir. Analizlerde okunan 95 mm ila 145 mm arasındaki yatay deplasman, Şekil 4.6'da gösterildiği üzere dolgu alın şevinden 15 m geride elde edilen değere yakın olduğu görülmektedir. Nehir yatağında yer alan kahverengi alüvyon tabakasının dolgu yüklemesi ile konsolidasyon analizinden önceki 4. aşama analizine kadar Şekil 4.1'de görüleceği üzere maksimum 39.8 cm

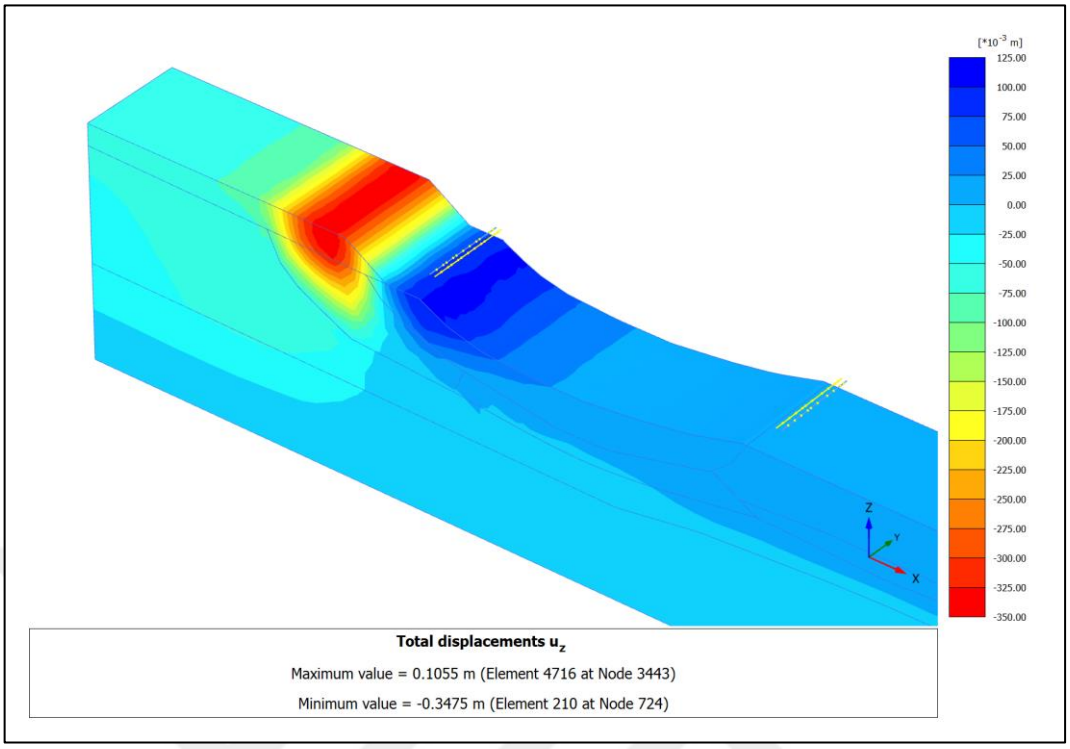
yatay deplasman yaptığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.7'de gösterildiği üzere analiz sonucundan yaklaşım dolgusundan dolayı oluşan ek gerilmeler ile nehir yatağındaki kahverengi alüvyon tabakasının yatayda nehir yatağına doğru yer değiştirdiği, dolgu altında olan gri alüvyon tabakasının da bu yönelimde hareket ettiği, 5. Aşama konsoldasyon analizi ile beraber yatay yer değiştirmenin yaklaşık olarak 7.5 cm daha geliştiği anlaşılmaktadır.



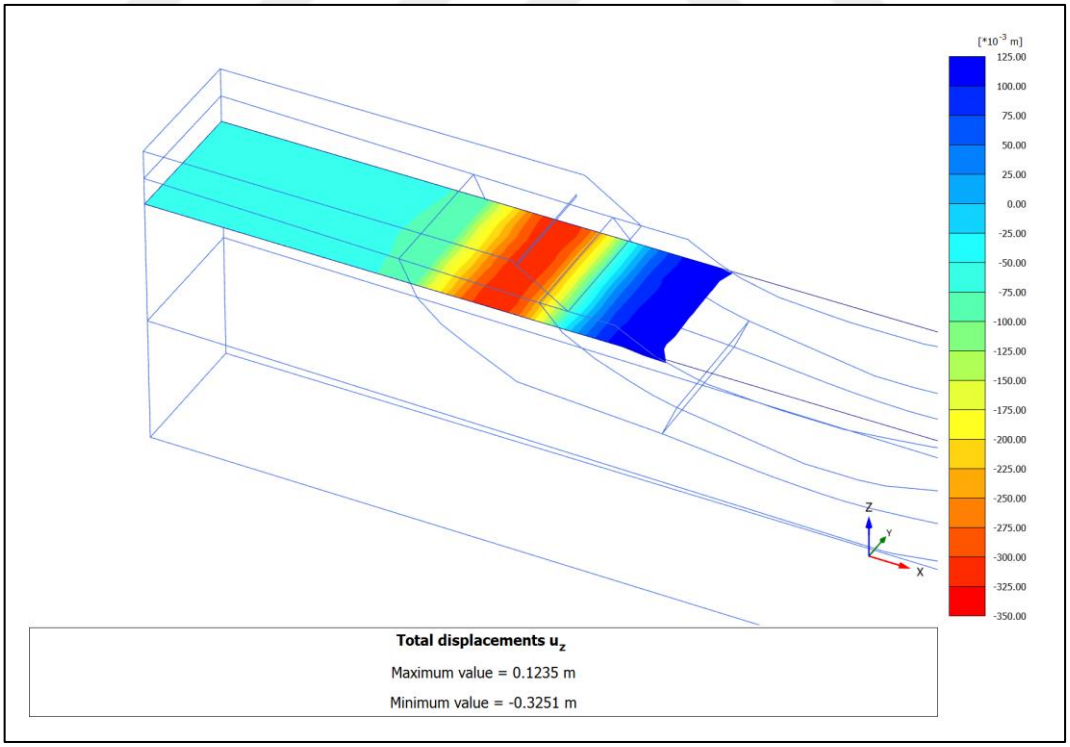
Şekil 4.1: Batı Dolgusunda yapım süreci boyunca konsolidasyon öncesi oluşan oturma miktarı.



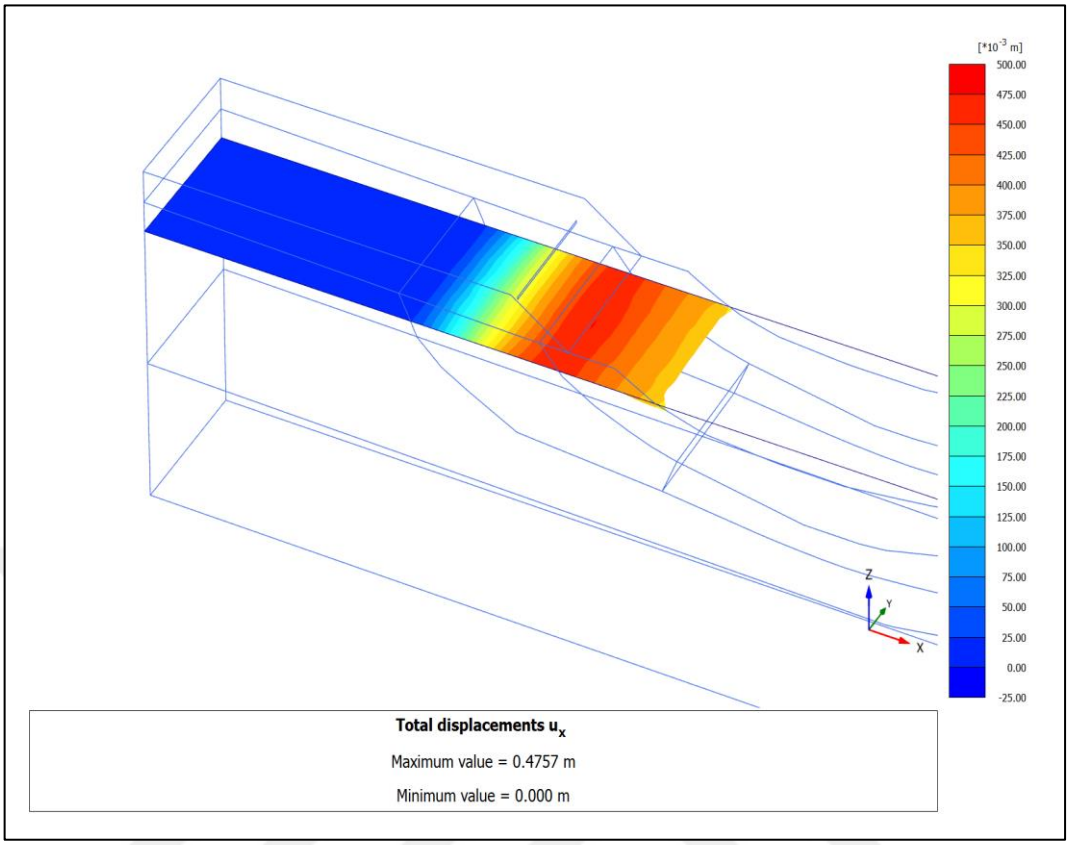
Şekil 4.2: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında oluşan toplam deplasman miktarı.



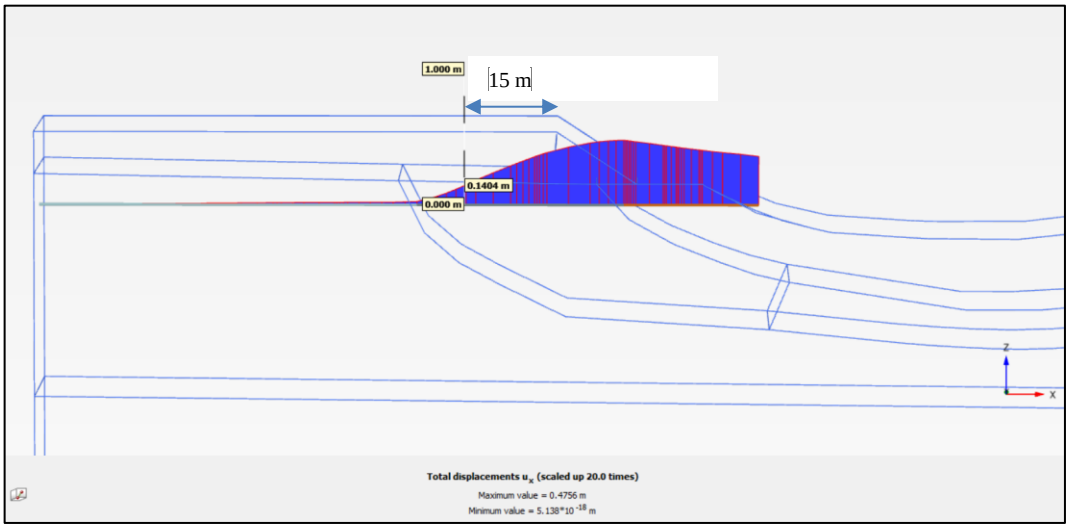
Şekil 4.3: Batı Dolgusununda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında oluşan oturma miktarı.



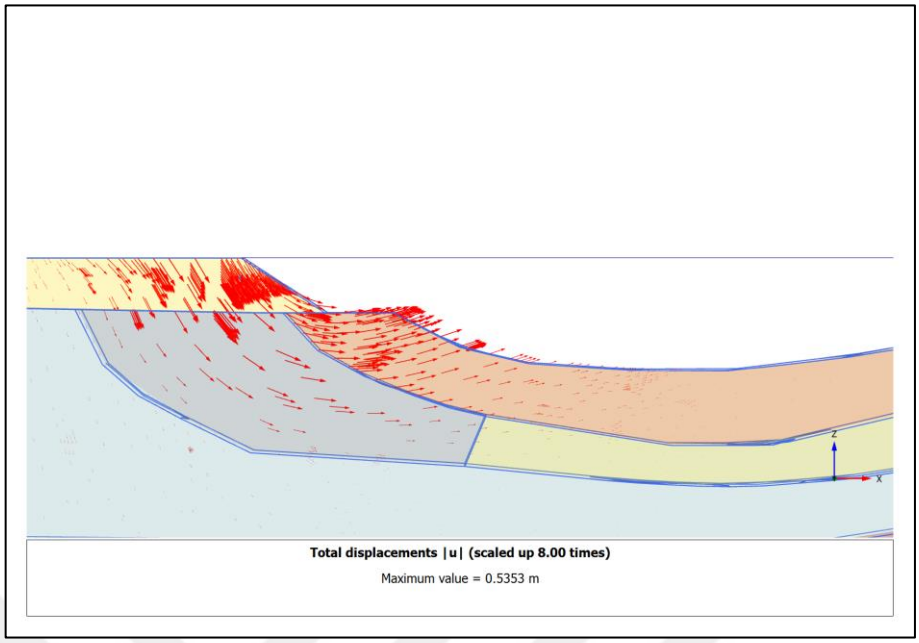
Şekil 4.4: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında original Zemin seviyesinden 4 m altında oluşan oturma miktarı.



