T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKRAJLI DAYANMA YAPILARININ EUROCODE TASARIM YAKLAŞIMLARI İLE ANALİZİ

Gökhan ÜSTÜNYER

DANIŞMAN
Doç. Dr. M.Kubilay KELEŞOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma, 6.11.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Fakülte

Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Fakülte

Dr.Öğr.Üyesi Esra Ece BAYAT
İstanbul Teknik Üniversitesi
Fakülte

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

Bu çalışma kapsamında, son zamanlarda ülkemizde meydana gelen derin kazı iksa sistemlerindeki göçmeler nedeniyle ankrajlı derin kazı tasarımları üzerinde durulmuş ve Eurocode-7 Tasarım Yaklaşımları uygulanarak hizmet görebilirlik sınır durumu ve nihai sınır durumları için analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Bu çalışma boyunca deneyim ve bilgilerini bizimle paylaşan ve iki yıl boyunca bize her konuda yardımcı olan danışman hocam Doç. Dr. M. Kubilay Keleşoğlu'na teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam sırasında eğitimime her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan halen çalışmakta olduğum Teknofor İnşaat Taahhüt Ltd. Şti. yetkililerine ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2019 Gökhan ÜSTÜNYER

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xvi**
ÖZET ..... **xx**
SUMMARY ..... **xxi**
1 GİRİŞ **1**
2 DAYANMA YAPILARI HAKKINDA GENEL BİLGİLER **3**
2.1 YANAL TOPRAK BASINÇLARI 3
2.1.1 Sükunetteki Toprak Basıncı 4
2.1.2 Aktif Toprak Basıncı 5
2.1.3 Pasif Toprak Basıncı 9
2.1.4 Çok Destekli Sistemlerde Toprak Basınçları 10
2.2 DAYANMA YAPILARI 12
2.2.1 Düşey Dayanma Yapıları 12
2.2.1.1 Palplanş Duvarlar *15*
2.2.1.2 Diyafram Duvar *17*
2.2.1.3 Fore Kazıklar *20*
2.2.1.4 Mini Kazık *24*
2.2.1.5 Püskürtme Beton (Shotcrete) *25*
2.2.1.6 Berlin Duvarı *27*
2.2.1.7 Top Down Yöntemi *28*
2.2.2 Yatay Destek Elemanları 31
2.2.2.1 Zemin Ankrajları *31*
2.2.2.2 Zemin Çivisi *44*
2.2.2.3 Strut *48*
3 TASARIM YAKLAŞIMLARI VE ANALİZ PROGRAMLARI **51**
3.1 TASARIM YAKLAŞIMLARI 51
3.1.1 Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu (SLS) 51

3.1.2 Nihai Sınır Durumu(ULS) ... 56
3.2 TASARIM PARAMETRELERİ ... 62
3.2.1 Gerilme Analizi ... 63
3.2.2 Kayma Gerilmesi ... 64
3.2.3 Permeabilite ... 68
3.3 LİMİT DENGE VE SONLU ELEMALAR ... 69
3.3.1 Limit Denge Analizi ... 70
3.3.1.1 GeoStudio Genel ... 70
3.3.1.2 Tasarım Yaklaşımlarının Dahil Edilmesi. ... 71
3.3.2 Sonlu Elemanlar Metodu ... 74
3.3.2.1 Plaxis Genel ... 75
3.3.2.2 Plaxis Zemin Modelleri ... 76
3.3.2.3 Drenaj Durumları ... 80
3.3.2.4 Plaxis EC-7 Tasarım Yaklaşımları ... 81
4 BULGULAR ... 88
4.1 ÖRNEK ANALİZ ... 88
4.2 REFERANS ÖRNEĞİ ... 95
4.2.1 Yeraltı Suyu İhmal Edilerek Yapılan Analiz ... 100
4.2.2 Fore Kazık Analizleri ... 104
4.2.3 Diyafram Duvar Analizleri ... 112
5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER ... 113
6 KAYNAKLAR ... 115
7 EKLER ... 117
8 ÖZGEÇMİŞ ... 132

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Toprak basınç durumları ve kırılma zarfı. 3
Şekil 2.2: Sükunetteki yanal gerilme durumu. 4
Şekil 2.3: Aktif durumda Mohr Dairesi ve kırılma zarfı. (Coduto, 2011) 6
Şekil 2.4: Yer değiştirmeye bağlı gerilme değişimi. (Berilgen,2012) 7
Şekil 2.5: Duvar arkasındaki aktif durum. 7
Şekil 2.6: Çekme çatlağı derinliği. 8
Şekil 2.7: Duvar arkasında oluşan pasif durum. 9
Şekil 2.8: Pasif durum Mohr Dairesi ve kırılma zarfı. 9
Şekil 2.9: Yer değiştirmeye bağlı gerilme değişimi. 9
Şekil 2.10: Terzaghi-Peck (1967) tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı. 10
Şekil 2.11: Tschebotarioff (1951) tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı. 11
Şekil 2.12: Navfac (1988) tarafından önerilen toprak basınç dağılımı. 11
Şekil 2.13: Duvar seçimi karar ağacı. (CIRIA C760, 2017) 14
Şekil 2.14: Çelik palplanş çakım işlemi. 16
Şekil 2.15: Kral kazıklı palplanş duvar. 17
Şekil 2.16: Kılavuz duvar görünüm ve kesiti. 18
Şekil 2.17: Farklı tiplerde diyafram duvar kazı ekipmanı. 19
Şekil 2.18: Diyafram duvar panelleri ve stop-end borusu. 19
Şekil 2.19: Bentonit solüsyon döngüsü. 19
Şekil 2.20: Diyafram duvar donatı kafesinin yerleştirilmesi ve beton dökülmesi. 20
Şekil 2.21: Kılavuz duvar imalatı. 21
Şekil 2.22: Muhafaza borusunun indirilmesi. 22
Şekil 2.23: Fore kazık delgisinin yapılması. 23

Şekil 2.24: Tremi borusu ile beton dökülmesi..... 23
Şekil 2.25: Donatısı indirilmiş mini kazık imalatı..... 24
Şekil 2.26: Püskürtme beton nozul hareket şekli. (Ryan 1973)..... 26
Şekil 2.27: El ve makine ile yapılan püskürtme beton uygulaması..... 26
Şekil 2.28: Konsol ve ankraj ile desteklenmiş Berlin duvarları. 28
Şekil 2.29: Düşey elemanlarının yerleştirilmesi..... 28
Şekil 2.30: Top-Town inşaat kazık, ilk aşama kazı ve döşeme imalatı..... 30
Şekil 2.31: Döşeme ek donatı detayı. (Öztorun, 1994) 30
Şekil 2.32: Kazı ve döşeme işleri. 31
Şekil 2.33: Geçici olarak imal edilen yapı elemanlarının kalıcı hale getirilmesi. 31
Şekil 2.34: Geçici öngermeli zemin ankrajı. 32
Şekil 2.35: Kalıcı öngermeli zemin ankrajı..... 32
Şekil 2.36: Zemin ankrajının kısımları..... 34
Şekil 2.37: Düz ankraj plakası..... 35
Şekil 2.38: Eğimli ankraj plakası..... 35
Şekil 2.39: Zemin ankrajlarında kullanılan ankraj kamaları. 36
Şekil 2.40: Farklı tipte kullanılan ayırıcılar ve merkezleyici. 37
Şekil 2.41: Farklı çaplarda polietilen hortum. 37
Şekil 2.42: Korozyon koruması seçim karar ağacı. (FHWA-IF-99-105, 1999)..... 38
Şekil 2.43: Ankraj koruma sınıflarının kesit görünümü. (FHWA-IF-99-105, 1999)... 39
Şekil 2.44: Kanıt testi yükleme prosedürü (FHWA-IF-99-105, 1999)..... 43
Şekil 2.45: Zemin çivisinde aktif ve pasif bölgeler. 44
Şekil 2.46: Zemin çivisindeki kuvvet ve gerilme dağılımı. (FHWA0-IF-03-017,2003)..... 45
Şekil 2.47: Zemin çivisi detayı. 46
Şekil 2.48: Zemin çivisi plaka detayı. 46
Şekil 2.49: Zemin çivisi imalatı..... 47

Şekil 2.50: Strut yerleştirilmesi. 48

Şekil 2.51: Strut üzerinde meydana gelen yükler. (CIRIA C760, 2017)..... 49

Şekil 3.1: Örnek hizmet görebilirlik sınır durumu. 51

Şekil 3.2: Duvar tipine bağlı deplasman sınırları. (CIRIA C760, 2017)..... 52

Şekil 3.3: Dayanma yapısına bağlı olarak oluşan deplasman sınırları ve etki uzaklığı. (CIRIA C760, 2017)..... 53

Şekil 3.4: Duvar uzunluğu ve etki bölgesi arasındaki ilişki (Ou, Hsieh ve Chiou, 1993)..... 53

Şekil 3.5: Ankrajlı duvar arkasında oluşan oturma profili. (FHWA-IF-99-105, 1999) 54

Şekil 3.6: Duvar hareketinin tahmini için tasarım eğrileri (Clough ve O'Rourke, 1990)..... 54

Şekil 3.7: Zemin yüzey oturmasının tahmini için Peck'in (1969) Yöntemi..... 55

Şekil 3.8: Maksimum zemin yüzey oturması ile duvarın maksimum sehim ilişki..... 55

Şekil 3.9: Örnek nihai sınır durumları. 56

Şekil 3.10: Tasarım aşamaları. (Harris ve Bond , 2008) 57

Şekil 3.11: Derin kazılarda meydana gelen nihai durumlar. (CIRIA C760, 2017) 58

Şekil 3.12: Efektif ve toplam gerilme ile çizilen kırılma zarfları. 64

Şekil 3.13: Zemin kayma zarfı 65

Şekil 3.14: Çimentosuz kumlarda SPT N_{60} ile efektif kayma açısı ilişkisi (Coduto, 1994). 66

Şekil 3.15: Normal konsolide ve aşırı konsolide killerin (CD) kayma mukavemeti zarfı. 67

Şekil 3.16: Efektif kayma direnç açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişki.(Terzaghi, 1996)..... 67

Şekil 3.17: Drenajsız kayma mukavemeti değerleri. (Bowles, 1990) 68

Şekil 3.18: Suya doygun killerde (UU) deney sonuçları için kayma mukavemeti zarfı. 68

Şekil 3.19: GeoStudio analiz modülleri..... 70

Şekil 3.20: GeoStudio programına Tasarım Yaklaşımlarının dahil edilmesi. 71

Şekil 3.21: Uygulanabilecek Tasarım Yaklaşımları. 71

Şekil 3.22: Dilim ağırlıklarında meydana gelen değişim. 72

Şekil 3.23: Dilimlerde Tasarım Yaklaşımlarına göre oluşan yükler. 72

Şekil 3.24: Dilimlerde sürşarj yükünde meydana gelen değişim. 73

Şekil 3.25: SLS analiz sonucu elde edilen güvenlik sayısı..... 73

Şekil 3.26: Pasif toprak basıncına uygulanan kısmi faktör sonucu elde edilen güvenlik sayısı. 74

Şekil 3.27: Plaxis tasarım aşamaları. 75

Şekil 3.28: Tasarım Yaklaşımları'nın Plaxis programına eklenmesi. 76

Şekil 3.29: Lineer elastik malzeme davranışı. 78

Şekil 3.30: Zemin kayma mukavemeti ve kayma zarfı. 78

Şekil 3.31: Elastik mükemmel plastik davranış..... 79

Şekil 3.32: Hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi. (Plaxis Manual, 2019) 79

Şekil 3.33: Kısmi yük faktörlerinin belirlenmesi. 82

Şekil 3.34: Zemin özelliklerine uygulanan kısmi faktörler. 82

Şekil 3.35: ULS analiz fazlarının SLS fazlarına dahil edilmesi. (Plaxis Manual, 2019)..... 82

Şekil 3.36: Uygulama Şeması 1'in Plaxis'e uygulanması. 83

Şekil 3.37: Uygulama Şeması 2'nin Plaxis'e uygulanması. 83

Şekil 3.38: SLS analiz Tasarım Yaklaşımı seçeneği. 83

Şekil 3.39: Uygulanabilecek Tasarım Yaklaşımları. 83

Şekil 3.40: Malzeme özelliklerinde kısmi faktörlerin belirlenmesi-1. 84

Şekil 3.41: Malzeme özelliklerinde kısmi faktörlerin belirlenmesi-2. 84

Şekil 3.42: Yüke kısmi faktör uygulanması. 85

Şekil 3.43: İzin verilen planlanmamış kazı. (Harris ve Bond , 2008) 85

Şekil 3.44: Ankraj dirençleri:dış ve iç dirençleri..... 86

Şekil 3.45: Ankraj tasarım hiyerarşisi. 86

Şekil 3.46: Önerilen ξ_a değerleri. 87

Şekil 4.1: Örnek-1 Plaxis modeli. 88

Şekil 4.2: Kil tabakasında, zemin kayma açısına uygulanan kısmi faktör. 90

Şekil 4.3: Kum tabakasında zemin kayma açısına uygulanan kısmi faktör. 90

Şekil 4.4: Kil zeminde kohezyona uygulanan kısmi faktör. 90

Şekil 4.5: Geçici ve kalıcı yüke uygulanan kısmi faktör. 90

Şekil 4.6: Çeper sürtünmesine uygulanan kısmi faktör. 91

Şekil 4.7: Ankraj halatlarında meydana gelen maksimum yükler. 92

Şekil 4.8: Dayanma yapısında analiz sonucu derinlikle beraber meydana gelen kesme kuvvetleri. 94

Şekil 4.9: Dayanma yapısında analiz sonucu derinlikle beraber meydana gelen minimum ve maksimum moment grafikleri. 94

Şekil 4.10: Problem geometrisi. 95

Şekil 4.11: ULS analizlerde su seviyesinin belirlenmesi. 97

Şekil 4.12: SLS analizde 5. fazda oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri. 97

Şekil 4.13: TY1-K1 ve TY2 analizde 5. fazda oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri. 97

Şekil 4.14: TY1-K2 ve TY3 analizde 5. fazda oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri. 98

Şekil 4.15: SLS analizinde elde edilen deplasman değerleri. 99

Şekil 4.16: SLS analizinde öngörülmeyen kazı yapılması durumu. 99

Şekil 4.17: Safety analiz sonuçları. 100

Şekil 4.18: Ankraj çeper sürtünmesine uygulanacak kısmi faktörün TY2'ye eklenmesi. 101

Şekil 4.19: SLS analizde oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri. 101

Şekil 4.20: TY1-K1 ve TY2* analizde oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri. 102

Şekil 4.21: TY1-K2 ve TY3 analizde oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri. .. 102

Şekil 4.22: Analize giren Ø65 cm çapındaki kazık özellikleri. 105

Şekil 4.23: Ø65 cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No-Moment ve Faz No-Kesme Kuvvet grafikleri. 106

Şekil 4.24: Ø65 cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No-Normal Kuvvet ve Faz No-Ankraj Yük grafikleri. 106

Şekil 4.25: Ø80 cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No-Moment ve Faz No-Kesme Kuvvet grafikleri. 107

Şekil 4.26: Ø80 cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No-Normal Kuvvet ve Faz No-Ankraj Yük grafikleri. 107

Şekil 4.27: Sırasıyla 100 cm ve 120 cm ara ile yapılan kazıkların özellikleri. 108

Şekil 4.28: Ø100cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No-Moment ve Faz No-Kesme Kuvvet grafikleri. 109

Şekil 4.29: Ø100 cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No-Normal Kuvvet ve Faz No-Ankraj Yük grafikleri. 109

Şekil 4.30: Ø100 cm çapında 120 cm ara ile imal edilen fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No- Moment ve Faz No-Kesme Kuvvet grafikleri. 110

Şekil 4.31: Ø100 cm çapında 120 cm ara ile imal edilen fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No- Normal Kuvvet ve Faz No-Ankraj Yük grafikleri.. 110

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Bazı zeminler için tipik K0 değerleri. (Yıldırım, 2009)..... 5

Tablo 2.2: Zeminin aktif duruma geçmesi için gereken yatay hareket. (Coduto, 2011)8

Tablo 2.3: Dayanma yapılarının avantaj ve dezavantajları. 13

Tablo 2.4: Palplanşlarda korozyon nedeniyle oluşan kesit kayıpları (CIRIA C760, 2017) 15

Tablo 2.5: Bentonit solüsyonunun özellikleri. (TS 3168, 2001) 20

Tablo 2.6: Püskürtme beton avantaj ve dezavantajları 25

Tablo 2.7: Kuru ve yaş karışım püskürtme beton sistemlerinin karşılaştırılması. 27

Tablo 2.8: Ankraj tendon tipleri ve özellikleri. 34

Tablo 2.9: Yaygın olarak kullanılan düz ankraj plaka detayları..... 35

Tablo 2.10: Yaygın olarak kullanılan açılı ankraj plaka detayları. 35

Tablo 2.11: Ankraj kama tip ve özellikleri..... 36

Tablo 2.12: Merkezleyici çap ve maksimum halat sayısı..... 37

Tablo 2.13: Enjeksiyon ve koruma kılıf boruları. 37

Tablo 2.14: Ankraj test yükü uygulama döngüsü. (FHWA-IF-99-105, 1999)..... 42

Tablo 2.15: Kalıcı ankrajlar için yük sıralaması ve gözlem periyotları. 43

Tablo 2.16: Zemin çivisi plakaları..... 47

Tablo 3.1: Tasarım Yaklaşımlarına göre uygulanacak kısmi yük faktörleri. 59

Tablo 3.2: Tasarım Yaklaşımlarına göre uygulanacak kısmi zemin ve direnç faktörleri. 59

Tablo 3.3: TY-1'de uygulanan kısmi faktörler. (Harris ve Bond , 2008)..... 61

Tablo 3.4: TY-2'de uygulanacak kısmi faktörler. (Harris ve Bond , 2008)..... 61

Tablo 3.5: TY-3'de kullanılacak kısmi faktörler. (Harris ve Bond , 2008) 62

Tablo 3.6: Kullanılacak hesap yöntemine göre gerekli parametreler. (CIRIA C760, 2017) 62

Tablo 3.7: İçsel sürtünme açısını etkileyen faktörler. (Look, 2007) 65

Tablo 3.8: Slope/W ile yapılan analiz sonucunda elde edilen güvenlik sayıları. 74

Tablo 3.9: Plaxis zemin modelleri ve kullanılacak parametreler. 77

Tablo 3.10: İlk yükleme sırasında gerilmeye bağlı malzeme rijitlik modülü değeri. (Von Soos, 2002) 80

Tablo 3.11: Plaxis zemin modellerinde kullanılabilecek drenaj durumları. 81

Tablo 4.1: Kazık özellikleri. 89

Tablo 4.2: Zemin malzeme özellikleri. 89

Tablo 4.3: Ankraj serbest ve kök bölgesinin uzunlukları. 89

Tablo 4.4: Halatta oluşan maksimum kuvvetler. 91

Tablo 4.5: Kazıkta oluşan moment ve kesme kuvvetleri 93

Tablo 4.6: EC-7 Örneği zemin özellikleri. 95

Tablo 4.7: Palplanş malzeme özellikleri 96

Tablo 4.8: Ankraj malzeme özellikleri. 96

Tablo 4.9: Analiz sonucunda elde edilen değerler. 98

Tablo 4.10: Uygulanan Tasarım Yaklaşımlarına göre elde edilen güvenlik sayıları. 100

Tablo 4.11: Geogrid yerine tanımlanan Embedded beam row malzeme özellikleri. . 101

Tablo 4.12: Yeraltı suyu ihmal edilerek tekrarlanan analiz sonuçlar. 102

Tablo 4.13: Yeraltı suyu bulunmayan analizlerde elde edilen güvenlik sayıları 103

Tablo 4.14: Yeraltı suyunun bağlı olarak oluşan maksimum yükler ve güvenlik sayıları. 103

Tablo 4.15: Plaxis programında kullanılacak kazık özellikleri. 105

Tablo 4.16: Ø65 cm çapında kazık ile yapılan analizlerden elde edilen kesit tesirleri. 106

Tablo 4.17: Ø80 cm çapında kazık ile yapılan analizlerden elde edilen kesit tesirleri. 107

Tablo 4.18: Farklı zemin modeli ve yeraltı suyu için yapılan analiz sonuçları. 107

Tablo 4.19: Ø100 cm çapında kazık ile yapılan analizlerden elde edilen kesit tesirleri. 108

Tablo 4.20: Ø100 cm çapında 1,2 m ara ile yapılan kazık analizlerinden elde edilen kesit tesirleri. 109

Tablo 4.21: Kazık analizleri sonucu elde edilen ankraj yükleri. 111

Tablo 4.22: Farklı ankraj kesit ve adetleri için elde edilen yük değerleri. 111

Tablo 4.23: Plaxis programında kullanılacak diyafram duvar özellikleri. 112

Tablo 4.24: Farklı diyafram duvar kalınlık ve boyları için elde edilen analiz sonuçları. 112

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklamalar
A	: Alan
c	: Kohezyon
c'	: Efektif kohezyon
c_u	: Drenajsız kayma dayanımı
c_{inc}	: Artan kohezyon
d	: Duvar kalınlığı
d_w	**:** Yeraltı su seviyesi
e_{init}	: Başlangıç boşluk oranı
E	: Elastisite Modülü
E_{inc}	: Artan elastisite modülü
E_{eod}	: Ödometre deneyinden elde edilen elastisite modülü
E_{50}	: Göçme değerinin %50'sine karşılık gelen elastisite modülü
E_{ur}	: Yükleme-Boşaltma elastisite modülü
H	: Duvar yüksekliği
G	: Kalıcı Yük
G_{ref}	: Küçük birim deformasyon kayma modülü
k	: Permeabilite (geçirimlilik)
K	: Yanal toprak basınç katsayısı
K_0	**:** Sükunetteki toprak basınç katsayısı
Ka	**:** Aktif toprak basınç katsayısı
Kp	**:** Pasif toprak basınç katsayısı
$P_{d(ULS)}$	: ULS analizinden elde edilen ankraj yükü
$P_{d(SLS)}$	: SLS analizinden elde edilen ankraj yükü

$\mathbf{P_d}$: Tasarım ankraj yükü

$\mathbf{P_p}$: Ankraj test direnci

$\mathbf{R_d}$: Tasarım ankraj direnci

$\mathbf{R_k}$: Karakteristik ankraj direnci

$\mathbf{R_{a,k}}$: Çimento şerbeti- zemin arası sürtünme direnci

Rt,k : Ankraj halatının çekme kapasitesi

Q : Geçici Yük

u : Su basıncı

L : Boy

m : Gerilme Katsayısı

M : Moment

N : Normal kuvvet

$\mathbf{u_x}$: Yatay deplasman

$\mathbf{u_y}$: Düşey deplasman

V(Q) : Kesme Kuvveti

$\mathbf{z_c}$: Çekme çatlağı derinliği

α : Malzemesi için ısıl katsayısı

β : Zeminin yatayla yaptığı açı

δ : Deplasman

δ_e : Elastik deplasman

δ_r : Kalıcı deplasman

δ_t : Toplam deplasman

Ø' : Efektif kayma mukavemeti açısı

Ø : Kayma mukavemeti açısı

$\mathbf{Ø_u}$: Drenajsız kayma mukavemeti açısı

γ_a : Ankraja uygulanan kısmi faktör

$\gamma_{c'}$:Efektif kohezyon kısmi faktörü

γ_{cu} :Drenajsız kayma dayanım kısmi faktörü

γ_{G} :Elverişsiz kalıcı yük kısmi faktörü

$\gamma_{G,fav}$:Elverişli kalıcı yük kısmi faktörü

γ_{n} : Doğal birim hacim ağırlığı

γ_{Rest} :Direnç kısmi faktörü

$\gamma_{R,h}$:Kayma direnci kısmi faktörü

γ_{sat} : Doygun birim hacim ağırlığı

γ_{Q} :Elverişsiz geçici yük kısmi faktörü

$\gamma_{Q,fav}$:Elverişli geçici yük kısmi faktörü

γ_{w} : Suyun birim hacim ağırlığı

$\gamma_{\emptyset}$:İçsel sürtünme açısı kısmi faktörü

γ_{γ} :Birim hacm ağırlığı kısmi faktörü

σ_{0} : Sükunetteki toprak basncı

σ_{a} : Aktif toprak basıncı

σ_{h} : Yatay toprak basıncı

σ_{p} : Pasif toprak basıncı

σ_{v} : Düşey toprak basıncı

ω : Su muhtevası

ξ_{a} : Ankraj testi düzeltme faktörü

Ψ : Dilatasyon açısı

ν : Poison oranı

μ^{*} : Şişme indeksi

Δa : Öngörülemeyen kazı derinliği

ΔL : Değişen boy

ΔT : Sıcaklık değişimi

Kısaltmalar	Açıklamalar
DL	: Tasarım yükü
FHWA	: Federal Highway Administration
HS	: Pekleşen Zemin Modeli
HSSmall	: Küçük Deformasyonları Dikkate Alan Pekleşen Zemin Modeli
LE	: Lineer Elastik Model
MC	: Mohr Coulomb Model
NCR	: Normal Konsilidasyon Oranı
OCR	: Aşırı Konsilidasyon Oranı
SLS	: Hizmet Görebilirlik Sınır Durmu
SS	: Yumuşak Zemin Modeli
SSC	: Yumuşak Zemin Krip Modeli
TY-1	: Tasarım Yaklaşımı 1
TY 1-K 1	: Tasarım Yaklaşımları 1 – Kombinasyon 1
TY 1-K 2	: Tasarım Yaklaşımları 1 – Kombinasyon 2
TY-2	: Tasarım Yaklaşımları 2
TY-3	: Tasarım Yaklaşımları 3
TS	: Türk Standartları
ULS	: Nihai Sınır Durumu
YASS	: Yeraltı su seviyesi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKRAJLI DAYANMA YAPILARININ EUROCODE TASARIM YAKLAŞIMLARI İLE ANALİZİ

Gökhan ÜSTÜNYER

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

Son zamanlarda, ülkemizde dayanma yapılarında meydana gelen göçmeler nedeniyle oluşan can ve mal kayıplarında büyük bir artış görülmektedir. Yapılan tasarımlar ve uygulamaların yeterliliği sorgulanmaya başlanmış ve ulusal yönetmelik ihtiyacı gündeme gelmiştir.

Bu çalışmada ankrajlı dayanma yapılarının hizmet görebilirlik sınır durumu ve nihai sınır durumları için Eurocode-7 Tasarım Yaklaşımları kullanılarak analizler yapılmıştır. Öncelikle Slope/W programı ile ankrajlı dayanma yapısının göçmeye karşı güvenliği farklı Tasarım Yaklaşımları uygulanarak analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar programı olan Plaxis 2D ile hizmet görebilirlik sınır durumu için deplasmanların belirlenen sınırlar içinde kaldığı kontrol edilmiştir. Nihai sınır durumu için uygulanan farklı tasarım yaklaşımlarının dayanma yapısında oluşan kuvvet ve momentlere etkisi incelenmiştir. Son olarak ankrajlarda meydana gelen yük değişimleri incelenmiş ve ankrajların yeterlilikleri yeterlilikleri kontrol edilmiştir.

Analizler neticesinde elde edilen maksimum kesit tesirlerinin ve ankraj yüklerinin TY1-K1 ve TY-2'de meydana geldiği görülmüştür. Elde edilen ankraj yük değerleri ile ankraj halatlarının yeterlilikleri karşılaştırılmış ve halatlarının yetersiz kalabildiği görülmüş ve ankraj çapı veya adeti arttırılarak analizler tekrarlanmıştır.

Eylül 2019, 153. sayfa.

Anahtar kelimeler: Eurocode-7 Tasarım Yaklaşımları, Plaxis 2D, zemin ankrajlı dayanma yapısı, derin kazı, hizmet görebilirlik sınır durumu, nihai sınır durumu

SUMMARY

M.Sc. THESIS

ANALYSIS OF ANCHORED RETAINING SYSTEMS WITH EUROCODE DESIGN APPROACHES

Gökhan ÜSTÜNYER

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

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

Recently, there has been a significant increase in the loss of life and property caused by the collapse of the retaining structures in our country. The quality of the design and the construction started to be questioned and the need for a national code has been raised.

In this study, Eurocode design approaches were used to satisfy the serviceability limit state and ultimate limit state conditions of an anchored retaining structure. At first, different design approaches were used in Slope/W limit state software, to analyze the safety of an anchored retaining structure against general type of collapse. Later, the finite element software Plaxis 2D was used to check whether the displacements remained within the specified limits for the serviceability limit state. The effect of each design approache on the forces and moments developped in the anchored retaining structure was investigated. Finally, the variation of the axial loads on the anchors were examined and the stability of the anchors was checked.

As a result of the analyses, it was seen that the maximum cross-sectional effects and anchorage loads occurred in TY1-K1 and TY-2. As the calculated axial anchor load values and the stability of the anchors were compared it was seen that the anchors did not satisfy the stability conditions thus the analyses were repeated by increasing the diameter size of the anchor shaft or the number of anchor rows.

September 2019, 153. pages.

Keywords: Eurocode design approach, Plaxis, soil anchor supported retaining systems, deep excavation, serviceability limit state, ultimate limit state

1 GİRİŞ

Ülkemizde nüfus yoğunluğunun fazla olduğu şehirlerde, yeni inşaat alanlarının yetersiz kalması ve arsa değerlerinin yüksek olması nedeniyle, zemin yüzeyi altına inşa edilen kat sayısı artmıştır. Bunun bir sonucu olarak derin kazı yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Eğimli kazı yapılması mümkün olmayan derin kazı problemlerinde, zemin koşullarına uygun dayanma yapıları tasarlanmaktadır. Bu bağlamda ülkemizde en çok tercih edilen yöntemlerin başında ankrajlı iksa sistemleri gelmektedir. Ankrajlar düşey dayanma yapılarında yatay destek elemanı olarak kullanılmaktadır.

Son yıllarda dayanma yapılarında, tasarımdan ve yapılan imalat hatalarından kaynaklı göçmeler ve aşırı deplasmanlar sonucu komşu yapı ve servis alanlarında hasarlar meydana gelmektedir. Meydana gelen can ve mal kayıpları nedeniyle ülkemizde eksikliği belirgin olarak hissedilen bir standart arayışına girilmiştir. Bu noktada referans olarak Eurocode-7 ve FHWA tarafından yayınlanan şartnameler esas alınabilir.

Bu çalışmada ülkemizde kullanılan hizmet görebilirlik sınır durumları ile birlikte Eurocode-7 tarafından önerilen Tasarım Yaklaşımları esas alınarak limit denge analiz programı Slope/W ve sonlu elemanlar programı Plaxis 2D ile analizler yapılmıştır. Hizmet görebilirlik limit durumu (SLS) analizlerinden elde edilen sonuçlarda deplasman değerleri, nihai limit durum (ULS) analizlerinde ise güvenlik sayıları ve kesit tesirleri dikkate alınmıştır.

Tasarım Yaklaşımlarında uygulanan kısmi faktörlere göre yükler arttırılır, zemin parametreleri ve dirençler ise azaltılır. Tasarım Yaklaşımlarında kullanılan kısmi faktörler sırası ile Tasarım Yaklaşımı 1-Kombinasyon 1; yüklere, Tasarım Yaklaşımı 1-Kombinasyon 2; zemin parametrelerine, Tasarım Yaklaşımı 2; yüklere ve dirençlere ve Tasarım Yaklaşımı 3; yüklere ve zemin parametrelerine uygulanır. Yüklere uygulanacak kısmi faktörler yükün elverişli, elverişsiz, kalıcı ve geçici olmasına bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Elverişli yani sistemi göçmeye karşı tutan geçici yükler hesaplamalara dahil edilmez. Dayanma yapısı arkasında bulunan zemin basınçları elverişsiz kalıcı yük olarak kabul edilir. Fakat sonlu elemanlar programına uygulan Plaxis elverişli ve elverişsiz yük ayırımı yapamadığı için kalıcı yüke kısmi faktör uygulayan TY1-K1 ve TY-2'de uygulanacak 1,35 kısmi faktörü analize dahil edilmez, yük etki faktörü olarak analiz sonucu elde edilen değerlere uygulanır.

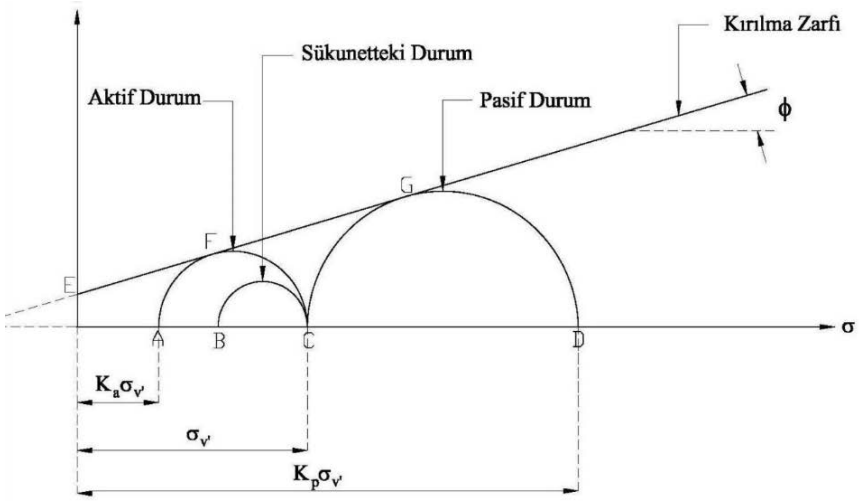
Bu çalışma kapsamında, öncelikle Tasarım Yaklaşımlarının Slope/W ve Plaxis 2D yazılımları ile kullanılabilirlikleri üzerinde durulmuş ve bir örnek problem üzerinde yaklaşımların uygulanışı anlatılmıştır. Daha sonra Plaxis Bulletin tarafından çözülen Eurocode-7 örneği yeniden analiz edilmiş ve bu örnek referans alınarak palplanş, fore kazık ve diyafram duvar için analizler yapılmıştır. Analizler farklı kazık çapları, yeraltı suyu durumu ve ankraj elemanları için tekrarlanmıştır. Analizlerde, öngörülmeyen kazı derinliği de modele dahil edilmiştir. Analizler neticesinde kullanılan Tasarım Yaklaşımı ile hizmet görebilirlik sınır durum analizleri arasında, uygulanan Tasarım Yaklaşımlarına göre farklılıklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Sayısal modelde göçme gözlenmesi ve ankrajların yetersiz olması durumlarında tasarım revize edilmiş ve yeterli güvenlik elde edilmeye çalışılmıştır.

2 DAYANMA YAPILARI HAKKINDA GENEL BİLGİLER

2.1 YANAL TOPRAK BASINÇLARI

Mühendislik uygulamalarında, şevli ve dik derin kazı imalatının yapılması elzem hale gelebilir. Yapılacak derin kazılar yatay ve düşey deplasmanlara neden olur. Deplasmanları kabul edilebilir sınırla içinde tutmak, komşu yapı ve servis yapılarında hasar oluşmasını önlemek için dayanma yapıları tasarlanır.

Dayanma yapılarının projelendirilmesinde yapılması gereken ilk adım, dayanma yapısına etkileyen kuvvetlerin büyüklük ve yönlerin belirlenmesidir. Yapıya etkileyen başlıca kuvvetler yatay toprak basıncı, su basıncı, sürşarj yükü ve deprem yükü olarak sıralanabilir. Derin kazılarda deformasyon ve gerilme analizlerinde toprak basınçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Dayanma yapılarının güvenli ve ekonomik olarak çözümlenebilmesi için dayanma yapısı arkasında yer alan zeminden gelecek toprak basınçlarının doğru olarak belirlenmesi gerekir.
Yanal toprak basınç hesabında kullanılan plastik sınır metotu Şekil 2.1'de verilen Mohr Dairesi ile ifade edilir. Şekil 2.1'de görünen kırılma sınırına gelene kadar toprak basıncı, sistemin elastik ve plastik yerdeğiştirmeleri incelenerek bulunabilir. Oluşan toprak basınçları sırası ile sükunetteki toprak basıncı, aktif toprak basıncı ve pasif toprak basıncı olarak sırasıyla ele alınmıştır.



Şekil 2.1: Toprak basınç durumları ve kırılma zarfı.

2.1.1 Sükunetteki Toprak Basıncı

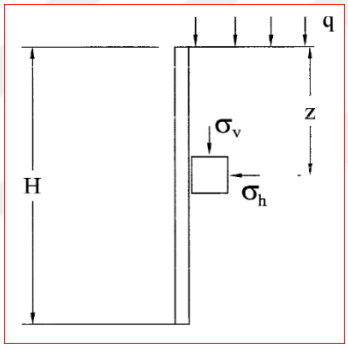
Dayanma yapısının zemine, zemininde dayanma yapısına göre rölatif hareketin olmaması (dönme ve yatay ötelenmesinin olmaması) durumunda aktif toprak basıncı değerinden büyük, pasif toprak basıncı değerinden düşük olarak meydana gelir. σ_o ile ifade edilebilir.

$$\sigma_p > \sigma_o > \sigma_a \quad (2.1)$$

Düşey toprak basınçlarının yatay toprak basınçlarına çevirmek için K_0 (sükunetteki toprak basınç katsayısı) kullanılır. Yatay toprak basıncı, (2.2) ve (2.3) bağıntıları ile hesaplanabilir.

$$\sigma_v = \gamma . z \quad (2.2)$$

$$\sigma_h = \gamma . K . z \quad (2.3)$$



Şekil 2.2: Sükunetteki yanal gerilme durumu.

Z derinliğinde yanal toprak basıncı suyun da bulunduğu göz önüne alınarak;

$$\sigma_h = \sigma_v K_0 + u \quad (2.4)$$

bağıntısı ile bulunabilir.

γ**:** Zemin birim hacim ağırlığı

K: Yatay toprak basınç katsayısı

z: Derinlik

u: Su basıncı

K değeri yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranıdır.K_0 değeri en doğru şekilde arazide yapılan presiyometre deneyi ile belirlenebilir fakat genellikle amprik formüller kullanılmaktadır.

K_0 değeri amprik olarak;

Granüler zeminlerde ; $K_0 = 1\text{-}\sin\phi'$ (2.5)

Normal konsolide killerde ; $K_0 = 0{,}95\text{-}\sin\phi'$ (2.6)

Aşırı konsolide killerde ; $K_{nc} = K_{onc}\,(OCR)^{1/2}$ (2.7)

Burada ϕ' efektif kayma direnci açısı, OCR aşırı konsilidasyon oranıdır. Aşırı konsolide killerde K_0 değeri birin üzerine çıkabilmektedir.

Normal konsolide killerde Broker ve Ireland (1965) tarafından plastisite indeksine bağlı bağlantılar önerilmiştir.

$K_0 = 0{,}40 + 0{,}007\,(PI)$ $\quad 0<PI<40$ (2.8)

$K_0 = 0{,}64 + 0{,}001\,(PI)$ $\quad 40<PI<80$ (2.9)

Sıkıştırılmış granüler zeminlerde Sherif ve Fang (1984) (2.10) bağlantısını önermektedir.

$K_0 = 1\text{-}\sin\phi' + (\gamma_k/\gamma_{kmin}\text{-}1)5{,}5$ (2.10)

Bazı zemin türleri için alınabilecek K_0 değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Bazı zeminler için tipik K0 değerleri. (Yıldırım, 2009)

Zemin Türü	**K_0**
Gevşek Kum	0,5
Sıkı Kum	0,35
Sıkıştırılmış Kum	1,0-1,5
Normal Konsolide Kil	0,5-0,7
Aşırı Konsolide Kil	1,0-4,0
Sıkıştırılmış Kil	1,0-2,0

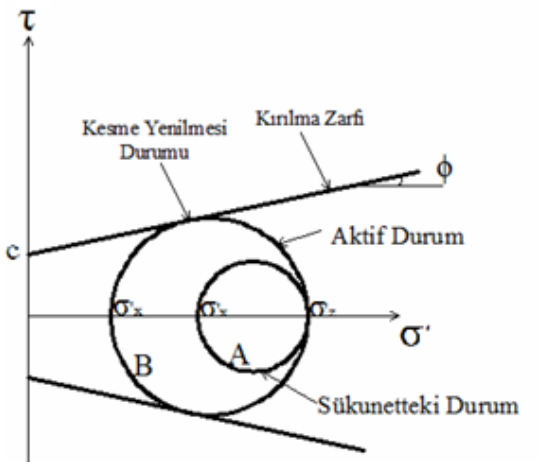
2.1.2 Aktif Toprak Basıncı

Dayanma yapılarına etkiyen aktif ve pasif toprak basıncının hesaplanmasında yaygın olarak plastisite teorisinden hareket eden ve Rankine tarafından geliştirilen 'Rankine Teorisi' ve Coulomb tarafından geliştirilen 'Kama Teorisi' kullanılmaktadır. İlave yüklerden doğan yanal basınçların hesabında elastisite teorisinden yararlanılarak elde edilen formüller de mevcuttur. Rankine ve Kama teorileri zemin kütlesi içinde kırılma yüzeyleri oluşuncaya kadar, zeminin

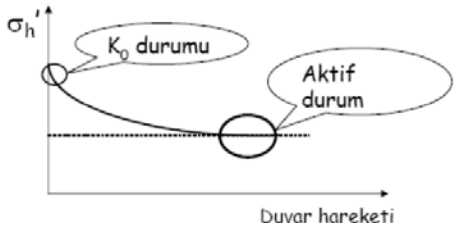
yatay yönde genişlemesi veya sıkışması esasına dayanır. Bu durum gerçekte perdenin öne veya arkaya doğru hareketi veya alt kenarı etrafında bir eksen boyunca dönmesi ile elde olunur. (Tunca, 2010)

Rankie teorisinin geçerli olabilmesi için, zeminin homojen ve izotrop, düşey dayanma yapısının dik ($\theta=90^0$), dayanma yapısı arkasında bulunan zeminin düz ($\beta=0$) ve zemin ile duvar arasındaki sürtünme açısının ($\delta=0$) kabullerinin yapılması gerekir. Bu teori dayanma yapısına gelecek olan itkiyi plastik denge teorisi kullanarak hesaplamaktadır.

Sükunetteki toprak basıncı, duvarın hareket etmediği durumlarda söz konusudur. Yapılan dayanma yapılarının tasarımında her ne kadar hareket etmeyen bir dayanma yapısı tasarlanmak istense de bu pek mümkün değildir. Dayanma yapısında meydana gelen çok küçük deplasmanlar bile yanal zemin basıncını değiştirmektedir. Dayanma yapısı kazı yönünde hareket eder veya alt nokta etrafında dönme meydana gelirse, bu hareket nedeniyle düşey gerilmeler sabit kalırken yatay gerilmelerde azalmalar meydana gelir. Bu azalma Mohr Dairesi'nin kırılma zarfına teğet olana kadar devam edecektir. Kırılma zarfına teğet olması durumunda zeminde kesme yenilmesi yani göçme meydana gelir. Mohr Dairesi'nden elde edilen bu değer bize σ_a değerini verecektir. Duvar arkasında göçmeye ulaşıldığında düşey gerilme büyük asal gerilme, yatay gerilme ise küçük asal gerilme değerindedir.



Şekil 2.3: Aktif durumda Mohr Dairesi ve kırılma zarfı. (Coduto, 2011)



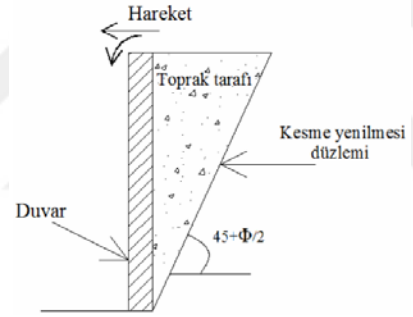
Şekil 2.4: Yer değiştirmeye bağlı gerilme değişimi. (Berilgen,2012)

Yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı bize aktif zemin itki katsayısını verecektir. Zeminde göçme durumunda asal gerilmeler ile kayma açısı arasındaki bağlantı (2.11) verilmiştir.

$$\sigma_a=\sigma_v tg^2(45+\phi/2)-2ctg^2(45-\phi/2) \quad (2.11)$$

Bu denklem yardımıyla (2.12) bağıntısı elde edilebilir.

$$\sigma_a=\sigma_v K_a-2c(K_a)^{1/2} \quad (2.12)$$



Şekil 2.5: Duvar arkasındaki aktif durum.

Burada kullanılacak ϕ ve K_a değerleri toplam veya efektif gerilme cinsinden hesaplanabilir. Efektif gerilme cinsinden hesap yapılması durumunda su basıncı hesaplamalara dahil edilmelidir.

Suya doygun drenajsız killerde kısa dönem parametrelerinde $\phi_u=0$ yazılabileceği için denklem (2.11) buna bağlı olarak (2.13) halini alacaktır.

$$\sigma_a=\sigma_v-2c \quad (2.13)$$

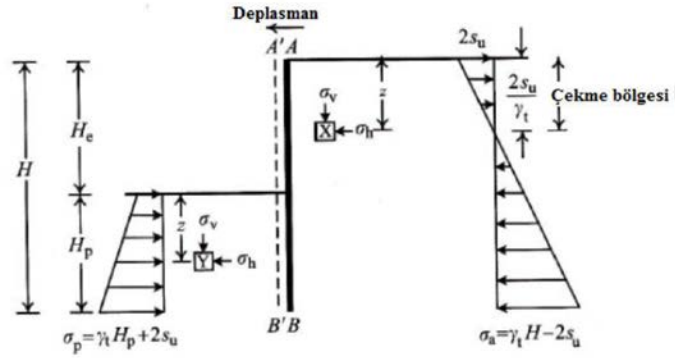
Temiz granüler zeminlerde ise c değeri 0 olup buna bağlı olarak (2.11) bağıntısı, (2.14) halini alacaktır.

$$\sigma_a=\sigma_v K_a \quad (2.14)$$

$$K_a = tg^2(45-\phi/2) \tag{2.15}$$

(2.11) eşitliği incelendiğinde c > 0 için yanal gerilmeler zemin yüzeyinde (σ_v=0) olduğundan σ_a=-2c(K_a)$^{1/2}$ olup zemin çekme gerilmeleri altındadır. Gerilmelerin pozitif değerlere geçtiği yer için (σ_a=0) yazılırsa, bağıntı (2.16) elde edilir. Burada z_c çekme çatlağı derinliğini göstermektedir.

$$0 = \gamma z_c K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad \text{ve} \quad z_c = \frac{2c}{\gamma\sqrt{K_a}} \tag{2.16}$$



Şekil 2.6: Çekme çatlağı derinliği.

Dayanma yapısının arkasındaki zemin α açısı ile eğimli ise buna bağlı olarak aktif toprak itki katsayısı (2.17) bağıntısı ile verilmiştir.

$$K_a = \cos\alpha \frac{\cos\alpha - \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\phi}}{\cos\alpha + \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\phi}} \tag{2.17}$$

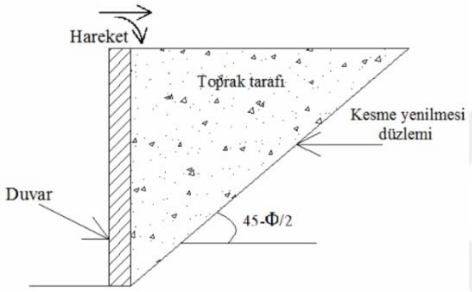
Zeminin aktif duruma geçmesi için gerekli gerekli deplasman miktarı Tablo 2.2'de görüldüğü gibi zemin türüne ve duvar yüksekliğine bağlıdır.

Tablo 2.2: Zeminin aktif duruma geçmesi için gereken yatay hareket. (Coduto, 2011)

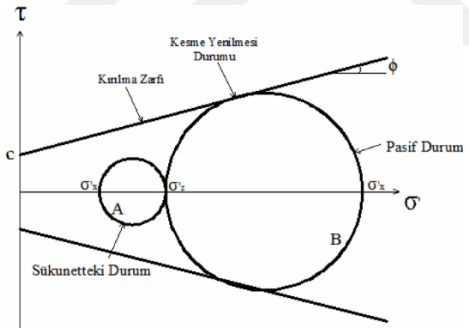
Zemin Türü	Aktif Duruma Geçmesi İçin Gerekli Yatay Hareket
Sıkı Kum	0,001*H
Gevşek Kum	0,004*H
Katı Kil	0,010*H
Yumuşak Kil	0,020*H
H: Duvar Yüksekliği	

2.1.3 Pasif Toprak Basıncı

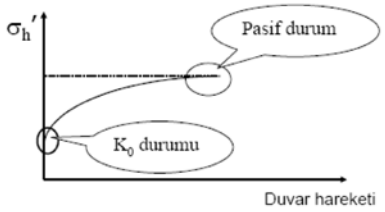
Dayanma yapısının, zemine doğru deplasman yapması ve uç kısmının zemine doğru dönmesinden dolayı zeminde düşey gerilmeler sabit kalırken yatay gerilmelerde artış gözlenir. Bu artış ile yatay gerilmeler düşey gerilmelere eşit olur ve daha sonra düşey gerilmelerden büyük hale gelir. Yatay gerilmelerdeki artış zemin göçmeye yani yatay gerilmeler kırılma zarfına teğet olana kadar sürecektir. Pasif toprak basıncı σ_p ile, pasif toprak itki katsayısı K_p ile gösterilir. Pasif toprak basıncının oluşumu ve buna bağlı olarak Mohr dairesinin değişimi Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.7: Duvar arkasında oluşan pasif durum.



Şekil 2.8: Pasif durum Mohr Dairesi ve kırılma zarfı.



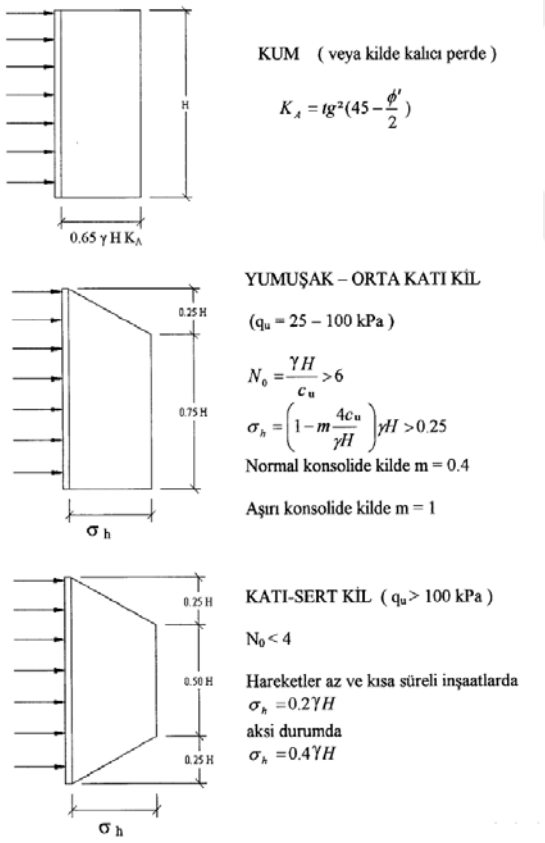
Şekil 2.9: Yer değiştirmeye bağlı gerilme değişimi.