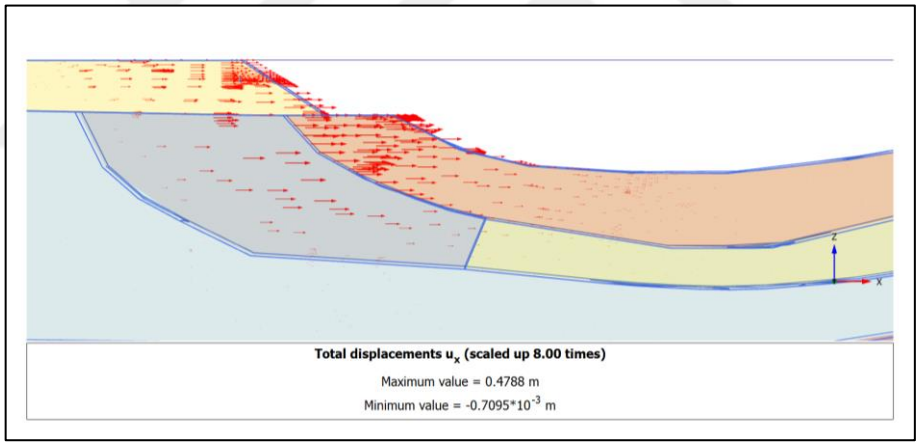
Şekil 4.5: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında original Zemin seviyesinden 4 m altında oluşan yatay deplasman miktarı.



Şekil 4.6: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında original zemin seviyesinden 4 m altında oluşan yatay deplasman miktarı için oluşturulan çizgisel kesit.

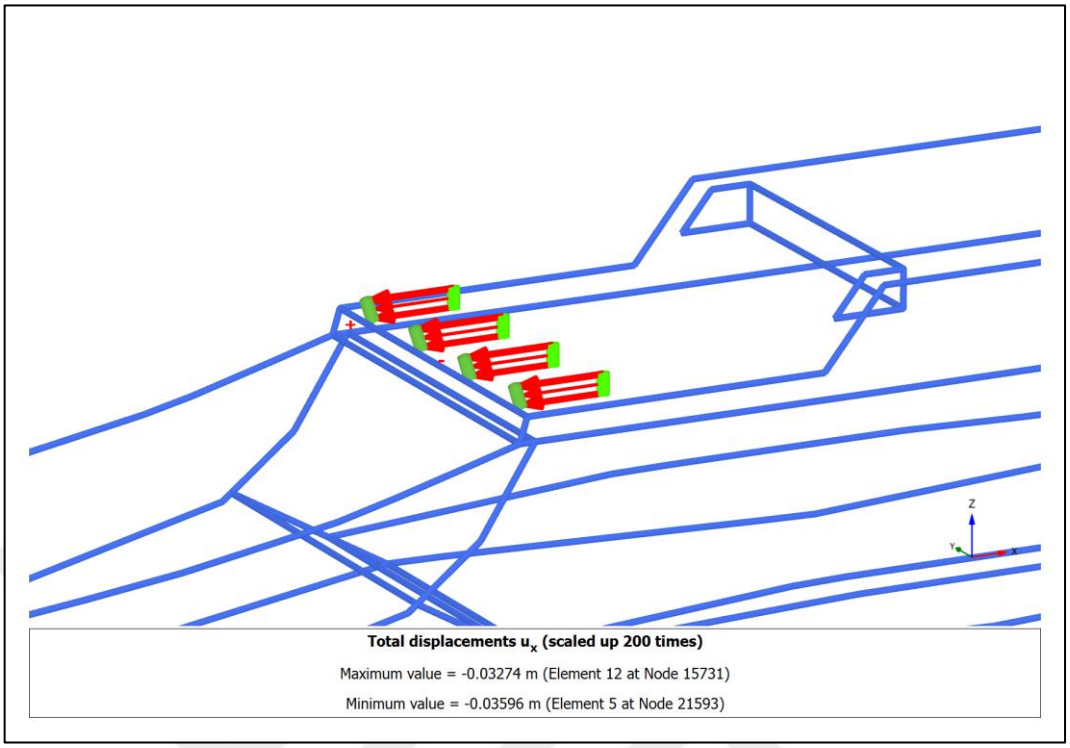


Şekil 4.7: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında toplam deplasman miktarı ve yönelimi.

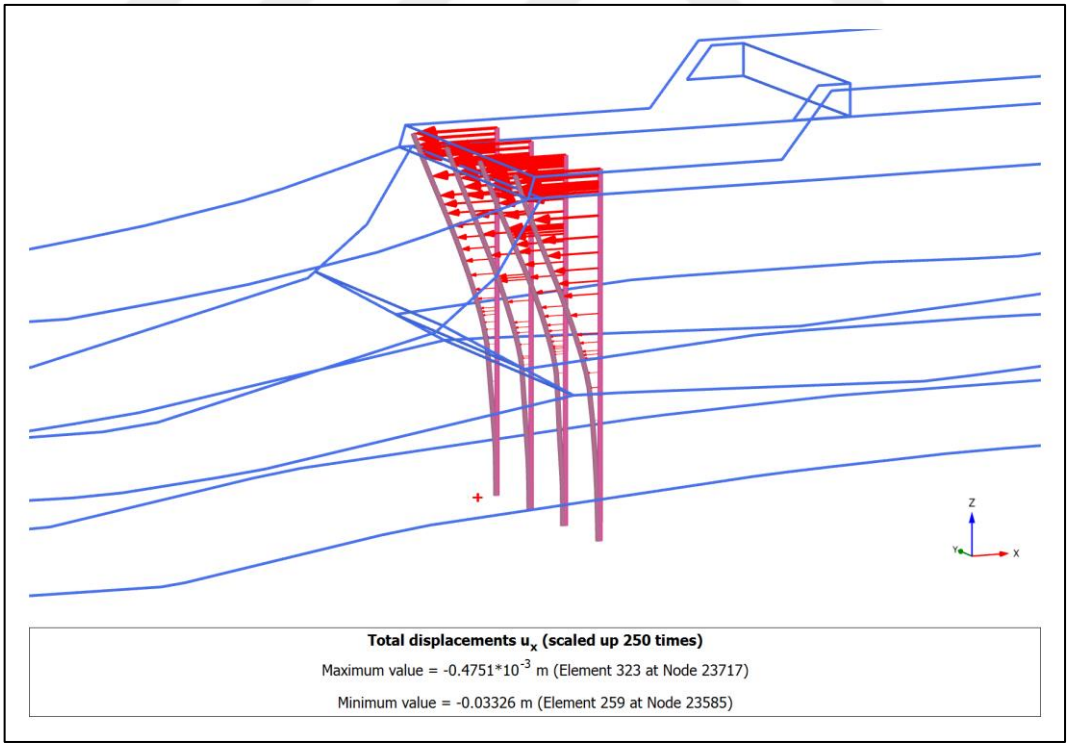


Şekil 4.8: Batı Dolgusunda 1 yıl konsolidasyon süresi sonrasında oluşan yatay deplasman miktarı ve yönelimi.

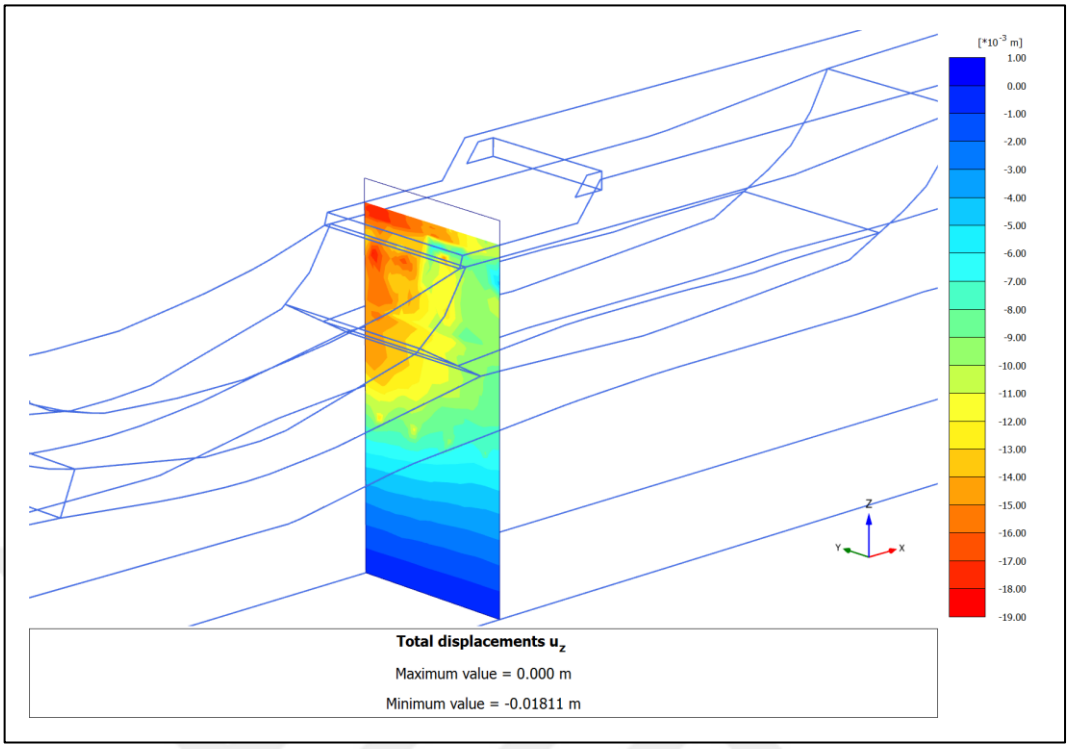
1 Kasım 1980'de E ayağının etrafında gözlenen 70 mm ile 115 mm civarında oturma, analizlerde Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterildiği üzere imalat tamamlandığı 11 numaralı analiz sonunda 1.8 ila 4.5 cm civarında hesaplanmıştır. Raporda E ayağının nehir yatağına doğru ötelendiği, kazıklar tamamlandıktan sonra 40 mm öne ötelenme gerçekleştiği kaydedilmiştir. Analizlerde kazıkların tamamlandığı aşamada Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da görüleceği üzere ayak başlığında 3.6 cm, kazık başında ise 3.3 cm nehir yatağına doğru yatay deplasman oluşmuştur.



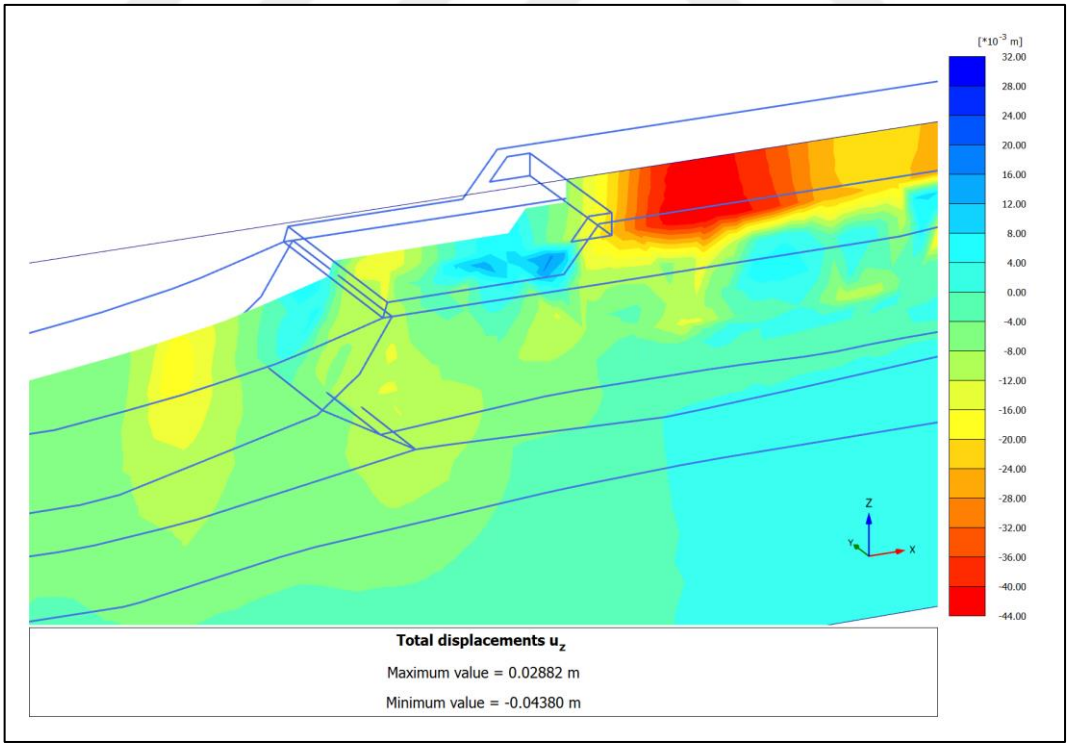
Şekil 4.9: Köprü E orta ayağı yatay deplasman miktarı ve görünümü.



Şekil 4.10: Köprü E orta ayağı kazıkları yatay deplasman miktarı ve görünümü.

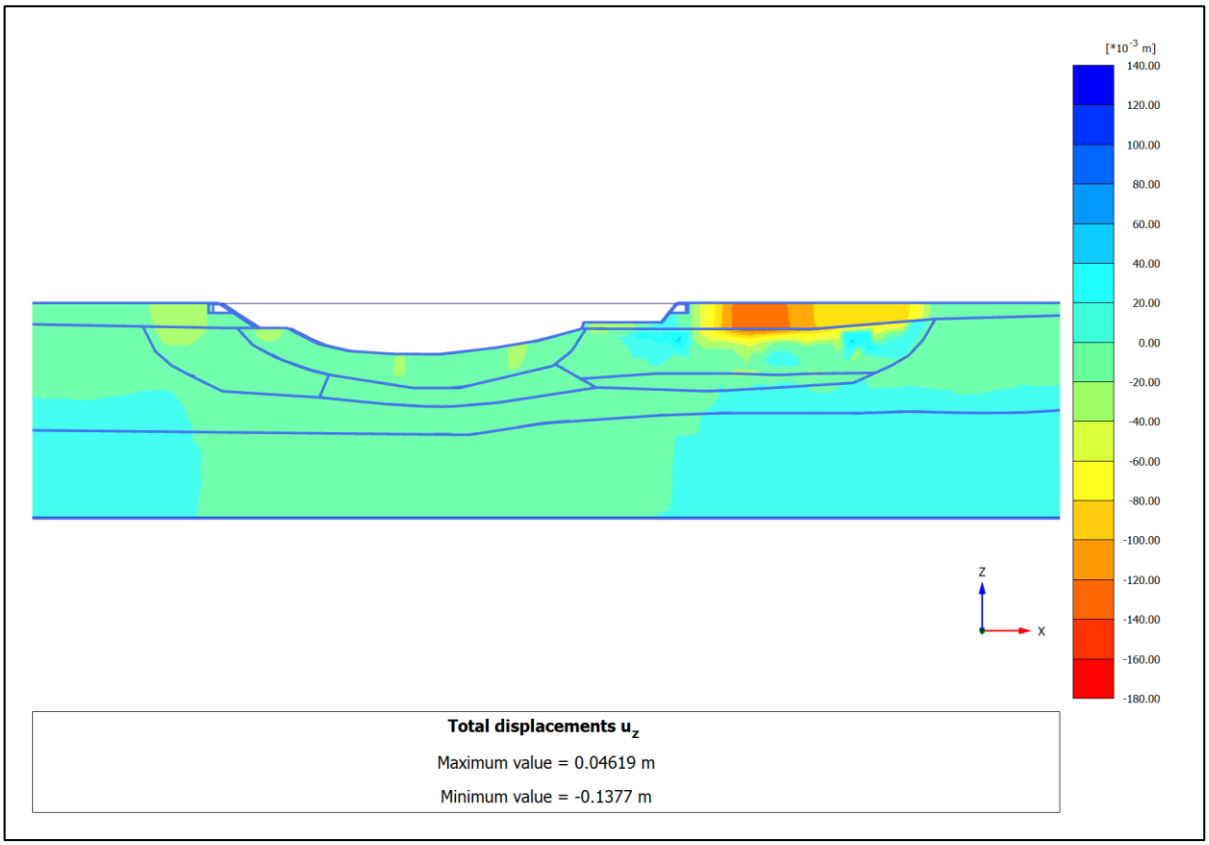


Şekil 4.11: Köprü E orta ayağı hizasından alınan kesitte oluşan oturma miktarı ve görünümü.



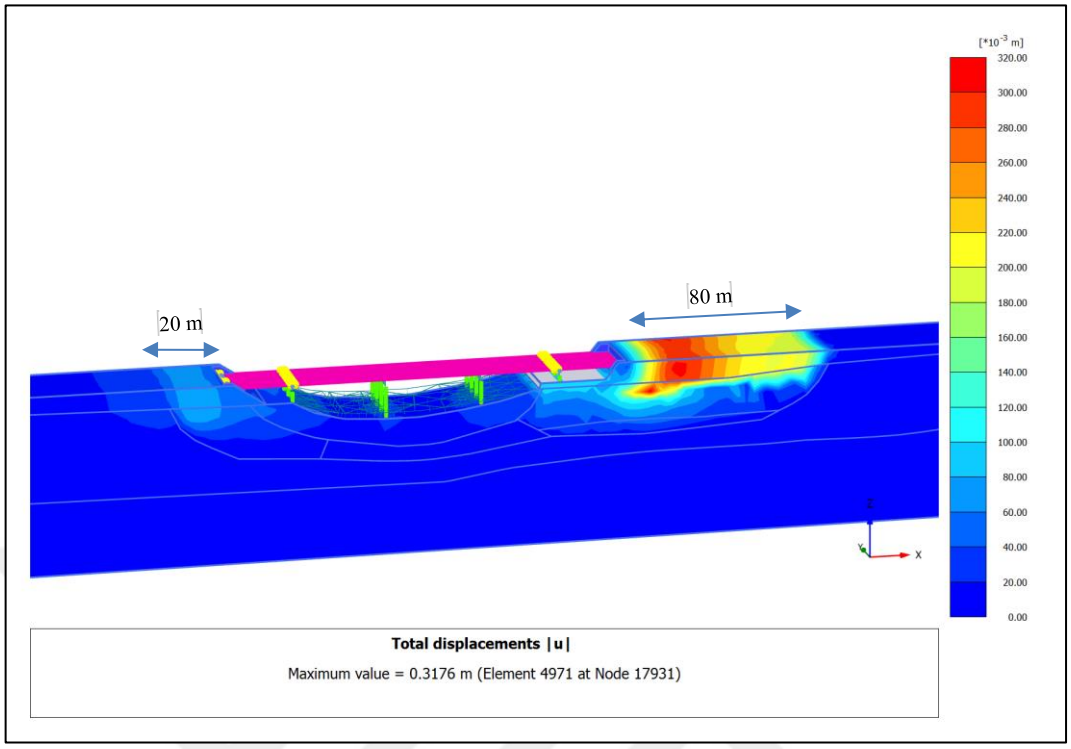
Şekil 4.12: Köprü E orta ayağı hizası normalinden alınan kesitte oluşan oturma miktarı ve görünümü.

1982 Yılında hazırlanan raporda doğu dolgusunun arkasında dikkat çeken oturmalar gözlenmiş, izleme sistemi ile takip edilmesi ve düzeltilmesi önerilmiştir. Köprü yapımından,1982 yılına kadar geçen 2 yıl için yapılan 12. aşama konsolidasyon analizi sonunda doğu dolgusunda 13.7 cm oturmalar hesap edilmiştir.



Şekil 4.13: Köprü yapımı tamamlanmasından 1982 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizi sonucunda oluşan oturmaları gösterir model boyuna kesiti.

Mayıs 1991'de havadan çekilen fotoğraflarda görülen kaplama yüzeyindeki farklı renkler, yol yüzeyinin her iki yaklaşım dolgusu tarafında da tamir edildiğini göstermektedir. Mayıs 1995'de havadan çekilen fotoğraflarda yüzey kaplamasında yenileme yapıldığı, bu yenilemelerin batı yaklaşım dolgusu tarafında geniş çaplı, doğu dolgusu tarafında ise 100 m'nin üzerinde olduğu belirtilmektedir. Şekil 4.14'de gösterildiği üzere analizlerde batı dolgusu tarafında oturmalardan etkilenen 20 m'lik, doğu dolgusu tarafında ise yaklaşık 80 m'lik alan olduğu görülmektedir.

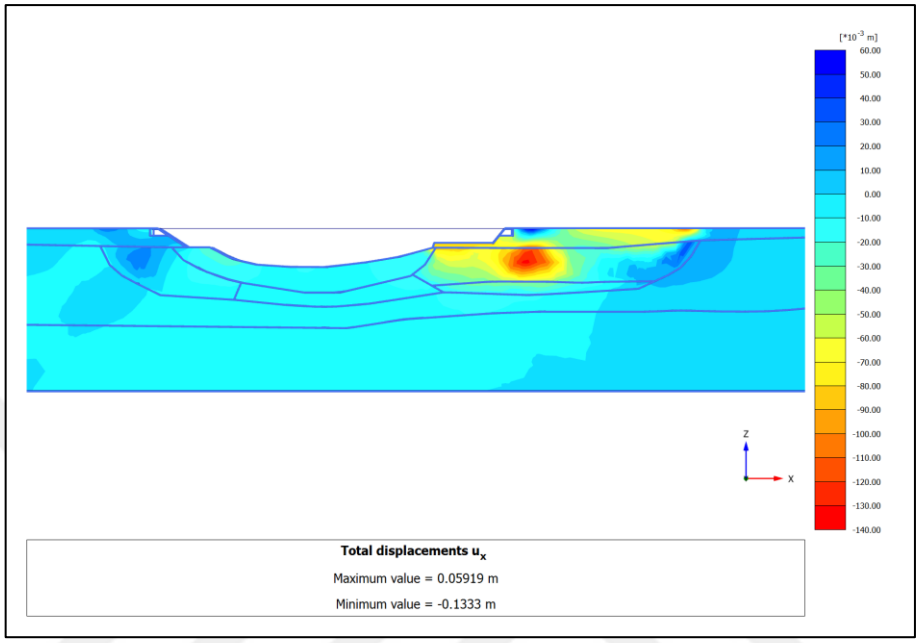


Şekil 4.14: 1991 ve 1995 yıllarında tespit edilen oturmalardan etkilenmiş alanların genişliğini gösterir analiz toplam deplasman çıktısı.

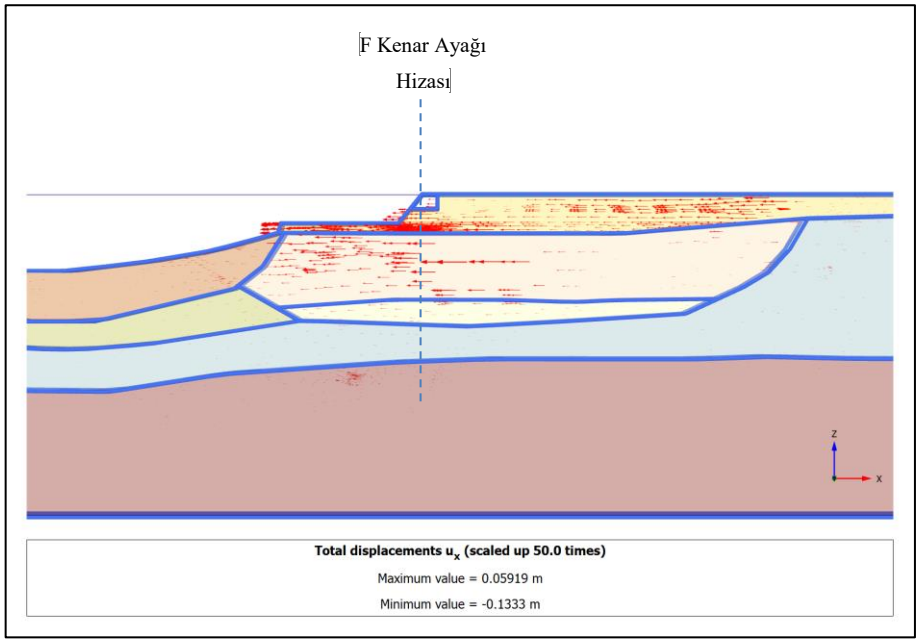
2000 yılında yapılan gözlemlerde köprü döşemesinin, A ve B ayakları göz önünde bulundurulduğunda batı yönünde hareket ettiği tespit edilmiştir. Doğu yaklaşım dolgusunun yatay deplasmanları göz önüne alınırsa en çok yatay kuvvete maruz kalan F ayağının, köprüyü batı yönünde ittiği düşünülmüştür. 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri sonunda doğu dolgusundan F ayağının temel seviyelerinde 8-9 cm ve arkasındaki bölgelerde Şekil 4.15'de gösterildiği üzere yatay deplasmanlar nehir yatağına doğru 5-6 cm mertebesindedir. Yatay deplasmanların yönelimleri Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Yatay deplasmanları, Şekil 4.17'de gösterildiği üzere F ayağı hizasında model ortasından alınan çizgisel kesit ile incelediğimizde meydana gelen deplasmanların büyük bölümünün killi silt ve sıkışabilir silt tabakalarında meydana geldiği anlaşılmaktadır.