Pasif yanal itkinin doğabilmesi için aktif itkilerden çok daha fazla yanal ötelenme gerekmektedir. Duvar üst noktasının gevşek kumda 0.006H, sıkı kumda 0.002H, yumuşak kilde 0.04H, katı kilde 0.02H mertebelerinde yer değiştirmesi gerektiği model deneylerinde belirlenmiştir. (Coduto, 2011)

2.1.4 Çok Destekli Sistemlerde Toprak Basınçları

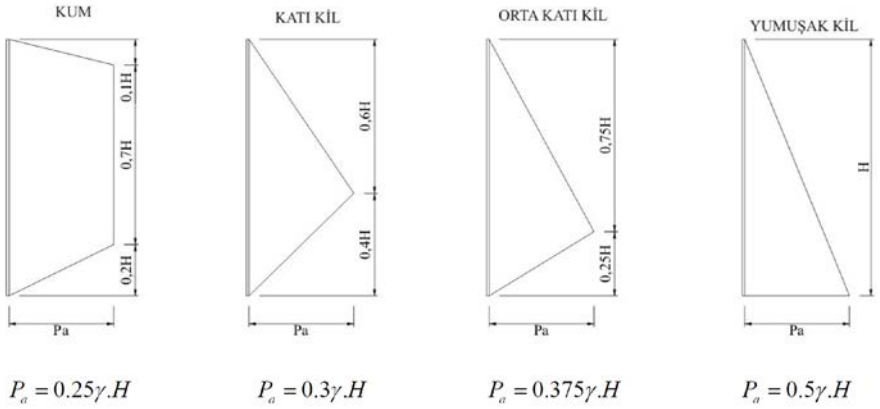
Aktif ve pasif toprak basınçları Rankine ve Coulomb tarafından, konsol sistemler ve tek sıra destekli dayanma yapıları için kullanılır. Fakat dayanma yapıları proje bazlı olarak birden çok yatay desteğe ihtiyaç duyabilir. Bu durumda Rankine ve Coulomb toprak basınç dağılımı kullanılamaz. Çok sıralı yatay destekli dayanma yapıları arkasında oluşan toprak basınç dağılımları için, saha çalışmaları ve gözlemler yapılmış ve bu çalışmalar neticesinde Rankine ve Coulomb'dan farklı toprak basınç dağılımları önerilmiştir.

Önerilen toprak basınç dağılımları sırası ile Terzaghi ve Peck (1967) Şekil 2.10'da, Tschebotarioff (1951) Şekil 2.11'de ve Navfac (1988) tarafından önerilenler toprak basınç dağılımı Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



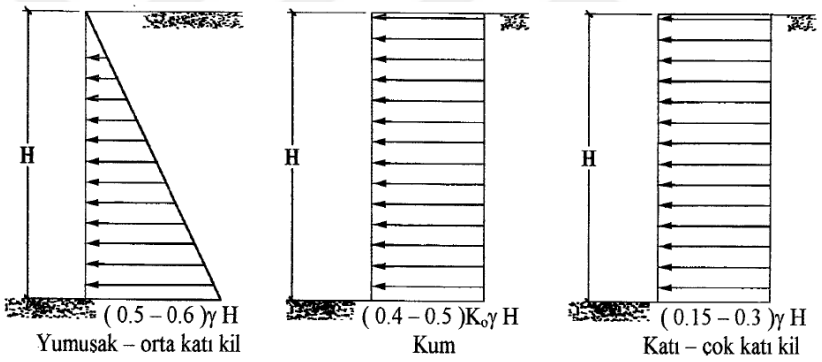
Şekil 2.10: Terzaghi-Peck (1967) tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı.

Kil için N_0 değeri 4 ile 6 arasında ise büyük değer hesaplamalarda dikkate alınabilir. Su ve sürşarj yükleri de dağılımlara dahil edilmelidir. Son iki dağılım kalıcı sistemler veya su seviyesinin kazı tabanından yüksek olması durumunda geçerli değildir.



Şekil 2.11: Tschebotarioff (1951) tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı.

Destekli sistemlerdeki yanal toprak basıncı dağılımları ile ilgili bir diğer öneri de Tschebotarioff tarafından önerilmiştir. Kumlu ve/veya kazı derinliğinin 16 m den fazla olduğu durumlarda Tschebotarioff metodunun daha geçerli olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 2.12: Navfac (1988) tarafından önerilen toprak basınç dağılımı.

Anılan bu araştırmacıların yanında, Bjerrum ve Kirkedam (1958), Lambe (1970), Golder (1970), Swatek (1972) ve Klenner gibi birçok araştırmacı yanal toprak basınçları hakkında çalışmalar yapmıştır ve öneriler sunmuştur. Önerilen toprak itkilerinin birçoğu içten iksalı kazılar için geçerli olmakla beraber ankrajlı kazıların tasarımında da kullanılması uygun olmaktadır. Son yıllarda yapılan yeni araştırmalar önerilen toprak itkilerinin yüksek değerler olduğunu ve kabul edilmesi gereken toprak itkilerinin daha az olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle iksa deplasmanı ölçümleri sonucu ile yapılan geri analiz ve saha ölçüm teknikleriyle yapılan analizlerde ekonomik olmayan sonuçlar doğuracak toprak itkilerinin seçildiği anlaşılmıştır. Kohezyonlu ve kohezyonsuz zemin kabulü ile yapılan yük dağılımı tercihleri, sert kil veya yumuşak kaya zeminlerde gerçekleşenin çok üstünde yanal yük hesaplamasına yol açmaktadır (Yoo, 2001).

Derin kazı destekleme sistemlerinin rijitlikleri istinat yapılarına göre daha azdır. Ayrıca destekleme sistemlerinde, bölgesel toprak basıncı yığılması sonucu destekleme sistemlerinin elemanlarında çok büyük yükler oluşmakta ve bunun sonucunda da sistemin toptan göçmesine neden olabilecek bir ardışık göçme mekanizması meydana gelebilmektedir. Bu sebepten desteklerin tasarımı, desteklere gelebilecek yüklerin ortalamasına göre değil de oluşabilecek maksimum yatay destek yüklerine göre yapılmalıdır. Oluşan kesit tesirleri kazı yapılması ve desteğin yerleştirilmesi ile farklılık gösterecektir. Bu nedenle her kazı kademesinde ve yatay desteğin uygulanmasında kesit tesirleri ve yükler kontrol edilmeli ve en kritik durum için tasarımlar yapılmalıdır.

2.2 DAYANMA YAPILARI

2.2.1 Düşey Dayanma Yapıları

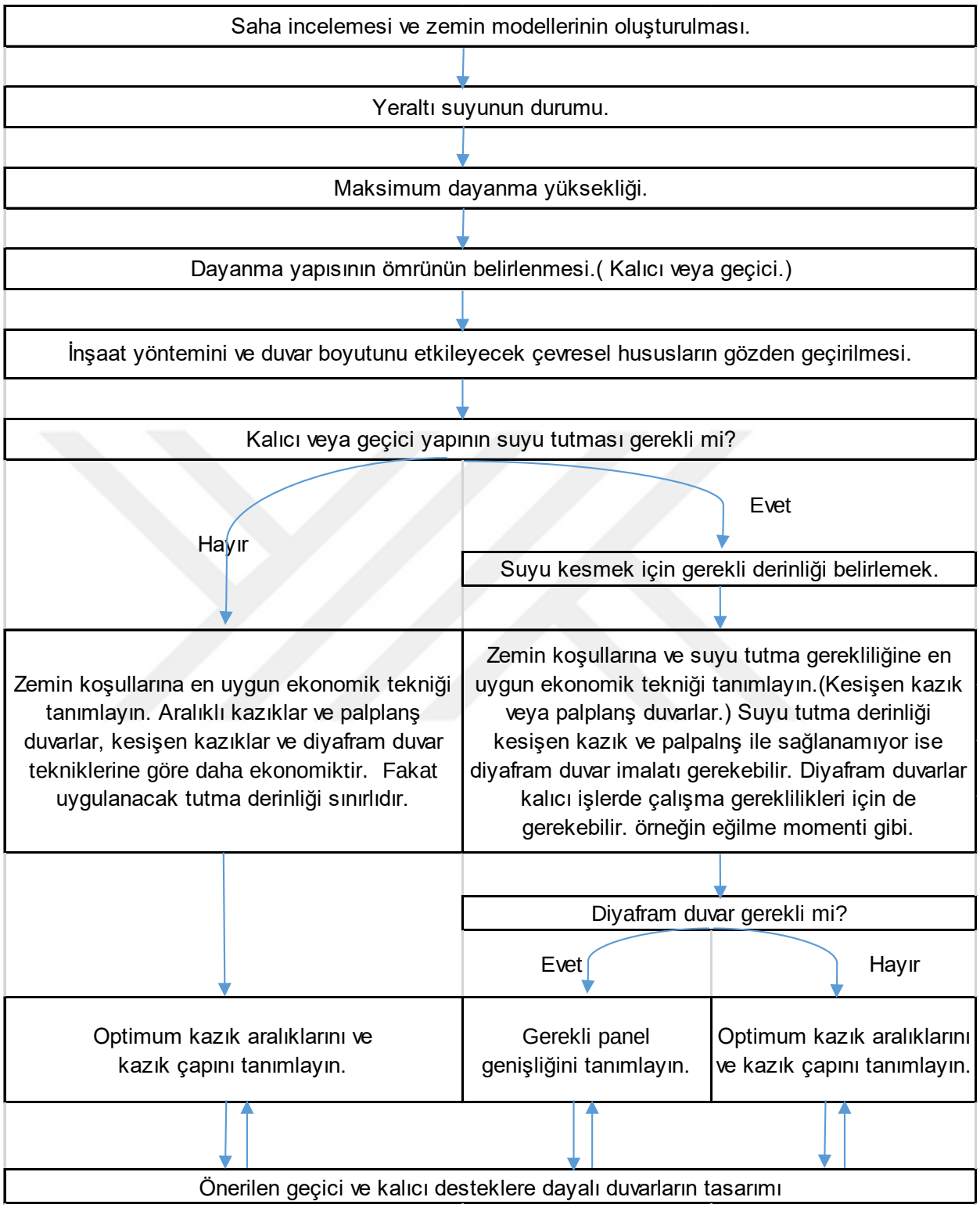
Derin kazılarda yatay toprak itkilerini tutmak için düşey dayanma yapıları kullanılır. Kullanılan dayanma yapıları oluşacak itkiye dayanmalı ve deplasmanları sınırlayarak kazı güvenliğini sağlamalıdır. Kullanılacak düşey dayanma yapıları birçok faktöre bağlı olmakla birlikte en önemli faktörler aşağıdaki gibidir;

- Maliyet,
- Zemin koşulları ve Yeraltı suyunun durumu,
- Dayanma yapısının önemi ve kazı derinliği.
- Kazı yanında bulunan servis yapıların ve komşu binaların güvenliği,
- İzin verilebilir deplasmanlar,
- Yapının kullanım ömrü, (kalıcı veya geçici)
- Çevreye verdiği rahatsızlık durumu,
- İmalat süresi,
- Seçilen sistemin uygulanabilirliği olarak sıralamak mümkündür.

Tablo 2.3’de düşey dayanma yapılarının avantaj ve dezavantajları verilmiş ve daha sonra bu başlıklar ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Kullanılacak dayanma tipinin seçimi Şekil.2.13’e göre yapılabilir.

Tablo 2.3: Dayanma yapılarının avantaj ve dezavantajları.

Duvar Tipi	Avantajlar	Dezavantajlar
Palplanş Duvarlar	- Kullanılan malzemeler hafiftir - Tekrar kullanılabilir. - Su sızdırmaz yapıya sahiptir. - İmalatlar büyük alanlara ihtiyaç duymaz.	- Kaya zeminlerde imalatı zordur.. - Oluşan deplasmanlar diğer dayanma yapılarına göre daha fazladır. - Korozyon nedeniyle kesitlerde kayıplar meydana gelebilir.
Diyafram Duvar	- Konsol olarak imal edilebilir. - Su sızdırmaz yapıya sahiptir. - kesişen kazık imalatının yapılamadığı yerlerde tercih edilebilir. - Kaya ortamında imalatı mümkündür.	- Kılavuz duvar imalatının yapılması gerekir. - Maliyeti yüksektir. - İmalatlarda bentonit solüsyonunun kullanılması gerekir. - Betonlama işlemi tremi boruları ile yapılmalıdır.
Fore Kazık	- Konsol olarak imal edilebilir. - Su tutucu yapılarda kesişen kazıklar kullanılabilir. - Aralıklı, teğet ve kesişen olarak imal edilebilir. - Yapılan delgi ile birlikte zemindeki tabakalanma gözlemlenebilir.	- Sert zeminlerde imalatı zordur. - Kesişen ve teğet kazıklarda kılavuz duvar imalatının yapılması gerekir. - Zemin çeperinde gevşemeler olur. - Betonlama işlemi tremi boruları ile yapılmalıdır.
Mini Kazık	- Daha küçük makineler ile imalat yapılabilir. - Fore kazık imalatı yapılamayan kayalarda delgi işlemi için kullanılır.	- Kazık çapları küçük olduğundan betonlama işlemi zordur ve farklı yöntemler gerekir.
Püskürtme Beton	- Maliyeti uygundur. - Hızlı ve pratiktir. - Kalıp kullanılmaz.	- Oluşan zayiatlar fazladır. - İşçiliği zordur. - Genellikle çelik hasır ile birlikte kullanılır.
Berlin Duvarı	- İmalatı hızlıdır. - Maliyet bakımından daha uygundur. - Gelişmiş ekipmanlara ihtiyaç duymaz.	- Geçici sistemlerde kullanılır. - Yeraltı suyu bulunan yerlerde kullanılmaz. - Diğer dayanma yapılarına karşılaştırıldığında rijit değildir. - Düşey elemanlar çakılarak imal edilebilir.
Top-Down İnşaat	- Oluşan deplasmanlar daha azdır. -Bodrum ve üstyapı inşaatları aynı anda yapılmasıyla imalat süresi kısalır. - Geçici olarak kullanılan düşey elemanlar kalıcı hale getirilir.	- Maliyetler yüksektir. - Kullanılacak makineler küçüktür. - Aydınlatma ve havalandırma konularında sıkıntılar yaşanabilir. - Zeminde yapılan imalatlar daha yavaş ilerler.



Şekil 2.13: Duvar seçimi karar ağacı. (CIRIA C760, 2017)

2.2.1.1 Palplanş Duvarlar

Yatay zemin yüklerini karşılayan ve sızdırmazlık sağlayan palplanş duvarlar, betonarme, ahşap ve genellikle çelik olarak imal edilebilir. Birçok kullanım alanı olması ile birlikte deniz kenarı gibi, su seviyesinin yüzeye çok yakın olduğu yerlerde yapılacak temel kazılarında zemin akmasını ve su gelişini büyük oranda engelleyen palplanş perdeler, hidrolik çekiçler yardımıyla istenilen boyda ve uzunlukta zemine çakılırlar.

Palplanşlar genellikle geçici olarak kullanmakla birlikte proje bazlı olarak kalıcı olarak da uygulanabilir. Geçici olarak uygulanan palplanşlar daha sonra soketlenen zeminden çıkarılır ve başka projelerde kullanılabilir.

Palplanşlar ankastre veya yatay destekler ile birlikte kullanılabilir. Ankastre palplanşlarda stabilite, gömme derinliğine bağlıdır. Bu nedenle alçak ve orta yükseklikteki uygulamalar için tasarlanabilir. Büyük derinliklerde palplanşlarda aşırı esnemeyi ve deplasmanı önlemek amacıyla yatay destek elemanları ile birlikte kullanılabilmektedir.

Palplanş seçimi projenin kullanım süresi, saha koşulları, derinlik, eğilme momentleri ve istenen koruma türüne bağlı olarak belirlenir.

Tablo 2.4: Palplanşlarda korozyon nedeniyle oluşan kesit kayıpları (CIRIA C760, 2017)

İstenilen Dizayn Çalışma Süresi	5 YIL (mm)	25 YIL (mm)	50 YIL (mm)	75 YIL (mm)	120 YIL (mm)
Örselenmemiş Doğal Zeminler (Kum, Silt, Kil, Şist)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Kirli Doğal Zeminler ve Endüstriyel Alanlar	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Agresif Doğal Zeminler (Bataklık)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Sıkıştırılmamış ve Agresif Olmayan Dolgular (Kil, Şist, Kum, Silt)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Sıkıştırılmamış ve Agresif Dolgular (Küller)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

Palplanş Türleri:

Palplanş türlerini 3 ana başlık altında sınıflandırabiliriz. Bunlar ahşap palplanşlar, betonarme palplanşlar ve çelik palplanşlardır.

Ahşap Palplanşlar:

Ahşap palplanşlar, kazı derinliğinin daha az olduğu durumlarda zaman içerisinde zemin şartlarından hasar görebilecekleri için geçici amaçlar için kullanılırlar. Kalaslar yan yana tek sıra halinde zemine dik olarak ya da birbirleri üzerine bindirme yaparak ve “U” demirinden bir başlıkla çakılır.

Betonarme Palplanşlar:

Betonarme palplanşların kullanılması halinde kullanılacak betonarme kesitleri uygulanan yüke, çakma ve taşıma sırasındaki gerilmeler dikkate alınarak seçilmelidir. Palplanşların birbiri ile iyi kenetlenmesini sağlamak için alt ucunda bir pah oluşturulabilir.

Çelik Palplanşlar :

7-30 mm kalınlığında 40-60 cm genişliğinde farklı kesitlere sahip çeliklerden, farklı uzunluklarda üretilebilir. Diğer tür palplanşlara göre daha yaygın kullanılmaktadır. Projede kullanılacak kesitin seçiminde palplanşların ne için kullanılacağı baz alınmalıdır. Z kesitli palplanşlar bükülme dayanımı gerektiren yerlerde, düz kilitli kesit ise çekme gerilmesi taşıyan yerlerde, kemerli palplanşlar büyük eğime ve konsol yükü taşıyan yerlerde kullanılmaktadır. (Ermanlar, 2009)

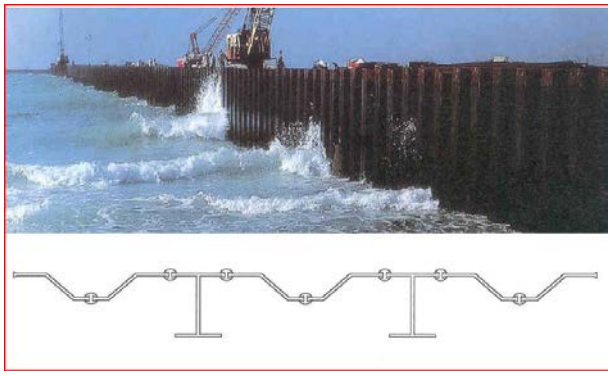
Kullanılan palplanş boyu cıvata veya kaynak ile uzatılabilir ve kazı tamamlandıktan sonra yeniden kullanılabilirler. Palplanşlar yerleştirilirken birbiri ile kesişecek şekilde çakılır böylelikle kazı aynasına paralel yönde sürekli bir duvar elde edilir. Kullanılacak kesitlere bağlı birleşme yerlerinin kesiti de değişebilir.



Şekil 2.14: Çelik palplanş çakım işlemi.

Kral Kazıklarla Kullanılan Palplanşlar:

Denizcilik uygulamalarında daha yüksek eksenel kapasiteye ulaşmak için kullanılır ve palplanşlardan daha derine sürülür.



Şekil 2.15: Kral kazıklı palplanş duvar.

Avantajları:

- Duvar rijitliğini arttırır.
- Artan duvar moment direnci.
- Palplanş kotları daha yüksek kotlarda sonlandırılabilir.
- Kral kazıkları daha sağlam kayaya kadar soketlenebilir.
- Ağır deniz uygulamaları için idealdir.

Dezavantajları:

- Daha pahalıdır.
- Kurulumu daha karmaşık ve zorludur.

2.2.1.2 Diyafram Duvar

Derin kazı destekleme yöntemlerinden biri olan diyafram duvar, yer altı suyu bulunan ve kendini tutamayan zeminlerde, geçirimsizlik perdesi olarak veya mevcut yapıların ve zeminin deplasmanını engellemek için düşey yapı elemanı olarak genellikle yüksek binalar, yer altı otoparkları, endüstriyel tesisler, deniz veya nehir kenarında yapılan projelerde, tarihi yapılara yakın derin kazılarda vb. birçok yapının inşasında kullanılabilir. Tipik olarak 20-60 m arasındaki derinlikler için kullanılmakla birlikte 100 m'yi aşan imalatlarda mümkündür.

Diyafram duvar diğer dayanma yapılarına oranla daha rijit bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla kazı sonucu oluşacak yatay ve düşey deplasmanlar diğer dayanma yapılarına göre oldukça düşük olacaktır. Bununla birlikte, kazılan derinliğin artması ile birlikte uygulanılacak olan duvar kesitleri artacak ve böylece maliyetler de yükselecektir. Bu sebeple diyafram duvara etkiyen momentleri azaltmak için yatay destek elemanları kullanılabilir. Böylelikle kesit tesirleri azaltılarak duvar kesitlerinin küçültülmesi ve tasarımın ekonomik olması sağlanabilir.

Diyafram Duvar İmalat Aşamaları:

- Kılavuz duvar inşası.
- Panel kazısı.
- Stop-end borusunun yerleştirilmesi.
- Kuyunun yıkanması.
- Donatı kafesinin yerleştirilmesi ve beton dökülmesi.
- Stop-end borusunun çekilmesi.

Kılavuz duvar inşası:

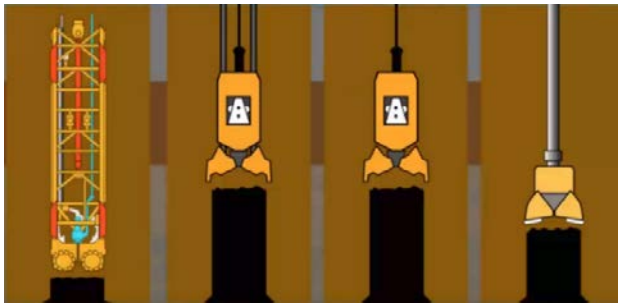
İmal edilecek olan diyafram duvarın projede istenen doğrultuda imal edilebilmesi için kılavuz duvar imalatı, diyafram duvar imalatına başlamadan önce yapılmalıdır. Bunun için önce 1.0 - 1.5m derinliğinde ve kazı ekipmanlarının rahat çalışabilmesi için diyafram duvar kalınlığından en az 5 cm geniş ön kazı yapılır ve prekast kılavuz duvar elemanları yerleştirilir veya yerinde imal edilir.



Şekil 2.16: Kılavuz duvar görünüm ve kesiti.

Panel kazısı:

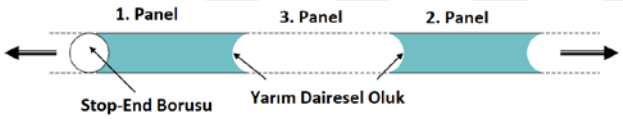
Kullanılacak duvar tipi uygulanacak projeye bağlı olarak 0,5- 1,5 m kalınlıklarında ve farklı boylarda olabilir. Diyafram duvarlar paneller halinde inşa edilir. Bu panel genişlikleri kullanılan ekipmana göre 2 m- 5 m arasında değişmekle birlikte kazı yapılacak ortamın zemin ve yeraltı suyu şartları altındaki hassasiyeti, donatı yoğunluğu gibi farklı faktörlere bağlı olarak da değişkenlik gösterebilir. Kazı işlemleri için grabler veya hidrofreze (Hidrolik Cutter) kullanılmaktadır. Seçilecek kazı yöntemi zemin koşullarına bağlı olarak belirlenir



Şekil 2.17: Farklı tiplerde diyafram duvar kazı ekipmanı.

Stop-End borusunun yerleştirilmesi:

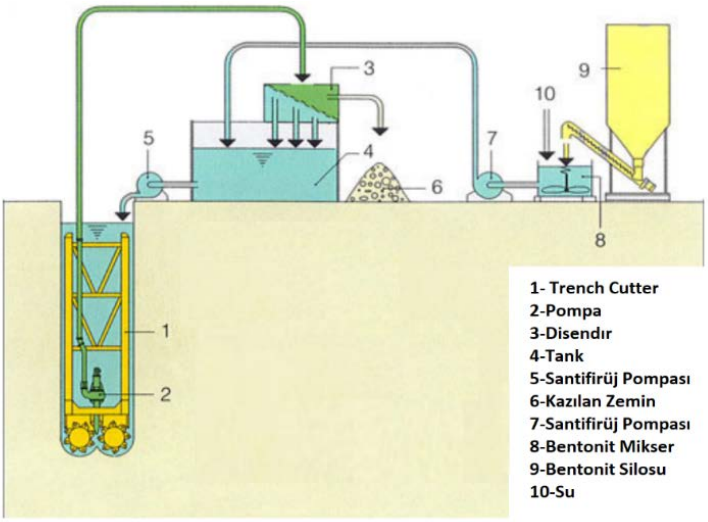
Diyafram duvarın sızdırmazlığını ve panellerin birbiri ile kenetlenmesini sağlamak için paneller arasına stop-end boruları yerleştirilir. Bu boruların genişlikleri panel genişliğine eşit olmalıdır.



Şekil 2.18: Diyafram duvar panelleri ve stop-end borusu.

Kuyunun yıkanması:

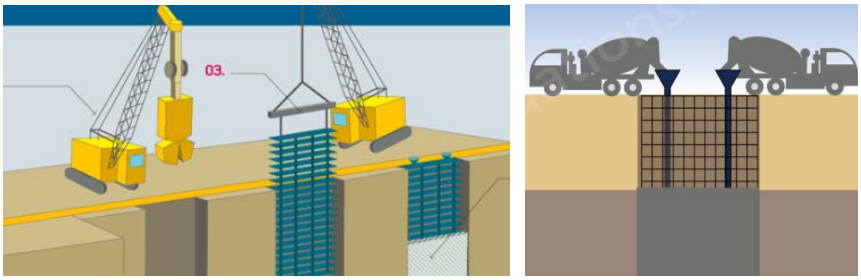
Diyafram duvar imalatında paneller kazılırken bir yandan da bentonit bulamacı ile kuyu stabilitesi sağlanır. Temiz bentonit havuzundan kazı çukuruna basılır, kuyudan çıkan yoğunluğu artmış bentonit ise disendırda temizlenip temiz bentonit havuzuna aktarılarak döngü sağlanır. Kazı çukurundaki bentonit yoğunluğu istenen değere gelene kadar bu işlem devam eder. Daha sonra beton dökümüne geçilebilir.



Şekil 2.19: Bentonit solüsyon döngüsü.

Donatıların yerleştirilmesi ve beton dökülmesi:

İstenilen derinliğe ulaşıldıktan sonra hazırlanmış donatı kafesi vinç yardımıyla kuyuya indirilir. Beton dökümü tek seferde soğuk derz oluşmasına izin vermeyecek şekilde gerçekleştirilir.



Şekil 2.20: Diyafram duvar donatı kafesinin yerleştirilmesi ve beton dökülmesi.

Bentonit Solüsyonu

Diyafram duvar imalatında kullanılacak olan bentonit solüsyonunun özellikleri TS EN 1538'de belirtildiği üzere aşağıdaki Tablo 2.5'de verilmiştir.

Tablo 2.5: Bentonit solüsyonunun özellikleri. (TS 3168, 2001)

Özellik	Kullanım Safhaları		
	Taze	Tekrar Kullanım İçin	Betonlamadan Önce
Birim Hacim Kütlesi (g/ml)	<1,10	<1,25	<1,15
Marsh Değeri (s)	32-50	32-60	32-50
Akışkan Kaybı (ml)	<30	<50	
pH	7-11	7-12	
Kum Muhtevası (%)		7-12	<4
Filtre Keki (mm)	<3	<6	
*Boş kutular dikkate alınmaz.			

2.2.1.3 Fore Kazıklar

Fare kazıklı duvarlar, iksa uygulamaları için kullanılan en yaygın yapı elemanlarıdır. Konsol kazık olarak tek başlarına kullanılabilecekleri gibi artan derinliklerle birlikte yatay destek elemanları ile de kullanılabilirler. Fore kazıklar farklı çap, boylarda, aralıklı, teğet veya kesişen kazık olarak imal edilebilir. Uygulanacak kazık türünün seçimi zemin koşullarına ve kazıkların ne için kullanılacağına bağlı olarak karar verilir. İmalat yöntemleri arasında belirgin farklılıklar olmamakla birlikte aşağıda kullanılabilecek kazık türleri belirtilmiştir.

Kesişen Kazık: Yeraltı su seviyesi altından yapılan kazılarda sızdırmazlık perdesi oluşturmak için tercih edilir.

Teğet Kazık: Su problemlerinin olmadığı fakat kazık aralarında malzeme boşalma riski olan zeminlerde veya jet grout kolonları ile birlikte sızdırmazlık perdesi oluşturmak için kullanılabilir.

Aralıklı Kazık: Yeraltı suyunun bulunmadığı, kazık arkasında bulunan zeminin akmadığı durumlarda belirli aralıklarla kazıklar imal edilir. Kazık aralıkları, malzemenin kazık arasından akmasına neden olacak kadar geniş, projede ankraj uygulaması var ise delginin kazık çeperlerine gelmesine neden olacak kadar da dar yapılmamalıdır.

Fore Kazık İmalat Aşamaları

- Kılavuz Duvarın İnşası (Teğet ve kesişen kazık için)
- Kılıf Borunun Yerleştirilmesi
- Kazık Kuyusunun Açılması
- Donatı Kafesinin Yerleştirilmesi ve Beton Dökülmesi
- Kılıf Borunun Çekilmesi

Kılavuz duvarın inşası:

Teğet ve kesişen kazık imalatlarında kazık hizasının bozulmaması için kılavuz duvar imalatı yapılır. Yapılacak kazık imalatının merkezleri arasındaki mesafe kazık çapından büyük olarak imal edilmesi durumunda yani aralıklı kazık imalatlarında kılavuz duvar imalatı yapılmayabilir. Kazık arasındaki mesafe ise imalat yapılan zemin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterir.



Şekil 2.21: Kılavuz duvar imalatı.

Kılıf borusun yerleştirilmesi:

Delgi esnasında kuyu çeperlerinde çökme meydana gelmesi durumunda kılıf borusu, bentonit çamuru su veya bu sistemler ortaklaşa kullanılabilir.

Kullanılacak kılıf borusu kalıcı olarak kullanılabileceği gibi ekonomik olması için genellikle geçici olarak kullanılır. Zemin yüzeyinden 0,5-1m yukarıda kalacak şekilde kılıf boru vibro çekiç, rotari, ön foraj vb. yöntemleri kullanılarak yerleştirilir ve delgi çeperinin stabil olması sağlanır. Boru alt kotu her zaman stabilite bozukluğu olan zemin tabakasının minimum kazık çapının 2 katı kadar altında bulunacaktır. Fore kazık çukuru kazıldıkça boru aşağıya sürülür. Daha uygun zemin katmanlarına geçilmesi durumunda kılıf borusu kısmi olarak sürülebilir ve içi su ile doldurularak delgi çeperinin stabilitesi sağlanır. Kullanılacak kılıf borusu deliksiz, yapısal hasar görmemiş, sürme ve çekme sırasında oluşabilecek etkilere dayanabilecek nitelikte olmalıdır.



Şekil 2.22: Muhafaza borusunun indirilmesi.

Kılıf borusu kullanılamaması durumunda yerine kuyuda meydana gelen çökmeleri önlemek için su veya bentonit çamuru da kullanılabilir. Zemin şartlarının elverdiği durumlarda bentonit yerine su kullanılacaktır. Ancak yeraltı suyuna rastlandığı takdirde veya kazık şaftı içinde çökme olması durumunda kuyu bentonit ile doldurulur. Uygulanacak yöntemler yeraltı suyunun oluşturduğu etkileri karşılamalı ve kullanılacak olan su ve bentonitin seviyesi, özellikle ince kumlu zeminlerde, delgi aletleri kuyunun dışında iken yeraltı su seviyesinin yaklaşık 2'm üstünde olmalıdır. Kullanılacak bentonit solüsyonu en az 12 saat önceden hazırlanmalıdır.

Kazık kuyusunun delgisi:

Yapılacak olan delgi yöntemi zemin türüne, zeminde yeraltı suyunun bulunmasına zeminin kendini tutup tutmamasına bağlı olarak değişir. Delme auger ile yapılacak olup, sert tabakaların geçilmesinde kaya matkabı ve gevşek sulu zeminlerde gerekirse kova kullanılacaktır.

Dikkat edilmesi gereken en önemli hususlarda biri kesişen kazıklarda diğer delgilerden farklı olarak her iki kazıktan biri donatısız olarak imal edilir. Bu kazıklara birincil kazık (Plastik kazık) daha sonra donatılı olarak imal edilecek kazıklara da ikincil kazık denir.

Kazık kuyularının açılması sırasında plastik kazıklar yeterli mukavemet kazanmadan önce ikincil kazıklar önce yapılan plastik kazıkları keserek delgi işlemini yapar. İkincil kazık, birincil kazığı kazık çaplarına bağlı olarak 125 mm ile 225 mm arasında bir değerde kesmelidir. Kesme miktarının 225 mm aşmasından kaçınılmalıdır. (CIRIA C760, 2017) İkincil kazıkların delgisine, birincil kazıkların betonu döküldükten en az 48 saat sonra başlanabilir.



Şekil 2.23: Fore kazık delgisinin yapılması.

Donatı kafesinin yerleştirilmesi ve beton dökülmesi:

Projeye göre hazırlanmış donatı kafesi vinç veya kazık makinesi yardımı ile delgi işlemi tamamlanmış kuyuya indirilir. Kazık donatı kafesinde aşırı eğilme ve bükülme olmaması için donatı kafesi boyunca belirli aralıklarla çember donatısı (genellikle 2 metrede bir adet olarak) yerleştirilir. Kazık çukuru betonlanmadan önce iyice temizlenmeli zemin döküntüsü ve yabancı maddelerin betona karışması önlemelidir..

Donatı kafesinin betonlama sırasında kayıp dağılmaması ve geçici muhafaza borusu çekilip çıkarılırken takılıp sıyrılmaması için özen gösterilmelidir. Delgisi tamamlanan kuyunun betonlama işlemi 20-25 cm çaplarında tremi boruları ile kuyu tabanından başlanarak yapılır.



Şekil 2.24: Tremi borusu ile beton dökülmesi.

Kılıf Borusunun çekilmesi:

Kılıf borusu vibro veya kazık makinesiyle, beton işlenebilirliğini kaybetmeden önce çıkartılır. Ancak beton ile boru arasında necking (sarılma) meydana gelmemesi için muhafaza borusu çekilirken aynı zamanda betonlama işlemene devam edilmelidir.

2.2.1.4 Mini Kazık

Fore kazık ile aynı özelliklere sahip olan mini kazık, çapının küçük olması nedeni ile fore kazıktan ayrılır. Çapları 25-40 cm arasında olan mini kazıklar, büyük kazık makinelerine ihtiyaç duymadan küçük makineler ile bu çaptaki kazıklar oluşturulabilmekte ve bu nedenle mini kazık makinelerinin ebatları daha küçük olabilmektedir. Bu durum fore kazık imalatı için uygun olmayan yerlerin mini kazık imalatı için uygun hale getirir. Fore kazık imalatının maliyetli olabileceği sağlam kayalarda imal edilebilmeleri önemli bir tercih sebebidir.



Şekil 2.25: Donatısı indirilmiş mini kazık imalatı.

Mini kazıklarda yeraltı suyunun olması durumunda beton dökümü yapılmaz. Bu tür sulu zeminlerde demir donatıya enjeksiyon hortumu bağlanır. Kuyuya beton yerine mıcır dökülür ve daha sonra enjeksiyon ile mıcırlar arasındaki suyun yerine enjeksiyon alması sağlanır.

Mini kazık imalatı içerisine tremi borusu sokulamadığından betonla yapılan kazık boyları 5 m den fazla uzun olması durumunda mini kazık dibinde ayrışmalar oluşur. Mini kazıklar düşük çaplarda imal edildikleri için kesit tesirlerine karşı düşük taşıma kapasitesine sahiptirler. Bu nedenle konsol çalıştırılacak kadar eğilme momenti kapasiteleri yoktur. Büyük çoğunlukla yanal yönde desteklenirler ve konsol momentlerinden daha düşük açıklık momentlerine maruz kalırlar. Yanal yönden deplasmanların sınırlı tutulması için aç-kapa betonarme perde imalatı ile birlikte kullanılarak mini kazıkların deplasman zafiyeti azaltılır.

2.2.1.5 Püskürtme Beton (Shotcrete)

Kendini tutamayan ve ayrışması muhtemel zeminlerde, su, agrega, çimento ve katkı karışımının yüksek hava basıncı ile hazırlanan yüzeye püskürtülerek uygulanan bir yöntemdir. Püskürtme beton, uygulama ve hazırlanış bakımından diğer geleneksel betonlardan farklı olup, bu farklılıklar kullanılan ekipman, katkı malzemeleri ve yüksek çimento oranından kaynaklanır.

İki çeşit püskürtme beton uygulaması vardır. Bunlar yaş karışım veya kuru karışım püskürtme beton olarak isimlendirilmekle birlikte yaş sistemde su, agrega ve çimento birlikte karıştırılır ve oluşturulan karışım direk olarak kazı aynasına uygulanır. Katkı kullanılacak ise sıvı katkı nozulda karışıma dahil edilir.

Kuru sistemde ise su ve katkı, nozulda karışıma dahil edilerek kazı aynasına uygulanır. Kuru tipte yapılan püskürtme betonda su muhtevası ağılıkça %4'ü geçmemesi gerekmektedir.

Birçok kullanım alanlı bulunmakla birlikte püskürtme betonun başlıca kullanıldığı yerler:

- Yol kenarlarındaki şevlerde,
- Kazı sırasında kayma tehlikesi olan yan yüzeylere,
- Tünel yada metro inşaatlarında,
- Toprak kayması ya da kaya, taş parçasının düşmesinin engellenmesinin istenildiği alanlarda,
- Yapı güçlendirme işlerinde,
- Dere yataklarında suyun aşındırma etkilerine karşı kullanılabilmektedir.

Avantaj ve Dezavantajları

Püskürtme beton farklı amaçlar için kullanılabilir. Kullanılacağı amaca göre avantaj ve dezavantajları vardır. Bunların başlıcaları aşağıda Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6: Püskürtme beton avantaj ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajları
I. Daha uygun maliyetlidir.	I. Oluşan zayiatlar fazladır.
II. Hızlı ve pratiktir.	II. İmalatı zordur.
III. Kalıp kullanılmaz.	III. Genellikle çelik hasır ile birlikte kullanılır.

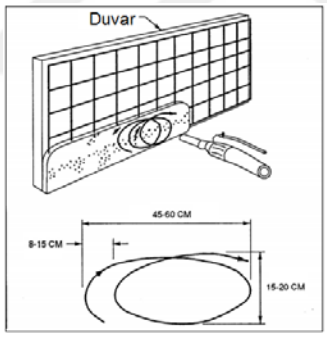
Zayiata asıl neden olan faktör, püskürtülen malzemenin yüzeyden geri sıçramasıdır. Sıçramaya etki eden unsurlar;

- Püskürtme başlığının kazı aynası ile yaptığı açı,
- Agreganın tane boyutu,

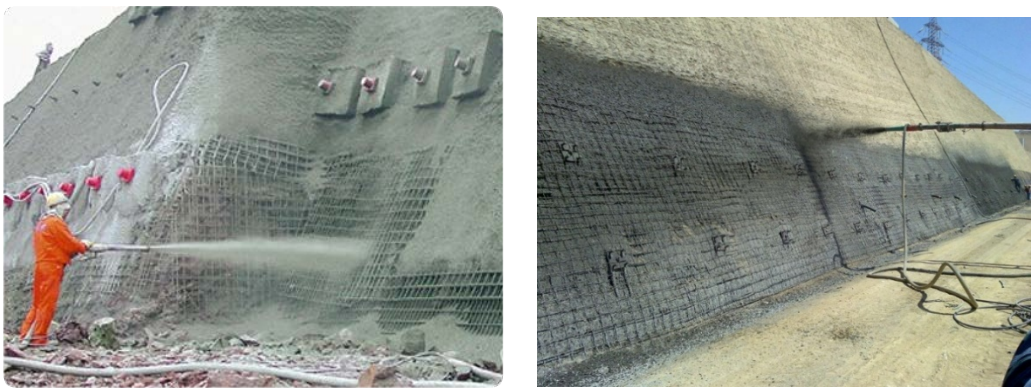
- w/c oranı,
- Yüzeyle püskürtme başlığı arasındaki mesafe.
- Betonun çıkış hızıdır.

Püskürtme Beton İmalat Aşamaları:

Püskürtme beton uygulanacak yüzey önce temizlenir, projesine uygun olarak çelik hasır donatısı yerleştirilir. Çelik hasırlar yerleştirilirken en az iki göz bindirme yapılır ve yüzey püskürtme beton için nemlendirilerek püskürtme beton için uygun hale getirilecektir. Uygulama iki kademe halinde yapılır. Uygulanacak yüzey üzerindeki 1. hasırın üzerine püskürtme beton ile kaplanır. Eğer püskürtme beton imalatı ile birlikte zemin çivisi imalatı da var ise bulon plaka kaynakları veya somun germe işlemi tamamlandıktan sonra projede belirtilen kalınlıkta plakaların üstleri kapatılacak şekilde püskürtme beton yapılır. Püskürtme beton uygulaması el ile yapılabileceği gibi makine yardımıyla da yapılabilir. Püskürtme işlemi sırasında nozul yüzeye mümkün olduğunca dik tutulmalı ve küçük daireler çizerek uygulanmalıdır. Püskürtme hızı ve mesafesi malzemenin geri dönüşünü en aza indirecek şekilde ayarlanacaktır.



Şekil 2.26: Püskürtme beton nozul hareket şekli. (Ryan 1973)



Şekil 2.27: El ve makine ile yapılan püskürtme beton uygulaması.

Kuru ve Yaş Sistemlerin Karşılaştırılması

Püskürtme beton, projedeki ihtiyaç durumuna göre kuru karışım veya ıslak karışım olarak üretilebilir. Bununla birlikte, ekipman maliyeti, bakım gereksinimleri, operasyonel özellikler, yerleştirme özellikleri ve ürün kalitesindeki farklılıklar, belirli bir uygulama için birini veya diğerini daha çekici hale getirebilir. Süreçlerin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırmalı bir özeti Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2.7: Kuru ve yaş karışım püskürtme beton sistemlerinin karşılaştırılması.

No	Karşılaştırma Kriterleri	Kuru Karışım	Yaş Karışım
1	Püskürtme Beton Hızları	70 ile 120 mt/sn	35 – 45 mt/sn
2	Dayanım	Yaş sisteme göre daha hızlı dayanım kazanır.	Kuru sisteme göre dayanımını daha yavaş kazanır.
3	Su Kullanımı	Nozul ucunda karışıma dahil edilir.	Çimento ve agrega ile birlikte karıştırılır.
4	Zayiat	Geri sekme nedeniyle oluşan zayiat oldukça fazladır.	Kuru sisteme göre zayiat daha azdır.
5	Uygulama süresi	1- 2 m^3/saat	7 - 8 m^3/saat
6	Çimento Dozajı	300-350 kg/m^3	400-450 kg/m^3
7	Tozlanma	Su kontrolü yapılamadığı için tozlanma önleyici katkı malzemeleri kullanılır.	Sulu karışım olduğu için tozlanma oluşmaz.

2.2.1.6 Berlin Duvarı

Berlin duvarları yeraltı su seviyesinin üstünde yapılacak kazılarda kalıcı ve geçici olarak kullanılabilen en eski iksa sistemlerinden biridir. Her türlü zeminde imalatı yapılabilir fakat, zemin yatay elemanlar yerleştirilene kadar göçme ve akma meydana gelmeyecek derecede kendini tutabilme yeteneğine sahip olmalıdır.

Berlin duvarları genellikle I veya H Profil çelik elemanlar kullanılmakla birlikte farklı tür düşey elemanlar da kullanabilir. Örneğin kesonlar, dairesel borular veya betonarme kazıklar. Yatay elemanlar için ise genellikle 10x10 cm ahşaplar kullanılır. Projeye göre ahşap yerine prekast betonarme plakalar veya çelik kirişler de kullanılabilir. Sistemin kalıcı olarak tasarlanması durumunda ahşap yerine betonarme plakalar kullanılmalıdır.

Berlin duvarının tek başına yeterli olmadığı durumlarda yardımcı yatay destek elamanı olarak ankraj, zemin çivisi veya çelik destekler kullanılabilir.



Şekil 2.28: Konsol ve ankraj ile desteklenmiş Berlin duvarları.

I. Düşey elemanlar zemine çakılarak veya ön delgi yapılarak zemine projede belirtilen soketleme boyu sağlanacak şekilde yerleştirilir. Düşey elemanlar kullanılan yatay elemanlarının genişliklerine göre 2-4 metrelik aralıklarla düzgün olarak yerleştirilir.



Şekil 2.29: Düşey elemanlarının yerleştirilmesi.

II. Düşey elemanlar zemine yerleştirildikten sonra kazı işlemine başlanır. Zemin akmayacak ve göçmeyecek derinliklere kadar kazı yapılır.
Yatay elemanlar yukarıdan aşağıya doğru kazı yapıldıkça indirilir. Kazı kademeri arasında gerekmesi durumunda yardımcı yatay destek elamanlarınimalatı yapılabilir veya çelik destekler yerleştirilebilir.

III. İstenen derinliğe ulaşıldıktan sonra, projede planlanan imalata başlanabilir.

IV. Projenin tamamlanmasının ardından veya Berlin duvarının alt kademelerden itibaren gerek duyulmaması durumunda yatay destek elemanları çıkarılmaya başlanır. Bütün yatay destek elemanlar çıkarıldıktan sonra düşey elemanlarda çıkarılır ve bu elemanlar başka projeler için de kullanılabilir.

2.2.1.7 Top Down Yöntemi

Klasik inşaat sistemleri uygun kazı kotuna inildikten sonra üst yapı inşasının yapılmasını gerektirir. Bu durum üst yapı inşaatı için iksa sistemlerinin, gerekmesi durumunda temel altı iyileştirilmesinin ve temel inşaatının bitmesini beklemek anlamına gelir. Top-Down metodun da ise durum klasik yöntemlerden tersine yukarıdan aşağıya doğru inşa edilmekte bu nedenle

analiz ve tasarım hesapları klasik yöntemlere kıyasla oldukça farklı olmaktadır. Bu metodun seçilmesinin en önemli nedeni proje süresini büyük oranda kısaltması ve üst yapı inşaatı için yeraltı imalatlarının tamamlanmasını beklenmemesidir.

Türkiye'deki ilk uygulamalarından biri Ankara Metro Projesi için Kızılay'da yaya ve araç trafiğinin oldukça yoğun olması ve kazı nedeniyle çevrenin olumsuz etkilenmesini minimuma indirmek amacıyla, öncelikle bu odak noktasındaki istasyonun yapılmasına karar verilmiş ve inşaat yöntemi olarak Top-Down inşaat yöntemi tercih edilmiştir. İnşaat süresince oldukça zorlanacak olan kent içi ulaşımı ve araç trafiğinin kazıları esnasında, daha büyük problemlerle karşılaşılmasını önlemek amacıyla trafik akışının en kısa sürede sağlanmasına gerek duyulması "Top-Down" yönteminin tercih edilmesinde en büyük etkenlerden biri olmuştur. (Öztorun, 1994)

Avantajlar ve Dezavantajları

Avantajları:

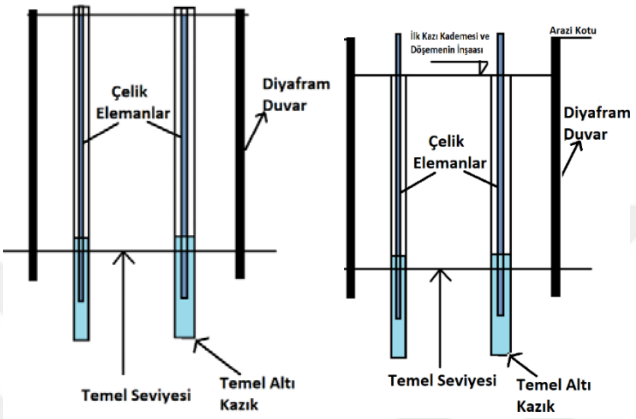
- Mevcut yapıların bulunması ve bu yapının yatay iksa elemanlarının uygulanmasına izin verilmemesi durumunda kullanılabilir.
- Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu imalatlarda kullanılabilir.
- Diğer inşaat uygulamaları ile karşılaştırıldığında daha kısa sürede imalat tamamlanabilir.
- Çelik iksa elemanlarına göre kiriş ve döşemeler daha rijittir. Bu sistem deplasmanları önemli derecede sınırlar.
- Çok katlı bodrum inşalarında üst yapı inşaatına bir anca başlayabilmeye olanak sağlar.
- Geçici olarak kullanılan düşey çelik elemanlar betonlar kullanılarak kalıcı olarak kullanılabilir.

Dezavantajları:

- Diğer uygulamalara göre maliyeti yüksektir.
- Kazı için küçük ekipmanlar kullanılır.
- Yeraltı kazısı bottom-top yöntemlere göre alanların dar olması nedeniyle daha yavaş ilerler.
- Aydınlatma ve havalandırma konusunda sıkıntılar yaşanabilir.
- Duvarlar arasındaki derzlerden su sızıntısı oluşabilir.
- Duvar su yalıtımının yapılamaması.

İmalat Aşamaları

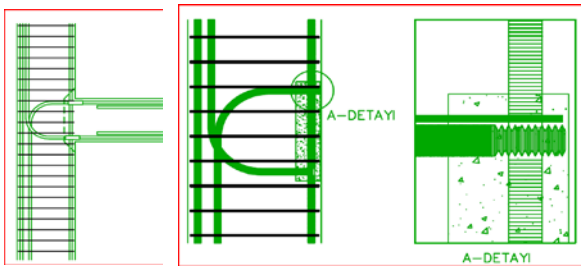
Top-Down metodunda klasik yöntemlerde olduğu gibi öncelikle iksa sisteminin düşey elemanları oluşturulur. Bu elemanlar palplanş duvar, diyafram duvar, kazık vb. taşıyıcı elemanlar olabilir. Daha sonra temel altı sistemi için kazık delgileri yapılır ve temel alt kotuna kadar betonlanır. Taşıyıcı sistem olarak çelik kolonlar veya betonarme kolonlar kullanılabilir.