F kenar ayağı ve diğer yapısal elemanların yatay deplasmanlar altındaki davranışı tüm sistem için Şekil 4.18'de, doğu kenar ayağı için Şekil 4.19'da, batı ayağı için Şekil 4.20'de verilmiştir. Doğu dolgusunda yer alan F kenar ayağı, dolgu oturmalarına paralel yatayda 4-5 cm civarında doğu yönünde deplase olmuş ve köprü tabliyesi ile rijit bağlantılı olmasından dolayı bu hareket ile tabliyeyi de doğu yönünde 4-5 cm civarında ittiği anlaşılmaktadır. Batı dolgusunda yer alan A ayağı batı yönünde 1- 2 cm civarında dolgu hareketine binaen yatay yönde deplase olduğu

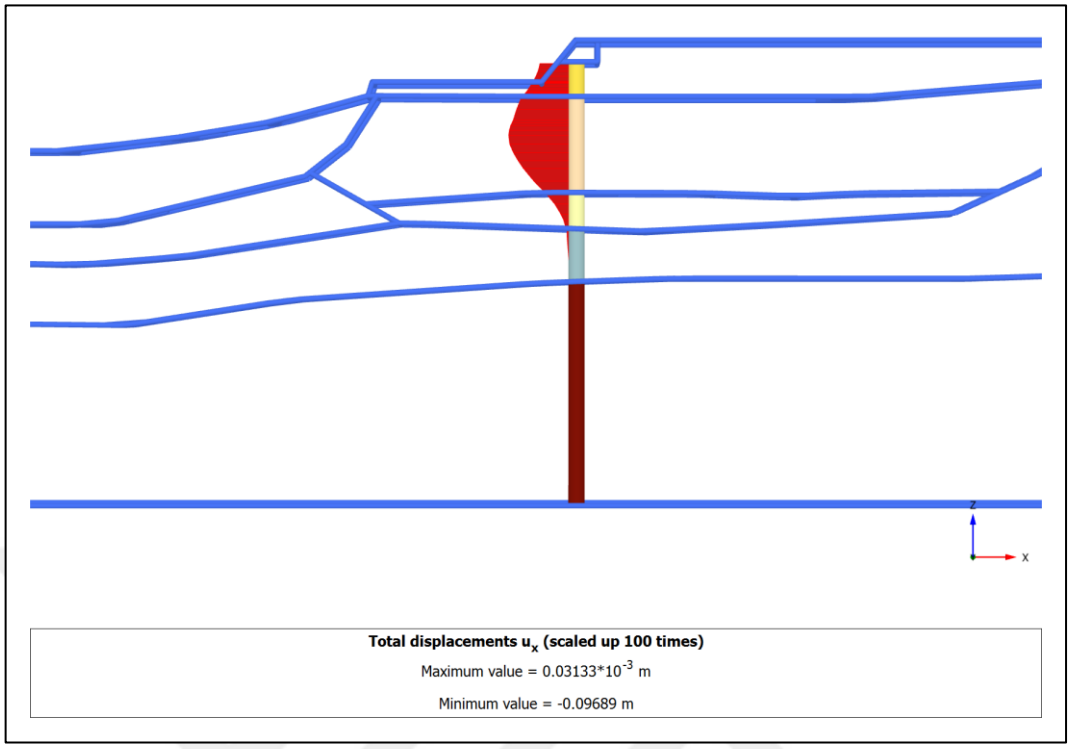
sonuçlardan anlaşılmaktadır. F ayağı tarafından doğu yönünde itilen köprü tabliyesi bu yatay hareketi tabliye boyunca üniform olarak A ayağına kadar devam ettiği Şekil 4.20'de görülmektedir.



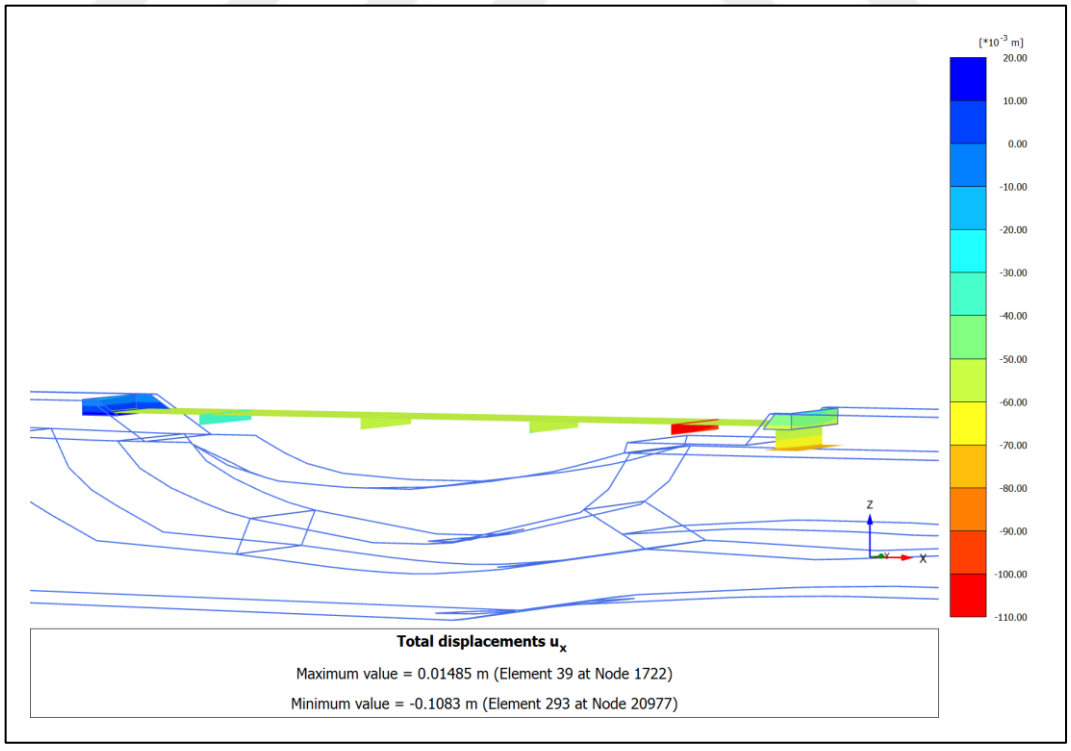
Şekil 4.15: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, model boyuna kesiti yatay deplasman sonuç çıktısı görünümü.



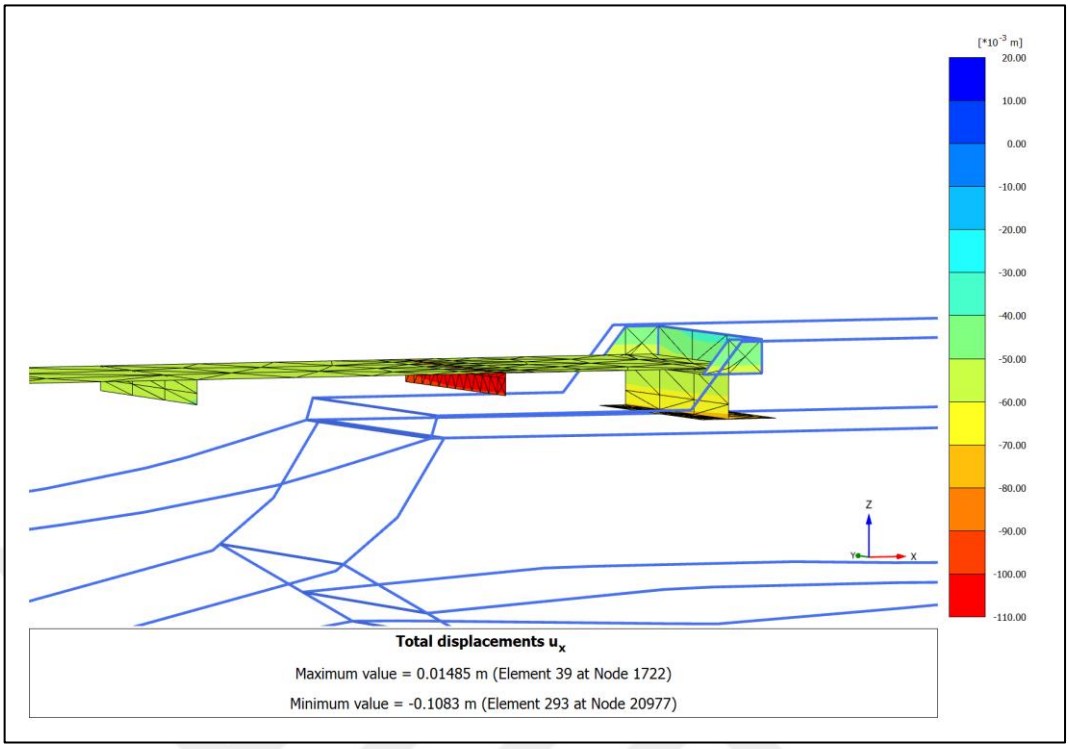
Şekil 4.16: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, model boyuna kesiti yatay deplasmanların yönelim görünümü.



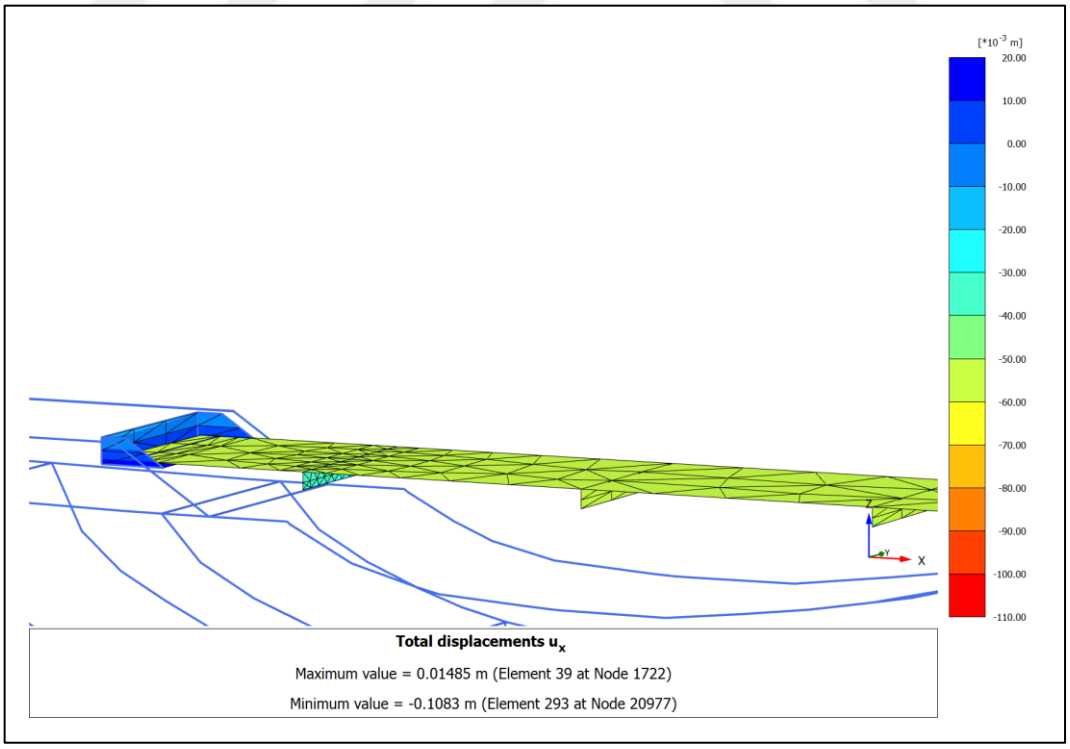
Şekil 4.17: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, F ayağı hizasından alınan çizgisel düşey kesiti yatay deplasman sonuç çıktısı görünümü.



Şekil 4.18: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, köprü döşemesi ve kenar ayaklarında oluşan yatay deplasman görünümü.

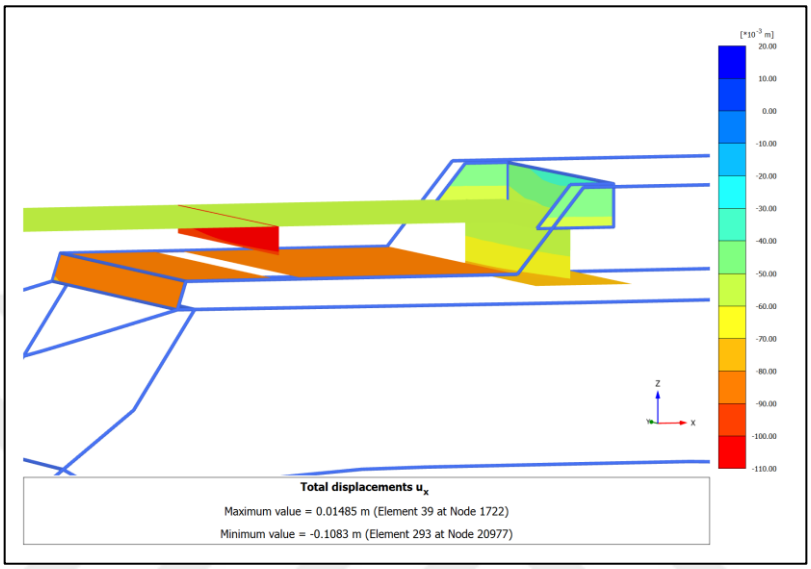


Şekil 4.19: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, köprü döşemesi ve doğu kenar ayağında oluşan yatay deplasman görünümü.



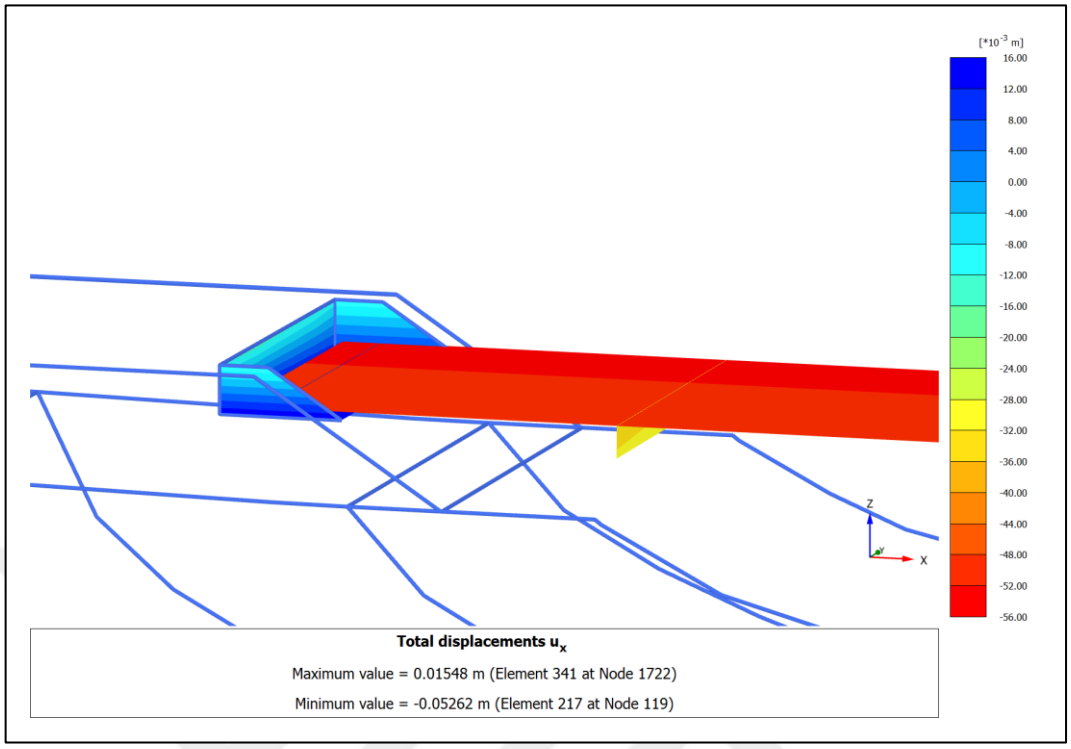
Şekil 4.20: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, köprü döşemesi ve batı kenar ayağında oluşan yatay deplasman görünümü.

2000 yılında ayrıca köprü döşemesinin batıya doğru hareketinin nispeten E ayağının batıya olan hareketinden daha az olduğu raporlanmıştır. Bu durum Şekil 4.21'de görüleceği üzere analizlerde saptanmıştır. E ayağı kolon başlığının batı yönünde yaklaşık 11 cm olan deplasman yapmışken, köprü tabliyesi aynı yönde yaklaşık 6 cm civarında yatay deplasman yapmaktadır.



Şekil 4.21: 2000 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri, köprü döşemesi ve doğu kenar ayağında oluşan yatay deplasman yakın görünümü.

2005 yılında A kenar ayağında doğu dolgusunda meydana gelen yatay hareketlere binaen 10-15 cm kaymaların oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 3.11'de gösterildiği gibi genleşme derzinde çok az bir boşluğun kaldığı görülmektedir. 2005 yılına kadar geçen süre için yapılan konsolidasyon analizleri sonunda Şekil 4.22'de görüleceği üzere köprü tabliyesi batı yönünde 5.3 cm deplase olduğu analizlerde belirlenmiştir. Ayrıca batı köprü kenar ayağının doğu yönünde köprü tabliyesi kadar olmasa da 1.5 cm yatay yönde deplase olduğu anlaşılmaktadır. İki tersinir yöndeki toplam yatay deplasman değeri 6.8 cm mertebesinde olması yapılan ölçümlerin altında olsa da belirtilmelidir ki Şekil 3.12 ve Tablo 3.4'de belirtilen imalat hataları, hasar görüp düzeltilmiş taşıyıcı kolonlar gibi ek gerilmelere sebep olacak etkenlerin sonlu elemanlar analizinde net olarak tanımlanamaması, imalat etkenlerinin göz ardı edilmesi hesaplanan bu deplasman değerinin rapor edilen değerlerden az olmasını etkileyen başlıca nedenlerdir. Hesaplanan değerlerin dahi köprü hesaplamaları aşamasında tasarımın tekrar değerlendirilmesini yol açacak mertebelerde olduğu belirtilmelidir.



Şekil 4.22: Batı dolgusu üzerinde yer alan A kenar ayağı ile köprü tabliyesinin farklı yatay deplasman yaptığının gösterir analiz görünümü.

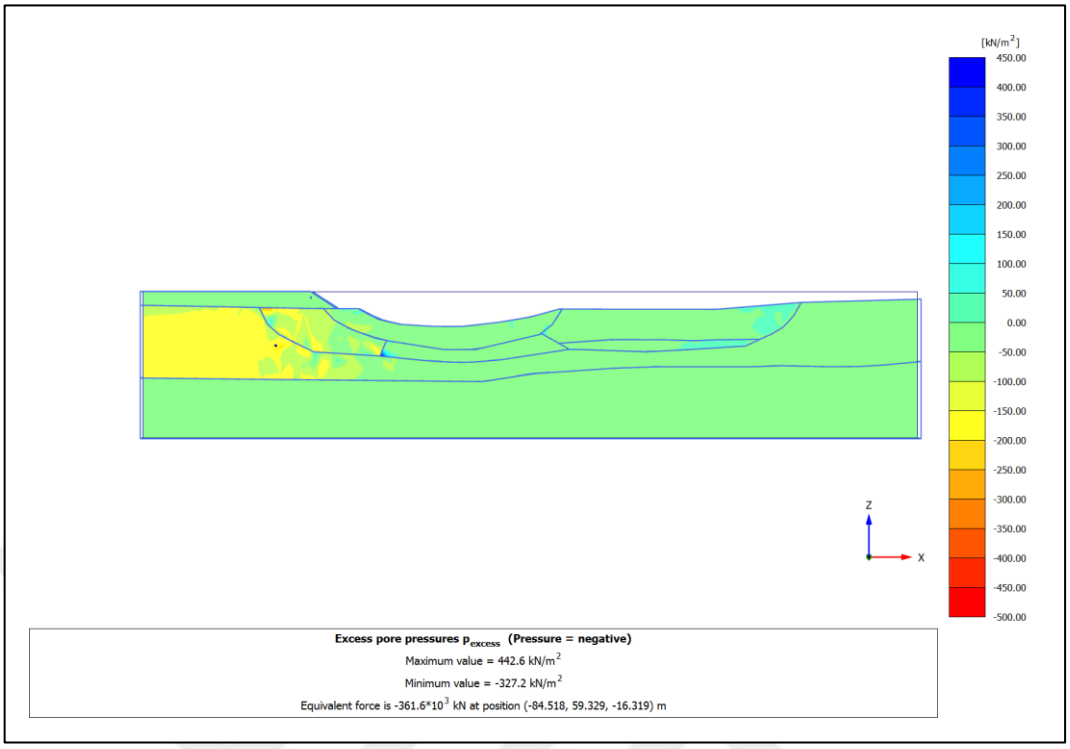
4.2. PERMABİLİTE KATSAYISININ VE HESAPLANAN İLAVE BOŞLUK SUYU BASINÇLARININ VAKAA ANALİZİNE ETKİLERİ

Bölüm 3.2.2'de sunulmuş olan permabilite değerleri ile yapılan raporlanmış zamana bağlı aşamalı analizlerde öncelikle batı dolgusu bulguları irdelenerek kullanılan permabilite değerlerinin doğruluğu incelenmiştir.

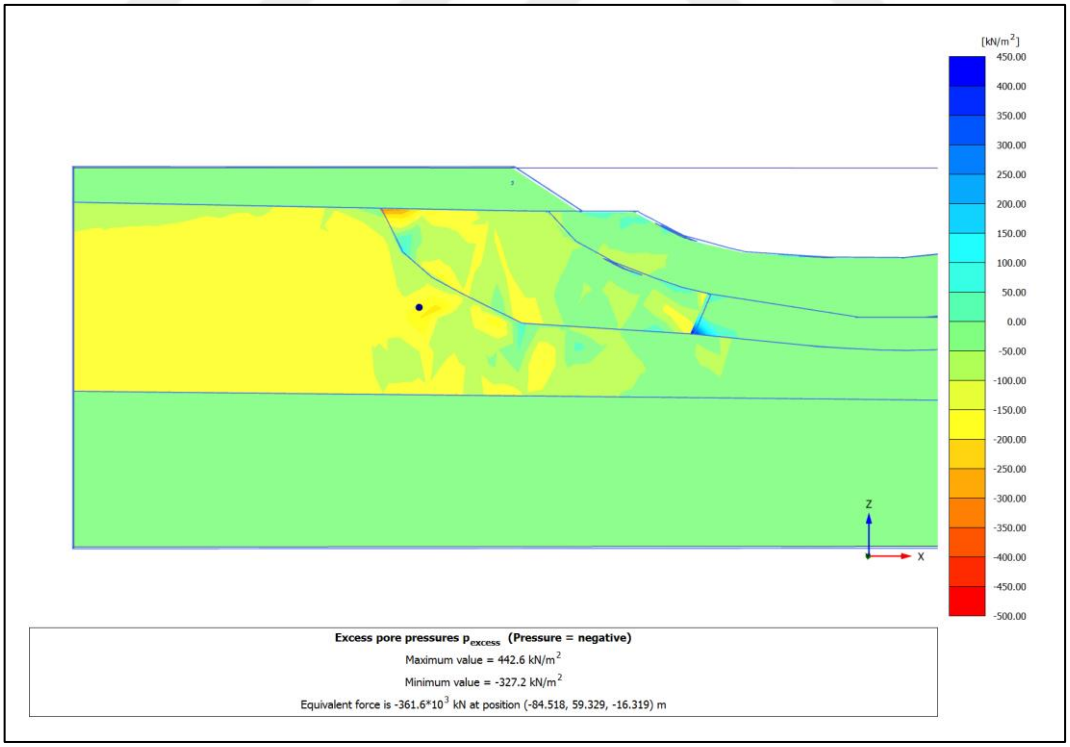
4.2.1. Batı Dolgusu Konsolidasyon Süreci

Batı dolgusunun inşası bitiminde dolgu yüklerinden dolayı oluşan ilave boşluk suyu basınçları Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de sunulmuştur. Takribi olarak ilave boşluk suyu basınç değerleri 200 ila 250 kPa mertebelerindedir. Bir yıllık bekleme süresi sonunda konsolidasyon ile ilave boşluk suyu basınçları 50-144 kPa mertebesine düşmüştür.

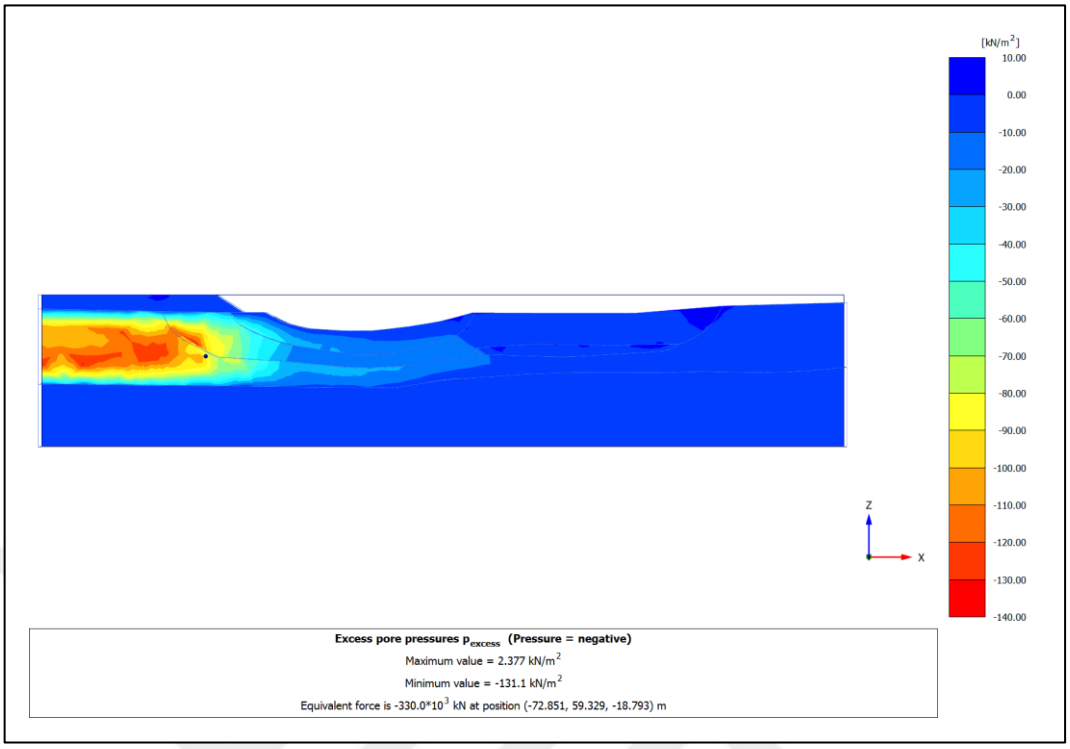
Sönümlenemeyen boşluk suyu basınçları yapı ömrü boyunca batı dolgusunda doğu dolgusunda oluşan deplasmanlar kadar olmasa da batı kenar ayağı arkasında oturmalara ve yol kaplamasında tamiratlara sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır. Analizlerde kullanılan permabilite katsayı değerleri vakaa geçmişi ile uyumlu sonuçlar vermektedir.