Şekil 2.30: Top-Town inşaat kazık, ilk aşama kazı ve döşeme imalatı.

İlk kazı kademesi kazılır. Döşeme betonu dökülür ve yeterli dayanıma ulaştıktan sonra üstyapı imalatına ve döşeme altı kazı imalatına başlanabilir. Bu betonarme yapılar diyafram duvarlara bağlanır. Bu döşeme ve kirişler duvarlarda yatay destek elemanı olarak çalışırlar.

Düşey elemanların donatıları hazırlanırken döşemelerin bağlantısı için özel manşonlu filizler bırakılmaktadır. Şekil 2.31 Detay A' da görüldüğü gibi filizlerin manşonla eklenecek uçları paslanmaya karşı korumaya alınmaktadır. Daha sonra açığa çıkartılacak olan filizlerin arasına beton girmemelidir. (Öztorun, 1994)



Şekil 2.31: Döşeme ek donatı detayı. (Öztorun, 1994)



Şekil 2.32: Kazı ve döşeme işleri.

İlk aşamada olan işlemler alt kademe kazılarında tekrarlanarak istenen kazı kotuna kadar bu işlemler tekrarlanır. Kat aralarında kullanılan makineler alanın dar olması sebebiyle küçüktür. Geçici olarak kullanılan düşey çelik kolonlar lüzumun ortadan kalkması durumunda kaldırılabilir veya uygun kalıp ile betonlanarak kalıcı sistem için uygun hale getirilir.



Şekil 2.33: Geçici olarak imal edilen yapı elemanlarının kalıcı hale getirilmesi.

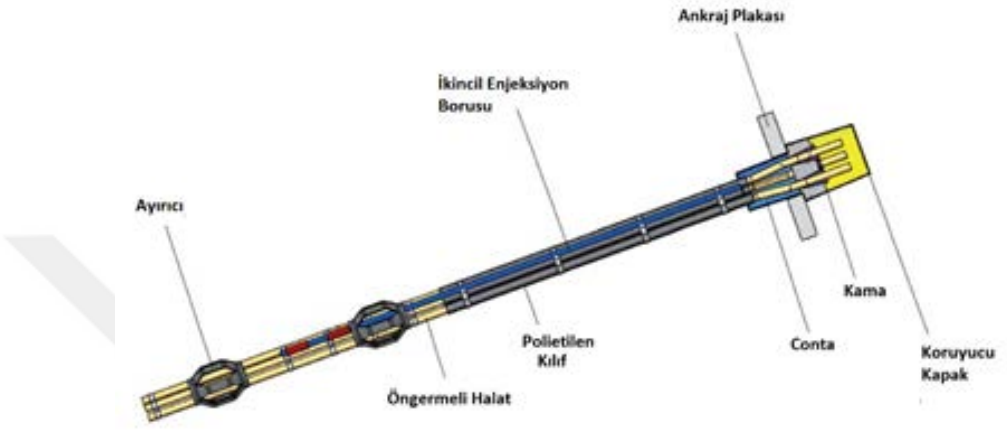
2.2.2 Yatay Destek Elemanları

Düşey yapı elemanlarının kesitinin yetersiz olduğu veya kullanılacak kesitlerin maliyetinin çok artacağı durumlarda zemin ve mevcut şartlara bakarak yatay destekleme elemanları kullanılabilir. Bu konuda birçok farklı yöntem bulunmakla birlikte aşağıda derin kazılarda en çok kullanılan üç sistemden bahsedilecektir. Bunlar sırası ile zemin ankrajları, zemin çivisi ve çelik destekleme elemanlarıdır.

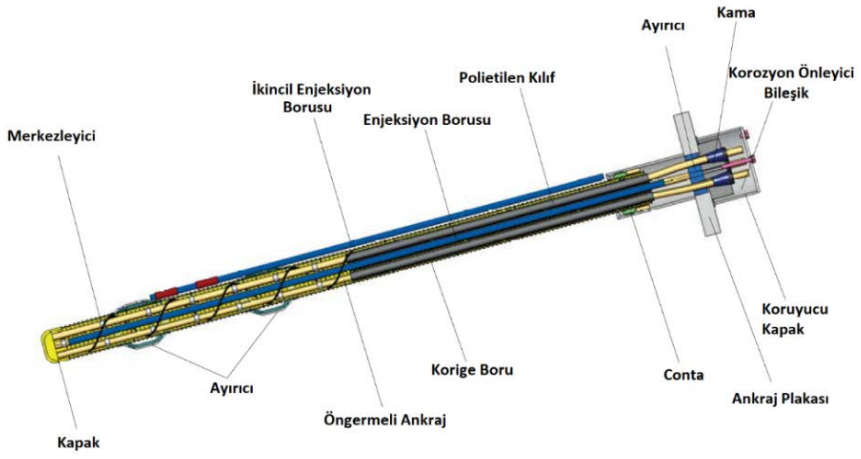
2.2.2.1 Zemin Ankrajları

Zemin ankrajları, dayanma yapıların yetersizliği durumunda yatay destek elemanı olarak, çekme kuvvetleri zemine aktarmak için kullanılır. Zemin ankrajları yardımıyla, kullanılacak düşey yapı elemanlarının ebatları küçültülebilir ve böylelikle sistemler daha ekonomik ve güvenilir hale getirilir.

Kullanılacak ankrajlar kalıcı ve geçici olarak imal edilebilir. Geçici ankrajlar maksimum 2 yıllık servis ömrüne sahip iken kalıcı ankrajlar için bu süre 75 ve 100 yıl olarak düşünülmektedir. Geçici ve kalıcı ankrajlar arasındaki farklılık uygulanan korozyon korumasından ve hesaplamalarda kullanılan güvenlik sayılarından kaynaklanmaktadır. Geçici ve kalıcı ankraj detayları sırası ile Şekil 2.34 ve Şekil 2.35'de gösterilmiştir.



Şekil 2.34: Geçici öngermeli zemin ankrajı.



Şekil 2.35: Kalıcı öngermeli zemin ankrajı.

Ankraja uygulanan germe yükü, halat adedi, ve korozyon koruma sisteminin seçimi, zemin özelliklerinin ve davranışının detaylı olarak araştırılması gerektirir. Tasarım için seçilen parametreler ile sahada uygulanan performans test sonuçları karşılaştırılarak seçilen parametrelerin doğruluğu teyit edilmelidir. Kullanılacak ankrajın kök bölgesi, ankrajların kapasitesini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Aşağıda kök bölgelerine göre ankraj tipleri ve ankrajın kullanım alanları verilmiştir.

Kök Bölgesine Göre Ankraj Tipleri:

- Yerçekimi ile enjeksiyonlanan zemin ankrajları. (A Tipi): Genellikle kaya zeminler için kullanılmakla birlikte sert killi zeminlerde de kullanılabilir.
- Basınçlı enjeksiyon ile yapılan zemin ankrajları. (B Tipi): İyi derecelenmiş kohezyonsuz zeminlerde ve çatlaklı kayalarda 10 Bar ile basılan çimento enjeksiyonu ile oluşturulur. Böylelikle yerçekimi ile enjeksiyonlanan zemin ankrajlarından daha büyük çaplı kök bölgesi elde edilmiş olur.
- İkincil enjeksiyon ile yapılan zemin ankrajları. (C Tipi): Enjeksiyon 2 aşamada uygulanır. İlk enjeksiyonun basınç değeri yüksek değil iken yapılan ikinci enjeksiyonun basınç değeri 20 bardan fazla olmalıdır.
- Çok köklü zemin ankrajları. (D Tipi): Birden fazla kökten oluşur.

Zemin Ankrajlarının Kullanım Alanları:

- Yapılan kazılarda düşey deplasmanların önlenmesi ve destek elemanlarının dönmesini engellemek için,
- Yapıların kaymaya karşı emniyetin sağlaması,
- Yapılarda suyun kaldırma kuvvetine karşı,
- Dar alanlarda yapılan kazık yükleme deneylerinde çekme elemanı olarak kullanılabilir.

Zemin Ankrajlarının Kısımları

Ankraj kafası, serbest bölge ve kök bölgesi olarak 3 ana bölümden oluşur.

Ankraj Kafası:

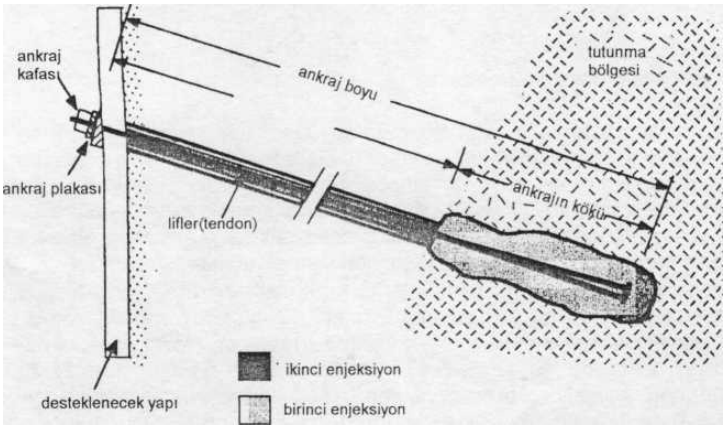
Başlık plakasıyla beraber çalışan bu kısım germe kuvvetinin zemini tutan iksa yüzeyine aktarılmasını sağlar. Germesi yapılan ankrajların kilitlendiği bölgedir. Ankraj kafası, düz plaka veya açılı plaka ve kamadan oluşmaktadır.

Serbest Bölge:

Ankrajın kök kısmı ile ankraj kafa kısmını bağlayan, yani germe kuvvetini kök bölgesine aktaran ve artan gerilmeyle beraber elastik uzama gösteren kısımdır.

Kök Bölgesi:

Enjeksiyon yapılarak oluşturulan, enjeksiyon – zemin aderansıyla germe kuvvetinin sağlam zemine aktarılmasını sağlayan kısımdır. Yüksek basınç altında çimento harcının ankraj deliğine enjeksiyonu ile kök bölgesi oluşturulur.



Şekil 2.36: Zemin ankrajının kısımları.

Ankraj Elemanları

- Tendon Malzemesi
- Ankraj Plakası
- Ankraj Kafası
- Ankraj Kamaları
- Ayırıcılar
- Polietilen Hortum

Tendon Malzemesi:

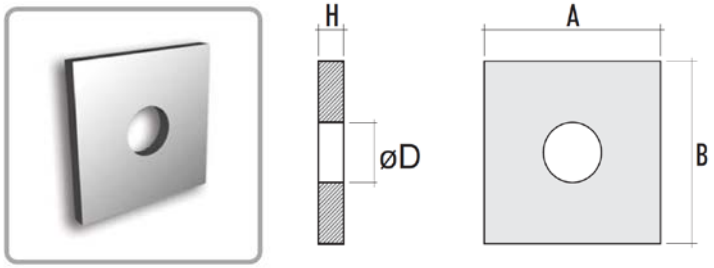
Tendonlar, 7 adet çelik telin birbiri ile birleştirilmesi ile imal edilir. Farklı çaplarda ve istenen uzunluklarda imal edilebilir. Zemin ankrajları konusu içinde 3 tip halattan bahsedilecek olup özellikleri aşağıda Tablo 2.8'de verilmiştir. Bu çelik halatların diğer çelikler elemanlardan farklı olarak kopma dayanımları daha yüksektir. Hazırlanacak projeler halat kopma yüklerinin %60'ı, test yükü için ise kopma yükünün maksimum %80'i baz alınacaktır. Tendon çelikleri uzun süreli yükler altında yük kayıplarını en aza indirmek için gevşeme özellikleri düşüktür.

Tablo 2.8: Ankraj tendon tipleri ve özellikleri.

Kesit (inç)	0,5	0,6	0,62
Çap (mm)	12,7	15,24	15,75
Kopma Mukavemeti	183,7 KN	260,7	277,4
Kesit Alanı	98,7 mm^2	140 mm^2	149,2 mm^2
Birim Ağırlık (kg/m)	0,775	1,102	1,173

Ankraj Plakası:

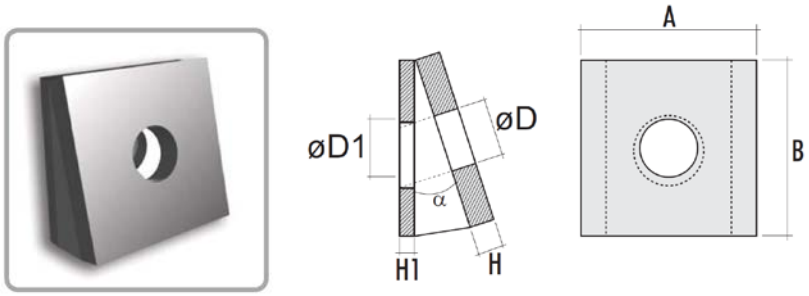
Öngermeli ankrajların kafa bölgesinde kullanılacak plaka kare şeklinde genellikle sacdan imal edilir. Ankraj plakası öngermeli ankrajın karakteristik yük kapasitesini taşıyabilecek, ankrajdan gelen yükü yapıya aktarabilecek ve bu yük altında ezilerek deforme olmayacak nitelikte seçilmelidir. Ankraj plakasının ebatları, ankraj tipine, ankraj kuvvetine, delgi çapına bağlı olarak belirlenir. Plakalar açılı veya düz olarak imal edilebilir.



Şekil 2.37: Düz ankraj plakası.

Tablo 2.9: Yaygın olarak kullanılan düz ankraj plaka detayları.

Kullanılan Plaka Ebatları	Halat Sayısı	∅D	Ağırlık
200x200x20 mm	3	65 mm	5,90
250x250x25 mm	4	65 mm	11,85
250x250x30 mm	5	80 mm	14,00
300x300x30 mm	6-7	90 mm	20,25



Şekil 2.38: Eğimli ankraj plakası.

Tablo 2.10: Yaygın olarak kullanılan açılı ankraj plaka detayları.

Kullanılan Plaka Ebatları	Plaka Açısı (α)	Halat Sayısı	∅D	∅D	Ağırlık
200x200x20 mm	10	3	65	90	10,30
250x250x25 mm	12	4	75	105	19,60
250x250x30 mm	15	5	75	105	25,40
300x300x30 mm	15	6-7	95	135	35,00

Ankraj Başlığı:

Ankraj kafası üzerindeki konik deliklerin içinden halatlar geçen, bu deliklere kamaların germe sonunda oturması ile tendondan gelen yükün ankraj plakasına aktarılmasını sağlayan elemanlardır. Ankraj kafasının ebatları, ankraj yüküne, tendondaki halat adedine ve kamaların tip ve ebatlarına bağlıdır.

Tendonun gerilmesinde, kanıt ve kilit yüküne ayrılmasına ve istendiğinde gerilme yükünün kaldırılmasına ve tekrar yükü uygulamasına müsaade edecek, çekme çubuğunun karakteristik yük kapasitesini taşıyacaktır. Öngermeli ankrajlarla desteklenecek iksa sistemlerinde kullanılacak ankraj kafaları silindir şeklinde olacak ve öngermeli ankrajların açıları ankraj kafası ile veya açılı kuşak kirişi ile sağlanacaktır.

Ankraj Kamaları:

Ankraj kamaları, sıkıştırıcı görevi gören, genellikle üç parçalı yüksük şeklindeki elemanlardır. Kullanılacak kamalar, kullanılan ankraj halatlarına uygun olacak şekilde seçilmelidir. Kasmalar gerdirme esnasında halatı sabitleyerek halatlar ile iletilen kuvveti kafa ve plaka yardımı ile zemine aktarır.

Tablo 2.11: Ankraj kama tip ve özellikleri.

Halat Tipi	Çap Aralığı (mm)	Segment Sayısı	Kama Uzunluğu	Diş Aralığı	Aralık
0,5” (12,7)	12,50-13,00	3	41	1,00	70
0,6” (15,2)	15,00-15,30	3	46	1,00	100



Şekil 2.39: Zemin ankrajlarında kullanılan ankraj kamaları.

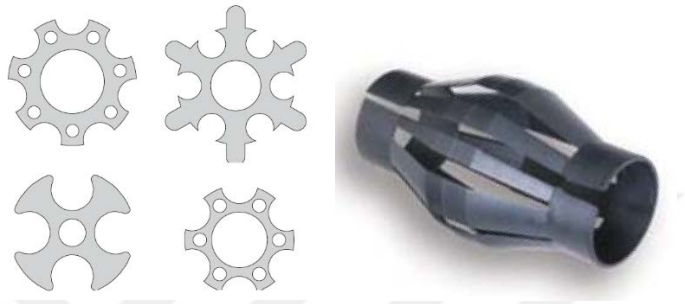
Ayırıcılar ve Merkezleyiciler:

Ayıraçlar, halatlar arasında 6 ile 13 mm bir boşluk kalmasını sağlayarak kök bölgesinde her bir halatın enjeksiyonla temasını sağlar. Ayırıcılar enjeksiyon şerbetinin akışına engel olmamalıdır. Merkezleyiciler ise halatlar ile kuyu çeperi arasında yeterli mesafe bırakarak halat

etrafında minimum enjeksiyon tabakasının olmasını sağlar. Kullanılan ayıraçlar halat sayısına göre belirlenir. Genellikle ortalarından enjeksiyon hortumu geçecek genişlikte olmalıdır.

Tablo 2.12: Merkezleyici çap ve maksimum halat sayısı.

Merkezleyici Çap	Halat Sayısı
90	9-10
63	7-8



Şekil 2.40: Farklı tipte kullanılan ayırıcılar ve merkezleyici.

Polietilen Hortum:

Polietilen hortum tendon malzemenin izolasyonunda ve enjeksiyonlama işleminde kullanılır. Korozyona dayanıklı olmakla birlikte belirli basınç değerlerine kadar sızdırmazlık sağlamalıdır. Tendonlar bu boru içerisine yerleştirilerek kuyuya indirilir. Enjeksiyon hortumu ankrajın en alt kısımlarına kadar betonun enjekte edilmesini sağlayan hortumdur.

Tablo 2.13: Enjeksiyon ve koruma kılıf boruları.

Dış Çap / OD (mm)	İç Çap / ID (mm)	Basınç (atm)
20	17	6
20	16	10
50	42	-
63	55	-
75	67	-



Şekil 2.41: Farklı çaplarda polietilen hortum.

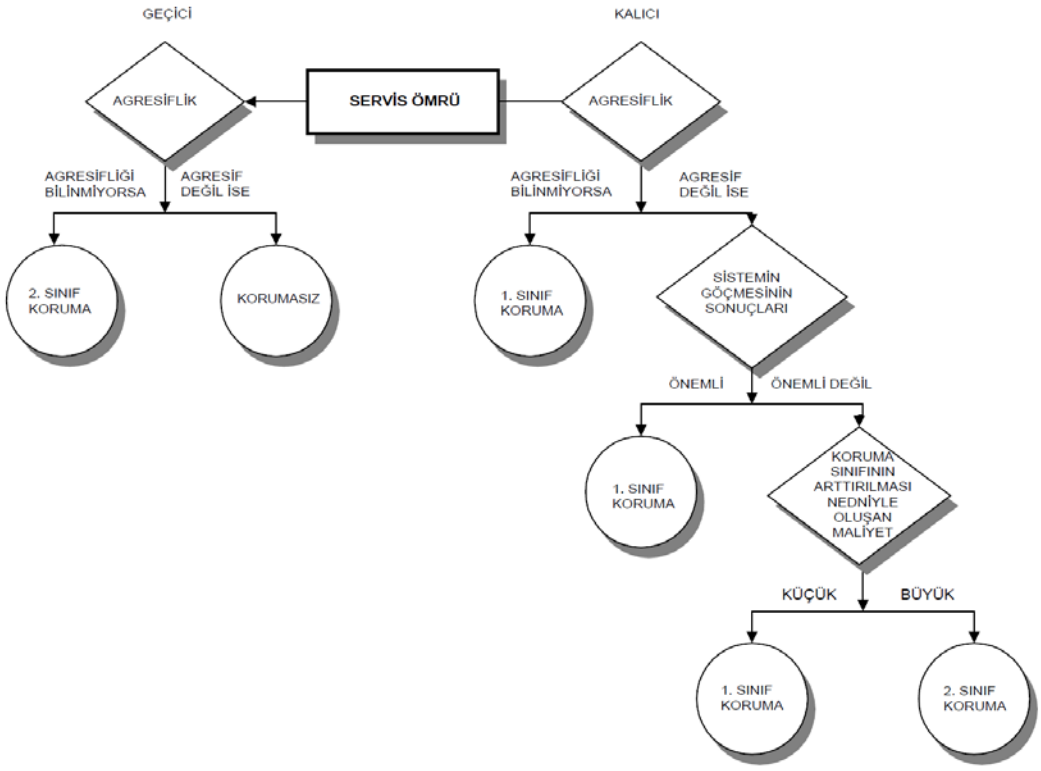
Ankraj Yapım Aşamaları:

Zemin ankrajları, sırası ile ankraj demetinin hazırlanması, ankraj deliğinin açılması, ankraj demetinin yerleştirilmesi, enjeksiyon yapılması ve germe işleminin yapılması ile imal edilir.

Ankraj Demetinin Hazırlanması:

Projede istenen adet ve boyda (bir metre germe payı da eklenerek) eşit olacak şekilde halatlar kesilir. Kök bölgesinde belirli aralıklarla ayırıcılar ve merkezleyiciler bağ teli ile halatlara bağlanır. Ankraj sistemine uygulanacak koruma sınıfına göre korozyondan korumak için belirli katmanlar oluşturulması gerekir. Bunun için serbest bölge halat demetlerini içine alacak şekilde polietilen boru ile izole edilir. 2 adet küçük çaplı (20 mm) enjeksiyon hortumu kök bölgesinin sonuna ulaşacak şekilde halat demetine bağlanır. Agresif zemin koşullarında korozyon koruması için halatlar tek tek ufak çaplı borulardan geçirilmelidir ve polietilen boru bütün halat demetini saracak şekilde hazırlanır.

Ankraj demeti çamurdan uzak yerde ve yere temas etmeyecek şekilde muhafaza edilmelidir. Şekil 2.42'de kalıcı ve geçici durumlarda kullanılacak korozyon koruması seçim karar ağacı verilmiştir. Bu karar ağacı ile ankrajlarda uygulanması gereken koruma sınıfı seçilir ve ankrajlar bu koruma sınıfı dikkate alınarak hazırlanır.

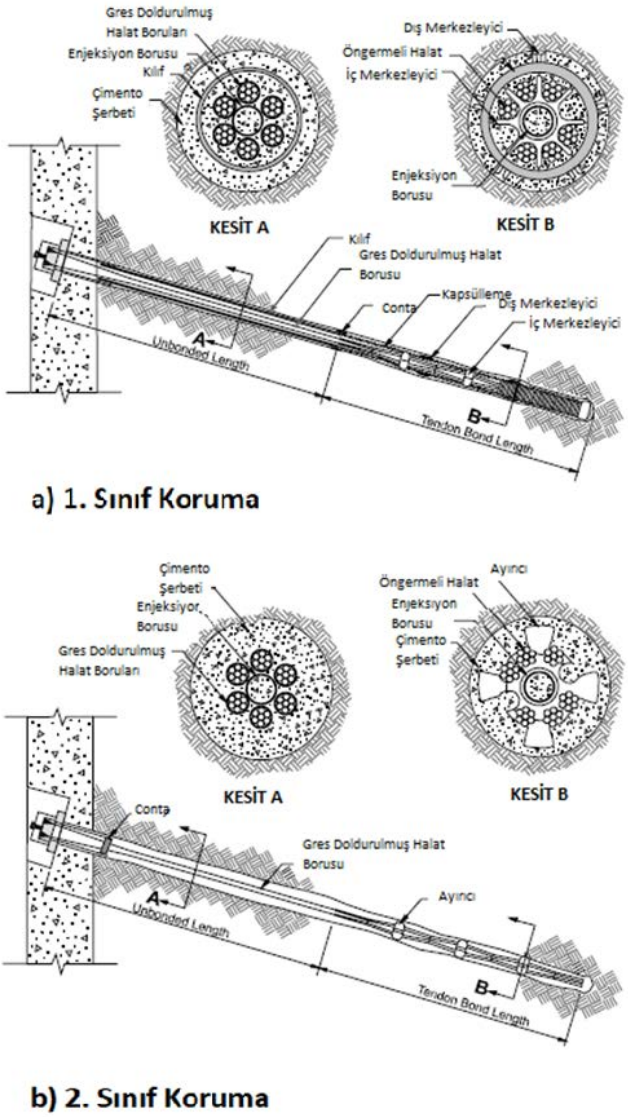


Şekil 2.42: Korozyon koruması seçim karar ağacı. (FHWA-IF-99-105, 1999)

Ankraj başlığı ve serbest uzunluk için 1. Sınıf ve 2. Sınıf koruma; agresif zemin koşullarının var olduğunu ve çoklu katmanların oluşturulması gerektiğini varsayar.

Kök boyu için 1.sınıf koruma; agresif koşulların var olduğunu varsayar ve birden fazla bariyer katmanı ile öngermeli çelik elamanların korunması sağlanır. 2 sınıf koruma için sadece bir bariyer tabakası kullanılır.

1.sınıf ve 2.sınıf korunmuş tendonlar, sırasıyla kapsüllenmiş tendonlar veya enjeksiyon şerbeti ile korunan tendonlar olarak isimlendirilir. Geçici ankraj uygulamasının yapılacağı yerlerde zemin koşulları agresif değil ise koruma gerekmez.



Şekil 2.43: Ankraj koruma sınıflarının kesit görünümü. (FHWA-IF-99-105, 1999)

Delgi Yapılması:

Delgi makinesinin, delgi imalatı yapabilmesi için kazı kotu, ankraj kotundan 50 cm aşağıda olmalıdır. Sahada delgisi yapılan ankrajlar genellikle 90-140 mm çapında; uygun bit, makine, ekipman ve yöntem kullanılarak yatayda projede öngörülen boyda ve eğimde delik açılır.

Delgi Yöntemleri:

- Burgu (Auger)
- Kaya Matkabı (Rock Bit)
- Üstten Vurmalı Çekiç (Top Hammer)
- İçten Vurmalı Çekiç
- Muhafaza Borusu (Casing) İle Delgi

Zeminin özelliğine bağlı olarak delgi yöntemi, kullanılacak makine ve ekipman, malzemelerin cinsi ve miktarı değişkenlik gösterir.

Ankrajın Delgiye Yerleştirilmesi ve Enjeksiyonlanması:

Ankrajlar delgiye yerleştirilmeden önce kuyuda çökme olmadığını emin olunur ve gerekmesi durumunda tarama yapılarak halatlar delgi içine yerleştirilir. Uygun w/c oranına sahip su-çimento enjeksiyonu kuyu içerisine kuyu dibinden başlayarak doldurmaya başlanır. Kuyu ağzından temiz enjeksiyon gelene kadar bu işleme devam edilir. 1-2 saat sonra ikincil enjeksiyon yapılarak enjeksiyonlama işlemi tamamlanır ve karışımın prizini alması beklenir.

Germe İşleminin Yapılması:

Enjeksiyon işlemi yapıldıktan sonra çimento su karışımının prizini alması beklenir bu süre yaklaşık bir hafta kadardır. Kullanılan katkı malzemeleri ile bu süre 4 güne kadar indirilebilir. Germe işlemi yapılmadan önce projede belirtilen plaka, başlık ve kamalar yerleştirilerek sistem germeye hazır hale getirilir. Germe işlemi yapılırken güç ünitesinde uygulanan yük takip edilir ve test yapılmıyor ise kilit yüküne kadar germe işlemi uygulanır.

Ankraj Testleri

Diğer yapı sistemleri ile karşılaştırıldığında zemin ankrajlarının kuvvetli yönü, tamamlanmış yapının parçası olacak ankrajların kilitlenmeden önce yük kapasitesinin ve yük deformasyon davranışının test edilerek yeterliliğinin kanıtlanmasıdır.

Zemin ankrajlarının proje kriterlerine uygun olup olmadığı aşağıdaki testlerin sonuçlarına göre karar verilir. Yönetmeliklerde farklı ankraj testleri mevcuttur. Aşağıda FHWA'de bahsedilen 3 ankraj testinde bahsedilmektedir.

A) Performans Testi

B) Kanıt Testi

C) Uzatılmış Krip Testi

Her ankraj yukarında belirtilen testlerden biri kullanılarak test edilir. Bu testlerin sonuçları, zemin ankrajlarının kullanılıp kullanılmayacağını belirlemek için proje öncesinde belirlenmesi gereken kabul kriterleri ile karşılaştırılır.

Ankraj testlerinde kullanılacak germe ekipmanları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Güç ünitesi
- Germe krikosu + Germe aparatları
- Germe Kaması
- Germe Kafası

Performans Testi:

Performans testi, ankrajların birbiri ardınca yapılan yükleme ve boşaltma döngülerinden ve halatta oluşan hareketlerin ölçülüp kaydedilmesi işlemlerinden oluşmaktadır. Performans testi ankraj kapasitesini doğrulamak yük deformasyon davranışını belirlemek, ankraj hareketlerinin nedenlerini tanımlamak ve serbest bölgenin tasarımda varsayılan boya eşit veya daha uzun olduğunu ispatlamak için kullanılır. Performans testleri genellikle ilk iki veya üç ankrajda daha sonra kalan ankrajların %2 sinde uygulanır.

Tablo 2.14: Ankraj test yükü uygulama döngüsü. (FHWA-IF-99-105, 1999)

Adım	Yükleme	Uygulanan Yük	Toplam Hareket Kayıt ve Grafiği (δ_{ti})	Kalıcı Hareketin Kayıt ve Grafiği (δ_{ri})	Elastik Hareketin Hesabı (δ_{ei})
1	Uygylanan Hizalama (Alignment) Yükü (AL)				
2	Döngü 1	0.25DL	δ_{t1}		
		AL		δ_{r1}	δ_{t1}- δ_{r1}= δ_{e1}
3	Döngü 2	0.25DL	δ_{2}		
		0.50DL	δ_{t2}		
		AL		δ_{r2}	δ_{t2}- δ_{r2}= δ_{e2}
4	Döngü 3	0.25DL	δ_{3}		
		0.50DL	δ_{3}		
		0.75DL	δ_{t3}		
		AL		δ_{r3}	δ_{t3}- δ_{r3}= δ_{e3}
5	Döngü 4	0.25DL	δ_{4}		
		0.50DL	δ_{4}		
		0.75DL	δ_{4}		
		1.00DL	δ_{t4}		
		AL		δ_{r4}	δ_{t4}- δ_{r4}= δ_{e4}
6	Döngü 5	0.25DL	δ_{5}		
		0.50DL	δ_{5}		
		0.75DL	δ_{5}		
		1.00DL	δ_{5}		
		1.2DL	δ_{t5}		
		AL		δ_{r5}	δ_{t5}- δ_{r5}= δ_{e5}
7	Döngü 6	0.25DL	δ_{6}		
		0.50DL	δ_{6}		
		0.75DL	δ_{6}		
		1.00DL	δ_{6}		
		1.2DL	δ_{6}		
		1.33DL	δ_{t6}, krip test için sıfır okuması		
8	Yük 10 dakika sabit tutulur ve belirli zamanlarda okumalar alınır. Eğer toplam hareket maximum değeri aşarsa test 60 dakikaya kadar uzatılmalıdır.				
9	Cycle 6 cont'd.	AL		δ_{r6}	Döngü 6: δ_{m}- δ_{r6}= δ_{e6}
10	Test sonuçları kabul kriterler için uygunsa kilit yüküne ayarlanır aksi takdirde 7.4.5.4'e bakınız.				
Not: AL = Alignment Yük, DL = Dizayn Yükü, δ_i = Döngüdeki max yükteki toplam hareket.					

Test yükünden kilit yüküne inmeden önce, 10 dakika boyunca yük test yükünde sabit tutulur. Bu 10 dakika içerisinde 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 10 dakikalarda uzamalar kaydedilir. Bunun amacı ankrajın zamana bağlı (sünme) hareketlerini ölçmektir. Performans testinin bu kısmı bir sünme testi olarak adlandırılır.

Eğer 1-10 dakikaları arasında toplam hareket, belirtilen maksimum sünme miktarını aşarsa test yükünde beklenen süre 50 dakika daha arttırılır ve testin 20, 30, 40, 50 ve 60. dakikalarında okumalar alınarak oluşan toplam hareket kaydedilir. Sünme testinin sonuçları belirlenen kriterlere uymaması durumunda;

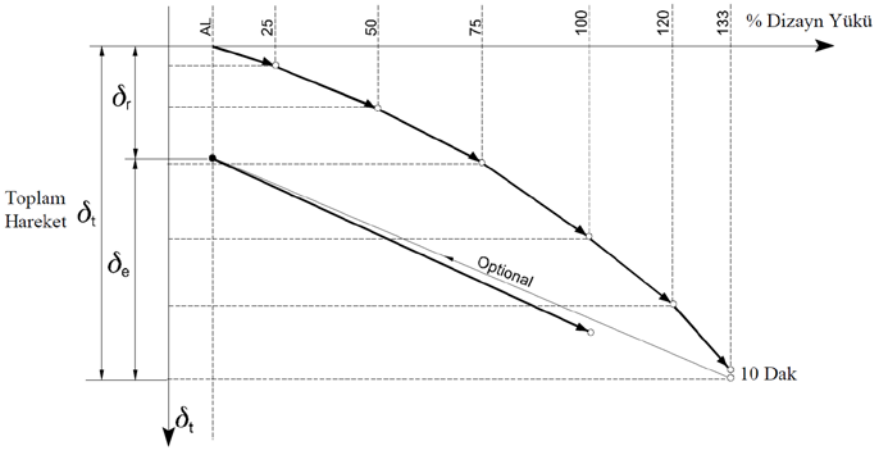
1- Ankraj yükü azaltılarak kullanılabilir,

2- Ankraj değiştirilebilir ve yerine yeni bir ankraj imalatı yapılır veya,

3- Enjeksiyon yapılabilen ankrajlarda tekrar bir enjeksiyon işlemi uygulanır ve daha sonra tekrar ankraj daha hassas kriterler ile test edilerek kabul kriterlerini sağlayıp sağlamadığına bakılır.

Kanıt Testi:

Kanıt testi tek bir döngü ve maksimum test yükünde, yükün belirli bir süre sabit tutulmasını ile yapılır. Kanıt testi, performans testi yapılmayan ankrajların kabul edilebilirliğini değerlendirmek için yapılır.



Şekil 2.44: Kanıt testi yükleme prosedürü (FHWA-IF-99-105, 1999)

Uzatılmış Krip Testi:

Uzatılmış krip testi bekleme süresinin fazla olduğu (yaklaşık 8 saat) bir ankraj yükleme testtir. Bu test ankrajlardaki sünme deformasyonlarını değerlendirmek için kohezyonlu zeminlerde (PI>20 ve LL>50 olan zeminler için) imal edilmiş olan ankrajlarda uygulanır. Bu zemin koşullarında minimum 2 adet uzatılmış krip testi yapılmalıdır.

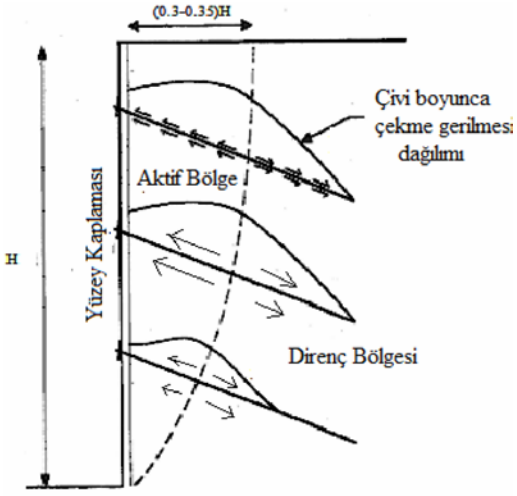
Tablo 2.15: Kalıcı ankrajlar için yük sıralaması ve gözlem periyotları.

Yükleme Döngüsü	Maximum Döngü Yükü	Toplam Gözlem Süresi (Dk)	Aşağıdaki Zamanlar Gözlemlenen Hareketler Ölçülür. (dk)
1	0.25*DL	10	1,2,3,4,5,6,10
2	0.50*DL	20	1,2,3,4,5,6,10,15,20,25,30
3	0.75*DL	30	1,2,3,4,5,6,10,15,20,25,30
4	1.00*DL	45	1,2,3,4,5,6,10,15,20,25,30,45
5	1.20*DL	60	1,2,3,4,5,6,10,15,20,25,30,45,60
6	1.33*DL	300	1,2,3,4,5,6,10,15,20,25,30,45,60,300

2.2.2.2 Zemin Çivisi

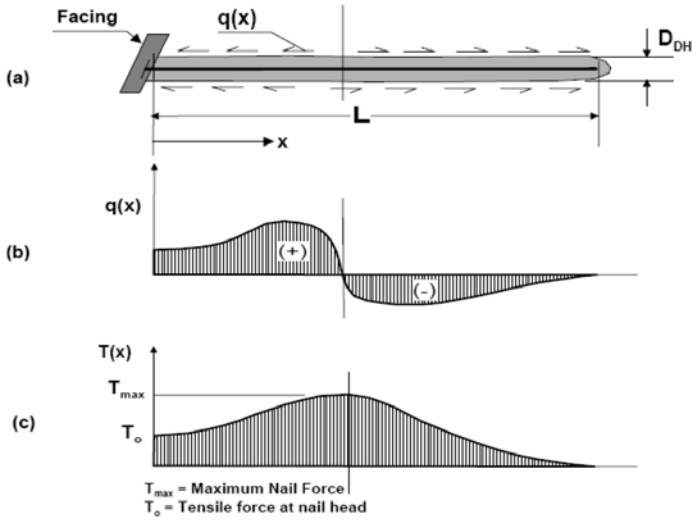
Derin kazılarda düşey yer değiştirmelerin önlenmesi, yapıların dönmeye karşı emniyete alınması amacıyla, kaya veya kil gibi değişen zeminlerde, pasif olarak kullanılan yatay destek elemanlarıdır. Sistem stabil halde iken pasif olan zemin çivileri zeminin deplasman yapması durumunda aktif hale gelerek yük taşımaya başlarlar. Farklı çap ve boyda demirler kullanılarak imal edilebilen zemin çivileri genellikle çelik hasır üzerine uygulanan püskürtme beton ile birlikte tasarlanır. Püskürtme beton, zemine yük transferini gerçekleştirir ve paslanmaya karşı zemin çivisini korur. Püskürtme beton ile ilgili daha ayrıntılı bilgi Bölüm 2.2.1.5'de verilmiştir.

Zemin çivileri öngermeli ankrajlarda olduğu gibi geçici ve kalıcı olarak imal edilebilir. İmalat yönünden ankrajlardan daha pratik ve imalatı daha kolay olmakla birlikte ankrajlara oranla zemin çivileri daha az yük taşıyabildiklerinden kullanılacak zemin çivisi miktarı artmaktadır. Ankrajlar düşey elamanları sağlam zemine mesnetlerken zemin çivileri kaymaya çalışan zemini, yani aktif bölgeyi kaymayan zemine bağlar. Ankrajlar başlıklarında yükü kuşak kirişlerine oradan da zemine aktarırken zemin çivileri kendi uzunluğu boyunca yükü zemine aktarır. (Tunç, 2002) Zemin çivisinde oluşacak çekme kuvvetleri aktif ve pasif bölgede iki farklı yönde oluşur. Aktif bölgede kayma yönünde pasif bölgede ise bunun tersi yönünde meydana geldiği Şekil 2.45'de gösterilmektedir.



Şekil 2.45: Zemin çivisinde aktif ve pasif bölgeler.

Bunun sonucu olarak; zemin çivisinde gelişen kayma etkisinin yönü ve çekme kuvveti zeminin kayma yüzeyi civarında oluşmakta ve uç noktalara gidildikçe çekme kuvveti azalmaktadır. (FHWA A0-IF-03-017,2003)



Şekil 2.46: Zemin çivisindeki kuvvet ve gerilme dağılımı. (FHWA0-IF-03-017,2003)

Zemin çivilerinin taşıma kapasitelerinin hesaplanması ve uygulanması konusunda aşağıdaki hususlara dikkat edilecektir:

- Zemin veya kaya aderansı,
- Sürşarj yükü,
- Mevcut zeminin veya kayanın özellikleri,
- Zemin çivisi ve delgi çapları
- Uygulanacak enjeksiyon şekli,
- Yeraltı su seviyesi ve drenajı.

İmalat Aşamaları

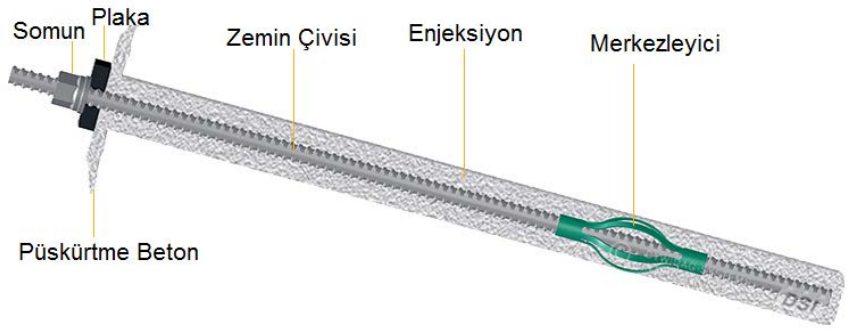
I. Delgi Yapılması: Ankrajlarda kullanılan delgi yöntemleri zemin çivisi içinde kullanılabilir. Delgi açıları ankraj imalatına oranla daha küçük olup 5-20^o arasında yapılabilir.

II. Zemin Çivisinin Hazırlanması ve Delgiye Yerleştirilmesi: Zemin çivişi projede istenen boylarda kesilip veya manşonlar ile birleştirilerek hazırlanır daha sonra belirli aralıklarda merkezleyici yerleştirilir. Zemin çivisi kalıcı olarak tasarlanacak ise yapılacak korozyon korumasına bağlı olarak korige boru da kullanılabilir. Bu durumda merkezleyici korige borunun üstüne takılır. Koruma sınıfının seçimi zemin ankrajları için bahsettiğimiz karar ağacı yardımıyla belirlenir.

III. Enjesksiyon Yapılması: Çimento şerbeti ile zemin çivisi arasında yapışma mukavemeti, enjeksiyon içindeki malzemelerin karışım oranına bağlıdır. Çimento enjeksiyonu için w/c oranı 0,40-0,45 arasında olmalıdır. Enjeksiyon basıncı; enjeksiyon amacına zemin cinsine ve kalitesine enjeksiyonlanacak kısmın derinliğine bağlıdır. Birinci grout işlemi tamamlandıktan

1-2 saat sonra ikinci grout işlemi de yapılarak enjeksiyon işlemi tamamlanır. 3 günlük basınç mukavemeti en az 10.50 MPa, 28 günlük basınç mukavemeti ise 21 MPa olmalıdır (FHWA0-IF-03-017, 2003). Enjeksiyona akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkılar ilave edilebilir.

IV. Püskürtme Beton Yapılması: Enjeksiyonlama işlemi bittikten sonra uygun ebat ve boylarda çelik hasır yerleştirilir. Püskürtme beton uygulamasına zemin çivisi etrafından başlanılır ve istenilen kalınlığa kadar devam edilir. Beton prizini almadan önce uygun ebatlardaki plaka yerleştirilir ve delgiye yerleştirilmeden önce açılan önce dişlere uygun somun ve pul takılır. İstenmesi durumunda tork anahtarı kullanılarak zemin çivisine öngerme vermek mümkün olup ve değer ön germeli ankrajlara nispetle küçük değerlerdir. Zemin çivisi, donatı, çelik hasır, püskürtme beton, zemin çivi plakası ve enjeksiyonun birlikte kullanılması ile oluşmaktadır.

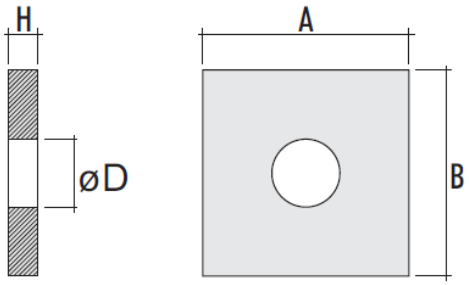


Şekil 2.47: Zemin çivisi detayı.

Zemin Çivisi Elemanları

Zemin Çivisi Donatısı: Genellikle ∅26 - ∅32 çapları arasında çelik elemanlar kullanılır. Zemin Çivisi Başlığı: Donatının plaka ile birleştiği kısımdır.

Plaka: Donatı çapına bağlı olarak uygun çapta plaka merkezinden delinmiş kare sac plakadır.



Şekil 2.48: Zemin çivisi plaka detayı.

Tablo 2.16: Zemin çivisi plakaları.

AXBXH	∅D	Ağırlık (kg)
150X150X10	32/34	1,77
150X150X15	32/34	2,65
200X200X10	32/34	3,15
200X200X20	32/34	6,29

Somun-Pul: Zemin çivisini plaka ile bağlantını sağlamak için kullanılır. Zemin çivilerine somun takılabilmesi için diş açılmalıdır. Bu da zemin çivisinin çapını yaklaşık 2 mm düşürür.

Manşon: Zemin çivi boyunun yetersiz olduğu durumlarda ek yapılması durumunda kullanılır.

Merkezleyici: Enjeksiyon geçişine izin verecek ve delgi çeperi ile zemin çivisi arasına yeterli enjeksiyon oluşmasını sağlayacaktır.

Kılıf Boru: Korozyon korumasını arttırmak için kullanılan polietilen kılıf borusudur.



Şekil 2.49: Zemin çivisi imalatı.

Kalıcı uygulamalarda kullanılan zemin çivileri, korozyona karşı kimyasal ve / veya fiziksel koruma gerektirir. Yüksek korozyon potansiyeline sahip zeminlerde ve daha düşük risk toleransı olan projeler için gerekli korozyon koruması seviyesi daha fazladır. Yapılacak korozyon korumasının en en düşük seviyesi yalnızca enjeksiyon tarafından sağlamaktadır.

2.2.2.3 Strut

Elverişsiz zemin koşullarında (yumuşak zemin, yüksek yeraltı suyu vb.), komşu yapılardan kaynaklanan sebeplerden dolayı ankraj imalatımım yapılamadığı durumlarda, sistemin konsol olarak tasarlanması maliyeti çok arttırması ve sahanın dar olması gibi nedenlerden dolayı kullanılan bu sistemde çelik boru/profiller veya betonarme kirişler geçici yatay destek elemanı olarak kullanılır. Top-town inşaatlarda kalıcı sturtlar betonarme kat döşemeleri ile sağlanır. Bu yapılar çok rijit oldukları için inşaat sırasında oluşan geçici yükleri taşıyabilir.

Geçici strut sistemlerinin kullanılması ile birlikte bazı risk durumlarını da beraberinde getirir. Oluşan göçme durumları genellikle bağlantı noktalarının tasarımında zayıf detaylandırma ve tasarımın göz ardı edilmesi, zemin koşullarının doğru yorumlanamaması ve kaza ile struta çarpmanın sonucudur. (Twine ve Roscoe, 1999).



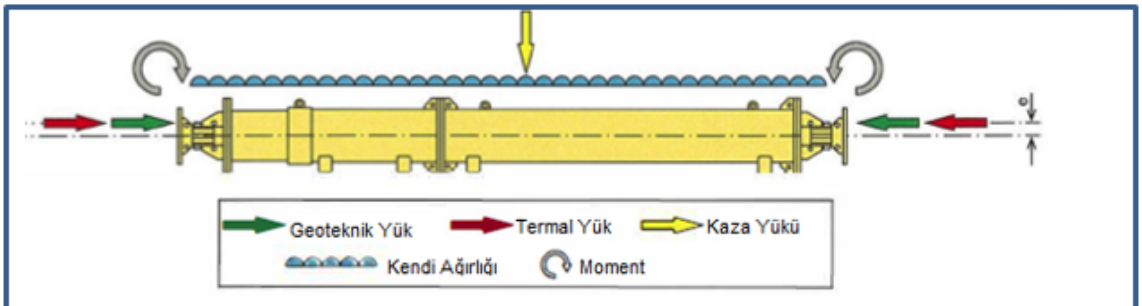
Şekil 2.50: Strut yerleştirilmesi.

Strutlar komşu veya karşı iksa yüzeyine pasif olarak veya nadiren öngerme verilerek yerleştirilir. Strutlarda öngerme sistemin yatay deplasman toleransının az olduğu durumlarda tasarım yükümün %50'ni oranında uygulanabilir.

Zeminden struta gelen kuvvetler kuşak kirişlerine aktarılır. Kuşak kirişleri betonarme veya çelikten imal edilir. Betonarme yapılması durumunda struttan yükü karşılaması için çelik plakalar yerleştirilir. Strutlar bu plakalara kaynatılır veya önceden hazırlanmış olan oluk üzerine yerleştirilir. İki cephenin yükler altında farklı davranış göstermesi strutlarda dönme, burulma, ve burkulma gibi problemleri oluşturur.

Strutların Tasarımı

Tasarımda struta gelen yüklerin belirlenmesi ve uygun kapasiteye sahip strutın seçilmesi gerekir. Geçici strutlar üzerinde, kontrol edilmesi gereken bir takım temel kuvvetler vardır. Bu kuvvetler aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Notlar:

1. Strut uzunluğu boyunca strut kendi ağırlığının eşit olarak dağıldığı varsayılır. Bu yük kalıcı yük olarak hesaba alınır (G_k).
2. Karakteristik geoteknik yükler kalıcı yük olarak dikkate alınacaktır. ($G_{k,GEO}$)
3. Karakteristik ısıl yükleme sıcaklık artışından ve bir duvar sınırlama katsayısından türetilir ve değişken bir etki olarak ele alınır. ($Q_{k,temp}$)
4. Karakteristik kaza yükü (tipik olarak 10 kN – 50 kN Williams ve Waite,1993'e göre) kaza yükü en kritik noktaya etkitilir. Burkulma göz önüne alındığı zaman, dik olarak sturt uzunluğunun ortasına etkitilir. Uygulanacak kaza yükü değişken olabilir. ($Q_{k,accidental}$)
5. Moment olmaksızın, strutlarda eksantrisite dikkate alınmalıdır (e). Uygulanacak eksatirisitenin büyüklüğü taşıma plakasının %10'una eşit olmalıdır.