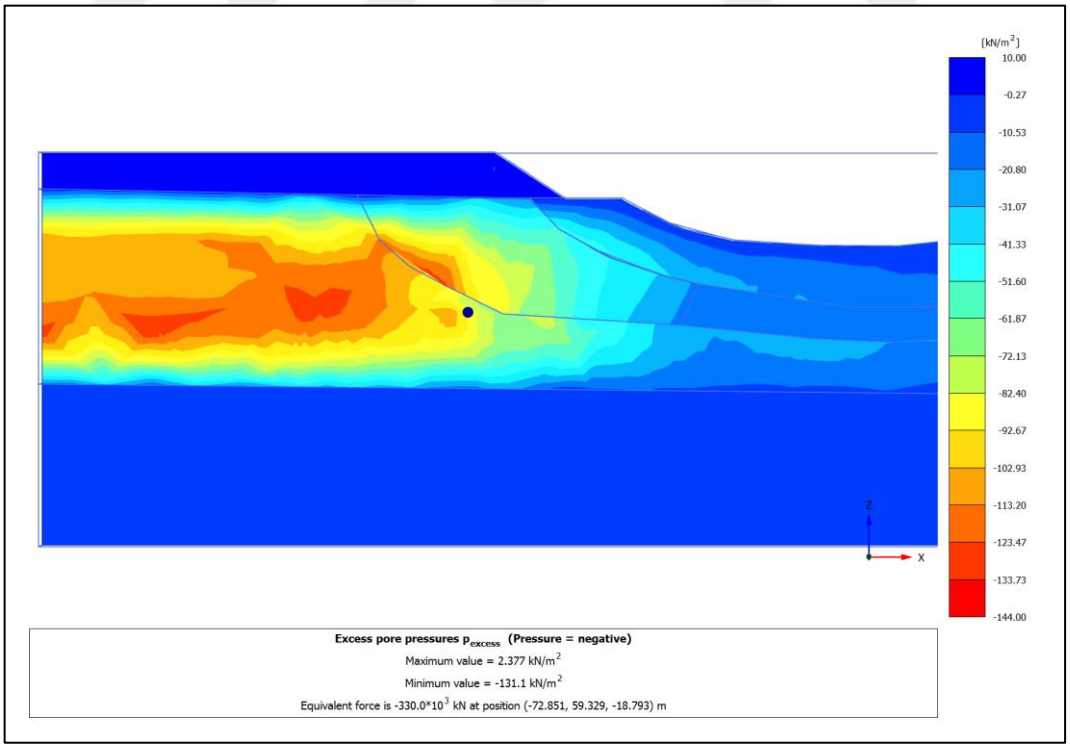
Şekil 4.23: Batı dolgusu inşa sonunda oluşan ilave boşluk suyu basınçları tam model görünümü.



Şekil 4.24: Batı dolgusu inşa sonunda oluşan ilave boşluk suyu basınçları batı dolgusu model görünümü.



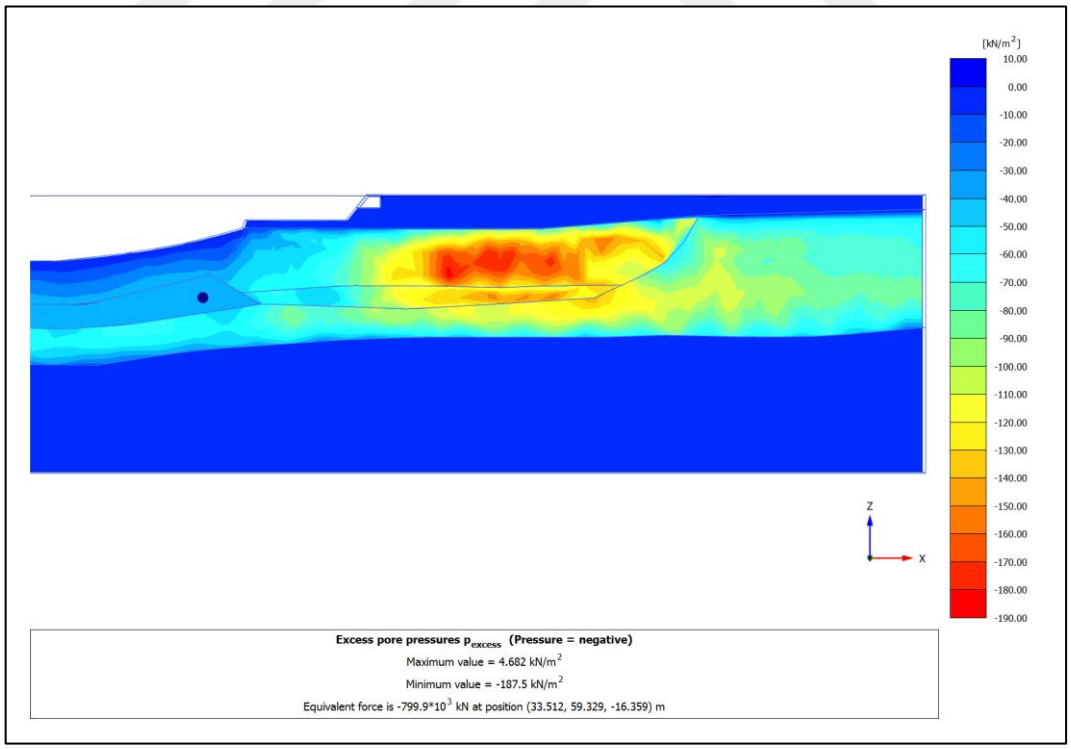
Şekil 4.25: Batı dolgusu bir yıl beklenilmesi sonunda sönümlenen ilave boşluk suyu basınçları tam model görünümü.



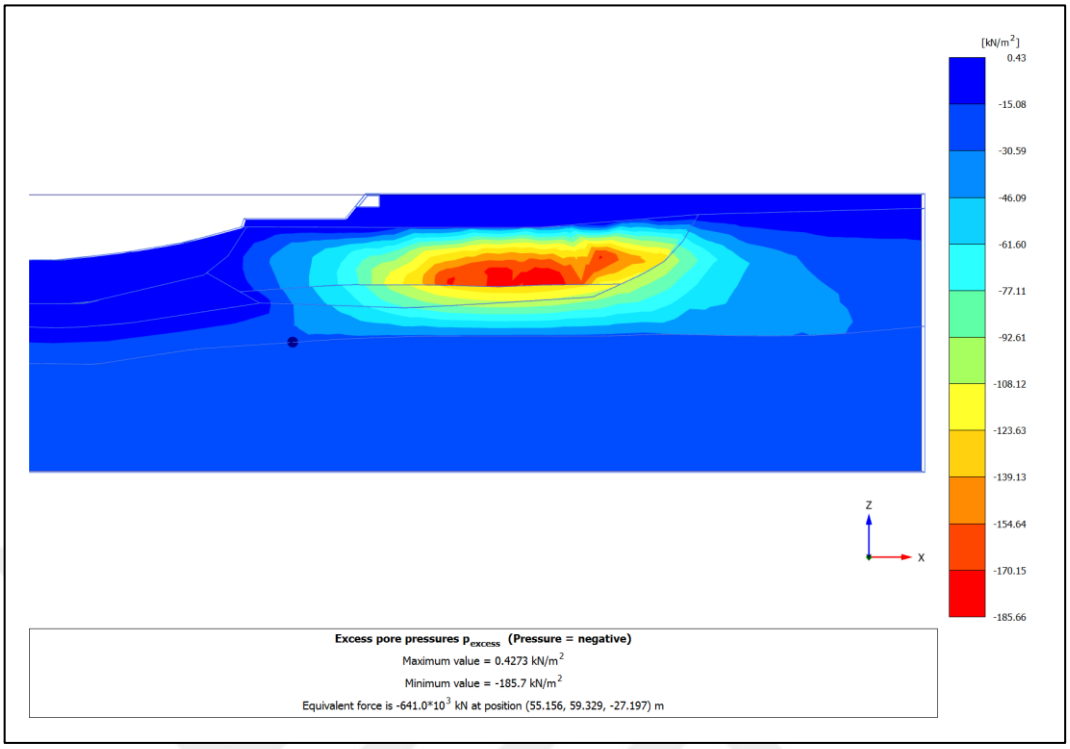
Şekil 4.26: Batı dolgusu bir yıl beklenilmesi sonunda sönümlenen ilave boşluk suyu basınçları batı dolgusu model görünümü.

4.2.2. Doğu Dolgusu Konsolidasyon Süreci

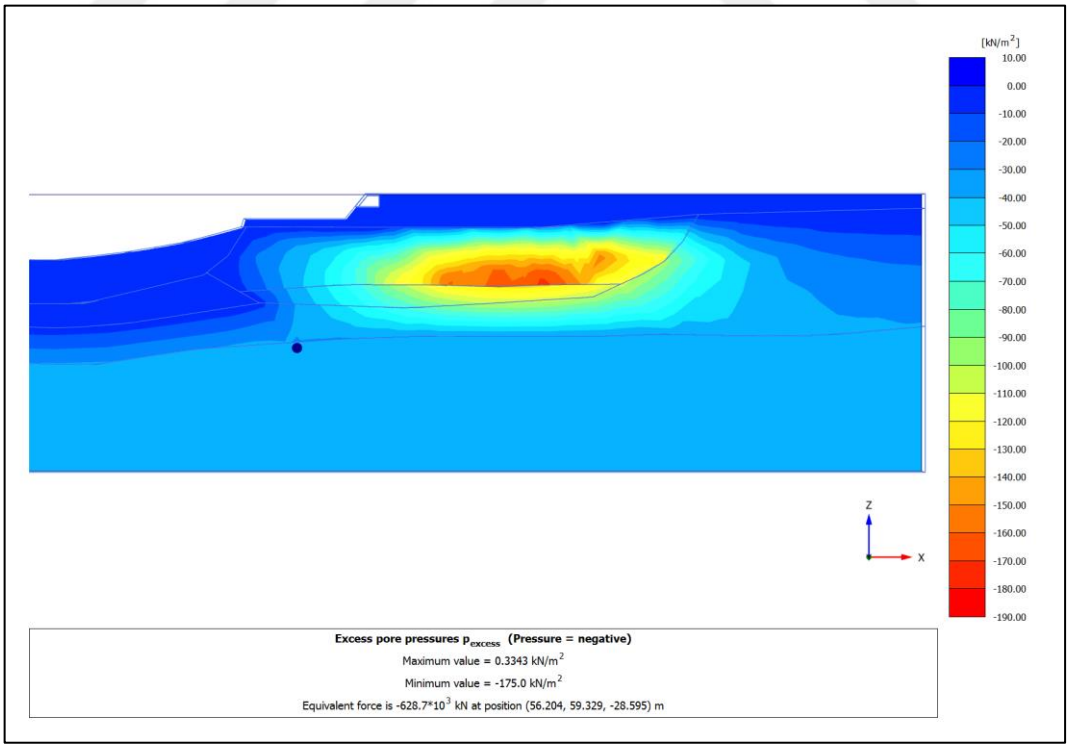
Doğu dolgusu için konsolidasyon süreci imalat sonrası ile yapı kullanım ömrü boyunca geçen süreyi kapsamaktadır. Köprü hasarları için oluşturulmuş raporlarda ele alınan hasar çeşitlerini ve yapılmış gözlemleri irdelemek adına her rapor tarihini ele alabileceğimiz konsolidasyon aşamaları analizler ile irdelenmiştir. Genel olarak ilave boşluk suyu basınçları doğu kenar ayağının 20-25 m gerisinde özellikle sıkışabilir silt tabakası ve killi silt tabakası genelinde oluşmuştur. Şekil 4.27'de sunulduğu üzere takribi olarak inşa sonunda 200 kPa mertebesinde olan ilave boşluk suyu basınçlarının köprü hizmete alındığı 1980 yılından, yıkımının yapıldığı 2008 senesine kadar geçen sürede analizlerde ancak %25'i sönümlenebilmekte olduğu saptanmıştır. Şekil 4.27'den Şekil 4.29'a kadar sırası ile 1980,2000 ve 2008 yıllarına kadar yapılmış konsolidasyon analiz sonuçları sunulmuştur. Vakaa için hazırlanan raporlar ele alındığında vakaa analizlerinin deplasman ve mekanik davranışının tutarlı olduğu anlaşılmakla birlikte geçen sürede ulaşılması beklenen konsolidasyon yüzdelerine ulaşılamaması programdan alınan sonuçların geçerliliği bakımından olumsuzdur.