Şekil 2.51: Strut üzerinde meydana gelen yükler. (CIRIA C760, 2017)

Büyük açıklıklarda strutlar kendi ağırlıklarından dolayı eğilme momentine maruz kalır, böyle durumlarda düşey destekler ile strut elemanları desteklenmelidir. Strutlar kendi ağırlıklarından dolayı eğilme momenti, yanal kuvvetlerde dolayı normal kuvvet etkisi altında bir kolon gibi düşünülüp boyutlandırılabilir. Yanal kuvvetlerin tespiti için ankrajlarda kullanılan alan ve mafsal metodu uygulanabilir.

Strutların genellikle 4 veya 5 m aralıklarla kullanılır fakat gerekli aralıklar ve adet, strut yerleştirildikten sonra bodrum inşaatına, hafriyat işlerine engel olmayacak ve demontaj sırasında güvenli bir şekilde çıkarılmasına olanak verecek şekilde hazırlanmalıdır.

Yatay destek elemanı olarak strut kullanılan projelerde aşırı yükleme veya yetersiz kapasite nedeniyle burkulmadan dolayı göçmelere pek sık karşılaşılmamaktadır. Sıcaklık değişimleri strut yüklerinin artmasına veya azalmasına neden olur ancak hesapla kullanılan güvenlik sayısı bu durumu telafi etmek için yeterli olacaktır. Tasarımda ve yük kapasitesinin hesabında strut rijitliği önemlidir. Bu değer tecrübelere dayanarak veya üretici firmadan alınan bilgiler doğrultusunda belirlenebilir. Hidrolik strutların rijitliği klasik çelik desteklere göre fazladır.

Kullanılacak çelik elemanlar için genellikte H veya dairesel kesit (çelik borular) kullanılır. Strut seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar;

- Açıklık.
- Fabrikasyon özellikleri.
- Materyalin bulunabilirliği ve teslim süresi.
- Kullanılabilirliği.
- Öngerme uygulaması yapılıp yapılmayacağı.
- Rijitlik ve eğilme direnci.
- İmalat aşamasında yani yerleştirilmesi ve kaldırılması durumunda ihtiyaç duyulan ekipman veya malzemeler.
- Kullanım süresi.

Bütün bu faktörler dikkate alınarak tasarımcının tecrübesi ile en uygun ve ekonomik çözüm ile tasarım yapmalıdır.

Çelik destekli sistemlerin tasarımında dikkat edilmesi gereken husus, yüklerin artık kalıcı sistem tarafından taşınmaya başlandığına emin olunduktan sonra, strutların demontajında oluşan aşırı deplasmanlardır. Buna ek olarak bazı beklenmeyen deplasmanların oluşması aşağıdaki nedenlerden kaynaklanabilir;

- İlk strutın derinliği
- Strut kademeleri arasında aşırı kazı yapılması.
- Strutın yerleştirilme süresinin uzaması.

Çelik elemanlar söküldükten sonra tekrar başka projelerde kullanılabilmekte ve ekonomik açıdan geri dönüşüm sağlamaktadır.

3 TASARIM YAKLAŞIMLARI VE ANALİZ PROGRAMLARI

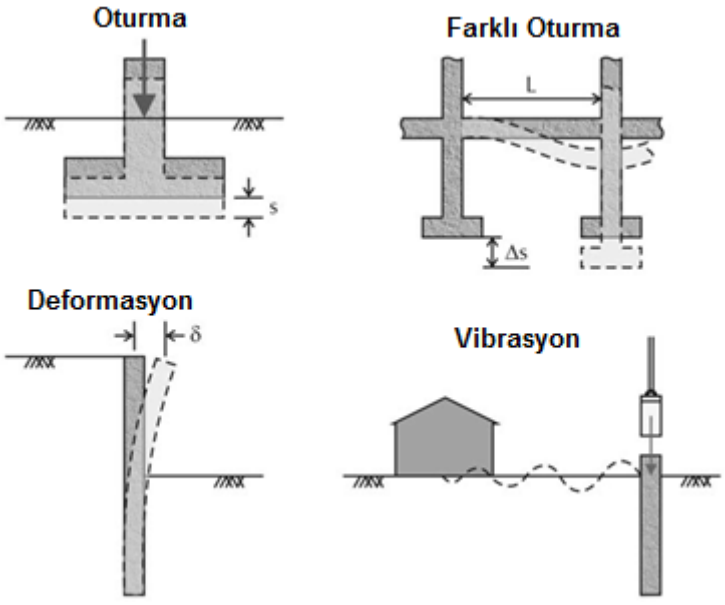
3.1 TASARIM YAKLAŞIMLARI

EC-7 kullanılan geleneksel güvenlik sayılarından uzaklaşarak, yerine limit durum Tasarım Yaklaşımları ile kısmi faktörler uygulayarak dayanma yapısının gerekli güvenliği sağlamaktadır. Geleneksel güvenlik faktörleri bizim için uygulanacak ve karşılaşılabilecek tüm durumlara karşı bir güvenlik uyguluyor fakat bu bizim belirsiz durum ve koşulları uygun bir şekilde kontrol etmemize imkan sağlamaz.

Limit durum, tasarımın artık deplasmanların kabul edilemez sınıra ulaştığını ve tasarım kriterlerini sağlamadığını gösterir. Geoteknik mühendisi tasarım yaparken kendi sınır durumlarını (nihai ve hizmet görebilirlik sınır durumlarını) belirlemelidir.

3.1.1 Hizmet Görebilirlik Sınır Durumu (SLS)

Yapının ve komşu yapıların kullanıcı konforunu ve kullanım fonksiyonlarını sorunsuz bir şekilde yerine getirmesini için oluşan deplasmanları dikkate alır. Meydana gelen deplasmanlar belirlenen sınır durumunu aşmamalıdır. Önemli komşu yapılarının bulunması (ör: tarihi yapılar, müze vb.) veya derin kazı nedeniyle komşu yapı ve servis yapılarında hasar meydana gelme olasılığı var ise bu yapılar dikkatlice incelenmeli, kazı esnasında ve kazı sonrasında gerekli ölçümler alınarak izlenmelidir.



Şekil 3.1: Örnek hizmet görebilirlik sınır durumu.

Deplasman Sınırları

Derin kazılarda kazı yapılması nedeniyle dayanma yapısında ve dayanma yapısı arkasında deplasmanlar meydana gelir. Bu deplasmanların proje hazırlanırken belirli sınırlar içinde kalması gerekir. Yapılan hesaplamalarda oluşacak deplasmanlar genellikle ampirik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemleri ile öngörülebilir. Meydana gelen deplasmanlar:

- zemin cinsi,

-kullanılan dayanma yapısının rijitliğine, (palplanş duvar, Berlin duvarı, teğet fore kazık, kesişen fore kazık, diyafram duvar vb.)

-yatay destek elemanı kullanılmasına ve aralığına,

-gömme derinliğine,

- yeraltı suyu basıncına,

-inşa aşamalarına ve yöntemlerine,

-yerleştirilen ilk yatay destek elamanın yerleştirilme seviyesine vb. birçok faktöre bağlıdır.

Oluşan deplasmanlar bu maddelerden sadece bir tanesine bağlı olmayıp bunların kombinasyonlarına bağlıdır ve oluşacak deplasmanları kesin olarak belirlemek zordur. Bu nedenle imalat tamamlandıktan sonra kalıcı dayanma yapılarında oluşan deplasmanların kontrolü ve gözlemi belirli zaman aralıklarında yapılmalı ve gerekli görülmesi durumunda ankrajlarda germe işlemi tekrardan yapılmalıdır. Geçici dayanma yapılarında ise zemin kalıcı yapıyla desteklenene kadar gözlem ve ölçümler yapılmalı imalat aşamasında olumsuz durumlar ile karşılaşılması durumunda proje revize edilmelidir.

CIRIA dayanma yapısına bağlı olarak oluşacak yatay ve düşey deplasman sınırlarını ve etki uzaklığını Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'deki gibi vermiştir.

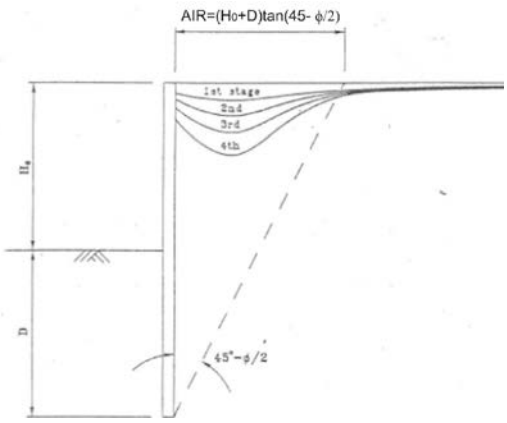
Duvar Tipi	Yatay Haraketler		Düşey Hareketler	
	Duvardaki Yüzey Hareketi (% max kazı derinliği)	Duvar Arkasındaki Hareketlerin İhmal Edilebilir Uzaklığı (X Max Kazı Derinliği)	Duvardaki Yüzey Hareketi (% max kazı derinliği)	Duvar Arkasındaki Hareketlerin İhmal Edilebilir Uzaklığı (X Max Kazı Derinliği)
Fore Kazıklar				
Sürekli Kazıkalr	0,04	1,50	0,04	2,00
Kesişen Kazıklar	0,08	1,50	0,05	2,00
Diyafram Duvarlar				
Yüzeysel	0,05	1,50	0,05	1,50
Destekleme	0,10	1,50	0,05	1,50
Notlar				
1-Maksimum yüzey hareketi duvara yakın gerçekleşir ve kazık derinliği / diyafram duvar açma derinliğinin yüzdesi olarak hesaplanır.				
2-Hareketin boyutu kazık/diyafram duvar derinliği boyutsuz olarak hesaplanır.				

Şekil 3.2: Duvar tipine bağlı deplasman sınırları. (CIRIA C760, 2017)

Hareket Tipi	Yüksek Rijitliğe Sahip Destekler (Yüksek Srutlı Duvarlar, Top-Down İnşaat)		Düşük Rijitliğe Sahip Destekler (Düşük Rijitlikli Geçici Strutlar veya Düşük Seviyede Yerleştirilen Geçici Strutlar)	
	Duvardaki Yüzey Hareketi (% max kazı derinliği)	Duvar Arkasındaki Hareketlerin İhmal Edilebilir Uzaklığı (X Max Kazı Derinliği)	Duvardaki Yüzey Hareketi (% max kazı derinliği)	Duvar Arkasındaki Hareketlerin İhmal Edilebilir Uzaklığı (X Max Kazı Derinliği)
Yatay	0,15	4,00	0,40	4,00
Düşey	0,10	3,50	0,35	3,50
Notlar				
1-Maksimum yüzey hareketi duvara yakın gerçekleşir ve duvarın önündeki maksimum kazı derinliğinin yüzdesi olarak ifade edilir.				
2-Hareketin kapsamı boyutsuz olarak maksimum kazı derinliğine bölünerek hesaplanır.				
3-Hareket, duvar kurulum etkilerinden kaynaklananları hariç tutar.				
4-Hareketler iyi işçilik ve tamamen sert kilin içine gömülmüş duvar, sert killerin veya diğer bileşenlerin topraklarının tutulması içindir.				
5-Oluşum seviyesinde yumuşak topraklarla karşılaşıldığında hareketler daha büyük olacaktır.				

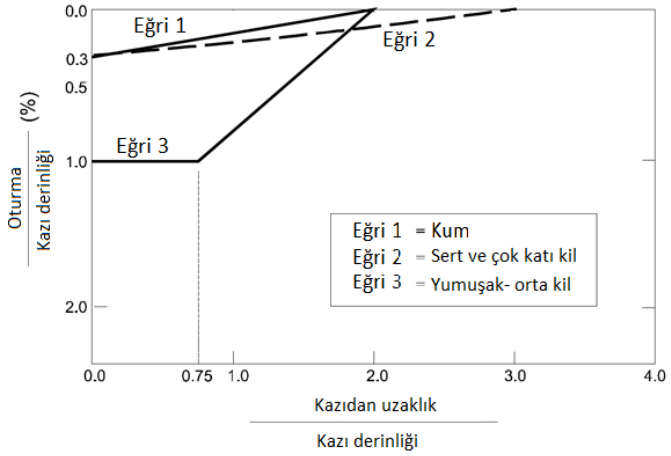
Şekil 3.3: Dayanma yapısına bağlı olarak oluşan deplasman sınırları ve etki uzaklığı. (CIRIA C760, 2017)

Saha gözlemlerine göre, duvar arkasındaki zemin oturmasının genişliği kazı derinliği ile artar. Kazı etki bölgesi içindeki binalar açısal distorsiyon derecesine ve yanal şekil değiştirme durumuna bağlı olarak zarar görebilir. Kazı etki bölgesi dışındaki zemin oturması değeri küçüktür ve kazı boyunca genelde çok az değişir. Bunun nedeni kazı etki bölgesinin dışındaki gerilme seviyesinin nispeten küçük olmasıdır. Şekil 3.4'de görüldüğü gibi AIR (etki bölgesi), duvar ile oturmada önemsiz değişimlerin olduğu veya oturmaların üniform olduğu yer arasındaki yatay uzaklık olarak tanımlanabilir. (Tunca, 2010)



Şekil 3.4: Duvar uzunluğu ve etki bölgesi arasındaki ilişki (Ou, Hsieh ve Chiou, 1993)

FHWA kum ve katı killerde imalatı yapılan ankrajlı dayanma yapılarında oluşacak maksimum yatay deplasman ortalama 0,2H, maksimum 0,5H, maksimum düşey deplasman ortalama 0,15H, maksimum 0,5H olabileceğini belirtmiştir. Duvar arkasında meydana gelen oturmaları değerlendirmek için Şekil 3.5 kullanılabilir. Eğri 1 ve Eğri 2 genellikle kalıcı ankrajlı duvarlar için kullanılır.

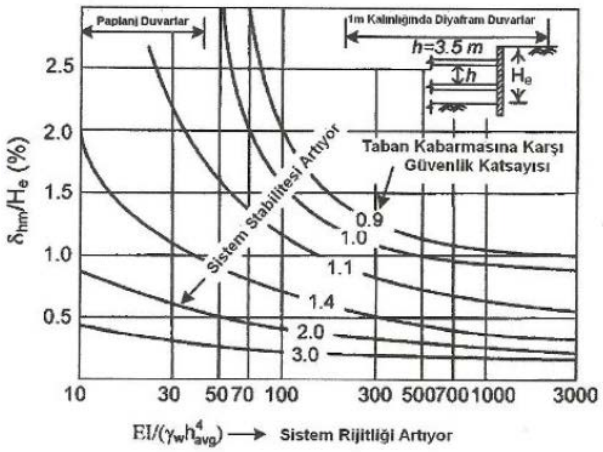


Şekil 3.5: Ankrajlı duvar arkasında oluşan oturma profili. (FHWA-IF-99-105, 1999)

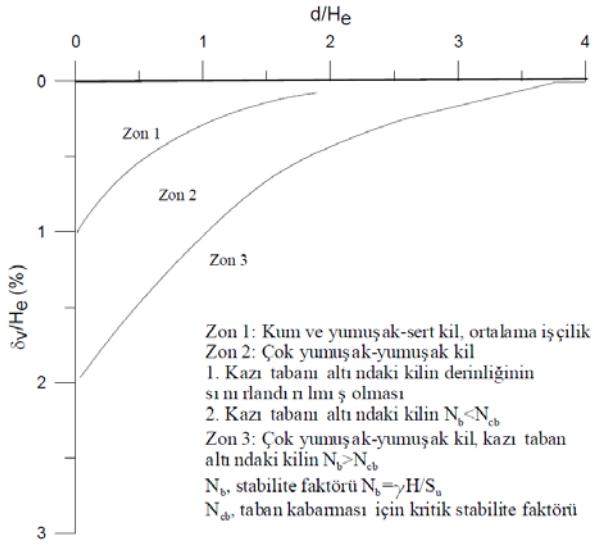
Genel olarak ankraj imalatında meydana gelen deplasmanlar strutlı sistemlere göre daha azdır.

- Ankrajlarda bir sonraki kademeye geçmeden önce öngerme uygulanır.
- Kademeler arasındaki mesafe daha azdır.
- Strutlarda montaj esnasında deplasman meydana geldiği gibi demontaj sırasında da deplasman meydana gelir. Fakat ankrajlarda demontaj yapılmadığı için bu aşamada deplasmanlar gözlenmez.

Clough ve O Rourke (1990) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda yumuşak – orta katı killer için destek sistemi rijitliği ve kazı tabanının göçmeye karşı güvenliğine bağlı olarak Şekil 3.6'da gösterilen tasarım kartı önerilmiştir. Buna göre yumuşak – orta katı killerde yapılan kazılarda, kazı tabanının kabarmaya karşı güvenlik sayısının FS<1,5 olduğu durumlarda destek sisteminin rijitliğinin duvar hareketi miktarına etkisi büyüktür. Katı killerde yapılan kazılarda genellikle FS>2 ise destek sisteminin rijitliğinin duvar hareketine etkisi oldukça küçüktür.



Şekil 3.6: Duvar hareketinin tahmini için tasarım eğrileri (Clough ve O'Rourke, 1990)

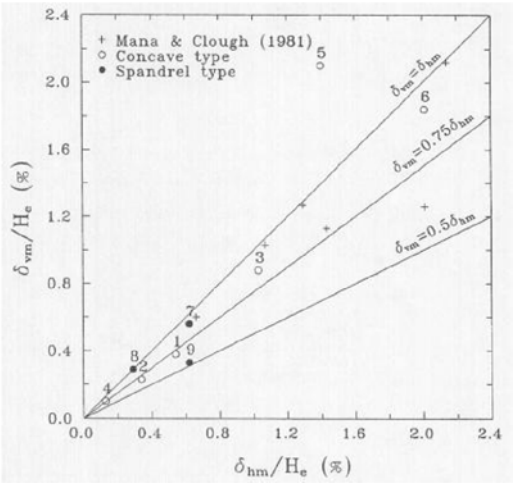


Şekil 3.7: Zemin yüzey oturmasının tahmini için Peck'in (1969) Yöntemi.

H_e: Son kazı derinliği

d: Dayanma yapısından uzaklık.

Şekil 3.7'de gösterilen oturma profilleri palplanş veya Berlin duvarı ile desteklenmiş kazılar için 1969'dan önceki vakalarda kullanılmıştır. Daha yeni tasarım ve inşa tekniklerinin, örneğin rijit diyafram duvar kullanıldığı durumlar için Şekil 3.7 ile tahmin edilen maksimum oturmanın ölçülenden daha büyük olduğu görülmektedir (Hsieh ve Ou, 1998).



Şekil 3.8: Maksimum zemin yüzey oturması ile duvarın sehim ilişki. (Hsieh ve Ou, 1998).

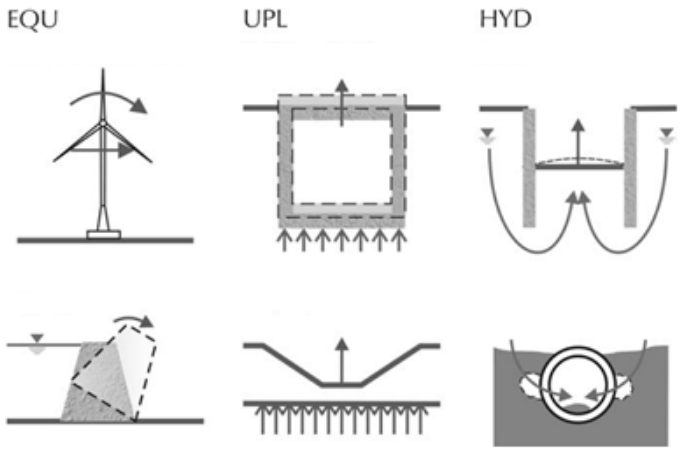
Şekil 3.8'de görüldüğü gibi çoğu durumda maksimum zemin oturması δ_{vm} 'nin maksimum duvar yer değiştirmesi δ_{hm}'in %50-%75'ine eşit olup üst limiti $\delta_{vm} = \delta_{hm}$ 'tir. Aşırı zemin hareketlerinin olması durumunda maksimum zemin oturmasının maksimum duvar yer değiştirmesinden daha büyük olduğu vakalarla karşılaşılmıştır (Hsieh ve Ou, 1998).

3.1.2 Nihai Sınır Durumu(ULS)

Yapıyı göçmeye ve insanları, hayati risklere karşı korumayı esas alan sınır durumdur. ULS'de yapılan deplasmanlar önemli değildir. Bu durumda önemli olan dayanma yapısının göçmeye ulaşıp ulaşmayacağıdır. ULS değerleri hayali değerler olup bu duruma sistemin asla ulaşamayacağı düşüncesi hakimdir. Bu nedenle gerekli kesit ve tasarımlar ULS analiz sonuçlarına göre belirlenir. Yapılan tasarımlarda, dayanma yapısının gevrek kırılmaya yani ani göçmeye ulaşmasını önleyecek şekilde tasarımlar yapılmalıdır.

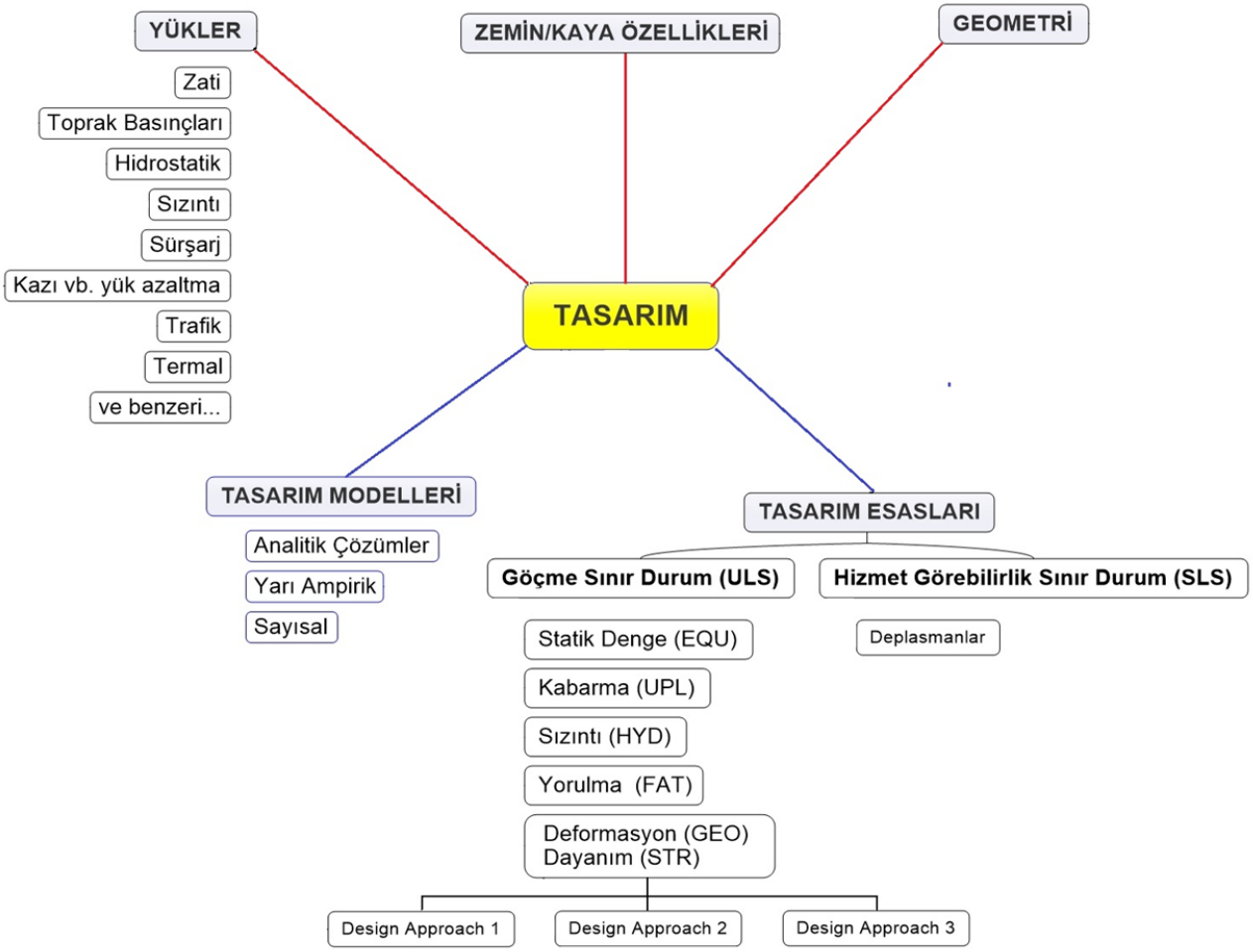
EC-7'de 5 adet ULS durum tanımlanır.

- EQU: Statik denge kaybının olduğu durum.
- STR: Yapısal göçme durumu.
- GEO: Zeminde meydana gelen göçme durumu.
- UPL: Kaldırma kuvvetlerinden dolayı meydana gelen göçme.
- HYD: Hidrolik nedenlerden dolayı meydana gelen göçme.



Şekil 3.9: Örnek nihai sınır durumları.

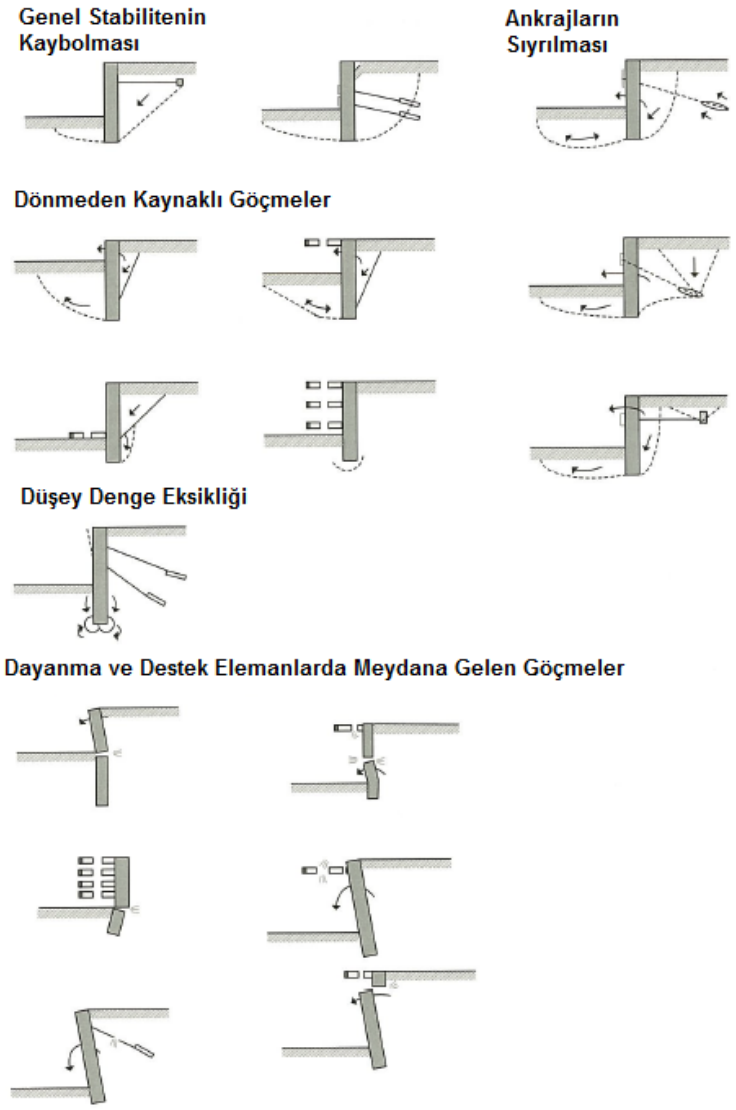
Geoteknik analizlerde STR, HYD ve GEO'dan kaynaklı göçmelere Tasarım Yaklaşımları (TY) uygulanır. Bunun ile ilgili tasarım aşamaları Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Tasarım aşamaları. (Harris ve Bond , 2008)

Dayanma yapılarında EC-7'e göre dikkat edilmesi gereken göçme durumları;

- Genel stabilitenin kaybolması.
- Yapısal elemanlardan (ankraj, zemin çivisi, kazık, veya strutlar) dolayı meydana gelen göçme durumları.
- Kabul edemeyecek sızıntı ve yeraltı suyu rejimindeki değişimler.
- Dayanma yapısında meydana gelen aşırı deplasmanlar.



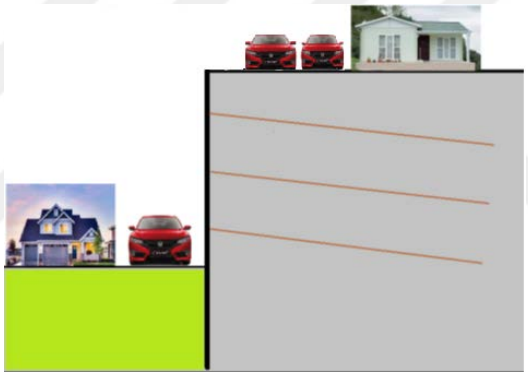
Şekil 3.11: Derin kazılarda meydana gelen nihai durumlar. (CIRIA C760, 2017)

EC-7 ‘de 3 Tasarım Yaklaşımı mevcuttur. Bunlar TY-1, TY-2 ve TY-3’tür. TY-1’in 2 kombinasyonu vardır. Uygulanacak kısmi faktörler; zemin ve kaya parametrelerine (içsel sürtünme açısına vb.), yüklere (bina yükü vb.), dirençlere (pasif toprak basıncı vb.) ve yükün etkilerine (eğilme momenti, kesme kuvveti, strut ve ankraj üzerine gelen yüklere) uygulanabilir. TY’da kısmi faktörlerin uygulandığı yerler aşağıda belirtilmiş ve uygulanan değerler Tablo 3.1ve Tablo 3.2’de verilmiştir.

- TY-1 K-1; Yüklere,
- TY-1 K-2; Zemin parametrelerine,
- TY-2; Yük ve dirençlere,
- TY-3; Yük ve zemin parametrelerine kısmi faktör uygular.

Uygulanan yükler kalıcı ve geçici olarak ayrılabilir bunlar da kendi içlerinde elverişli ve elverişsiz olarak ikiye ayrılır ve böylece 4 farklı yük durumu oluşur.

- Kalıcı Yük: yapının servis ömrü boyunca mevcut olacak yüktür. (Ör. Şekil 3.12'deki binalar)
- Geçici Yük: yapının servis ömrü boyunca etkilemesi muhtemel yüklerdir. (Ör. Şekil 3.12'deki arabalar)
- Elverişsiz Yük: oluşan bu yükler dayanma yapısını göçmeye yani stabilizasyonu bozmaya yardımcı olan yüklerdir. (Ör. Şekil 3.12'deki duvar arkasındaki ev ve arabalar)
- Elverişli Yük: bu yükler elverişsiz yükün tam zıttı olarak sistemin stabilizasyonunu korumaya yardımcı olan yüklerdir. Geçici olması durumunda hesaplamalara dahil edilmez. (Ör. Şekil 3.12'deki duvar önündeki ev ve araba)



Şekil 3.12: Farklı yük durumlarının modellenmesi.

Tablo 3.1: Tasarım Yaklaşımlarına göre uygulanacak kısmi yük faktörleri.

Tasarım Yaklaşımları	Elverişsiz Kalıcı Yük	Elverişli Kalıcı Yük	Elverişsiz Geçici Yük	Elverişli Geçici Yük
TY1/K1	1,35	1,00	1,50	0,00
TY1/K2	1,00	1,00	1,30	0,00
TY2	1,35	1,00	1,50	0,00
TY3	1,00	1,00	1,30	0,00

Tablo 3.2: Tasarım Yaklaşımlarına göre uygulanacak kısmi zemin ve direnç faktörleri.

Tasarım Yaklaşımları	tanϕ'	c'	γ	Cu	Pasif Direnç
TA1/K1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
TA1/K2	1,25	1,25	1,00	1,40	1,00
TA2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,40
TA3	1,25	1,25	1,00	1,40	1,00

Tasarım Yaklaşımlarının zemin parametrelerine uyguladığı kısmi faktörler Tablo 3.2'de verilmiştir. Bütün tasarım Yaklaşımlarında birim hacim ağırlığına uygulanan kısmi faktör 1,00 olarak verilmektedir. Kullanılan limit denge analiz programlarında elverişsiz yük olan toprak basınçlarının göçmeye veya tutmaya çalışan olarak ayırabildikleri için limit denge analizlerinde kalıcı yük olarak zemin birim hacim ağırlığına 1,35 kısmi faktör uygulanabilir. Bunun ile ilgili hesaplamalara etkileri daha sonra limit denge analizinde gösterilecek ve bu hususa tekrardan değinilecektir.

Tablolarda yükün etkilerine uygulanan kısmi faktör yoktur. Bu değer analiz sonunda TY'da 1,35 olarak kullanılır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli husus eğer yüklerin etkisine yani hesap sonucunda elde edilen kesme ve eğilme momenti değerleri 1,35 katsayısı ile büyütülecek ise o zaman analiz başlangıcında kullanılan yük kısmi faktörleri 1,35'e bölünmesi ve elde edilen sonuçların analiz başında uygulanmasıdır. Örneğin TY2 kullanılacak ise elverişsiz geçici yük 1,5/1,35=1,11 veya elverişsiz kalıcı yük 1,35/1,35=1,00 alınarak hesaplamalara dahil edilir. TY-2 gibi elverişsiz kalıcı yüklere faktör uygulamak sonlu eleman modellerinde zordur. Bu nedenle buna çözüm olarak geoteknik yük yerine, yükler sonucu oluşan kesit tesirlerine kısmi faktör uygulama yoluna gidilmiştir. Bu durumda ankraj, kazık, duvar ve palplanşa gelen yükler 1,35 kat arttırılır.

Yukarıda yüklere kısmi faktörler uygulanamasa bile yük etkisine uygulanabildiğinden bahsettik. Fakat bu seferde karşımıza zeminin göçmeye karşı sistem tutan dirençlere faktör uygulanması sorunu çıkacaktır. bu durumda zemin parametresini değiştirmek yerine kullanılacak güvenlik sayısı değiştirilecektir. Şev gibi eğimli kazılarda SLS analizlerde, göçme durumuna karşı 1,00 güvenlik kullanılıyordu. TY2 kullanılması durumunda ise bu durum zemin dirençlerine uygulanan faktör 1,1 ve yük etkisine uygulanan 1,35 düşünülerek analizlerde kullanılacak güvenlik sayısı 1,1*1,35=1,485 olarak değerlendirilebilir. Aynı düşünce ile derin kazı probleminde uygulanan 1,4 faktör içinde uygulanırsa yapının göçmeye karşı olacak güvenlik sayısı 1,4*1,35=1,89 olarak hesaplamalarda dikkate alınabilir. Konu ile ilgili ayrıntılı bilgiyi Decoding EC-7'e bulabilirsiniz.

Tablo 3.3: TY-1'de uygulanan kısmi faktörler. (Harris ve Bond , 2008)

Tasarım Yaklaşımı 1			Kombinasyon 1			Kombinasyon 2		
			A1	M1	R1	A2	M2	R1
Kalıcı Yükler (G)	Elverişsiz	γ_G	1,35			1,00		
	Elverişli	$\gamma_{G,fav}$	1,00			1,00		
Hareketli Yükler (Q)	Elverişsiz	γ_Q	1,50			1,30		
	Elverişli	$\gamma_{Q,fav}$	0,00			0,00		
Kesme Direnci Katsayısı (tan ϕ)		γ_{ϕ}		1,00			1,25	
Efektif Kohezyon (c')		$\gamma_{c'}$		1,00			1,25	
Drenajsız Kayma Direnci (cu)		γ_{cu}		1,00			1,40	
Serberst Basınç Dayanımı (qu)		γ_{qu}		1,00			1,40	
Özgül Ağırlık (γ)		γ_{γ}		1,00			1,00	
Direnç		γ_R			1,00			1,00

Action(A) ⟶ A1 : 1 nolu yük faktör seti
Material (M) ⟶ M1 ve M2 : 1 ve 2 nolu malzeme faktör setleri
Resistance(R) ⟶ R1: 1 nolu direnç faktör seti

Tablo 3.4: TY-2'de uygulanacak kısmi faktörler. (Harris ve Bond , 2008)

Tasarım Yaklaşımı 2			A1	M1	R2
Sabit Yükler (G)	Elverişsiz	γ_G	1,35		
	Elverişli	$\gamma_{G,fav}$	1,00		
Hareketli Yükler (Q)	Elverişsiz	γ_Q	1,50		
	Elverişli	$\gamma_{Q,fav}$	0,00		
Malzeme Özellikleri (X)		γ_M		1,00	
Taşıma Direnci (Rv)		γ_{Rv}			1,40
Kayma Direnci (Rh)		γ_{Rh}			1,10
İstinat Yapısına Karşı Toprak Direnci		γ_{Re}			1,40
					1,10

Action(A) ⟶ A1 : 1 nolu yük faktör seti
Material (M) ⟶ M1: 1 nolu malzeme faktör seti
Resistance(R) ⟶ R2: 1 nolu direnç faktör seti

Tablo 3.5: TY-3'de kullanılacak kısmi faktörler. (Harris ve Bond , 2008)

Tasarım Yaklaşımı 3			A1	A2	M2	R3
Sabit Yükler (G)	Elverişsiz	γ_G	1,35	1,00		
	Elverişli	$\gamma_{G,fav}$	1,00	1,00		
Hareketli Yükler (Q)	Elverişsiz	γ_Q	1,50	1,30		
	Elverişli	$\gamma_{Q,fav}$	0,00	0,00		
Kesme Direnci Katsayısı (tan Ø)		$\gamma_Ø$			1,25	
Efektif Kohezyon (c')		$\gamma_{c'}$			1,25	
Drenajsız Kayma Direnci (cu)		γ_{cu}			1,40	
Serberst Basınç Dayanımı (qu)		γ_{qu}			1,40	
Özgül Ağırlık (γ)		γ_γ			1,00	
Direnç (Kazık şaftlarında meydana gelen çekme hariç.)		γ_R				1,00
Kazık şaftlarında meydana gelen çekme		$\gamma_{R,st}$				1,10

3.2 TASARIM PARAMETRELERİ

Zemin dayanma yapısının tasarımında, laboratuvar ve saha araştırma yöntemlerinden elde edilen parametreler kullanılır. Bu parametreler karakteristik parametre olarak isimlendirilir ve alt indis olarak k kullanılır. Dayanma yapısının davranışını belirlemek için, zemin parametrelerinin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerekir. Parametrelerin seçimi, dayanma yapısı için düşünülen hesap yöntemi, zemin modeli ve zemin cinsine bağlıdır. Zemin parametre değerleri, dayanma yapısının ömrü boyunca değişmesi muhtemel ise bir dizi değer dikkate alınmalı ve hesaplar tekrarlanmalıdır.

Tablo 3.6: Kullanılacak hesap yöntemine göre gerekli parametreler. (CIRIA C760, 2017)

Hesap Yöntemi	Zemin veya Kaya Parametreleri							
	Birim Hacim Ağırlığı	Sükunetteki Toprak Basınç Katsayısı	Zemin Kesme Dayanımı				Rijitlik Parametreleri	Kaya Kütle Karakterizasyonu
			Nihai Sınır Durumu		Deplasman Sınır Durumu			
	γ_b	Ko	Toplam Gerilme c_u veya UCS	Efektif Gerilme c' ve Ø'	Toplam Gerilme c_u veya UCS	Efektif Gerilme c' ve Ø'	E veya G	RQR,RMR, Q, GSI ve Süreksizlik Parametreleri
Limit Denge	✓	✕	✓	✓	✓	✓	✕	✓
Subgrade reaction/ Pseudo Sonlu Elemanlar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sonlu Elemanlar Sonlu Farklar Elasto-Plastik Mohr Coulomb Model	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✕
Kaya Konstitütif Model (H-B veya UJM)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zeminşer için Lineer Olmaya	✓	✓	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	✕

Birim hacim ağırlığı gibi az değişkenlik gösteren zemin parametrelerinin karakteristik değeri, test sonuçlarından elde edilen değerlerin ortalaması alınabilir. Büyük değişikliklerin olduğu veya değerlerin güvenle belirlenemediği durumlarda, karakteristik değer için verilerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerekir. Detaylı test verilerinin bulunmadığı durumlarda, karakteristik parametreler yeterli güvenliği sağlayacak şekilde seçilmelidir.

Tasarım parametrelerinin seçiminde aşağıdakilere dikkat edilmesi gerekir;

- Jeolojik ve geçmiş bilgiler.
- Saha ve laboratuvar çalışmaları.
- Numune sayısı.
- Elde edilen değerlerin değişkenliği.
- Geoteknik yapının davranışını belirleyen zemin limit durumuna göre değerlendirilmesi.
- Önceki projelerden elde edilen veriler ve mevcut tesislerin performansı.
- İnşaat faaliyetlerinin zemin özellikleri üzerine etkisi.

Dayanma yapılarının tasarımı genellikle efektif gerilme analizi içerir, ancak bazı durumlarda toplam gerilme tasarımı uygun olabilir. Bu nedenle drenajlı ve drenajsız durum için zemin parametreleri elde edilmelidir. Bunun için ince daneli zeminlerde geçici işlerde 3 muhtemel durum mevcuttur.

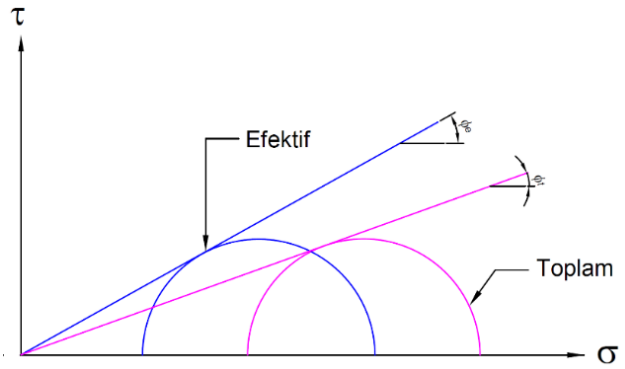
- 2 tarafında drenajsız olduğu durum: Bu varsayım en riskli durum olarak nitelendirilir. Bu riski azaltmak, dikkat ve önemli kontrol gerektirir.
- Bir tarafın drenajlı bir tarafın drenajsız olduğu durum: Aktif ve pasif bölgelerde drenajlı ve drenajsız durum kombinasyonlarıdır.
- 2 tarafında drenajlı olduğu durum: Riskin düşük olduğu durumdur.

Kalıcı işlerin tasarımı, kısa vadede geçici işlerde olduğu gibi hesaplanabilir. Uzun vadede ise her iki tarafın drenajlı olduğu düşünülmelidir. Geçici işlerin servis ömrü 18 veya 36 aydır. Bu süre proje bazlı olarak uzatılıp kısaltılabilir. Kalıcı işlerin servis ömrü ise 75 -100 yıl olarak belirlenebilir.

3.2.1 Gerilme Analizi

Zeminde meydana gelen toplam gerilmeler, zemin daneleri ve su ile karşılanır. Efektif gerilmeler zemin daneleri ile taşınan gerilme değeridir. Analizlerimizde genellikle efektif gerilme analizi yapılır. Bunun nedeni zemin içinde bulunan su ve havanın oluşan kayma

gerilmelerini karşılayamadığı ve bu kayma gerilmelerinin sadece zemin daneleri tarafından taşındığı düşüncesidir. Yukarıda verilen Mohr-Coulomb kırılma zarfını toplam ve efektif gerilmeler için çizmek mümkündür.



Şekil 3.12: Efektif ve toplam gerilme ile çizilen kırılma zarfları.

Zemine ilave yük uygulanması durumunda yük öncelikle su ile karşılanacak ve daha sonra bu boşluk suyu basını sönümlenerek efektif gerilmeler artacaktır. Fakat suya doygun kil gibi zeminler geçirimliliği az olduğu için boşluk suyu basınçları hemen sönümlenemez, bu gibi durumlarda toplam gerilme analizi yapılır. Fakat bu boşluk suyu basıncı uzun vadede sönümleneceği için toplam gerilme analizleri ile birlikte, efektif gerilme analizleri de yapılmalıdır.

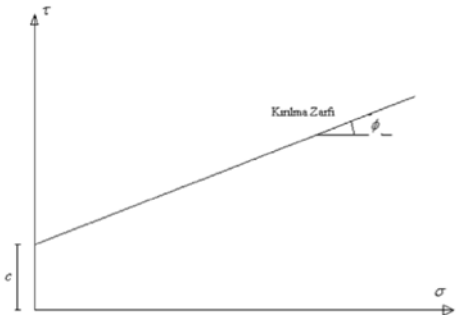
3.2.2 Kayma Gerilmesi

Geoteknik yapı imalatlarında zeminde kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Oluşan bu kayma gerilmeleri kayma mukavemetinden büyük ise göçme meydana gelir. Bu nedenle kayma mukavemetinin belirlenmesi gerekmektedir. Ancak zeminlerdeki kayma mukavemetini kontrol eden parametreler çok farklıdır. Zeminler ayrık malzeme olup meydana gelen göçme durumları malzemenin iç dayanımından değil de danelerin birbiri ile etkileşiminden kaynaklanır. Bu etkileşim kohezyon veya sürtünme yoluyla oluşur. Ancak geoteknik mühendisliğinde sürtünme katsayısı yerine içsel sürtünme açısını (ϕ) kullanarak sürtünme dayanımını tanımlamayı tercih etmektedirler. ϕ değeri zeminin mineralojisine, dane şekline, dane çapı dağılımına, boşluk oranına ve organik içeriğine bağlıdır. Bunun ile ilgili içsel sürtünme açısında olan değişimler Tablo 3.7 ‘de verilmektedir.

Tablo 3.7: İçsel sürtünme açısını etkileyen faktörler. (Look, 2007)

Faktör	Etki
Boşluk Oranı, e	e ↑,ϕ ↓
Köşelilik, A	A ↑,ϕ ↑
Dane Boyu Dağılımı	C_u ↑,ϕ ↑
Yüzey Pürüzlülüğü, R	R ↑,ϕ ↑
Su İçeriği, w	w ↑,ϕ ↓ hafifçe
Dane Boyu, S	Etkisiz (e sabiti ile)
Aşırı Konsolidasyon veya Ön Gerilme	Az Etki

Zeminde meydana gelen göçmeler için genellikle Mohr-Coulomb kırılma hipotezi kullanılır. Şekil 3.13'de görüldüğü üzere zemin kayma mukavemeti 2 parametre ile belirlenir. Oluşan kayma gerilmelerinin zarfa ulaşması durumunda zeminde göçme meydana gelir. Oluşan kayma gerilmeleri bu zarfın üstüne çıkamaz bu nedenle zemin kayma mukavemeti c ve ϕ değerleri kullanılarak hesaplanacaktır.



Şekil 3.13: Zemin kayma zarfı

Kesme dayanımı laboratuvar ortamında kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve ya sahada yapılan vane deneyi ile elde edilebilir. Tasarımda kullanılacak zemin parametreleri laboratuvar deney sonuçlarından ve arazi çalışmalarından elde edilemediği durumlarda literatürde önerilen zemin parametreleri ile arazi deney sonuçları arasındaki korelasyonlar kullanılabilir.

Kohezyonsuz Zeminler

Kohezyon kuvvetlerinin bulunmadığı, yani kendi içinde birbirini tutmayan, sadece taneler arasındaki sürtünme kuvvetiyle ayakta duran zeminlerdir. Kaba taneli zeminler (Kum – Çakıl) kohezyonsuz zeminlerdir. Zeminde yüklemeden dolayı boşluk suyu basıncı oluşmaz bu nedenle bu tür zeminlerde efektif parametreler ile çalışılır.

Kayma Direnci Açısı

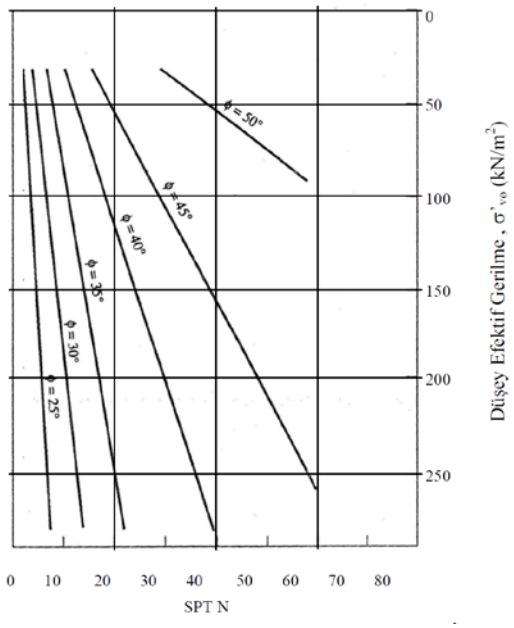
$$\phi' = 25 + 3.2\sqrt{\frac{100N}{70 + \sigma'_{V0}}} \quad \text{(OCDI-Japan 2002)} \qquad (5.2)$$

ϕ'= efektif kayma direnci açısı

N=SPT Direnci (darbe/30 cm)

σ'_{vo}= SPT yapılan derinlikteki efektif düşey gerilme.

Efektif kayma açısının tahmini için Şekil 3.14 verilen abaklarda kullanılabilir. Şekil 3.14'de verilen N_{60} değeri SPT N sayısının %60 enerji oranına göre düzeltilmiş değeridir.



Şekil 3.14: Çimentosuz kumlarda SPT N_{60} ile efektif kayma açısı ilişkisi (Coduto, 1994).

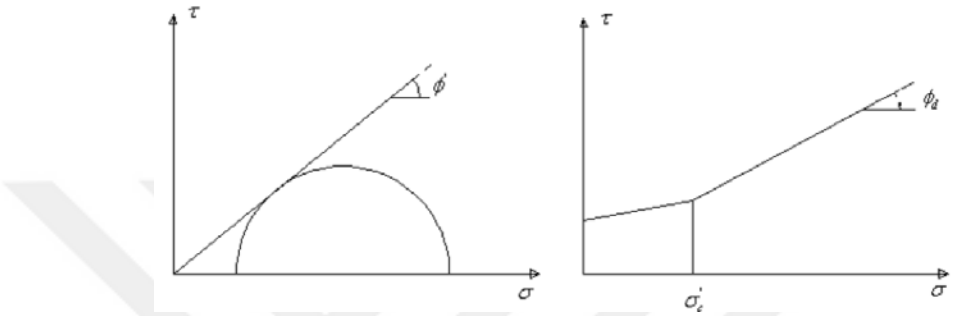
Kohezyonlu Zeminler

Efektif Kayma Direnci

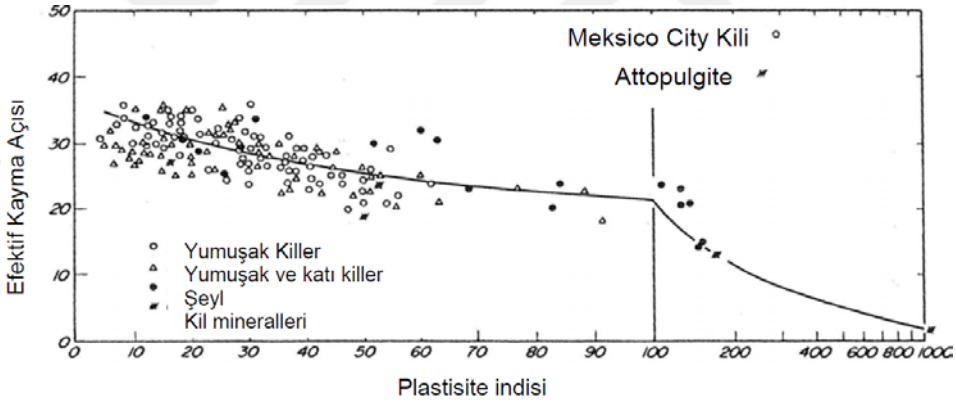
Suya doygun olmayan kohezyonlu zeminlerde yapılan arazi çalışmaları neticesinde c ve ϕ değerleri elde edilir. Zeminde suyun drene olamaması gibi nedenlerden dolayı toplam kayma

direnci de kullanılabilir fakat efektif gerilme analizleri daha kritik olup tasarımlarda efektif parametreler dikkate alınır.

Arazideki kil tabakasının, konsolidasyonu tamamlamasından sonra, drenajlı durumda yüklenmesi söz konusu olan durumlarda, kayma mukavemetinin konsolidasyonlu-drenajlı (CD deneyleri) ile saptanması gerekmektedir. Bu koşullarda normal konsolide ve aşırı konsolide killer için kayma mukavemeti zarfları Şekil 3.15'de gösterildiği gibi olacaktır.



Şekil 3.15: Normal konsolide ve aşırı konsolide killerin (CD) kayma mukavemeti zarfı.



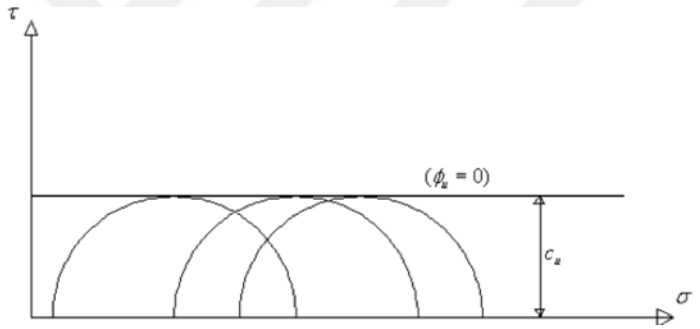
Şekil 3.16: Efektif kayma direnç açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişki.(Terzaghi, 1996)

Suya doygun kohezyonlu zeminlerde drenaj yavaş gerçekleştiği için zemin drenajsız olarak hesaplamalara dahil edilir. Zeminin tamamen doygun ve drenajsız olduğu durumda yeni uygulanan yüklerin tamamı boşluk suyu tarafından karşılandığından $0 < \phi$ olsa bile $\phi=0$ kabulü yapılır. Bu işleme "$\phi = 0$" analizi ve kayma mukavemetine de drenajsız kayma mukavemeti c_u denir. c_u 'nun tipik değerleri Şekil 3.17'de verilmiştir.

Kıvam	Drenajsız kayma mukavemeti, c_u (kPa)
Çok yumuşak	< 12
Yumuşak	12-25
Orta	25-50
Katı	50-100
Çok Katı	100-200
Sert	> 200

Şekil 3.17: Drenajsız kayma mukavemeti değerleri. (Bowles, 1990)

c_u değeri laboratuvar ortamında yapılan 3 eksenli UU deneyi ile elde edilir. Bu deneyde zeminin konsolidasyonuna ve drenaj yapmasına izin verilmeden numune kırılır. Bu durumda oluşan kayma mukavemeti c_u değerine eşit olacaktır. Bu deney aynı şekilde tekrarlanır ve elde edilen kayma zarfı düz bir çizgi olacaktır. (ϕ=0 elde edilir.)



Şekil 3.18: Suya doygun killerde (UU) deney sonuçları için kayma mukavemeti zarfı.

3.2.3 Permeabilite

Zeminlerin, içlerinden su geçmesine izin veren bu özelliklerine, permeabilite denir. Bu özellik, zemin cinsine göre farklılıklar gösterir. Permeabilite katsayısı laboratuvarda permeabilite deneyi, konsolidasyon deneyi ve üç eksenli kesme deneyi ile bulunabilmektedir. Permeabilite laboratuvarda veya arazide doğrudan belirlenmesinin yanı sıra permeabilitenin belirlenmesinde kullanılabilecek yararlı ampirik formüller ve tablo halinde değerler mevcuttur. En çok kullanılan ampirik denklem, A Hazen (1911) tarafından temiz kumlarda yapılan deneyler sonucunda 3.7 bağıntısı önerilmiştir.

$$k=CD_{10}^2 \qquad (3.7)$$

Bu metot ince dane oranı %10'u geçmesi durumunda kullanılması tavsiye edilmez.

Suya doygun zeminler için tipik k, değerleri verilmektedir.

Zemin tipi:	k(cm/s):
• temiz çakıl	100-1
• kaba kum	1-0.01
• ince kum	0.01- 0.001
• siltli kil	0.001-0.00001
• kil	$<10^{-6}$

3.3 LİMİT DENGE VE SONLU ELEMALAR

Güvenli ve aynı zamanda ekonomik bir tasarımın yapılabilmesi için, doğru sistem seçimi, seçilen sistemin kaliteli bir zemin araştırmasından elde edilen zemin verileri kullanılarak değişik metotlarla analizi, bu analiz sonuçlarının, benzer zemin koşullarında yapılan kazılardan elde edilen tecrübeler ışığında değerlendirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu nedenle şartnamelerde yer alan limit denge analizlerinin ve zemin-yapı etkileşimini dikkate alan sonlu elemanlar metodunun beraberce kullanılması giderek gerekli hale gelmiştir.

Zemine gömülü derin kazı iksa sistemlerinin projelendirilmesi için kullanılan yöntemler genel olarak dört ana grupta toplanabilir. Bunlar; "limit denge" metodu, iksa sisteminin kiriş ve zeminin yaylar ile modellendiği "elastik zemine oturan kiriş" yöntemi, "pseudo-sonlu elemanlar" yöntemi ve "sonlu elemanlar/sonlu farklar" yöntemleridir.

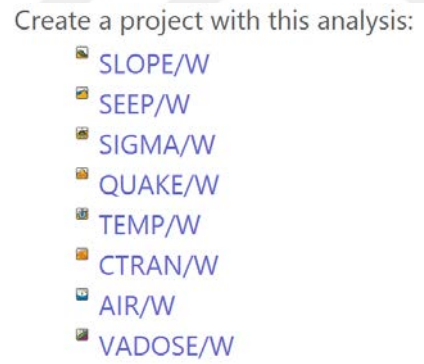
Sonlu eleman denklemleri temel olarak denge denklemleridir. Yani, sonlu eleman denklemleri ile bir çözüm elde etmek için yapının kararlı olması gerekir. Yapıya uygulanan toprak basıncı ve yükler yapıyı kararsız hale getirir ise program sonuca ulaşamayacaktır. Yapının stabilitesi açısından, çözüm elde etmek için güvenlik faktörünün 1.0 veya daha büyük olması gerekir. Bu bölümde limit denge analizi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve kullanılan programlar ile ilgili bilgiler verilmiştir. Tasarım çalışmalarında bunlar aktif olarak kullanılabilir. Öncelikle limit denge ile ULS analizi yapılarak dayanma yapılarının boyları belirlenir daha sonra sonlu elemanlar ile SLS analiz yapılarak deplasman kontrolü yapılır. Tasarımcı tarafından verilen sınırlar aşılmazsa, analizlere ULS analizler de eklenerek kesit, dayanma yapısı ve ankrajın yeterliliği kontrol edilir.

3.3.1 Limit Denge Analizi

Limit denge analizi, zeminde oluşan düşey ve yatak kuvvetlerin dengesi ile moment dengesi üzerine kurulu bir sistemdir yani sistemin denge durumunu inceler. Limit denge analiz programları zemin yapı etkileşimini modellemez ve zeminde meydana gelen deformasyonları hesaplayamaz. Fakat analiz sonuçlarından elde edilen veriler yardımıyla ampirik olarak oluşacak deplasmanlar hesaplanabilir. Bu analiz programları 2 boyutlu analiz yapabilir. Kullanıcı tarafından istenen parametreler Sonlu elemanlar metoduna göre daha azdır. Yapılan çalışmalarda GeoStudio 2012 programı kullanılmış ve destekli kazıların yapılması durumunda Tasarım Yaklaşımlarının etkileri incelenmiştir.

3.3.1.1 GeoStudio Genel

GeoStudio istenen farklı analizler için farklı modüllerden oluşur. Yapılacak analiz programın açılış sayfasında seçilmelidir. Bir modülde yapılan çalışma diğer modüllere aktarılabilir ve geometrinin tekrardan oluşturulması gerekmez. Fakat kullanılacak modüllere göre ilave parametre gerekebilmektedir. Şekil 3.19 de GeoStudio'da bulunan modüleler gösterilmiştir. Bu modüllerin içinden bu çalışma kapsamında Slope/W kullanılacaktır.



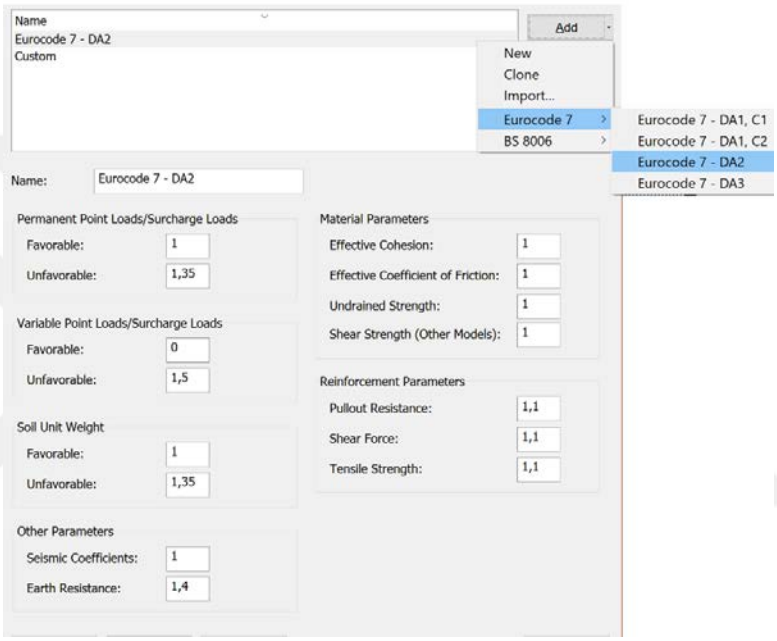
Şekil 3.19: GeoStudio analiz modülleri.

Slope / W gibi modern limit denge yazılımları, yapılan analizlerin daha kompleks hale gelmesi, zemin tabakalanmasının düzensiz olması, boşluk suyu basıncı koşulları ve sürşarj yüklerinin hesaplanmasını mümkün kılar. Dilim yöntemine dayanan limit denge formülasyonları, ankrajlı ve zemin çivili duvarlarda da uygulanmaktadır.

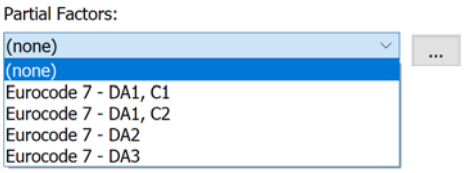
Yapılacak analizlerde Tasarım Yaklaşımları kullanmadan ve Tasarım Yaklaşımı kullanarak analizler tekrarlanacak uygulanan Tasarım Yaklaşımlarının güvenlik sayıları üzerindeki etkilerine bakılacaktır.

3.3.1.2 Tasarım Yaklaşımlarının Dahil Edilmesi.

Programda öncelikle kullanılacak yöntem seçilmeli ve daha sonra kullanacağımız Tasarım Yaklaşımları eklenmelidir. GeoStudio programı uygulanabilecek Tasarım Yaklaşımlarını kendi bünyesinde bulundurur ve kullanıcı tarafından da farklı yaklaşımların eklenmesine müsaade eder. Şekil 3.20'de DA-2'e göre uygulanacak kısmi faktör verilmiştir. Eğer herhangi bir Tasarım Yaklaşımı uygulanmak istenmiyor ise Şekil 3.21 görülen seçeneklerden none seçeneği seçilerek analizler gerçekleştirilebilir.



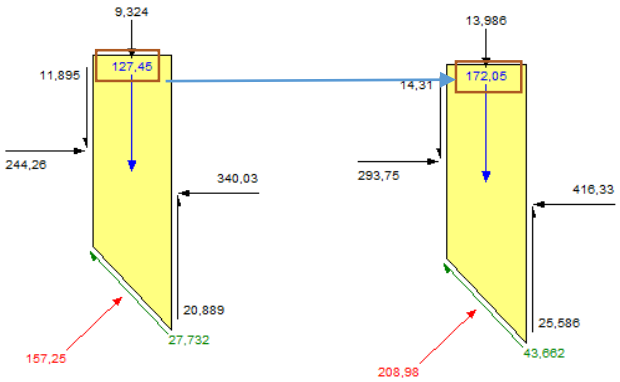
Şekil 3.20: GeoStudio programına Tasarım Yaklaşımlarının dahil edilmesi.



Şekil 3.21: Uygulanabilecek Tasarım Yaklaşımları.

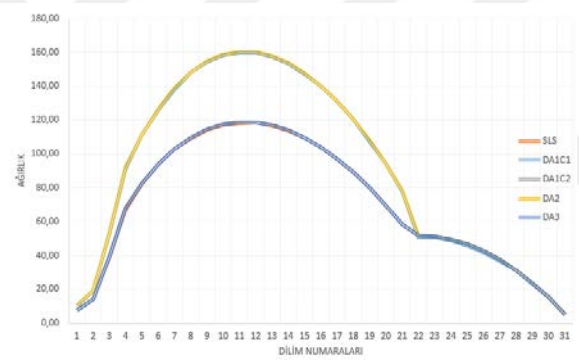
Uygulanacak Tasarım Yaklaşımına göre aynı dilimde meydana gelen kuvvetler değişmektedir. Kalıcı zemin yükünü faktörlemek için birim hacim ağırlığına uygulanan kısmi faktör sonucu meydana gelen değişimler Şekil 3.22'de verilmiştir.

Dilim ağırlığı: 127,45*1,35=172,05



Şekil 3.22: Dilim ağırlıklarında meydana gelen değişim.

Kalıcı yük olarak zemin birim hacim ağırlığına uygulandığı zaman program elverişli ve elverişsiz yükleri ayırt edebilmektedir. Bu duruma örnek olarak 22. dilimde elverişli durama geçtiğini Şekil 3.23'de görünmektedir.

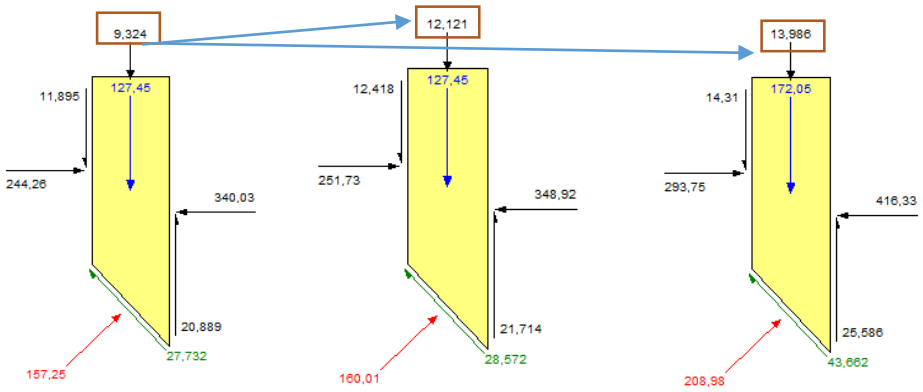


Şekil 3.23: Dilimlerde Tasarım Yaklaşımlarına göre oluşan yükler.

Tasarım Yaklaşımlarına göre geçici sürşarj yüklerine uygulanan 1,3 ve 1,5 kısmi faktörler Şekil 3.24'de gösterilmiştir.

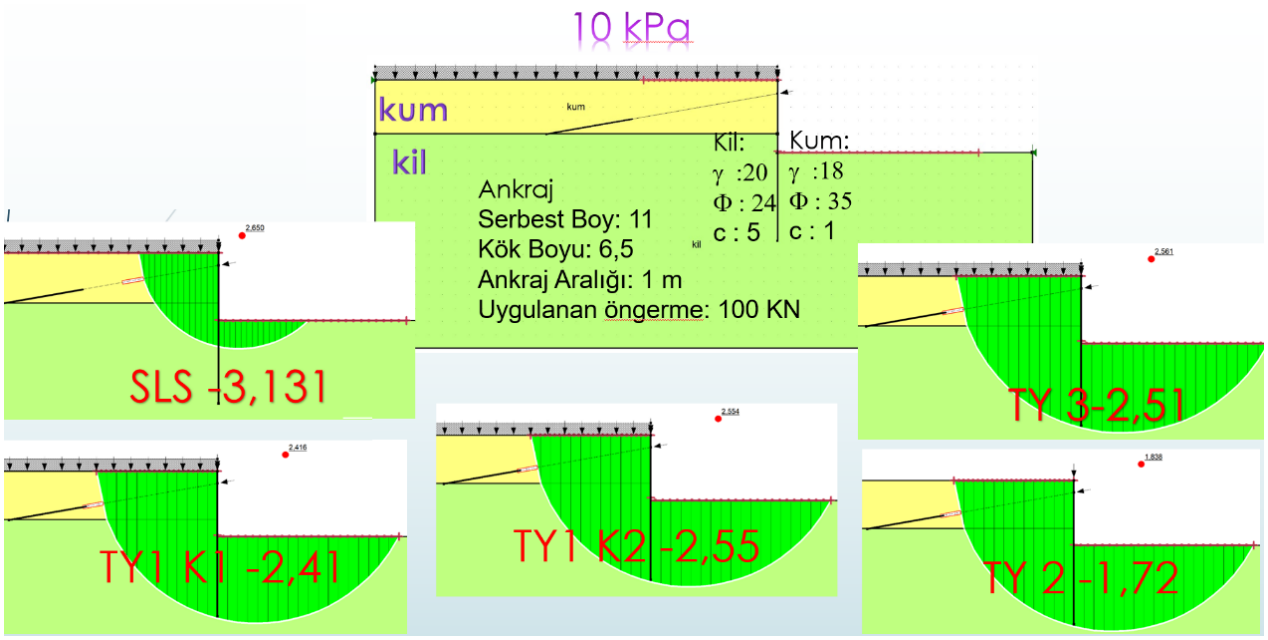
TY1 K2 ve TY3: 9,324*1,3=12,12

TY1- K1 ve TY2 için 9,324*1,5=13,96

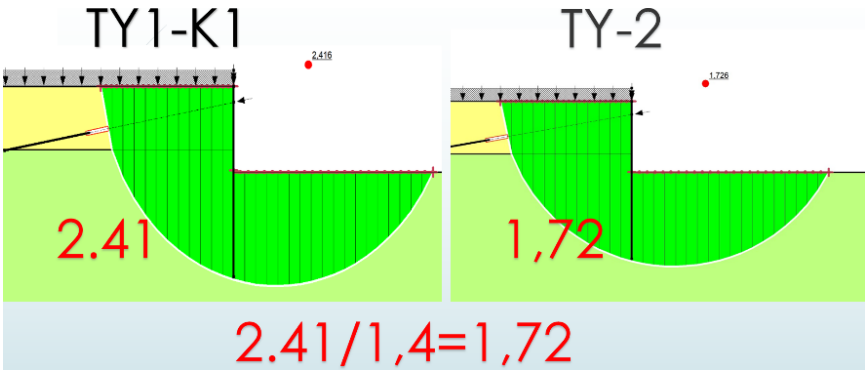


Şekil 3.24: Dilimlerde sürşarj yükünde meydana gelen değişim.

Limit denge analizi sonlu elemanlar programı ile uygulanamayan bazı kısmi faktörlerin uygulanmasına izin verir. Bunlardan biri de TY2'de dayanma yapısı önünde bulunan pasif toprak basıncına uygulanması gereken γ_{re} kısmi faktördür. Program bu faktörü dilimler üzerine etkitmeyip elde edilen güvenlik sayısı üzerine uygular. Pasif toprak basıncına uygulanan kısmi faktörün hesaplamaya etkisini görmek için yapılan analizde pasif toprak basıncına uygulanan kısmi faktörün 1 ve kısmi faktörün 1,4 olduğu TY1 K1 ve TY2'de elde edilen güvenlik sayılarına bakılmıştır. İlerleyen bölümlerde vereceğimiz Plaxis Bultein örneğinde verdiğimiz Slope/w'da modellenmiş ve elde edilen güvenlik sayıları Şekil 3.25'de verilmiştir.



Şekil 3.25: Analiz sonucu elde edilen güvenlik sayıları.



Şekil 3.26: Pasif toprak basıncına uygulanan kısmi faktör sonucu elde edilen güvenlik sayısı.

Plaxis'de pasif toprak basıncına faktör uygulanmamaktadır. Bu nedenle gerekli güvenlik, sınır şartı arttırılarak sağlanabilir. Dayanma yapılarında istenen güvenlik şartı 1 ise bu değer 1,4'e çıkarılabilir. Bu konuya sonlu elemanlar analizlerinde tekrardan değinilecektir.

Şekil 3.25'de modellenen problem için Tasarım Yaklaşımları uygulanarak analizler tekrarlanmıştır. Elde edilen güvenlik sayısına bakıldığında en kritik durum olarak TY 2 belirlenmiştir, sonuçlar Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8: Slope/W ile yapılan analiz sonucunda elde edilen güvenlik sayıları.

Uygulanan Tasarım Yaklaşımı	Güvenlik Sayısı
SLS	3,13
DA1 C1	2,41
DA1 C2	2,55
DA2	1,72
DA3	2,56

3.3.2 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu, günümüzde giderek daha karmaşık hale gelen problemlerin yaklaşık çözümlerinin elde edilmesinde kullanılan pratik bir sayısal metottur. Çözüm sonuçlarının hızlı bir şekilde elde edilmesi ve muhtemel durumların göz önüne alarak analizlerin tekrarlanabilmesi vb. nedenlerden dolayı son yıllarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Yöntemde, sürekli bir sistem kendi içinde sonlu sayıda bileşen veya elemanlardan ve bu elemanları birleştiren düğüm noktalarından oluşan ayrık bir sistem olarak modellenmektedir. Yani sistem sonlu elemanlara bölünerek denklemler bir eleman için yazılmakta ve entegre edilerek sistem denklemleri elde edilmektedir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi mühendisliğin birçok alanında 30 yılı aşkındır kullanılırken, geoteknik problemlerin analizi için kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Bunun nedeni geoteknik mühendisliğine özel çok sayıda karmaşık konu bulunması ve bunların yeni çözülmüş olmasıdır. Uygun bir şekilde kullanıldığında, bu yöntem ile pratik zemin mühendisliği problemleri için gerçekçi sonuçlar elde edilebilir. İyi bir analiz gerçek zemin davranışını benzeştirerek mühendisin problemi daha iyi anlamasını sağlar. (Berilgen, 2012).

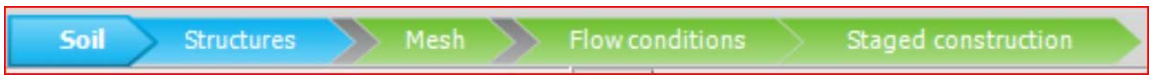
Sonlu eleman yöntemi ile sayısal analizde; zemin kesiti, zemin özellikleri ve zemin yapısal modeli, sonlu eleman modellerinin boyutları, elemanların şekil ve boyutları, ara yüzey elemanlarının kullanılması sonuçların gerçekçiliğini doğrudan etkilemektedir. Programların verdiği sonuçlar kullanıcı tarafından girilen parametrelere bağlı olduğu için sonuçların gerçekçi olması için kullanılan parametrelerin ve zemin modelinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir.

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, sonlu elemanlar analizi, gerçek durumu modelleyebilmek amacıyla adım adım (aşamalı yükleme, aşamalı kazı) yapılmaktadır. Analizin adımlar halinde gerçekleştirilebilmesi iki avantaj sağlamaktadır:

- Analizlerde dolgu yerleştirilmesi veya kaldırılması durumunda, geometri her bir adımda değişmektedir. Geometrideki değişim sonlu elemanlar ağına eleman ekleyerek veya kaldırarak modellenebilmektedir.
- Analizlerde, zemin kütlesi içinde gerilmelerin değişimi sonucu her bir yükleme kademesinde zemin özellikleri değişmektedir. (Cansız, 2014)

3.3.2.1 Plaxis Genel

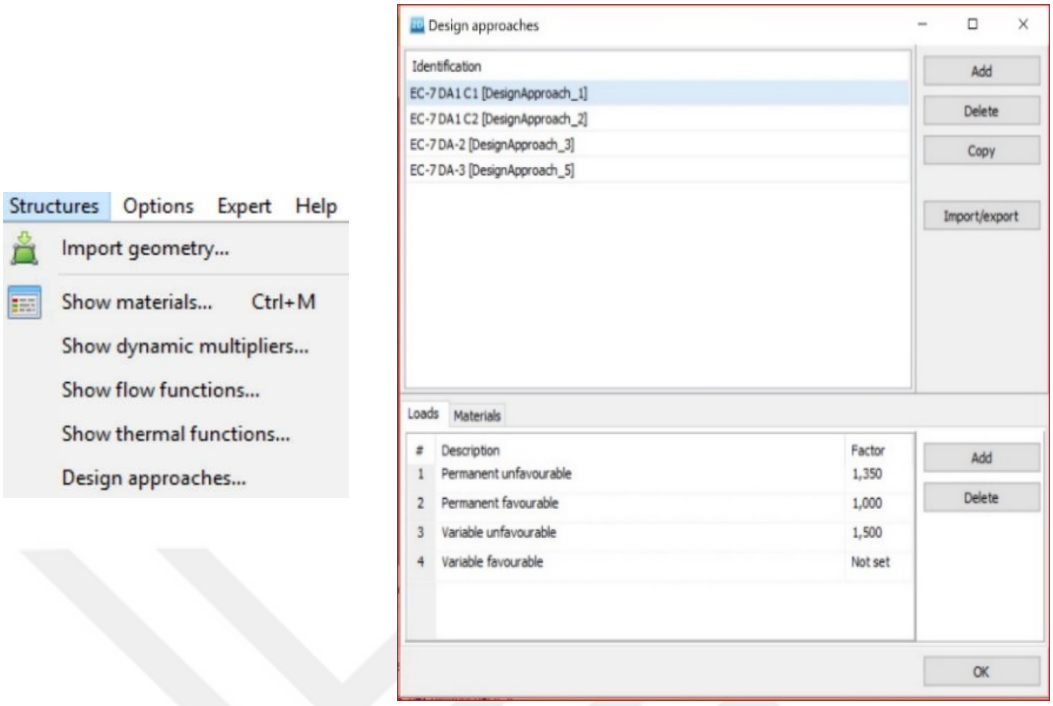
Plaxis, tasarım yapmaları için takip etmeleri gereken aşamaları kullanıcılarına sunar.



Şekil 3.27: Plaxis tasarım aşamaları.

Zemin (Soil) : zemin tabakaları ve özellikleri tanımlanır. Mevcut sondaj logları oluşturulup yeraltı su seviyesi belirtilir.

Yapılar (Structures) : modelin yapısal bileşenleri tanımlanır. Kazık, ankraj, strut, perde duvar vb, yapısal elemanlar burada oluşturulur. Bu bölümde uygulanacak Tasarım Yaklaşımları belirlenmeli ve kullanılacak kısmi faktörler girilmelidir. Daha önce oluşturulan veya sürekli kullanılması düşünülen TY veya kısmi faktörler import/export seçeneğine tıklanarak farklı projelerde de kullanılabilir.



Şekil 3.28: Tasarım Yaklaşımları'nın Plaxis programına eklenmesi.

Ağ oluşturulması: sonlu eleman ağı oluşturur. Hassas analizler için mesh sıkılaştırılabilir.

Akış Koşulları: su seviyesi ve sınırları tanımlanır.

İnşaat Aşamaları: hesaplama ayarları tanımlanır. SLS fazlarının tanımlanmasının ardından ULS fazları analiz aşamalarına eklenir.

3.3.2.2 Plaxis Zemin Modelleri

Plaxis uygulanacak probleme göre farklı zemin modelleri kullanılabilmektedir. Doğru zemin modelini seçmek bizim problemimizi ve zemin davranışını daha iyi bir şekilde anlamamızı yardımcı olmaktadır. Aynı problemin farklı zemin modelleri ile çözümü yapılabilir fakat bu durumda elde edilecek deplasman ve kesit tesirleri arasında farklılıklar oluşur.

Aşağıda zemin modellerine girilmesi gereken parametreler tablo halinde verilmiştir. Tabloda verilenlerden farklı olarak alternatif parametreler de hesaplamalara dahil edilebilir.

Tablo 3.9: Plaxis zemin modelleri ve kullanılacak parametreler.

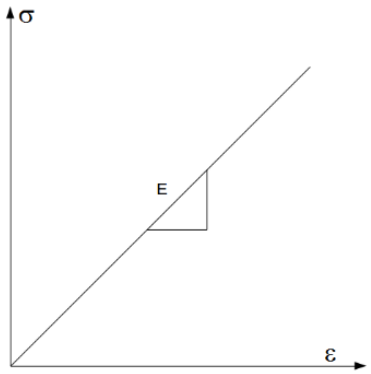
Malzeme Parametreleri	Kullanılan Malzeme Modeli					
	LE	MC	HS	HSSmall	SS	SSC
E’	✓	✓				
E_{50}^{ref},E_{ur}^{ref},E_{eod}^{ref}			✓	✓		
ν'	✓	✓		✓		
ϕ'		✓	✓	✓		
c'_{ref}		✓	✓	✓	✓	✓
ψ'			✓		✓	✓
m			✓		✓	✓
κ*					✓	✓
λ*					✓	✓
μ*						✓
G^{ref}				✓		
$\gamma_{0,7}$				✓		

- İstenmesi durumunda ekstra parametreler girilerek zemin daha uygun bir şekilde tanımlanabilir.
- Kullanılan bütün malzemelerde birim hacim ağırlığı, suya doygun birim hacim ağırlığı ve drenaj durumu her malzemede kullanıcıdan istenmektedir.
- LE: Linear Elastic Model (Lineer Elastik Model)
  MC: Mohr Coulomb Model (Mohr Coulomb Model)
  HS: Hardening Soil Model (Pekleşen Zemin Modeli)
  HSSmall: Hardening With Small Strain Stiffness Model
  SS: Soft Soil Model (Yumuşak Zemin Modeli)
  SSC: Soft Soil Creep Model (Yumuşak Zemin Krip Modeli)
- E: Elastisite modülü
  ν’: poison oranı
  ϕ' :İçsel sürtünme açısı
  c'_{ref} :Kohezyon
  ψ' :Dilatasyon açısı
  m : Rijitlik davranışına bağlı olarak gerilmeye oranı κ* :
  λ* :Basınç indeksi
  κ* :Şişme indeksi
  G^{ref} :Küçük birim deformasyon kayma modülü
  $\gamma_{0,7}$:G’nin 70% olduğunu gösteren kesme

Linear Elastic Model

Lineer elastik model Hooke’s Yasası’na dayanır. Bu model sadece kullanıcıdan iki parametre talep eder bunlar sırasıyla E ve ν’ parametreleridir. Lineer olmayan zeminlerde lineer elastik model kullanılması uygun değildir ve gerçek zemin davranışını yansıtmayacaktır.

Bu modele göre artan gerilmelerle birlikte şekil değiştirmeler artacak fakat sistem göçmeye ulaşamayacak, yani malzemenin sonsuz rijit olduğu kabulünü yapacaktır. Ancak yüksek rijitliğe sahip olan zeminlerde, betonlarda ve ayrışmamış kayalarda bu model kullanılabilir.

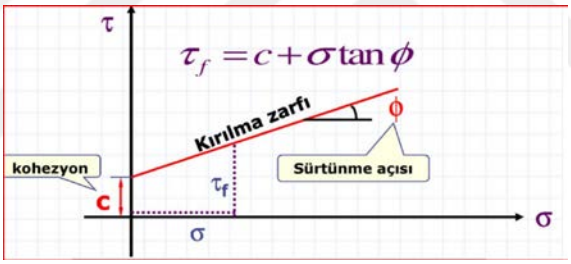


Şekil 3.29: Lineer elastik malzeme davranışı.

Mohr Coulomb Model (MC)

Zemin mekaniğinde en yaygın kullanılan zemin modeli Mohr-Coulomb modelidir ki bu modelde maksimum kayma gerilmesi (τ_{max}); kohezyon (c'), içsel sürtünme açısı (ϕ') ve normal gerilmenin(σ') bir fonksiyonudur.

$$\tau_{max}=c'+\sigma'\tan\phi' \qquad (6.1)$$

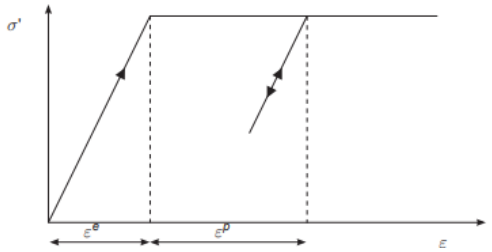


Şekil 3.30: Zemin kayma mukavemeti ve kayma zarfı.

MC, zeminin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin birinci bölgesinde elastik, ikinci bölgesinde ise mükemmel plastik bir malzeme olduğu varsayımına dayanır. Tanımlanması için 5 parametre gerekir. Bunlar sırasıyla E, ν, c, ϕ ve ψ parametreleridir. MC analize başlamadan önce zemin davranışının nasıl olacağını tahmin etmek için ilk aşamada kullanılabilir.

Zeminlerin gerilme altında pekleşme ve yumuşama gibi özelliklerini modelleyemediği gibi, dilatansi içermeyen ve hacimsel artmadan ziyade hacimsel azalma gösteren gevşek kumlar ve aşırı konsolide kil davranışını da iyi modelleyemez. Ayrıca, yükleme-boşaltma durumları için bir ayrım yapılamaz. Bu sebeple kazı problemlerinde genelde önerilmez ve gelişmiş zemin modellerinin (HS ve HSSmall vb.) kullanılması tavsiye edilir. Fakat MC derinlikle birlikte zemin E ve c değerleri arttırılabilir. Bunun için E_{inc} ve c_{inc} değerleri Plaxis'e girilmelidir. (Zeminde kazı yapılması ile birlikte dayanma yapısı arkasındaki zeminde gevşemeler olur.

Buna bağlı olarak da E değerinde değişimler olur. MC kullandığı E değeri sabit olduğu için kazı nedeniyle E'de olan değişimleri de hesaba katamaz.)

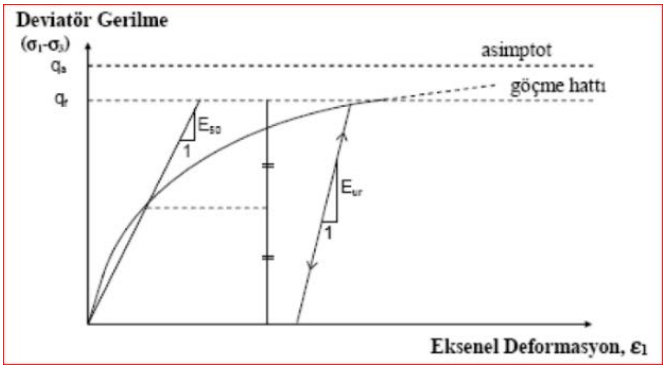


Şekil 3.31: Elastik mükemmel plastik davranış.

Hardening Soil Model (HS) (Pekleşen Zemin Modeli)

HS, plastisite teorisi çerçevesinde oluşturulan yumuşak ve katı özellikteki birçok zeminin modellenmesinde kullanılabilecek gelişmiş bir zemin modelidir. Bu model (Duncan ve Chang, 1970) hiperbolik modelin yerini alan çok daha gelişmiş bir versiyonudur. MC'da olduğu gibi c, ϕ ve ψ parametreleri kullanılır. HS Modeli lineer bir gerilme şekil değiştirme eğrisi yerine hiperbolik bir eğri kullanarak, zeminlerin elastisite modülleri gerilmeye bağımlı olarak değişmesini saptamaktadır.

Derin kazılarda kazı aynası gerisinde zeminin her noktasında farklı yük durumları ve gerilme izleri oluşmaktadır. Bazı noktalarda efektif gerilmeler azalırken diğer bazı noktalarda da gerilmeler artmaktadır. Bu nedenle derin kazıların gerilme seviyesine bağlı rijitlik modülü ön gören Pekleşen Zemin Modeli (HS) ile modellenmesi MC modeline göre daha gerçekçi olacaktır. Bu nedenle yapılan nümerik analizde zemin malzeme modeli olarak HS kullanılmıştır. HS modeli kullanılan tek rijitlik parametresinden farklı olarak 3 farklı elastisite modülü (E_{50}, E_{ur} ve E_{eod}) tanımlanır.



Şekil 3.32: Hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi. (Plaxis Manual, 2019)

E_{50}: 3 eksenli deneyden elde edilen sekant rijitliği

E_{eod}: ödometre yükleme rijitliği

E_{ur}: 3 eksenli yükleme-boşaltma rijitliği

Plaxiste kullanılan m değeri; gerilmeye (yükleme seviyesi) bağlı rijitlik değeri için girilen üs değeridir, kum ve siltler için genellikle 0.5~1 yumuşak zeminler için ise genellikle 1 alınmaktadır. Denklemlerde P_{ref} referans gerilme 100 kPa kabul edilir.

Tablo 3.10: İlk yükleme sırasında gerilmeye bağlı malzeme rijitlik modülü değeri. (Von Soos, 2002)

İlk Yükleme Durumunda Normal Konsolide Zeminler	γ_{sat} (kN/m^3)	Poison (n) %	E_{eod}^{ref} (MPa)	m
Çok sıkı kuvars kumu	21	35	50	0,60
Çok gevşek kuvars kumu	16	50	20	0,60
Silt (w_L=0,2 için)	19	45	5	0,75
Kil (w_L=0,6 için)	16	65	1	1,00

Hardening Soil Small Strain- Stiffness (Pekleşen Zemin Küçük Deformasyon Rijitliği)

HSSmall, HS modele ek olarak zeminde küçük şekil değiştirmelerine bağlı olarak artan rijitliğini hesaba katar. HS modelde kullanılan tüm parametreler burada da geçerli olup ek olarak 2 adet G^{ref} ve $\gamma_{0,7}$ parametresine ihtiyaç duyar. Zeminde yapılan kazılarda HSSmall, HS modelinden daha iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca küçük deformasyon özelliği gösteren genellikle dolgu malzemesi olarak kullanılan granüler zeminlerde ve aşırı konsolide olmuş killerde kullanılması daha uygundur.

3.3.2.3 Drenaj Durumları

Uygulanan yük doğrultusunda zeminde boşluk suyu basınçlarının hızlı bir şekilde sönümlenmesi durumu drenajlı durum olarak kabul edilecektir. Kum ve çakıllar için yapılan analizlerde bu tür zeminler drenajlı olarak hesaplamalara dahil edilecektir. Drenajlı şartların mevcut olduğu durumda boşluk suyu basıncının her zaman hidrostatik basınca eşit olduğu varsayılır.

Uygulanan yük ile oluşan boşluk suyu basınçları hemen sönümlenmez ise yani drenaj hızı yük uygulama hızından düşük ise zeminde ilave yük nedeniyle boşluk suyu basınçları oluşur. Boşluk suyu basınçlarının oluşması bizim efektif değerlerimizi düşürecektir. Bu duruma drenajsız durum denir. Plaxis'de 3 tür drenajsız durum mevcuttur. Bunlar Drenajsız (A), Drenajsız (B) ve Drenajsız (C) olarak isimlendirilmiştir. Zemin modellerinde kullanılabilecek drenajsız durumlar Tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.11: Plaxis zemin modellerinde kullanılabilecek drenaj durumları.

Malzeme Modelleri	Kullanılabilecek Drenaj Durumları
Lineer Elastik Model	Drenajlı
	Drenajsız (A)
	Drenajsız (C)
	Geçirimsiz
Mohr Coulomb Model (MC)	Drenajlı
	Drenajsız (A)
	Drenajsız (B)
	Drenajsız (C)
	Geçirimsiz
Pekleşen Zemin Modeli (HS)	Drenajlı
	Drenajsız (A)
	Drenajsız (B)
HSSmall	Drenajlı
	Drenajsız (A)
	Drenajsız (B)
Yumuşak Zemin Modeli (SS)	Drenajlı
	Drenajsız (A)
SSC	Drenajlı
	Drenajsız (A)

3.3.2.4 Plaxis EC-7 Tasarım Yaklaşımları

Bu bölümde Tasarım Yaklaşımlarının Plaxis programında uygulanmasında bahsedilecek ve uygulanan kısmi faktörler neticesinde elde edilen sonuçlardaki farklılıklar sunulacaktır.

Tasarım Yaklaşımlarının Plaxis'e Uygulanması

Yukarıda bahsedilen Tasarım Yaklaşımları structure bölümünde programa dahil edilir. Fakat girilen kısmi faktörler seçilmeden hesaplamalara dahil olmaz. Uygulanacak Tasarım Yaklaşımına göre yük ve zemin parametreleri için kısmı faktörler Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'de olduğu gibi girilebilir.



Şekil 3.33: Kısmi yük faktörlerinin belirlenmesi.



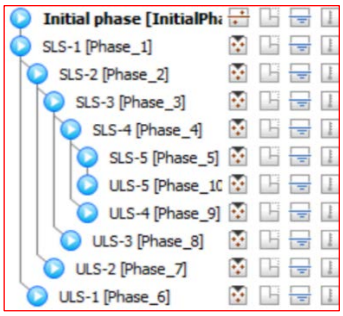
Şekil 3.34: Zemin özelliklerine uygulanan kısmi faktörler.

Yukarıda görüldüğü gibi Plaxis malzeme özelliklerine ve yüklere kısmi faktör uygulanmasına olanak sağlar. Malzeme özelliklerine ve yüklere yukarda verilenlerden farklı olarak kısmi faktör eklemek isteniyorsa, add seçeneği ile eklenebilir.

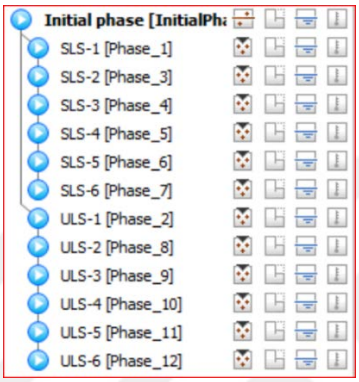
Gerekli geometri ve zemin tabakları oluşturulduktan sonra analiz aşamasına geçilir. Analiz aşamasında öncelikle SLS fazları, daha sonra ULS fazları analize dahil edilir. Bu işlem iki farklı şekilde yapılabilir bunun seçimi kullanıcının tercihine kalmıştır. Biz çalışmalarımızda ikinci analiz düzenini tercih edeceğiz. ULS analizlerin farklı uygulanmasının sonuçlara etkisi vardır fakat bu farklılıklar çalışmamız kapsamında değildir. Farklı proje ve çalışmalarda kullanılan uygulama şeması aradaki farklılıklar dikkate almaya değer olabilir.



Şekil 3.35: ULS analiz fazlarının SLS fazlarına dahil edilmesi. (Plaxis Manual, 2019)

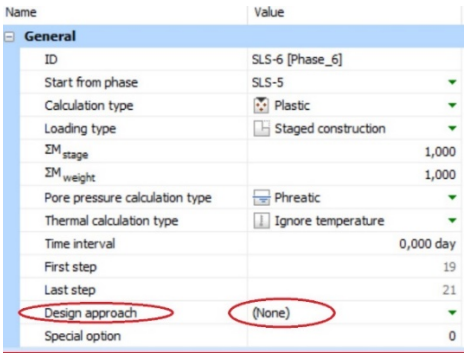


Şekil 3.36: Uygulama Şeması 1'in Plaxis'e uygulanması.

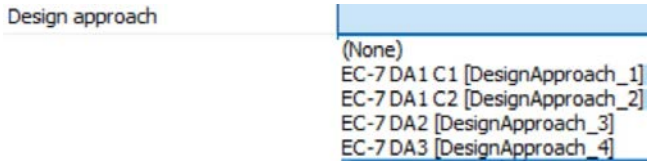


Şekil 3.37: Uygulama Şeması 2'nin Plaxis'e uygulanması.

SLS analizde Şekil 3.38'de gösterildiği gibi Design Approach (Tasarım Yaklaşımı) seçeneğini seçmedik. Bu nedenle hesaplamalara herhangi bir kısmi faktör uygulanmadı.



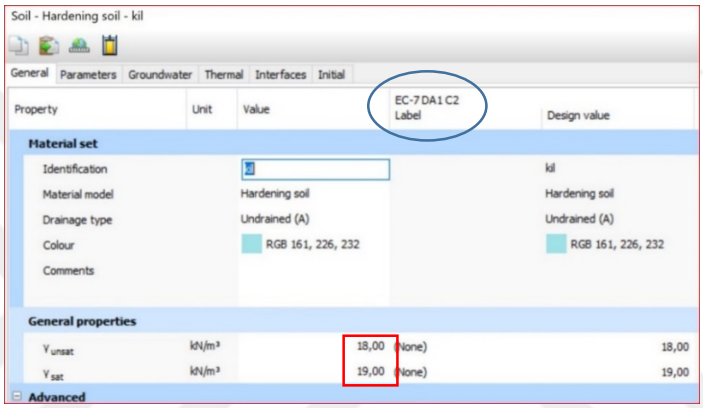
Şekil 3.38: SLS analiz Tasarım Yaklaşımı seçeneği.



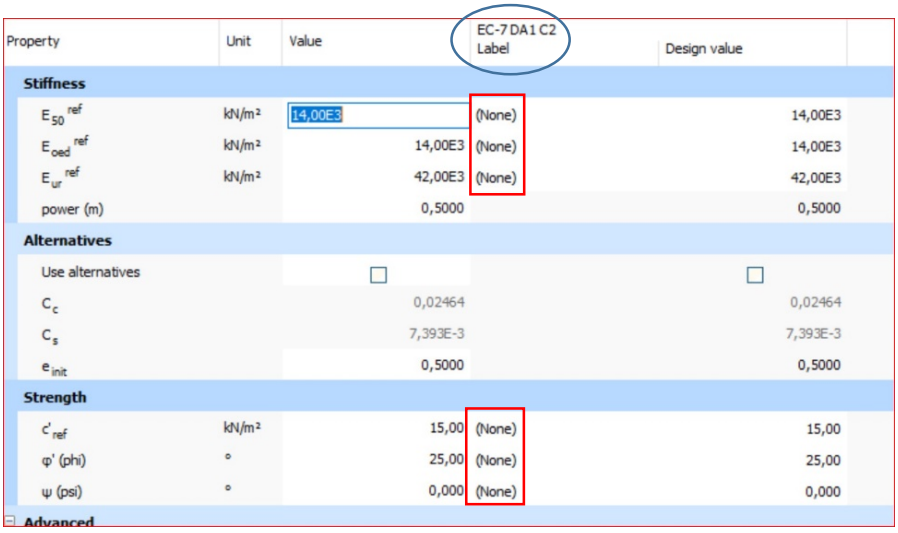
Şekil 3.39: Uygulanabilecek Tasarım Yaklaşımları.

SLS analiz fazları oluşturulduktan sonra tekrar initial phase'den (Başlangıç fazından) ULS imalat aşamaları eklenmeye başlanır.

Structure bölümünde girmiş olduğumuz Tasarım Yaklaşımları burada karşımıza çıkacaktır. Uygulamak istediğimiz TY seçilir. Girmiş olduğumuz Tasarım Yaklaşımı zemin parametrelerine kısmi faktör uyguluyor ise malzeme özelliklerine girerek uygulanacak kısmi faktörlerin seçimi yapılmalıdır. Hangi parametreye hangi kısmi faktör uygulanacak ise buradan seçilir. Bu işlemin her fazda tekrarlanması icap etmez fakat her fazda uygulanacak Tasarım Yaklaşımının seçimi yapılmalıdır.

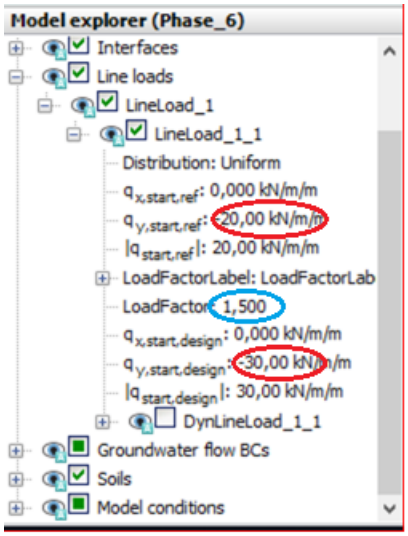


Şekil 3.40: Malzeme özelliklerinde kısmi faktörlerin belirlenmesi-1.



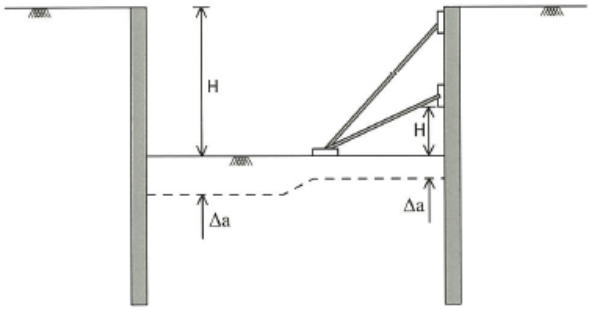
Şekil 3.41: Malzeme özelliklerinde kısmi faktörlerin belirlenmesi-2.

Yükler için uygulanacak kısmi faktörler faz aşamalarında yükün aktif hale getirilerek Şekil 3.42'de belirtildiği gibi uygulanabilir. Uygulanmak istenen faktörler uygulandıktan sonra analiz başlatılır.



Şekil 3.42: Yüke kısmi faktör uygulanması.

Burada ayrıca belirtmek istediğimiz nokta ULS analizlerde planlanmamış kazı durumunun da göz önüne alınabileceğidir.