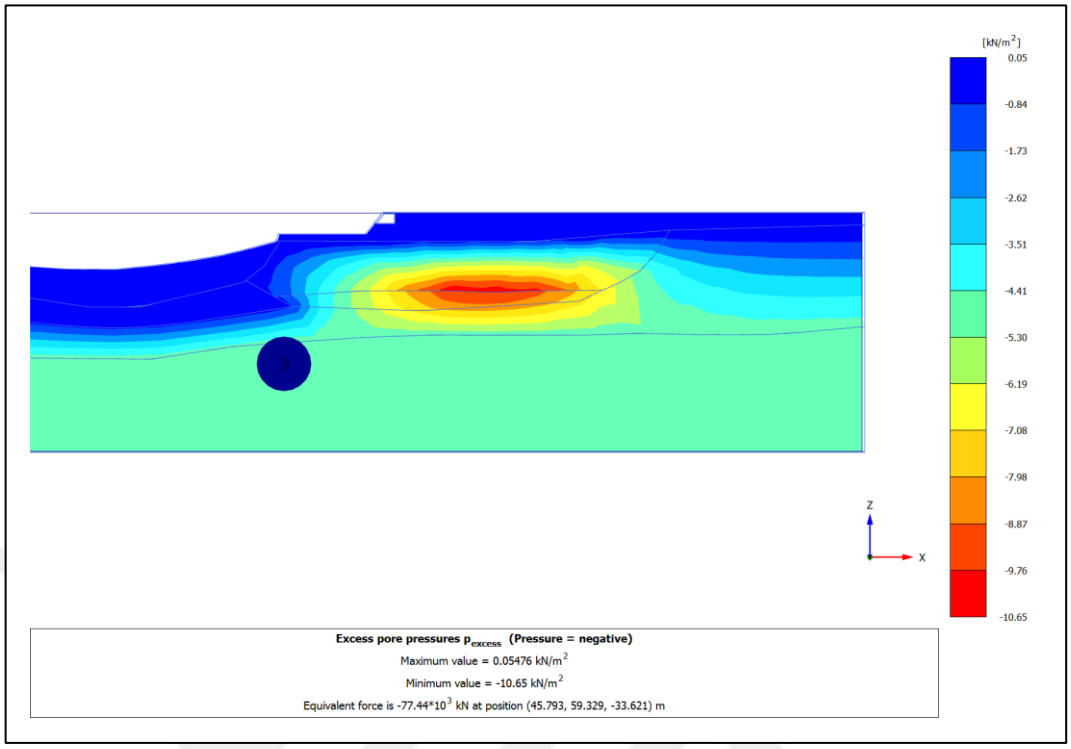
Şekil 4.27: 1980 yılında inşa sonunda oluşan ilave boşluk suyu basınçlarının ekran görünümü**.**



Şekil 4.28: 2000 yılına kadar yapılan konsolidasyon analizi sonunda ilave boşluk suyu basınçları ekran görünümü.



Şekil 4.29: 2008 yılına kadar yapılan konsolidasyon analizi sonunda ilave boşluk suyu basınçları ekran görünümü.



Şekil 4.30: ilave boşluk suyu basınçlarının maksimum 10 kPa kalana kadar sönümlenmesine kadar yapılan konsolidasyon analizi sonunda ilave boşluk suyu basınçları ekran görünümü.

Sistemde kalan ilave boşluk suyu basınçlarının maksimum 10 kPa kalana kadar sönümlenmesi için son bir analiz aşaması tanımlanmıştır. İlave boşluk suyu basınçlarının maksimum 10 kPa kalana kadar sönümlenmesi için gereken süre programca 456 yıl olarak hesaplanmaktadır. Şekil 4.30'da ilave boşluk suyu basınçlarının maksimum 10 kPa kalana kadar sönümlenmesi için tanımlanmış analiz aşaması sonucu sunulmuştur.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Özellikle akarsu kıyısında inşa edilen köprülerde, servis koşulları altında istenilen tasarım düzeyinin sağlanması için yaklaşım dolgularında oluşacak, kısa ve uzun dönem zemin hareketlerinin belirlenmesi çok önemlidir. Yüksek sıkışabilirliğe sahip, düşük mukavemetli alüvyonel akarsu çökelleri hem köprü orta ayaklarında ve dilatasyonlarda, hem de köprü kenar ayakları üzerinde yıkıcı hasarlara neden olabilir. Bu çalışmada bu tip hasarların en iyi örneklerinden bir tanesi olan Surtees Köprüsü'nün inşat süreci çalışılmıştır. Bu çalışmada, Bölüm 3.1'de tanımlanan süreçler sonlu elemanlar yöntemine dayalı üç boyutlu Plaxis 3D ver. 2013 programı ile sayısal modeller kullanılarak irdelenmiş ve köprüdeki aşırı deplasmanların tasarım aşamasında tahmin edilip edilemeyeceği araştırılmıştır.

İncelenen vakanın modelleme ve analizlerinin yürütülmesinde birtakım zorlukların var olduğu belirtilmelidir. Öncelikle problemin çözümünde hesap ağının oluşturulmasında karşılaşılan zorluklar arasında öncelikli olanı köprü, yaklaşım dolgu istinat yapıları ve yapıların özel bağlantılarının modele yansıtılmasıdır. Hesap ağı oluşturma prensipleri çerçevesinde sonlu elemanlar çözüm ağının oluşturulmasına gerekli, ek geometrik ya da yaklaşımsal önlemlerin çözüm ağının daha karmaşık ve fazla eleman ile çözümlenmesine ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır. Bu durum analiz zamanını arttırmaktadır ve daha fazla bilgisayar hesap gücüne ihtiyaç duyulmasına yol açmaktadır. Eleman sayısı artan hesap ağı, sonlu elemanlar çözüm matrislerinde zaman zaman ıraksama problemleri oluşmaktadır. Bu durum yazılım sağlayıcının müdahalesini gerektirmekte, tasarım verimliliğinin düşmesine ve iş saati kaybının yaşanmasına sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada birçok sonlu elemanlar hesap ağı ile denemeler yapılmış olup, birçok sıkı hesap ağına sahip analiz modelinin analiz sırasında ıraksamalara sebep olduğu, çok kaba hesap ağlarının ise özel bağlantı elemanlarının oluşturulamaması nedeni ile ek sıkılaştırmalara ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada analizlerin sağlıklı olarak yapılmasını sağlayacak hesap ağı opsiyonu ise genel olarak kaba bir hesap ağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Yaklaşım dolguları üzerinde yapılan köprü detayları ve/veya tüm köprünün modellenmesi ihtiyacı doğan karmaşık modeller ile çalışma zorunluluğunda, Plaxis 3D programı ile sağlıklı hesap ağı kurulamaması önemli bir olumsuz durum olduğu tespit edilmiştir. Özellikle incelenen problemde olduğu gibi, karmaşık modellerde yapı ile birlikte çözümlenmesi gereken geoteknik

problemlerin, yatay tabakalanmaya sahip olmayan karmaşık hesap modellerinde hesap ağına doğrudan müdahale edilmesinin mümkün olduğu, bağlantı noktalarının serbestlik derecelerinin daha doğrudan şekilde ayarlanabildiği, yapısal elemanların üst yapı hesap yöntemlerinin uygulanmasına daha açık özel elemanlar olarak tanımlanabildiği hesap programlarının gerekliliği aşikardır.

Yapısal elemanların bağlantılarında kullanılan özel bağlantı elemanlarının çalışma performansı yeterli görülmüş ancak tanımlanmaları için gerekli ek ara yüz elemanlarının, sonlu elemanlar hesap ağı (mesh) oluşturulmasında sebep olduğu sıkıntılar problemi çözüm aşamasının uzamasına neden olmuştur. Bu problem geoteknik problem olarak tanımlanmayan, bu alanda oldukça bilgi birikimi gereksinimlerine ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.

Sonlu elemanlar çözüm ağının oluşturulmasında gerekli ek geometrik ya da yaklaşımsal önlemlerin çözüm ağının daha karmaşık ve fazla elemana ihtiyaç duymasına sebep olmaktadır. Bu durum analiz zamanını arttırmaktadır ve daha fazla bilgisayar hesap gücüne ihtiyaç duyulmasına yol açmaktadır.

Yapısal elemanlara ait inşaat süreçlerinin sayısal model üzerindeki etkileri gerçekçi bir şekilde modellenememektedir. Bölüm 3.1.4'de Şekil 3.12'de gösterildiği gibi kolonların imalat hatalarından kaynaklanan unsurlar, farklı hasara ya da ek deplasmanlara yol açabilmekte ancak bu etkiler sayısal olarak tanımlamamaktadır.

Analizlerde önemli bir etken unsur olan tekrarlı dinamik yükler olan trafik yükleri sabit statik yükler olarak tanımlanması köprü yaklaşım elemanlarının bağlantı noktalarında oluşması beklenen ek davranışlarının modele yansıtılamamasına neden olmaktadır. Dinamik yüklerin Plaxis 3D analizlerinde zamana bağlı olarak etkitilmesi durumunda analiz sürelerinin, tasarımcı için verimli süreler olmaktan çıktığı gözlenmektedir. Bu gibi etkilerin yapısal hesap programlarında incelenmesi daha uygun olacağı tespit edilmiştir.

İncelenen problemde, geoteknik şartların karmaşıklığı ve köprü gibi son derece detaylı modelleme gerektiren bir yapının modellenecek olması sonlu elemanlar analizlerini daha da karmaşık hale getirmektedir. Problem üzerinde belirleyici olan mühendislik parametrelerinin etkisini araştırmak amacıyla parametrik hassasiyet analizlerinin yapılması, analiz zamanının fazla olması ve tekrarlı analizlerde model bütünlüğünün bozularak modelin hata vermesi gibi nedenlerden dolayı gerçekleştirilememiştir.

Bünye modeli olarak seçilen pekleşen zemin modeli ile gerilme modül değişimi ilişkisi sayısal analizlere yansıtılabilmiş. Ancak gerilme değişimlerine bağlı olarak konsolide olan zeminlerin permeabilite ile gerilme değişimi arasındaki ilişkisi için benzer uyum elde edilememiştir.

Yapılan analizler neticesinde, yapısal elemanlardaki deplasmanların sahadan alınan ölçümlerle uyumlu olduğu görülmektedir. Plaxis 3D yazılımında kullanılan geometrik modelin, analiz davranışını gerilme dağılımı ve deplasmanların değişimi konusunda etkilediği anlaşılmaktadır. Daha basit bir model oluşturulması durumunda ise uygulamada karşılaşılması olası öngörülemeyen yapısal problemlerin gözden kaçmasına neden olabileceği anlaşılmaktadır.

Sahadan alınan numuneler üzerinde yapılan bir boyutlu konsolidasyon deneylerinden elde edilen ödeometrik elastisite modüllerinin gerçek malzeme davranışını yansıtamadığı anlaşılmaktadır. Vakaa analizlerinde konsolidasyon sıkışma katsayısından elde edilen modül değerleri artırılarak kullanılması ve vakaa davranışının arttırılmış modüller ile ancak sağlanabildiği tespit edilmiştir. Yapılan vaka analizinde, elde var olan konsolidasyon deneyi ile elde edilmiş sıkışabilirlik katsayılarından hesaplanan modüllerin çok düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Hesaplanan referans modüllerinin, ilgili derinliklerden alınmış olan örselenmemiş numuneler ile üç eksenli basınç deneyleri yapılarak elde edilecek modüllerin karşılaştırılamamıştır. Bu durum özellikle analizlerde yanal gerilmenin düşük olduğu nehir yatağı kısmında tanımlanan yumuşak killerde, sahada karşılaşılmayacak mertebede aşırı yanal deplasmanların oluşmasına imkân sağlamaktadır.

Plaxis 3D analizlerinde, bünye modelinde tanımlanan ve az olan drenajsız kayma dayanımının, analizlerde meydana gelen aşırı deplasmanlar ile göçmeyitetiklememesi malzeme yapısı düşünüldüğünde tezat yaratmaktadır. Her halükarda konsolidasyon deneyi ile elde edilmiş sıkışabilirlik katsayılarından hesaplanan Ödeometrik modüller ile birlikte üç eksenli basınç deneyleri yapılarak elde edilecek modüllerin karşılaştırması yapılarak pekleşen bünye modelinde kullanılması, davranışın doğru tanımlanması adına bir gereklilik olduğu tespit edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizleri ile tasarım yapılırken, gelişmiş materyal modelleri kullanılmak isteniyor ise bu modellerin tanımlayıcı parametrelerinin modelin tanımlayıcı özelliklerine uygun test ve deneylerden elde edilmesi gerekliliğinin analizler için kritik önem arz ettiği anlaşılmaktadır. Konsolidasyon testlerinin yanında, ilgili derinliklerden alınmış örselenmemiş

numuneler ile, konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli deneylerin yapılması özellikle normal konsolide davranış gösteren mukavemeti az ince tane içerikli zemin birimlerinin pekleşen zemin davranışı yansıtabilen bünye modelleri için gereklilik olduğu tespit edilmiştir. 1980 yılında ve sonrasında yapılan saha ve laboratuvar deneyleri, yapılan analizlerde kullanılan ileri düzey malzeme parametrelerini sağlıklı şekilde tanımlanmaya yetecek detayda veri sağlamamaktadır.

Konsolidasyon analizlerinde permeabilite katsayısının doğru tanımlanabilmesi, özellikle deplasman davranışının etkilerinin doğru gözlemlenebilmesi açısından önem arz ettiği anlaşılmaktadır. Özellikle saha çalışmaları ile yatay ve düşey permeabilitenin saptanması doğru bir pratik olacağı nümerik yaklaşımın doğru kurulabilmesi açısından gereklidir.

Konsolidasyon analizleri için daha sıkı sonlu elemanlar çözüm ağının gerekliliği ve analizler için tanımlanacak kritik çözüm zaman adımlarının bu ağ eleman maksimum büyüklükleri, tabaka kalınlıklarınca tanımlanması, nümerik hatalardan kaçınabilmek ve doğru davranış ya da sonuçlara ulaşılabilmesi adına önem arz ettiği yapılan analizlerde görülmektedir.