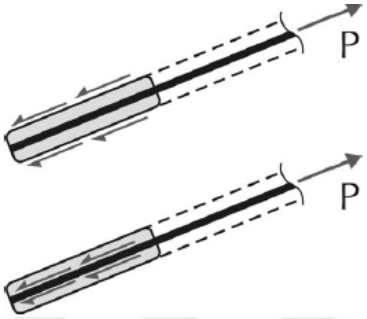


Şekil 3.43: İzin verilen planlanmamış kazı. (Harris ve Bond , 2008)

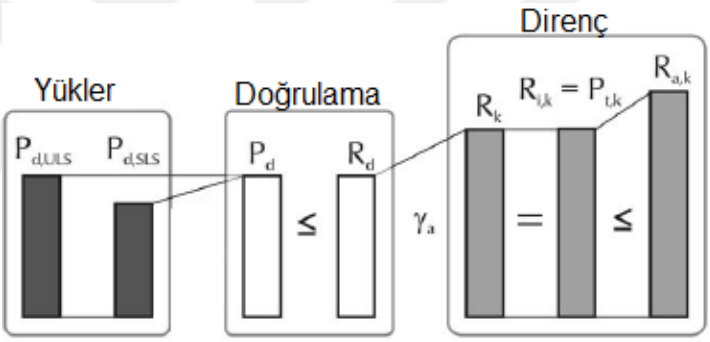
Şekil 4.43'de görülebileceği gibi planlanmamış kazı derinliği için 2 farklı durum söz konusudur. Birincisi konsol çalışan sistemlerde kazı derinliğinin %10'u, ikincisi ise yatay destek elemanı ile desteklenmiş sistemlerin, en altındaki destek elemanı ile kazı taban kotu arasındaki mesafenin %10'udur. Her iki durum için de öngörülmeyen kazı derinliği 0,5 metreden fazla olamaz. Tasarımcı kazı yapılırken planlanmayan bir kazı olmayacağını düşünerek ve gerekli kontrollerin sürekli olarak yapılacağını düşünerek bu miktarları 0,1 m olarak düşünebilir. Biz çalışmalarımızda bu farkın sonuçlara ne gibi etkisi olacağını görmek için, SLS ve ULS planlı kazı derinliğine kadar yapılan analiz sonuçlarının yanında bu durumları da göstereceğiz.

Yapılan analiz sonuçlarında elde edilen ankraj kuvvetleri ile zemin çeper dirençleri karşılaştırılmalıdır. SLS ve ULS analizlerinden elde edilen maksimum değer ile kısmi faktör uygulanmış sürtünme değerlerinin karşılaştırma şeması Şekil 3.45'de verilmiştir. Kullanılacak

direnç değerleri çimento şerbeti-zemin ve çimento şerbeti-halat arasındaki değerin küçük olanı dikkate alınmalıdır. Bu değerler sahada yapılan farklı test çalışmaları ile belirlenebilir. Ankrajlara gelen yükün zemin tarafından karşılandığı düşünüldüğünde, karşımıza halatlarda meydana gelen akma ve kopma yükleri çıkacaktır. Bahsedilen bu durumlardan minimum yük değerine sahip olanı kısmi faktör uygulanarak tasarıma dahil edilir.



Şekil 3.44: Ankraj dirençleri:dış ve iç dirençleri.



Şekil 3.45: Ankraj tasarım hiyerarşisi.

Burada $P_{d,ULS}$ ve $P_{d,SLS}$ değerleri ULS ve SLS analiz sonuçlarından elde edilen yük değeridir.

P_d, iki analiz sonucundan elde edile maksimum yük değeridir.

$R_{a,k}$, zemin ile çimento şerbeti arasındaki dış direnç.

$R_{i,k}$ ankraj halatı ile çimento şerbeti arasındaki iç direnç.

$R_{t,k}$ ankraj halatının çekme kapasitesi.

γ_a: dirençlere uygulanacak kısmi faktördür. EN 1997-1'e göre 1,1 alınabilir.

$R_{a,k}$ değeri sahada yapılan test sonuçları neticesinde belirlenir.

$$R_{a,k} = \frac{P_p}{\xi_a} \tag{6.4}$$

ξ_a değeri için farklı değerler alınabilir. Bu değer düzeltme değeri olarak kullanılır ve uygulanan test adedine göre belirlenebilir.

Referans	ξ_a on measured resistance (R_{am})	Ankraj Test Adedi		
		1	2	> 2
ENV 1997-1[12]	mean ($R_{am,mean}$)	1.5	1.35	1.3
	minimum ($R_{am,min}$)	1.5	1.25	1.1
Designers' Guide[13]	mean ($R_{am,mean}$)	1.2	-	1.1
	minimum ($R_{am,min}$)	1.2	-	1.05
EN 1997-1				

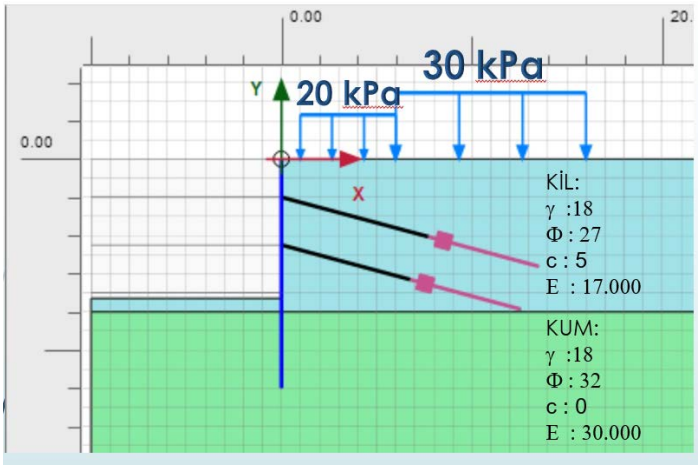
Şekil 3.46: Önerilen ξ_a değerleri.

4 BULGULAR

Bu çalışma kapsamında Plaxis'te kullanılacak kısmi faktörlerin sonuçlar üzerinde ne gibi etkileri olduğunu anlamak için bir adet örnek analiz çalışması yapılmıştır. Hazırlanan bu örnek analizlerde öncelikle kısmi faktörlerin hesaplamalara nasıl dahil edileceği, daha sonra uygulanan kısmi faktörlerin etkileri araştırılacaktır. Analizlerde SLS ve ULS durum için elde edilen sonuçlar şekiller ile gösterilmiş ve sonuçlar tablolar ile sunulmuştur. Analiz sonuçlarında karşılaştırma yapılırken, oluşan maksimum deplasman, düşey yapı elemanında oluşan normal kuvvet, kesme kuvveti ve momentler, halatta oluşan eksenel çekme kuvvetleri dikkate alınmış, oluşan plastik noktalar ve genel göçme güvenlik değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Daha sonra yapılan Eurocode -7 referans analizi yapılarak sonuçların doğruluğu kontrol edilmiş ve farklı dayanma yapıları ve koşullar için aynı problem tekrar analiz edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde elde dilen kesit tesirleri ve ankraj yüklerinin yeterliliği kontrol edilmiş, uygun görülmeyen sonuçlar çıkması durumunda analizler tekrarlanmıştır.

4.1 ÖRNEK ANALİZ

Bu örnekte 7 metrelik kazı için ankrajlı iksa sistemi modellenmiştir. Kazıklar 80 cm çapında 12 m boyunda, ankrajlar ise -2 m kotunda, 8 m serbest boy, 6 m kök boyu ve -4,5 m kotunda 7 m serbest boy, 6 m kök boyu olarak yatay ile 15^0 açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Dayanma yapısından 6 m uzaklıkta 30 kPa kalıcı bir yük ve 20 kPa geçici sürşarj yükü tanımlanmıştır. Zemin iki tabaka halinde modellenmiş ve tasarımda kullanılan malzeme özellikleri aşağıda tablolar halinde verilmiştir.



Şekil 4.1: Örnek-1 Plaxis modeli.

Bu çalışmada 4 farklı kısmi faktör ayrı ayrı uygulanmış ve toplam 6 adet analiz yapılmıştır. Kalıcı yüke uygulanan kısmi faktör yük etkisine uygulanarak ele alınmıştır. Bu çalışmada Tasarım Yaklaşımlarından çok uygulanacak kısmi faktörlerin nasıl programa dahil edilebileceği hususu üzerinde durulmuş ve ayrı ayrı olarak uygulanan kısmi faktörlerin sonuçlardaki değişimi incelenmiştir.

Tablo 4.1: Kazık özellikleri.

Kazık Çapı (m)	0,80 m
Kazık Uzunluğu (m)	12
Alan (m^2)	0,50
Elastisite Modulü (E)	30.000.000
EA	15E+6
EI	60E+4

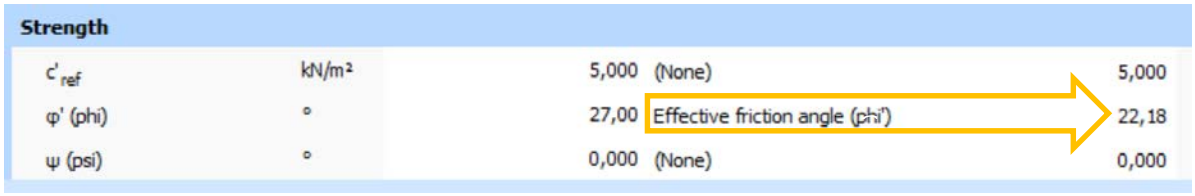
Tablo 4.2: Zemin malzeme özellikleri.

Zemin	Kil	Kum
Zemin Modeli	Hardening Soil	Hardening Soil
Drenaj Durumu	Drained	Drained
γ_{unsat}	18	18
γ_{sat}	19	20
E_{50}^{ref}	17E+3	30E+3
E_{eod}^{ref}	17E+3	30E+3
E_{ur}^{ref}	51E+3	90E+3
C	5	0
ϕ	27	32
ψ	0	2

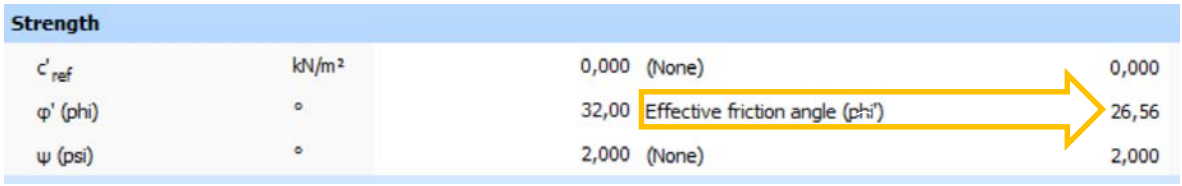
Tablo 4.3: Ankraj serbest ve kök bölgesinin uzunlukları.

Ankraj Kotu	Serbest Uzunluk	Kök Uzunluğu
-2	8	6
-4,50	7	6

Analizlerde öncelikle zemin kayma açısına uygulanan kısmi faktör dahil edilmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de kısmi faktörlerin analize dahil edilmesinden sonra zemin parametrelerindeki değişim verilmiştir.

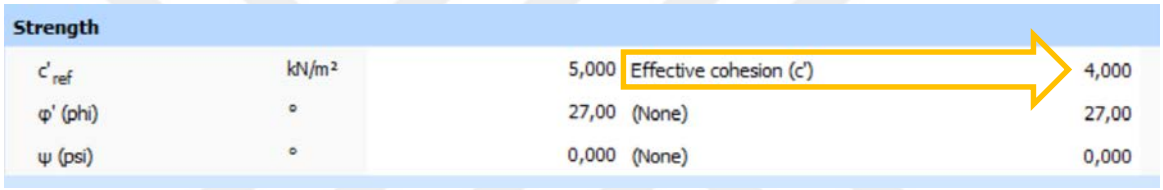


Şekil 4.2: Kil tabakasında, zemin kayma açısına uygulanan kısmi faktör.



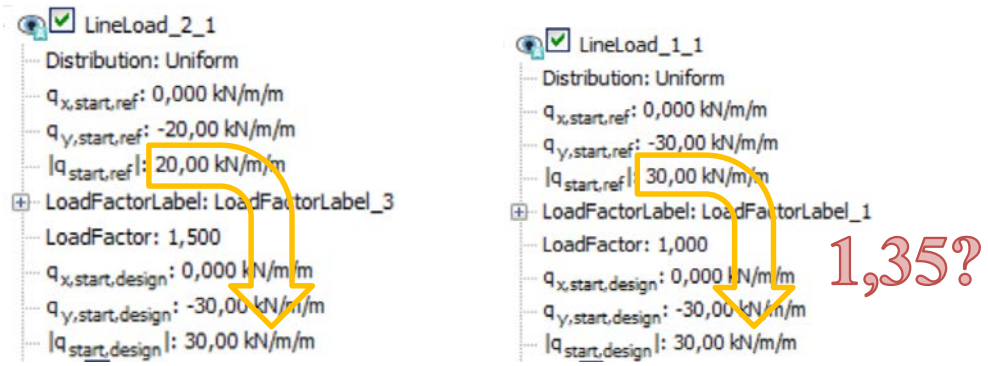
Şekil 4.3: Kum tabakasında zemin kayma açısına uygulanan kısmi faktör.

Analiz daha sonra kohezyona uygulanan kısmi faktör için koşturulmuştur. Kohezyon sadece kil zeminde mevcut olması nedeniyle kumda herhangi bir değişiklik olmamaktadır.



Şekil 4.4: Kil zeminde kohezyona uygulanan kısmi faktör.

Analize geçici ve kalıcı olmak üzere iki farklı yük durumu tanımlanmıştır. Plaxis programı hangi yükün kalıcı veya hangi yükün geçici olduğuna karar veremeyeceği için uygulanacak kısmi faktörler yüklerin aktif edilmesi aşamasında belirtilmelidir. Kalıcı yüklerde yük etkisine faktör uygulandığı için kısmi faktör 1,35 yerine 1 olarak alınmış ve hesaplamalara dahil edilmiştir.



Şekil 4.5: Geçici ve kalıcı yüke uygulanan kısmi faktör.

Sadece TY2'de zemin çeper sürtünmesine kısmi faktör uygulanmaktadır. Uygulanan kısmi faktörün sonuçlar üzerinde değişimini görmek için analize dahil edilmiştir. Uygulanan 1,1 kısmi faktörü sonucu meydana gelen değişim Şekil 4.6'da verimiştir.



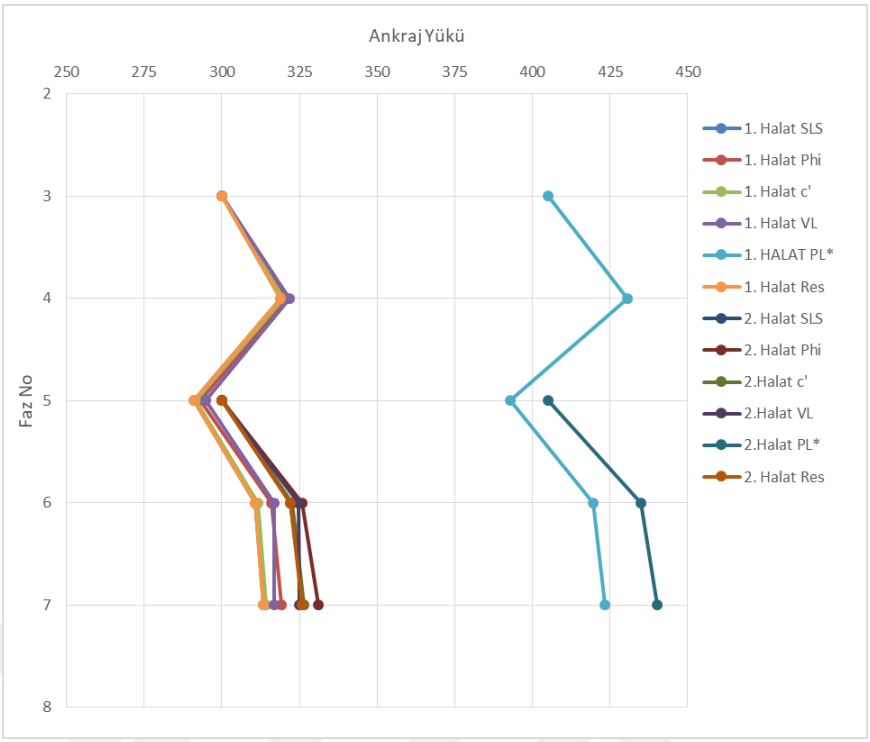
Şekil 4.6: Çeper sürtünmesine uygulanan kısmi faktör.

Tablo 4.4: Halatta oluşan maksimum kuvvetler.

Halat	Faz No	SLS	Phi	c'	VL	PL*	Res
1.Halat Serbest Bölgesi	3	300,00	300,00	300,00	300,00	300*1,35=405,00	300,00
	4	318,90	321,20	319,90	321,70	318,9*1,35=430,5	318,90
	5	291,00	293,00	291,60	294,70	291*1,35=392,85	291,00
	6	310,70	315,96	311,70	316,80	310,7*1,35=419,44	310,70
	7	313,50	319,30	314,40	317,00	313,5*1,35=423,22	313,50
2.Halat Serbest Bölgesi	5	300,00	300,00	300,00	300,00	300*1,35=405,00	300,00
	6	322,16	325,80	322,60	324,80	322,16*1,35=434,92	322,00
	7	326,14	331,00	326,50	325,00	326,14*1,35=440,28	326,00

Phi: zemin kayma açısına uygulanan kısmi faktör.
C: Zemin kohezyon değerine uygulanan kısmi faktör.
VL: Geçici sürşarj yüküne uygulanan kısmı faktör.
PL: kalıcı yüke uygulanan kısmi faktör.
Res: Ankraj çeper sürtünmesine uygulanan kısmi faktör.
Tablodaki değerler kN olarak verilmiştir.

Elde edilen ankraj yüklerine bakıldığında kalıcı yüke uygulanan kısmi faktör dışında büyük farklılıklar oluşmamaktadır. Şekil 4.7'de 2 halata gelen yükler birlikte verilmiş ve maksimum yük 2. Halatta kalıcı yüke kısmi faktör uygulanması durumunda elde edilmiştir. Oluşan bu büyük fark SLS analizi sonucu elde edilen değerlerin 1,35 yük etki faktörü ile çarpılması sonucu oluşmuştur.



Şekil 4.7: Ankraj halatlarında meydana gelen maksimum yükler.

Yapılan analizler sonucunda hesaplanan ankraj kuvvetleri ile ankrajların kapasitesi karşılaştırılmalıdır. Bu durum için yukarıda bahsedilen zemin-halat sürtünme değerleri ile halat akma dayanımı için tasarımın yeterliliği kontrol edilmelidir.

Ankraj halatları için 3 adet 0,6 inç halat düşünülmüştür. 0,6" halatın kopma mukavemeti 260 kN'dur. Bir halatın kapasitesi, kopma mukavemetinin %80'i olduğunu düşünürsek bir halatın çekme dayanımı 208 kN'dur. 3 halat için bu değer 624 kN olarak hesaplanacaktır. Çeper sürtünmesinden elde edilen değerlere baktığımız zaman 1 m kök bölgesinin taşıma kapasitesi 80 kN'dur. 6 m kök bölgesi için bu değer 480 kN yapacaktır. 2 koşula bakıldığı zaman kritik olan durum halat ile zemin arasındaki sürtünme değeridir. SLS analizlerden elde edilen maksimum yük 326 kN'dur. Phi, c', VL analizlerinde elde edilen maksimum değer 331 kN'dur.

SLS : 480 kN > 326 kN (yeterlidir.)

Kalıcı yüke (PL*) uygulanan kısmi faktörden elde edilen maksimum ankraj yükü 440 kN'dur. Kalıcı yüke kısmi faktör uygulayan Tasarım Yaklaşımları, diğer Tasarım Yaklaşımlarından daha kritik olmaktadır.

PL* : 480 kN > 440 kN (yeterlidir.)

Dirençlere uygulanan faktörde ankraj kök çeper sürtünmesine 1,1 oranında faktör uygulanmış ve 80 kN/m olan çeper sürtünme değeri 72,7 kN/m değerine düşmektedir. 72,7*6 =436,2 kN değeri elde edilecektir. Dirence faktör uygulanması durumunda elde edilen maksimum yük 326 kN'dur.

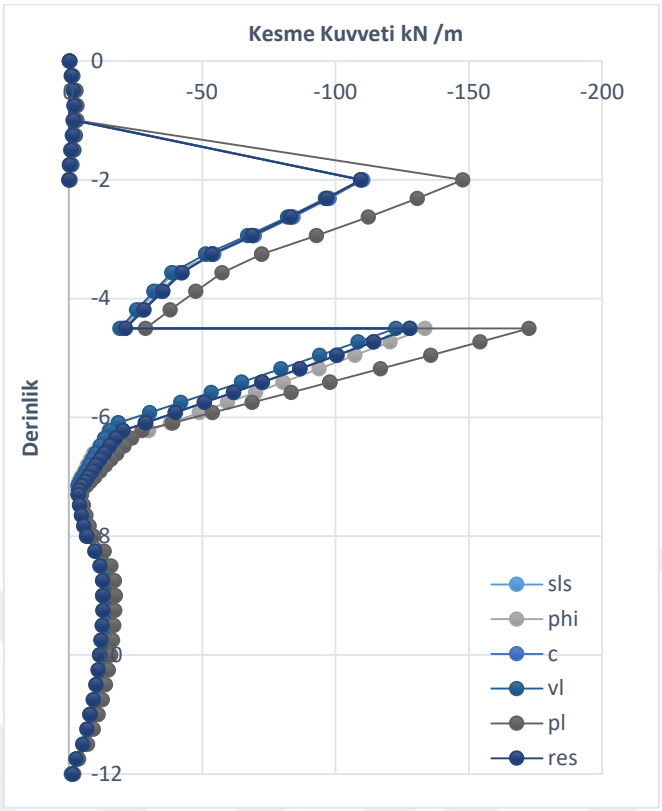
Res :436,2 kN > 326 kN (yeterlidir.)

Yapılan kontroller neticesinde ankraj adet ve çeper sürtünmesinin SLS ve ULS analizler için yeterli olduğu görülmüştür.

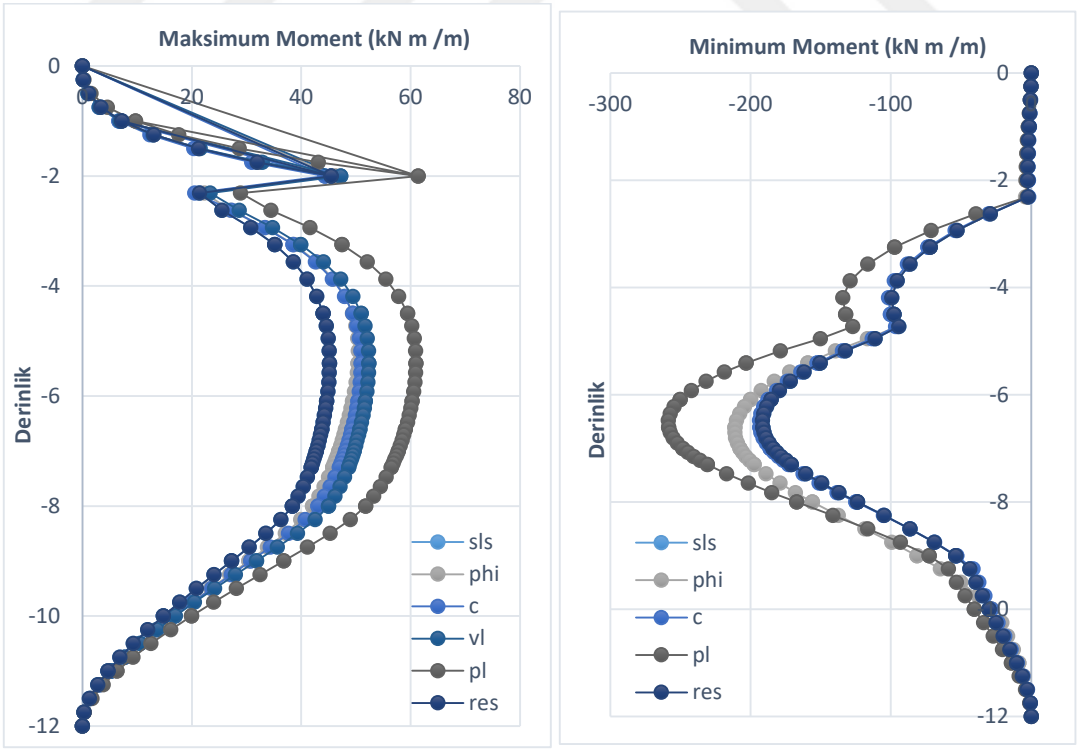
Kazıkta farklı fazlarda oluşan maksimum kesme ve moment değerleri Tablo 4.5'de verilmiştir. Elde edilen değerler daha sonra grafiklerle ifade edilmesi için derinlikle birlikte kesme kuvvetinin ve moment değerlerinin uygulanan kısmi faktörlere göre değişimi aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.5: Kazıkta oluşan moment ve kesme kuvvetleri.

Kuvvetler	Faz No	SLS	Phi	c'	VL	PL*	Res
Minimum Moment	1	-2,44	-3,92	-2,09	-4,00	-3,3	-2,44
	2	-2,44	-3,92	-2,09	-4,05	-3,3	-2,44
	3	-93,88	-85,15	-92,97	-81,24	-126,74	-93,88
	4	-99,46	-100,4	-101,6	-95,11	-134,27	-99,46
	5	-99,46	-100,4	-101,6	-95,11	-134,27	-99,46
	6	-166,5	-180,8	-169,7	-169,7	-224,75	-166,5
	7	-191,6	-211,2	-193,7	-171,0	-258,66	-191,6
Maksimum Kesme Kuvveti	1	3,9	3,77	4,1	-5,3	-5,26	3,9
	2	22,48	22,92	22,93	25,11	-30,34	22,48
	3	-85,37	-83,89	-85,74	-81,72	-115,25	-85,37
	4	-109,4	-110	-110,3	-109,6	-147,69	-109,4
	5	-109,4	-110	-110,3	-109,6	-147,69	-109,4
	6	-121,1	-125,7	-121,7	-122,3	-163,48	-121,1
	7	-127,8	-133,6	-128,1	-122,6	-172,53	-127,8



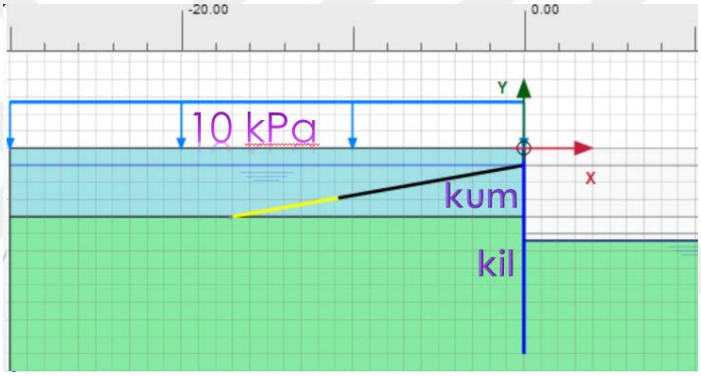
Şekil 4.8: Dayanma yapısında analiz sonucu derinlikle beraber meydana gelen kesme kuvvetleri.



Şekil 4.9: Dayanma yapısında analiz sonucu derinlikle beraber meydana gelen minimum ve maksimum moment grafikleri.

4.2 REFERANS ÖRNEĞİ

Bu örnekte, çalışmalarımızda örnek olarak kullanılması için Eurocode -7'den alınmış ve uygulanan analizler öncelikle tatbik edilmiş, sonuçların uygunluğu teyit edildikten sonra farklı Tasarım Yaklaşımları, farklı dayanma yapısı ve farklı yükler analizlere dahil edilerek tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar tablolar ve şekiller halinde verilmiştir. Problemin geometrisi Şekil 4.10'da ve malzeme özellikleri Tablo 4.6, Tablo 4.7 ve Tablo 4.8'de verilmiştir. Verilen örnekte 5 m kazı yapılacak ve ankraj kotu -1 olarak belirlenmiştir. Kazı taban kotu arasında 4m kazı vardır. Öngörülmeyen kazı 4x%10 ile 0,4 m olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Dayanma yapısının boyu örnek analizde verildiği için dayanma yapısının boyu ile ilgili hesaplamalar yapılmamıştır.



Şekil 4.10: Problem geometrisi.

Tablo 4.6: EC-7 Örneği zemin özellikleri.

Zemin Özellikleri	Birinci Tabaka	İkinci Tabaka
Zemin	Kum	Kil
Zemin Modeli	HS	HS
Drenaj Durumu	Drenajlı	Drenajlı
γ_{unsat}	18	20
γ_{sat}	20	20
E_{50}	20.000	12.000
E_{oed}	20.000	8.000
E_{ur}	60.000	36.000
m	0,5	0,8
c'_{ref}	1	5
ϕ'	35	24
ψ	0	0
k_x-k_y	1	0.001
K_o	0,67	0,67
R_{inter}	0,67	0,67

Tablo 4.7: Palplanş malzeme özellikleri.

EA (kN/m)	3,67 E6
EI (kNm^2/m	5 E4
w (kN/m/m)	1,4
Boy (m)	12

Tablo 4.8: Ankraj malzeme özellikleri.

Ankraj Rijitliği (kN/m)	16,5 E3
Serbest Boy (m)	11
Kök Boyu (m)	6,5
Ankraj Aralığı (m)	1
Uygulanan Öngerme (kN)	100

Problemde uygulanan fazları sırası ile aşağıda tanımlayabiliriz.

Faz 1: Duvar aktif hale getirilir. ULS analizlerde zemin özelliklerine kısmi faktörler bu aşamada uygulanır.

Faz 2: Sürşarj yükü aktif hale getirilir. Ankraj kotuna kadar (-1 m) kazı yapılır. ULS analizlerde uygulanan sürşarj yüklerine kısmi faktör uygulanır.

Faz 3: Ankraj aktif edilir ve 100 kN öngerme uygulanır. (Bu aşamada kök bölgesi embedded beam row olarak tanımlanmış ise TY2'de kısmi faktör uygulanabilir.)

Faz 4: -5 m kotuna kadar kazı yapılır. Su seviyesi -5 m kotuna düşürülür. (su kotu başlangıçta -1 olarak belirlenmiştir.

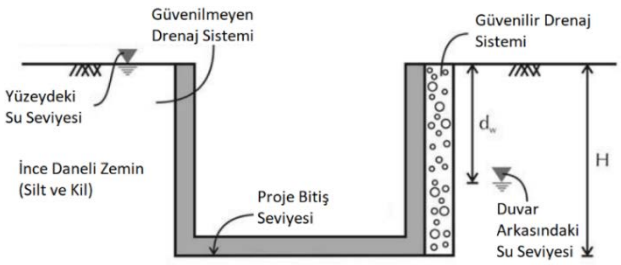
Faz 5: -5,40 m kotuna kadar kazı yapılır. Su seviyesi -5,40 m kotuna düşürülür.

Yukarıda yeraltı suyu -1m kotunda alınmıştır. Şimdi bu konuyu biraz inceleyeceğiz. Dayanma yapılarında su seviyesinin önemi büyüktür. EC-7 bu konuda tasarımcıya bazı tavsiyelerde bulunur. Eğer dayanma yapısı arkasındaki zemin permeabilitesi düşük veya normal ise drenaj durumuna bağlı olarak su seviyesini belirler. Zemin drenajı kötü ise su seviyesi yüzeye yakın yani $d_w=0$ olarak alınabilir. Şekil 4.11'in sol tarafı bunu ifade eder. İyi bir drenaj sistemi mevcut ise bu durumda su seviyesi yüzeyden aşağıda alınabilir yani $d_w>0$ olabilir. Fakat İngilizler uygulamalarından drenajsız durumda, EC-7 şartlarını muhafazakar buldukları için aşağıdaki şartları dikkate almıştır.

H<4 m d_w=H/4 (6.2)

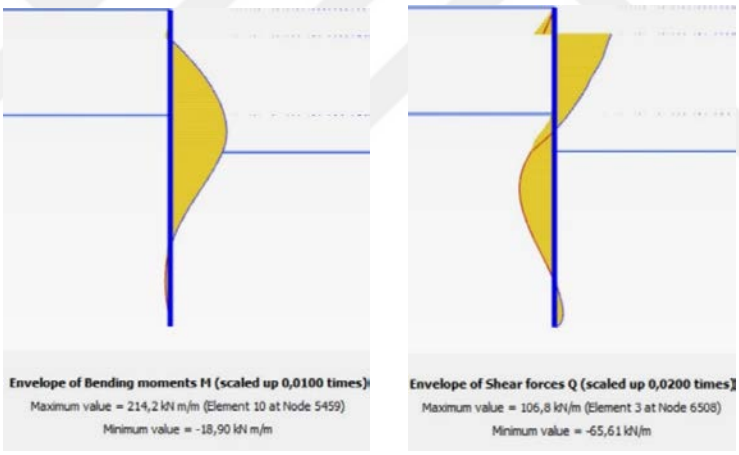
H>4 m d_w=1 m (6.3)

Çalışmamızda yukarıda (6.2) ve (6.3) eşitlikleri kullanılmıştır. Bu örnekte de su derinliği -1 m kotunda alındığını da tekrardan belirtelim.

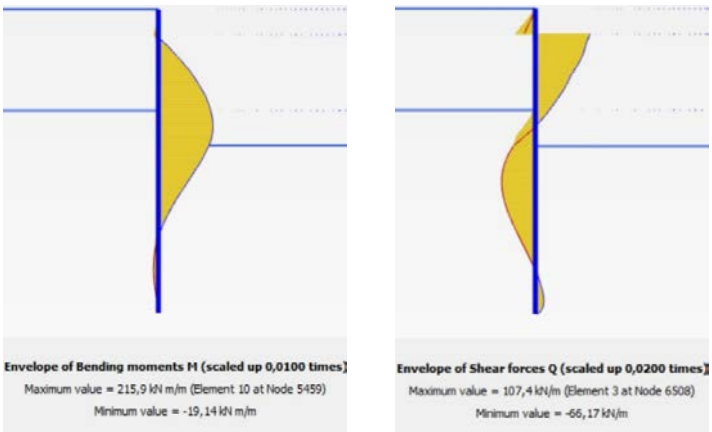


Şekil 4.11: ULS analizlerde su seviyesinin belirlenmesi.

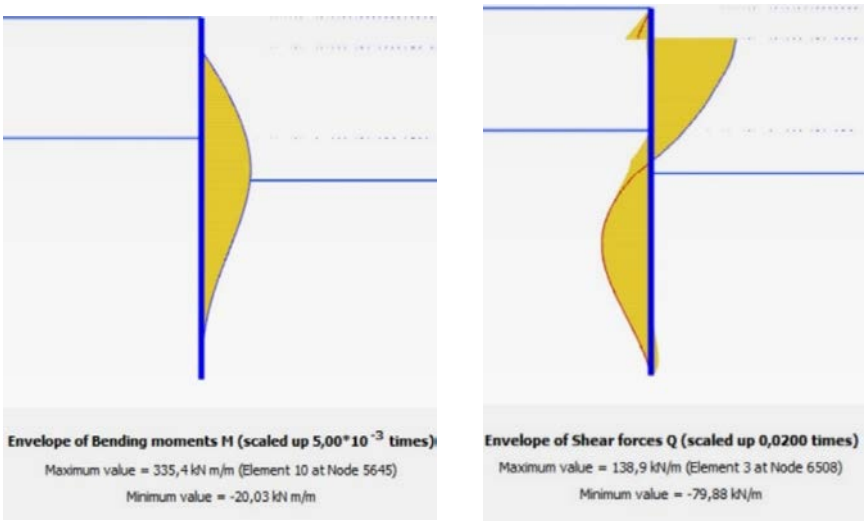
Yapılan analiz neticesinde elde edilen kesit tesirleri Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de ve sonuçlar Tablo 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.12: SLS analizde 5. fazda oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri.



Şekil 4.13: TY1-K1 ve TY2 analizde 5. fazda oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri.



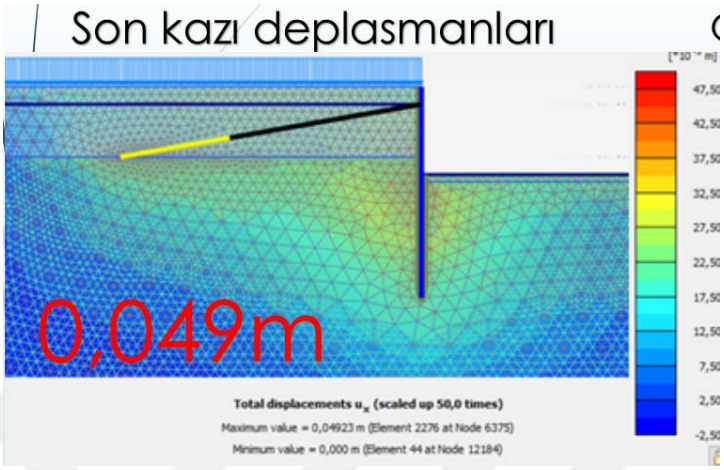
Şekil 4.14: TY1-K2 ve TY3 analizde 5. fazda oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri.

Tablo 4.9: Analiz sonucunda elde edilen değerler.

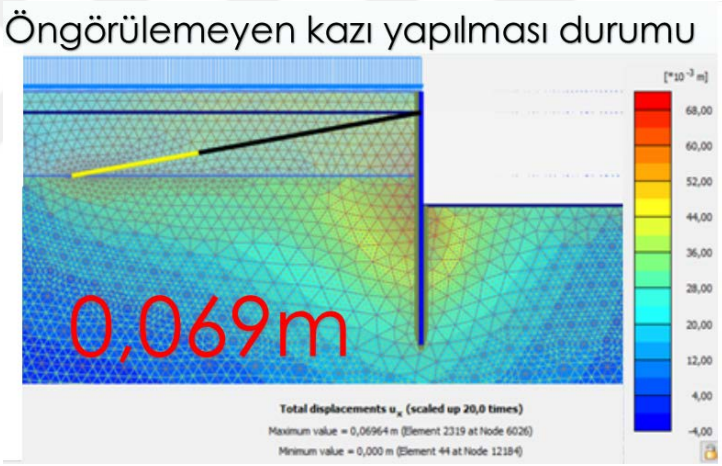
FAZ	Uygulanan Tasarım Yaklaşımı	Deplasmanlar		Max Ankraj Yükü	Max Moment	Max Kesme Kuvveti
		Ux (mm)	Uy (mm)	(kN)	(kN m/m)	(kN/m)
FAZ 3	SLS	-12	-16	100	35	60
	TY1 K1	-12	-18	135	45	81
	TY1 K2	-10	-22	100	28	57
	TY2*	-12	-18	135	45	81
	TY3	-10	-22	100	28	57
FAZ 4	SLS	50	-40	120	173	97
	TY1 K1	50	-41	163	235	131
	TY1 K2	100	-86	144	254	119
	TY2*	50	-41	163	235	131
	TY3	100	-86	144	254	119
FAZ 5	SLS	70	-53	130	214	107
	TY1 K1	71	-57	177	292	144
	TY1 K2	160	-128	163	335	139
	TY2*	71	-57	177	292	144
	TY3	160	-128	163	335	139

SLS analizinde planlanmamış kazı yapılması analizlere dahil edilmez. Fakat ULS analizlerin sonuçlarının karşılaştırılması için SLS analizinin 5. Fazı olarak öngörülmeyen kazı da modellenmiştir.

Buna bağlı olarak SLS 4. Fazda oluşan yatay deplasman değeri 49 mm iken 5. Fazda elde edilen deplasman değeri 69 mm dir. 0,4 m ekstra kazı yapılması durumunda deplasmanların 20 mm arttığı görülmüştür. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da elde edilen deplasman değerleri verilmiştir.



Şekil 4.15: SLS analizinde elde edilen deplasman değerleri.



Şekil 4.16: SLS analizinde öngörülmeyen kazı yapılması durumu.

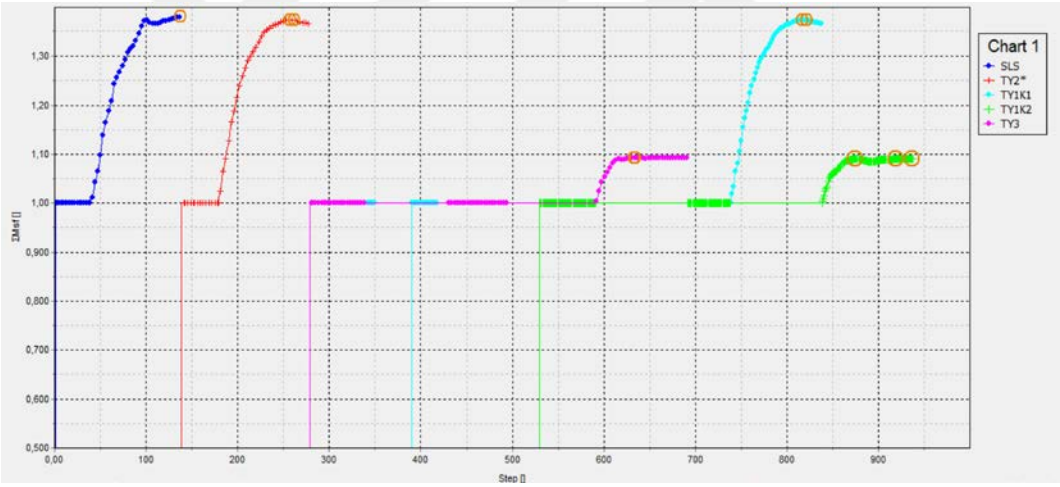
Tasarım Yaklaşımlarının uygulandığı analizlerde sistemin göçmeye ulaşıp ulaşmayacağı kontrol edilmelidir. Bu durumda TY1 K1 ve TY2* hariç sonlu elemanlarla analizler yapılabilir. Fakat TY1 K1 ve TY2* için yük etkisine faktör uygulandığı için güvenlik sayısına herhangi bir etkisi olmayacaktır. Buna ek olarak TY2*'de dayanma yapısı önündeki pasif toprak basıncına 1,4 kısmi faktör uygulanarak dayanma yapısı önündeki toprak direnci azaltılamamaktadır. Sonlu elemanlarda bu durumlara müdahale edemediğimiz için güvenlik sınırı olarak belirlenen 1,00 değeri arttırılmalıdır. TY1 K1 için bu değer yük etkisi oranında 1x1,35=1,35 olarak TY2* için ise pasif toprak direnci ve yük etkisi dikkate alınarak 1,4x1,35x1=1,89 olarak hesaplar kontrol edilebilir. Tablo 4.10'da verilen güvenlik sayılarına bakıldığında SLS, TY1K1 ve TY2*

arasında büyük farklılıklar olmadığı görülebilir. Oluşan farklılık geçici sürşarj yüküne uygulana 1,11 faktöründen kaynaklanmaktadır.

Sonlu elemanlar ile bu çalışmanın yapılması birçok belirsizlik meydana getirmektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar ile analiz yapılmadan önce limit denge analizi yapılarak yeterli güvenlik sağlanmalı daha sonra sonlu elemanlara geçilerek deplasman şartları kontrol edilmelidir.

Tablo 4.10: Uygulanan Tasarım Yaklaşımlarına göre elde edilen güvenlik sayıları.

Uygulanan Tasarım Yaklaşımı	Güvenlik Sayısı
SLS	1,38
TY1 K1	1,37
TY1 K2	1,09
TY2*	1,37
TY3	1,09



Şekil 4.17: Safety analiz sonuçları.

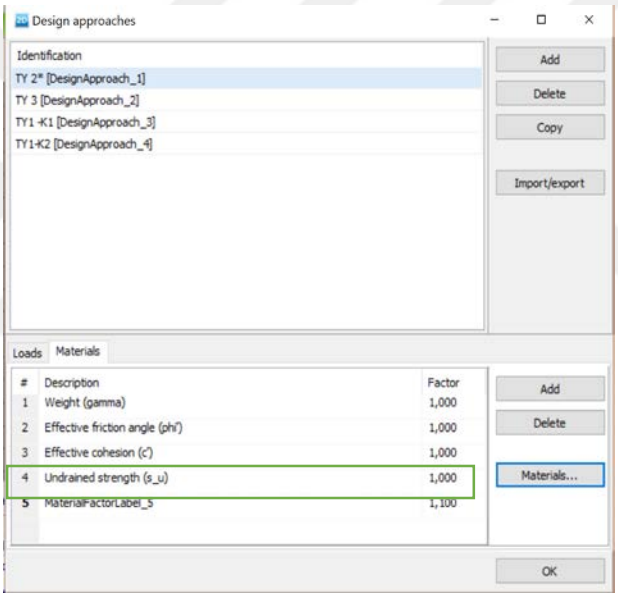
4.2.1 Yeraltı Suyu İhmal Edilerek Yapılan Analiz

EC-7 analizinde kullanılan geometri ve model daha sonra kök bölgesi embedded beam olarak modellenmiş ve mevcut yeraltı suyu ile analizler yapılmıştır. Elde edilen değerlerde büyük farklılıklar oluşmadığı görülmüş ve yeraltı suyu kaldırılarak analizler tekrar edilmiştir. Kök bölgesinin embedded olarak modellenmesi bize ankraj çeper sürtünmesine uygulanacak 1,1 büyüklüğünde kısmi faktörü kullanabilmemize imkan sağlar.

Bu nedenle çalışmalarımızın devamında kök bölgesi embedded beam olarak modellenecektir. Kullanılacak embedded beam özellikleri Tablo 4.11'de ve Tasarım Yaklaşımına eklenen kısmi faktör Şekil 4.18'de verilmiştir.

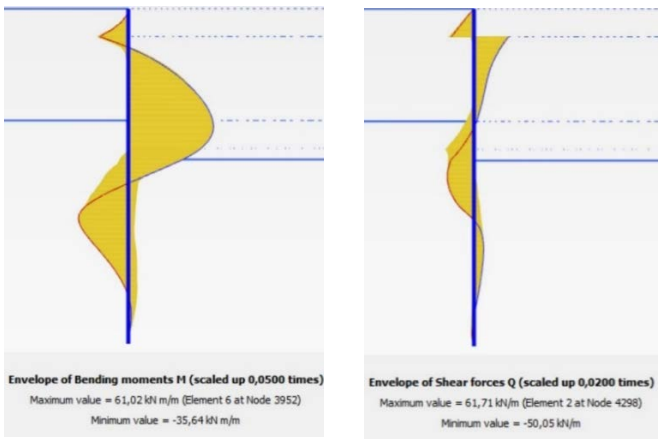
Tablo 4.11: Geogrid yerine tanımlanan Embedded beam row malzeme özellikleri.

E	10E+6
D (m)	0,14
Ankraj Aralığı (m)	1
$T_{skin\ start\text{-}end}$	70

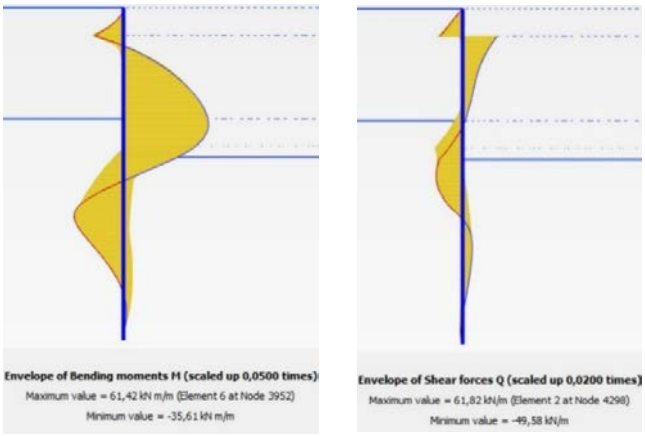


Şekil 4.18: Ankraj çeper sürtünmesine uygulanacak kısmi faktörün TY2'ye eklenmesi.

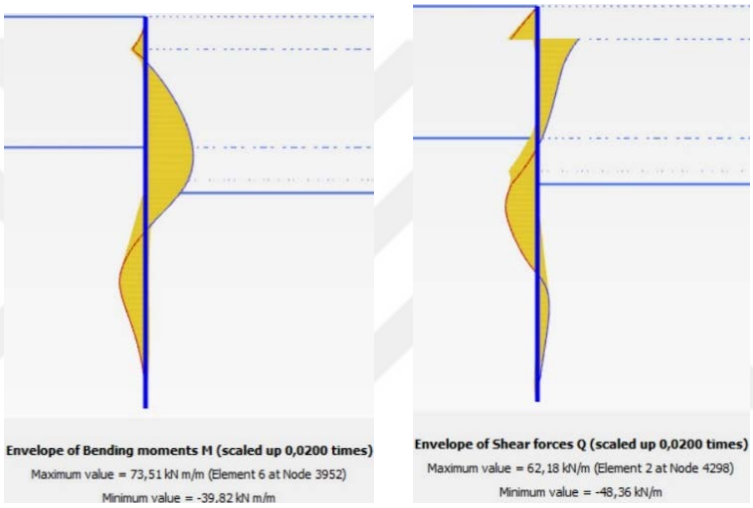
Analiz sonucunda elde edilen kesit tesirleri Şekil 419, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.19: SLS analizde oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri.



Şekil 4.20: TY1-K1 ve TY2* analizde oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri.



Şekil 4.21: TY1-K2 ve TY3 analizde oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri.

Tablo 4.12: Yeraltı suyu ihmal edilerek tekrarlanan analiz sonuçlar.

FAZ	Uygulanan Tasarım Yaklaşımı	Maksimum Ankraj Yükü	Maksimum Moment	Maksimum Kesme Kuvveti	Maksimum Normal Kuvvet
		(kN)	(kN m/m)	(kN/m)	(kN/m)
3	SLS	100	18,65	54,46	17,88
4		101,94	56,00	61,71	63,92
5		102,58	61,02	61,71	67,70
3	TY1 K1 TY2*	135	25,51	73,62	23,85
4		137,6	76	83,45	76
5		138,5	82,91	83,45	97,2
3	TY1 K2 TY3	100	18,84	54,25	18,42
4		102,89	63,32	61,64	64,60
5		103,86	73,51	62,18	72,07

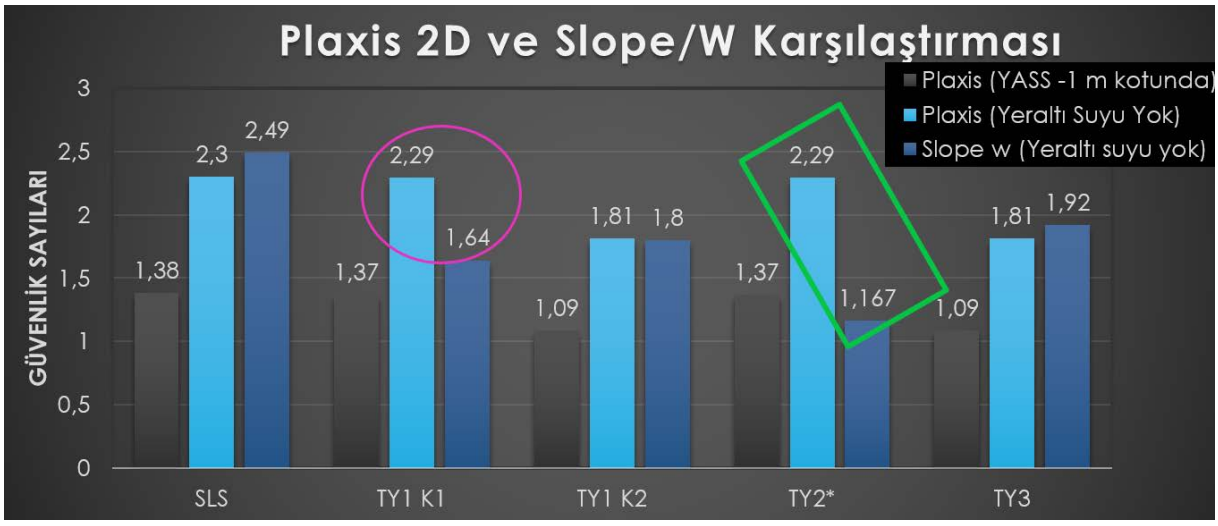
Tablo 4.13: Yeraltı suyu bulunmayan analizlerde elde edilen güvenlik sayıları.

Uygulanan Tasarım Yaklaşımı	Güvenlik Sayısı
SLS	2,30
TY1 K1	2,29
TY1 K2	1,81
TY2*	2,29
TY3	1,81

Suyun sonuçlar üzerindeki etkisini görmek için son kademedeki değerler ve güvenlik sayılarına bakabiliriz. Yeraltı suyunun bulunduğu Plaxis 2D ve yeraltı suyunun ihmal edildiği Plaxis 2D ve Slope/W analiz sonuçları Şekil 4.22'de verilmiştir.

Tablo 4.14: Yeraltı suyunun bağlı olarak oluşan maksimum yükler.

Uygulanan Tasarım Yaklaşımı	Yeraltı suyu -1m kotunda			Yeraltı suyu yok		
	Max Ankraj Yükü (kN)	Max Moment (kNm)	Max Kesme Kuvveti (kN)	Max Ankraj Yükü (kN)	Max Moment (kNm)	Max Kesme Kuvveti (kN)
SLS	130	214	107	102	61	61,7
TY1 K1	177	292	144	138	82,9	83,4
TY1 K2	163	335	139	103	73,5	62,1
TY2*	177	292	144	138	82,9	83,4
TY3	163	335	139	103	73,5	62,1



Şekil 4.22: Plaxis ve Slope/W ile yapılan güvenlik analizleri.

Elde edilen analiz sonuçlarına bakıldığında minimum güvenlik yeraltı suyunun bulunduğu Plaxis 2D analizlerinde elde edilmiştir. Fakat yeraltı suyunun bulunmadığı analizlere

bakıldığında elde edilen minimum güvenlik sayılarında program arasında farklılıklar görülmektedir.

Bu farklılıklar Slope/W ile Plaxis'de kısmi faktörlerinin analize dahil edilmesinden kaynaklanmaktadır. Slope/W kalıcı yük durumuna ve pasif toprak basıncına kısmi faktör uygulayabilirken Plaxis bu konuda yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle kalıcı yüke faktör uygulanmayan SLS, TY1 K2 ve TY3 analizlerinde sonuçlar arasında büyük farklılıklar olmadığı görülmektedir. Plaxis 2D'de kalıcı yüke uygulanacak faktör güvenlik analiz sonucu elde edilen değere uygulanacak olursa TY1 K1'de 2,29 olan değer 1,69 olarak elde edilir. Slope/W'da ise bu değer 1,64 olarak hesaplanmıştır. TY 2'de ise kalıcı yüke uygulanan 1,35 ve pasif toprak basıncına uygulanan 1,4 kısmi faktör Plaxis 2D için elde edilen değere uygulanırsa 2,29/(1,35*1,4)=1,21 olarak güvenlik sayısını elde edebiliriz. Bu değer Slope/W'da elde edilen 1,16 değeri ile yakınlık göstermektedir.

4.2.2 Fore Kazık Analizleri

Bu bölümde farklı kazık çap ve kazık aralıkları için analizler yapılmış, SLS analiz ile belirlenen kesit tesirleri ile ULS analiz sonuçlarına göre belirlenen kesitlerin yeterliliği kontrol edilmiştir. Elde edilen kesme kuvvetleri için beton kesme dayanımının yeterliliği kontrol edilmiş ve olumsuz bir durum ile karşılaşılmamıştır. Gerekli donatı hesabı için ise SLS ve ULS analiz sonuçları için minimum donatı miktarının yeterli olduğu görülmüştür. Tablolarda, TY1 K1 ve TY2 için verilen sonuçlar, analiz sonucunda elde edilen değerlerin 1,35 olan yük etki katsayısı ile çarpılmış halidir.

Bu bölümde kullanılacak kazıkların özellikleri Slope/W için Tablo 4.15'de Plaxis 2D için Tablo 4.16'da verilmiştir. Slope/W ile yapılan analiz sonuçlarıdan elde edilen güvenlik sayıları da Tablo 4.15'de verilmiştir. elde edilen değerlere bakıldığında kazık kesme dayanımları arttıkça güvenlik sayısının arttığı ve belli bir değerden sonra artış olmadığı görülmektedir. Kazık aralıklarına bağlı olarak da güvenlik sayılarında artış ve azalış meydana gelmektedir.

Tablo 4.15: Slope/W ile yapılan farklı ebatlardaki kazık güvenlik analizleri.

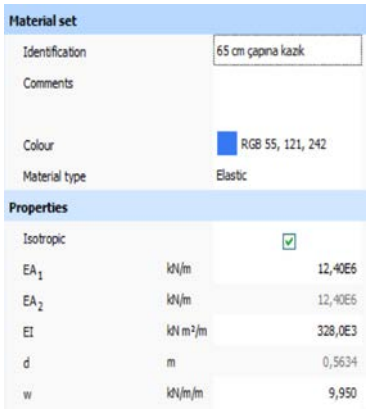
Slope/W Fore Kazık Güvenlik Analizleri							
	100 kN 0,5 m ara ile	100 kN 1 m ara ile	100 kN 2 m ara ile	215 kN 0,8 m ara ile	300 kN 1 m ara ile	500 kN 1 m ara ile	500 kN 1,2 m ara ile
SLS	3,13	2,65	1,97	3,13	3,13	3,13	3,13
TY1 K1	2,41	1,75	1,25	2,41	2,41	2,41	2,41
TY1 K2	2,55	1,89	1,34	2,55	2,55	2,55	2,55
TY2	1,72	1,24	0,89	1,72	1,72	1,72	1,72
TY3	2,56	2,03	1,53	2,56	2,56	2,56	2,56

Tablo 4.16: Plaxis programında kullanılacak kazık özellikleri.

Analiz No	**1**	**2**	**3**	**4**
d	0,65	0,80	1,00	1,00
A	0,33	0,50	0,79	0,79
s	0,8	1	1	1,2
w	9,95	12,06	18,85	15,71
EA	1,24E+07	1,50E+07	2,35E+07	1,96E+07
EI	3,28E+05	6,00E+05	1,47E+06	1,22E+06

Analiz 1(65 cm çapında 80 cm ara ile)

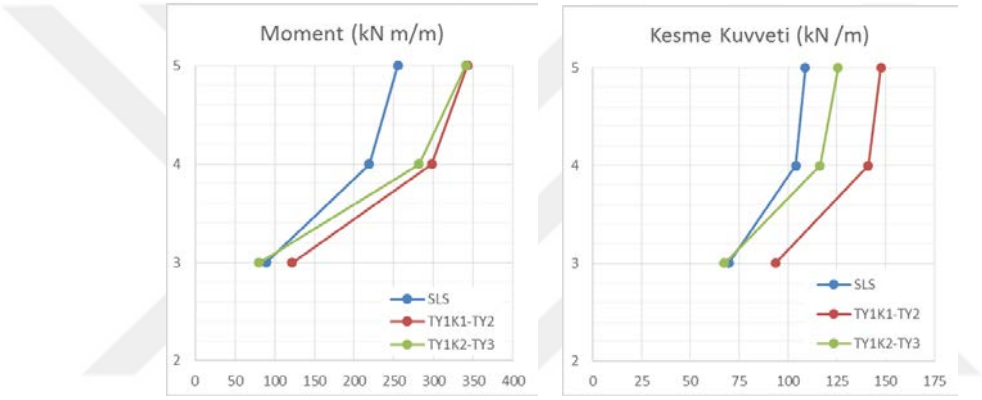
65 cm çapında 80 cm aralıklı kazıklar modellenmiştir. Buna bağlı olarak yeraltı su seviyesi kazı kademeleri ile birlikte düşürülmüştür.



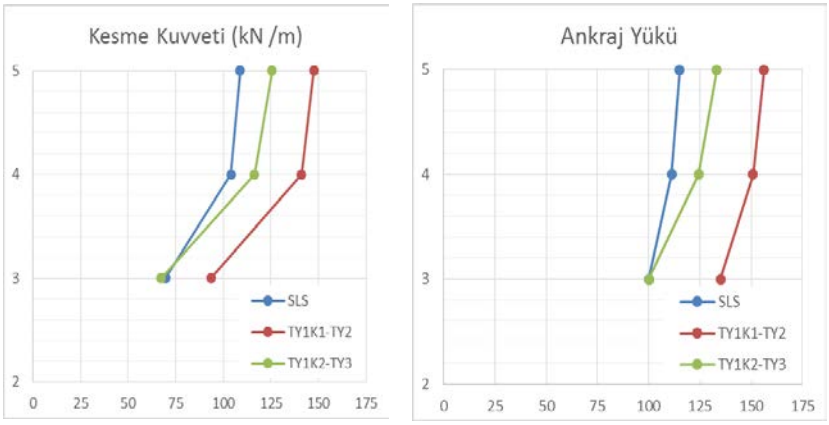
Şekil 4.23: Analize giren Ø65 cm çapındaki kazık özellikleri.

Tablo 4.167: Ø65 cm çapında kazık ile yapılan analizlerden elde edilen kesit tesirleri.

Kullanılan Tasarım Yaklaşımı	Faz No	Moment	Kesme Kuvveti	Normal Kuvvet	Ankraj Yükü
SLS	3	89,4	69,7	45,4	100,0
	4	218,9	104,0	145,3	111,2
	5	255,2	108,7	152,7	115,0
TY1 K1 TY2	3	122,2	93,5	64,6	135,0
	4	297,6	141,0	197,6	151,0
	5	342,6	147,5	207,5	156,2
TY1 K2 TY3	3	80,2	67,4	53,3	100,0
	4	281,4	116,3	139,8	124,3
	5	340,6	125,5	146,0	133,3



Şekil 4.24: Ø65 cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No-Moment ve Faz No-Kesme Kuvvet grafikleri.



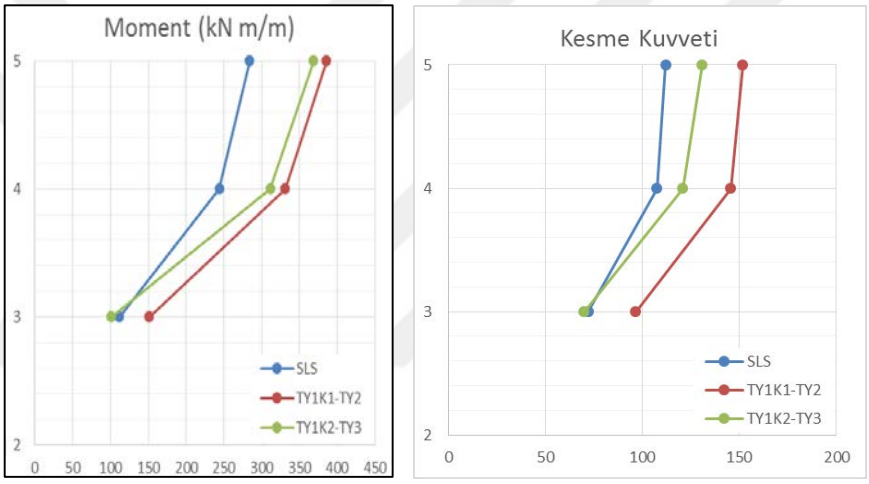
Şekil 4.25: Ø65 cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No- Normal Kuvvet ve Faz No-Ankraj Yük grafikleri.

Analiz 2 (80 cm çapında 100 cm ara ile)

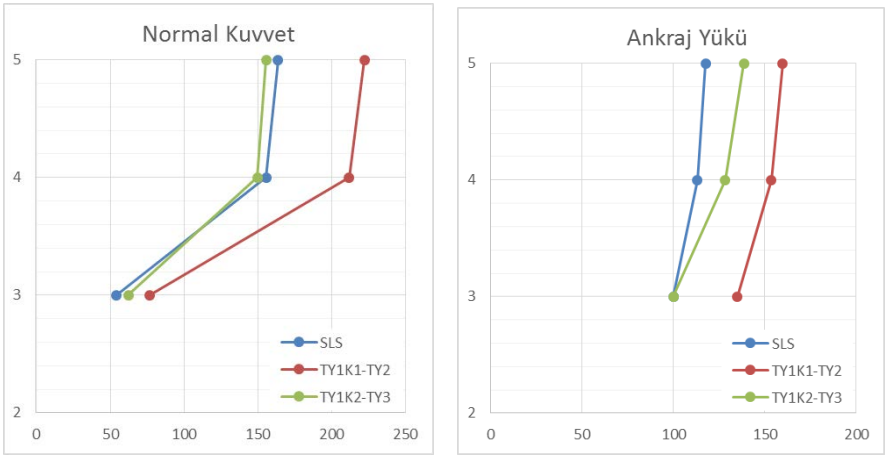
Analize 80 cm çapında 100 cm aralıklarla kazıklar modellenmiştir. Yapılan analiz daha sonra yeraltı suyunun bulunmadığı ve HS zemin modeli yerine MC zemin modeli seçilerek tekrarlanmıştır.

Tablo 4.178: Ø80 cm çapında kazık ile yapılan analizlerden elde edilen kesit tesirleri.

Kullanılan Tasarım Yaklaşımı	Faz No	Moment	Kesme Kuvveti	Normal Kuvvet	Ankraj Yükü
SLS	3	111,6	72,0	54,2	100,0
	4	243,9	107,4	155,8	113,2
	5	283,8	112,0	163,8	117,5
TY1 K1 TY2*	3	151,3	96,5	76,8	135,0
	4	331,1	145,5	211,8	153,5
	5	385,5	151,8	222,3	159,7
TY1 K2 TY3	3	100,9	69,9	62,4	100,0
	4	311,5	120,7	149,7	128,4
	5	368,8	130,9	155,7	138,6
Not: Yapılan TY1K1 ve TY2 analizlerinde elde edilen değerlerin 1,35 ile çarpılmış halleri verilmiştir.					



Şekil 4.26: Ø80 cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No- Moment ve Faz No-Kesme Kuvvet grafikleri.



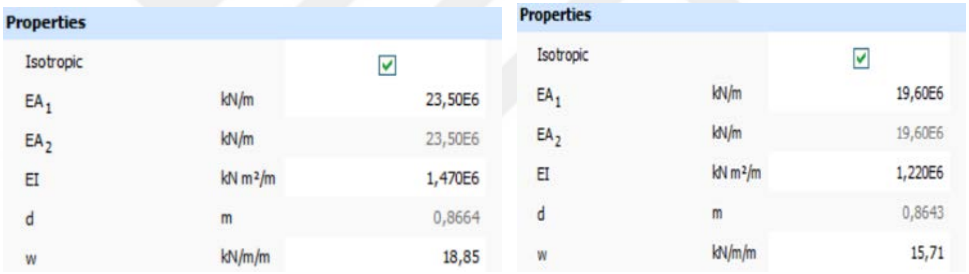
Şekil 4.27: Ø80 cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No- Normal Kuvvet ve Faz No-Ankraj Yük grafikleri.

Tablo 4.189: Farklı zemin modeli ve yeraltı suyu için yapılan analiz sonuçları.

Zemin Modeli	Yeraltı Suyu	Faz No	Moment	Kesme Kuvveti	Normal Kuvvet	Ankraj Yükü
HS	YOK	SLS	216, 4	101,9	128,3	109,3
		TY1-K1/ TY2	293,9	137,5	173,4	147,8
		TY1-K2/TY3	259,4	110,3	131,4	118,5
MC	YOK	SLS	174,3	97,7	135,7	105,6
		TY1-K1/TY2	237,6	132,1	186,8	142,5
		TY1-K2/TY3	198,9	99,5	132,9	107,4
HS	VAR	SLS	283,8	112,0	163,8	117,5
		TY1-K1/TY2	385,5	151,8	222,3	159,7
		TY1-K2/TY3	368,8	130,9	155,7	138,6
Not: HS model yeraltı suyunun mevcut analiz sonuçları doğrudan yapılan analizlerden alınmış ve 1,35 çarpanı uygulanmıştır.						

Analiz 3 (100 cm çapında fore kazık)

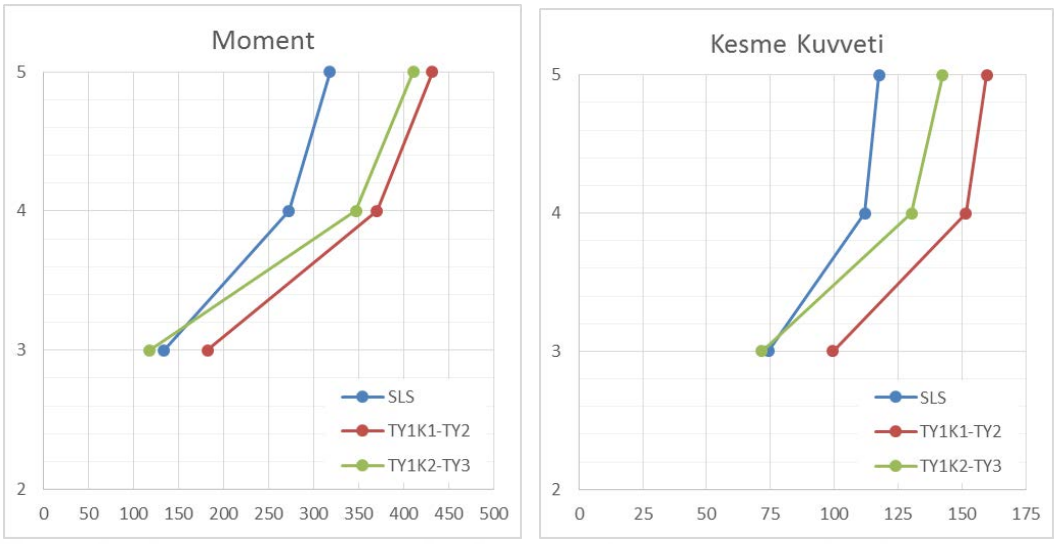
Analizde 100 cm çapında 100 cm ara ile kazıklar modellenmiş ve analiz edilmiştir. Analizde kullanılan kazık özellikleri Şekil 4.27'de verilmiştir. Analiz daha sonra kazık aralıkları açılarak tekrarlanmıştır.



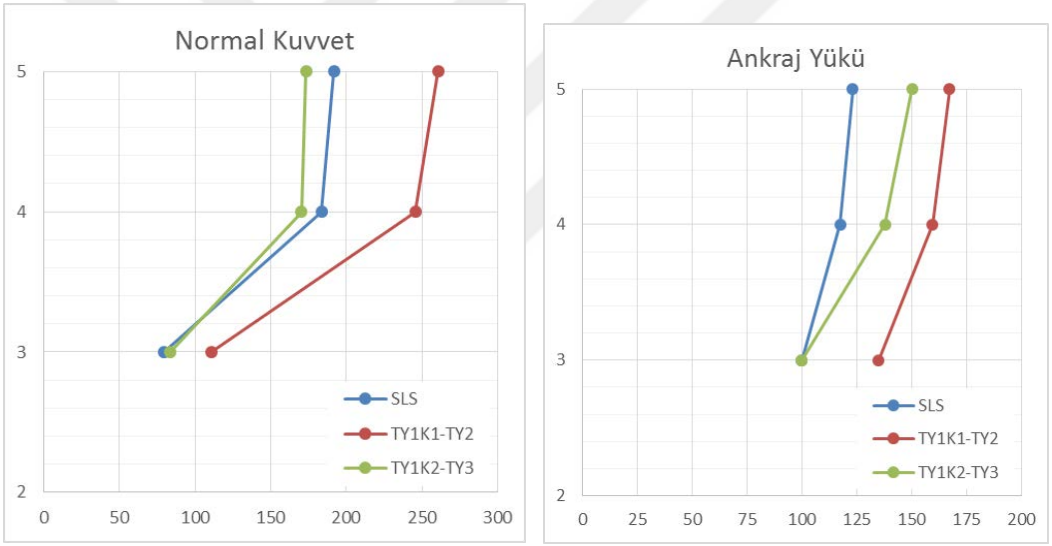
Şekil 4.28: Sırasıyla 100 cm ve 120 cm ara ile yapılan kazıkların özellikleri.

Tablo 4.20: Ø100 cm çapında kazık ile yapılan analizlerden elde edilen kesit tesirleri.

Kullanılan Tasarım Yaklaşımı	Faz No	Moment	Kesme Kuvveti	Normal Kuvvet	Ankraj Yükü
SLS	3	133,8	74,1	79,6	100,0
	4	272,6	111,9	183,6	117,4
	5	317,6	117,6	192,0	123,0
TY1 K1 TY2	3	182,1	99,5	111,2	135,0
	4	369,9	151,6	245,7	159,4
	5	431,3	159,7	260,9	167,2
TY1 K2 TY3	3	117,8	71,7	83,6	100,0
	4	347,1	130,2	170,4	137,9
	5	410,7	142,5	173,3	150,2



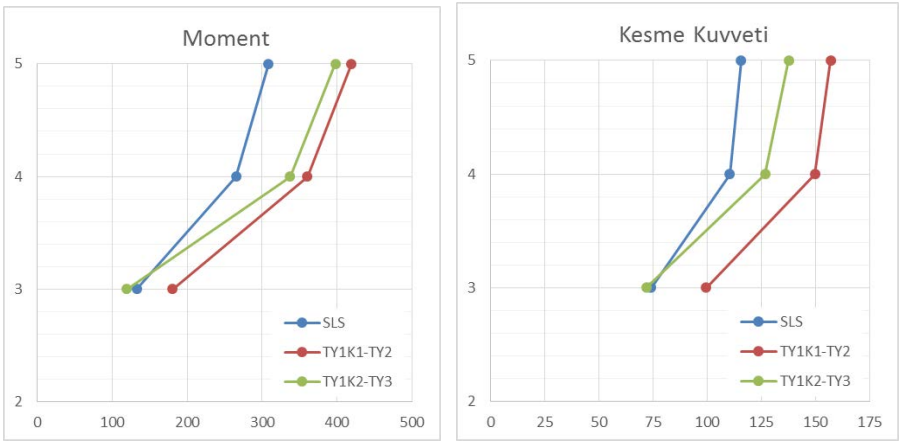
Şekil 4.29: Ø100cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No- Moment ve Faz No-Kesme Kuvvet grafikleri.



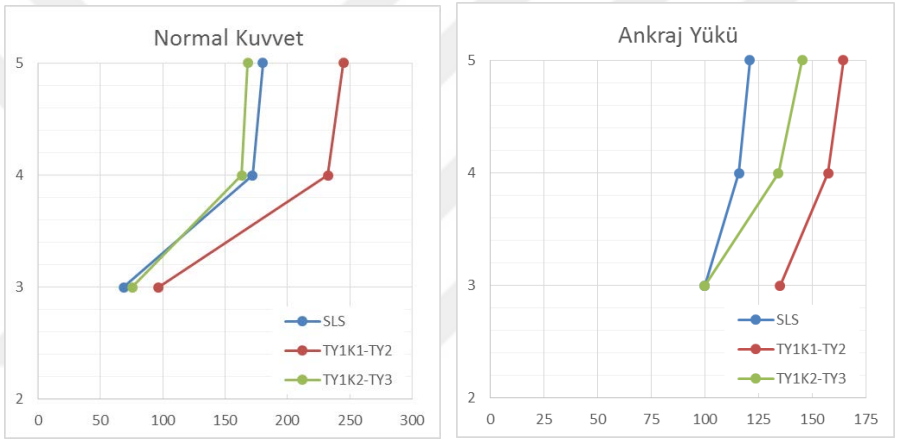
Şekil 4.30: Ø100 cm çapında fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No- Normal Kuvvet ve Faz No-Ankraj Yük grafikleri.

Tablo 4.19: Ø100 cm çapında 1,2 m ara ile yapılan kazık analizlerinden elde edilen kesit tesirleri.

Kullanılan Tasarım Yaklaşımı	Faz No	Moment	Kesme Kuvveti	Normal Kuvvet	Ankraj Yükü
SLS	3	132,8	74,0	68,49	100,0
	4	265,5	110,4	172,0	115,9
	5	308,5	115,6	180,3	121,0
TY1 K1 TY2	3	180,5	99,4	96,5	135,0
	4	360,4	149,6	232,5	157,4
	5	419,0	156,9	245,0	164,5
TY1 K2 TY3	3	119,8	71,7	75,48	100,0
	4	337,3	126,6	163,3	134,3
	5	397,9	137,6	168,2	145,3



Şekil 4.31: Ø100 cm çapında 120 cm ara ile imal edilen fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No- Moment ve Faz No-Kesme Kuvvet grafikleri.



Şekil 4.32: Ø100 cm çapında 120 cm ara ile imal edilen fore kazık için yapılan analiz sonucu elde edilen Faz No- Normal Kuvvet ve Faz No-Ankraj Yük grafikleri.

Kazık analiz sonuçları:

Dayanma yapısı olarak kullanılan betonarme kazık elemanlarının ve ankraj elemanlarının yeterliliği elde edilen analiz sonucunda kontrol edilmelidir. Bölüm başında seçilen betonarme kesitinin ve minimum donatının yeterli olduğu belirtmişti. Bu bölümde ise ankraj elemanlarının yeterlikleri kontrol edilecektir. Kullanılan 0,5 inç halatın kopma mukavemeti 183 kN'dur. Ankraj halatının kapasitesi, kopma dayanımının %80'i olarak, ankraj kapasitesini belirleyen değer olacaktır. TY1 ve TY2'de ise bu değer uygulanacak 1,1'lik kısmi faktör ile tekrardan azaltılacaktır. Bu durumda TY3 için ankraj kapasitesi 146 kN, TY2 için ise 133 kN olacaktır. Programa girilen çeper sürtünme değeri ankraj kapasitesinden fazla olduğu için ankraj elemanlarına uygulanabilen yükte halatların kapasitesi belirli olacaktır. Aşağıda kazık analizleri sonucu elde edilen ankraj yükleri tablo halinde verilmiştir. Bunlara bağlı olarak ankraj halatının yeterliliği kontrol edilmiştir. Tabloda verilen sonuçlarda, en kritik durum olan 100 cm çapında

100 cm ara ile yapılan kazık için halat sayısı ikiye çıkarılarak ve 0,5 inç yerine 0,62 inç halat kullanılarak analizler tekrarlanmıştır.

2 Halat kullanılması durumunda ankraj kapasitesi 134x2=268 kN, 0,62 inç halat kullanımasın durumunda ankraj kapasitesi 201 kN olacaktır. Yeşil işaretlenen yük değerleri için ankraj kapasitesi yeterli görülmekte, pembe işaretli yük değerleri için ankrajların yetersiz olduğu belirtilmektedir.

Tablo 4.20: Kazık analizleri sonucu elde edilen ankraj yükleri.

Tasarım Yaklaşımı	Faz No	∅ 65 Kazık	∅ 80 Kazık	∅ 100 Kazık 100 cm ara ile	∅ 100 Kazık 120 cm ara ile
SLS	3	100	100	100	100
	4	111	113	117	115
	5	115	117	123	121
TY1 K1 TY2	3	135	135	135	135
	4	151	153	159	157
	5	156	159	167	164
TY1 K2	3	100	100	100	100
	4	124	128	137	134
	5	133	138	150	145
TY3	3	100	100	100	100
	4	124	128	137	134
	5	133	138	150	145

Tablo 4.21: Farklı ankraj kesit ve adetleri için elde edilen yük değerleri.

Tasarım Yaklaşımı	Faz No	0,5 inç Tek Halat	0,5 inç Çift Halat	0,62 inç Tek Halat
Ankraj Kapasitesi		134 kN	268 kN	201 kN
SLS	3	100	100	100
	4	117	126	121
	5	123	133	128
TY1 K1 TY2	3	135	135	135
	4	159	172	165
	5	167	181	174
TY1 K2	3	100	100	100
	4	137	149	143
	5	150	162	156
TY3	3	100	100	100
	4	137	149	143
	5	150	162	156

4.2.3 Diyafram Duvar Analizleri

Yapılan analizlere su geçirimsizliği sağlamak amacıyla palplanş kullanıldığı gibi, aynı görevi gören daha rijit bir yapı olan diyafram duvar için analizler yapılmıştır. Burada su seviyesi -1 kotunda tanımlanmış ve palplanşta olduğu gibi su seviyesi dayanma yapısının arkasından kazı kademesine düşürülmüştür. Analizler diyafram duvar uzunluğu 10 m, 12m ve 14 m olarak ayrı ayrı tanımlanmış ve çözülmüştür. Bu durumda SLS analizde oluşan deplasmanlara ve ULS analizlerinde 5. fazda oluşan kesit tesirlerine bakılmıştır.

Tablo 4.22: Plaxis programında kullanılacak diyafram duvar özellikleri.

Analiz No	1	2	3
d	0,6	0,6	0,6
A	0,6	0,6	0,6
I	0,018	0,018	0,018
w	15	15	15
EA	18E+6	18E+6	18E+6
EI	54E+4	54E+4	54E+4
L	10	12	14

Tablo 4.23: Farklı diyafram duvar kalınlık ve boyları için elde edilen analiz sonuçları.

Duvar Kalınlığı		60 cm		
Duvar Uzunluğu		10 m	12 m	14 m
Yatay Deplasman	SLS Ux (mm)	73	61	54
Düşey Deplasman	SLS Uy (mm)	-68	-52	-45
Ankraj Yükü	SLS	147	143	140
	TY1 K1 /TY2	201	194	191
	TY1 K2/ TY3	Göçtü	185	181
Moment	SLS	349	363	354
	TY1 K1 /TY2	471	494	479
	TY1 K2/ TY3	Göçtü	502	483
Kesme	SLS	141	137	135
	TY1 K1 /TY2	192	187	183
	TY1 K2/ TY3	Göçtü	176	172
Güvenlik Sayısı	SLS	1,17	1,32	1,44
	TY1 K1 /TY2	1,16	1,31	1,43
	TY1 K2/ TY3	Göçtü	1,05	1,15

5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Destekleme sistemlerindeki yükler, ankrajlar vasıtasıyla zemine aktarılan öngerme kuvvetleriyle karşılanmakta ve çok daha küçük kesitlerle büyük kuvvetler karşılanabilmektedir. Tasarlanan ankrajlı iksa sistemi, imalat sırasında ve imalat tamamlandıktan sonraki kullanım ömrü boyunca tasarımcı tarafından belirlenen hizmet görebilirlik sınır şartlarını sağlamalıdır. Fakat ülkemizde dayanma yapılarında son yıllarda meydana gelen göçme vakalarında önemli bir artış görülmektedir. Can ve mal kayıplarına neden olan bu göçmeler, yapılan tasarım ve imalatların sorgulanmasına neden olmuştur.

Bu çalışma kapsamında, ankrajlı iksa sisteminde, dünyaca kabul gören Eurocode-7 Tasarım Yaklaşımları, limit denge analiz programı Slope/W ve sonlu elemanlar programı Plaxis 2D kullanılarak, hizmet görebilirlik sınır durumu ve nihai sınır durumları incelenmiştir. Kısmi faktörler kullanılarak yükler arttırılmış, zemin parametreleri düşürülmüş ve dayanma yapısına destek olan pasif toprak basıncı azaltılmıştır. Bu bağlamda TY1-K1, TY1-K2, TY-2 ve TY-3 Tasarım Yaklaşımları sırasıyla analiz edilmiş elde edilen kesit tesirleri, ankraj yükleri ve güvenlik sayıları incelenmiştir.

Analizler öncelikle Slope/W ile yapılmış elde edilen güvenlik sayılarının kontrol edilmiştir. Plaxis 2D elverişli ve elverişsiz yük durumlarını ayrıt edemediği için kalıcı yüke uygulanacak 1,35 ve pasif toprak basıncına uygulanacak 1,4 kısmi faktörleri analize dahil edilemez. Slope/W ise elverişli ve elverişsiz yük durumunu tanımlayabilmekte, kalıcı yüklerine ve pasif toprak basınç kısmi faktörlerini doğrudan uygulayabilmektedir. Bu nedenle sistemin yeterli güvenliğe sahip olup olmadığı Slope/W programı ile kontrol edilmiştir. Yapılan analizlerde elde edilen minimum güvenlik TY-2'de elde edilmiştir. Farklı kesme dayanımlarına ve farklı aralıklara sahip kazıklar için analizler tekrar edilmiş ve kesme dayanımının artmasına bağlı olarak güvenlik sayısının arttığı fakat belli bir değerden sonra değişim olmadığı görülmüştür. Artan kazık aralıkları ise güvenlik sayısı azalmış, azalan kazık aralıkları ile de güvenlik sayılarında artış görülmüştür.

Sonlu elemanlar programı ile elde edilen güvenlik sayılarına bakıldığı zaman minimum güvenlik sayısı TY1-K2'de elde edilmiştir. Bu değer TY1-K1 ve TY-2'de kalıcı yüklere ve pasif toprak basıncına uygulanamayan kısmi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Plaxis 2D sonucu elde edilen sonuçlar TY1-K1 için 1,35 TY-2 için 1,89 ile bölünmesi ile Slope/W ile elde

edilen sonuçlara yakın değerler elde edilmiştir. Bu durumda TY1-K1 için minimum güvenlik sayısı 1,35 olarak TY-2 için ise minimum güvenlik sayısı 1,35*1,40=1,89 olarak belirlenebilir.

Yeterli güvenlik sağlandıktan sonra Plaxis 2D ile SLS analizler yapılmıştır. SLS analizlerde öngörülmeyen kazı derinliği hesaplamalara dahil edilmezken, deplasmanlardaki değişimi görmek için analizlere dahil edilerek analizler yapılmış ve yatay deplasmanlarda dikkate değer derecede artış olduğu görülmüştür. Bu durum bazı zemin parametrelerinin azaltıldığı TY1–K2 ve TY3 analizlerinde göçmelere neden olmuştur.Analiz sonucu elde edilen deplasman değerleri, belirlenen sınırlar içinde kalıyorsa ULS fazları programa dahil edilerek analiz modeli tamamlanır. Yapılan analizler neticesinde maksimum kesit tesirleri ve ankraj yükleri, yük etki kısmi faktörü 1,35 uygulanan TY1-K1 ve TY-2 analiz sonuçlarında elde edilmiştir. Meydana gelen ufak değişiklikler ise TY-2'de ankraj çeper sürtünmesine uygulanan kısmi faktörden kaynaklanmaktadır. Oluşan maksimum ankraj yükleri için ankraj yeterlilikleri kontrol edilmiş ve bazı analizlerde ankraj halatlarının yetersiz olduğu görülmüştür. Bu durumda analizler ankraj halat çapı değiştirilerek veya ankraj sayısı arttırılarak tekrarlanmıştır. Oluşan maksimum normal kuvvet, moment ve kesme değerleri için beton kesitleri yeterli olduğu görülmüş ve kazıklar için hesaplanan donatı miktarlarında büyük değişiklikler meydana gelmemiştir.

Yapılan analizlere ek olarak yeraltı suyunun kaldırılması durumunda elde edilen güvenlik sayılarında büyük artış görülmüştür. Bu da yapılacak analizlerde su seviyesinin belirlenmesinin büyük önem taşıdığını göstermektedir. Drenaj sisteminin yetersiz kalacağı düşünülmesi durumunda kritik su seviyesi Eurocode-7 tarafından önerilen seviyelerde belirlenmelidir.

Analizlerde Slope/W ve Plaxis 2D tek başlarına yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu nedenle iki programında birlikte kullanılması tavsiye edilebilir. Bunun için; Limit denge analizi programı ile güvenlik sayısı belirlenmeli, Plaxis 2D ile deplasmanların belirlenen sınırlar içinde kaldığı kontrol edilmeli, SLS analiz modeline Tasarım yaklaşımları dahil edilerek yapılan analiz sonuçlarında kesitlerin ve ankrajların yeterlilikleri kontrol edilmelidir.

Ülkemizde yapılan zemin etüt çalışmalarının zemin parametrelerini güvenli tarafta kalarak belirlendiği düşünülmektedir. TY1-K2 ve TY-3 gibi zemin parametrelerine kısmi faktör uygulayan Tasarım Yaklaşımları zemini daha da kötü duruma düşürecek ve yapılan tasarımın maliyetini büyük oranda arttıracaktır. Bu nedenle yapılacak çalışmalarda yük faktörü uygulanan TY1-K1 ve TY-2 Tasarım Yaklaşımları ülkemiz açısından daha uygun düşünülmektedir.

6 KAYNAKLAR

Berilgen, M. (1996). *Ankrajlı perdelerde zemin yapı etkileşiminin incelenmesi .* Doktora Tezi Yıldız Teknik Üniverstesi.

Brinkgreve ve Mark. (2015). *Geotechnical ultimate limit state design using finite elements.*

British Standart Institution. (2001). *Code Of Practice for Earth Retaining Structures.*

Cansız, B. M. (2014). *İksa Sitemlerinde Köşe Etkilerinin İki Bıyutlu Sonlu Eleman Analiz Yöntemleri İle İncelenmesi. .* Yüksek Lisans Tezi İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

CIRIA C760. (2017). *Guadience on Embedded Retaining Wall Design.* London.

Coduto, D. P. (2011). *Temel Tasarımı İlkeler ve Uygulamalar Çeviri: Murat Mollammahmutoğlu ve Kamil Kayabalı.* Ankara: Gazi Kitapevi.

EN 1997-1. (2013). *EC 7-Geotechnical Design Worked Example.* Dublin: Eurocode Commission.

EN 1997-2 . (2007). *Ground Investigation and Testing.* European Commitee For Standardization.

Ergün, M. U. (2008). *Deep Excavations.* Ankara.

Excavations of German Geotechnical Society. (2008). *Recommendation On Excavation EAB.* Almanya.

FHWA-IF-99-105. (1999). *Ground Anchors and Anchored Systems.* Washington.

Geo-Slope Int. (2012). *Stability modeling with Slope/W.* Kanada.

Harris ve Bond . (2008). *Decoding Eurocode 7.* London and Newyork: Toylor And Francis Group.

Institution of Civil Engineering. (2007). *ICE The Specification for piling and embedded retaining walls.*

Karademir ve Kuruoğlu, . (2018). Eurocode-7'ye göre dayanma yapısının geoteknik tasarımı. *Zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği 17. Ulusal Konferansı.* İstanbul: ZMGM.

Lewandowska, A. S. (2008). *Design of deep excavations according to Eurocode 7.* Poland.

Look, B. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Table.* Londan.

Öztorun, N. K. (1994). Ankara Metrosu Kızılay İstasyonu Örneği İle Yukarıdan Aşağıya (Top-Down) İnşaat Yöntemi. İstanbul.

Plaxis Bulletin. (2011). *The Use of Design Approaches with Plaxis.* Netherlands: Delft University of Technology & Plaxis Bv.

Plaxis Manual. (2019). *Plaxis 2D Reference Manual 2019.* The Netherlands: Delft University of Technology & Plaxis bv.

Schweiger ve diğ. (tarih yok). Eurocode 7 and new design challenges using numerical methods with different soil models.

Schweiger, H. (tarih yok). *Influence of constitutive model and EC7 design approach in FE analysis of deep excavations.*

Simpson ve Powrie. (2001). Embedded Retaining Walls, Theoary, Practice and Understanding. *15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.* İstanbul.

Simpson, B. (2007). Approaches to ULS design- The merits of design approach 1 in Eurocode 7. *First International Symposium on geotechnical safety and risk.* Shanghai.

Teodoru, I. B. (2013). *Application of numerical methods In design of embedded retaining structures according to Eurocode-7.*

TS 3168. (2001). *Özel Jeoteknik Uygulamalar Delme (Fore) Kazıklar- (Yerinde Dökme Betonarme Kazıklar).* Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 1537. (2001). *Zemin Ankrajları.* Ankrara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 1997-2. (2007). *Geoteknik Tasarım - Bölüm 2: Zemin Etüdü ve Deneyleri (Eurocode 7).*

Tunca, M. (2010). *Derin Kazılarda Kaynaklanan Zemin Oturmalarının Sayısal Analizlerle İncelenmesi. Yüskek Lisans Tezi.* YTÜ Fen BİIimleri Enstitüsü.

Yıldırım, S. (2009). *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı.* İstanbul: Birsen Yayınevi.

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

7 EKLER

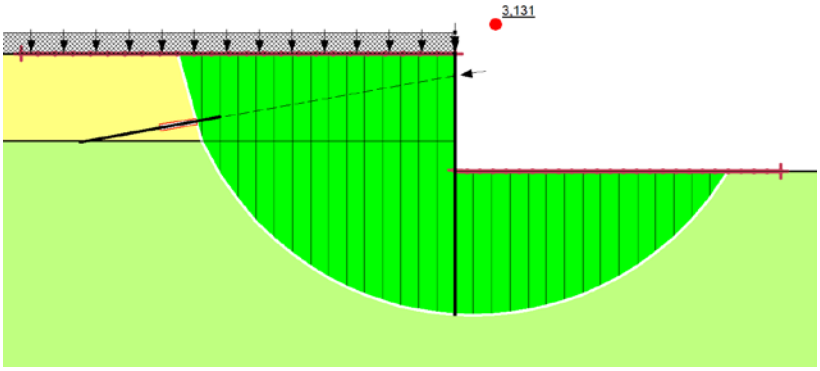
EK A: Slope/W analiz sonuçları

EK B: EC-7 Örneği analiz sonuçları

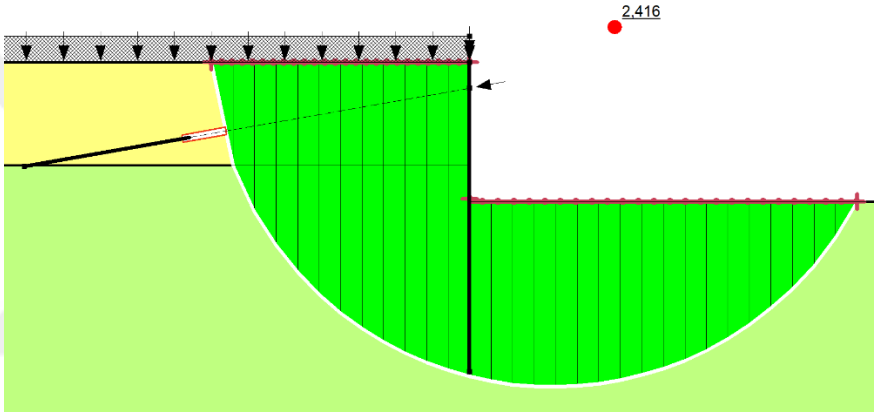
EK C: Kazıklı modelleri deplasman ve kesit tesirleri analiz sonuçları

EK D: Diyaframlı modeller analiz sonuçları

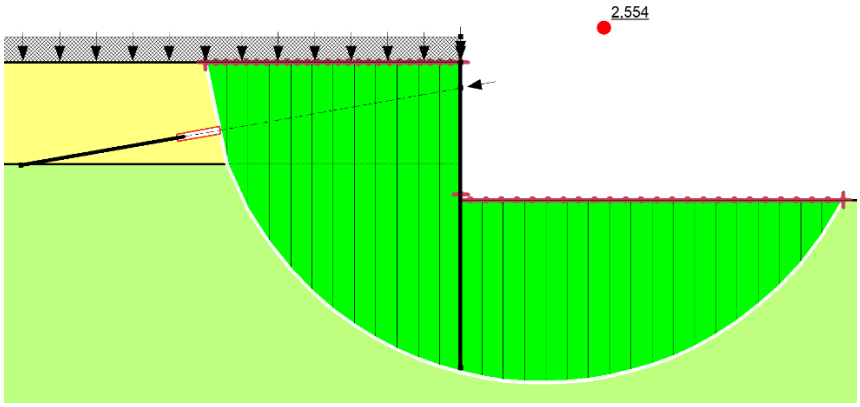
EK A: Slope/W uygulanan Tasarım Yaklaşımları analiz sonuçları.



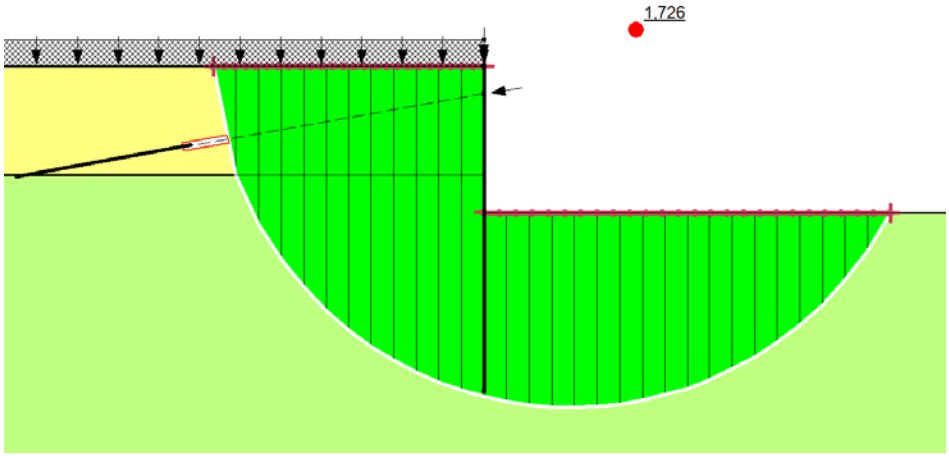
Şekil A.1: SLS analiz sonucu elde edilen güvenlik sayısı



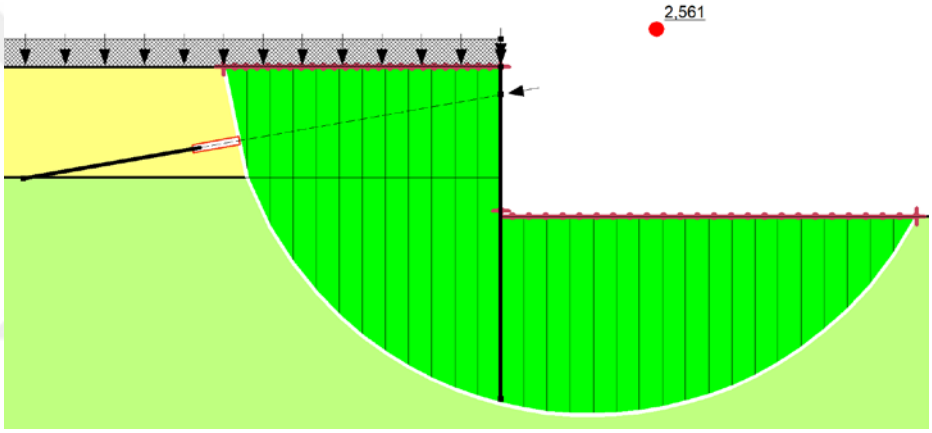
Şekil A.2: DA1-C1 analiz sonucu elde edilen güvenlik sayısı.



Şekil A.3: DA1-C2 analiz sonucu elde edilen güvenlik sayısı.

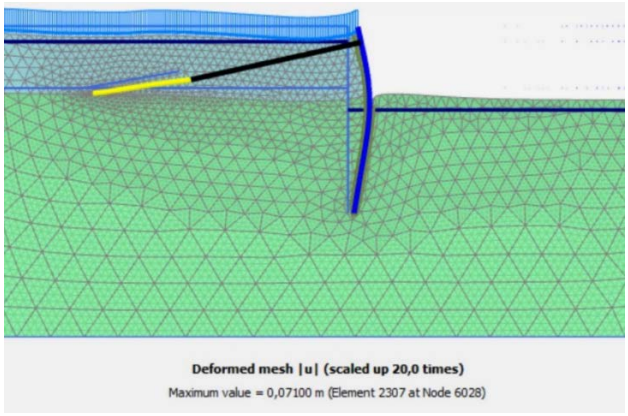


Şekil A.4: DA2 analiz sonucu elde edilen güvenlik sayısı.

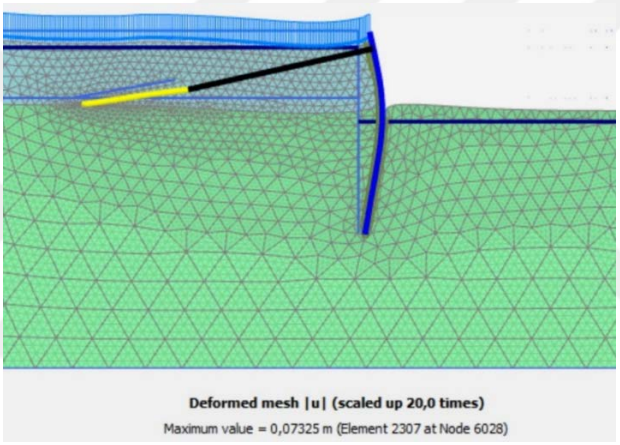


Şekil A.5: DA3 analiz sonucu elde edilen güvenlik sayısı.

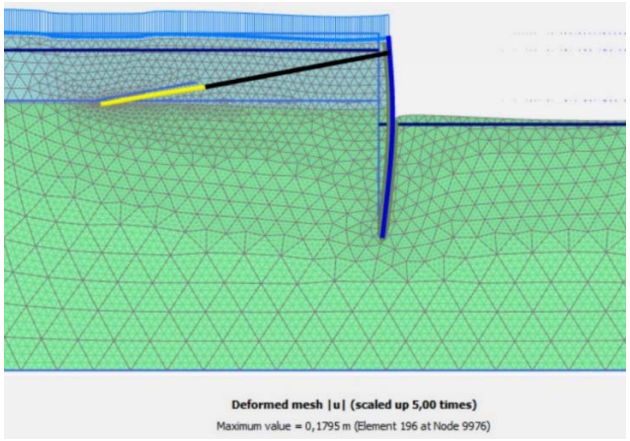
EK B: EC-7 Örneği Analiz Sonuçları



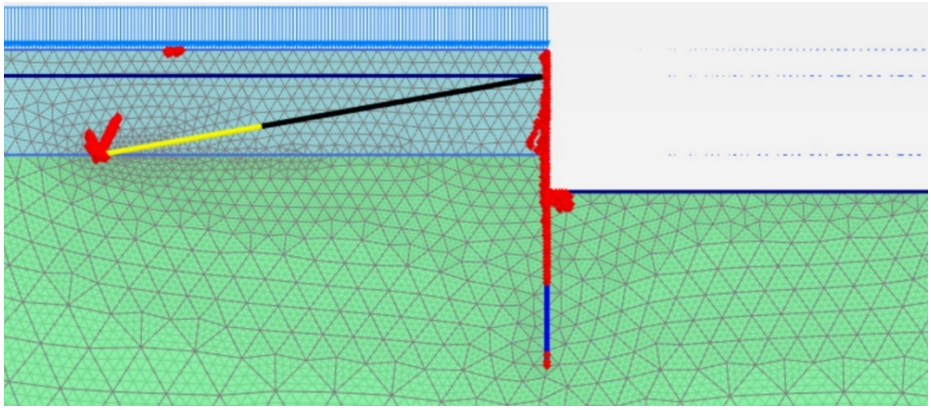
Şekil B.1: SLS analizinden elde edilen maksimum deplasman.



Şekil B.2: TY1 K1 ve TY2 analizlerinden elde edilen maksimum deplasman.

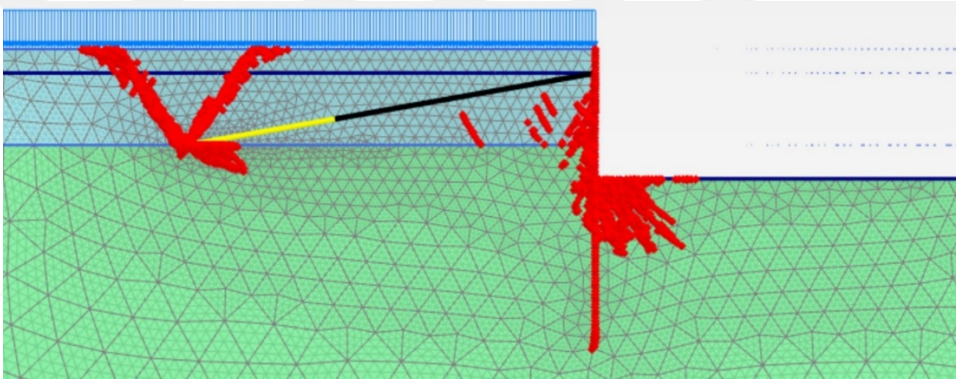


Şekil B.3: TY1 K2 ve TY3 analizlerinden elde edilen maksimum deplasman.

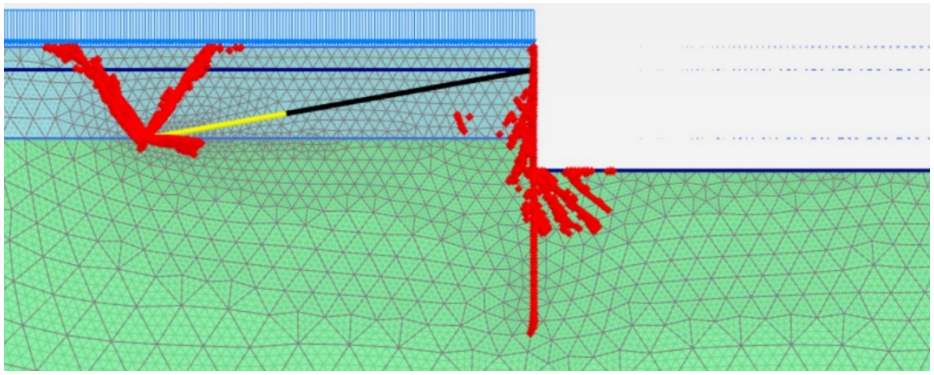


Şekil B.4: SLS analiz sonucu oluşan plastik noktaları.

SLS analiz sonucu elde edilen plastik noktalar ile TY1 K1 ile TY2* analizi sonucu elde edilen plastik noktalar benzerdir.

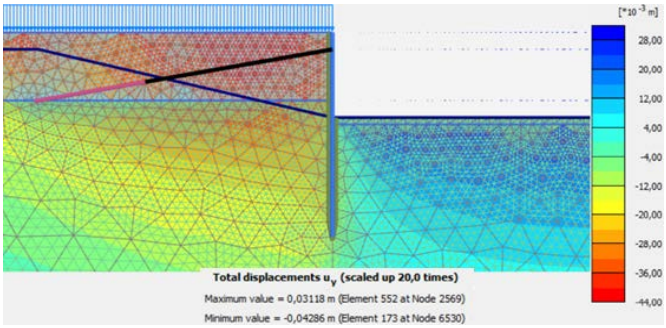


Şekil B.5: TY1 K2 analiz sonucu oluşan plastik noktaları.

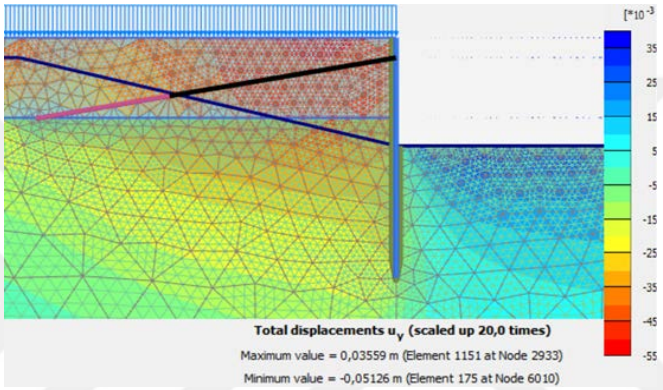


Şekil B.6: TY3 analiz sonucu oluşan plastik noktaları.

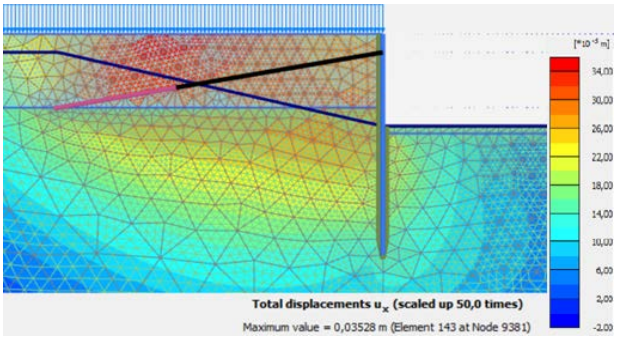
EK C: Kazıklı modeller analiz sonuçları



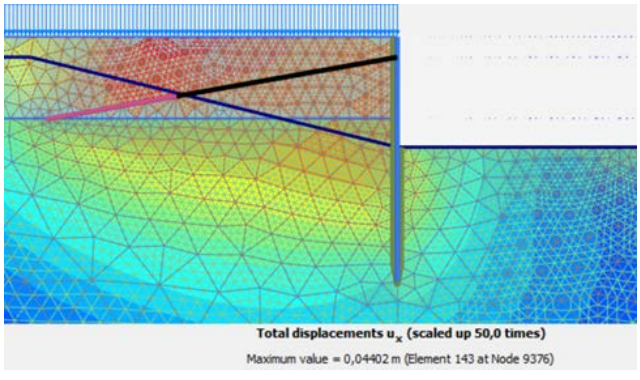
Şekil C.1: Ø65 cm çapında kazık için SLS 4.fazda oluşan düşey deplasman.



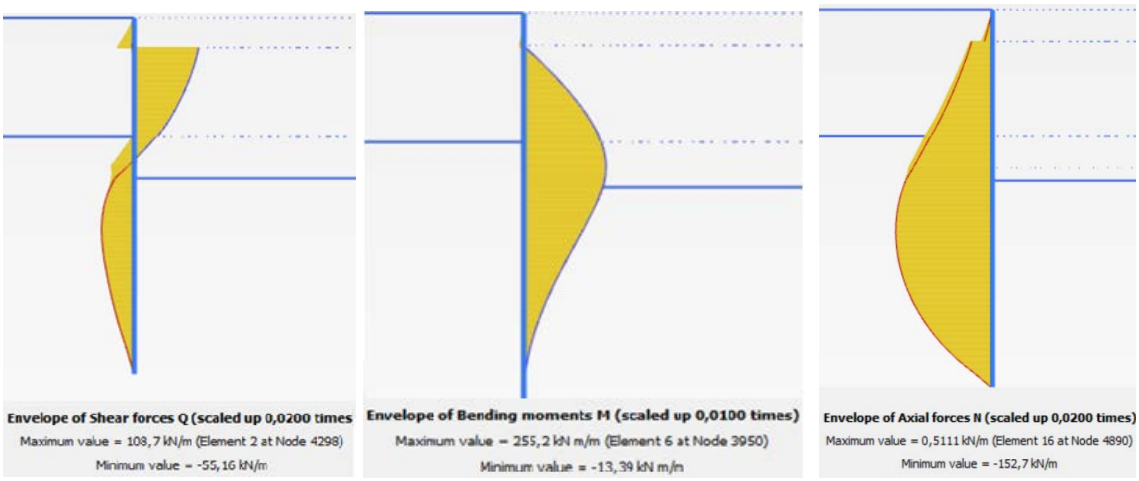
Şekil C.2: Ø65 cm çapında kazık için SLS 5.fazda oluşan düşey deplasman.



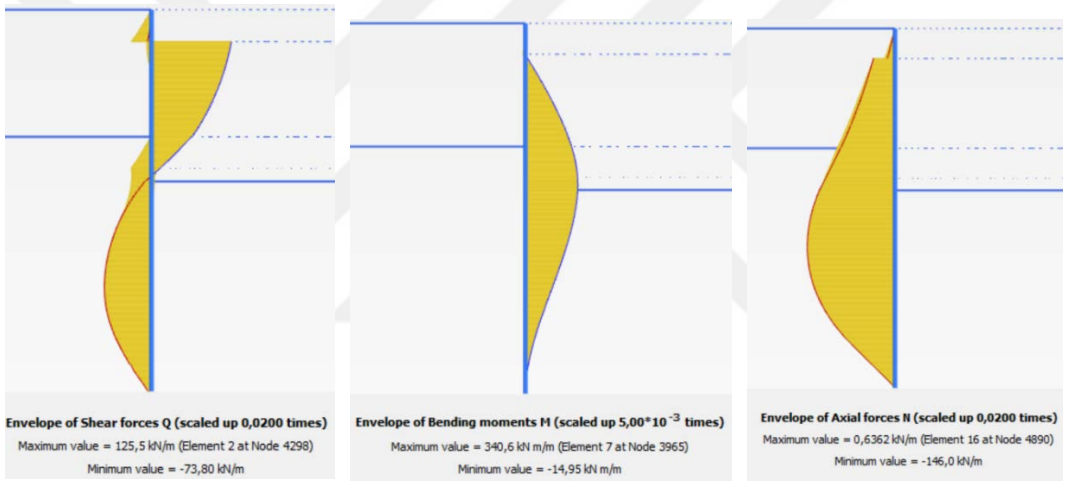
Şekil C.3: Ø65 cm çapında kazık için SLS 4.fazda oluşan yatay deplasman.



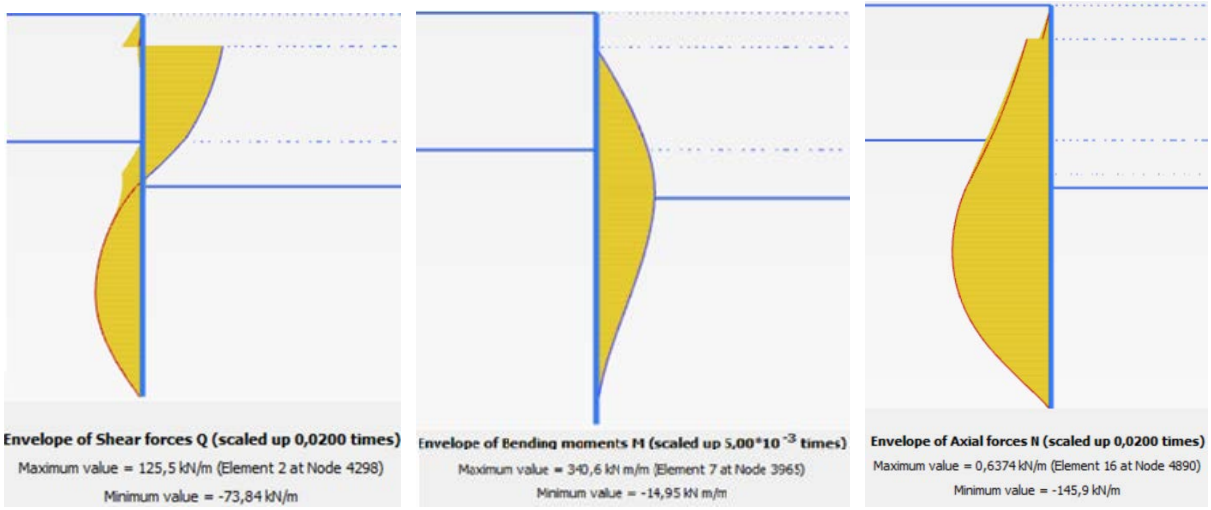
Şekil C.4: Ø65 cm çapında kazık için SLS 5.fazda oluşan yatay deplasman.



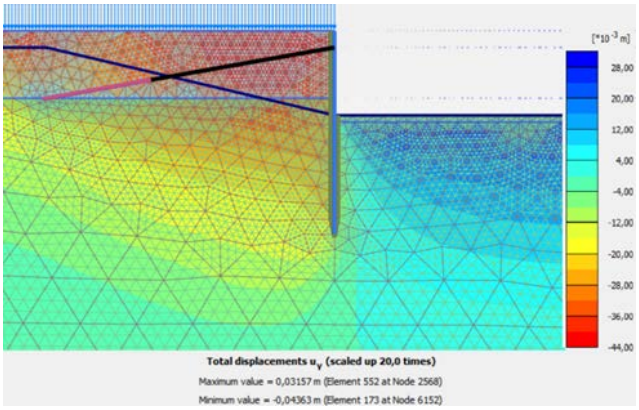
Şekil C.5: Ø65 cm çapında kazık için SLS 5.fazda elde edilen kesme kuvveti, moment ve normal kuvvet değerleri.



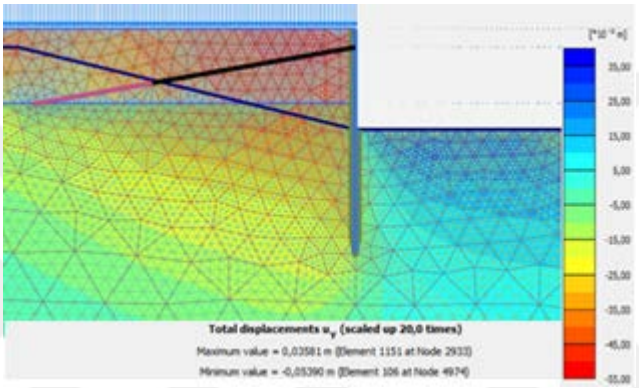
Şekil C.6: Ø65 cm çapında kazık için TY1-K1 ve TY 2- 5.fazda elde edilen kesme kuvveti, moment ve normal kuvvet değerleri.



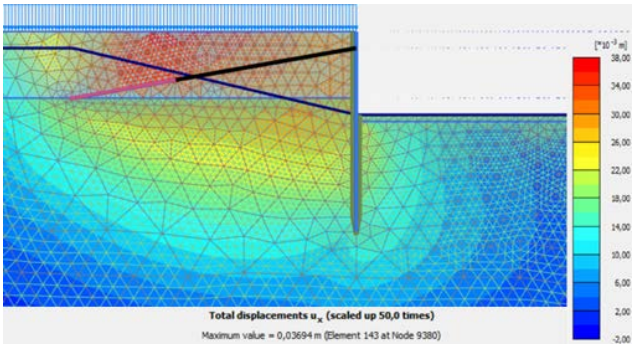
Şekil C.7: Ø65 cm çapında kazık için TY1-K2 ve TY 3- 5.fazda elde edilen kesme kuvveti, moment ve normal kuvvet değerleri.



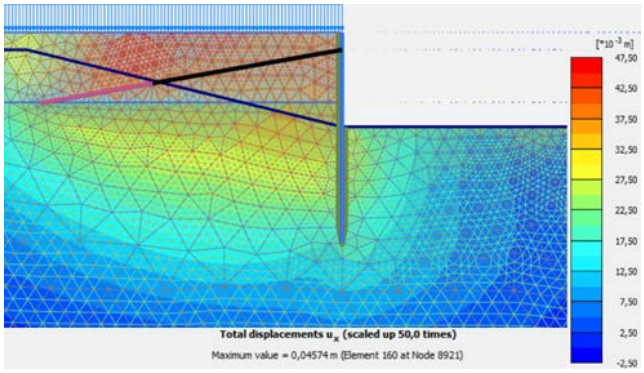
Şekil C.8: Ø80 cm çapında kazık için SLS 4.fazda oluşan düşey deplasman.



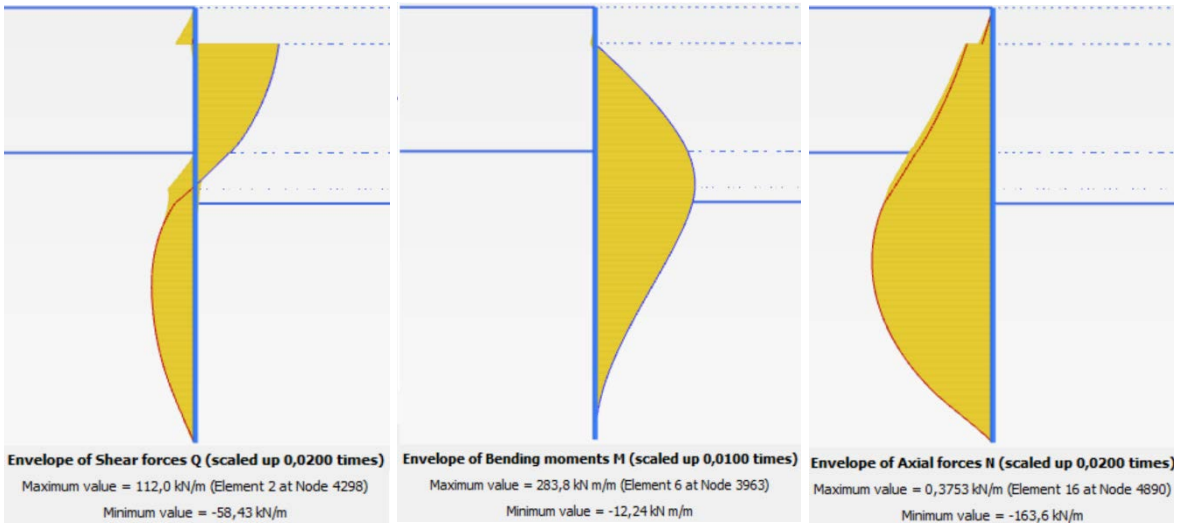
Şekil C.9: Ø80 cm çapında kazık için SLS 5.fazda oluşan düşey deplasman.



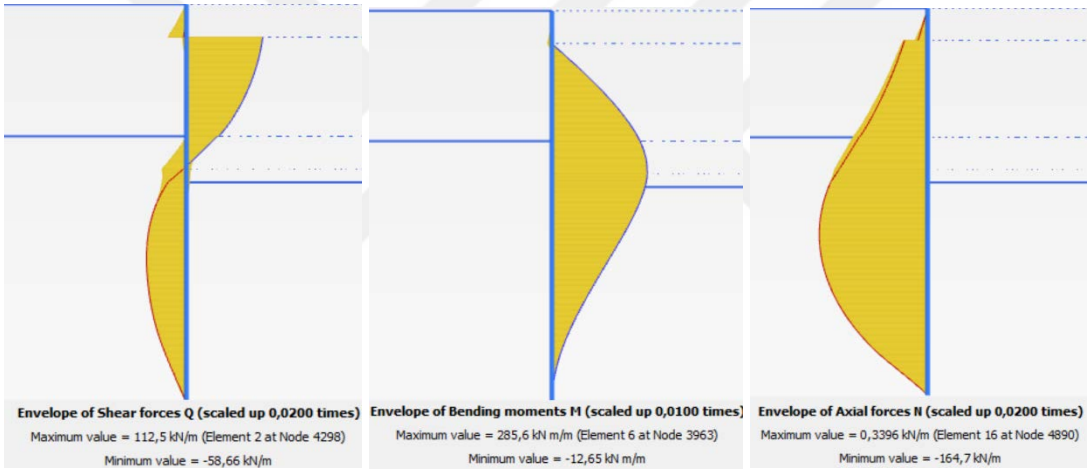
Şekil C.10: Ø80 cm çapında kazık için SLS 4..fazda oluşan yatay deplasman.



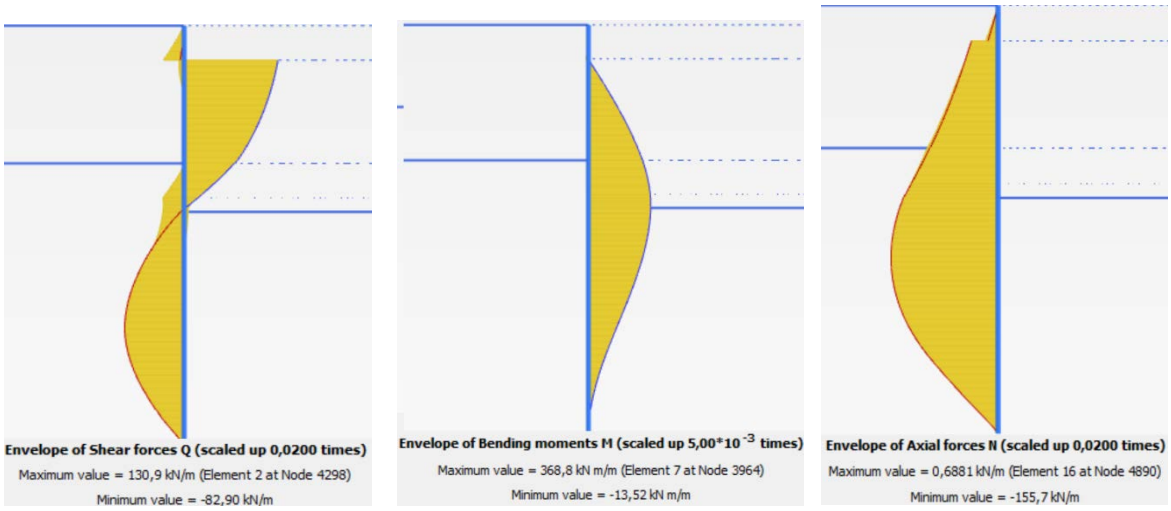
Şekil C.11: Ø80 cm çapında kazık için SLS 5..fazda oluşan yatay deplasman.



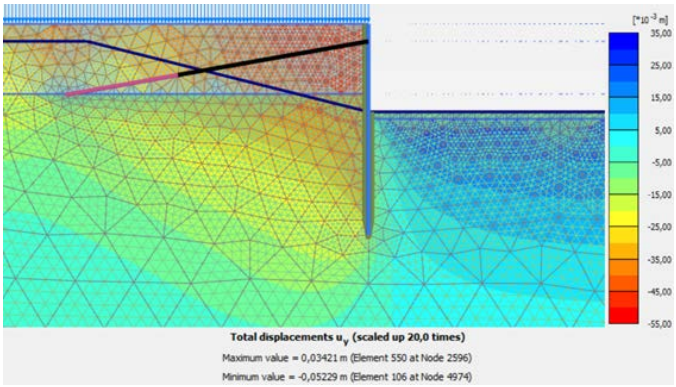
Şekil C.12: Ø80 cm çapında kazık için SLS 5.fazda elde edilen kesme, moment ve normal kuvvet değerleri.



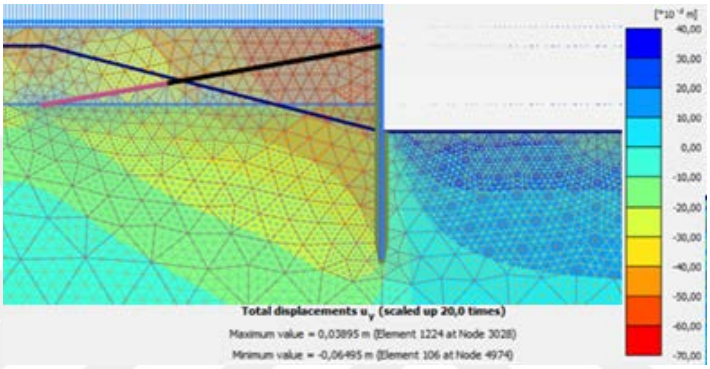
Şekil C.13: Ø80 cm çapında kazık için TY1-K1 ve TY 2 5.fazda elde edilen kesme, moment ve normal kuvvet değerleri.



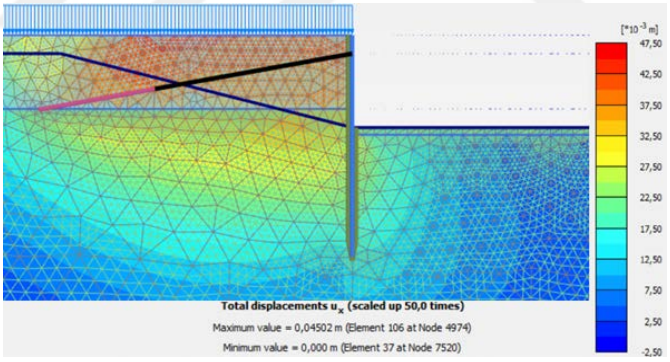
Şekil C.14: Ø80 cm çapında kazık için TY1-K2 ve TY 3 5.fazda elde edilen kesme, moment ve normal kuvvet değerleri.



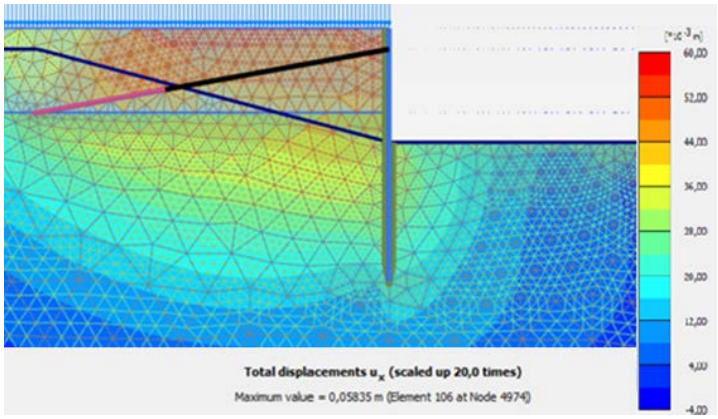
Şekil C.15: Ø100 cm çapında kazık için SLS 4.fazda oluşan düşey deplasman.



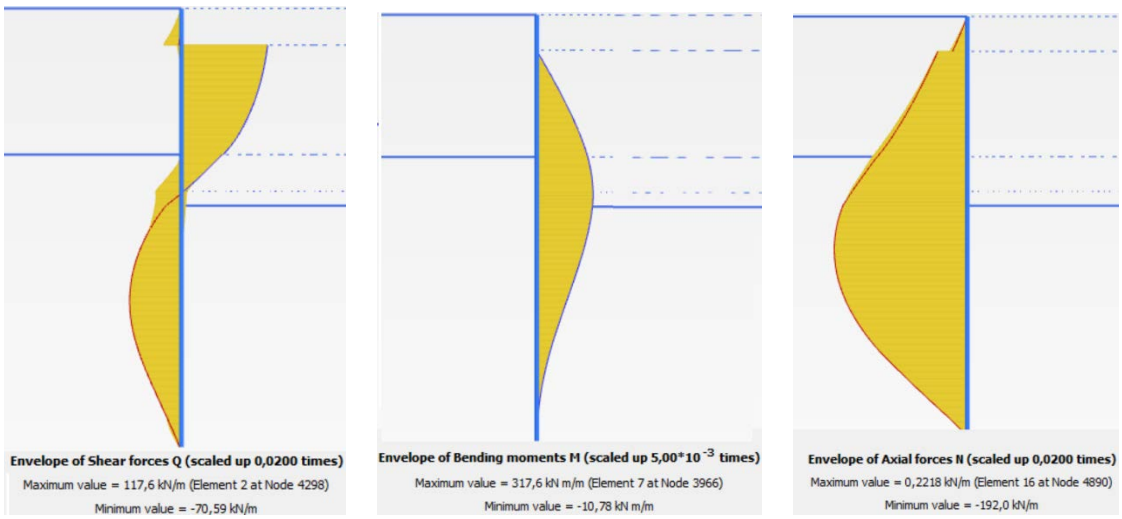
Şekil C.16: Ø100 cm çapında kazık için SLS 5.fazda oluşan düşey deplasman.



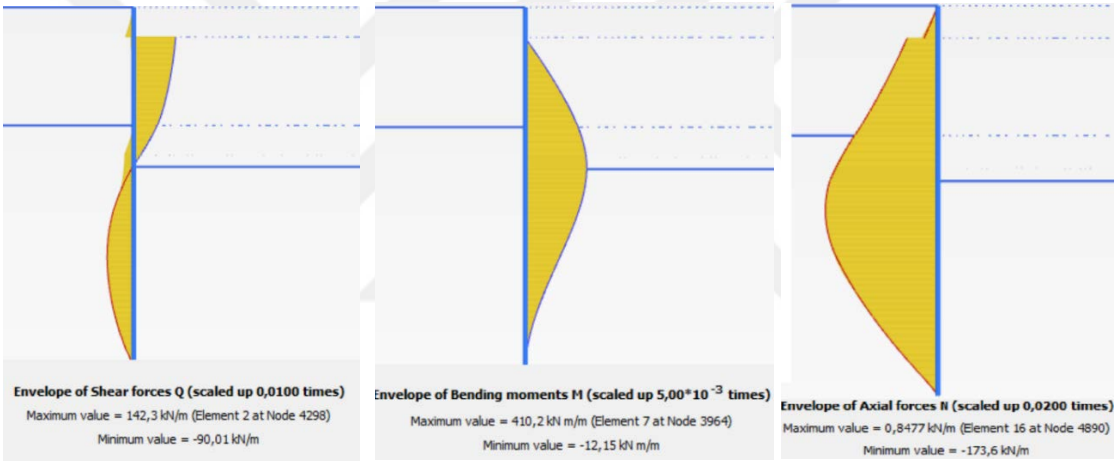
Şekil C.17: Ø100 cm çapında kazık için SLS 4.fazda oluşan yatay deplasman.



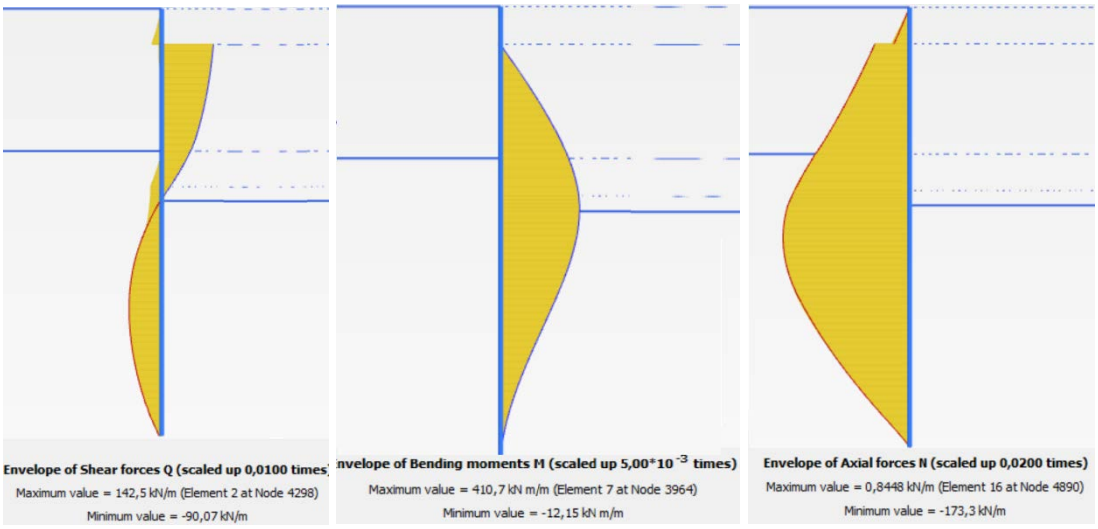
Şekil C.18: Ø100 cm çapında kazık için SLS 5.fazda oluşan yatay deplasman.



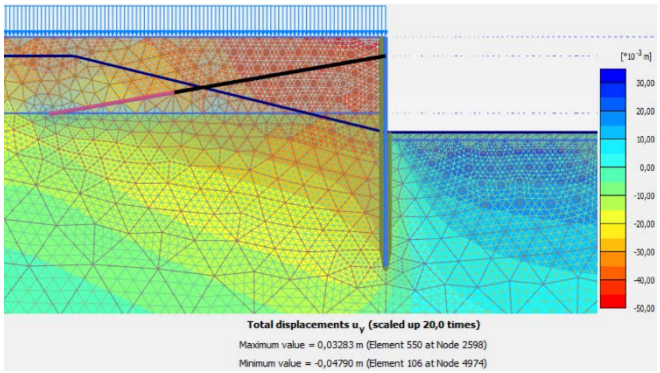
Şekil C.19: Ø100 cm çapında kazık için SLS 5.fazda elde edilen kesme kuvveti, moment ve normal kuvvet değerleri.



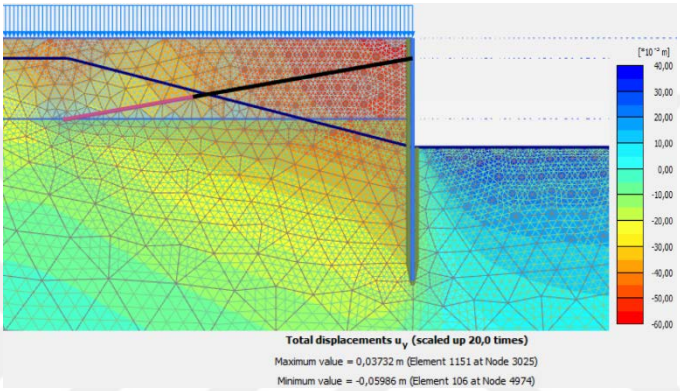
Şekil C.20: Ø100 cm çapında kazık için TY1-K1 ve TY 2 5.fazda elde edilen kesme kuvveti, moment ve normal kuvvet değerleri.



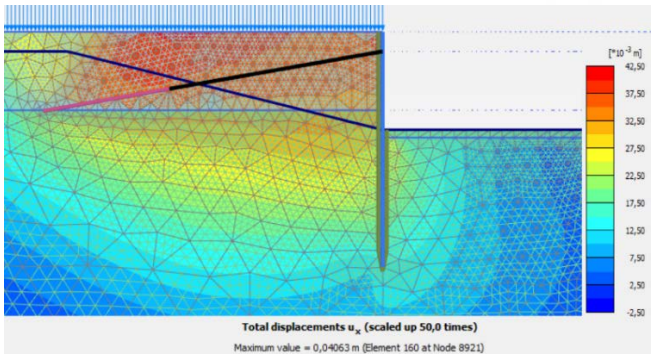
Şekil C.21: Ø100 cm çapında kazık için TY1-K2 ve TY 3 5.fazda elde edilen kesme, moment ve normal kuvvet değerleri.



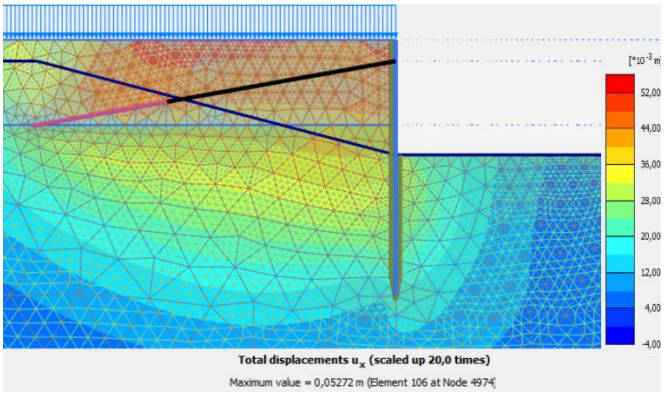
Şekil C.22: Ø100 cm çapında 120 cm ara ile modellenen kazık 4.fazda oluşan düşey deplasman.



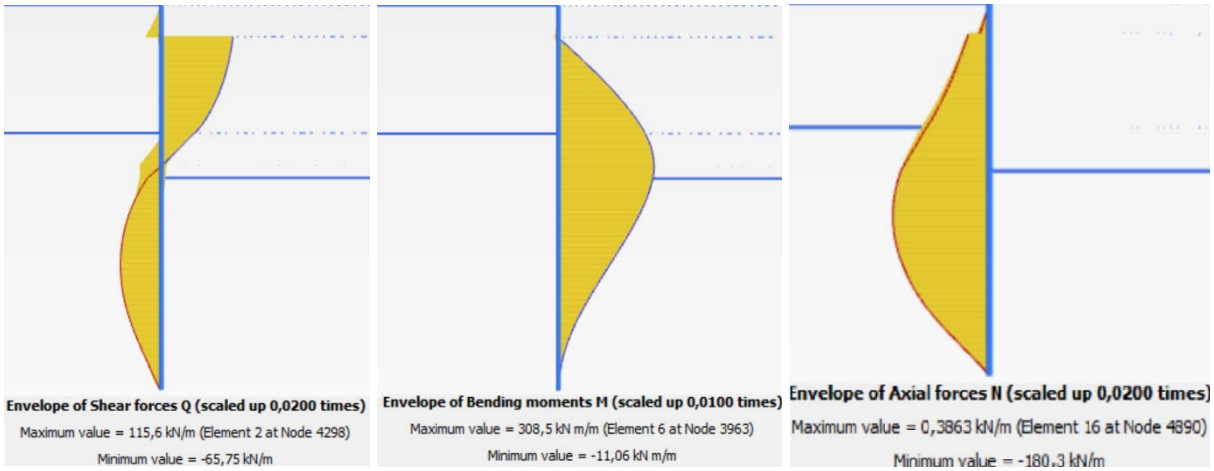
Şekil C.23: Ø100 cm çapında 120 cm ara ile modellenen kazık 5.fazda oluşan düşey deplasman.



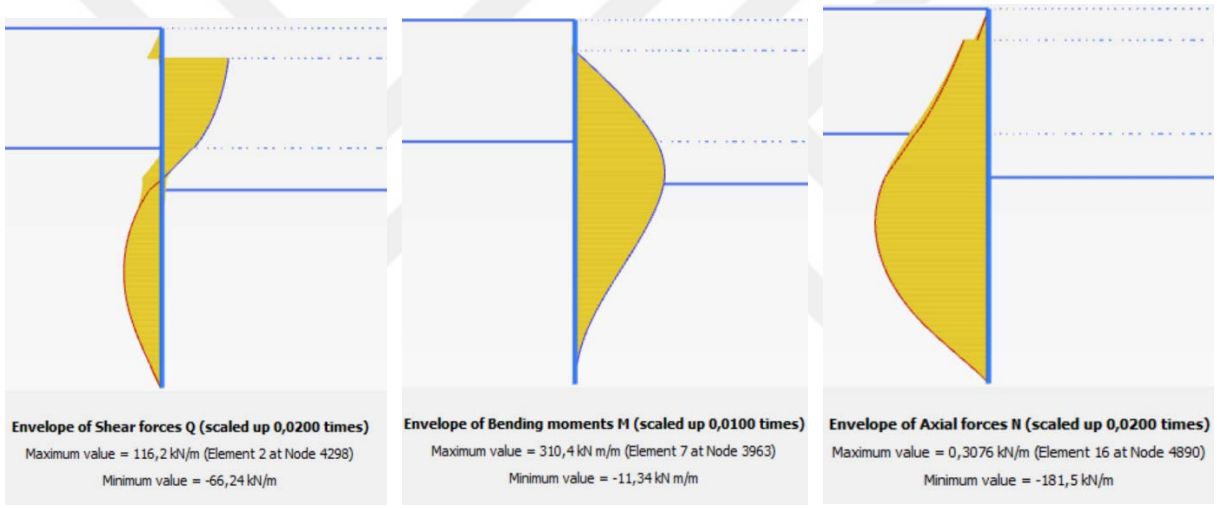
Şekil C.24: Ø100 cm çapında 120 cm ara ile modellenen kazık 4.fazda oluşan yatay deplasman.



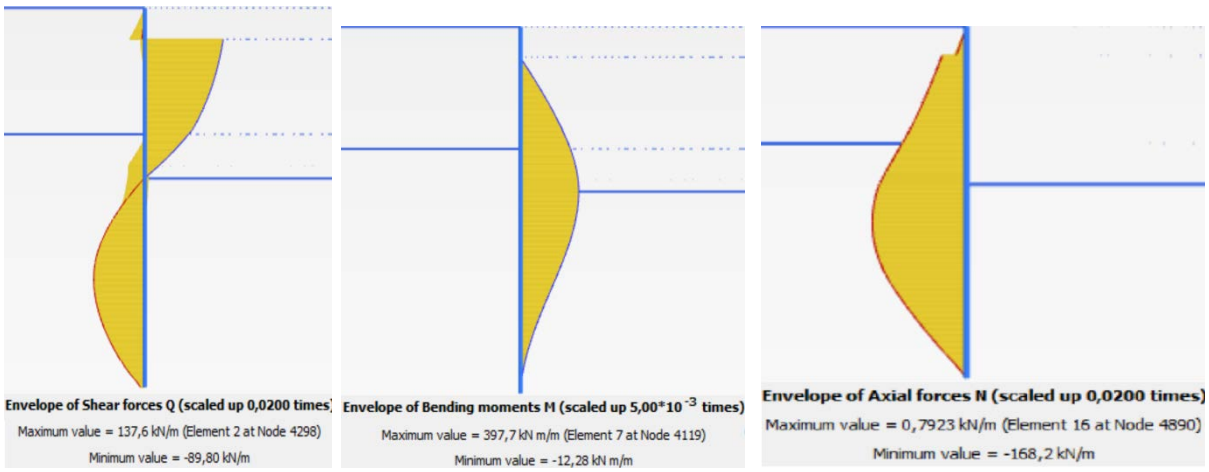
Şekil C.25: Ø100 cm çapında 120 cm ara ile modellenen kazık 5.fazda oluşan yatay deplasman.



Şekil C.26: Ø100 cm çapında 120 cm ara ile modellenen kazık için SLS 5.fazda elde edilen kesme kuvveti, moment ve normal kuvvet değerleri.

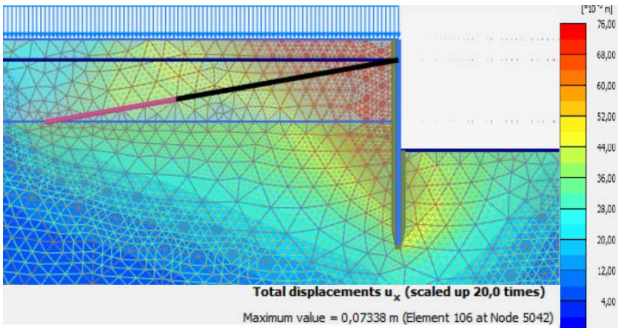


Şekil C.27: Ø100 cm çapında 120 cm ara ile modellenen kazık için TY1-K1 ve TY 2 5.fazda elde edilen kesme kuvveti, moment ve normal kuvvet değerleri.

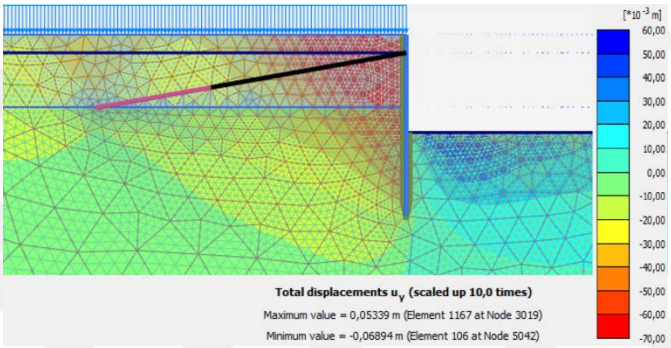


Şekil C.28: Ø100 cm çapında 120 cm ara ile modellenen kazık için TY1-K2 ve TY 3 5.fazda elde edilen kesme kuvveti, moment ve normal kuvvet değerleri.

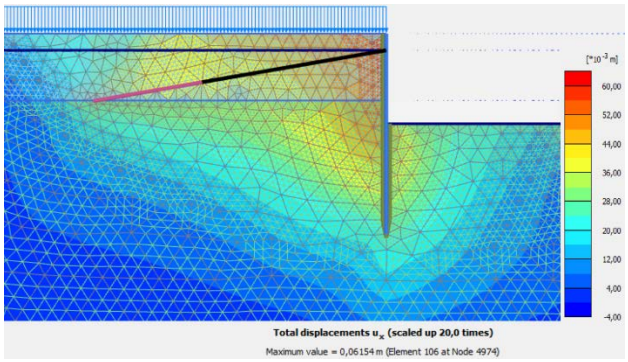
EK D:



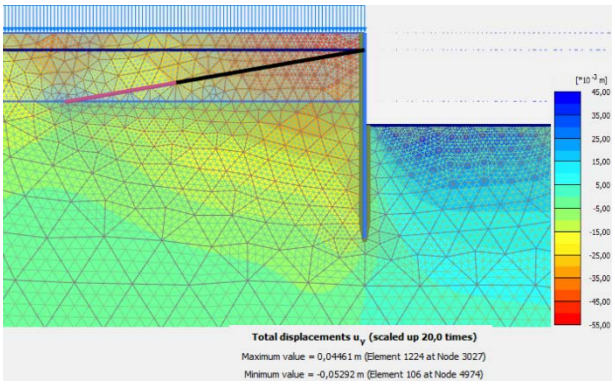
Şekil D.1: 60 cm kalınlığında 10 m uzunluğundaki diyafram duvar için elde edilen yatay deplasman.



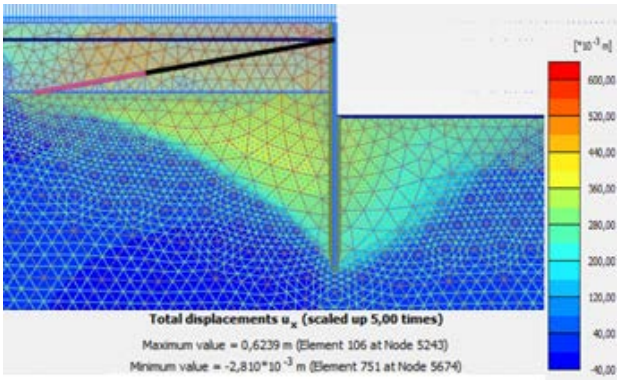
Şekil D.2: 60 cm kalınlığında 10 m uzunluğundaki diyafram duvar için elde edilen düşey deplasman.



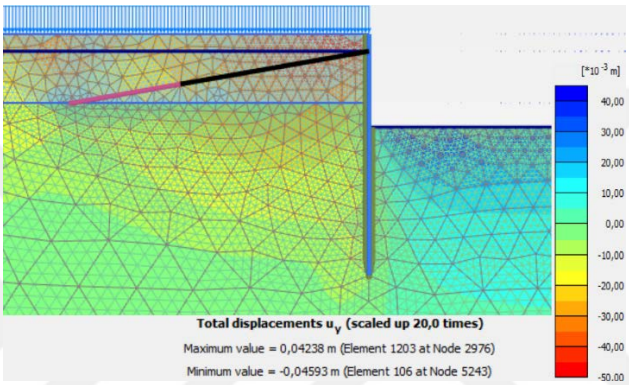
Şekil D.3: 60 cm kalınlığında 12 m uzunluğundaki diyafram duvar için elde edilen yatay deplasman.



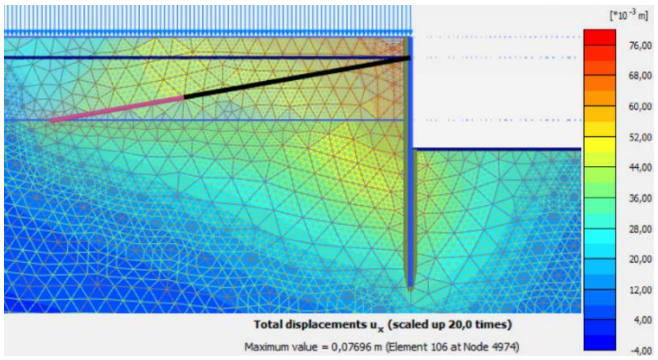
Şekil D.4: 60 cm kalınlığında 12 m uzunluğundaki diyafram duvar için elde edilen düşey deplasman.



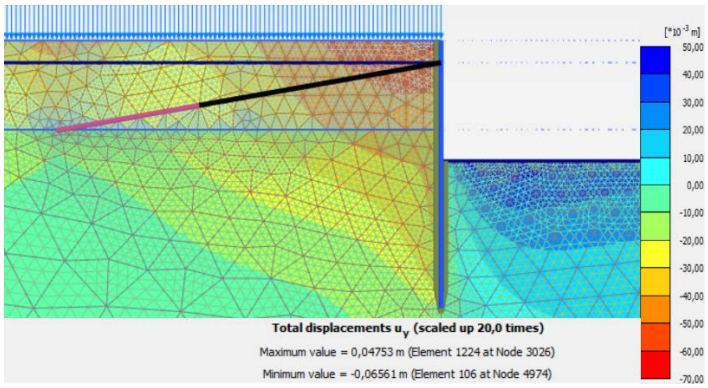
Şekil D.5: 60 cm kalınlığında 14 m uzunluğundaki diyafram duvar için elde edilen yatay deplasman.



Şekil D.6: 60 cm kalınlığında 14 m uzunluğundaki diyafram duvar için elde edilen düşey deplasman.



Şekil D.7: 80 cm kalınlığında 12 m uzunluğundaki diyafram duvar için elde edilen yatay deplasman.



Şekil D.8: 80 cm kalınlığında 12 m uzunluğundaki diyafram duvar için elde edilen düşey deplasman.

8 ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Gökhan ÜSTÜNYER
Doğum Yeri	Bartın
Doğum Tarihi	01.11.1994
Uyruğu	☑ T.C. ❒ Diğer:
Telefon	05380119412
E-Posta Adresi	Gokhan_ustunyer@hotmail.com
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2017

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

Makale ve Bildiriler