Konsolidasyon analizi sürecinde tabaka geçişlerindeki ilave boşluk suyu basınçlarının tespitinde ya da doğru tanımlanmasında zorluklar bulunduğu söylenebilir. Bu durum yukarıda bahsedilen daha sıkı çözüm ağının analiz çözümleme zamanına etki etmeyecek şekilde geliştirilmesi ile aşılabilse de üç boyutlu modellerde bu durumun kolayca aşılabilecek bir problem olmadığı belirtilmelidir.

Analizlerde sahadaki başlangıç koşullarının oluşturulması için tabakalanmanın yatay ve monotonik olmamasından ötürü asal gerilmelerin doğrultularının doğru tanımlanması adına Plaxis 3D programında başlangıç gerilmelerini oluşturulması için tanımlanmış yerçekimi yüklemesi (gravity loading) opsiyonu kullanılmıştır. Bu opsiyonda program tüm tabaklara atanmış malzeme özelliklerini ön konsolidasyon basıncı ya da aşırı konsolidasyon katsayısı göz etmeyerek normal konsolide olarak kabul ederek plastik hesap ile yerçekimi doğrultusunda 1 g ivme etkitilerek gerilmeleri oluşturmaktadır. Bu durumun, düşey gerilmelerin özellikle lineer olmayan tabaka geçişlerinde devamsız üretimine sebep olduğu tespit edilmiştir. Her ne kadar başlangıç gerilmelerinin üretimi sırasında bir denge haline ulaşılsa da bir sonraki imalat aşamasından önce deplasman vektörlerinin sıfırlanması sonrasında oluşacak ek gerilme dengesinin boş analiz aşaması ile çözüm yapılarak sağlanması gereklidir. İnşaat aşamalarının

oluşturulmasından önce boş bir imalat aşaması hesaplamasının gerilmelerin devamlılığının sağlanması adına yapılması gerekliliği tespit edilmiştir.

İncelenen yaklaşım dolgusunda gözlenen aşırı deplasmanların azaltılmasına yönelik olarak alınabilecek iyileştirme tedbirleri ise ayrı bir çalışma kapsamında analiz edilebilir.

- Doğu dolgusunda basp sürtünme kazıkları tasarlanarak dolgu ile kenar ayak arasındaki diferansiyel oturmaların azaltılması önleyici önlem olarak kullanılabilir. Bu yaklaşım ile ilgili Kökten ve Akbaş'ın [55] bir çalışması bulunmakta olup nispeten diferansiyel oturmaların kabul edilebilir sevilerde kontrol altına alınabildiğini vurgulamaktadırlar.
- Doğu dolgusunda oluşan oturmalar dolgunun ağırlığı ile direkt olarak ilişkili olduğu yapılan analizler ile ortaya konulmuştur. Yumuşak dolgular üzerinde yapılacak yüksek yaklaşım dolgularının oturma performansını geliştirmek adına atermit kökenli EPS köpük hafif dolgular bu vakaa için kullanılabilir. Özellikle sıkışabilir tabakaların vakada önemli yeri olduğu düşünülür ise sıkışmaya neden olan dolgunun ağırlığının EPS köpük hafif dolgu ile bertaraf edilerek vakanın önlenmesi sağlanılabilir.
- Analizlerde ve yapılan ölçümlerde doğu dolgusunda meydana gelen deplasmanların yönünün nehir yatağına doğru oldu düşünülür ise çakma Herkül tipi 30 cm'lik kazıkların yanal yüklere maruz kalması söz konusudur. Yanal yük etkisi altında çalışan bu kazıkların kapasitesinin bu etkiler ön görülerek daha kapasitesi yüksek fore kazıklar olarak teşkil edilmiş olması vakanın gelişimini engelleyeceği söylenilebilir.
- Yumuşak kil temel tabakasında teşkil edilecek taş kolonlar veya derin karıştırma yöntemleri ile temel tabakasının elastisitesinin iyileştirilmesi, oturmaların meydana geldiği yumuşak kil tabakasında oluşacak oturmaları engelleyerek vakanın önlenmesi adına alınacak tedbirler arasında gösterilebilir.
- Radikal tasarım önlemlerinin yanı sıra geleneksel olarak Doğu tarafındaki dolgunun zamana bağlı olarak oturmalarının tamamlanması beklenerek hasarların minimal seviyelere çekilmesi de vakanın önlenmesi adına uygun bir adım olabilir. Her ne kadar bakım gerektirebilecek hasarların oluşması deplasman düzeylerine bakılarak kaçınılmaz olduğu görülse de deplasman miktarı kabul edilebilir düzeyde olacağı öngörülebilir.

KAYNAKLAR

[1] ASSHTO, Manual on Subsurface Investigations, Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1984.

[2] Transportation Research Board, TRB, NCHRP Synthesis of Highway Practice 8: Construction of Embankments, Washington, D.C.: National Research Council, 1971.

[3] L. Bjerrum, «Embankments on Soft Ground,» %1 içinde *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and EarthSupported Structures, Vol. 2*, West Lafayette, 1972.

[4] M. a. K. L. Bozozuk, «Settlement Analysis of the Gloucester Test Fill,» *Canadian Geotechnical Journal,*, pp. 339-354, 1976.

[5] Perloff, W.H., G.Y. Baladi, and M.E. Harr, «Stress Distribution Within and Under Long Elastic Embankments,,» Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C. , 1967.

[6] K. E. Fadum, «Influence values of estimating stresses in elastic foundations,» %1 içinde *Proc. Second International Conf.*, SM&FE, 1948.

[7] T. Hopkins, «Long-Term Movements of Highway Bridge Approach Embankments and Pavements,» Kentucky Transportation Research Program, Kentucky, 1985.

[8] Gifford, D.G., J.R. Wheeler, S.R. Kraemer, and A.F. McKown, «Spread Footings for Highway Bridges,» Federal Highway Administration, Washington, D.C, 1987.

[9] J. Schmertmann, «Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design,» Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1977.

[10] J. Schmertmann, «Static Cone to Compute Static Settlement over Sand,» *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,* 1970.

[11] B. Hough, «Compressibility as the Basis for Soil Bearing Value,» *Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE,* 1959.

[12] D. Taylor, Fundamentals of Soil Mechanics, New York: J. Wiley and Sons, 1948.

[13] N. Janbu, Slope Stability Computations, Embankment- Dam Engineering, New York: John Wiley and Sons, 1973.

[14] Mana, A.I. and G.W. Clough, «Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay,» *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE,* 1981.

[15] Siriwardane, H.J., L.K. Moulton, and R-J. Chen, «Prediction of Lateral Movement of Bridge Abutments on Piles,» National Research Council, Washington, D.C, 1984.

[16] S. Johnson, «Precompression for Improving Foundation Soils,» *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,* 1970.

[17] Moran, Proctor, Mueser, and Rutledge, «Study of Deep Soil Stabilization by Vertical Sand Drains,» Department of the Navy, Washington, 1958.

[18] ICE, «Vertical Drains,» %1 içinde *Institute of Civil Engineers*, London, 1982.

[19] S. Hansbo, «Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains,» %1 içinde *Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3*, Stockholm, 1981.

[20] Rixner, J.J., S.R. Kraemer, and A.D. Smith, «Prefabricated Vertical Drains, Vol. I, Engineering Guidelines,» Federal Highway Administration, Washington, D.C., 186.

[21] R. Lukas, «Dynamic Compaction for Highway Construction, Vol. I: Design and Construction Guidelines,» Federal Highway Administration, Washington, D.C. , 1986.

[22] J. Mitchell, «Soil Improvement,» %1 içinde *Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 4*, Stockholm, 1981.

[23] J. Welsh, «In Situ Testing for Ground Modification Techniques,» *Geotechnical Special Publication No. 6, ASCE*, 1986.

[24] Welsh, J.P., R.D. Anderson, R.P. Barksdale, C.K. Satya- priya, M.T. Tumay, and H.E. Wahls, «Densification,» *Geotechnical Special Publication No. 12, ASCE*, 1987.

[25] K. Massarch, «Deep Compaction of Sand Using Vibratory Probes,» %1 içinde *Soil Improvement Methods, Proceedings of the Third International Geotechnical Seminar*, Singapore, 1985.

[26] Barksdale, R.D. and R.C. Bachus, «Design and Construction of Stone Columns, Vol. I,» Federal Highway Administration, Washington, D.C, 1983.

[27] Broms, B.B. and I-H. Wong, «Embankment Piles,» %1 içinde *Soil Improvement Methods, Proceedings of the Third International Geotechnical Seminar*, Singapore, 1985.

[28] Transportation Research Board, NCHRP Synthesis of Highway Practice 2: Bridge Approach Design and Construction Practices, Washington, D.C.: National Research Council, 1969.

[29] J. Harden, «Pressure Berms, Soil Replacement and Lightweight Fills,» %1 içinde *Soil Improvement Methods, Proceedings of the Third International Geotechnical Seminar*, Singapore, 1985.

[30] Mitchell, J.K. and W.C.B. Villet, NCHRP Report 290: Reinforcement of Earth Slopes and Embankments, Washington, D.C.: National Research Council, 1987.

[31] Christopher, B.R., S.A. Gill, J-P. Giroud, I. Juran, J.K. Mitchell, and J. Dunnicliff, «Design and Construction Guidelines for Reinforced Soil Structures, Vol. I,» Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1988.

[32] Greimann, L.F., A.M. Wolde-Tinsae, and P.S. Yang, Skewed Bridges with Integral Abutments, Washington, D.C.: National Research Council, 1983.

[33] J. Smith, «Bridge Approach Settlement and Proposed Repairs, Natchez Trace,» Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1985.

[34] M. Burke, «Bridge Approach Pavements, Integral Bridges and Cycle Control Joints,» %1 içinde *66th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C,, 1987.

[35] H. Wahls, NCHRP Synthesis of Highway Practice 107: Shallow Foundations for Highway Structures, Washington, D.C. : National Research Council, 1983.

[36] D. Allen, «A Survey of the States on Problems Related to Bridge Approaches,» A Survey of the States on Problems Related to Bridge Approaches, Kentucky, 1985.

[37] L. Moulton, «Tolerable Movement Criteria for Highway Bridges,» Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1986.

[38] P. Keene, Tolerable Movements of Bridge Foundations," in Transportation Research Record 678: Tolerable Movement of Bridge Foundations, Sand Drains, K-Test, Slopes, and Culverts, Washington, D.C. : National Research Council, 1978.

[39] Jones, C.A., Stewart, D.I. and Danilewicz, C.J., «Bridge Distress Caused by Approach Embankment Settlement,» *Geotechnical Engineering*, 2008.

[40] C. S. D. a. D. C. Jones, «Bridge Distress Caused by Approach Embankment Settlement,» *Geotechnical Engineering*, 2008.

[41] Durham, «Delft Continuous Sampling Investigation for the A66 Stockton- Thornaby By-Pass,» Durham Co. , Bracknell, 1973.

[42] Durham Co. , «Site Investigation T.R. A66 Stockton–Thornaby By-pass,» Durham Co. , Bracknell, 1976.

[43] Exploration Associates, «A66 Surtees Bridge Proposed Widening Vols 1 and 2.,» ICE, Wallsend, 1992.

[44] Ritchies, «A66 Surtees Bridge, Vols 1–3,» BTA, Wigan, 2004.

[45] British Geological Survey, *Stockton, England and Wales Sheet 33 Solid and Drift Geology.1:50,000,* British Geological Survey: Nottingham, 1987.

[46] AGAR R., «Glacial and post-glacial geology of Middlesbrough and the Tees Estuary,» *Proceedings of the Yorkshire Geological Society,* 1954.

[47] MCCLAVE J. T. and SINCICH T., Statistics, 8th edn, USA: Prentice Hall, 2000.

[48] MOORE D. S., Statistics: Concepts and Controversies, 4th edn., New York: W. H. Freeman and Co., 1996.

[49] CASAGRANDE A., «The determination of the preconsolidation load and its practical significance.,» %1 içinde *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,* Cambridge, 1936.

[50] LAMBE T. W. and WHITMAN R. V., Soil Mechanics, SI version, New York: John Wiley and Sons, 1979.

[51] BULLEN AND PARTNERS, «Thornaby Bypass Stage 2C A66 Surtees Bridge Widening Geotechnical Assessment,» BULLEN AND PARTNERS, Durham, 1993.

[52] C. Danilewicz, «A66 Surtees Bridge Replacement Report,» Halcrow Group Ltd, Borough, 2008.

[53] B. Look, Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables, Routledge: CRC Press, February 13, 2014.

[54] Plaxis bv, Plaxis Manuals, Delft, Hollanda: Plaxis bv, , 1997-2013.

[55] Ö. KÖKTEN ve S. O. AKBAŞ, «YUMUŞAK ZEMİN ÜZERİNDE YER ALAN KÖPRÜ YAKLAŞIM DOLGULARI OTURMALARININ KAZIKLAR İLE AZALTILMASI,» %1 içinde *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbeşinci Ulusal Kongresi*, Ankara, 2014.

EKLER

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Osman Onur GÜRLER
Doğum Yeri	Ankara
Doğum Tarihi	04.02.1983
Uyruğu	☑ T.C. ❒ Diğer:
Telefon	+90 541 877 21 33
E-Posta Adresi	ogurler@nettoinsaat.com
Web Adresi	www.nettoinsaat.com



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2013

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler