İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AŞIRI YÜKLEMELER ALTINDA TOPRAKARME İSTİNAT YAPILARININ
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tahir YILDIZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AŞIRI YÜKLEMELER ALTINDA TOPRAKARME İSTİNAT YAPILARININ
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tahir YILDIZ
501111316**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin YILDIRIM

27 MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111316 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Tahir YILDIZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**AŞIRI YÜKLEMELER ALTINDA TOPRAKARME İSTİNAT YAPILARININ TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin YILDIRIM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Derin URAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erol GÜLER
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi: **27 Mayıs 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Toprakarme istinat yapıları, 40 yılı aşkın bir süredir tüm dünyada geleneksel istinat sistemlerine alternatif olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu araştırma çalışması kapsamında, bir proje vaka analizi üzerinden, mühendislik yapıları için elverişli olmayan geoteknik koşullar altında, aşırı sürşarj yüklemelerine maruz kalacak ve palyeli olarak yapılması düşünülen bir toprakarme istinat duvarı yapısının hesap yöntemleri araştırılmış, yapı güvenliği için sağlanması gereken stabilite koşulları göz önüne alınarak sistemin tasarımı ortaya konmuştur.

Tez çalışmam süresince bana yol gösteren, çalışmamın verimli bir şekilde sonuca ulaşmasına bilgi ve tecrübeleriyle katkıda bulunan danışmanım Sayın Prof. Dr. Hüseyin Yıldırım'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Geoteknik mühendisliği alanında uzmanlaşma kararında vizyonu ve mühendislik yaklaşımıyla bana yıllar boyunca yardımcı olan, bu sektörde çalışmamda ve kazandığım başarılarda önemli payı bulunan kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Aykut Şenol'a minnet ve teşekkürlerimi bildiririm.

Tez üzerinde çalışmam için bana zaman ve imkan veren, araştırma konumun belirlenmesinde fikir alışverişinde bulunduğum ve benden bu konuda yardımlarını esirgemeyen çalışanı olduğum Reinforced Earth İnşaat Proje ve Tasarım A.Ş.'ye, geoteknik problemlerinin çözümünde ve tez kapsamında yapılan çalışmaların koordinasyonunda emeği geçen Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş. çalışanlarına teşekkür ediyorum.

Mesleki tecrübe kazanmama ve çalıştığım projelere bilimsel bir bakış açısıyla yaklaşmamı sağlayan Terre Armee Internationale France bünyesinde çalışan meslektaşlarıma minnet ve teşekkürlerimi bildiririm.

Yüksek lisans hayatımda ve tez çalışmam süresince her türlü zorluk ve sıkıntıda bana destek olan ve yardım eden aileme ve sevdiklerime sonsuz teşekkürlerimi iletmek isterim.

Mayıs 2014

Tahir YILDIZ
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Toprakarme İstinat Yapıları Genel Konsepti	1
1.2 Tarihsel Gelişim	2
2. TOPRAKARME İSTİNAT YAPI SİSTEMİ	5
2.1 Yapı Tipleri	5
2.1.1 Şerit tipi donatılı toprakarme yapıları	6
2.1.2 Kafes tipi donatılı toprakarme yapıları	7
2.1.3 Tabaka tipi donatılı toprakarme yapıları	8
2.1.4 Çubuk tipi donatılı toprakarme yapıları	9
2.1.5 Lif tipi donatılı toprakarme yapıları	9
2.1.6 Gözenekli donatılı toprakarme yapıları.....	10
2.2 Şerit Donatılı Toprakarme Yapılar	10
2.2.1 Şerit donatılı toprakarme uygulamaları.....	10
2.2.2 Yapısal elemanlar.....	11
2.2.2.1 Seçilmiş dolgu.....	12
2.2.2.2 Donatı şeritleri.....	15
2.2.2.3 Yüzey kaplama elemanları	18
2.2.2.4 Temel zemini.....	20
2.2.2.5 Taşıyıcı dolgu.....	20
2.2.2.6 Bağlantı elemanları	20
2.2.3 Toprakarme istinat yapıları imalat aşamaları.....	21
2.2.3.1 Tesviye betonunun teşkili	21
2.2.3.2 İlk sıra panellerin montajı	22
2.2.3.3 Şerit montajı	22
2.2.3.4 Dolgu sıkıştırma işlemi	23
2.2.3.5 Montaj ekipmanları	24
2.2.4 Toprakarme sisteminin avantaj ve dezavantajları	25
2.2.4.1 Sistem Avantajları.....	25
2.2.4.2 Sistem Dezavantajları.....	26
2.2.4.3 Maliyet karşılaştırması	26
3. TOPRAKARME SİSTEMİNİN PRENSİPLERİ	27
3.1 Temel Kabuller	27
3.2 Henry Vidal'in Çalışmaları.....	28
3.3 Dolgu-Donatı Etkileşimi Prensibi	29

3.3.1 Donatı geometrisi etkisi	30
3.3.2 Dolgu sıklığı ve granülometrisi etkisi	31
4. ŞERİTLİ TOPRAKARME İSTİNAT YAPILARININ TASARIM KRİTERLERİ	33
4.1 Giriş	33
4.2 Donatı	33
4.3 Donatı Gerilmeleri	34
4.4 Göçme Modları	36
4.4.1 İç stabilite	37
4.4.2 Dış stabilite	37
4.5 Yükleme Koşulları	37
4.6 Su Etkisi	38
4.7 Dizayn Aşamaları	40
4.7.1 Gömme derinliği	40
4.7.2 Düşey donatı aralıkları	41
4.7.3 Donatı uzunluğu	41
4.7.4 Yatay toprak itkisi ve düşey gerilme	42
4.7.5 Dış stabilite	44
4.7.5.1 Taban kayma tahkiki:	44
4.7.5.2 Devrilme tahkiki	46
4.7.5.3 Taşıma gücü tahkiki	48
4.7.5.4 Genel stabilite	50
4.7.5.5. Sismik kontrol	50
4.7.6 İç stabilite	52
4.7.6.1 Donatılarda çekme kuvvetleri ve şerit kırılma tahkiki	52
4.7.6.2 Kopma tahkiki	56
4.7.6.3 Sismik kuvvetler etkisinde iç stabilite kontrolü	57
4.8 Oturma	59
4.9 Zemin İyileştirmesi	60
5. PALYELİ TOPRAKARME İSTİNAT YAPILARI	63
5.1 Giriş	63
5.2 Palyeli Toprakarme Yapıları	63
5.2.1 Palyeli toprakarme yapılarının tasarımı	65
5.2.1.1 Ön tasarım	65
5.2.1.2. Saha araştırmaları	66
5.2.1.3. Taşıma gücü kontrolü	68
5.2.1.4. Yatay deformasyonlar	68
5.2.1.5. Düşey deformasyonlar	68
5.2.2 Palyeli toprakarme yapılarının imalatı	69
5.2.2.1 Dolgu	69
5.2.2.2. Palye genişliği (Set-Back)	70
5.2.2.3. Drenaj	71
5.2.3 Tarihsel gelişim	72
6. HESAP YÖNTEMLERİ VE NÜMERİK ANALİZ PROGRAMLARI	73
6.1 Hesap Yöntemleri	73
6.1.1 Çalışan yükler yöntemi	73
6.1.2 Limit durum yöntemi	73
6.1.3 Deformasyon kontrol yöntemi	74
6.1.4 Donatı tipine göre hesap yöntemi	74
6.1.4.1 Uzayamayan donatılı sistemler	74

6.1.4.2 Uzayabilen donatılı sistemler	75
6.2 Nümerik Analiz Programları	75
6.2.1 İç ve dış stabilite analizleri.....	75
6.2.2 Genel stabilite analizleri.....	75
6.2.2.1 Basitleştirilmiş bishop dilim yöntemi	77
6.2.2.2 Slide yazılımı ile ilgili açıklamalar	79
6.2.3.1 Janbu tanjant modülü yaklaşımı	80
6.2.3.2 Geo5 settlement ile ilgili açıklamalar	84
7. VAKA ANALİZİ: ROZAK MAKİNA DİLOVASI TESİSLERİ PALYELİ	
TOPRAKARME DUVARLARI	85
7.1 Giriş	85
7.2 Proje Sahası	86
7.2.1 Toprakarme duvarın yeri	86
7.3 Depremsellik	88
7.4 Sondaj ve Araştırma Çukurları	88
7.4.1 Araştırma çukurları	89
7.4.2 Sondajlar	90
7.5 İdealize Zemin Profili	90
7.6 Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi	94
7.7 Yükleme Koşulları	94
7.8 Geri Dolgu Malzemesi Analizleri	96
7.8.1.1 Elek analizleri	96
7.8.1.2 Atterberg limitleri	98
7.8.1.3 Saha atterberg limitleri	99
7.8.2 Elektrokimyasal özellikler	99
7.9 Malzeme	100
7.9.1 Yüzey kaplama elemanları	100
7.9.2 Donatı	101
7.10 Tasarım	102
7.10.1 İç ve dış stabilite analizleri.....	102
7.10.1.1 Üst duvar	102
7.10.1.2 Alt duvar	103
7.10.2 Genel stabilite analizleri.....	104
7.10.3 Oturma Analizi.....	106
7.10.4 Zemin ıslahı.....	110
7.10.4.1 Zemin ıslahı projelendirme detayları	110
7.10.5 İyileştirme sonrası genel stabilite analizleri.....	113
7.10.6 İyileştirme sonrası oturma analizleri.....	118
7.11 Drenaj Önlemleri	120
7.12 Dolgu Kontrolü	124
7.13 Uygulamaya İlişkin Sonuçlar ve Genel Değerlendirme.....	126
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	129
KAYNAKLAR	133
EKLER.....	139
ÖZGEÇMİŞ.....	163

KISALTMALAR

a_g	: Pik Yatay Yer İvmesi
a_m	: Maksimum Yatay Deprem İvmesi
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASCE	: American Society of Civil Engineers
ASTM	: American Society for Testing and Materials
b	: Donatı Genişliği
b_f	: Gerçek Sürşarj Genişliği
c	: Kohezyon
C_c	: Konsolidasyon Katsayısı
C_u	: Uniformluk Katsayısı
D	: Palye Genişliği
D_f	: Duvar Gömme Derinliği
D_1	: Etkin Sürşarj Genişliği
D_{60}	: Malzemenin %60'ının Daha Küçük Olduğu Çap Değeri
D_{10}	: Efektif Çap
E	: Young Modülü
e	: Eksantrisite
e_0	: Boşluk Oranı
F^*	: Kopma Dayanım Katsayısı
FHWA	: Federal Highway Administration
G	: Kayma Modülü
G_s	: Güvenlik Katsayısı
GS_{PO}	: Kopma Tahkiki İçin Güvenlik Katsayısı
GPA	: Giga Pascal
H	: Duvar Yüksekliği
H_1	: Mekanik Duvar Yüksekliği
I_1	: Donatı Tırnak Serisi Arası Mesafe
j	: Gerilme Faktörü
K	: Bulk Modülü
K_a	: Aktif Toprak Basıncı Katsayısı
K_p	: Pasif Toprak Basıncı Katsayısı
K_{ab}	: Coulomb Aktif Toprak Basıncı Katsayısı
K_0	: Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısı
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
L	: Donatı Boyu
L_a	: Aktif Bölge Şerit Boyu
L_e	: Pasif Bölge Şerit Boyu
L_1'	: Üst Duvar Şerit Boyu
L_2	: Alt Duvar Şerit Boyu
m	: Janbu Modülü
M_D	: Devirici Moment
M_{WR}	: Yapı Ağırlığından Kaynaklı Tutucu Moment

M_{TR}	: Toprak İtkisinden Kaynaklı Tutucu Moment
MPa	: Mega Pascal
MSE	: Mechanically Stabilized Earth Walls
N'	: Efektif Düşey Kuvvet
N_c	: Taşıma Gücü Faktörü
N_q	: Taşıma Gücü Faktörü
N_γ	: Taşıma Gücü Faktörü
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program
P_a	: Aktif Toprak İtkisi
P_b	: Aktif Kayma Kuvveti
P_I	: Yatay Deprem Kuvveti
P_q	: Sürşarj Yüklerinden Kaynaklı Gerilme
P_r	: Birim Uzunluk Boyunca Tutucu Kayma Kuvveti
P_{AE}	: Sismik İtki
P_{IR}	: Dinamik Atalet Kuvveti
P₁	: Donatı Yüzeyi Tırnaklar Arası Mesafe
PI	: Plastisite İndisi
q_{all}	: Emniyetli Taşıma Gücü
q_{ult}	: Maksimum Taşıma Gücü
R_c	: Kapsama Oranı
REAS	: Reinforced Earth A.Ş.
RECO	: Reinforced Earth Company
S_h	: Yatay Aralık
S_v	: Düşey Aralık
SPT	: Standart Penetration Test
T	: Çekme Kuvveti
T_m	: Şerit Yüzeyinde Maksimum Gerilme
T_{max}	: Maksimum Donatı Gerilmesi
T_{m1}	: Sismik Gerilme Kuvveti 1. Bileşeni
T_{m2}	: Sismik Gerilme Kuvveti 2. Bileşeni
TAI	: Terre Armee Internationale
u	: Boşluk Suyu Basıncı
V_q	: Toprakarme Taban Seviyesinde Toplam Düşey Kuvvet
W	: Yapı ağırlığı
W'	: Şev Dolgusundan Kaynaklı Ağırlık
Z	: Duvar Üst Seviyesinden Düşey Mesafe
ZETAŞ	: Zemin Teknolojisi A.Ş.
α	: Ölçek Düzeltme Faktörü
β	: Toprakarme Dolgu Üstü Şevin Yatay ile Yaptığı Açısı
γ	: Birim Hacim Ağırlık
γ_b	: Toprakarme Dolgusu Birim Hacim Ağırlığı
γ_f	: Temel Zemini Birim Hacim Ağırlığı
ε	: Gerilme Artışından Kaynaklı Deformasyon
δ	: Geri Dolgu Aktif İtkisinin Normail ile Yaptığı Açısı
ρ	: Toprakarme Dolgu-Donatı Arası Kayma Açısı
λ_b	: Toprak İtkisi ile Yatay Düzlem Arasındaki Açısı
Ø	: Kayma Mukavemeti Açısı
Ø_b	: Toprakarme Dolgusu Kayma Mukavemeti Açısı
Ø_f	: Taban Zemini Kayma Mukavemeti Açısı
Δσ_v	: Düşey Gerilme Artışı

$\Delta\sigma_h$	: Yatay Gerilme Artışı
σ_h	: Yatay Gerilme
σ_r	: Referans Gerilmesi
σ_v	: Düşey Gerilme
μ	: Sürtünme Kuvveti Katsayısı
τ	: Donatı Boyunca Meydana Gelen Ortalama Kayma Gerilmesi
ν	: Poisson Oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : KTŞ'ye göre toprakarme dolgusu dane çapı dağılımı	13
Çizelge 2.1 : AASHTO T27'ye göre Toprakarme Dalgusu Dane Çapı Dağılımı.	13
Çizelge 6.1 : Zeminler için janbu tanjant modülleri ve gerilme faktörleri.....	83
Çizelge 6.2 : İnce daneli zeminler için SPT-Janbu tanjant modülü ilişkisi.....	84
Çizelge 6.3 : Kaba daneli zeminler için SPT-Janbu tanjant modülü ilişkisi.	84
Çizelge 7.1: Zemin Parametreleri	95
Çizelge 7.2: Granülometri-Sınır Değerlerin Karşılaştırılması.....	97
Çizelge 7.3: Uniformluk katsayısı-Sınır değerlerin karşılaştırılması	97
Çizelge 7.4: Atterberg limitleri-Sınır değerlerin karşılaştırılması.....	98
Çizelge 7.5: Plastik olmayan malzeme ile karışım sonrası atterberg limitleri	99
Çizelge 7.6: Elektrokimyasal özellikler-Sınır değerlerin karşılaştırılması.....	99
Çizelge 7.7: Genel stabilite analizi sonuçları	105
Çizelge 7.8: İyileştirme sonrası genel stabilite analizi sonuçları.....	115
Çizelge 7.9: Filtre malzemesi gradasyonu.....	120
Çizelge 7.10: Arazi proktor deney sonuçları.	125

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Toprakarme istinat yapısı tip kesiti (REAŞ, 2006)	2
Şekil 1.2 : Tipik bir toprakarme istinat yapısının üç boyutlu görünümü (REAŞ, 2006).....	2
Şekil 1.3 : Bir Toprakarme kenar ayak uygulaması (Baltimore Beltway Maryland USA).....	4
Şekil 1.4 : Esenler Hal Kavşağı TEM Bağlantı Yolu (REAŞ, 2003)	4
Şekil 2.1 : Donatı yüzeyi ile dolgu arasındaki sürtünme kuvveti (Mitchell, 1987).....	5
Şekil 2.2 : Donatı yüzeyinde meydana gelen pasif toprak basıncı (Elias, 2001).....	6
Şekil 2.3 : Lineer tek yönlü metal ve geosentetik donatı enkesiti (Mitchell, 1987)....	7
Şekil 2.4 : Toprakarme elemanlarının şematik gösterimi (ASCE, 1994).....	8
Şekil 2.5 : Kafes Donatılı Toprakarme Yapısı tipik kesiti (Mitchell, 1987)	9
Şekil 2.6 : Çubuk Tipi Donatılı Toprakarme Sistemi (Mitchell, 1987).....	9
Şekil 2.7 : Toprakarme uygulamaları ve geleneksel sistem (Elias ,2001).....	11
Şekil 2.8 : Donatı şeritlerinde tırnakların boyutlandırılması (RECO USA ,2006)....	16
Şekil 2.9 : Yüksek aderanslı çelik şeritlerin çalışma prensibi (Durgunoğlu, 2008) ..	16
Şekil 2.9 : Toprakarme şeritlerinin çalışma prensibi (Liang, 2004)	18
Şekil 2.10 : Metal kaplama eleman enkesiti (NCHRP, 1984)	19
Şekil 2.11 : Beton panel kaplama görünüşü (Elias, 2001).....	20
Şekil 2.12 : Çelik şerit bağlantı elemanları (REAŞ, 2006).....	21
Şekil 2.13 : İlk sıra panellerin payandalanması (REAŞ, 2006)	22
Şekil 2.14 : Montaj Sırası ve Yardımcı Elemanlar (REAŞ, 2006)	23
Şekil 2.15 : Taban tesviyesinde kademelendirme işlemi (REAŞ, 2006).....	23
Şekil 2.16 : Şerit montajı (REAŞ, 2006)	24
Şekil 2.17 : İlk ve ikinci sıra dolgu serilmesi (REAŞ, 2006)	24
Şekil 3.1 : Güçlendirilmemiş Zeminin Göçmesi (Jaky, 1978)	28
Şekil 3.2 : Toprakarme Sisteminde Donatıların Yerleşimi (Jaky, 1978).....	29
Şekil 3.3 : Donatı geometrisi sürtünme katsayısı-düşey mesafe eğrisi (Ingold, 1982).....	31
Şekil 4.1: Uzayamayan donatılı sistemde gerilme çizgisi (Elias, 2001).....	34
Şekil 4.2: Uzayabilen donatılı toprakarme sisteminde maksimum gerilme çizgisi (Elias, 2001).	35
Şekil 4.3: Farklı yöntemlere göre maksimum gerilme hattı (Vidal, 1969).....	36
Şekil 4.4: Dış stabilitede göçme modları (Elias, 2001)	38
Şekil 4.5: Toprakarme sisteminde su basıncı (NCHRP, 1984)	39
Şekil 4.6: Toprakarme sistemi geometrisi ve yükleme koşulları (Berg, 2009)	40
Şekil 4.7: Şevli topuk ve düz topuk için gömme derinlikleri (Elias, 2001)	41
Şekil 4.8: Dolgu arkasında düşey gerilme parametreleri (Elias, 2001)	43
Şekil 4.9: Dış stabilitede Meyerhof formülü (Elias, 2001).....	45
Şekil 4.10: Toprakarme sisteminde devrilme tahkiki (Elias, 2001)	47
Şekil 4.11: Toprakarme sisteminde taşıma gücü tahkiki (Elias, 2001)	49
Şekil 4.12: Toprakarme sisteminde sismik kuvvetler (Elias, 2001)	51

Şekil 4.13: Şerit tiplerine göre yatay gerilme oranı-yükseklik ilişkisi (Elias, 2001).	52
Şekil 4.14: Şevli duvarlarda donatı gerilmeleri (Elias, 2001).....	54
Şekil 4.15: Sürşarj tipine göre düşey gerilme artışı (Elias, 2001)	54
Şekil 4.16: Yatay yükler altında gerilme artışı parametreleri (Elias, 2001)	55
Şekil 4.17: Bağlantı noktalarında şerit kopma tahkiki (Elias, 2001)	56
Şekil 4.18: Uzayamayan donatılı sistemde sismik iç stabilite (Elias, 2001)	59
Şekil 4.19: Ön yükleme ve düşey dilatasyon (Elias, 2001)	61
Şekil 5.1: Kompleks geometrili toprakarme sistemleri (Elias, 2001).....	64
Şekil 5.2: Palyeli duvarlarda maksimum gerilme çizgisi (Elias, 2001).....	66
Şekil 5.3: Üst duvar etkisinde alt duvarda düşey gerilmeler (Elias, 2001).....	67
Şekil 5.4: Cürufli toprakarme dolgusundan kaynaklı deformasyon (Smith, 2003) ..	70
Şekil 5.5: Palyeli duvarlarda terasman dolgusu (TAI, 2000)	71
Şekil 5.6: Palye mesafesine göre topuk dolgusu (TAI, 2000)	71
Şekil 5.7: Örnek palyeli duvar uygulaması (Seattle Airport, RECO, 2003).....	72
Şekil 6.1: Dilim Yöntemi (Zhu, 2003).....	77
Şekil 6.2: Basitleştirilmiş bishop yöntemi için dilim kuvvetleri (McCarthy, 2007)..	78
Şekil 6.3: Bishop yöntemi için önerilen m_a değerleri (McCarthy, 2007)	79
Şekil 7.1: Proje sahası	86
Şekil 7.2: Yer bulduru haritası	87
Şekil 7.3: Toprakarme duvarın konumu	87
Şekil 7.4: Kocaeli ili deprem haritası.....	88
Şekil 7.5: 1,2 ve 3 nolu araştırma çukuru logları	89
Şekil 7.6: 4 ve 5 nolu araştırma çukuru logları	89
Şekil 7.7: Sondaj 1'e ait numune fotoğrafı.....	90
Şekil 7.8: 1 Nolu sondaj logu.....	91
Şekil 7.9: Arazi sondaj ve araştırma çukuru planı	92
Şekil 7.10: Doğu-Batı doğrultusunda jeolojik kesit.....	92
Şekil 7.11: Kuzey-Güney doğrultusunda jeolojik kesit	93
Şekil 7.12: Doğu-Batı doğrultusunda idealize zemin profili	93
Şekil 7.13: Toprakarme duvar yük planı (Doğu-Batı doğrultusu).....	96
Şekil 7.14: 1-2-3 nolu numune gradasyon eğrileri	98
Şekil 7.15: Prekast panel üretimi ve depolanması (REAS, 2013)	100
Şekil 7.16: Toprakarme Şerit Donatıları (REAS, 2013).....	101
Şekil 7.17: Üst duvar için hesap kesiti.....	103
Şekil 7.18: Alt duvar için hesap kesiti	104
Şekil 7.19: Statik durumda genel stabilite	107
Şekil 7.20: Sismik durumda genel stabilite	108
Şekil 7.21: İyileştirmesiz durum için oturma analizi.....	109
Şekil 7.22: Kiriş metoduna göre yük transfer platformu (Collin, 2005).....	112
Şekil 7.23: Kazıklı iyileştirme hattı (REAS, 2013)	112
Şekil 7.24: Zemin ıslah hattı (REAS, 2013)	113
Şekil 7.25: Toprakarme altı derin ıslah sistemi-Analiz kesiti (REAS, 2013).....	114
Şekil 7.26: Geogrid uygulaması-Yük transfer platformu (REAS, 2013)	115
Şekil 7.27: İyileştirilmiş zeminde statik durumda genel stabilite analizi	116
Şekil 7.28: İyileştirilmiş zeminde sismik durumda genel stabilite analizi	117
Şekil 7.29: İyileştirme bölgesi	118
Şekil 7.30: İyileştirme sonrası oturma analizi sonuçları.....	119
Şekil 7.31: Filtre tabakası uygulaması (REAS, 2013).....	121
Şekil 7.32: Toprakarme kesitinde filtre tabakaları (REAS, 2013).....	122
Şekil 7.33: Palye üstü drenaj uygulaması (REAS, 2013)	123

Şekil 7.34: Drenaj borusu çıkışı (REAŞ, 2013).....	124
Şekil 7.35: Laboratuar modifiye proctor sıkışma eğrisi (REAŞ, 2013)	125
Şekil 7.36: Rozak makina dilovası tesisi toprakarme duvarı (REAŞ, 2013).....	128

AŞIRI YÜKLEMELER ALTINDA TOPRAKARME İSTİNAT YAPILARININ TASARIMI

ÖZET

Toprakarme istinat duvarları, konvansiyonel dayanma yapılarına alternatif olarak son 40 yılda yaygın bir şekilde uygulama alanı bulmaktadır. Esnek yapıları nedeniyle büyük deformasyonları karşılayabilmesi, sismik kuvvetler etkisi altında yüksek performans göstermesi, imalat kolaylığı sağlaması ve ekonomik olması yönü ile karayolu, demiryolu, fabrika inşaatlarında, su ve liman yapılarında bu sistem tercih edilmektedir. Gelişen dünya ile birlikte zorlayıcı topoğrafik ve jeolojik koşullar altında mühendislik yapılarının inşa edilmesi bir zorunluluk olarak ortaya çıkmıştır. Geleneksel sistemlerin ekonomik çözümler ortaya koyamadığı bölgelerde, toprakarme istinat sistemleri önemli bir alternatif olmuştur. İnşa edilecek yapıların ekonomik, işlevsel ve güvenli olması, toprakarme istinat sistemlerinin doğru tasarımı ile mümkün olmaktadır. Taşıma gücü kontrolü, oturma analizleri, sistemde meydana gelebilecek devrilme ve kayma gibi geoteknik problemler, toprakarme istinat yapılarının analiz edilmesinde göz önüne alınması gereken başlıca kritik durumlardır. Ortaya çıkan kompleks geometriler ve bu geometrilerin bir sonucu olarak meydana gelmesi beklenen yüksek sürşarj yüklemeleri, istinat yapısının inşa edileceği bölgedeki zemin koşulları ile bir arada düşünüldüğünde, bu etkiler altındaki toprakarme istinat yapılarının tasarımının bir geoteknik problemi olduğu, bu problemin çözümünün geoteknik mühendisliğinin temel yaklaşımları ile mümkün olabileceği anlaşılmaktadır. Bu yaklaşımlar kapsamında, imalat ve tasarım süresince, sistemin temel bileşenlerinden, donatı, dolgu ve yüzey kaplama elemanları gibi yapısal elemanların ve çevresel koşulların doğru analiz edilmesi problemin doğru bir şekilde anlaşılması ve çözümlenmesi açısından gereklidir. Söz konusu durum, bu tez çalışması kapsamında, toprakarme istinat yapılarının tipleri ve genel hesap yöntemleri ile ortaya konmuştur. Sonrasında bu yöntemler ışığında, palyeli geometriler için hesap yaklaşımları araştırılmıştır. Derlenen veriler göz önüne alınarak bir proje vaka analizi üzerinden, aşırı yüklemelere maruz kalacağı öngörülen palyeli bir toprakarme istinat yapısının tasarımı araştırılmıştır. Tasarım kapsamında ilk olarak, mevcut geoteknik koşullar için yapı davranışı incelenmiştir. Sistemde meydana gelebilecek stabilite problemlerine karşı alınacak önlemler araştırılmıştır. Sistemin, tasarıma uygun bir şekilde imalatının yapılması, analiz sonuçlarının gerçeği yansıtması açısından son derece önemlidir. Bu amaçla, imalat sırasında, dolgunun her bir tabakası üzerinde sıkışma kontrolleri yapılarak, elde edilen veriler, imalat öncesinde yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlarla, dolgunun şartnamelerce belirlenen kriterlere uygunluğu doğrulanmıştır.

DESIGN OF MECHANICALLY STABILIZED EARTH (MSE) WALLS UNDER EXCESSIVE LOADINGS

SUMMARY

Retaining structures are indispensable elements of every highway and railway design. Retaining structures are used not only for bridge abutments and wing walls but also for slope stabilization and to minimize the amount of embankments in construction of different type of structures such as factories, dams and, railways. For many years, retaining structures were almost exclusively designed as a conventional solutions which is made of reinforced concrete and with the gravity or cantilever type walls which are essentially rigid structures and cannot perform well against significant differential settlements unless founded on deep foundations. With increasing height of the filling soil to be retained and poor foundation conditions, the cost of reinforced concrete retaining walls increases rapidly.

Mechanically Stabilized Earth Walls (MSE) is cost-effective reinforced-soil structures that can accommodate much larger settlements than conventional retaining structure systems. Using reinforcing elements in the soil mass, the strength of the soil can be improved. Facing system is generally essential to prevent soil raveling between the reinforcing elements. MSE system allows very steep slopes and vertical walls to be constructed safely.

Different type of methods have been used since ancient times to improve soil. The use of straw to improve the quality of adobe bricks had been observed since the earliest human history. Many primitive people used wooden sticks to support mud dwellings. French natives along the Bay of Fundy in Canada used sticks to reinforce mud dikes for 200 years approximately during the 17th and 18th century. Some other early examples of basic soil reinforcement methods include dikes of earth and tree branches, which have been used in China and along the Mississippi River. Other examples include wooden pegs for preventing of erosion and landslide control in England, and bamboo or wire mesh, used for revetment erosion control. Soil reinforcing can also be achieved by using live plant roots.

The modern methods of soil reinforcement for retaining wall construction were developed by the French architect and engineer Henri Vidal in the early 1960s. His research led to the invention and engineering phenomena of Reinforced Earth, a system in which steel strips are used for reinforcing the soil mass. Today, MSE walls are the wall of choice in most fill situations, and MSE walls are used extensively in worldwide.

MSE wall systems has many advantages compared to the classical systems by means of their flexibility, high seismic performance, easy construction facilities and cost

saving parameters. Main application areas can be classified as, highways, railways, factory constructions, hydraulic and shore structures.

Cost saving advantage of MSE walls are the main reason of choosing this system in engineering applications. Site specific costs of a MSE structure depend on many parameters, such as cutfill amount, wall-slope size and type, soil type, backfill material quality, facing type, temporary or permanent applications. It has been found that MSE walls with precast concrete facings are usually less expensive than conventional type of retaining structures.

Construction in extreme environmental and geological conditions has appeared as an obligation with the development of industry and urban cities. MSE wall has been preferred as an alternative of the conventional systems where the classical methods can not be applied properly. The main properties of a structure, listed as economy, safety and functionality, can be provided by the correct design of MSE walls.

MSE walls are usually designed according to Load and Resistance Factor Design (LRFD) method. In LRFD, the external and internal stability of the MSE wall is evaluated at all appropriate strength limit states. Besides, overall stability and lateral/vertical wall movement are evaluated at the service limit state, as well. Extreme case load combinations are used to design and analyze for conditions such as vehicle impact, excessive surcharge loadings and seismic effects.

For the internal stability analysis, tensile and pullout resistance of the reinforcement is checked. The structural resistance of facing elements and connection parts should be checked, too. Limiting eccentricity, sliding and bearing resistance cases should be considered for the external stability check, according to LRFD design of the MSE walls. Overall stability and compound stability cases are mostly related to global stability.

The external stability of an MSE wall is maintained assuming that the reinforced soil mass acts as a rigid body. This is because, the wall facing and the reinforced soil act as a coherent block with lateral earth pressures acting on the back side of that block in the proper design. This is called coherent gravity method.

Internal stability analysis depend on the soil-reinforcement interaction, tensile resistance of the reinforcement and durability of the reinforcing strips. Calculations are listed respectively as determination of the maximum factored load for each reinforcement, comparison of this maximum factored load to the factored pullout resistance and to the factored tensile resistance of the reinforcement for all applicable strength, service, and extreme event limit states.

The major geotechnical engineering problems such as bearing capacity, differential or total settlement, overturning and sliding should be taken into consideration during the design of a retaining wall. These conditions are valid for MSE walls as well. The design of MSE wall should be examined as a geotechnical problem when this issue meets with the environmental effects with the complex geometries and excessive surcharge loadings. The solution of this problem is possible with the logical determination of construction components and environmental conditions during the design and application on site.

This master thesis is prepared to explain the typical systems of MSE types with general calculation hypothesis. The design methods for tiered MSE walls are researched.

After that, a case study has been investigated including a tiered MSE wall faces with excessive surcharge loadings. The design of MSE wall is explained with the consideration of geotechnical conditions. Structural behavior is questioned. The precautions against possible stability problems are explained in detail.

Mechanical and electrochemical properties of backfill material is also explained. The results of necessary tests are compared with the limit values in the related codes and standards. Suitable fill material affects the wall performance by the durability of the structure in the long term.

The general terms of typical design of Mechanically Stabilized Earth Walls are valid for this project. On the other hand, assumptions for the analysis should be reconsidered because of the complex geometry of the structure. The excessive loadings caused by trucks, cranes and storage area require special solution that consider the situation as a geotechnical engineering problem. Therefore, analysis carried on by this point of view.

Soil improvement is an important topic for the structures constructed on poor foundation soils. This project has been examined for soil improvement. It is clear that, MSE wall system can not be designed properly without any soil stabilization application under excessive loadings with poor subsoil conditions. Therefore, suitable improvement system was chosen for this application. Project details were explained. The stability analysis before and after the improvement were compared in order to show the efficiency of stabilization method.

It is important that, construction works and site applications should be compatible with numerical analysis of the design. For this purpose, each layer of the fill has been tested by its compaction behavior. Compaction test results have been compared with the tests carried out before the construction. The validity of test results has been shown by comparing the results with the interval values noted in the standards.

MSE wall design is a complete geotechnical engineering problem if the structure is expected to resist excessive surcharge loads with the poor subsoil conditions. Therefore, the design of the MSE wall is a complex task that requires detailed site investigation and a series of analysis. All of the stability conditions for static and seismic cases should be confirmed. The proper design of the structure should be based on this methodology.

1. GİRİŞ

1.1 Toprakarme İstinat Yapıları Genel Konsepti

İstinat yapıları, yol, yapı, altyapı tasarımları başta olmak üzere inşaat mühendisliğinin bütün uygulama alanlarında sıkça kullanılmaktadır. Öncelikli olarak yol inşaatlarında topografik koşulların bir sonucu olarak dayanma yapılarının kullanılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu noktada alternatif istinat yapılarının tasarım ve kullanımı önem kazanmaktadır.

İstinat yapıları; yol projelerinde, köprü ve kavşak yaklaşımlarında, şev stabilitesi sorunu bulunan bölgelerde, yol genişletme çalışmalarında çokça kullanılmaktadır. Uzun yıllar boyunca istinat yapılarının tamamına yakını betonarme olarak tasarlanmış ve uygulanmıştır. Bu duvarlar ağırlık tipi olarak çalışmaktadır. Ancak betonarme istinat yapılarının rijit özellikte olması ve temel zemininde büyük gerilmeler oluşturması, derin temel sistemlerinin kullanılmaması durumunda oturma ve taşıma gücü problemleri yaratmıştır. Yüksek kesitlerin ortaya çıkması, bu tipteki istinat yapılarının zayıf zemin koşullarındaki performansını düşürmüştür. Söz konusu problemlerin çözümü aşamasında, konvansiyonel betonarme istinat yapılarının maliyetleri ciddi bir artış göstermiştir.

Bu noktada, toprakarme istinat yapıları, betonarme istinat yapılarına bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Toprakarme istinat yapılarının önemli bir özelliği, konvansiyonel sistemlere göre daha büyük deformasyonları karşılayabilmesidir. Bu yapıların tasarımı, zemin içerisinde yerleştirilen çelik donatıların, sıkıştırılmış geri dolgu ile arasında meydana gelen sürtünme kuvveti sayesinde taşıyıcı özelliği olan, sağlam, kompozit bir yapı oluşturulması esasına dayanır.

Klasik bir toprakarme istinat yapısı yatay olarak serilip sıkıştırılan bir dolgu içerisine gömülü olarak bulunan donatılardan ve seçilen bir yüzey kaplama sisteminden oluşmaktadır. Yapı içerisinde kullanılacak donatılar metal ya da polimer olarak seçilebilmektedir. Yüzey kaplamasının başlıca amacı, kullanılan geri dolgunun, donatıların arasından akmasını önlemektir. Kaplama elemanları genellikle betonarme

olarak imal edilir ve yapısal elemanlarla donatılara bağlantısı sağlanır. Kaplama elemanları prekast betonun yanı sıra çelik kafes olarak da yapılabilmektedir. Bağlantı elemanları ise çeliğin yanında polimer olarak imal edilebilir.

Şekil 1.1 : Toprakarme istinat yapısı tip kesiti (REAŞ, 2006)

Şekil 1.2 : Tipik bir toprakarme istinat yapısının üç boyutlu görünümü (REAŞ, 2006)

1.2 Tarihsel Gelişim

Zemin içinde donatı kullanılarak güçlendirme fikri çok eski zamanlarda çeşitli şekillerde günlük hayatta kullanılmıştır. Kerpiç bloklarının içinde güçlendirmek amacıyla saman kullanılması, çamur karışımların içinde ahşap çubukların kullanımı,

tarihten uygulanmış güçlendirme yöntemlerindendir. 17. ve 18. yüzyılda Kanada da çamur hendeklerini güçlendirmek için ahşap çubuklar kullanılmıştır. Ayrıca günümüzden yaklaşık 1000 yıl önce Çin'de ağaç dalları kullanılarak daha yüksek dayanımlı toprak yapılarının elde edildiği bilinmektedir. Aynı yöntem 1880 li yıllarda Mississippi nehri kıyılarında da uygulanmıştır. İngiltere'de toprak kaymalarına karşı zemin içerisinde kullanılan ahşap parçaları da eski dönemlerde iyileştirme amacıyla zemin içerisinde kullanılan yardımcı elemanlardandır.

Zeminlerin donatılar kullanılarak güçlendirilmesinin sistemli bir mühendislik yaklaşımıyla gerçekleştirilmesi 1960'lı yıllara denk gelir. Fransız mimar mühendis Henry Vidal 1966 yılında çekme dayanımlı donatılarla güçlendirilmiş zeminlerin pratik kullanımı üzerine rasyonel dizayn prosedürleri geliştirmiştir. Bununla beraber toprakarme istinat duvarlarının uygulamaları tüm dünyada büyük hız kazanmış ve ilgi görmüştür. Klasik sistemlere göre imalat, performans ve ekonomi yönünden getirdiği avantaj ve yenilikler toprakarme istinat yapılarının yenilikçi bir uygulama olarak talep görmesinin önünü açmıştır. 1970 li yıllarda prekast cephe panellerinin ilk defa kullanımı, tırnaklı donatıların üretilmesi, bu teknolojinin dönüm noktası kabul edilir (Elias, 2001).

1980li yıllardan itibaren ülkemizde de uygulama alanı bulan toprakarme istinat duvarları, inşaat mühendisliği alanında son 40 yılın önemli yeniliklerinden kabul edilmektedir. Son 20 yıl içerisinde sadece Türkiye'de 400000 m² nin üzerinde toprakarme duvar imalatı yapılmıştır. Karayollarında köprü yaklaşımları ve kenar ayaklar toprakarme sisteminin en çok uygulandığı yerlerdir. Bunun yanında askeri yapılarda, demiryollarında, sanayi yapılarında, barajlarda, kıyı ve liman yapılarında bu sistem tercih edilmektedir (Durgunoğlu, 2008).

Esnek istinat yapıları dünya çapında uygulanmaya devam etmektedir. Yapıların tasarımına ilişkin şartnameler, bu teknolojinin profesyonel anlamda uygulandığı ve geliştirildiği Fransa, Amerika, Almanya gibi ülkelerde hazırlanmıştır. Malzeme, imalat, tasarım konusunda her geçen gün yeni mühendislik yaklaşımları ortaya konmakta, sistem gelişimini sürdürmektedir.

Şekil 1.3 : Bir toprakarme kenar ayak uygulaması (Baltimore Beltway Maryland USA)

Şekil 1.4 : Esenler Hal Kavşağı TEM Bağlantı Yolu (REAŞ, 2003)

2. TOPRAKARME İSTİNAT YAPI SİSTEMİ

2.1 Yapı Tipleri

Toprakarme istinat yapıları genel olarak üç temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar:

- Donatı
- Seçilmiş Dolgu
- Yüzey kaplama elemanları

Bazı toprakarme sistemlerinde dördüncü bileşen olarak panel-şerit bağlantısının elemanları da sayılabilir. Tüm sistemlerde bu bileşenlerin özellikleri dikkate alınarak dizayn yapılır.

Toprakarme sistemleri kullanılan donatı malzemesine, donatı geometrisine, yüzey kaplama elemanlarının ve bağlantılarının tipine ve çalışma mekanizmasına bağlı olarak sınıflandırılır. Donatılar çelik veya geosentetik malzemeden imal edilebilir. Şekil olarak donatılar ise şerit, kafes, kablo şeklinde olabilmektedir. Donatıların temel çalışma prensibi aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Donatı yüzeyi ile dolgu arasındaki sürtünme kuvveti
- Donatı yüzeyinde rölatif hareketin normali doğrultusunda oluşan pasif toprak basıncı

Şekil 2.1 : Donatı yüzeyi ile dolgu arasındaki sürtünme kuvveti (Mitchell, 1987)

Şekil 2.2 : Donatı yüzeyinde meydana gelen pasif toprak basıncı (Elias, 2001)

Geometriye göre donatılar üçe ayrılmaktadır:

- **Lineer tek yönlü donatılar:** Nervürlü veya düz çelik şeritler, kaplamalı geosentetik şeritlerdir.
- **Kompozit tek yönlü donatılar:** Ağ Aralığı 150 mm' den büyük kafes tipi donatılardır.
- **Düzlemsel çift yönlü donatılar:** Kaynaklı veya dikişli olabilen geosentetik elemanlardır. Ağ aralığı 150 mm'den küçüktür.

Malzeme tipine göre donatılar ikiye ayrılır:

- **Metal donatılar:** Tipik yumuşak çelikten üretilir. Malzeme galvaniz veya epoksi kaplanarak kullanılır
- **Metal olmayan donatılar:** Genel olarak geosentetik malzemeden imal edilirler. Polipropilen, polietilen veya polyester özellikte olabilirler.

Uzama özelliklerine göre donatılar ikiye ayrılır:

- **Uzayamayan donatılar:** Göçme anındaki donatı deformasyonu, zeminin uğradığı deformasyondan daha azdır. Deformasyona izin vermeyen tipte donatılar bu sınıfa girer. Çelik donatılar buna örnektir.
- **Uzayabilen donatılar:** Zemin ve donatının aynı anda veya kıyaslanabilir mertebede göçtüğü kabul edilen tipte donatılardır. Geosentetik donatılar buna örnektir.

2.1.1 Şerit tipi donatılı toprakarme yapıları

Bu yöntem, lineer doğrusal şerit tipi donatılarla, seçilmiş dolgu arasındaki meydana gelen sürtünme kuvveti esasına dayanır. Metal veya geosentetik şeritler, tabakalar halinde serilerek sıkıştırılan dolgu ile birlikte taşıyıcı özellik kazanır. Mukavemet mekanizması donatının imal edildiği malzemeye ve donatı geometrisine bağlıdır.

Şekil 2.3 : Lineer tek yönlü metal ve geosentetik donatı enkesiti (Mitchell, 1987)

Toprakarme sistemi, düz veya tırnaklı donatılar ile inşa edilen bir yapıdır. Metal veya beton kullanılarak imal edilen prekast yüzey elemanları ile şeritler birbirine bağlanır. Şartnamelerle belirlenen geoteknik özellikleri sağlayan geri dolgu malzemesi toprakarme sisteminin diğer bileşenidir.

Çelik şerit donatılara alternatif olarak toprakarme yapılarında kullanılan geosentetik şeritler, korozyonun fazla olduğu bölgelerde tercih edilebilmektedir. Prensip olarak çelik şeritli toprakarme yapılarına benzer şekilde tasarımı yapılarak imal edilirler. Geri dolgu olarak kum-çakıl boyutunda granüler malzeme kullanılır.

2.1.2 Kafes tipi donatılı toprakarme yapıları

Bu tip donatılar, çekme dayanımı yüksek, metal ya da polimerden imal edilen yapısal elemanlardır. Kafes tipi donatıların dikdörtgen ızgaralar halinde yatay olarak dolgu içerisine yerleştirilmesi sonucu, istinat yapısı inşa edilir. Dayanım özelliği, şerit tipi donatılar ile yapılan toprakarme duvarlarda olduğu gibi dolgu-donatı arasındaki

yüzeysel sürtünme kuvveti ve şerit üzerinde meydana gelen pasif toprak basıncına bağlıdır.

Şekil 2.4 : Toprakarme elemanlarının şematik gösterimi (ASCE, 1994)

Izgara tipi kafes donatılı istinat yapılarında, her tabakadaki donatı elemanı bükülerek bir üstteki tabakada yer alan donatı tabakasına bağlanır. Kafes donatılar bir başka toprakarme tipi olan donatılı zemin dolgularda da yer almaktadır. Bu tipte kafes yapılar prekast beton paneller ile birlikte kullanılır.

Polimerden imal edilen kafes tipi donatılar, çevresel faktörlerin uygun olmadığı korozyon ortamlarda ve su etkisinde kalması öngörülen istinat yapılarında kullanılmaktadır. Yüzey kaplamasında donatıların boğçalanması yönteminin yanında gabion ve beton paneller kullanılabilir.

2.1.3 Tabaka tipi donatılı toprakarme yapıları

Sürekli tabakalar halinde yatay doğrultuda zemine serilen geotekstiller ile dolgunun sıkıştırılması sonucu elde edilen yüksek dayanımlı kompozit yapının elemanlarıdır. Geotekstil malzemeler genelde polyester veya polipropilen özelliktedir. Kaynaklı, dikişli, reçineli geotekstil ürünler de bu donatı sınıfına girer. Toprakarme dolgu malzemesi siltli kum-çakıl boyutunda seçilmiş granüler özelliktedir. Yüzey kaplamasında genellikle boğçalama yöntemi tercih edilmektedir. Buna alternatif olarak gabion ve beton paneller de kullanılmaktadır. Geotekstil donatılar ile toprakarme duvarın yapısal elemanları bindirme, çivileme gibi bağlama yöntemleriyle birbirine sabitlenir.

Şekil 2.5 : Kafes Donatılı Toprakarme Yapısı tipik kesiti (Mitchell, 1987)

2.1.4 Çubuk tipi donatılı toprakarme yapıları

Ankrajlı zemin olarak da isimlendirilen bu sistemde zemin-donatı arası gerilme transferi pasif dayanıma dayanır. Bu yönden geleneksel ankrajlı iksa sistemine benzer. Toprakarme prensibinde zemin-donatı arasında meydana gelecek direncin donatı boyunca meydana gelmesi beklendiğinden, bu sistem tam olarak bir toprakarme yapısı olarak tanımlanamaz. Ancak oluşan kompozit yapı, yine de dayanma yapısı özellikleri taşımaktadır. Zemin içindeki ankrajlar bu sistemde de prekast yüzey panellerine bağlanır.

Şekil 2.6 : Çubuk Tipi Donatılı Toprakarme Sistemi (Mitchell, 1987)

2.1.5 Lif tipi donatılı toprakarme yapıları

Bu sistemde gelişmiş mekanik özelliklere sahip çekme dayanımı yüksek lifler, seçilmiş dolgu malzemesi ile birlikte taşıyıcı özellik göstermektedir. Zemin içinde

lifler kullanılarak uygulanan iyileştirme sistemi henüz gelişiminin başındadır ve yaygın biçimde kullanılmamaktadır. Lif olarak kullanılabilecek malzeme türleri halen araştırılmaktadır. Malzeme olarak, doğal lifler, sentetik lifler (geotekstil kökenli) veya küçük boyutlu metal elemanlar kullanılabilir.

2.1.6 Gözenekli donatılı toprakarme yapıları

Gözenekli donatılar yapısal dolguların temellerinde, zayıf zemin üzerine inşa edilecek yapı temellerinde ve şevli dolguların stabilizasyonunda kullanılabilmektedir. Bu sistemde kullanılacak donatıların laboratuvar ve sahadaki deney çalışmaları genellikle Amerika'da yapılmaktadır.

2.2 Şerit Donatılı Toprakarme Yapılar

2.2.1 Şerit donatılı toprakarme uygulamaları

Şeritli toprakarme sistemleri, klasik betonarme veya ağırlık tipi istinat yapılarına göre daha ekonomik bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Toprakarme istinat köprü kenarayaklarında, yaklaşım dolgularının ve şevlerin stabilizasyonunun sağlanmasında yaygın olarak kullanılan yapılardır. Uzun yıllar boyunca tüm dayanma yapıları betonarme olarak dizayn edilmiş ve uygulaması yapılmıştır. Bu yapıların rijit özellikte olmasından dolayı zayıf zemin koşullarında farklı oturmalarla karşı risk teşkil ettikleri bilinmektedir. Taban zemininde büyük gerilmeler meydana getirmeleri, taşıma gücü problemlerine de sebep olmaktadır. Konvansiyonel betonarme istinat yapıları, bu problemlerden dolayı kazıklı temel sistemleriyle birlikte inşa edilmiştir. Zayıf zemin koşulları ve depremsellik gibi etkenler, duvar yüksekliğinin artmasıyla birlikte büyük maliyetler doğurmaktadır.

Toprakarme istinat duvarları, oturmalarla karşı daha yüksek toleranslar gösterebilmesi yönünden betonarme istinat yapılarından farklı olarak ek önlemler gerektirmemektedir. Bu nedenle maliyetleri daha düşüktür. Sıkıştırılmış dolgu içine serilen donatılar ile iyileştirilmiş kompozit bir zemin kütlesi elde edilir. Donatılar arasında bulunan dolgunun akmasını önleyici bir yüzeysel kaplama sistemi yardımıyla dik eğimli ve düşey istinat yapıları güvenle inşa edilebilmektedir. Bazı durumlarda, kayma kuvvetine karşı çalışan donatılar ekstra stabilite sağlayabilmektedir. Bu durum donatıların içinde bulunduğu seçilmiş dolguya direkt olarak bağlıdır.

Toprakarme istinat yapıları zayıf zemin özelliği gösteren bölgelerde konvansiyonel betonarme istinat yapılarından çok daha avantajlı olabilmektedir. Kritik zemin koşullarında ve yüksek sismisiteye sahip bir alanda yapılacak konvansiyonel istinat sistemleri, taban iyileştirmesi için ek önlemler gerektirecektir. Esnek istinat yapıları bu koşullarda göreceli olarak daha küçük çapta önlemlerle inşa edilmektedir. İyileştirme önlemlerinin önüne geçilmesiyle toplam inşaat maliyeti %50' ye varan oranlarda azalabilmektedir.

Şekil 2.7 : Toprakarme uygulamaları ve geleneksel sistem (Elias ,2001)

2.2.2 Yapısal elemanlar

Toprakarme sisteminin başlıca yapısal bileşenleri aşağıdaki gibidir:

- Seçilmiş Dolgu
- Donatı

- Yüzey Kaplama Elemanları
- Şerit- Kaplama Bağlantı Elemanları

Yapısal elemanlar ile ilgili detaylı açıklamalar aşağıda verilmiştir.

2.2.2.1 Seçilmiş dolgu

Toprakarme istinat duvarlarının tamamına yakınında geri dolgu malzemesi olarak granüler nitelikte kaba daneli malzeme tercih edilmektedir. Bazı mekanik özellikleri karşılaması şartıyla uçucu kül, cüruf gibi artık malzemeler de dolgu malzemesi olarak kullanılabilir.

Kaba daneli dolgu malzemesinin en önemli avantajı uygun sıkıştırma koşullarıyla yüksek mukavemetli olabilmesidir. Granüler nitelikte olması, donma etkilerine karşı iyi performans göstermesi, şeritler açısından korozyon etkilerine karşı güvenli olması, kaba malzemenin diğer avantajlarıdır. İnce malzemelerin en büyük avantajı ise granüler geri dolgu malzemesine göre daha düşük maliyetli olması ve daha kolay temin edilebilmesidir. İnce malzeme içeren dolgu ile tasarlanan donatılı istinat yapılarında, dolgunun korozyon etkisine karşı geosentetik donatılar tercih edilmektedir. (Güler, 2011) Bunun yanında uzun vadede ince daneli dolgular donma ve korozyon etkisiyle durabilite problemi yaratabilmektedir. Dolayısıyla seçilmiş dolgunun akmasıyla aderans ve sürtünme kuvveti kaybı meydana gelebilir.

Toprakarme istinat yapılarının imalatında dolgu seçimi önemli bir husustur. Belirlenen kriterlere uygun malzemenin inşaat sahasına yakın bir yerden getirilmesi imalat süresi ve ekonomi açısından büyük önem teşkil eder. Seçilen malzemenin gerekli saha ve laboratuvar deneyleri yapılarak, tasarım için uygun nitelikleri taşıyıp taşımadığı kontrol edilmelidir.

Dolgu malzemesinin kontrol edilmesi gereken özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Birim Hacim Ağırlık (γ)
- Kayma Mukavemeti Açısı ($\emptyset$)
- Dane Çapı Dağılımı
- Uniformluk Katsayısı (C_u)
- Kompaksiyon Yüzdesi
- pH değeri
- Klor iyonu içeriği

- SO₃ içeriği
- Redoks Potansiyeli
- Rezistivite
- Dolgu ile donatı arasındaki sşrtşnme kuvveti katsayısı
- Organik içerik oranı

İnce dane içeren dolgular için aşağıdaki parametreler de kontrol edilmelidir:

- Kohezyon
- Dolgu ile donatı arasında aderans kuvveti
- Likit Limit
- Plastisite İndisi
- Konsolidasyon Parametreleri

Yukarıda sıralanan parametreler için aranan değerler şartnamelerde belirlenmiştir. Her yşnetmelikte aranan değerler değişkenlik gşstermekle birlikte genel anlamda uyumludur. FHWA ve AASHTO tarafından şnerilen değerler ile Karayolları Teknik şartnamesinde (2006) şnerilen izelge 2.1'de listelenmiştir.

Çizelge 2.1 : KTş'ye gşe toprakarme dolgusu dane çapı dağılımı (2006).

Elek Boyutu (mm)	% Geçen
125 (5")	100
75 (3")	85-100
12.5 (1/2")	25-100
2 (No.10)	15-100
0.59 (No.30)	10-65
0.075 (No.200)	<15

Çizelge 2.2 : AASHTO T27'ye gşe toprakarme dolgusu dane çapı dağılımı.

Elek Boyutu (mm)	% Geçen
102 (4")	100
0.425 (No. 40)	0-60
0.075 (No.200)	0-15

Toprakarme dolgu malzemesinin Őniformluk Katsayısı $C_u > 4$, Plastisite İndeksi $PI < 6$ olmalıdır. Uniformluk katsayısı değerı şerit-dolgu arasındaki sşrtşnme katsayısıyla direkt olarak ilişkilidir. Bu değerın yşksek olması dolgu-şerit arasındaki aderans kuvvetini arttırması yşnşnden şnemlidir.

Dane apı dağılımında en önemli kriter ince malzeme oranıdır. Toprakarme dolgusu olarak seçilecek malzemenin içinde 200 nolu elekten geçen malzeme oranı %15'den fazla olmamalıdır. Drenaj ve durabilite açısından bu değere özellikle dikkat edilmelidir. Bu açıdan ideal toprakarme malzemesi kırmataş olarak seçilebilir.

Dolgu malzemesinin standart proktor yüzdesi minimum %95 olmalıdır. Toprakarme duvar yüksekliğinin fazla olduğu, yapının yüksek sürşarj yüklemelerine maruz kalacağı durumlarda sıkışma kontrolü modifiye proktor testi ile yapılmalıdır. Aranan sıkışma yüzdesi yine minimum %95 olarak verilmektedir. Sıkıştırma ekipmanları duvar yüksekliklerine göre seçilmelidir. Yüksekliği 2 metreden az olan yapılarda yüksek toprakarme duvarlara göre daha hafif ekipmanlar kullanılmalıdır. Bu durum imalat sırasında ekipmanların çalışmasından doğacak düşey deformasyonları önler.

Toprakarme dolgusunun içsel sürtünme açısına ilişkin şartnamelerde belirlenen bir limit değer yoktur. Ancak yukarıda tariflenen mekanik özelliklere sahip dolguların toprakarme istinat yapılarında iyi performans gösterdiği görülmüştür. Tavsiye edilen minimum içsel sürtünme açısı değeri 34° olarak verilmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü toprakarme dolgularında 36° içsel sürtünme açısı tavsiye etmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda bazı uniform dağılımlı ince kumların 31-32° aralığında içsel sürtünme açısı değerine sahip olmasına rağmen toprakarme dolgusu özelliği taşıdığı görülmüştür. Malzeme numuneleri üzerinde yapılan üç eksenli basınç dayanımı ve direk kesme deneyi sonuçlarına göre bu değerler doğrulanmalıdır. İçsel sürtünme açısının 40° sınırının üstünde verildiği malzemelerin kullanılmasında mekanik özelliklerin sahada ve arazide yapılacak deneylerle doğrulanması önemlidir.

Plastisite indisi ve gradasyon açısından verilen kriterlere uymayan dolguların kullanılması, kısa dönem ve uzun dönemde yapıda i ve dış stabilite problemleri yaratmakta, drenaj sorunları ortaya çıkarmaktadır. İnce malzemenin dolgu içinde fazla olması oturma problemleri ortaya çıkarabilmekte, şeritlerin paneller ile bağlantı noktalarında oturmadan kaynaklı deformasyona uğramalarına sebep olmaktadır. Suyun, ince malzemenin fazla olduğu toprakarme dolgusundan drene olamaması, tasarımda hesaba katılmayan hidrostatik basınç kuvvetlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Bu da yapıda servis ömrü süresince stabilite problemleri doğurmaktadır. Elektrokimyasal zelliklerin kontrolü dolgu içinde yer alan şerit performansı açısından göz önüne alınması gerekir. Dolgunun korozif nitelikte olması, elik

şeritlerin uzun dönem dayanımını düşüren bir faktördür. Elektrokimyasal özellikler için Karayolları Teknik Şartnamesi ve AASHTO benzer sınır değerler belirlemiştir.

Çizelge 2.3 : Toprakarme dolgusu elektrokimyasal özellikleri.

Elektrokimyasal Özellik	KTŞ	AASHTO	Test Yöntemi
Rezistivite (ohm-cm)	>3000	>3000	ASTM G 57
pH	5-10	5-10	ASTM G 51
Suda Çözülebilir Klorit İyonu (mg/kg)	<100	<100	ASTM D 512
Suda Çözülebilir Sülfat İyonu (mg/kg)	<200	<200	ASTM D 516
Minimum Redoks Potansiyeli (volt)	0.40	0.40	ASTM D 1498
Maksimum Organik Madde İçeriği (%)	0.2	1	ASTM D 2974

2.2.2.2 Donatı şeritleri

Toprakarme istinat yapılarında kullanılacak şerit donatıların sahip olması gereken karakteristik özellikler aşağıdaki gibidir:

- Şeritler toprakarme dolgusu ile birlikte yüksek aderans sağlayacak özellikte olmalıdır
- Şeritler yüksek çekme mukavemetine sahip olmalıdır.
- Şeritler imalatın güvenle sürdürülebilmesi için deformasyonları karşılayabilecek esneklikte olmalıdır. Gevrek nitelikte olmamalıdır
- Şeritler yüksek durabilite performansı göstermelidir.
- Ekonomik yönden cazip olmalıdır.

Donatı şeritleri metal veya polimer malzemeden imal edilebilir. Şeritlerin genel geometrik özellikleri iki ana malzeme için aşağıdaki gibidir:

(a) Metal panel kullanılan toprakarme yapılarında şeritler yüzey kaplama elemanları ile aynı malzemeden üretilir. Galvaniz daldırma çelik şeritler yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalınlıkları değişken olmakla birlikte 4-6 mm arasında değişir. Genişlikleri ise 40-65 mm aralığındadır.

(b) Prekast beton panellerin kullanıldığı toprakarme yapılarında şeritler daldırma galvanizli çelikten üretilir. Boyutları 40x4mm, 50x4mm, 50x5mm, 60x5mm şekilde olabilir. Kullanılan şerit boyutları proje ihtiyacına ve yapı sınıfına göre değişkenlik gösterebilir. Şerit tipi seçiminde yapının ekonomik olarak tasarlanması da bir başka kriterdir. Dolgu ile şerit arasındaki aderans kuvvetinin artırılması için çelik şeritler tırnaklı olarak imal edilirler.

$$I_1, I_3 > 10 \text{ mm} \quad I_2 > 95 \text{ mm}$$

16

Mekanik özellikler aşağıdaki gibidir:

- Kopma Dayanımı: Minimum 510 Mpa
- Akma Dayanımı: Minimum 355 Mpa

Sıcak daldırma galvaniz kalınlığı ise minimum 70 µm olarak önerilmektedir.

Çelik şeritler, toprakarme sisteminin en hassas elemanlarıdır. Yapı performansı önemli ölçüde şerit performansına bağlıdır. Şeritlerin şartnamelere uygun mukavemette olması, galvaniz kalınlığının istenen seviyede olması, servis ömrü boyunca performansın istenen seviyede olmasını sağlar. Aktif iyon içeren agresif dolgularda, çelik şerit korozyona uğrayarak mukavemetini zaman içinde kaybedebilmektedir.

İnce malzeme oranı yüksek dolgular, kum-çakıl özellikteki granüler dolgu malzemelerine göre korozyon açısından daha yüksek potansiyel taşımaktadır. Yüksek su tutma özelliği taşıyan killi zeminler dolgu içine suyu hapseder ve şeritlerin korozyona uğramasına yol açar. Toprakarme dolgusuna ilişkin kısımda belirtildiği gibi dolgu içindeki mikrobiyal aktivite ve organik madde içeriği, korozyona direkt etki eden faktörlerdir. Bu özellikler bakımından da ince malzeme oranı yüksek toprakarme dolguları, çelik şeritler için bir risk unsurudur.

Segrestin P. ve Bastick M. 1996 yılında yaptıkları çalışmada, uzayabilen ve uzayamayan toprakarme donatı şeritlerinin çalışma mekanizmalarını ve performanslarını incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda uzayamayan (çelik) şeritlerin tüm şerit uzunluğu boyunca mukavemet özellikleri gösterdiği görülmüştür. Şerit boyunca meydana gelen sürtünme kuvveti uniform özellikte ve şeritin kayma direncinden daha küçük ölçülmüştür.

Durgunoğlu H. T., Özbatır M. ve Kaya T., 2008 yılında yaptıkları çalışmalarda uzayabilen ve uzayamayan donatıların duvar geometrisine bağlı olarak performanslarını araştırmışlardır. Şeritlerin genel çalışma prensibine göre (Şekil-2.10) şeritler üzerinde meydana gelen maksimum gerilme hattının duvar panelleri tarafında kalan dilim aktif bölge olarak tanımlanmıştır. Bu bölge panel yüzeyinde bir yanal itki meydana getirirken, gerilme çizgisinin arkasında kalan pasif bölgede donatılar sürtünmeyle çalışarak tutucu bir kuvvet meydana getirmektedir.

Limit durum yöntemine göre yapılan hesaplarda uzayabilen polimer donatıların kritik kayma dairesi uzayamayan donatılara göre daha yatay geçmekte ve aktif bölgenin büyümesine sebep olmaktadır. Bu durum polimer şeritli yapı tasarımlarında şerit

boyplarının artmasına sebebiyet vermektedir. Duvar yüksekliklerinin fazla olduğu projelerde uzun şerit kullanımı maliyetleri ciddi anlamda etkilemektedir.

Şekil 2.10 : Toprakarme şeritlerinin çalışma prensibi (Liang, 2004)

Yaygın olarak kullanılan ve ülkemizde de geçerli olan limit durum yöntemine göre tasarım, uzayamayan donatının yapı performansının, uzayabilen donatıların yapı performansından daha iyi olduğunu göstermektedir. Buna göre uzayabilen donatıların kullanımında farklı tasarım yöntemlerine başvurulması önemlidir. (Anderson, 2010)

2.2.2.3 Yüzey kaplama elemanları

Toprakarme istinat yapılarının dolgu ve şeritten sonra gelen diğeri yapısal bileşeni yüzey kaplama elemanlarıdır. İlk donatılı zemin yapılarında yüzey elemanları silindirik ya da eliptik formda çelikten imal edilmiştir. Sünek özellikteki metal paneller geri dolgunun deformasyona uğraması durumunda esnekliğı sayesinde deplasmanları karşılayabilmekteydi. 1970 li yıllardan itibaren çelik panellerin yerine prekast beton yüzey elemanları daha yaygın şekilde kullanılmıştır. Toprakarme duvar aksının topografik koşulların sonucunda eğimli seyrettiğı durumlarda beton paneller montaj açısından daha uygun olmaktadır.

Metal kaplama elemanları, deformasyonlara karşı daha iyi performans gösterdiğinden ve beton panellere göre daha hafif olduğundan halen bazı projelerde kullanılmaktadır.

Yüzey kaplama elemanlarını malzeme kökenlerine göre aşağıdaki gruplara ayrılabilir:

- Beton Paneller (Yerinde Dökme veya Prekast)

- Galvanizli Çelik Paneller
- Paslanmaz Çelik Paneller
- Metal Paneller

(a) Metal Paneller: Metal yüzey kaplama elemanları ve şeritleri galvanizli çelik malzemeden üretilir. Kaplama elemanının uzunluğu bağlantı şeritleri arasındaki düşey mesafe ile ilişkilidir. Bağlantılar donatı şeritlerine uygulanan bohçalama ve her tabaka şeritlerinin birbirine bindirilmesi ile yapılır. Bu bindirme ile toprakarme dolgusunun yüzey panelleri arasından akması engellenir. (Şekil 2.10)

Şekil 2.11 : Metal kaplama eleman enkesiti (NCHRP, 1984)

(b) Beton Paneller: Beton paneller donatılı veya donatısız olarak 14 ya da 18 cm kalınlıklarda imal edilir. Panel boyutları ve şekilleri değişken olmakla birlikte, yükseklik ve genişliği 1.50 metre olan kare kesitli paneller kullanılmaktadır. Ağırlıkları 1.1 ile 1.65 ton arasında değişir.

Standart bir beton panelde dört adet bağlantı elemanı yer alır. Bağlantı elemanları beton panel içine gömülü haldedir. Bu elemanlar toprakarme donatısı ile aynı malzemeden üretilir. Panel geometrisi yüzey elemanları arasında bağlantının güçlü olması esasına göre özel olarak tasarlanır. Aynı zamanda düşey ve yatay yönde deformasyonlar paneller arasındaki geometrik uyumla sınırlanır. Panellerde düşey deformasyonların önlenmesi için sıkışabilir özellikte EPDM takozlar montaj sırasında paneller arasına yerleştirilir. Her panelin taşıma ve montaj sırasında kolaylık sağlayan bağlantı noktaları bulunur.

Beton paneller standart bir üretim yapılabilmesi için boyutları belirlenmiş kalıplar yardımıyla imal edilmektedir. Kalite kontrol çalışmalarının kolaylıkla yapılabilmesi açısından kalıpların kullanımı önemlidir. Standart beton panellere alternatif olarak değişik tipte paneller de dökülebilmektedir. Panel tipi ve boyutlandırması, projesel ihtiyaçlara ve yapı sınıfına göre yapılabilir.

Şekil 2.12 : Beton panel kaplama görünüşü (Elias, 2001)

- Yarım Paneller: Standart 1.50 m yüksekliğindeki panellerin yanında 0.75 m yükseklikte üretilen panellerdir. Duvar taban ve tepe kesimlerinde kullanılırlar
- Üst Paneller: Yükseklikleri 0.55 m ile 1.85 m arasında değişir. Üst kotların değişkenlik gösterdiği kesimlerde istenen alanın duvar ile kaplanabilmesi amacıyla değişik türleri kullanılır
- Köşe ve Yarım Paneller: Duvar aksının düz olarak seyretmediği topoğrafik koşullarda değişik boyutlarda imal edilerek kullanılırlar.

2.2.2.4 Temel zemini

Temel zemin bilgileri inşaatın yapılacağı sahada yürütülen zemin etüt çalışmalarından, alınan numuneler üstünde yapılan laboratuvar deney sonuçlarından elde edilebilir. Bu bilgiler ışığında toprakarme yapısının genel stabilite analizleri, olası oturma, taşıma gücü problemleri farklı kesimler için araştırılabilir.

2.2.2.5 Taşıyıcı dolgu

Toprakarme dolgu malzemesi seçiminde daha önceki kısımlarda belirtildiği gibi; aktif iyon içeriği yüksek, ince malzeme yüzdesi fazla, durabilite ve drenaj açısından risk teşkil edecek malzemelerden kaçınılmalıdır. Endüstriyel atıkların dolgu malzemesi olarak kullanılması toprakarme donatısına zarar vermeyecek nitelikte olmasıyla sınırlandırılır. Yapı performansı bu açılardan taşıyıcı dolgunun niteliğine bağlıdır.

2.2.2.6 Bağlantı elemanları

Toprakarme istinat yapısının tipine göre farklı malzemelerden imal edilebilen bağlantı elemanları esas olarak donatı şeritleriyle yüzey elemanlarının güvenli bir şekilde birlikte çalışmasını sağlar. Geotekstil donatılı istinat yapılarında bağlantı

elemanları kullanılmayabilir. Bunun yerine donatıların duvar ön yüzüne doğru bohçalama yapılması yöntemi tercih edilebilir.

Çelik şeritli toprakarme istinat yapılarında çelik şeritler, aynı malzemeden imal edilen panel içindeki kelepçelere galvanizli civata ve somunlar ile bağlanır (Şekil 2.12). Bu bağlantı noktalarında şerit kesitinde bir kayıp meydana gelir. Bu kayıp dizaynda hesaba dahil edilerek analizler yürütülür. Bağlantı elemanları ve çelik şeritlerin aynı malzemeden üretilmesi, kesit kaybının bir stabilite problemi yaratmasını önler. Deneysel yöntemlerin sonucunda, bağlantı noktalarında meydana gelen eksenel gerilmenin, tüm şerit boyunca meydana gelen maksimum eksenel gerilme değerinin %85'i mertebesinde olduğu görülmüştür (RECO, 2006).

Şekil 2.13 : Çelik şerit bağlantı elemanları (REAS, 2006)

2.2.3 Toprakarme istinat yapıları imalat aşamaları

2.2.3.1 Tesviye betonunun teşkili

Tesviye betonu toprakarme istinat sisteminin donatısız elemanlarıdır. Bir taşıyıcı özelliği yoktur. Tesviye betonu arazide panel yerleşiminin ve montajın düz bir satıhta yapılabilmesini ve proje kotuna uyulmasını sağlar. İlk kademenin düzgün bir şekilde

montajı tesviye betonunun istenen kotta dökülmesi ile mümkün olur. Tesviye betonu dikdörtgen kesitli olarak dökülür. Yüksekliği 15 cm genişliği 35 cm alınabilir.

2.2.3.2 İlk sıra panellerin montajı

Panellerin döküm sahasından montaj sahasına taşınması ve indirilmesi sırasında zarar görmemesine dikkat edilir. Zarar görmüş paneller montajda kullanılamamaktadır.

Geri dolgunun yapımı sırasında ilk sıra panellerinin deplasman yapmaması için ahşap elemanlarla geçici olarak payandalanması önemlidir. (Şekil 2.13)

Şekil 2.14 : İlk sıra panellerin payandalanması (REAŞ, 2006)

Tam panellerin yanına yarım paneller yerleştirilerek montaj sürdürülür. Paneller kelepçelenerek yatay hattın düzgün çıkarılması sağlanır. Panellerin üst kısmına lastik takozlar yerleştirilir. (Şekil 2.14)

Taban tesviyesi sırasında kazı işinin azaltılması için kademelendirme yapılmaktadır. Buna göre arazi kotuna uyumlu olarak tesviye betonu 0.75 m veya 1.50 m yüksekliğinde yukarı veya aşağı taşınabilir. (Şekil 2.15)

2.2.3.3 Şerit montajı

Toprakarme şeritleri sıkışmış dolgu üzerine serilerek panel bağlantıları yapılmalıdır. Panel bağlantı elemanları ve şeritlerin korozyona karşı koruma işlemlerinden geçmiş olmasına dikkat edilir. Bağlantı sayıları panellerin isimlendirmesine göre kontrol edilir. Bazı durumlarda şeritlerin montaj kotundan aşağıya doğru bükülmesi gerekmektedir. İhtiyaç duyulan pasif sürtünme kuvvetinin sağlanması, üst kotta yol

altyapı tabakalarının yerleşimi için belirli bir tabakanın eldesi bu işlemi gerekli kılmaktadır.

Şekil 2.15 : Montaj Sırası ve Yardımcı Elemanlar (REAŞ, 2006)

Şekil 2.16 : Taban tesviyesinde kademelendirme işlemi (REAŞ, 2006)

2.2.3.4 Dolgu sıkıştırma işlemi

İlk sıra donatı şerit seviyesine kadar doldurularak dolgu işlemine başlanır. Dolgu daima panel yerleşim istikametinde serilir. Bu husus panellerin dışarı doğru itilmesini önler. Yalnızca ilk donatı bağlandıktan sonra ve bunların üzerine dolgu yapıldıktan sonra panellere yakın kısma dolgu yapılmalı ve sıkıştırılmalıdır.

Dolgu panelleri 100 cm mesafeye kadar büyük silindirlerle sıkıştırılabilir. Bu mesafe içindeki panelleri dışarı doğru itmemek için elle idare edilen küçük silindirler kullanılır. Ardından gözle panel istikameti kontrol edilmeli ve gerekli ayarlamalar yapılmalıdır. Dolgu sıkıştırma işleminden sonra sıkışma kontrolü yapılmalıdır. Tavsiye edilen sıkışma yüzdesi %95 olarak verilmektedir. Sahada kum konisi deneyi ile sıkışma kontrolü yapılır.

Şekil 2.17 : Şerit montajı (REAŞ, 2006)

Şekil 2.18 : İlk ve ikinci sıra dolgu serilmesi (REAŞ, 2006)

2.2.3.5 Montaj ekipmanları

- Prekast panel yapımı için gerekli olan yeterli sayıda özel çelik kalıp
- Panel yapımı için şartname’de belirtilen kalitede beton ve demir
- Her kalıp için bir takım RMD vidası
- Panel üretimi ve montajı için gerekli kaldırma ekipmanı

- Panele monte edilirken boy ayarı için her düşey derzde 4 veya 6 adet sert ağaç kama.
- Dikey birleşme yerleri için tahta yüzlü mengene
- Panelleri indirmek ve kaldırmak için 4 uçlu bez veya çelik halat.
- İlk sıra panel için payanda malzemesi.
- Manivela ve şakül.
- Su terazisi.
- Keser.
- Balyoz.
- Çırpı ipi.
- Süpürge fırçalar.

Dolgu serme ve sıkıştırma için aşağıdaki ekipmanlar kullanılmalıdır:

- Dolgu ekipmanı, dolgunun yüklenmesi, taşınması ve serilmesi için gerekli yükleyici, kamyon, skreyper, greyder, vs. (Diğer ekipmanlar dolgu, serme kalınlığı ve sıkıştırma şartnamesine bağlıdır.)
- Yüksek dolgular için geniş, düz, vibrasyonlu silindirler.
- Panellerden 1 m mesafeye kadar küçük, elle kullanılan silindirler veya düz levhalı kompaktörler.

2.2.4 Toprakarme sisteminin avantaj ve dezavantajları

Toprakarme istinat yapılarının, konvansiyonel betonarme istinat yapılarına ve ağırlık tipi yığma istinat duvarlarına göre ekonomik yönden, imalat yönünden ve kullanım alanları yönünden çeşitli avantaj ve dezavantajları vardır. Bu kriterler aşağıda açıklanmıştır. Buna göre;

2.2.4.1 Sistem Avantajları

Toprakarme sisteminin genel avantajları;

- Taşınabilir ve basit ekipmanlarla hızlı bir şekilde imal edilebilirler.
- Nitelikli işçi ihtiyacı yoktur.
- Diğer seçeneklere göre daha düşük boyutta bir saha araştırması gerektirir.
- İmalat sırasında yapı önünde daha kısa mesafe ihtiyacı vardır.
- Satın alma maliyetleri düşüktür.
- Deformasyonlara toleransı fazla olduğundan rijit bir temel ihtiyacı yoktur.

- Yüksek kesitlerde ekonomik çözüm olarak tercih edilebilir.

2.2.4.2 Sistem Dezavantajları

Sistemin bazı dezavantajları;

- Panel arkasında yer alacak şeritler için mesafe ihtiyacı doğurur.
- Panel arkasında şartnamelerle belirlenmiş dolgu malzemesine ihtiyaç duyulur.
- Donatıların korozyona uğrama riskine karşı özel dizayn kriterleri uygulanmalıdır.
- Tasarım kriterleri ve şartnameler halen gelişmekte ve günümüz koşullarına göre değişmektedir.

Toprakarme sisteminin en önemli avantajlarından birisi oturma riskine karşı gösterdiği yüksek performanstır. Konvansiyonel çözümlere göre esnek bir yapıda olduğundan, toprakarme istinat duvarları zayıf zeminlerde yüzeysel temel sistemleriyle inşa edilebilmektedir.

Sismik yükler altında, toprakarme sistemleri deformasyonları betonarme istinat duvarlarına göre daha yüksek limitlerde karşılar. Toprakarme yapılarında özel üretim yapısal elemanlar, alternatiflerine göre daha az miktarlarda kullanılır. Bu da maliyetlerde ciddi kazanımlar sağlamaktadır.

2.2.4.3 Maliyet karşılaştırması

Toprakarme istinat yapılarının maliyeti pek çok koşula bağlıdır. Bu koşullar; kazı-dolgu maliyetleri yapı yüksekliği ve alanı, zemin koşulları, depremsellik, dolgu malzemesinin özellikleri olarak sıralanabilir. Yapılan araştırmalar sonucunda, ortalama zemin koşullarında duvar yüksekliğinin 3 metreden fazla olduğu projelerde prekast panelli toprakarme istinat yapılarının, konvansiyonel istinat yapılarına göre daha ucuz olduğu görülmüştür.

Zayıf zemin koşulları göz önüne alındığında, yüzeysel temelli toprakarme istinat yapıları, derin temel sistemleri ile desteklenen konvansiyonel yapılara göre %25-50 oranında daha az maliyetle imal edilebilmektedir. İmalat hızı ve kolaylığı, maliyetleri etkileyen bir başka önemli faktördür.

3. TOPRAKARME SİSTEMİNİN PRENSİPLERİ

3.1 Temel Kabuller

Yatay doğrultuda yarı sonsuz uzunlukta kohezyonsuz bir zemin ele alınırsa, zeminin üst yüzeyinden h kadar derinlikte düşey efektif gerilme ve buna bağlı olarak meydana gelecek yatay gerilmeler aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$\sigma_v = \gamma h \quad (3.1)$$

$$\sigma_h = K_0 \gamma h \quad (3.2)$$

Bu formül grubunda γ zeminin birim hacim ağırlığını, h derinliği, K_0 ise sükunetteki toprak basıncı katsayısını temsil eder. Sükunetteki toprak basıncının formülü sıkışmış kumlar ve konsolide killeri için yaklaşık olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$K_0 \approx 1 - \sin \phi \quad (3.3)$$

İncelenen zeminin yatay olarak harekete geçtiği kabulü yapılıyorsa yatay gerilmenin aktif toprak basıncı katsayısı ile küçültülmesi gerekir. Buna göre yatay gerilme formülü;

$$\sigma_h = K_a \gamma h \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan K_a terimi aktif toprak basıncı katsayısı olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi formülize edilmiştir:

$$K_a = \frac{(1 - \sin \phi)}{(1 + \sin \phi)} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.5)$$

İncelenen zeminin yatay olarak harekete geçmediği kabul ediliyorsa yatay gerilme aşağıdaki gibi formülize edilir:

$$\sigma_h = K_p \gamma h \quad (3.6)$$

Pasif toprak basıncı katsayısı (K_p) ise aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$K_p = \frac{(1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.7)$$

Toprak basıncına ilişkin bu bağıntılar esnek istinat yapılarının rasyonel modellerinin oluşturulmasında büyük önem taşımaktadır.

3.2 Henry Vidal'in Çalışmaları

Donatılı zemin teknolojisinin ilk mucidi olan Fransız Mimar Mühendis Henry Vidal 1960' lı yıllarda laboratuvar ortamında ilk deneysel donatılı zemin sistemini kum ve kağıt kullanarak kurmuştur. Bu deneysel yöntem ile büyük yapıların davranışlarını incelemeyi hedeflemiştir.

1966 ve 1969 yılları arasında toprakarme teknolojisinin temel prensipleri ve mekanizması Henry Vidal tarafından açıklanmıştır. Yapılan çalışmalar güçlendirme işlemi görmeyen zeminin Mohr-Coulomb kriterine uygun bir şekilde davrandığını göstermiştir. Buna göre kohezyonsuz özellikte bir zemin, normal gerilme düzlemiyle $+\phi$ ve $-\phi$ açı yapan iki kayma düzlemi yardımıyla tanımlanır. Eğer bu zemine bir σ_1 düşey gerilmesi etkilirse, zeminin kayma durumuna geçebilmesi için σ_3 değerinde bir yatay gerilmeye ihtiyaç duyduğu ortaya konmuştur. Bu gerilmenin minimum büyüklüğü $K_a \sigma_1$ değerine eşit olur. Bu sınır değer koşulu aşağıdaki düzlemde gösterilmektedir.

Şekil 3.1 : Güçlendirilmemiş zeminin göçmesi (Jaky, 1978)

Aynı koşullar altında zeminin yatay donatılar ile güçlendirildiği kabulü yapılırsa, iki yatay donatı arasındaki tabaka ele alınır. Yeterli sürtünme kuvvetinin kazanıldığı durumda, bu zemin tabakasının alt ve üst noktada donatıların seviyesinde olduğu kabul edilir (Şekil 3.2.).

Donatılı zemin sisteminde yer alan donatılar, zeminden daha yüksek bir Young modülüne sahiptir. Bu sayede meydana gelen gerilmeler sonucunda zemin aktif hale

geçemez ve sükunette kalır. Bu durumda meydana gelecek toprak basıncının, pasif toprak basıncı değerine eşit olması beklenir.

Şekil 3.2 : Toprakarme sisteminde donatıların yerleşimi (Jaky, 1978)

3.3 Dolgu-Donatı Etkileşimi Prensibi

Şeritli toprakarme yapılarında dolgu donatı arasında gerilme transferi, dolgu ile şerit yüzeyi arasında meydana gelecek sürtünme kuvveti vasıtasıyla olur. Düz donatılara alternatif olarak tırnaklı yüzeye sahip çelik şeritler kullanılırsa, tırnaklar üzerinde meydana gelecek pasif direnç, sürtünme kuvvetine eklenir.

Toprakarme sisteminde dolgu donatı etkileşiminin anlaşılmasında, sahada ve laboratuvar ortamında yürütülen deneysel çalışmalar fikir verici olmuştur. Bu yöntemler gerçek yapı koşullarını tamamen temsil etmese de gerilme transferinin prensiplerinin oluşturulmasında önem arzeder. (Ingold, 1982).

Çekme deneyleri kapsamında, donatı dolgudan çekilerek bu sırada kaydedilen deplasmanlardan ve yüklerden çekme kuvveti-deplasman eğrisi oluşturulur. Çekme deneyleri sonucunda şerit seviyesindeki düşey gerilme değerine, uygulanan çekme kuvvetine ve donatının geometrisine bağlı bir tasarım sürtünme katsayısı elde edilir.

Dolgu-Donatı arası sürtünme kuvveti katsayısı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_v} = \frac{T}{(2bL\sigma_v)} \quad (3.8)$$

Burada,

μ = Sürtünme Kuvveti Katsayısı

σ_v = Düşey Jeolojik Yük

T= Uygulanan Çekme Kuvveti

τ = Donatı Boyunca Meydana Gelen Ortalama Kayma Gerilmesi

b= Donatı Genişliği

L= Donatı Boyu

olarak tanımlanır. Bu katsayı, yüzeysel kayma kuvvetinin ve pasif sürtünme kuvvetinin dolgu-donatı arası gerilme transferi mekanizmasının anlaşılmasında önemlidir. (Ingold, 1982)

Dolgu donatı arası sürtünme katsayısı dolgu malzemesinin türü ile yakından ilişkilidir. Sıkı granüler dolgularda sürtünme katsayısı direk kesme deneyinde ölçülen değerlerden daha yüksektir. Granüler toprakarme dolgusu, donatı yüzeyine yakın bölgelerde kayma kuvvetinin etkisinde hacim artışına uğrar. Bu hacim artışı donatıların üzerinde meydana gelecek normal kuvvetini, dolayısıyla dolgu-donatı arası sürtünme kuvveti katsayısını artırır. Tırnaklı şeritlerin kullanılması, pasif dayanımı da arttıracığından, dolgu-donatı arasındaki sürtünme kuvveti bu tip donatılı sistemlerde daha fazla olur.

Dolgu-donatı arasındaki sürtünme kuvvetini etkileyen faktörler Mitchell ve Schlosser (1979) ile Mc Kittrick (1978) tarafından yürütülen çalışmalar sonucunda özetlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sürtünme katsayısının bazı parametrelere bağlı olduğunu göstermiştir:

- Zemin özellikleri (gradasyon ve danelerin geometrisi)
- Zeminin sıklığı
- Donatı seviyesindeki düşey efektif jeolojik yük
- Donatı geometrisi
- Dolgu içindeki ince malzeme oranı

3.3.1 Donatı geometrisi etkisi

Tırnaklı ve düz donatılar üzerinde yapılan çekme testlerinde sürtünme katsayısı- düşey mesafe eğrisi donatı geometrisine göre farklılıklar göstermiştir (Şekil 3.3) Bu grafiğe göre düz donatılarda tasarım sürtünme katsayısının pik değeri küçük bir deplasmana karşılık gelmektedir. Rezidüel sürtünme katsayısı değeri ise pik değerin yaklaşık yarısıdır. Tırnaklı donatılarda ise tasarım sürtünme katsayısının pik değeri, rezidüel değere daha yakındır. Maksimum sürtünme katsayısı seviyesinde görülen deplasmanlar ise düz donatıya göre daha büyük mertebelerdedir.

Grafiğe göre, düz donatılar ile yapılan toprakarme tasarımlarında rezidüel sürtünme katsayısının, tırnaklı donatılar ile yapılan tasarımlarda ise pik sürtünme katsayısının dikkate alınması önerilmektedir. (NCHRP, 1984)

Şekil 3.3 : Donatı geometrisi sürtünme katsayısı-düşey mesafe eğrisi (Ingold, 1982)

3.3.2 Dolgu sıklığı ve granülometrisi etkisi

Toprakarme dolgusu ile donatılar arasındaki sürtünme özelliklerinin anlaşılmasına ilişkin laboratuvar ortamında kurulan modeller, gevşek dolgu içinde ölçülen tasarım sürtünme katsayısının, gerçek sürtünme katsayısına yakın olduğunu göstermiştir. Diğer yandan, toprakarme dolgusu daha sıkı bir özellikte ise, tasarım sürtünme katsayısı gerçek sürtünme katsayısından daha yüksek bir değerdedir. Bu durum, dolgu az sıkı olsa bile, gerçek yapı modelini temsil etmektedir. Bu nedenle, tasarım kriterlerinde bu durum dikkate alınmalıdır. Daha önceki bölümde açıklanan dolgunun genişmesi mekanizması burada da geçerlidir.

Toprakarme dolgusu olarak kullanılacak malzemelerde granülometri de sürtünme davranışını etkiler. Uniformluk katsayısı (C_u) 10'dan büyük olan dolgularda sürtünme katsayısı ciddi artış göstermektedir (Elias, 2001). Bu nedenle ince malzeme oranı düşük dolgular durabilite ve sürtünme karakteristikleri bakımından sisteme ciddi avantaj sağlamaktadır.

3.3.3 Düşey efektif jeolojik yük etkisi

Dolgu-donatı etkileşimini incelemek amacıyla kurulan gerçekçi yapısal modellerde, sıkı kum numuneler üzerinde yapılan deneylerle sürtünme katsayısı değeri ile düşey

efektif jeolojik yük ilişkisi araştırılmıştır. Buna göre jeolojik yükün artışıyla tasarım sürtünme katsayısı azalma göstermektedir. (Şekil 3.3) Buna göre

- Grafikteki $\tan\phi$ değeri tırnaklı donatılar için zemin kütlesi içindeki kaymayı temsil eder.
- Grafikteki $\tan\delta$ değeri düz donatılar için donatı ile zemin arasındaki sürtünmeyi temsil eder.

Kaba daneli sıkı zeminlerde görülen genleşme etkisi tırnaklı donatıların kopma mukavemetlerini etkileyen önemli bir faktördür. Bu etkinin incelenebilmesi için değişmez hacimli sıkı kumlar üzerinde kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonuçlarında tasarım sürtünme katsayısı, ortalama kayma gerilmesinin başlangıç normal gerilmeye oranı olarak hesaplanır. Sıkışmış granüler dolgularda tasarım sürtünme katsayısı, deneysel yöntemlerle ölçülen değerlerden daha yüksek çıkmaktadır. Bu durum toprakarme sisteminin stabilitesini destekleyen önemli bir faktördür.

4. ŞERİTLİ TOPRAKARME İSTİNAT YAPILARININ TASARIM KRİTERLERİ

4.1 Giriş

Sıkıştırılmış dolgu ve donatı ile elde edilen kompozit bir inşaat yapısı olan toprakarme sistemlerinin mukavemet prensibi, bu iki malzeme arasında meydana gelen sürtünme kuvvetine dayanır. Sistem üzerinde yapılan teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda, toprakarme sisteminin kompleks yapısının, anizotropik özellikteki zeminin, çekme dayanımı yüksek donatılar ile etkileşiminden kaynaklandığı görülmüştür. Bu nedenle, sistemin tasarımında her bir yapı elemanının karakteristik davranışı belirleyici bir faktördür.

Toprakarme sistemlerinin tasarımı çeşitli hesap kabullerine göre farklılık göstermekle birlikte yöntemlerin ortak olarak belirlediği kriterler aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

- Toprakarme duvarların ön yüzeyi genellikle diktir. Duvar önü eğimi 70° ile 90° arasında değişir.
- Kesit yüksekliklerine göre kullanılan donatı tipleri farklılık gösterir. Yüksekliği 15 metreye kadar ulaşan kesitlerde uzayabilen polimer donatılar kullanılırken yüksekliği 15 metreden daha fazla olan kesimlerde uzayamayan çelik donatılar daha uygun çözümler sunmaktadır.
- Donatı kademelerinin düşey mesafeleri 0.15m ile 0.90m arasında değişir.
- Sistemde granüler özellikte geri dolgu malzemesi kullanılır.
- Kullanım amacına uygun bir yüzey kaplama sistemi tercih edilir.

4.2 Donatı

Toprakarme sistemindeki donatı tipi seçimi, sistemin tasarım ve davranışının anlaşılmasında büyük önem taşır. Donatılar sistemin yatay deformasyonlarının sınırlandırılmasını amaçlar. Zemin içindeki deplasmanlara karşı donatıların uzayabilirlik özelliği sistemin de davranışını belirler. Uzayabilen donatılar ile

tasarlanan toprakarme yapılarında aktif duruma göre, uzayamayan donatılar ile tasarlanan yapılarda ise pasif duruma göre hesaplar yapılır. Uzayamayan donatılar, (çelik şerit) zemin göçme durumuna erişmeden kopar. Geogrid ve geotekstil niteliğindeki donatılar zemin göçme durumuna erişmeden deformasyona uğrasa da göçme anında donatının kopması hala gerçekleşmemiş olabilir. Bu açıdan bu özellikteki donatılar uzayabilen donatı sınıfına girer.(Mitchell, 1987)

4.3 Donatı Gerilmeleri

Toprakarme donatılarında donatı yüzeyi boyunca meydana gelen gerilmelerin büyüklük ve yerlerinin tespiti için pek çok sayısal model geliştirilmiştir. Sistemin iç stabilitesi, donatı geometrisi, donatı boyları bu çalışmalar sonucunda çözülür. (RECO, 2006)

Bir toprakarme modelinde her bir donatıya bağlanan deplasman ölçerler ile ölçülen maksimum değerlerin şerit üzerindeki lokasyonu bulunarak bir gerilme hattı oluşturulmuştur. Toprakarme istinat yapılarında iç stabilite analizlerinin temel prensipleri, bu hattın yorumlanmasıyla mümkündür. İdealleştirilmiş maksimum gerilme hattı uzayabilen ve uzayamayan donatılı toprakarme sistemleri için aşağıdaki gibidir:

Şekil 4.1 : Uzayamayan donatılı sistemde gerilme çizgisi (Elias, 2001)

Şekil 4.2 : Uzayabilen donatılı toprakarme sisteminde maksimum gerilme çizgisi. (Elias, 2001)

Maksimum gerilme çizgisi, sistemi iki bölüme ayırır. Panel tarafında kalan bölgeye aktif bölge, diğer bölgeye pasif bölge adı verilir. Aktif bölgede toprakarme şeritleri bu bölgedeki dolguyu tutarken, pasif bölgede dolgu, sürtünme kuvveti ile toprakarme şeritlerini tutar. Aktif bölgede şerit seviyesinde meydana gelen kayma kuvveti panel yüzeyinden geriye doğru iken, pasif bölgede kayma kuvvetleri duvar yüzüne doğrudur.

Maksimum gerilme çizgisinin deneysel yöntemlerle belirlenmesi yönünde yapılan çalışmalar, çelik donatıların kullanılması durumunda duvar topuğundan başlayan gerilme çizgisinin lineer bir yol izleyerek duvarın orta noktasında duvar ön yüzüne paralel olarak tepe noktasına ulaştığını göstermiştir. Yapının üst kısmında maksimum gerilme çizgisinin duvar düşeyinden uzaklığı yaklaşık olarak yüksekliğin %30'u kadardır.

Uzayabilen donatılar kullanılan toprakarme sisteminde maksimum gerilme çizgisi Coulomb-Rankine kayma düzlemini keser. Dolayısıyla dolguda meydana gelen gerilmeler aktif durumu temsil eder. Maksimum gerilme hattı toprakarme kesitinin geometrisine ve sürüşarj yüklerine göre değişebilir. (Juran, Schlosser, 1978)

Şekil 4.3 : Farklı yöntemlere göre maksimum gerilme hattı (Vidal, 1969)

4.4 Göçme Modları

Toprakarme istinat yapılarının tasarımında kullanılan yazılım ve kodlar, iç stabilite ve dış stabilite analizlerini ayrı ayrı yapmaktadır. İç stabilite ve dış stabilite analizlerinde yapılan tahkikler bundan sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Sistemin göçme modlarının anlaşılması, stabilite tahkiklerinin incelenmesiyle mümkündür.

4.4.1 İç stabilite

Toprakarme sisteminin iç stabiliteye bağılı olarak iki farklı şekilde göçtüğü kabul edilir:

- Şerit kırılmasından dolayı meydana gelen göçme durumudur. Donatı kesiti esas alınarak tasarım yapılır.
- Şerit kopmasından dolayı meydana gelen göçme durumudur. Donatı boyu ve yüzey alanı esas alınarak tasarım yapılır. Kopma şerit bağlantı noktasında veya kesit boyunca herhangi bir kesimde meydana gelebilir. Analiz yöntemi her iki bölge için de aynıdır.

İç stabiliteden kaynaklı göçme modlarının çözümlenmesinde maksimum gerilme çizgisi fikir vericidir. Bu hat potansiyel kayma dairesi olarak düşünülürse tasarım şerit boylarının bu hattın dışına kadar uzatılması gerekmektedir. (Juran, 1983)

4.4.2 Dış stabilite

Toprakarme duvarların dış stabilite tahkikleri için, sistemin bir ağırlık duvarı gibi davranacağı kabulü yapılır. Bu kabule göre aşağıda belirtilen koşullara karşı analizler yürütülür;

- Taban kayması kontrolü
- Zeminin taşıma gücü kontrolü
- Devrilme kontrolü
- Dairesel göçme kontrolü

Toprakarme sisteminin konvansiyonel istinat yapılarına nazaran daha esnek ve deformasyonları karşılayabilen bir özellikte olduğundan tahkiklerde kabul edilen güvenlik sayıları daha düşüktür. Schlosser'e göre esnek istinat yapılarının taşıma gücü kontrolü için aranan güvenlik sayısı 2 iken, bu değer konvansiyonel ağırlık tipi duvarlar için 3'tür (1978).

4.5 Yükleme Koşulları

Toprakarme duvarlar farklı tipte yükleme koşullarına göre dizayn edilmektedir. Yükleme statik ve dinamik olarak ikiye ayrılır. Statik yükleme durumları aşağıda özetlenmiştir:

- Toprak itkisi
- Köprü kenar ayaklarında düşey ve yatay noktasal yükler
- Trafik yükleri
- Dolgu arkası şev yükleri
- Üstyapı Dolgu yükleri
- Baraj ve su kanallarında su yükleri

Şekil 4.4 : Dış stabilitede göçme modları (Elias, 2001)

4.6 Su Etkisi

Tasarım aşamasında su etkilerinin göz önüne alınması, hesap yöntemlerini değiştiren bir durumdur. Toprakarme sisteminin hidrostatik yüklemeler altındaki davranışı, su etkisi olmayan ortamlardan farklıdır. Saha araştırmaları ve projenin niteliği su etkisine yönelik tasarım ve önlemlerin alınmasında ön tasarım aşamasında yardımcı olur. Su etkileri araştırılırken aşağıdaki hususlara bakılır:

- Hidrostatik basınç kuvvetleri
- Akım ağırları
- Efektif zemin parametreleri
- Su etkisinde zemin ile donatı arasındaki sürtünme davranışı

Su etkisi altında toprakarme duvar tasarımı, baraj yapılarında, su kanallarında kullanılacak toprakarme sistemlerinde önem arz etmektedir. Bu tarz yapılarda toprakarme duvar bloğunun önündeki su seviyesi değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle iki farklı parametre grubu oluşturulmalıdır. Karakteristik parametreler denen ilk grupta maksimum su seviyesi ile minimum su seviyeleri dikkate alınır.

Diğer grup parametreleri akış rejiminin on yıllık veya daha geniş zaman aralığında analiz edilmesiyle oluşturulur. Kanal tasarımlarında bu parametrelerin belirlenmesi ekonomik ve güvenli bir yapı sistemi oluşturulması açısından önemlidir.

Karakteristik dizayn durumunda, maksimum su seviyesi ile minimum su seviyesi arasındaki fark ölçülür. Suyun etkisi altında kalacak duvar seviyeleri böyle belirlenir. Dizaynda en olumsuz durum göz önüne alınarak projelendirme yapılır. Su etkisi altında en olumsuz durum şekil 4.5' de gösterilmektedir.

Su etkisine karşı toprakarme topuk kısmının korunması da oldukça önemlidir. Su etkisi altında tabanda meydana gelebilecek oyulmalara karşı gabion uygulaması, kaya dolgu teşkili gerekli olabilmektedir. Bunun yanında özel yüzey kaplama elemanları, düşey ve yatay dilatasyon uygulamaları, nitelikli dolgu seçimi alınabilecek diğer önlemlerdir (TAI, 2000).

Şekil 4.5 : Toprakarme sisteminde su basıncı (NCHRP, 1984)

4.7 Dizayn Aşamaları

Geleneksel bir toprakarme sisteminin tasarımında, yapının dikdörtgen kesitli bir blok olduğu kabulü yapılır. Şerit boylarının yapı yüksekliği boyunca aynı boyda olduğu kabul edilir. Duvarın ön yüzünün yatay düzleme dik olduğu düşünülür. (Şekil 4.6)

4.7.1 Gömme derinliği

Gömme derinliği (D), toprakarme sisteminin topuğunun çeşitli etkilere karşı korunması ve tabanda meydana gelecek taşıma gücü problemlerine karşı bir önlem olarak yapının tasarımında göz önüne alınan bir parametredir. Topuğun korunması donma etkilerine, yüzeysel kayma riskine ve topuk kesiminde meydana gelecek oyulmalara karşı uygulanır. Gömme derinliği, yapı yüksekliğine, yapının inşa edileceği bölgenin depremselliğine, zemin koşullarına, topografik etmenlere bağlı bir değerdir. Teorik olarak düşey yapı yüksekliğinin %10'u kadar alınır. Kaya zemine oturan sistemler hariç, minimum gömme derinliği için 0.60 m önerilmektedir. Şeve oturan sistemlerde bu değer 1.20 m mertebesine kadar çıkar. (Berg, 2009)

Şekil 4.6 : Toprakarme sistemi geometrisi ve yükleme koşulları (Berg, 2009)

Şekil 4.7 : Şevli topuk ve düz topuk için gömme derinlikleri
(Elias, 2001)

4.7.2 Düşey donatı aralıkları

Sistemde yer alacak yatay donatılar arasındaki düşey mesafeler, sıkıştırma tabaka kalınlığına, dolgu niteliğine, yüzey paneli geometrisine ve şerit yoğunluğuna göre değişmekle birlikte, başlangıç olarak 0.30-0.60 m aralığında düşey mesafe seçilir. İç stabilize analizlerine göre, duvar taban seviyesinden yukarıya doğru tabaka mesafelerinde değişiklik görülebilir. Mesafe değişimi toprakarme şeritlerinin mukavemet özellikleri ve şeritler arasında yer alacak zemin bloğunun karakteristik dayanım parametrelerine bağlıdır. (Mitchell, 1987)

4.7.3 Donatı uzunluğu

Toprakarme istinat yapılarında donatı uzunluğunu etkileyen pek çok faktör vardır. Kesin donatı boyunun belirlenmesi, seçilecek fiktif bir boy için yapılacak iç ve dış stabilize analizleri ile mümkün olur. Fiktif donatı boyunun seçilmesinde, yapı yüksekliği, yükleme durumu, duvar üstü geometrisi dikkate alınır. Taban zemininin özelliği de fiktif boyun belirlenmesinde önem arz eder. Tesviye beton üstünden yapının üst kotuna kadar olan mesafe duvar yüksekliği (H) olarak alınırsa, fiktif şerit

boyu(L) bu yüksekliğin %70'i (0.7H) olarak seçilebilir. Şevli dolguları taşıyan, yüksek sürşarj yüklerine maruz kalan veya kenar ayak yüklerini taşıması istenen sistemlerde şerit boyları 0.8H ile 1.1H seviyesine çıkabilir. Depremselliğin yüksek olduğu bölgeler için dizayn edilen sistemlerde şerit boyları daha da yüksek seçilebilmektedir. Rijit bir temel zeminine oturan sistemlerde, karşılıklı olarak inşa edilen duvarlarda ise bu boy 0.5H seviyesine düşebilmektedir. (ASCE, 1994)

4.7.4 Yatay toprak itkisi ve düşey gerilme

Uzayamayan donatılı toprakarme sistemlerinde, toprakarme dolgusunun arkasındaki bölgede dolgudan kaynaklı toprak itkisi duvar üstünden tabana doğru lineer bir artış gösterir. Uzayamayan donatılı sistemlerde bu gerilmeden kaynaklanan itkinin yatay düzlem ile bir λ açısı yaptığı kabul edilir. Bu açının formülü aşağıdaki gibidir:

$$\lambda = \left(1.2 - \frac{L}{H}\right) \phi_b \quad (4.1)$$

Uzayamayan donatılı sistemlerde;

$$\lambda = 0 \quad (4.2)$$

uzayabilen donatılı sistemlerde ise toprakarme dolgusunun arkasındaki itki aşağıdaki gibidir:

$$P_a = 0.5K_{ab(\lambda,\beta)}\gamma H^2 \quad (4.3)$$

Buna ek olarak sürşarj etkileri dikkate alınmadığında Coulomb yatay toprak basıncı katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$K_{ab} = \tan^2(45^\circ - \phi_b/2) \quad (4.4)$$

Bu durumda şekil 4.8'e göre λ ve β değerleri sıfıra eşit değilse aktif toprak basıncı katsayısı geri dolgunun efektif içsel sürtünme açısının (ϕ_b) ve itkinin yatayla yaptığı eğim açısına (λ) bağlıdır.

Toprakarme sisteminin arkasında sonsuz uzunlukta, yatayla β açısı yapan bir şevli dolgu yer alıyorsa uzayamayan donatılar için eğim açısı aşağıdaki hale gelir:

$$\lambda_b = \phi_b[1 - (1 - \beta/\phi_b)(L/H - 0.2)] \quad (4.5)$$

Uzayabilen donatılarda;

$$\lambda_b = \beta$$

(4.6)

olur. Aktif toprak basıncı katsayısı ise;

$$K_a = \left[\frac{(\sin(\theta - \phi_b) / \sin \theta)}{(\sqrt{\sin(\theta + \lambda)} + \sqrt{\sin(\phi_b + \lambda) \sin(\phi_b - \beta) / \sin(\theta - \beta)})} \right]^2$$

(4.7)

formülü yardımıyla hesap edilir.

Şekil 4.8 : Dolgu arkasında düşey gerilme parametreleri (Elias, 2001)

H' mekanik yüksekliğine sahip bir toprakarme kesitinde meydana gelecek düşey gerilmeler yukarıdaki gibidir. Hesaplamalarda yüzey elemanının düşey ağırlığı dikkate alınmamaktadır. Bu kabuller ışığında ön hesaplamalar için aşağıdaki sıra takip edilir.

- Eğim açısı belirlenir (λ)
- Duvar arkasındaki yatay itki hesaplanır:

$$P_a = 0.5K_{ab(\lambda, \beta)}\gamma H^2$$

(4.9)

- Eksantrisite hesaplanır. Eksantrisite noktası duvar tabanında toplam moment değerinin sıfıra eşit olduğu yerdir. W toplam düşey gerilme değerini belirtmek üzere eksantrisite aşağıdaki gibi hesap edilir:

$$e = \frac{[P_a \cos \lambda H' / 3 - P_a \sin \lambda L / 2 - W'(d - L/2)]}{[\gamma_r HL + W' + P_a \sin \lambda]} \quad (4.10)$$

- Tabandaki uniform düşey gerilme (σ_v) ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\sigma_v = \frac{(\gamma_r HLW' + P_a \sin \lambda)}{(L - 2e)} \quad (4.11)$$

Bu yaklaşım Meyerhof formülü ile uyumludur. Bu yaklaşımda eksantrik yükleme sonucu tabanda meydana gelen uniform gerilmenin, taban genişliğinin ekstantrisine mesafesinin iki katı kadar daha kısa bir mesafede olduğu kabul edilir.

- Düşey gerilmelere yapı üstü sürşarj değeri eklenerek analiz tamamlanır.

4.7.5 Dış stabilite

4.7.5.1 Taban kayma tahkiki:

Toprakarme sisteminin taban kaymasına karşı güvenlik koşulu aşağıdaki gibidir:

$$GS_{kayma} = (\sum \text{Yatay tutucu kuvvetler}) / (\sum \text{yatay devirici kuvvetler}) \geq 1.5 \quad (4.12)$$

Uniform sürşarj yükü etkisinde, yatay doğrultuda bir dolguyu tutan ($\beta = 0$), uzayabilen donatılı ($\lambda = 0$) bir sistemde kayma için güvenlik faktörü:

$$GS_{kayma} = \frac{(V_q + W)\mu}{(P_b + P_q)} \quad (4.13)$$

μ değeri taban zemini ile toprakarme kütlesi arasındaki sürtünme katsayısını temsil eder.

Tabandaki düşey gerilme değeri;

$$V_q = \gamma_s h_s L \quad (4.14)$$

Yapı ağırlığı (W) hesabı;

$$W = \gamma_r HL \quad (4.15)$$

Sürşarj yükleri etki hesabı;

$$P_q = K_{(a,b)} \gamma_s h_s H \quad (4.16)$$

Geri dolgunun yatay itkisi hesabı;

$$P_a = 0.5K_{(a,b)}\gamma_b H^2 \quad (4.17)$$

Genel stabilite hesaplarında güvenli tarafta kalmak amacıyla gömme derinliğinden ötürü oluşacak pasif toprak itkisi hesaba dahil edilmez. Topuktaki gömmenin zaman içinde kaldırılabilceği düşünülür. Bunun yanında yüzey panellerinin kayma direnci ihmal edilir. Diğer yandan taban zemini boyunca meydana gelecek kayma direnci, geri dolgunun yaratacağı itkinin yatay bileşeni ile ilişkilendirilir. (Şekil 4.9)

Şekil 4.9 : Dış stabilitede Meyerhof formülü (Elias, 2001)

Uzayamayan donatılı klasik toprakarme sisteminde ($\lambda \neq 0, \beta \neq 0$) taban kayması tahkiki için aşağıdaki yol izlenir:

- Duvar arkasındaki itki hesabı;

$$P_a = K_{(\phi, \lambda, \beta)}(0.5\gamma_b H'^2 + qH') \quad (4.18)$$

- Mekanik yükseklik;

$$H' = H + L \tan \beta \quad (4.19)$$

- Aktif kayma kuvveti hesabı;

$$P_b = P_a \cos \lambda_b \quad (4.20)$$

Daha sonra kayma modlarına göre minimum içsel sürtünme açısının ($\emptyset$) seçimi yapılır. İlk durum taban zemini boyunca meydana gelen kaymadır. Duvarın oturduğu temel zeminine ait mukavemet parametreleri ($c, \emptyset_f$) geri dolgunun parametrelerinden daha düşük değerlerde ise bu durum dikkate alınır. Tabaka tipi donatılar kullanılırsa geri dolgu yüzeyi boyunca meydana gelen kayma durumu dikkate alınır ($\emptyset_r$). Toprakarme dolgusu içinde dolgu-donatı yüzeyinde meydana gelen kayma durumu son kayma modunu temsil eder (ρ). Dolgu-donatı arası sürtünme kuvveti açısı deneysel yöntemlerle belirlenebilir.

- Birim uzunluk boyunca tutucu kayma kuvvetinin hesabı;

$$P_r = (W + V_q + P_a \sin \lambda_b) \mu \quad (4.21)$$

$$\mu = \min (\tan \emptyset_f, \tan \emptyset_r, \tan \rho) \quad (4.22)$$

Sürşarj yüklerinin kaymaya karşı güveliğe pozitif etkisi yalnızca kalıcı olması durumunda hesaba katılır. Geçici yüklemeler kayma tahkikinde tutucu kuvvetlere dahil edilmez.

Tüm veriler hesaplandıktan sonra güvenlik sayısı belirlenir. Güvenlik sayısının istenen değerden küçük olması durumunda donatı uzunluğu arttırılabilir, şev açısı düşürülebilir ve analizler tekrarlanır.

4.7.5.2 Devrilme tahkiki

Toprakarme duvarların klasik istinat yapılarından daha esnek olması nedeniyle, devrilme durumu konvansiyonel duvarlardan daha farklı meydana gelir. Bunun yanında klasik göçme moduna göre duvar topoğunda tutucu momentlerin devirici momentlere oranı hesaplanarak bir güvenlik katsayısı elde edilir.

$$G_{s_{devrilme}} = \sum \text{tutucu momentler} / \sum \text{devirici momentler} \geq 2.0 \quad (4.23)$$

Devrilme tahkikinde tutucu momentler; yapı ağırlığından, duvar üstü ölü sürşarj yüklerinden, dolgu arkasındaki toprak itkisinin düşey bileşeninden meydana gelmektedir. Devirici momentler ise toprak itkisinin yatay bileşenlerinden, geri dolguya etkiyen ölü ve hareketli sürşarj yüklerinden ötürü meydana gelir.

Uzayabilen donatılı uniform yüklü bir toprakarme sisteminde dönme tahkikinde kullanılan güvenlik sayısı formülü aşağıdaki gibidir:

$$G_{s_{devrilme}} = \frac{(V_q + W)(L/2)}{(P_b (H/3) + P_q (H/2))} \quad (4.24)$$

Geleneksel toprakarme sistemi için ($\lambda \neq 0, \beta \neq 0$) hesap sırası aşağıda açıklanmıştır:

- Devirici kuvvet olarak toprak itkisinin yatay bileşeni (P_a) yüksekliği H' olan bir duvarda:

$$M_D = P_a \cos \lambda_\beta \left(\frac{H}{3} \right) \quad (4.25)$$

- Yapı ağırlığından dolayı tabanda meydana gelen tutucu moment hesabı:

$$M_{WR} = V_q d + W \frac{L}{2} \quad (4.26)$$

- Tutucu kuvvet olarak toprak itkisinin yatay bileşeni hesabı:

$$M_{TR} = P_a \sin \lambda_\beta L \quad (4.27)$$

Şekil 4.10 : Toprakarme sisteminde devrilme tahkiki (Elias, 2001)

- Kabullere göre dönmeye karşı güvenlik katsayısı aşağıdaki gibi hesap edilir:

$$GS_{devrilme} = \left(\frac{V_q d + W \frac{L}{2} + P_a \sin \lambda_\beta L}{P_a \cos \lambda_\beta \frac{H'}{3}} \right) \quad (4.28)$$

Güvenlik katsayısının istenen değeri sağlamaması durumunda şerit boyu arttırılarak eksantrisite tekrar hesaplanır. Eksantrisite değeri için aşağıdaki şart aranmaktadır.

$$e \leq L/6 \quad (4.29)$$

Bu koşulun sağlanmaması halinde şerit boyu arttırılmalıdır. (Elias, 2001)

4.7.5.3 Taşıma gücü tahkiki

Toprakarme sisteminde taşıma gücü problemi yaşanmaması için, Meyerhof yöntemiyle hesaplanan taban basıncının, zeminin emniyetli taşıma gücünün üzerine çıkmaması beklenir. Emniyetli taşıma gücünün hesabında güvenlik katsayısı 2 olarak alınır.

$$\sigma_v \leq q_{all} = \frac{q_{ult}}{F_s} = \frac{q_{ult}}{2} \quad (4.30)$$

Uzayabilen donatılı yatay bir geri dolguyu tutan toprakarme sisteminde taşıma gücü tahkiki için öncelikle daha önce tanımlanan eksantrisite değerinin hesabı gereklidir. Bu değer formülü aşağıdaki gibidir:

$$e = \frac{\left(P_b \frac{H}{3} + P_q \frac{H}{2} \right)}{(V_q + W)} \quad (4.31)$$

Buradan hareketle tabanda meydana gelecek toplam gerilme;

$$\sigma_{vmax} = \frac{(V_q + W)}{(L - 2e)} \quad (4.32)$$

$$q_{all} = \frac{q_{ult}}{2} \geq \frac{\sigma_{vmax}}{G.S.} \quad (4.33)$$

Geleneksel toprakarme sistemi için ($\lambda \neq 0, \beta \neq 0$) hesap sırası aşağıda açıklanmıştır:

- Denklem 4.10' da verilen formüle göre eksantrisite hesabı yapılır.
- Meyerof formülüne göre düşey gerilme hesaplanır:

$$\sigma_v = \frac{(V_q + W + P_a \sin \lambda)}{(L - 2e)} \quad (4.34)$$

Şekil 4.11 : Toprakarme sisteminde taşıma gücü tahkiki (Elias, 2001)

- Zemin mekaniği prensiplerine göre taban zemininin taşıma gücü hesabı yapılır:

$$q_{ult} = c_f N_c + 0.5(L - 2e) \gamma_f N_f \quad (4.35)$$

Burada N_c ve N_f değerleri birimsiz büyüklükler olup, zemin mekaniği kaynaklarından okunabilir.

Emniyetli taşıma gücü tahkiki yapıldıktan sonra, istenen stabilite kriterleri sağlanmıyorsa şerit boyları uzatılarak analizler tekrarlanır. Şeritlerin uzatılmasıyla istenen güvenlik sayıları elde edilemiyorsa zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulur ve temel zemininin dayanım parametreleri yeniden hesaba katılmalıdır.

En yaygın tercih edilen iyileştirme yöntemleri zemin yerdeğiştirme, jet grout ve taş kolon olarak sıralanabilir. İyileştirme yöntemleri projenin niteliğine bağlı olarak çeşitlendirilebilir. Kompleks geometrilerde, yüksek yüklemeler altında ve zayıf zemin koşullarında iyileştirme yöntemleri çeşitlendirilebilmektedir. İyileştirme alanı belirlenirken, toprakarme dolgu bölgesi, dolayısıyla şerit boyları da dikkate alınmalıdır. (Schlosser, 1983)

4.7.5.4 Genel stabilite

Sistemin donatı boyları, donatı aralıkları, dış stabilite tahkikleri tamamlandıktan sonra genel stabilite kontrolü yapılmalıdır. Sisteme ait parametrelerin yanında, yapının yer alacağı bölgenin topoğrafik özellikleri, jeolojik yapısı, tabakalanması, taban zemininin ve alttaki tabakaların geoteknik parametreleri genel stabilite analizlerinin sonuçlarına direk olarak etki eder. genel stabilite analizleri şev stabilitesi analizi yapan nümerik analiz programları ile yapılabilir. Bu yazılımlarda toprakarme yapısının sınırları belirlenir. Şeritlerin yerleşimleri ve boyları sisteme girilerek parametreler tanımlanır. Analizler sonucunda emniyet katsayısı en düşük kayma dairesi bulunur. Hesaplanan güvenlik katsayısı istenen değerden düşük ise şeritler uzatılarak, ya da taban zemininde iyileştirme yapılarak analizler tekrarlanır. (Elias ,2001)

4.7.5.5. Sismik kontrol

Sismik yükler altında toprakarme sistemine statik duruma ek olarak bir dinamik itki etki eder. Bu itkiden kaynaklı meydana gelecek atalet kuvveti aşağıdaki gibi formülize edilir.

$$P_{IR} = Ma_m \quad (4.36)$$

Burada M değeri toprakarme kütesinin toplam ağırlığını temsil ederken a_m değeri sisteme etkileyen maksimum yatay yöndeki ivmeyi ifade eder.

Dinamik yatay itki kuvveti psödö statik özellikte, Mononobe-Okabe yaklaşımında tariflendiği gibi meydana gelir. Statik durumda sistemde yer alan kuvvetlerin yanında, bu dinamik itki de hesaba katılarak dış stabilite analizleri yapılır. Sismik analizlerde güvenlik faktörleri, statik analizlerdeki güvenlik faktörlerinin yaklaşık %75'i kadardır.

Sismik hesaplar aşağıdaki sıraya göre yürütülür:

- Yapının bölgesine göre belirlenecek maksimum yer ivmesi katsayısıyla (a) çarpılmak üzere bir pik yatay yer ivmesi (a_g) belirlenir.

$$a_m = (1.45 - a)a \quad (4.37)$$

- Denklem 4.36'da belirtilen a_m değeri merkezde oluşan ve duvara etkileyen maksimum deprem ivmesini temsil eder. Tasarım deprem ivmesi olarak da

isimlendirilir. Buna bağılı olan yatay atalet kuvveti (P_{IR}) ve sismik itki (P_{AE}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_{IR} = 0.5a_m\gamma_r H^2 \quad (4.38)$$

$$P_{AE} = 0.375a_m\gamma_b H^2 \quad (4.39)$$

Şekil 4.12 : Toprakarme sisteminde sismik kuvvetler (Elias, 2001)

Hesaplanan kuvvetler sisteme etkiyen statik kuvvetlere eklenir. Yatay atalet kuvveti değerinin, sismik itkinin %60'ı büyüklüğünde olduğu kabul edilir. İki değer maksimum mertebeye ulaştığı ana kadar indirgenen yatay atalet kuvveti sisteme etki eder.

- Kayma ve devrilme tahkikleri bu durum için tekrarlanır. Sistemin statik halde sağlaması gereken güvenlik katsayılarının %75'i kadar güvenli olduğu durum, sismik analizlerin istenen güvenliği sağladığı durum olarak kabul edilmektedir.

Deprem ivmelerinin 0.4g mertebesinde büyük olduğu bölgelerde sistemin kalıcı yatay ve düşey deformasyonlar yapabileceği düşünülmelidir. Bu nedenle sismik

aktivitesi yüksek bölgelerde tasarımda daha yüksek güvenlik sayıları elde edilmesi gerekli olabilmektedir. (Binquet, 1978)

4.7.6 İç stabilite

4.7.6.1 Donatılarda çekme kuvvetleri ve şerit kırılma tahkiki

İç stabilite kontrolünde ilk adım, şeritlerde meydana gelmesi beklenen maksimum çekme kuvvetinin belirlenmesidir. Bu problemde daha önce bahsedilen maksimum gerilme çizgisinden yararlanılır. Bu hattın yeri dolgunun sıkılığına, donatıların sıkılığına bağlı olarak değişse de genel formu aynıdır. Bu kriterlere göre şerit tipine göre bir yatay gerilme oranı-derinlik grafiği oluşturulmuştur. (Şekil 4.13)

Şekil 4.13 : Şerit tiplerine göre yatay gerilme oranı-yükseklik ilişkisi (Elias, 2001)

Maksimum gerilmelerin hesabında aşağıdaki yol izlenir.

- Her bir şerit donatısı seviyesinde düşey gerilme ve yatay gerilmeler hesaplanır. Sistemde yer alan sürşarj yüklerinden dolayı meydana gelecek ek gerilmelerin de yatay ve düşey bileşenleri eklenir. Buna göre her şerit seviyesinde toplam yatay ve düşey gerilmeler aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$\sigma_H = K_r \sigma_v + \Delta \sigma_h \quad (4.40)$$

Düşey gerilme hesabında donatı seviyesi (Z) ve duvar üstünden gelecek sürşarj yükü (q) değeri de göz önünde bulundurulur.

Buna göre düşey gerilme değeri aşağıdaki gibi hesap edilir.

$$\sigma_v = \gamma_r Z + \sigma_2 + q + \Delta\sigma_v \quad (4.41)$$

Burada K_r değeri duvar üst seviyesinden alt seviyesine kadar olan mesafenin (Z) bir fonksiyonudur. Bu mesafede duvar üstü elemanlar (kep) ve panel altı tesviye betonu kalınlığı dikkate alınmaz. Formüldeki σ_2 değeri ise Şekil 4.15'te gösterildiği gibi hesaplanır.

$\Delta\sigma_v$ parametresi düşey yüklerden dolayı sistemde meydana gelen düşey gerilme artışını temsil eder. Bu artış geometrik olarak 2Y/1D eğimle sisteme etkir. (Şekil 4.15)

$\Delta\sigma_h$ parametresi sisteme etkiyen düşey yüklerden dolayı meydana gelecek yatay gerilme artışını temsil etmektedir. (Şekil 4.15)

Her sürşarj yük tipine göre gerilme artışları ve hesap yöntemleri farklıdır. (Şekil 4.15, 4.16)

- Düşey kademeler S_v olmak üzere her bir donatı kademesi için birim genişlikte maksimum gerilmeler hesaplanır:

$$T_{max} = \sigma_h \cdot S_v \quad (4.42)$$

Maksimum gerilme değeri bağımsız tipte donatılar için belirlenen bir duvar genişliği boyunca da hesaplanabilir:

$$T_{max} = \frac{\sigma_h \cdot S_v}{R_c} \quad (4.43)$$

Denklem 4.42'de yer alan R_c değeri kapsama oranı olarak ifade edilir. Bu değer:

$$R_c = \frac{b}{S_h} \quad (4.44)$$

olarak hesaplanır. Kapsama oranı donatıya ait birim genişliğin (b), donatıların merkezleri arasındaki yatay uzaklığa (S_h) oranıdır. Kapsama oranı dış stabilitenin iç stabilite ile ilişkisinin anlaşılması yönünden önemlidir. Şekil 4.13 ve 4.14' de şevli duvarlardaki donatı gerilmeleri ile sürşarj yükünden kaynaklı düşey gerilme artışının hesaplanması açıklanmıştır.

Şekil 4.14 : Şevli duvarlarda donatı gerilmeleri (Elias, 2001)

Şekil 4.15 : Sürşarj tipine göre düşey gerilme artışı (Elias, 2001)

Sürşarjlardan meydana gelen yatay gerilmelerin hesabında aşağıdaki yol takip edilir.

- Eğer varsa, yatay sürşarj kuvvetlerinden meydana gelen yatay gerilme artışı:

$$\Delta\sigma_h = 2F_H \left(\frac{z}{l_1} \right) \quad (4.45)$$

Denklem 4.44' te geçen l_1 değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$l_1 = \frac{L_b}{\tan(45^\circ - \phi/2)} \quad (4.46)$$

L_b , sürşarj yükünün efektif genişliğine karşılık gelir. F_H , etkiyen yatay kuvveti temsil eder.

Şekil 4.16 : Yatay yükler altında gerilme artışı parametreleri (Elias, 2001)

- İzin verilen maksimum çekme kuvveti (T_a) her kademe için hesaplanır:

$$T_a \geq \frac{T_{max}}{R_c} \quad (4.47)$$

Bu tahkikte şeritlerin panel bağlantı noktalarında meydana gelecek kuvvetlerin, şerit kapasitesini aşmaması kontrol edilmelidir. Kapasite aşılması durumunda şerit tipinin değiştirilmesi, hesap yüksekliğindeki bağlantı sayısının arttırılması gibi seçenekler göz önüne alınmalıdır. Çekme tahkiki iç stabilitenin aderans tahkiki ile birlikte iki temel kriterinden birisidir. (Mitchell, 1987)

4.7.6.2 Kopma tahkiki

Şeritlerin kopma dayanımının kontrolü aşağıdaki kriterle kontrol edilir:

$$T_{max} \leq \left(\frac{1}{GS_{PO}} \right) P_r R_c \quad (4.48)$$

$$T_{max} \leq \left(\frac{1}{GS_{PO}} \right) F^* \alpha \gamma_r z' L_e C R_c \quad (4.49)$$

Denklem 4.48' de yer alan değişkenlerden GS_{PO} , kopma tahkiki için güvenlik sayısını, F^* , kopma dayanım katsayısını, α ise ölçek düzeltme faktörünü ifade eder.

Şekil 4.17 : Bağlantı noktalarında şerit kopma tahkiki (Elias, 2001)

C değeri çelik şerit donatılar için 2 alınır. $\gamma_r z'$ ifadesi hesap derinliğindeki düşey jeolojik yüke karşılık gelir. Burada L_e değeri önemlidir. Maksimum gerilme çizgisine göre pasif bölgede kalan şerit mesafesi bu değere eşittir. Kopmaya bağlı iç stabilite analizlerinde şerit boyu bu parametreye bağlıdır. Denklemden pasif bölgedeki şerit boyu çekilirse aşağıdaki sınır koşulu elde edilir:

$$L_e \geq \left(\frac{1.5 T_{max}}{C F^* \alpha \gamma_r z' R_c} \right) \quad (4.50)$$

Bu denklemde hareketli yükler hesaba katılmamıştır. Bu kriterin sağlanmaması durumunda donatı boyu arttırılabilir, daha yüksek kopma dayanımına sahip şeritler kullanılabilir veya donatılar arası düşey mesafeler arttırılarak maksimum kopma dayanımı (T_{max}) düşürülebilir.

Toplam donatı boyu aktif bölge ve pasif bölgede yer alan donatı uzunluklarının toplamına eşittir. (Şekil 4.1,4.2)

$$L = L_a + L_e \quad (4.51)$$

Uzayabilen donatılar için aktif bölge şerit boyu (L_a) uzunluğu;

$$L_a = (H - Z) \tan(45 - \phi/2) \quad (4.52)$$

Uzayamayan donatılar için aktif bölge şerit boyu (L_a) uzunluğu duvar yüksekliği boyunca değişkenlik göstermektedir. Buna göre;

- Duvar üstünden H/2 seviyesine kadar;

$$L_a = 0.3H \quad (4.53)$$

- H/2 seviyesinden duvar tabanına kadar;

$$L_a = 0.6(H - Z) \quad (4.54)$$

olarak hesaplanır.

Genellikle kesit boyunca aynı uzunlukta şerit boyu seçilir. Şerit boyu en elverişsiz şerit kademesi için güvenliği sağlayacak uzunlukta olmalıdır. Yükleme durumları ve geometrik değişiklikler sonucunda kademeler arasında şerit boylarında değişiklik yapılabilir. Her durumda şerit boylarının dış ve iç stabilite açısından güvenlik koşullarını sağlaması beklenir. (Bowles, 1988)

4.7.6.3 Sismik kuvvetler etkisinde iç stabilite kontrolü

Sismik kuvvetler etkisinde toprakarme duvar iç stabilite tasarımında, yatay yönde bir deprem kuvveti (P_1) aktif bölgeye etkilir. Bu kuvvet, yatay doğrultuda yer alan donatılarda bir gerilme kuvveti oluşturur. Toprakarme sisteminin her şerit seviyesinde bu gerilmeyi güvenle karşılaması beklenir. Sismik yüklemenin meydana geldiği süre boyunca maksimum gerilme çizgisinin lokasyonunun değişmediği kabulü yapılır. Bu kabul, şerit kırılması ve kopması durumlarına göre daha konzervatif bir kabuldür.

Sismik kuvvetler altında iç stabilite analizleri aşağıdaki işlem sırasında yapılır.

- Bir z seviyesinde toprakarme sistemine etkiyen maksimum deprem ivmesi ($\alpha_m g$) ve atalet kuvveti ($P_1(z)$) hesaplanır:

$$\alpha_m = (1.45 - \alpha)\alpha \quad (4.55)$$

$$P_I(z) = M(z)\alpha_m g \quad (4.56)$$

Sismik kuvvetler altında meydana gelen maksimum gerilme kuvvetinin ilk bileşeni (T_{m1}) istenen derinlikteki düşey gerilme (σ_h) ve derinliğe bağlı K katsayısına bağlı olarak hesaplanır.

$$\sigma_h = K\sigma_v + \Delta\sigma_h = K(\gamma_r H + q + \Delta\sigma_v) + \Delta\sigma_h \quad (4.57)$$

Buna bağlı olarak sismik kuvvetler etkisindeki maksimum gerilme kuvvetinin ilk bileşeni aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$T_{m1} = S_v \sigma_h \quad (4.58)$$

- Sismik kuvvetlerce uyarılmış donatı şeritleri üzerindeki dinamik artım hesaplanır. Bu artım sismik kuvvetin donatıların taşıyıcı bölgeleri üzerine orantılı olarak dağıtılmasıyla hesaplanır.

$$T_{m2} = \frac{P_I (R_c L_e) i}{(\sum (R_c L_e) i)} \quad (4.59)$$

Buna göre toplam gerilme kuvveti bu iki bileşenin toplamına eşit olur:

$$T_{max} = T_{m1} + T_{m2} \quad (4.60)$$

Şerit kopması ve kırılması durumlarına göre sismik iç stabilite analizlerinde, statik durumdaki güvenlik faktörleri 0.75 ile çarpılarak kullanılır. Sismik kırılma tahkiki:

$$T_{max} \leq \frac{1}{0.75} T_a R_c \quad (4.61)$$

- Kopma tahkiki ise aşağıdaki gibi yapılır:

$$T_{max} \leq \frac{P_r R_c}{0.75 G S_{PO}} \quad (4.62)$$

$$T_{max} \leq \frac{2F_d^* \alpha}{1.125} \gamma z' L_e R_c \quad (4.63)$$

Buna bağılı olarak;

$$F_d^*(\text{dinamik}) = 0.8F^* \quad (4.64)$$

Bu hesap yöntemi uzayamayan donatılı toprakarme sistemi için geliştirilmiştir. Donatıların uzayabilirliği toprakarme kütesinin sıkılığını etkileyen bir faktördür. Sıkılığın azalmasıyla sismik kuvvetlerin devirme etkisi artacaktır. (Mitchel, 1987)

Şekil 4.18 : Uzayamayan donatılı sistemde sismik iç stabilite (Elias, 2001)

4.8 Oturma

Dış stabilite analizleri, toprakarme sisteminin sürşarj yükleri ve kendi ağırlığı altında taban zemininde meydana gelebilecek oturmaların da tespit edilmesini içermektedir. Konvansiyonel sistemlere nazaran daha esnek bir yapıda olan toprakarme sistemlerinde oturma sınırları , yapının sınıfına göre değişmektedir. Yapı dolgusu, yol yaklaşımları, kenar ayak sistemleri, farklı oturma kriterleri beklemektedir. Bu duruma göre oturma analizleri iki farklı durum için göz önüne alınmalıdır:

- İnşaat sırasında zayıf zemin tabakalarına oturan kesimlerde bir farklı oturma meydana gelebilir. Bu durumda zayıf zemine oturan kesimlerin dilatasyonlarla farklı özellikte oturan kısımlardan ayrılması gerekir.

- Yapının servis ömrü süresince meydana gelecek toplam oturmalarla karşı uzun dönem zemin parametreleri kullanılarak toplam oturma miktarı bulunmalıdır. Bu miktar istenen değerlerin üzerinde ise, panellerde deformasyonlar meydana gelmektedir.

İzin verilen maksimum oturma değeri yapı yüksekliğinin bir fonksiyonudur. Beton panelli toprakarme sistemlerinde toplam izin verilebilir oturma miktarı panel yüksekliğinin %1'i seviyesindedir.

Sistemin önemli bir avantajı, dolgu serme sıkıştırma ile imalatın yürütülmesinden dolayı, temel sisteminin sürekli bir yükleme altında olmasıdır. Bunun sonucunda meydana gelebilecek ani oturmalar imalat sırasında tamamlanır. Uzun dönemde meydana gelebilecek konsolidasyon oturmalarına karşı alınabilecek bazı önlemler vardır. Bunlara örnek olarak imalat sırasında ön yükleme yapılması, düşey drenler ile konsolidasyonun servis ömrüne sarkmadan kabul edilebilir seviyelere indirilmesi verilebilir.

Duvar hattı boyunca zayıf zemin tabakalarından ötürü lokal olarak oturmalar gözleniyorsa, farklı oturmalarla karşı sisteme düşey derzler konularak oturan bölümün ayrılması önlemi alınır. Sistem içinde yaratılan bu lokal bölgelerin farklı deformasyon yapabilme riski, artık yapının bütünü için bir tehdit oluşturmayacak düzeydedir. Sıkışabilen zemin tabakalarına denk gelen bu kısım dilatasyonlar vasıtasıyla sistemin genelinde oturma açısından risk oluşturmayacak hale gelir.(Schlosser, 1974)

4.9 Zemin İyileştirilmesi

Toprakarme sisteminin kendi temel sistemiyle maruz kalacağı yükleri taşıyamaması sonucunda temel zemininin iyileştirilmesi gereği ortaya çıkmaktadır. Temel iyileştirme yöntemlerinden bu sisteme uygun olanlar aşağıda sıralanmıştır:

- Zemin değiştirilmesi: Zayıf zeminin kaldırılarak yerine istenen kalınlıkta kaliteli malzeme ile serme-sıkıştırma yapılması
- Dinamik konsolidasyon
- Ön yükleme
- Taş kolon uygulaması
- Jet grout uygulaması

- Düşey drenler ile konsolidasyonun hızlandırılması (NCHRP, 1984)

Şekil 4.19 : Ön yükleme ve düşey dilatasyon (Elias, 2001)

5. PALYELİ TOPRAKARME İSTİNAT YAPILARI

5.1 Giriş

Toprakarme istinat yapılarının kullanımının hızla yaygınlaşması, farklı arazi koşullarında ve topoğrafik şartlarda, farklı kullanım amaçlarına göre sistemin yeni uygulama alanları bulmasına olanak sağlamıştır. Bu gelişimin bir sonucu olarak, kompleks toprakarme sistemleri ortaya çıkmış, hesap yöntemlerinin geliştirilmesi ve genel prensiplerin özel çözümlere uygulanması gerekmiştir.

Yüksek sismik aktivite görülen bölgelerde, apik arazilerde, yüksek üstyapı yüklerinin meydana geleceği projelerde, toprakarme istinat sistemlerinin kullanımı süreç içinde bir zorunluluk haline gelmiştir. Özel tasarımın gerekli olduğu toprakarme sistemlerinden başlıcaları aşağıda sıralanmıştır:

- Toprakarme kenar ayaklar
- Palyeli toprakarme duvarlar
- Trapez kesitli toprakarme duvarlar
- Karşılıklı toprakarme duvarlar
- Destekli toprakarme duvarlar

Bu sistemler için geleneksel dikdörtgen kesitli toprakarme duvar tasarım esaslarının yanında özel dizayn ve imalat koşulları belirlenmiştir.

5.2 Palyeli Toprakarme Yapıları

Kompleks toprakarme sistemlerinin içinde palyeli istinat duvarlarının tasarımının ayrı bir önemi vardır. Mimari tasarımların ve apik arazi koşullarının bir sonucu olarak ortaya çıkan yüksek kesitlerin tek palyeli sistemlerle geçilmesi toprakarme sisteminde şerit boylarını uzatmaktadır. Bunun yanında sistemin meydana gelecek yüksek dolgu yüklerinden dolayı oturmaya maruz kalma riski ortaya çıkmıştır. Bu oturma, temel seviyesinde ve dolgu içinde meydana gelebileceği gibi, beton panel yüzeylerinde de kalıcı deformasyonlara neden olacaktır. Bu nedenle toprakarme yapılarının kademeli olarak inşa edilmesi ihtiyacı doğmuştur. Palyeli sistemler düşey

deformasyonları önleyebileceği gibi, sistemin eğimli bir ön yüze sahipmiş gibi davranmasını sağlar. Böylece sistemin yatay gerilmeleri azaltılır. (Berg, 2009)

Şekil 5.1 : Kompleks geometrili toprakarme sistemleri (Berg, 2009)

5.2.1 Palyeli toprakarme yapılarının tasarımı

5.2.1.1 Ön tasarım

Palyesiz dikdörtgen kesitli toprakarme istinat sistemleri için çözüm yöntemleri geliştirilirken, palyeli toprakarme sistemleri için analiz yöntemleri hakkında bilinenler çok daha sınırlıdır. Sistemin tam olarak anlaşılabilmesi için genel stabilite analizlerinin ve maksimum kayma dairelerinin yorumlanması, iç ve dış stabilitenin doğru çözümlenmesi mutlak koşuldur. Ön tasarımda dikkate alınacak hususlar bu kısımda açıklanacaktır.

Palyeli duvarların tasarımında iki ana durum için analizler yürütülür:

- Dış stabilite analizi için basitleştirilmiş geleneksel toprakarme dizayn yaklaşımları kullanılır. Maksimum gerilme hattı belirlenir. (Şekil 5.2)
- Şev stabilitesi analiz programları kullanılarak sistemin geometrik koşulları ile zemin şartları tanımlanır ve genel stabilite kontrolleri yapılır.

Alt ve üst palyeler için duvar yükseklikleri belirlenir. Bundan sonra duvarların birbirine etkisinin anlaşılması için duvarlar arası yatay mesafe (set back) tespit edilir. Duvarlar arası yatay mesafe alt ve üst palye yüksekliklerinin bir fonksiyonudur. Bu değer sınır koşullarına göre maksimum gerilme hattı belirlenir. (Şekil 5.2)

Ön tasarımda alt ve üst duvarlar için şerit boyları belirlenmelidir. Bu şerit boylarının belirlenmesinde sınır koşullar aşağıda verilmiştir:

Üst duvar için;

$$L'_1 \geq 0.7 H_1 \quad (5.1)$$

Alt duvar için;

$$L'_2 \geq 0.6 H \quad (5.2)$$

Burada H_1 üst duvar yüksekliğini, L_1 üst duvar şerit boyunu, H_2 alt duvar yüksekliğini, L_2 alt duvar şerit boyunu temsil eder. Sistemin toplam duvar yüksekliği H olmak üzere bu değer;

$$H = H_1 + H_2 \quad (5.3)$$

şeklinde ifade edilir.

Tasarım için izlenecek yol aşağıdaki gibidir:

- Üst duvar klasik toprakarme tasarım kriterlerine göre analiz edilir.
- Alt duvarın hesabında, üst duvardan gelecek gerilmeler, duvar üstüne sürüşarj yükü olarak eklenir. Alt duvar bu koşullar için genel stabilite analizlerine tabi tutulur. En kritik kayma daireleri belirlenir. İstenen güvenlik katsayılarına erişilemiyorsa, şerit boyları uzatılabilir. Eğer hala kriterler sağlanmıyorsa zemin iyileştirme yöntemleri değerlendirilir.

Şekil 5.2 : Palyeli duvarlarda maksimum gerilme çizgisi (Elias, 2001)

- İç stabilite analizleri için palye genişliği sınır koşulları için şekil 5.2'de gösterilen durumlardan uygun olan seçilir. Maksimum gerilme hattının belirlenmesi ampirik bağıntılarla geometrik koşulların yardımıyla mümkün olmaktadır
- Palye mesafesi ortalama mertebede olan sistemler için düşey gerilme diyagramları dikkate alınır (Şekil 5.3)
- Büyük palye genişliklerinde D mesafesi için belirlenen sınır koşullar aşılr. Bu durumda üst duvarın alt duvara etkisi olmayacağı düşünülür ve duvarlar bağımsız olarak tasarlanır.

5.2.1.2. Saha araştırmaları

Geleneksel toprakarme duvar tasarımlarından önce, yapının oturacağı zemin hakkında bilgi sahibi olmak büyük önem arzeder. Klasik yaklaşımlar ile çözülebilen

kesitlerde duvar hattı boyunca açılacak sondajlardan elde edilen veriler yeterli olmaktadır. Yapı yüksekliğinin arttığı palyeli duvarlarda ise daha detaylı bir zemin araştırması yapılması gerekmektedir. Meydana gelecek yüksek dolgu yüklerinin yanında, yapıdan taşınması beklenen yüksek ölü ve hareketli sürşarjlar, sondaj sayısı ve derinliklerinin yeniden gözden geçirilmesini gerektirmiştir. Yalnızca duvar aksı boyunca yapılan sondajların yanında, toprakarme istinat yapısının geri dolgusunun oturacağı alanda da araştırmaların yapılması önemlidir. Bu bölge tahmini olarak duvar yüksekliğinin %70'i olarak kabul edilir. Duvar yapısının oturacağı bu dikdörtgen temel hattında yapının devam ettiği bölge boyunca sondajlar yapılmalıdır. Zayıf zemin tabakaları ile karşılaşıldığında sondajların sıklaştırılması temel zemini hakkında daha yaklaşık sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır. (Sankey, 2004)

Şekil 5.3 : Üst duvar etkisinde alt duvarda düşey gerilmeler (Elias, 2001)

Yüksek toprakarme yapılarında, alçak yapılara nazaran daha yüksek temel zemini gerilmeleri meydana gelmektedir. Yüksek gerilmeler altında temel zemininin taşıma gücü ve oturma davranışının anlaşılması için standart penetrasyon ya da koni penetrasyon deneylerinin yürütülmesi, direk kesme, üç eksenli basınç ve konsolidasyon testlerinin yapılması, yüksek yüklemeler altında sistemlerin güvenliğini test etmek hususunda fikir verici olmaktadır. Bu açıdan yüksek toprakarme yapı tasarımında geoteknik araştırma önemli bir unsurdur.

5.2.1.3. Taşıma gücü kontrolü

Yüksek duvarların tasarımında temel zemininin yüksek yüklemeler altındaki davranışının anlaşılması, ekonomik bir tasarım yapılması açısından önemlidir. Klasik toprakarme yaklaşımının yeterli olmadığı kompleks geometrilerin tasarımında ekonomi büyük önem arz etmektedir. Doğru bir yaklaşım yapılamadığı takdirde, ekonomik olmayan konzervatif tasarıma sahip yapıların ortaya çıkması mümkündür. Daha gerçekçi ve ekonomik bir tasarımın, temel zemininin taşıma gücü açısından davranışının doğru yorumlanmasıyla mümkündür. Bu da daha önce bahsedilen detaylı saha araştırmalarının yapılmasını işaret etmektedir. Yeterli araştırmanın yapılmamasının sonucu olarak daha yüksek güvenlik katsayılarında tasarım yapılır. Bu da sistemin gerekenden daha uzun çelik şeritler kullanılarak, daha fazla maliyetle çözülmesine yol açar.

5.2.1.4. Yatay deformasyonlar

Oturma analizleri, palyeli yüksek duvarların ekonomik tasarımı açısından göz önüne alınması gereken bir başka husustur. Sonlu elemanlar tabanlı nümerik analiz programları kullanılarak, duvardaki deformasyonlar, maksimum gerilmeler, potansiyel kayma daireleri sismik ve statik koşullarda tespit edilir. Bu açıdan ön tasarımın gerçek yapı performansının tahmininde gerçekçiliği artar.

Sankey (2004) tarafından ortaya konan yaklaşıma göre palyeli olarak dizayn edilmiş uzayamayan (çelik) donatılı bir toprakarme istinat yapısı için izin verilebilen maksimum yatay deformasyon 12 mm mertebesindedir. Bu seviyede bir deformasyonun, yapısal bir hasar yaratmayacağı kabul edilir. Sismik etkiler altında bu deformasyon daha da fazla olabilir.

Toprakarme sisteminin esnek yapısı küçük mertebedeki deformasyonları yapısal bir hasar görülmeden karşılayabilmektedir. Buna rağmen yatay deformasyonların sınırlandırılması bir zorunluluktur. Duvar kesiti boyunca yatay deformasyonların görüldüğü bölgelerde alınacak özel önlemler ile sistemin performansı artırılabilir.

5.2.1.5. Düşey deformasyonlar

Palyeli yapılarda düşey deformasyonlar dolgu yüksekliğinin yanında yüzey panel elemanlarının niteliğine de bağlıdır. Yüksek dolgu yüklerinde herhangi bir düşey deformasyon tehlikesine karşı gerilmenin fazla olduğu alt kesimlerde standart 14 cm

kalınlığındaki panellerin yerine 18 cm kalınlığındaki panellerin kullanılması alınabilecek bir önlemdir. Artan gerilmelerin etkisinde yüzey panellerinin birbirine basarak deformasyon yaratmasını önlemek amacıyla değişen kalınlıklarda polimer takozlar duvar kesiti boyunca kullanılır. Kesitlerin yükseklikleri arttıkça kullanılan takozların kalınlıkları da artar.

Yüksek kesitli toprakarme sistemlerinde 1 metre mertebesine ulaşan düşey deformasyonlar gözlenmiştir. Toprakarme sisteminin esnek yapısı düşey deformasyonlar için avantaj oluşturmaktadır. Polimer takozlar ve uygulanan dilatasyonlar düşey deformasyonların sınırlandırılmasında önemlidir. Alınan bu önlemlerle toprakarme sistemi çarpılma açısı 1 cm/metre seviyesine kadar olan farklı oturmaları karşılayabilmektedir. (Sankey, 2004)

5.2.2 Palyeli toprakarme yapılarının imalatı

5.2.2.1 Dolgu

Palyeli toprakarme sistemlerinde dolgu malzemesinin seçimi önemlidir. Geleneksel toprakarme yapılarına benzer olarak, palyeli toprakarme yapılarında da granüler ve iyi sıkışma özelliklerine sahip bir geri dolgu malzemesinin kullanılması gerekmektedir. AASTHO 'da tavsiye edilenlere göre palyeli yapılarda kullanılacak toprakarme dolgularında içsel sürtünme açısının minimum 34° ve 200 nolu elekten geçen malzemenin %15 değerinden küçük olması beklenir. Kesit yüksekliklerinin azalmasıyla bu kriter esnek hale gelse de, özellikle yüksek kesitlerde dolgunun bu kriterleri sağlaması yapı performansı açısından önemlidir.

İyi sıkışma özelliklerine sahip toprakarme dolgusu şerit-dolgu arasındaki aderans kuvvetini arttırmaktadır. İnce malzeme oranının düşük olması, organik aktiviteleri engelleyeceğinden, çelik donatıların galvanizli yüzeylerinde meydana gelecek korozyon da sınırlandırılır.

İnce malzeme oranı yüksek dolguların kullanımı, toprakarme dolgusu içinde oturmalara sebep olabileceği gibi, üstyapıda ekstra deformasyonlar meydana getirebilmektedir. Cüruf, uçucu kül gibi endüstriyel atıkların toprakarme dolgusu olarak kullanılması da önerilmemektedir. Bu tip malzemeler drenaj özellikleri açısından sistemi hidrostatik yüklere maruz bırakabilmektedir. Bu nedenle toprakarme dolgusu olarak kullanılması, sakıncalı sonuçlar doğurabilmektedir. (Smith, 2003)

5.2.2.2. Palye genişliği (Set-Back)

Yüksek toprakarme yapılarda palye imalatı bir dizayn hususu olmakla birlikte, yapının servis ömrü boyunca meydana gelebilecek arızaların da onarımı açısından önem taşır. Buna bağlı olarak palye tasarımında bazı kriterlerin göz önüne alınması gerekir. Palye tasarımı aşağıdaki konuları etkiler:

- Üst duvarın gömme geometrisi
- Terasman genişliği
- Şerit yerleşimi

Şekil 5.4 : Cürufu toprakarme dolgusundan kaynaklı deformasyon (Smith, 2003)

Palyeler en az 1 metre genişlikte olmalıdır. Bu genişlik palye hattında dolgu sıkışması ve imalatın kolay yapılabilmesi açısından önemlidir. Drenaj kanallarının temizlenmesi, dilatasyonların ve numune şeritlerin kontrolü, palyeler yardımıyla yapılır. Palyeler, üst duvarın topuğunun korunması açısından önem taşır. Gerekli gömme derinlikleri, palye üstü dolgusunun şekillendirilmesiyle elde edilir. Bu gömme derinliği üst duvarın sisteme ilettiği taban gerilmesinin bir fonksiyonudur. Palye şevlendirmesinin doğru bir açıyla yapılmaması durumunda bu bölgede lokal stabilite problemleri görülebilmektedir. Palye genişliği ile topuğun korunmasına ilişkin tasarım doğrudan ilişkilidir. Üst palyelerdeki duvarlarda yapılacak topuk koruma dolgusu, sistemin pasif direnç kazanarak devrilme durumu için daha güvenli hale gelmesine yardımcı olur.

5.2.2.3. Drenaj

Deniz ve liman bölgeleri dışındaki alanlarda imal edilen toprakarme istinat yapılarında, su etkisi dikkate alınmamaktadır. Toprakarme dolgusunun granüler özellikte olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla sistemin yüzeysel suları dolgu içinde tutmadan gövdeden uzaklaştırması gerekir. İnce malzeme içeren dolgularda bu su dolgu içine hapsolmakta, meydana gelen hidrostatik basınç kuvveti ile yüzey panellerinde deformasyonlar meydana gelmektedir.

Şekil 5.5 : Palyeli duvarlarda terasman dolgusu (TAI, 2000)

Şekil 5.6 : Palye mesafesine göre topuk dolgusu (TAI, 2000)

Drenajların doğru uygulanmaması tüm sistemin stabilite sorunları ile karşı karşıya kalmasına sebep olabilir. Kompleks bir geometriye sahip palyeli duvarlar için drenaj daha kritik bir husustur. Yapı yüksekliği boyunca suyun sisteme ek bir yük meydana getirmeden uzaklaştırılması esastır. Özellikle palye genişlikleri boyunca birikecek suların alınacak önlemlerle sistemden uzaklaştırılması, drenaj projelendirmesinin ana

amacıdır. Panel yüzeylerinde biriken suyun duvar tabanına doğru akışı sağlanamazsa, su toprakarme dolgusu içerisine girer ve ön tasarımda hesaba katılmayan bir itki oluşturur. Bunun önüne geçmek için alınabilecek önlemler aşağıdaki gibidir:

- Palye içine gömülü poroz borular
- Palye altında geomembran uygulaması
- Palye üstünde polistren destekli eğimli grobeton imalatı

5.2.3 Tarihsel gelişim

Toprakarme istinat yapılarının son 20 yılda büyük uygulama alanları bulmasıyla birlikte, sismik olarak aktif bölgelerde farklı projelerde uygulanmaya başlanmıştır. Sistemin yaygınlaşmasının bir sonucu olarak, geleneksel yaklaşımlar ile çözülebilen küçük kesitlerin yanında, yüksek sürşarj yüklerine maruz kesitler de ortaya çıkmıştır. Hesap yöntemleri temelde aynı olmakla birlikte, toprakarme sisteminin bileşenleri olan dolgu, donatı ve yüzey elemanlarına ilişkin kriterlerin gözden geçirilmesi durumu ortaya çıkmıştır.

Amerika'da 1980'li yıllara kadar yapılan toprakarme istinat yapılarında maksimum yapı yüksekliği 12 metreyi aşmamaktaydı. Ancak 1990'lı yıllardan itibaren 20 metreye kadar ulaşan toprakarme uygulamaları yapılmaya başlanmıştır. Şehir merkezlerinde yapılan inşaatlarda alanların kısıtlı olması, kamulaştırma sıkıntıları, yüksek kesitlerin ekonomik bir tasarım ile çözülmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Uzayamayan donatılar ile yapılan sistemlerde, uzayabilen donatılı sistemlere nazaran daha küçük mertebelerde deformasyonlar gözlenmiştir. (Sankey, 2004)

Şekil 5.7 : Örnek Palyeli Duvar Uygulaması (Seattle Airport, RECO, 2003)

6. HESAP YÖNTEMLERİ VE NÜMERİK ANALİZ PROGRAMLARI

6.1 Hesap Yöntemleri

Toprakarme istinat yapılarının tasarımında gelişen teknoloji ve yeni dizayn yöntemleri ile beraber, geleneksel rasyonel mühendislik yaklaşımlarının, nümerik analiz programlarıyla çözümlenmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Buna bağlı olarak bir toprakarme sisteminin çözümlenmesinde yapılacak tahkiklerin nümerik analiz programlarıyla doğrulanması gerekmektedir.

Toprakarme istinat sistemlerinin iç ve dış stabilite analizinde kullanılan başlıca hesap yöntemleri aşağıdaki gibidir:

- Çalışan Yükler Yöntemi
- Limit Durum Yöntemi
- Deformasyon Kontrol Yöntemi

6.1.1 Çalışan yükler yöntemi

Çalışan yükler yöntemine dayalı toprakarme yapı analizinde aşağıdaki esaslara göre tahkikler yapılır:

- Toprakarme donatılarının düşey lokasyonlarının ve aralıklarının belirlenerek, mevcut zemin koşulları altında gerilmelerin hesaplanması tamamlanır.
- Her donatı seviyesinde iç stabilite tahkiki yapılarak tahmini göçme dayanımları belirlenir.

6.1.2 Limit durum yöntemi

Limit durum yönteminde, toprakarme yapısının iç ve dış stabilite analizleri kontrol edilir. Analizlerin kombinasyonları da göz önüne alınır. Buna göre limit durum yönteminde aşağıdaki esaslara göre tahkikler yürütülür:

- Toprakarme sistemi bir blok olarak tanımlanır. Daha sonra bu bloğun dışından geçecek kritik kayma yüzeyleri bulunarak dış stabilite analizleri yapılır.

- Toprakarme dolgusunun içinden geçecek kritik kayma yüzeyleri bulunarak iç stabilite analizi yapılır.
- Kritik kayma yüzeylerinin toprakarme dolgusunun içinden ve dışından geçtiği durumlar için iç ve dış stabilitenin kombinasyonları göz önüne alınır.

6.1.3 Deformasyon kontrol yöntemi

Deformasyon kontrol yöntemi, limit durum ve çalışan yükler yöntemlerinden farklı olarak yapısal performansı göz önüne almaktadır. Buna göre servis süresince yapıda meydana gelebilecek yatay ve düşey deformasyonların tahmini, deformasyon kontrol yönteminin esasıdır. Bu tahminlerde toprakarme donatılarının boyları ve aralıklarından faydalanılır. Yatay deformasyonların bu yöntemle tahmini oldukça zordur. Yatay deformasyonlar yaklaşık olarak tahmin edilerek, belirlenen bir güvenlik faktörü ile iç ve dış stabilite için istenen güvenlik koşullarının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Düşey deformasyonların belirlenmesinde geleneksel oturma analizlerinden faydalanılır. Oturma analizleri için toprakarme yüzey panellerinin altında ve geri dolgu boyunca verilerin toplanması gerekmektedir. Analiz sonuçları, yüzey elemanlarının tipine, geri dolgu özelliklerine, dolgunun sıkışma karakteristiğine göre değişiklik gösterir. (Elias, 2001)

6.1.4 Donatı tipine göre hesap yöntemi

Toprakarme sistemlerinde uzayabilen veya uzayamayan donatıların kullanılması durumları için farklı hesap kabulleri yapılmaktadır.

6.1.4.1 Uzayamayan donatılı sistemler

Limit durum yönteminde, toprakarme sisteminin tutucu ağırlık metoduna (coherent gravity method) göre konvansiyonel istinat yapılarına benzer şekilde dış stabilite analizleri yapılır. İç stabilite analizleri için toprakarme sisteminin içinden geçen kritik kayma dairesi belirlenerek, sistemin aktif ve pasif bölgeleri göz önüne alınır. (Şekil 2.10)

Dış stabilite için gerilme durumu Coulomb kriterlerine göre belirlenir. İç stabilite için aktif toprak basıncının duvar yüksekliği ve donatı tipi ile olan ilişkisi göz önüne alınır. Bu hesap yöntemi basitleştirilmiş tutucu ağırlık metoduna (Coherent Gravity Method) dayanır.

6.1.4.2 Uzayabilen donatılı sistemler

Uzayabilen donatılı sistemlerde dış stabilite analizi uzayamayan donatılı sistemlerle aynı şekilde yapılır.

İç stabilite analizlerinde basitleştirilmiş tutucu ağırlık yönteminin yanında Rankine kayma teorisi göz önüne alınır. Bunun sebebi uzayabilen donatıların göçme anından önceki deformasyonlara, zemine göre daha toleranslı olmasıdır. (Elias, 2001)

6.2 Nümerik Analiz Programları

6.2.1 İç ve dış stabilite analizleri

Toprakarme sisteminin iç ve dış stabilite analizleri için Valdez isimli yazılımdan faydalanılmıştır. Valdez yazılımı Reinforced Earth şirketi tarafından kullanılan, limit durum yöntemini esas alarak toprakarme sistemlerinin stabilite analizlerinin yapıldığı özel bir nümerik analiz programıdır. Programın ayrıntılı sonuçları diğer nümerik analizlerle bir arada değerlendirilecek ve yorumlanacaktır.

Valdez programına ilişkin ayrıntılı açıklamalar Ek-1 'de verilmiştir.

6.2.2 Genel stabilite analizleri

Karmaşık geometri ve yükleme koşulları altındaki toprakarme istinat yapıları için iç ve dış stabilite kadar genel stabilitenin de kontrolü büyük önem taşır. Belirlenen zemin koşulları ve yüklemeler altında sistemin genel stabilitesinin istenen güvenlik faktörlerine göre yapılması gerekir. Genel stabilitenin yeterli güvenlik koşullarını sağlamaması durumunda iç ve dış stabilitenin de yeniden tahkik edilmesi gereklidir. Geleneksel dikdörtgen kesitli toprakarme istinat sistemlerinde, ideal zemin koşulları için genel stabilite kritik bir husus değilken, aşırı yüklemelere maruz yüksek kesitli yapılarda genel stabilite mutlaka yapılması gereken bir tahkiktir.

Bir genel stabilite analizinde izlenmesi gereken yol aşağıdaki gibidir:

- Kritik kesitlerin seçilmesi
- Göçme mekanizmasının anlaşılması
- Ekonomik ve güvenli bir dayanım yapısının tanımlanması
- Üstyapı yüklerinin, su ve deprem etkilerinin dikkate alınması.

Doğru bir nümerik model kurulması için, analizin yapılacağı kesite ait jeolojik kesitlerin, zemin ve kayaların mühendislik parametrelerinin önceden belirlenmesi

gerekir. Yer altı suyu durumu, tabakalar arası düzensizlikler ve çatlaklar, faylanmalar ve deprensellik de göz önüne alınmalıdır (Us Army Corps, 2003). Hidrolik koşullar, stabilite analizlerinde büyük önem taşır. Boşluk suyu basıncı etkisinde, kuru durumda belirlenen mühendislik parametrelerinin tekrar değerlendirilmesi gerekir. (Abramson, 2002)

Genel stabilite analizleri geçmişte grafik yöntemlerle veya el hesabı ile yapılırken, günümüzde gelişmiş nümerik analiz programları yardımıyla yapılmaktadır. Çoğu program, iki ya da üç boyutlu limit durum yöntemine göre hesaplama yapmaktadır.

Limit durum yöntemini esas alan bilgisayar programları, zemin kütlesinin kendi ağırlığı veya yüklemeler etkisinde stabil halde durabilmesini inceler. Şev stabilitesi analizleri, zeminin bu kuvvetler altında harekete geçeceği potansiyel kayma dairesinin bulunması esasına dayanır. Tüm yazılımlar sistemdeki tutucu kuvvetlerin, devirici kuvvetler ile karşılaştırılması durumunu dikkate alır. Tutucu kuvvetlerin devirici kuvvetlere oranı, belirlenen bir güvenlik faktörü ile değerlendirilerek sistemin stabilitesi hakkında fikir edinilir. En sık kullanılan limit durum tabanlı analiz tipi, dilim metodudur. Bu metot kayma riski olan bölgenin düşey dilimlere ayrılarak, her bir dilimin lokal stabilitesini analiz eder.

Fonksiyonel şev stabilitesi programları, sistemde en düşük güvenlik sayısına sahip kayma dairesinin yerini vermektedir. Dilim yöntemleri için çeşitli yaklaşımlar vardır. Nümerik analiz programları her yaklaşım için ayrı çözümler yapabilmektedir. Yöntemler titiz ve esnek olmak üzere ikiye ayrılır:

- Titiz yöntemler: Titiz yaklaşımlar stabilite analizlerinde yatay kuvvet dengesi, düşey kuvvet dengesi ve moment dengesini doğrulayan çözüm yöntemleridir. Sarma ve Spencer yöntemleri titiz yaklaşımlara örnektir. Yaklaşık yöntemlerden daha kesin sonuçlar ortaya koymaktadırlar.
- Yaklaşık yöntemler: Yaklaşık yöntemler sadece bazı denge durumlarını doğrular. Diğer denge durumları için basitleştirmeler ve kabuller yapılmaktadır. Bu yöntemler pratikte daha çok tercih edilmektedir. Basitleştirilmiş Bishop ve Fellenius yöntemleri bu sınıfa girer.

Hem yaklaşık hem titiz yöntemlerde analiz yapılmasını sağlayan nümerik analiz programları bulunmaktadır. Yaklaşık yöntemler, hızlı sonuç alınması, uygulama açısından fikir verici olması açısından tercih edilmektedir.

Şekil 6.1 : Dilim yöntemi (Zhu, 2003)

6.2.2.1 Basitleştirilmiş bishop dilim yöntemi

Basitleştirilmiş Bishop dilim yöntemi, Bishop (1955) tarafından ortaya konan dilim yaklaşımı ile şev stabilitesi problemlerini çözmeye yarayan bir yaklaşımdır. Bu yöntem her dilim üzerine etki eden kuvvetleri ele alır. Göçme durumuna göre güvenlik katsayısı, zemin bloğunun deneysel yöntemle hesaplanan maksimum kayma gerilmesinin (τ_{max}), denge durumundaki kayma gerilmesine (τ_{denge}) oranlanmasıyla bulunur.

$$G.S = \frac{\tau_{max}}{\tau_{denge}} \quad (6.1)$$

Kayma mukavemeti teorisine göre zeminin kayma direnci;

$$\tau_{max} = c' + (\sigma - u)\tan\phi = c' + \sigma'\tan\phi \quad (6.2)$$

Denge durumundaki kayma mukavemeti ise;

$$\tau_{denge} = \frac{1}{GS} [c' + \sigma'\tan\phi] \quad (6.3)$$

olarak tanımlanır.

Her bir dilim için tutucu momentlerin devirici momentlere oranı elde edilir. Bu oran mevcut dilim için kayma durumu için güvenlik katsayısını vermektedir.

Şekil 6.2 : Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi için dilim kuvvetleri (McCarthy, 2007)

Burada hesapta kullanılacak terimler aşağıda açıklanmıştır:

W = Dilimin toplam ağırlığı (Yüklemeler varsa bu terime dahil edilir)

N' = Efektif düşey kuvvet

u = Boşluk suyu basıncından kaynaklanan kuvvet

u = Dilim taban seviyesinde oluşacak boşluk suyu basıncı

α = Dilimin yatay düzlem ile yaptığı açı

Buna bağlı olarak basitleştirilmiş dilim yöntemine ilişkin güvenlik katsayısı aşağıdaki hale gelir:

$$G.S = \frac{\sum \frac{1}{m_a} [c'b + (W - ub)\tan\phi]}{\sum W \sin \alpha} \quad (6.4)$$

Buradaki m_a değeri birimsiz ampirik bir büyüklüktür. Şekil 6.3'de verilen abak yardımıyla belirlenir. Kayma dairesinin yatay düzlemle yaptığı açıya bağlıdır.

Şekil 6.3 : Bishop yöntemi için önerilen m_a değerleri
(McCarthy, 2007)

6.2.2.2 Slide yazılımı ile ilgili açıklamalar

Slide programı limit durum yöntemine göre kaya ve zeminlerde iki boyutlu şev stabilite analizi yapılmasını sağlayan bir programdır. Slide programında Spencer, Morgenstern-Price gibi titiz yöntemlerin yanında, basitleştirilmiş Bishop, düzeltilmiş/basitleştirilmiş Janbu, Fellenius, Lowe-Karafiath gibi yaklaşık yöntemlerle de analizler yapılabilir. Programda en kritik kayma daireleri kullanıcı tarafından noktasal olarak tanımlanabileceği gibi, seçilen bir bölgedeki veya tanımlanan aralık için tüm sistemdeki kritik kayma daireleri ve güvenlik faktörleri görülebilir. Program Monte Carlo veya Latin Hypercube gibi olasılıksal yöntemlerle de analiz yapabilmektedir. Geri hesap yöntemine olanak veren yazılım, sistemdeki donatı kuvvetlerinin istenen güvenlik katsayılarına göre hesabını da mümkün kılar.(Rocscience, 2011)

6.2.3 Oturma analizleri

Toprakarme sistemi konvansiyonel istinat yapılarına nazaran daha esnek bir sistem olduğu için karşılayabildiği düşey deformasyonlar betonarme ve ağırlık tipi duvarlardan daha fazladır. Bununla birlikte yüksek kesitlerde, aşırı ölü ve hareketli yüklemeler altında sistemin oturma tahkiklerinin yapılması gerekmektedir. Aşırı

yüklü palyeli toprakarme sistemlerinde, oturma için risk oluşturabilecek koşulların bir araya gelmesi durumu söz konusudur.

Oturmayı etkileyen bir başka faktör ise toprakarme yapısının oturacağı taban zemini özellikleridir. Konsolide olabilecek kalın zemin tabakaları üzerinde inşa edilecek yapılar için oturma göz önüne alınması gereken önemli bir geoteknik problemidir.

Günümüzde oturma analizleri konsolidasyon teorisini esas alan yaklaşımları kullanan nümerik analiz programları ile yapılmaktadır. Oturma analizlerinin yapılmasında zemin profilinin doğru tanımlanması, uygun parametre seçimi, yükleme koşullarının anlaşılması büyük önem taşımaktadır.

Oturma hesaplarında nümerik analiz programlarının kullandığı başlıca yöntemler aşağıda listelenmiştir:

- Odömetre modülü yaklaşımı
- Sıkışma sabiti yaklaşımı
- Sıkışma indisi yaklaşımı
- Buisman, Ladde yaklaşımı
- Zayıf zemin modeli yaklaşımı
- DMT (Sıkışık modül) yaklaşımı
- Janbu tanjant modülü yaklaşımı

Bu yöntemlerden janbu tanjant modülü yaklaşımı nümerik analiz programlarında gerçekçi sonuçlar vermekte ve pratik kullanımından dolayı tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılacak oturma analizleri Janbu Tanjant Modülü yaklaşımı kullanılarak yürütülmüştür.

6.2.3.1 Janbu tanjant modülü yaklaşımı

Janbu tanjant modülü yaklaşımı, zeminin lineer ve lineer olmayan bölgedeki gerilme-deformasyon eğrisinden faydalanarak değişik tipte zeminler için oturma davranışını tahmin eden bir modeldir.

Janbu modülü kullanılarak yapılan oturma analizleri, geleneksel yöntemle hesaplanan konsolidasyon katsayısı (C_c) ile boşluk oranı (e_0) parametrelerinin matematiksel yöntemlere idealize edilmesi esasına dayanır. Hesaplanan modülün mühendislik yapılarına ilişkin hesaplarda kullanılması, değişik zemin türlerinin

davranışı hakkında fikir sahibi olunması ve edinilen tecrübeyle gerçekçi olacaktır. (Fellenius, 2001)

Janbu yaklaşımı her tür zeminin oturma davranışının belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Metot zemin türüne bağlı olarak boyutsuz bir Janbu modülü belirlenmesini sağlar. Bu boyutsuz modül yukarıda açıklandığı gibi zeminin konsolidasyon parametreleri ile ilişkilidir. Bu aşamada analiz yapılacak zemin numunelerine ait parametrelerin doğru olarak belirlenmesi büyük önem taşır.

Janbu yaklaşımı, zeminin gerilme deformasyon davranışını, zemin tipine göre karakteristik iki boyutsuz parametre ile açıklar. Bu parametreler gerilme faktörü (j) ve janbu modülüdür (m). Janbu bağıntıları, tanjant modülünün türetilmesiyle oluşturulmuştur. (Janbu, 1988)

$$M_t = \frac{\delta \sigma}{\delta \varepsilon} = m \sigma_r \left(\frac{\sigma'}{\sigma_r} \right)^{1-j} \quad (6.5)$$

Eşitlikteki ifadeler aşağıda açıklanmıştır:

ε = Efektif gerilme artışından kaynaklı deformasyon

σ' = Efektif gerilme

j = Gerilme faktörü

m = janbu modülü

σ_r = Referans gerilmesi (100 KPa alınır)

- Kohezyonsuz zeminler için (j > 0)

Denklem 6.5 integre edilerek aşağıdaki ifadeye ulaşılır.

$$\varepsilon = \frac{1}{mj} \left[\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_r} \right)^j - \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma'_r} \right)^j \right] \quad (6.6)$$

ε = Efektif gerilme artışından kaynaklı deformasyon

σ'_0 = Başlangıç efektif gerilme

σ'_1 = Son efektif gerilme

j = Gerilme faktörü

m = janbu modülü (arazi ya da laboratuvar deneylerinden elde edilir)

σ_r = Referans gerilmesi (100 KPa alınır)

- Kaba daneli sıkı zeminler için ($j = 1$)

Kaba derecelenmiş sıkı zeminlerde oturmanın elastik özellikte olacağı düşünülürse gerilme faktörü 1'e eşit olur. Bu değer yerine konarak referans gerilmesi 100 KPa alınır eşitlik aşağıdaki hale gelir:

$$\varepsilon = \frac{1}{100m} (\sigma'_1 - \sigma'_0) = \frac{1}{100m} \Delta\sigma' \quad (6.7)$$

- Kumlu ve siltli zeminler ($j = 0.5$)

Janbu yaklaşımı zemin kabalaştıkça gerilme faktörünün 1 değerine yaklaştığını kabul eder. j değerinin 1 ya da 0 değerinden farklı olduğu durum yalnızca kumlu ve killi zeminler üzerinde yapılacak analizlerde ortaya çıkar. Bu tip zeminler için j değeri 0.5 olarak alınır. Referans gerilmesi değeri de denklem 6.5'de yerine konulursa bu tip zeminler için aşağıdaki eşitliğe ulaşılır:

$$\varepsilon = \frac{1}{5m} (\sqrt{\sigma'_1} - \sqrt{\sigma'_0}) \quad (6.8)$$

Aşırı konsolide zeminlerde, toplam son durumdaki gerilme değeri ön konsolidasyon basıncından büyük ise denklem 6.8 aşağıdaki hale gelir:

$$\varepsilon = \frac{1}{m_r} (\sqrt{\sigma'_p} - \sqrt{\sigma'_0}) + \frac{1}{5m} (\sqrt{\sigma'_1} - \sqrt{\sigma'_p}) \quad (6.9)$$

m_r = gevşeme modülü

σ'_p = Ön konsolidasyon basıncı

Toplam son gerilme değeri ön konsolidasyon basıncından küçük ise denklem 6.8 aşağıdaki hale gelir:

$$\varepsilon = \frac{1}{5m_r} (\sqrt{\sigma'_1} - \sqrt{\sigma'_0}) \quad (6.10)$$

- Kohezyonlu zeminler ($j=0$)

Kohezyonlu zeminler için gerilme faktörü 0 kabul edilir. Buna göre normal konsolide zeminlerde deformasyon:

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0} \quad (6.11)$$

Aşırı konsolide zeminler için deformasyon;

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} + \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'_1}{\sigma'_p} \quad (6.12)$$

Farklı zemin tipleri için çıkarılan bu deformasyon denklemleri, nümerik analiz programlarına tanımlanmıştır. Geometrik olarak sistemin tanımlanması, zemin tabakalarının belirlenmesi, uygun hesap yönteminin seçilmesi oturma analizlerinin doğru sonuçlar vermesinde büyük önem arz eder.

Oturma analizlerinde efektif gerilme değişimleri, sıkışabilir tabaka kalınlıkları ve tabakaların geoteknik parametreleri belirlendikten sonra, janbu yönteminin uygulanabilmesi için janbu tanjant modülü değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bu değerler değişik zemin türlerine göre saha ve laboratuvar ortamında yapılan deneylerle belirlenir. Canadian Foundation Engineering Manual (1992) tanjant modülünü farklı zemin değerleri için tanımlamıştır. (Çizelge: 6.1)

Çizelge 6.1 : Zeminler için janbu tanjant modülleri ve gerilme faktörleri.
(Canadian Foundation Engineering Manual, 1992)

Zemin Tipi	Janbu Tanjant Modülü (m)	Gerilme Faktörü (j)
Çok sıkı-sıkı buzul zeminler	1000-300	1
Çakıl	400-40	0.5
Sıkı kum	400-250	0.5
Orta sıkı kum	250-150	0.5
Gevşek kum	150-100	0.5
Sıkı silt	200-80	0.5
Orta sıkı silt	80-60	0.5
Gevşek silt	60-40	0.5
Sert-Katı kil	60-20	0
Katı-Orta katı kil	20-10	0
Yumuşak kil	10-5	0
Yumuşak deniz kili	20-5	0
Organik zemin	20-5	0
Turba	5-1	0

Fellenius (2009), bu değerlerin konservatif olduğunu ifade etmiştir. Bu değerlere göre yapılan tasarımlarda hesaplanan oturma değerleri gerçek saha koşullarından daha yüksek mertebeler ortaya koyabilmektedir. Zetaş (1994) Zemin türü ve SPT değerlerine göre janbu modüllerini aşağıdaki gibi önermektedir:

Çizelge 6.2 : İnce daneli zeminler için SPT-Janbu tanjant modülü ilişkisi.
(Zetaş, 1994)

Zemin Tipi	SPT	Janbu Tanjant Modülü
Yumuşak	2-4	10
Orta Katı	5-14	20
Katı	15-30	100
Sert	30+	200

Çizelge 6.3 : Kaba daneli zeminler için SPT-Janbu tanjant modülü ilişkisi.
(Zetaş, 1994)

Zemin Tipi	SPT	Janbu Tanjant Modülü
Çok Gevşek	4	50
Gevşek	4-10	100
Orta Sıkı	11-30	200
Sıkı	31-50	300
Çok Sıkı	50+	400

6.2.3.2 Geo5 settlement ile ilgili açıklamalar

Toprakarme istinat yapıları, kompleks geometrilere ve aşırı yükleme koşullarına göre tasarlandığında, iç ve dış stabilite tahkiklerine ek olarak genel stabilite ve oturma tahkikleri de önem kazanır. Yapının oturacağı zemin profilinde sıkışabilen tabakaların bulunması, yapı inşaatı sırasında ve servis ömrü süresince oturma gözlenmesi riskini arttırmaktadır. Sistem konvansiyonel çözümlere göre oturmalar daha toleranslı davranırsa da, oturma analizleri için modellemeler yapılması büyük önem taşır. Oturma hesaplamalarında Bölüm 6.3.2'de verilen yaklaşımlardan Janbu Tanjant Modülü yaklaşımı kullanılmıştır.

7. VAKA ANALİZİ: ROZAK MAKİNA DİLOVASI TESİSLERİ PALYELİ TOPRAKARME DUVARLARI

7.1 Giriş

Rozak Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş. firması adına Gebze Dilovası mevkiinde İstanbul Makine ve İmalat Sanayicileri Organize Sanayi Bölgesi sınırları içinde kalan 128 parselle sınırlı 47,605m² yüzölçümüne sahip bir alanda yeni bir sanayi tesisi yapılması planlanmaktadır.

Arazinin alt ve üst kotları arasında 28m'ye varan farklar oluşması sebebiyle derin yarma ve dolgu kesitleri oluşmaktadır. Bu bağlamda arazinin kuzey ve batı cephelerinde maksimum yüksekliği 16m'yi bulan dolgu kesitlerinde bir kalıcı toprakarme duvar ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Arazide yapılan zemin araştırmalarına göre zemin yüzeyinden itibaren 0-13.50 metre arasında değişken kalınlıklı dolgu tabakası gözlenmiştir. Bu tabakanın altında ise beyazımsı krem renkli orta derinlikte ayrılmış, derinlikle birlikte bol kırık ve çatlaklı yüksek dayanımlı kireçtaşı olduğu gözlenmiştir.

Toprakarme projesi kapsamında, ilk aşamada duvar hattı boyunca araştırma çukurları açılmış ve sondajlar yapılmıştır. Elde edilen verilerle toprakarme istinat yapısı altında jeolojik kesitler oluşturulmuştur. Duvar geometrisi belirlenerek jeolojik profil işlenmiştir. Toprakarme sisteminin saha araştırmalarında özelliği tariflenen değişken kalınlıklı dolgulara oturması, sistemin taşıma gücü,oturma ve genel stabilite açısından problemli hale gelmesine sebep olacaktır. Yapı üzerinde öngörülen aşırı yüklemeler ve toprakarme sisteminin kompleks geometrisi, meydana gelebilecek yapısal problemlerin özel bir tasarımla ve uygun bir zemin ıslahı projesi ile birlikte çözülmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Bunun yanında nitelikli bir dolgu malzemesinin seçimi ve şartnamelere uygun şekilde serme ve sıkıştırma işlemlerinin yapılması önem kazanmıştır. Palyeli toprakarme duvarlarda sistemin suyun olumsuz etkilerinden korunması için özel drenaj önlemleri alınması şarttır. Buna bağlı olarak

tüm kritik koşullar için istenen tasarım ömrü süresince yapının istenen performansı sağlayacağı bir çözüm kombinasyonu oluşturulmuştur.

Bu çalışma kapsamında tüm topoğrafik ve jeolojik koşulların tanımlandığı modellerde sistemin iç dış ve genel stabilite tahkikleri yapılmış, oturma analizleri yürütülerek zemin ıslahı sonrasında yapının stabilitesi aynı koşullar için tekrar kontrol edilmiştir.

Ayrıca sistemin su etkilerinden korunması amacıyla özel drenaj önlemleri tasarlanmış ve sahada uygulanması sağlanmıştır. İmalat sırasında dolgunun atterberg limitleri ve sıkışma performansı gözlenmiştir.

7.2 Proje Sahası

Projenin yapıldığı alan Kocaeli ili Gebze İlçesi Dilovası mevkisindedir. Proje sahasının yer bulduru haritası aşağıda verilmiştir.

Şekil 7.1 : Proje Sahası

7.2.1 Toprakarme duvarın yeri

Toprakarme duvar, söz konusu arazinin kuzeybatısında, doğu-batı doğrultusunda ve kuzey-güney doğrultusunda inşa edilmiştir.

Şekil 7.2 : Yer bulduru haritası

Harita üzerinde duvar hattını gösterir çizim, şekil 7.3'te verilmiştir.

Toprakarme duvarın toplam uzunluğu 415 metredir. Duvar arazi kotlarına bağlı olarak dolgu yüksekliğinin 15 metreyi geçtiği bölümlerde yapı palyeli olarak tasarlanmıştır. Palyeli çözüm arazinin kuzeybatı köşesinde yer alan toprakarme hattında 170 metre boyunca yapılmıştır.

Şekil 7.3 : Toprakarme duvarın konumu

Proje sahası Kuzey Anadolu Fay hattının kuzeyinde yer almakta olup 1. derece deprem bölgesi olarak değerlendirilmektedir. Buna bağlı olarak yapısal tasarımlarda aktif deprem ivmesi $0.4 a_0/g$ olarak alınmalıdır.

Şekil 7.4 : Kocaeli ili deprem haritası

7.4 Sondaj ve Araştırma Çukurları

Parselde toprakarme duvarın oturacağı eksen boyunca araştırma çukurları ve sondajlar açılarak, toprakarme gövdesinin altındaki jeolojik profil çıkarılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında;

- Kuzey-Güney doğrultusunda derinlikleri 2-3.5 m arasında değişen 5 adet araştırma çukuru
- Doğu-Batı doğrultusunda derinlikleri 6-10.5 m arasında değişen 6 adet sondaj yapılmıştır.

Sondaj ve araştırma çukurlarının yerini gösterir plan Şekil 7.6'te verilmiştir.

Toprakarme eksen bölgesinin yanında, şerit bölgesinin altındaki bölgelerde de sondaj çalışması yapılmıştır.

7.4.1 Araştırma çukurları

Kuzey-Güney doğrultuda yapılan araştırma çukurlarında ortalama 1.50 metre derinliğinde bloklu ve killi dolgu malzemesi ile yer yer bitkisel toprak tabakaları gözlenmiştir. Bu tabakaların altında temel özelliği taşıyabilecek kıltaşı ve dolomitik kireçtaşı gözlenmiştir.

Şekil 7.5 : 1, 2 ve 3 nolu araştırma çukuru logları

Şekil 7.6 : 4 ve 5 nolu araştırma çukuru logları

7.4.2 Sondajlar

Arazi çalışmaları kapsamında yapılan Doğu-Batı doğrultusundaki sondajlarda kalınlığı 4 metre ile 9 metre aralığında değişen beyazımsı kireçtaşı bloklu, çakıllı dolgu tabakası geçilmiştir. Dolgu tabakasının altında grimsi bej renkli dolomitik kireç taşı yer almaktadır.

Yapılan sondajlardan 4 ve 6 numaralı sondajlar, duvar dolgusunun oturacağı bölgelerde yapılmış olup, diğer sondajlar duvar aksı altında yapılmıştır. Dolgu altındaki sondajlar, arazinin eğimine göre dolgu tabakası sınırının belirlenmesi için yapılmıştır.

Şekil 7.7 : Sondaj 1'e ait numune fotoğrafı

7.5 İdealize Zemin Profili

Yapılan sondajlara ve açılan araştırma çukurlarına göre toprakarme duvarın oturacağı zemin profilinin duvar hattı boyunca farklılık gösterdiği ortaya çıkmıştır. Buna göre;

- Kuzey-Güney doğrultusunda duvar kıltaşı birimine,
- Doğu-Batı doğrultusunda duvar dolgu birime oturmaktadır.

Bu aşamada, sondajlarda toprakarme dolgusunun oturacağı zemin tabakalarına ait mühendislik parametrelerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Sistemin çözümü için yapılacak yaklaşımlarında bu parametreler kullanılacaktır. Bunun yanında, analizlerde kurulacak model için idealize zemin modeli oluşturulmalıdır.

İŞVEREN Carried Out For				SONDAJ YERİ Boring Location				PAFTA/ 121 ADN/ 1 PARSEL				DERİNLİK Depth (m)		SONDAJ No Borehole No		SAYFA Page																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
İDARE / Directorate : Meftun VARICI				Koordinat - Y : -				7,00				1		1 / 1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
PROJE / Project : GEBZE / MAKİNE OSB				ZEMİN KOTU / G. Elev. : -				DERİNLİK Depth (m)				TARİH DATE		AÇIKLAMA Explanation																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
MAKİNE TİPİ / Machine Type : Hidrolik				BAŞ. TARİHİ / Start Date : 08.06.2013				BİTİŞ TARİHİ / Finish Date : 08.06.2013																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
SONDAJ TİPİ / Boring Type : Rotary				DEL. ÇAP/ Hole Diam. : 0.76 cm																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Tipi / Sample Type	Manivela Boyu	Çökeltimeli Numune Derinliği (m)	STANDART PENETRASYON DENEYİ (Standart Penetration Test)												KAYA ÖZELLİKLERİ (Rock Characteristic)						AÇIKLAMALAR (EXPLANATION)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
				DARBE SAYISI (Number of Blows)			Grafik (Graph)									TCR%	SQR%	RQD%	DAYANIMLILIK/Strength	AYRISMA/Weathering	KIRIK/Fracture (30cm)		LİTOLOJİ (LITHOLOGY)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
				0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N	0	10	20	30	40	50	60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																

Şekil 7.8 : 1 Nolu sondaj logu

Şekil 7.9 : Arazi sondaj ve araştırma çukuru planı

Şekil 7.10 : Doğu-Batı doğrultusunda jeolojik kesit

Şekil 7.11 : Kuzey-Güney Doğrultusunda Jeolojik Kesit

Toprakarme duvar yapısının doğu-batı doğrultusunda yer alacak kısmı, anakayaya oturan kuzey-batı doğrultusundaki kısımdan daha kritiktir. Bu kesimde meydana gelmesi olası geoteknik problemlerinin çözümü için, bu doğrultudaki zemin profilinin belirlenmesi daha büyük önem taşır.

Şekil 7.12 : Doğu-Batı doğrultusunda İdealize Zemin Profili

7.6 Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi

Toprakarme sisteminin gerekli tahkiklerinin yapılabilmesi için kullanılacak nümerik analiz programlarında, zemin profilinde yer alan tabakalara ilişkin geoteknik parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Dolgu zeminde ortalama SPT değerleri 18 olarak alınabilir. Dolgu zemin için mühendislik parametreleri bu değerden türetilmiştir. (Kulhawn, 1990)

Dolgu altındaki dolomitik kireçtaşı tabakası anakayayı temsil etmektedir. Kireçtaşı tipi kayalar için literatürde önerilen mühendislik parametreleri kullanılarak nümerik analizler yapılmıştır. Dolgu ve kireçtaşı tabakalarının tanımlanmasında Mohr-Coulomb modelinden faydalanılmıştır. (Sabatini, 2002)

Limit durum hesap yönteminde bu parametrelerin tamamı tanımlanmamıştır. Bu parametreler "Young (Elastisite) modülü" (E), "Bulk Modülü" (K), "Kayma Modülü" (G) ve "Poisson Oranı" (ν) olarak sıralanabilir. Bu değerlerin iki tanesi bilinirse diğer parametreler aşağıdaki formüller yardımıyla oluşturulabilir.

$$G = \frac{E}{2(1 + 2\nu)} \quad (7.1)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (7.2)$$

Kontrolsüz dolgu tabakası için seçilen parametreler arazide yürütülen dolgu içi SPT sonuçlarına göre seçilmiştir. (Kulhawn, Mayne, 1990)

Kireçtaşı için Barton tarafından ortaya konulan kriterlere göre parametreler belirlenmiştir. (1973). Elastisite modülü, poisson oranı gibi parametreler için FHWA-IF-02-034 kullanılmıştır. (2002)

Çizelge 7.1 'de zemin parametreleri özet olarak verilmiştir.

7.7 Yükleme Koşulları

Toprakarme yapısının hattı boyunca yapı üzerine etkiyecek bazı sürşarj yükleri bulunmaktadır. Yükleme durumları hat boyunca farklılık göstermektedir. Bu nedenle

her çözüm kesitinde farklı yükleme durumları göz önüne alınmıştır. Sisteme etkimesi beklenen yük grupları listelenmiştir.

Çizelge 7.1 : Zemin Parametreleri.

Zemin Tipi	Birim Hacim Ağırlık (kN/m³)	Ø	c (kPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Janbu Modülü
Kontrolsüz Dolgu	18	30	0	40	0.30	100
Toprakarme Dolgusu	19	34	0	60	0.35	400
Kireçtaşı	25	35	10	40000	0.35	900

- **Tır Yüğü:** Toprakarme duvarın gerisinde yapılması planlanan platformda işleyecek tırların toprakarme sistemine sürşarj yüğü getireceğı düşünölmektedir. Bu yüğü 25kN/m² olarak verilmiştir.
- **Açık Yükleme Sahası Sürşarj Yüğü:** Toprakarme duvarın doğu-batı doğrultusunda, arazinin kuzeyinde yer alan saha üzerinde çelik rulo yükleme sahası oluşturulması planlanmaktadır. Bu saha toprakarme duvarın etki bölgesinde kalacaktır. Dolayısıyla tasarımda bu alandaki yüklemeler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yüklemenin değeri 125 kN/m² olarak verilmiştir.
- **Kren Yüğü:** Depolama sahasının gerisinde çalışacak bir kren düşünölmektedir. Bu krenin toprakarme sistemine çizgisel olarak yükleme yapacağı düşünölmektedir. Çizgisel yük değeri 300 kN/m olarak verilmiştir.
- **Deprem Yüğü:** Yapının inşa edileceğı bölge, 1 derece deprem bölgesinde bulunmaktadır. Tasarım ve analizlerde deprem yükleri buna göre dikkate alınmalıdır.

Yükleme koşulları bir arada ele alındığında, arazinin doğu batı doğrultusunda uzanan duvar kesitinde aşırı sürşarj yüklemelerinin bir kombinasyonunun meydana geldiğı görölmektedir. Jeolojik kesitlerle birlikte bu sonuçlar değeriendirildiğinde, aşırı yüklemelerin meydana geleceğı bölümün, duvarın dolgu zemine oturması beklenen

kısım olduğu ortaya çıkmaktadır. Buna bağlı olarak, sistemin tek bir hesap yaklaşımıyla bütün olarak çözümlenmesi gerçekçi olmayacaktır. Sağlam kayaya oturan kuzey-güney doğrultusunda yer alan duvar bölgeleri klasik yaklaşımlarla çözülebilmektedir. Ancak doğu-batı doğrultusunda uzanan bölgede yüksek sürşarj yüklerinin ve zayıf zemin tabakasının etkisiyle, özel bir çözümün geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu çözümün detayları ilerleyen kısımlarda açıklanacaktır. Sistemin yükleme planı şekil 7.13'de verilmiştir.

Şekil 7.13 : Toprakarme duvar yük planı (Doğu-Batı doğrultusu)

7.8 Geri Dolgu Malzemesi Analizleri

Toprakarme yapısının tasarım ve imalatına başlanmadan önce, geri dolgu malzemesi olarak kullanılacak malzeme araştırması yapılmıştır. Bu araştırma kapsamında, dolgu malzemesi olarak kullanılması düşünülen malzemeden numune alınarak, şartnamede aranan mekanik ve elektrokimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneyler yapılmıştır.

Projede toprakarme sisteminin kompleks geometrisi ve maruz kalacağı yüksek sürşarj yükleri, dolgu malzemesinin özelliklerinin şartnamelere uygunluğu konusunda daha dikkatli olunması gerektiğini ortaya koymuştur. İnce malzeme oranı düşük, sıkıştırma özellikleri iyi, granüler bir geri dolgu seçimi yapı performansını iyi yönde etkileyen bir faktördür. (Mitchell, 1995)

7.8.1 Mekanik özellikler

7.8.1.1 Elek analizleri

Toprakarme duvar yapısı için bu projeye özel olarak hazırlanan teknik yapım şartnamesinde dolgu malzemesinin mekanik özellikleri için FHWA dökümanında

önerilen kriterler dikkate alınmıştır. Buna göre deneyler kapsamında dolgu malzemesinin gradasyonunun belirlenmesi için alınan numuneler üzerinde elek analizi çalışması, plastisite indisinin belirlenmesi için atterberg testleri yapılmıştır.

Alınan 3 numune üzerinde yapılan 27.08.2013 tarihli elek analizi sonuçları ile teknik şartnamede öngörülen sınır değerlerin karşılaştırılması çizelge 7.2'de verilmektedir.

Çizelge 7.2 Granülometri-Sınır Değerlerin Karşılaştırılması

Numune	Elek Çapı			Şartname Sınır Değerleri		
	102 mm	No.40	No.200	102 mm	No.40	No.200
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	100	11.94	9.41	100	0-60	0-15
2	100	15.03	11.25	100	0-60	0-15
3	100	12.72	7.93	100	0-60	0-15

Granülometri sonuçlarına göre alınan dolgu numunelerinin şartnamelerde belirlenen şartları sağladığı görülmektedir. Dolgu malzemesinin 200 nolu elekten geçen ince malzeme yüzdesi ortalama olarak % 9.53 olarak hesaplanmıştır. Karayolları Teknik Şartnamesi ve AASHTO tarafından önerilen sınır değer maksimum %15'tir. (Çizelge 2.1, Çizelge 2.2)

Granülometri sonuçlarından uniformluk katsayısı (C_u) hesaplanabilir. Bu değer malzemenin %60 kadar miktarının daha küçük olduğu çap değeri (D_{60}) ve efektif çap değerine bağlı bir parametredir. Şartnamelerde, toprakarme dolgusu olarak kullanılacak malzeme için C_u değerinin 4'ten büyük olması beklenmektedir. Uniformluk katsayısına ilişkin özet bilgiler çizelge 7.3'te gösterilmektedir. Çizelgeye göre dolgu malzemesi numunesi şartnamede öngörülen uniformluk katsayısı sınır koşullarını sağlamaktadır.

Çizelge 7.3 Uniformluk katsayısı-Sınır değerlerin karşılaştırılması

Numune	D60 (mm)	D10(mm)	$C_u=D60/D10$	Min C_u
1	12.5	0.1	125	4
2	20	0.1	200	4
3	21	0.1	210	4

Şekil 7.14 : 1-2-3 nolu numune gradasyon eğrileri

7.8.1.2 Atterberg limitleri

Dolgu malzemesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar kapsamında, elek analizleri yapılarak granülometri eğrileri çıkarılan numuneler üzerinde kıvam limitleri testleri de yürütülmüştür. Bu çalışmalar sonucunda malzemenin likit limit plastik limit ve plastisite indisi değerleri elde edilmiştir. Toprakarme dolgusu niteliğinde malzemenin maksimum plastisite indisi (PI) değeri şartnamelerde 6 olarak verilmiştir. Bu değer üstündeki malzemelerin toprakarme dolgusu olarak kullanılması tavsiye edilmemektedir. Plastisite indisi yüksek dolgular, uzun dönemde su etkisindeki davranışları sebebiyle durabilite sorunlarına sebep olabilmektedir. (Elias, 2001) Atterberg test sonuçları çizelge 7.4 te verilmektedir.

Çizelge 7.4 Atterberg limitleri-Sınır değerlerin karşılaştırılması

Numune	Likit Limit(%)	Plastik Limit(%)	Plastisite İndisi(%)	PI Max Sınır Değer(%)
1	33	19	14	6
2	35	18	17	6
3	38	18	20	6

Test sonuçlarından görüldüğü üzere, dolgu numunelerinin plastisite indisi değerleri, toprakarme dolgu malzemesi plastisite indisi için önerilen sınır değerden daha yüksektir. Bu noktada, malzemenin bu haliyle toprakarme dolgusu olarak kullanılması önerilmemektedir. Bu noktada önlem olarak, malzemenin sahada plastik

olmayan malzeme (NP) ile karıştırılması ve plastisite indisinin düşürülmesi öngörülmüştür. Böylece uygun granülometriye sahip malzeme, toprakarme dolgusu için şartnamelerde ortaya konan diğer mekanik özellikleri karşılayacaktır.

7.8.1.3 Saha atterberg limitleri

Dolgu malzemesinin plastisite indisinin sınır değerlerden yüksek olması üzerine, plastik olmayan malzeme ile sahada dolgu malzemesi karıştırılarak bu yeni karışımdan numuneler alınmıştır. Alınan 4 adet numune üzerinde atterberg limitlerinin belirlenerek, dolgu malzemesinin plastisite indisi tekrar belirlenmiştir. çizelge 7.5 deney sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlara göre dolgu malzemesinin plastisite indisi istenen sınır koşulları sağlamaktadır.

Çizelge 7.5 Plastik olmayan malzeme ile karışım sonrası atterberg limitleri

Numune	Likit Limit(%)	Plastik Limit(%)	Plastisite İndisi(%)	PI Max Sınır Değer(%)
1	30	26	4	6
2	31	27	4	6
3	33	28	5	6

7.8.2 Elektrokimyasal özellikler

Toprakarme dolgusunun mekanik özelliklerinin yanında, elektrokimyasal özelliklerinin de analiz edilmesi gerekmektedir. Elektrokimyasal özellikler kapsamında dolgu malzemesinden alınan numuneler üzerinde pH tayini, klorit iyon miktarı, suda çözünebilen sülfat iyonu, resistivite testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar şartnamedeki sınır değerlerle karşılaştırılarak dolgunun elektrokimyasal özellikler açısından uygunluğu irdelenmiştir.

Çizelge 7.6. Elektrokimyasal özellikler-Sınır değerlerin karşılaştırılması

Özellikler	Dolgu Numunesi Değerleri	Sınır Değerler	Analiz Metodu
PH	8.09	5-10	TS ISO-10390:2013
Klorit İyonu (mg/kg)	12.3	max 100	SM 4500-CI-B:2012
Sülfat (mg/kg)	16.6	max 200	SM 4500-SO4 (-2):E:2012
Rezistivite (ohm-cm)	17.76	min 3	TS ISO 11265 (1996)

TS: Türk Standartları

ISO: International Organization for Standardization

SM: Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater

Sonuç olarak, seçilen toprakarme dolgusu mekanik ve elektrokimyasal özellikler açısından şartnamelerle belirlenen koşulları sağlamaktadır. Dolayısıyla imalatta kullanımı uygundur.

7.9 Malzeme

Toprakarme sistemi için seçilen dolgu malzemesinin yapılan deneyler ile şartnamelere uygun olduğunun anlaşılmasından sonra, ön tasarım aşamasına geçilmiştir. Tasarımda farklı zemin tabakalarına oturan kesitler için farklı koşullarda çözüm yapılması düşünülmüştür.

7.9.1 Yüzey kaplama elemanları

Projede, yüzey kaplama elemanı olarak prekast beton paneller kullanılacaktır. Beton panellerin kalınlığı standart olarak 14 cm olarak tavsiye edilmektedir. Toplam duvar yüksekliğinin 15 metreyi geçti bölümlerde, yüksek dolgu yüklerinden dolayı, mevcut koşullarda beton panellerin deformasyona uğrama riski bulunmaktadır. Bu durumlarda 18 cm kalınlığında panellerin kullanılması önerilmektedir. Bunun yanında, dolgu yüksekliğinin 5 metreyi aştığı kesimlerden itibaren, yüzey elemanlarının donatılı olarak imal edilmesi ve kullanımı, yüzeysel deformasyonların sınırlandırılması açısından önemlidir. (Ekli, 2006)

Şekil 7.15 : Prekast panel üretimi ve depolanması (REAŞ, 2013)

7.9.2 Donatı

Çelik donatılı toprakarme sistemleri için Karayolları Teknik Şartnamesi (2006) bazı performans kriterleri belirlemiştir. Buna göre, toprakarme donatısı olarak kullanılacak şeritlerin, yüksek aderanslı, sıcak daldırma-galvaniz kaplamalı veya yüksek çekme dayanımlı plastik özellikte olması istenmektedir.

Çelik şeritler; 530 gr/m^2 'den az olmayacak şekilde sıcak-daldırma galvaniz ile kaplanacak, çelik şerit orta veya yüksek karbon şeriti özelliğinde ve çekmek mukavemeti minimum 510 kPa olacaktır. Galvaniz kaplamasının minimum 70 μm olması önerilmektedir.

Donatı olarak ülkemizde en yaygın kullanılan tip 40 mm genişliğinde 4 mm kalınlığında olan yüksek aderanslı toprakarme donatısıdır.(HA 40x4) Yüksek kesitlerin yer aldığı, kompleks yüklemelere maruz kalan yapılarda ise farklı tipte şeritler kullanılabilir. (Sankey, 2012)

Küçük boyutlu şeritler ile büyük gerilmelerin karşılanması, şerit boylarının uzamasını ve bağlantı sayılarının artması sonucunu doğurmaktadır. Bu durum maliyetleri ve yapısal güvenliği etkileyen bir unsurdur. Söz konusu yapıda, güvenli ve ekonomik bir tasarım yapılabilmesi amacıyla HA 40x4 mm ve HA 50x4 mm'lik şeritler birlikte kullanılmıştır. Gerilmelerin arttığı alt kesimlerde 50x4 mm boyutlarında yüksek aderanslı şeritler tercih edilmiştir. Üst kesimlerde ise 40x4 mm şeritler kullanılmıştır. Şeritlerin uygulama bölgeleri, duvar geometrisine, yükleme koşullarına bağlıdır ve iç stabiliteyi etkileyen bir unsurdur.

Şekil 7.16 : Toprakarme Şerit Donatıları (REAŞ, 2013)

7.10 Tasarım

Toprakarme sisteminin tasarımında, arazinin doğu-batı doğrultusunda seyreden, yüksekliği 10 metreyi aşan ve Bölüm 7.7. de tariflenen yükleme koşullarına maruz kalan kesit kritiktir. Bu kesimde duvar palyeli olarak düşünülmüştür.

FHWA tarafından önerilen tasarım yaklaşımlarına göre, palyeli kesit için üst duvar ve alt duvar ayrı ayrı ele alınmıştır. Her iki kısım için iç ve dış stabilite analizleri Valdez yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Sistemin bütün olarak ele alınarak genel stabilite analizlerinin yapılması, iç ve dış stabilite analizlerinde yapılan yaklaşımların gerçekçiliğini ortaya koyacaktır.

İç ve dış stabilite analizleri limit durum yöntemini esas alan NF P94-270 "Reinforced Fill and Soil Nailing Structures (2009)" adlı standarda göre yapılmıştır.

Genel stabilite analizleri basitleştirilmiş bishop yöntemini kullanan Slide 5.0 isimli yazılımla yapılmıştır.

7.10.1 İç ve dış stabilite analizleri

7.10.1.1 Üst duvar

İç ve dış stabilite analizlerinde, öncelikli olarak palyeli duvarın üst kademesi göz önüne alınmıştır. Geoteknik araştırmalar sonucu elde edilen zemin parametreleri ile, şartnamelerde belirlenen dolgu özellikleri tanımlanmıştır. Şerit boyu için FHWA tarafından önerilen yaklaşımlar dikkate alınmıştır.

İlgili kesitte sürşarj yükü olarak duvar üstünde yer alacak tır yükü ve dolgu gerisinde bulunacak profil stok sahasının yüklemeleri sisteme girilmiştir. Çizgisel kren yükünün etkisi genel stabilite analizlerinde dikkate alınacaktır. Sürşarj yüklerinin uygulama bölgesi, duvar ön yüzünden 5 metre geriden başlamaktadır.

İç ve dış stabilite analizleri kapsamında Bölüm 2'de tanımlanan şerit kopması, şerit kırılması, aderans, tabanda kayma, dolgu içi kayma ve devrilme durumları için Valdez yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Hesap detayları ve program tanıtım dosyası EK-1 de verilmiştir.

Üst duvar yüksekliği seçilen kesitte 9.73 metredir. FHWA kriterlerine göre tasarım şerit boyunun duvar yüksekliğinin minimum %70'i olması gerekmektedir (Elias, 2001). Depremsellik ve sürşarj yükleri dikkate alındığında önerilen şerit boyunun

stabilite açısından yeterli olmadığı görülmüştür. Buna bağlı olarak şerit boyu arttırılarak analizler yapılmıştır. Duvarın üst kesimlerinde dolgu ile donatı arasındaki sürtünme kuvvetinin arttırılması amacıyla lokal olarak üstten 3 kademede yer alan şeritlerin boyları 1 metre daha arttırılmıştır. (Şekil 7.17)

Şekil 7.17 : Üst duvar için hesap kesiti

7.10.1.2 Alt duvar

Toprakarme alt duvarın seçilen kesitteki yüksekliği 4.48 metredir. FHWA kriterlerinde palyeli duvar tasarımları için, alt kesimde yer alan duvara üst kesimin etkisinin sürşarj gibi tanımlanması önerilmektedir. Ön tasarımdaki şerit boyu için toplam duvar yüksekliğinin minimum %60'ı kadar olmalıdır. (Bölüm 6). Bu kesit için toplam duvar yüksekliği $9.73 + 4.48 = 14.21$ metre olarak hesaplanmıştır. Bu yüksekliği %60 değeri $14.23 \times 0.6 = 8.52$ m olmaktadır. Buna göre alt duvar için tasarım şerit boyu 9 metre olarak seçilmiştir. (Şekil 7.18)

Yapının dolguya oturması durumunda dolgu için seçilen parametreler dikkate alınmıştır. Tasarım şerit boyuna göre, sistemin taban kayması tahkikinde statik ve sismik açıdan güvenliğin sağlanmadığı görülmüştür. Dolayısıyla mevcut yükleme

koşullarında, toprakarme duvarın istenen stabilite kriterlerini yerine getiremeyeceği anlaşılmıştır.

Alt duvar tasarımının gerçekçi bir şekilde yapılabilmesi için genel stabilite analizlerine bakılmalıdır. Kritik kayma değerlerine göre seçilen ön tasarım şerit boyunun uygunluğu doğrulanmalıdır.

İç ve dış stabilitenin sağlanabilmesi için temel zemininde uygun bir ıslah yapılması gerekmektedir. Alt duvara ait ön analizlerde temel zemininin iyileştiği kabul edilmiştir. Alt duvar için hesap detayları EK'te verilmiştir.

Üst duvarda 13 sıra şerit yer almaktadır. Yukarıdan itibaren ilk 8 sırada 40x4 mm tipi şerit, altta yer alan 5 sırada 50x4 mm şerit kullanılmıştır. Alt duvardaki 6 sıranın tamamı 50x4mm şerit kullanılarak tasarlanmıştır.

Şekil 7.18 : Alt duvar için hesap kesiti

7.10.2 Genel stabilite analizleri

Kompleks geometrili toprakarme istinat yapılarının tasarımı, geleneksel hesap yaklaşımlarıyla gerçekçi bir şekilde yapılamamaktadır. Bu sistemlerin iç ve dış stabilitesi, geometrik olarak doğru olarak modellenmesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle iç ve dış stabilitenin genel stabilite ile birlikte düşünülmesi gerekir. (Elias, 2001)

Söz konusu projede kompleks geometrinin yanında elverişsiz zemin koşulları, aşırı sürüşarj yükleri bulunmaktadır. Bu şartlar altında sistemin geleneksel yöntemlerle çözülmesi gerçekçi sonuçları yansıtmayacaktır.

Toprakarme yapısının altında yer alan değişken kalınlıklı dolgu tabakası, sistemin genel stabilitesi açısından bir risk oluşturmaktadır. Bu riskin boyutunun belirlenmesi, mevcut zemin koşullarında inşa edilecek yapının davranışının tahmin edilmesi, genel stabilite analizine başvurulmasını gerekli kılmıştır.

Analiz kapsamında, iç stabilite analizlerinin yapıldığı 2 palyeli toprakarme duvar kesiti seçilerek, belirlenen ön tasarım şerit boyları ile sistem modellenmiştir. Geoteknik saha araştırmaları ile belirlenen parametreler, Basitleştirilmiş Bishop Yöntemini kullanarak kritik kayma dairelerine ait güvenlik katsayılarını hesaplayan Slide 5.0 isimli programa tanımlanmıştır. Jeolojik kesit yardımıyla yapı altındaki zemin tabakalanması da modellenmiştir. Daha önce tariflenen yükleme durumları yapı üzerindeki etki bölgelerine göre çözüme girilmiştir. Sistemde, iç stabilite analizleriyle belirlenen şerit seviyeleri ve her bir seviye için şerit yoğunlukları dikkate alınmıştır. Analizler depremli ve depremsiz koşullar için aynı kesitte yapılmıştır. Programa ait hesap çıktıları EK-2'de detaylı olarak verilmektedir.

FHWA tasarım kriterlerine göre, toprakarme sistemlerinin statik durumda minimum 1.50 güvenlik katsayısını sağlaması beklenmektedir. Sismik koşullar altında sağlanması beklenen güvenlik katsayısı 1'dir (2001).

Bu koşullar altında genel stabilite analizi sonuçları değerlendirilerek, mevcut koşullarda sistemin güvenliği araştırılmıştır. Proje alanı 1. deprem bölgesinde yer aldığından tasarım deprem ivmesi 0.2g olarak seçilmiştir. Analiz sonuçları statik ve sismik olarak verilmiştir. (Şekil 7.19-7.20)

Analiz sonuçları özet olarak çizelge 7.7'da verilmiştir.

Çizelge 7.7 Genel stabilite analizi sonuçları

Güvenlik Katsayıları			Sınır Değerler	
Kesit	Statik	Sismik	Statik	Sismik
14.21	1.445	1.088	1.500	1.000

Analiz sonuçlarına göre sistem sismik açıdan istenen güvenlik koşullarını sağlasa da, statik açıdan güvenlik koşullarını sağlamamaktadır. Bu durumda mevcut yükleme

koşullarında sistemin tekrar çözümlenmesi gerekmektedir. İstenen güvenlik katsayılarının elde edilmesi için zemin ıslahı seçeneği göz önüne alınmalıdır.

7.10.3 Oturma Analizi

Projedeki dolgu yükseklikleri ve sürşarj yüklemeleri dikkate alındığında, toprakarme dolgusu altında yer alacak mevcut kontrolsüz dolguda oturma meydana gelmesi olasıdır. Genel stabilite açısından sistemin istenen kriterleri sağlamadığı görülmüştür. Bunun yanında, oturma riskine karşı da toprakarme duvarın analizi yapılmalıdır.

Toprakarme sisteminin konvansiyonel sistemlere göre oturmalarla karşı daha fazla tolerans gösterdiği bilinmektedir. Oturma yaklaşımında, sistemin bir blok olarak hareket edeceği varsayımı yapılmaktadır. Panel hattında ve panel arkası dolgu altındaki zemin davranışının, farklı oturma problemi yaratabileceği bilinmektedir. Bu nedenle tüm toprakarme bloğu boyunca oturma dikkate alınmalıdır.

Oturma analizleri için detayları Bölüm 6'da verilen Geo5 Settlement programı kullanılmıştır. Analizler Janbu Tanjant modülü yöntemine göre oturma değerlerini hesaplamaktadır. Hesap yönteminde Tablo 7.1'de belirtilen geoteknik parametreler dikkate alınmıştır.

Duvar üzerinde yer alan yayılı tır yükü ve noktasal kren yükü sisteme tanımlanmıştır. Toprakarme imalatı için açılacak kazı hattı geometrisi gösterilmiştir. Toprakarme kütlesi altında meydana gelecek oturmalar noktasal olarak hesaplanmış, maksimum oturmanın miktarı ve meydana geleceği bölge bulunmuştur.

Analiz sonucunda maksimum oturma toprakarme dolgusu altında meydana gelmiştir. Maksimum oturma miktarı, toprakarme dolgusu altındaki bölgede 14 cm olarak hesaplanmıştır. Mevcut koşullarda sistemin izin verilen oturma miktarından fazla deformasyona uğrayacağı anlaşılmıştır. Oturmaların sınırlandırılması için zemin ıslahı yapılması gerekmektedir.

Gerekli zemin ıslahının sığ veya derin tabakalarda uygulanan yöntemlerden seçilmesi, sistemin bütünü göz önüne alınarak karar verilecek bir husustur. İyileştirme tipinin belirlenmesinde, mevcut yapının karakteristik özelliği olarak aşırı sürşarj yüklemeleri ve seçilen kesitteki 10 metreyi aşan dolgu yükseklikleri kritik hususlardır.

Şekil 7.19 : Statik Durumda Genel Stabilité

Şekil 7.20: Sismik Durumda Genel Stabilité

Şekil 7.21 : İyileştirmesiz durum için oturma analizi

7.10.4 Zemin ıslahı

Mevcut saha koşulları için yapılan iç dış ve genel stabilite analizleri, sistemin kontrolsüz dolguya oturduğu kesimlerde, istenen performans kriterlerini sağlamadığını göstermiştir. Bu noktada toprakarme sisteminin güvenli tasarımı için zemin ıslahı yapılması gerekmektedir. Buna bağlı olarak toprakarme sistemine ve mevcut jeolojik koşullara uygun bir iyileştirme yöntemi araştırılmıştır.

Bölüm 4.9'da belirtilen iyileştirme yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan yöntem zemin yer değiştirmesidir. Bu yöntem toprakarme sisteminin esnek yapısına uygun ve hızlı yapılabildiği için uygundur. Ancak söz konusu projede taban zeminindeki dolgu kalınlığının çok fazla olması, iyileştirme tabakasının kalınlığının artmasına, dolayısıyla ıslah projesinin maliyetini arttırmaktadır. Bu nedenle derin iyileştirme yöntemleri göz önüne alınmıştır.

Zemin yer değiştirmesine alternatif olarak, kalın dolgu tabakası üzerine inşa edilecek toprakarme yapılarının iyileştirmesinde jet grout kolonları ile iyileştirme yapılabilmektedir. Ercan A., Kuruoğlu Ö. ve Akman M.K. tarafından yapılan çalışmalara göre jet grout kolonları ile yapılan iyileştirme sonucunda, genel stabilite analiz sonuçlarında elde edilen güvenlik katsayıları iyileştirme öncesi duruma göre yaklaşık %40 oranında artış göstermiştir. (2009)

Toprakarme sistemlerinin altında kullanılan derin iyileştirme yöntemlerinden bir diğeri de CMC (Controlled Modulus Columns) kolonlarıyla yapılan kazıklı iyileştirme sistemidir. Bu yöntem kalın kil tabakaları ve zayıf zeminler üzerine inşa edilecek toprakarme dolgularının taşıma gücü ve oturma açısından yapısal performans kriterlerini sağlamasını amaçlayan bir yöntemdir. Sistemin Amerika'da başarılı uygulamaları vardır. (Masse, 2011)

7.10.4.1 Zemin ıslahı projelendirme detayları

Toprakarme sisteminin güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi için, mevcut koşullarda uygulanabilecek zemin ıslah yöntemleri araştırılmıştır. Bunun sonucu olarak, toprakarme yapısının değişken dolguya oturduğu doğu-batı doğrultusu boyunca kazıklı ve jet grout kolonlarıyla destekli bir derin iyileştirme sistemi ile, zemin yer değiştirmesi ile teşkil edilecek bir yüzeysel iyileştirme sistemi yapılması planlanmıştır. Dolgu kalınlığının düşük olduğu bölgelerden dolayı derin ve yüzeysel iyileştirme yöntemlerinin bir kombinasyonu düşünülmüştür.

İyileştirme projesi, duvarın doğu-batı doğrultusundaki 180 metre uzunluğundaki hat boyunca yapılacaktır. (Şekil:7.23) Toprakarme temel altı dolgu kalınlığının 2 metreyi aştığı kesimlerde kazıklı sistem, dolgu kalınlığının daha az olduğu kesimlerde ise zemin yer değiştirmesi yöntemi ile iyileştirme düşünülmektedir.

Derin ıslah projesi kapsamında, ön tasarımda görülen genel stabilite problemine karşı, duvar hattının altında Ø65 boyutunda 2.25 m karelağla donatılı kazıklar imal edilecektir. Bu kazıklar, dolgu tabakası altında seyreden kireçtaşı tabakasına en az 2 metre soketlenecektir. Mevcut koşullarda iyileştirme düşünülmeyen yapılan analizlerle ortaya konan oturma problemine karşı, donatılı kazıklara ek olarak, toprakarme dolgusunun altında Ø65 donatısız mini kazıklar imal edilecektir. Toprakarme kütesinin bir blok gibi hareket edeceği düşünülürse, sistemin kendi içinde farklı oturmalara maruz kalmaması için homojen bir temel sistemi ile desteklenmesi gereklidir.

Kazıklar üzerine inşa edilen toprakarme yapılarının statik davranışı önemlidir. Sistem konvansiyonel sistemlere göre esnek davranış göstermesi, kazıklı bir iyileştirme sistemi ile kombinasyon söz konusu olduğunda istenilen esnek yapı performansının düşmesi riskini doğurmaktadır. Toprakarme sistemi kendi içinde esnek bir yapıda olsa da, rijit iyileştirme sistemi ile birlikte çalışmak durumundadır. Statik olarak farklı davranacak bu iki sistemin kombinasyonu için statik kazıklı sistem ile toprakarme duvarın arasında granüler malzeme ile teşkil edilecek bir yük transfer platformu gereklidir. Platformun tasarımında geogrid tabaka ile yük aktarımı desteklenmektedir. Bu tabaka üstyapı yüklerinin %50-95 oranında kazıklı sisteme aktarılmasını sağlar. Yük transfer yüzdesi tabaka kalınlığına ve geogrid özelliğine bağlıdır. (Sankey, 2008)

Yük transfer platformu tasarımı Collin yöntemine göre yapılır. Bu yöntemle göre, kazıklı sistemin üzerinde yer alan dolguların oturmalarının kontrol edilebilmesi için, dolgu altında geogrid tabakaları ile desteklenen sıkışmış dolgu teşkil edilerek yük aktarım platformu tasarlanır. Bu tabaka, üstyapıdan gelen yüklerin, kazıklı iyileştirme sisteme aktarımını sağlayan bir giriş işlevi görecektir. (2005)

Yük aktarım platformunun performansı aşağıdaki bileşenlere bağlıdır:

- Kolon çapı
- Dolgu yüksekliği
- Sürşarj yükleri

- Kolon merkezleri arası mesafe
- Geosentetik donatı aralıkları
- Platform kalınlığı

Şekil 7.22 : Kiriş metoduna göre yük transfer platformu (Collin, 2005)

Şekil 7.23 : Kazıklı iyileştirme hattı (REAŞ, 2013)

Toprakarme altındaki kontrolsüz dolgu tabakası kalınlığının 2 metreden daha az olduğu yerlerde, zayıf dolgu malzemesi kaldırılarak, yerine toprakarme dolgusu niteliğinde malzeme ile serme sıkıştırma işlemi yapılmıştır.

Şekil 7.24 : Zemin ıslah hattı (REAŞ, 2013)

Sıkıştırma işlemi, duvar taban tesviye kotlarına kadar devam etmiştir. Farklı temel sistemleri üzerine inşa edilecek toprakarme bölümlerinin farklı oturma riskine karşı düşey derzler ile bu zonların desteklenmesi düşünülmüştür.

Yapılan iyileştirme sonucunda ön tasarımda istenen güvenlik kriterlerinin sağlanmadığı genel stabilite analizlerinin tekrarlanması gerekmektedir. Sistemin yeni güvenlik katsayıları ilk durumla ve istenen sınır değerler ile karşılaştırılarak yapılan iyileştirmenin verimi anlaşılabacaktır.

Oturma analizlerinin de iyileştirme sonrası koşullarda tekrarlanarak, iyileşmiş sistemin oturma değerleri kontrol edilecektir. Mevcut iyileştirme, sistemin iç stabilite hesaplarında belirlenen şerit uzunluklarını ve yoğunluklarını doğrulamaktadır.

7.10.5 İyileştirme sonrası genel stabilite analizleri

Donatılı kazıklarla duvar hattı altında, donatısız kazıklar ile dolgu altında yapılan iyileştirme çalışmalarından sonra ilk hesap kesitinde yürütülen hesapların tekrarlanması gerekmektedir. Ön tasarımda ortaya çıkan genel stabilite probleminin giderildiği gösterilmelidir. Buna bağlı olarak mevcut sistemde tabaka sınırları ve geoteknik parametrelerin korunarak, toprakarme altına donatılı ve donatısız forekazıkların tanımlanması işlemi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7.25 : Toprakarme altı derin ıslah sistemi-Analiz kesiti (REAŞ, 2013)

Şekil 7.26 : Geogrid uygulaması-Yük transfer platformu (REAŞ, 2013)

Analizler sismik ve statik koşullar için yapılmıştır. Yükleme koşulları korunmuştur. Buna göre iyileştirme sonucunda statik ve sismik durumlar için en kritik kayma daireleri bulunarak güvenlik katsayıları çıkarılmıştır. Sistemin iyileştirme yapılmadan önceki ve iyileştirme sonrası durumları, statik ve sismik koşullarda aranan minimum güvenlik katsayıları ile çizelge 7.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.8 İyileştirme sonrası genel stabilite analizi sonuçları.

Güvenlik Katsayıları					
İyileştirme Öncesi		İyileştirme Sonrası		Sınır Değerler	
Statik	Sismik	Statik	Sismik	Statik	Sismik
1.445	1.088	1.647	1.316	1.500	1.000

Analiz sonuçlarına göre yapılan iyileştirme sonucunda seçilen kesitte ilk duruma göre güvenlik katsayıları ön görülen sınır değerlerin üzerine çıkmıştır. Güvenlik katsayısı statik durumda ilk çözüme göre %15, sismik durumda ilk çözüme göre %20 artış göstermiştir. Statik ve sismik durum için genel stabilite analizleri şekil 7.27 ve şekil 7.28'de görülmektedir.

Sonuç olarak, toprakarme sistemi iç dış ve genel stabilite açısından yapılan iyileştirme sonrası istenen yapısal performans kriterlerini sağlamakta, yüksek sürüşarj yükleri altında belirlenen geometrik tasarımla uygulanabilecektir.

Şekil 7.27 : İyileştirilmiş zeminde statik durumda genel stabilite analizi

Şekil 7.28 : İyileştirilmiş Zeminde Sismik Durumda Genel Stabilite Analizi

7.10.6 İyileştirme sonrası oturma analizleri

Toprakarme sisteminin altında yapılan iyileştirme öncesinde, seçilen hesap kesitinde mevcut zemin koşulları altında maksimum 14 cm oturma beklenmektedir. İyileştirme sonrasında aynı yükleme koşullarında oturmaların tekrar kontrol edilerek istenen güvenlik kriterlerinin sağlanması beklenmektedir.

İyileştirme sonrası yapılan analizler kapsamında, toprakarme duvar altına bir iyileştirme zonu tanımlanmıştır. Donatısız forekazıkların alansal yüzdesi hesaplanarak, mevcut dolgu ile oluşan kompozit yapıya ait Geo5 programı için kullanılan Janbu tanjant modülü tanımlanmıştır. Analizlerde kireçtaşı tabakası sıkışmaz kabul edilmiştir. Alansal ağırlıklı ortalama hesabına göre, iyileştirme kesitinin birim genişlik için toplam alanı 52 m² olarak ölçülmüştür. Bu alanın %25'i kazık bölgesi %75'i dolgu bölgesidir. C30 beton için elastisite modülü 30 GPA olarak önerilmektedir. Tablo 7.1'e göre dolgu malzemesinin elastisite modülü 40 MPA olarak verilmiştir. Ağırlıklı ortalamaya göre iyileştirme zonunun elastisite modülü 10 GPA olarak hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak Geo5 programına iyileştirme zonu için janbu tanjant modülü 600 olarak tanımlanmıştır.

İyileşen zeminin tanımlanması sonrası tekrarlanan oturma analizlerinde, duvar tabanında meydana gelmesi beklenen maksimum oturma miktarı 2.3 cm seviyelerine düşmüştür. Bu durum, iyileştirme sonrası duvar altında meydana gelecek oturmaların kabul edilebilir seviyelerde olacağını göstermektedir.

Şekil 7.29 : İyileştirme bölgesi

7.11 Drenaj Önlemleri

Palyeli toprakarme yapılarında, yağışlar ve yüzeysel sular sonucu sistemde meydana gelebilecek hidrostatik kuvvetlere karşı drenaj önlemleri almak büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, tasarımda dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bu konulardan başlıcaları aşağıda sıralanmıştır.

- Granüler dolgu malzemesi kullanılması
- Panel arkası filtre malzemesi kullanılması
- Dolgu arkası filtre malzemesi kullanılması
- Geomembran kullanılması
- Duvar üstü kanal tasarımı
- Duvar tabanı drenaj borusu kullanılması

Projenin imalatı aşamasında Bölüm 7.8'de özellikleri tariflenen dolgu malzemesi kullanılacaktır. Smith A. ve Dison L., yaptıkları çalışmalar sonucunda, yüksek yağışların görüldüğü bölgelerde yapılacak toprakarme sistemlerinde suyun yıkıcı etkisinden kaçınılması için, kullanılacak dolgu malzemesinde 20 mikronluk elekten geçen malzeme miktarının %20'den fazla olmamasını önermektedir (2009). Şartnamelere uygun granülometride seçilen dolgu malzemesi drenaj açısından da önerilen koşulları sağlamaktadır.

Panellerin yüzeyine su itkisinin gelmemesi amacıyla, yağışlar sonrası meydana gelecek yüzeysel suların drenajı, panel arkasına serilen 1 metre kalınlığındaki filtre malzemesi ile yapılacaktır. Filtre malzemesi gradasyonu çizelge 7.9 de verilmiştir.

Çizelge 7.9 Filtre Malzemesi Gradasyonu (KTŞ, 2009)

Elek Boyutu	% Geçen
63 mm	100
37.5 mm	<85
20 mm	>20
10 mm	>5

Filtre malzemesi serimi, şerit arkası bölge için de uygulanacaktır. Bu tabaka, toprakarme sisteminin arka kesiminden gelecek yüzeysel suların dolgu içine girmeden drene olmasını amaçlamaktadır.

Şekil 7.31 : Filtre tabakası uygulaması (REAŞ, 2013)

Panel yüzeyinde filtre tabakasının temel amacı, sistemi tehdit edebilecek yüzeysel suları duvar tabanındaki drenaj borularına indirmektir. Palyeli sistemlerde, duvar üstünden başlayacak bu su akışının kesintiye uğramadan alt kotlara ulaşması gerekmektedir. Sistem içinde birikecek su, meydana getireceği basınç kuvveti ile sistemin stabilitesi için risk oluşturabilir. Özellikle duvarın palyeli olduğu kesimde iki farklı aks boyunca devam etmesi, bu iki aks boyunca uygulanacak düşey drenajın bir bütün olarak çalışması gereğini doğurmaktadır. Bu nedenle, Bölüm 5'te verilen alternatif palye drenajlarından uygun olan seçenek tercih edilerek uygulanmıştır. Palyelerde filtre tabakası geçişlerinde, toprakarme dolgusuna su girmesinin önlenmesi amacıyla geomembran ile koruyucu hat oluşturulmuştur. (Şekil 7.32-7.33) Duvar taban seviyesi boyunca filtre malzemesinden gelen suyun toplanması amacıyla drenaj boruları teşkil edilmiştir. Bu borulardan araziye uygun görülen kesimlerden deşarj yapılarak sistemin içinde biriken su atılacaktır. Drenaj boruları ince malzemeden dolayı tıkanma ihtimaline karşı geotekstil keçe ile kaplanmaktadır. (Şekil 7.34)

Şekil 7.32 : Toprakarme kesitinde filtre tabakaları (REAŞ, 2013)

Şekil 7.33 : Palye üstü drenaj uygulaması (REAŞ, 2013)

Şekil 7.34 : Drenaj borusu çıkışı (REAŞ, 2013)

7.12 Dolgu Kontrolü

Toprakarme istinat yapısının imalatı aşamasında, dolgunun sıkışma performansının Bölüm 2'de açıklanan kriterleri sağlaması gerekmektedir. Bu aşamada, imalat boyunca tabakalar boyunca dolgu üzerinde proktor testleri ile sıkışma kontrolü, kum konisi deneyi ile birim hacim ağırlık kontrolleri yapılır. Bu deney sonuçlarına göre, dolgu tabakalarının istenen teknik kriterlere uygunluğu araştırılır.

Karayolları Teknik Şartnamesine göre toprakarme dolgusunun sıkışmasının %95 standart proktor yüzdesini sağlaması gerekmektedir.(2006) İmalatı yapılacak toprakarme sisteminin maruz kalacağı yükler göz önüne alındığında, sıkışma kontrolünde modifiye proktor deney sonuçlarının kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışma kapsamında alınan dolgu numunesi üzerinde proktor deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen proktor eğrisi Şekil 7.35'da verilmiştir.

Deney sonucuna göre dolgu numunesinin maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri (γ_{dmax}) 2.05 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. Optimum su muhtevası ise %10.4 olarak belirlenmiştir. Sahada yapılan değerler, bu sonuçlar ile kıyaslanarak sıkışma performansı ve birim hacim ağırlık değerlerinin uygunluğu kontrol edilecektir.

Şekil 7.35 : Laboratuvar modifiye proktor sıkışma eğrisi (REAŞ, 2013)

Çalışma kapsamında farklı dolgu kademelerinde yürütülen 5 farklı modifiye proktor ve birim hacim ağırlık deney sonuçları, laboratuvarda elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Mevcut tabakaların istenen sıkışma performansını gösterdiği görülmektedir. Deneyler sırasıyla 04.09.2013, 10.09.2013, 17.09.2013, 25.09.2013 ve 09.10.2013 tarihlerinde yapılmıştır.

Deney sonuçları çizelge 7.10'da verilmektedir.

Çizelge 7.10 Arazi proktor deney sonuçları.

Arazi Değerleri			Laboratuvar Değerleri			
Deney Tarihi	w (%)	γ_{dmax} (gr/cm ³)	w(%)	γ_{dmax} (gr/cm ³)	Sıkışma Yüzdesi (%)	Sınır Değer (%)
04.09.2013	5.57	1.974	10.4	2.05	96	95
10.09.2013	8.01	1.995	10.4	2.05	97	95
17.09.2013	6.93	1.99	10.4	2.05	97	95
25.09.2013	7.13	1.981	10.4	2.05	97	95
04.10.2013	6.79	1.974	10.4	2.05	96	95

Sıkışma kontrollerinin sonuçlarına göre, değişik dolgu kademelerinde yapılan deneylerde, istenen sıkışma yüzdesinin elde edildiği, dolgunun sıkışma performansının şartnamelerle belirlenen sınır değerlere uygun olduğu görülmektedir.

7.13 Uygulamaya İlişkin Sonuçlar ve Genel Değerlendirme

Rozak Makina Dilovası Fabrikası projesi kapsamında yapılan, parsel çevresi toprakarme istinat yapısı tasarımı kapsamında, saha araştırmaları sonuçları ve geometrik koşullar değerlendirilerek, yapılması planlanan duvara ait proje verileri elde edilmiştir. Duvara ait ön tasarım çalışmaları kapsamında seçilen kritik kesit için iç ve dış stabilite analizleri, genel stabilite ve oturma kontrolleri yapılmıştır. Bunun yanında toprakarme geri dolgusu olarak kullanılacak malzemenin şartnamelerce belirlenen kriterlere uygunluğu, yapılan deneylerle irdelenmiştir.

- Toprakarme duvar inşaatı kapsamında, toprakarme geri dolgusu olarak kullanılması düşünülen malzemedan alınan numuneler üzerinde elek analizi deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre malzemenin 200 nolu elekten geçen ince malzeme oranı ortalama %9.53 olarak ölçülmüştür. Bu değer şartnamelerde belirtilen sınır değerlere uygundur.
- Yine numuneler üzerinde yapılan Atterberg limitleri test sonuçlarına göre malzemenin plastisite indisi şartnamelerin öngördüğü değerden yüksek çıkmıştır. Buna önlem olarak, malzemenin imalat aşamasında plastik olmayan (NP) malzeme ile karıştırılarak kullanılması önerilmiştir. Plastik olmayan malzeme ile karıştırılmış dolgu malzemesi üzerinde tekrarlanan kıvam limitleri test sonuçlarına göre, numunenin plastisite indisi istenen sınır değerinin altına inmiş, dolgunun mekanik özelliklerinin imalata uygunluğu sağlanmıştır.
- Alınan numuneler üzerinde yapılan kimyasal analizler sonucunda, toprakarme dolgu malzemesinin elektrokimyasal özelliklerinin şartnamelerce belirlenen koşullara uygun olduğu gösterilmiştir.
- Toprakarme sisteminin analizleri kapsamında, ilk aşamada seçilen ön tasarım şerit boyları, mevcut sismik koşullar ve sürşarj yüklemeleri için kontrol edilerek, iç ve dış stabilite analizleri yapılmıştır. Üst duvar için öngörülen şerit boyları güvenliği sağlarken, mevcut zemin koşullarında alt duvar için sistemin taban kayması tahkikinde istenen güvenlik katsayısına ulaşamamıştır. Bu aşamada sistemin seçilen kesitte bir zemin ıslah çalışması ile güvenliğin sağlanacağı anlaşılmıştır. İç stabilite hesaplarında seçilen şerit boyları üst duvar için 11 metre ve 10 metre, alt duvar için seçilen şerit boyu 9 metredir.

- İç ve dış stabilite analizlerine ek olarak genel stabilite analizleri, seçilen kritik kesitte mevcut geometri için sürşarj yükleri tanımlanarak sismik ve statik koşullar için yapılmıştır. Analizler sonucunda, iyileştirme önlemi alınmadan sistemin statik koşullar için istenen güvenlik katsayısı değerine ulaşmadığı anlaşılmıştır. Sonuç olarak iç ve dış stabilite analizleri sonucunda ortaya çıkan zemin iyileştirmesi ihtiyacı, genel stabilite analizleri sonuçlarıyla doğrulanmıştır.
- Stabilite sonuçlarına ek olarak, sürşarj yüklerinin etkisinde duvar yapısının aynı kesitteki oturması hesap edilmiştir. Hesaplarda toprakarme duvar taban seviyesinde 14 cm oturma ölçülmüştür. Bu sonuca göre sistemin oturma açısından da güvenli olmadığı anlaşılmıştır.
- Stabilite ve oturma analizleri sonucunda performans kriterlerinin istenen seviyede olmaması, zemin ıslahının gerekliliğini ortaya koymuştur. Buradan hareketle zemin iyileştirme yöntemleri tartışılmış, duvar aksı boyunca donatılı 65'lik kazıklar, dolgu bölgesi boyunca donatısız 65'lik kazıklar yapılması suretiyle, kazıklı bir derin iyileştirme sistemi oluşturulmuştur. İyileştirme sistemi ile toprakarme sisteminin birlikte çalışabilmesi için, iki sistemin arasına geogrid kullanılarak teşkil edilecek bir yük aktarım platformu düşünülmüştür. Proje kapsamında yükseklikleri 9 ile 6 metre arasında değişen 80 adet donatılı, 175 adet donatısız olmak üzere toplam 255 adet forekazık imalatı yapılmıştır. Toplam kazık boyu 1783 m olmuştur.
- İyileştirme işlemi gerçekleştirildikten sonra, mevcut şerit boyları kullanılarak daha önce seçilen kritik kesit üzerinde iyileştirme sonrası durum için genel stabilite analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda sistemin statik ve sismik koşullar için güvenlik katsayıları istenen minimum değerlerin üzerine çıkmıştır. Buna göre iyileştirme işlemi sistemi genel stabilite açısından güvenli hale getirmiştir. İyileştirme sonrası tekrarlanan oturma analizi sonuçlarına göre, ilk aşamada 14 cm olarak ölçülen toprakarme dolgu altında beklenen oturma, kazıklı iyileştirme sonrası 2 cm seviyelerine inmiştir. Bu karşılaştırmalı sonuçlara göre sistem oturma açısından da güvenli hale gelmiştir.

- Toprakarme istinat yapısının imalat aşamasında uygulanmak üzere, daha önce ortaya konulan kompleks geometrili duvarlar için önerilen drenaj sistemlerinden uygun olan bir alternatif seçilmiş, sahada uygulanması sağlanmıştır. Bu uygulama sonucunda imalat aşamasında sistemin hidrostatik basınç kuvvetleri etkisinde kalmadığı görülmüştür. Servis ömrü süresince yapıda su etkisinden ötürü bir hasar beklenmemektedir.
- Toprakarme dolgusunun serme sıkıştırma işlemi sırasında, her bir dolgu tabakası üzerinde kum konisi yöntemi ile birim hacim ağırlık deneyi ve modifiye proktor deneyi yapılmıştır. İmalat öncesinde laboratuarda numuneler üzerinde yapılan deneyler ile, sahada yapılan deney sonuçları karşılaştırılmış. Seçilen tabakaların istenen sıkışma yüzdesine eriştiği görülmüştür.

Şekil 7.36 : Rozak makina dilovası tesisi toprakarme duvarı (REAŞ, 2013)

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Aşırı yüklemeler altında kompleks geometriye sahip toprakarme istinat yapılarının tasarımında, geleneksel hesap yöntemleri kullanılarak yapılacak çözümler sistemi gerçek anlamda temsil edememektedir. Bu noktada sayısal yaklaşımların, mevcut zemin ve yükleme koşulları ile birlikte ele alınması, güvenli ve yüksek performanslı bir tasarım için gerekli olduğu ortaya çıkmaktadır. Doğru bir tasarımın gerçek saha koşullarında uygulanabilirliği, nümerik analizlerle destekli bir araştırma sonucunda mümkün olacaktır. Sonuç olarak bir inşaat yapısından beklenen kullanılabilirlik, ekonomi ve güvenlik özel bir çözüm yaklaşımıyla sağlanabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, toprakarme istinat yapılarının tarihsel gelişimi incelenerek, yapıların türleri, genel çalışma prensipleri ve yapısal elemanları ortaya konmuştur. Bunun yanında imalat aşamaları incelenerek, sistemin avantaj ve dezavantajları açıklanmıştır.

Toprakarme istinat yapılarının tasarımında göz önüne alınan temel prensipler, farklı yapısal elemanlar için yapılan kabuller, toprakarme istinat yapılarının şartname ve yönetmeliklere göre yapılması gereken tahkikler araştırılmıştır. Çelik şerit kullanılarak tasarımı yapılan toprakarme sistemlerinde, limit durum yöntemi esas alınarak yapılacak tasarımlarda izlenecek yol ortaya konmuştur. Çevresel koşulların ve depremsel etkilerin altında, sistemin güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi için alınabilecek önlemler irdelenmiştir.

Kompleks geometrilerin ortaya çıktığı durumlar için, geleneksel yaklaşımların yeniden ele alınması gerekliliği sorgulanmıştır. Bu yeniden değerlendirmenin bir sonucu olarak, palyeli olarak tasarlanması gereken toprakarme yapılarda, klasik yaklaşımların hangi şekilde uygulanacağı açıklanmıştır.

Yapı tasarımı yapılacak nümerik analiz programları ve programların hangi koşulları dikkate aldığı ortaya konmuştur. Yapısal analizde kullanılan parametrelerin, kapsamlı bir geoteknik değerlendirme sonucu belirlenmesinin, tasarımın gerçekçi olmasındaki rolü araştırılmıştır.

- Sismik açıdan risk taşıyan, zayıf zemin koşullarının mevcut olduğu bölgelerde, yüksek kesitlerin ortaya çıktığı toprakarme istinat yapılarının, klasik yöntemlerin bir adım ötesinde bir bakış açısıyla ele alınması bir zorunluluktur. Bu aşamada, yapının iç stabilitesinden bağımsız olarak, mevcut zemin koşullarının servis ömrü süresince yapı performansında belirleyici rol oynadığı gerçektir. Çalışma kapsamındaki saha araştırmalarında yapının temel seviyesinde, bölgesel olarak zayıf özellikte bloklu kil zeminin bulunduğu gözlenmiştir.
- Yüksek sürşarj yükleri altında, toprakarme istinat yapılarının kabul edilebilir sınırların üstünde deformasyona uğrama riski bulunmaktadır. Zayıf zemin koşullarına müdahale edilmeden yapılacak tasarım güvenli olamayacağı gibi, ekonomik olma özelliğini de kaybedecektir. Bu bağlamda, zemin ıslahı, yüksek yükler altında toprakarme tasarımında mutlaka göz önüne alınması gereken bir seçenektir. İncelenen projede, iyileştirme önlemi alınmadan inşaat yapılması durumunda iç, dış ve genel stabilite problemleri ortaya çıkacağı görülmüş, sistemin mevcut yükler altında kabul edilebilir sınırların üzerinde bir miktarda oturma yapacağı anlaşılmıştır. Dolayısıyla, güvenli bir tasarım yapılabilmesi için zemin ıslahı yapılmasına karar verilmiştir.
- İyileştirme yönteminin seçilmesinde, zayıf zemin tabakalarının mevcut yüklemeler altındaki davranışı belirleyici rol oynamaktadır. Bu davranışın anlaşılmasında, iyileştirme öncesinde yapılacak nümerik analizler fikir verici olacaktır. Bu analiz sonuçlarına göre ıslah yönteminin yüzeysel veya derin bölgelerde uygulanacağı belli olacaktır. İyileştirme yönteminin doğru seçilmesi, yapısal performansın yanında, ekonomiyi de etkileyen önemli bir adımdır. Çalışma kapsamında, zemin ıslah yöntemi olarak kazıklı bir temel sistemi teşkil edilerek, stabilite problemlerinin çözümlenmesi amaçlanmıştır. İyileştirme uygulaması öncesi ve sonrasında, yapılan karşılaştırmalı analizlerle ıslah projesinin verimliliği ortaya konmuştur.
- Esnek özelliği nedeniyle, yüksek deformasyonları karşılayabilen toprakarme istinat yapılarının, yapılacak zemin iyileştirme tipine göre farklı davranış sergileyebileceği, esneklik özelliğini kaybederek, rijit bir sistem gibi davranabileceği düşünülmelidir. Bu aşamada, toprakarme sisteminin temel sistemini destekleyen iyileştirme tabakasının, yapının esneklik özelliğine

zarar vermeyecek özel önlemler ile tasarlanması önem kazanmaktadır. Buna göre, göreceli olarak toprakarme yapıdan daha rijit özellikte olan kazıklı sistem ile toprakarme duvar temeli arasında geosentetik malzeme ve sıkışmış granüler dolgudan teşkil edilecek bir yük aktarım platformu tasarlanmıştır. Bu tabaka sistem elemanlarının uyumlu çalışmasını, üstyapı yüklerinin uniform olarak alt tabakalara aktarılmasını amaçlamıştır.

- Yapısal tasarımların güvenliği, tasarım kabullerinin gerçekçiliği ile yakından ilişkilidir. Bu aşamada toprakarme yapılarının elemanlarının özellikleri belirlenmelidir. Toprakarme donatısı ve geri dolgu malzemesi nitelikleri, yapının durabilitesini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Özellikle doğal ortamdan seçilen dolgu malzemesinin kontrolü önemlidir. Bu nedenle, imalat ve tasarım öncesinde, dolgu olarak kullanılması düşünülen dolgu malzemesinin mekanik ve elektrokimyasal özellikleri ortaya konmalıdır. Deney sonuçlarına göre dolgu malzemesinin elektrokimyasal özelliklerinin şartnamelere uygun olduğu, malzemenin mekanik özelliklerinin de plastisite indisi haricinde istenen kriterleri sağladığı görülmüştür. Plastisite indisinin istenen sınır değerlerden yüksek olması nedeniyle, dolgunun plastik olmayan malzeme ile karıştırılarak uygun özelliğe gelmesi hedeflenmiştir. Sahada yapılan deneyler ile bu işlem sonrasında dolgu malzemesinin uygunluğu kontrol edilmiştir.
- İmalat süresince, seçilen dolgu malzemesinin sıkıştırma kontrollerinin yapılması, yine tasarımda yapılan kabullerin gerçekçiliğini desteklemesi açısından önemlidir. Sahada yapılacak sıkışma ve birim hacim ağırlık deneyleri, her tabaka için tekrarlanmalı, istenen sınır değerleri sağlamayan tabakaların serme-sıkıştırma işlemleri, istenen performans kriterleri elde edilinceye kadar tekrarlanmalıdır. Proje çalışması sırasında alınan numuneler üzerinde yapılan deneyler ile dolgu malzemesinin sıkışabilirliği kontrol edilmiş, sahadaki serme sıkıştırma işlemleri sırasında yapılan sıkışma deneyleri ile laboratuvar sonuçları kıyaslanarak, sıkışma yüzdeleri hesaplanmıştır. Sonuçların şartnamelerce öngörülen sınır değerlere uygunluğu kontrol edilmiştir.
- Çalışma kapsamında yapılan analizler ve ortaya konan kriterler ışığında, toprakarme istinat yapılarının aşırı yüklemeler altında davranışı ve performansı, meydana gelebilecek geoteknik problemlerin göz önüne alınarak

bu sorunların ekonomik ve uygulanabilir bir çözüm yöntemiyle aşılmasına bağlıdır. Toprakarme istinat yapılarının tasarımında çevresel koşulları bütünüyle kapsayan bir yaklaşım, güvenli ve ekonomik bir tasarımın başlıca şartıdır. Mevcut çalışma kapsamında, yapı tasarımının tüm stabilite kriterlerine göre kontrolü ve geoteknik değerlendirmesi yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- AASHTO T-27-11**, (2012). "Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate"
American Association of State Highway and Transportation Officials, USA
- Abramson, L.W., Thomas S., Glenn, M.**, (2002). "Slope Stability and Stabilization Methods (2nd ed.)", New York, USA: John Wiley & Sons.
- AFNOR, NF P 94-220**, (1992). "Soil Reinforcement: Backfilled Structures with Extensible and Flexible Reinforcing Strips or Sheets". French Standard, July
- AFNOR, NF P 94-270**, (2009). "Geotechnical Design: Retaining Structures- Reinforced Fill and Soil Nailing Structures", French Standard, July
- American Society of Civil Engineers**, (1994). "Retaining and Flood Walls Technical Engineering and Design Guides", ASCE Press, New York, USA
- Amiri, S., Esmaily, A.**, (2011). "A Survey of Soil-Reinforcement Interface Friction" *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, Dallas, USA
- Anderson, P.L., Gladstone, R.A., Sankey, J.E.**, (2012). "State of the Practice of MSE Wall Design for Highway Structures" *Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Keynote Lectures from GeoCongress: Geotechnical Special Publication No.226*
- ASTM G51-95**, (2012). Standard Test Method for Measuring pH of Soil for Use in Corrosion Testing, American Society for Testing and Materials, USA
- ASTM G57-06**, (2012). Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method, American Society for Testing and Materials, USA
- ASTM D512-89**, (1999). Standard Test Methods for Chloride Ion in Water, *American Society for Testing and Materials*, USA
- ASTM D516-02**, (1999). Standard Test Method for Sulfate Ion in Water, *American Society for Testing and Materials*, USA
- ASTM D1498-93**, (1999). Standard Practice for Oxidation-Reduction Potential of Water, *American Society for Testing and Materials*, USA

- ASTM D2974-13**, (1999). Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, *American Society for Testing and Materials*, USA
- Barton, N.R.**, (1973). "Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints". *Engineering Geology*. 7, 287-332.
- Berg, R.R., Christopher, B.R., Samtani, N.C.**, (2009). "FHWA-NHI-10-024: Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes-Volume:I" *Technical Manual* , Woodbury USA
- Bishop, A.W.**, (1955). "The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes" *Géotechnique, Volume 5, Issue 1*, pp 7–17
- Bowles, E.J.**, (1988). Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill Book Company, New York, USA
- Canadian Foundation Engineering Manual** (1992). 3rd Edition, *Canadian Geotechnical Society*, BiTech Publisher Ltd., Canada
- Choufani, C., Wu, P., Gagnon, G., Macintosh, M.**, (2011). "A Precast Faced Mechanical Stabilized Earth Solution for a 20 Metre High Mining Crusher Wall with Various Technical and Site Challenges" *2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference*, Canada
- Collin, J.G., Han, J., Huang, J.**, (2005). "Geosynthetic-Reinforced Column-Support Embankment Design Guidelines" *North American Geosynthetics Society/Geosynthetics Institute Conference*, Las Vegas, USA
- Das, M. B.**, (2007). Principles of Foundation Engineering, 7th Edition, Brooks/Cole, California, USA
- Durgunoğlu H. T., Kaya T., Özbattır M.**, (2007). "Donatılı Zemin Duvar Yapılarının Depremde Davranışı" *TMMOB Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 1. Özel Konulu Sempozyum*, İstanbul
- Ekli O.**, (2006). Donatılı Zemin Kenar Yıkılma Duvarlarının Nümerik Analizi, Master Tezi Boğaziçi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
- Elias, V., Christopher, B.R., Berg, R.R.**, (2001). "FHWA-NHI-00-043: Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines" Woodbury, USA
- Ercan, A., Kuruoğlu, Ö., Akman, M.K.**, (2009). "Düzce – Akçakoca – Ereğli Yolu Km: 23+770 23+995 Dayanma Yapısı Taban Zemin İyileştirme Analizi" *Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. Teknik Makaleler* www.yukselproje.com

- Fellenius, B.H.**, (2001). "Determining Janbu Modulus Values From Results of Consolidation Tests" *Background Notes and Spread-Sheet Template for Analysis. Internal Report.*
- Fellenius, B. H.**, (2009). "Basics of Foundation Design Electronic Edition"
- Fordham, F.W., Louis M., Truong, K.M.**, (2008). "Case Study of a MSE Wall Supporting Multi-Story Building" *New Horizons in Earth Reinforcement – Otani, Miyata & Mukunoki (eds) Taylor & Francis Group, London*
- Güler, E., Çiçek, E., Demirkan, M.M., Hamderi, M.**, (2011). "Numerical Analysis of Reinforced Soil Walls with Granular and Cohesive Backfills Under Cyclic Loads" *Bull Earthquake Eng.*10:793–811
- Han, J., Gabr, M.**, (2002). "Numerical Analysis of Geosynthetic-Reinforced and Pile-Supported Earth Platforms Over Soft Soil." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 128(1), 44–53.
- Hardianto, F., Sankey, J., and Truong, K.**, (2010). "Parametric Study of Seismic AASHTO Design Methods for Metallic Mechanically Stabilized Earth Walls". *GeoFlorida 2010: pp. 2123-2132, USA*
- Hossain, M.J., Kibria G., Khan, M.S., Hossain, J., Taufiq, T.**, (2012). "Effects of Backfill Soil on Excessive Movement of MSE Wall" *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, December
- Hutchinson L.D.**, (2011). "Case Study of a Foundation Improvement Beneath MSE Walls for a Highway Embankment" *Geo-Frontiers 2011 : Advances in Geotechnical Engineering*, Dallas, USA
- Ingold, T.S.**, (1982). "Reinforced Earth Theory and Design", *The Highway Engineer*, Vol.28, No.7, PP.2-17.
- Jaky, J.**, (1978). "The coefficient of earth pressure at rest" *J. Soc. Hungarian Architects and Engineers.*
- Janbu, N.**, (1967). "Settlement Calculations Based on The Tangent Modulus Concept" *Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, Trondheim*
- Juran I., Schlosser, F.**, (1978). "Theoretical Analysis of Failure in Reinforced Earth Structures" *Proceedings of a Symposium Sponsored by the Committee on Placement and Improvement of Soils of the Geotechnical Engineering Division of the ASCE*, Pittsburgh, Pennsylvania, pp 528-556, April

- Juran, I.**, (1983). "State of the Art Report "Reinforced Soil Systems – Application in Retaining Structures," *7th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Haifa.
- Karayolları Teknik Şartnamesi**, (2006). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara
- Kaya T.**, (2007). Behavior of Reinforced Earth Structures Under Earthquakes, Master Tezi Boğaziçi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
- Kulhawy F.H., Mayne P.W.**, (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design, Final Report 1493-6, EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA
- Liang R.Y.**, (2004). "MSE Wall and Reinforcement Testing At Mus-16 Bridge Site", September
- Mahajan, P., Biswas, S., Adhikari, A.**, (2008). "Behaviour of Reinforced Earth Structures Founded on Soft Silt Deposit in Seismically Active Hilly terrains" *New Horizons in Earth Reinforcement – Otani, Miyata & Mukunoki (eds) Taylor & Francis Group*, London
- Masse, F., Pearlman, S., Bloomfield, R.A.**, (2008). "Support of MSE Walls and Reinforced Embankments Using Ground Improvement" *New Horizons in Earth Reinforcement – Otani, Miyata & Mukunoki (eds) Taylor & Francis Group*, London
- McCarthy, D.F.**, (2007). Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics (7th Edition), New Jersey ,Pearson Prentice Hall
- Mitchell, J.K., Zornberg J.G.**, (1995). "Reinforced Soil Structures with Poorly Draining Backfills Part II: Case Histories and Applications" *Geosynthetics International*, Vol. 2, No. 1, pp. 265-307
- Mitchell, J.K., Villet, W.C.B.**, (1987). "Reinforcements of Earth Slopes and Embankments" *National Cooperative Highway Research Program Report*, California, USA, June
- NCHRP Project 24-2**, (1984). "Reinforcement of Earth Slopes and Embankments, Draft report", Appendix 1.A., Reinforced Earth, November
- Özsoy, B.**, (2013). " Rozak Makine Dilovası Projesi Toprakarme Duvar Teknik Şartnamesi (128 Ada / 3 Parsel)" Mayıs
- Pearlman, S.L., Masse, F.**, (2011). "Support of MSE Walls and Embankments Using CMC" *Geo-Frontiers 2011 : Advances in Geotechnical Engineering* Dallas-Texas
- Reinforced Earth Company**, (2006). "Reinforced Earth Retaining Walls", TAI Group

- Sabatini, P.J., Bachus B.C., Mayne, P.W., Schneider, J.A., Zettler T.E.,** (2002). "FHWA-IF-02-034: Geotechnical Engineering Circular No:5- Evolution of Soil and Rock Properties" *Technical Manual*, Atlanta, USA, April
- Sankey, J.E., Segrestin, P.,** (2001). "Evaluation of Seismic Performance in MSE Structures." *Landmarks in Earth Reinforcement, Volume 1. Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement*, Kyushu, Japan
- Sankey, J.E., Brabant, K., Masse, F.,** (2011)." Stand Alone and Combined Technologies for MSE Walls: State of Practice for Compressible Soils" *Geo-Frontiers 2011 : Advances in Geotechnical Engineering*, Dallas, USA
- Sankey, J., Soliman, A.,** (2004). "Tall Wall Mechanically Stabilized Earth Applications" *Geo-Trans 2004:Geotechnical Engineering for Transportation Projects* Los Angeles-California, USA
- Schlosser, F., Juran, I, Jacobsen, H.M.,** (1983). "Soil Reinforcement", *General Report, 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki
- Schlosser, F., Long, N.T.,** (1974). "Recent results in French Research on Reinforced Earth", *Journal of ASCE*
- Segrestin P., Bastick M.,** (1996). "Comparative Study and Measurement of the Pull-Out Capacity of the Extensible and Inextensible Reinforcements" *Ochiai, Yasufuku & Omine, Balkema* Rotterdam
- Segrestin P., Freitag, N.,** (2000). "Reinforced Earth Walls Along the Spillways" TAI Document
- Segrestin, P.,** (2008)." Design Philosophy for Reinforced Soil Walls:Noteworthy Aspects of European Standards" *New Horizons in Earth Reinforcement – Otani, Miyata & Mukunoki (eds) Taylor & Francis Group*, London
- Smith, A.C., Dison, L.,** (2000). "Backfill materials for Mechanically Stabilized Earth (MSE): African Experience" *Reinforced Earth South Africa Company Technical Papers* <http://www.reco.za>
- Steward J.D., Truong K., Segrestin P.,** (1995). "Design and performance of three Reinforced Earth tiered walls" *RECO USA Technical Papers* <http://www.reinforcedearth.com>
- Stuedlein, A.W., Allen, T.M., Holtz, R.D., Christopher, B.R.,** (2012). "Assessment of Reinforcement Strains in Very Tall Mechanically Stabilized Earth Walls" *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , March

- Stuedlein, A.W., Bailey, M., Lindquist D., Sankey, J., Neely, W.J.,** (2010). "Design and Performance of a 46-m-High MSE Wall" *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , June
- Truong, K.M., Aziz, S., Freitag, N.,** (2008). " An in-depth Numerical Analysis of 25m Tall Reinforced Earth Wing Walls, Built back-to-back and Supporting a Bridge Approach" *New Horizons in Earth Reinforcement – Otani, Miyata & Mukunoki (eds) Taylor & Francis Group*, London
- US Army Corps of Engineers** (2003). "Engineering and Design - Slope Stability", Washington DC, USA
- Vidal H.,** (1969). "The Principle of Reinforced Earth," *Highway Research Record*, No. 282
- Wright, G.S.,** (2005). " FHWA/TX-05/0-4485-2: Design Guidelines for Multi-Tiered MSE Walls" *Technical Manual*, Texas, USA, August
- Zetaş,** (1994). " Modulus Number Table for the use of Janbu's Method in Settlement Calculations" *House Report*, İstanbul
- Zhu, D.Y.; Lee, C.F.; Jiang, H.D.,** (2003). "Generalised Framework of Limit Equilibrium Methods for Slope Stability Analysis" *Geotechnique* ,London
- Url-1** <<https://www.rocscience.com/>>, "Slide 5.0 User Manual" alındığı tarih 21.03.2014
- Url-2** <<http://www.finesoftware.eu/geotechnical-software/settlement/>>, "Geo 5 Settlement User Manual" alındığı tarih 30.03.2014

EKLER

EK A: Valdez Program Tanıtımı

EK B : Valdez Analiz Sonuçları

EK-A

"VALDEZ" PROGRAMI HESAP YÖNTEMİ AÇIKLAMASI

DÜŞEY PANELLER İLE REINFORCED EARTH® DUVAR DİZAYNI İÇİN HESAP YÖNTEMİ

TAISOFT PROGRAM : VALDEZ

Yöntem, notasyonlar, sonuçlar ve program çıktıları

Tüm hesaplar AFNOR standard NF P 94-270-0/1 (*Renforcement des sols-Ouvrages en sols rapportés renforcés par armatures ou nappes peu extensibles et souples-Dimensionnement*) göre yapılmaktadır.

Kullanılan tüm referanslar NF P 94-270-0/1 standartlarından alınmıştır.

Not : A'dan G'ye kadar olan harfler bu dökümandaki bölümlere, 1'den 2.3.2'ye kadar olan sayılar program çıktılarındaki paragraflara tekabül etmektedir.

A. PROJE TANITIMI

İlk sayfada projenin ve hesapların tanımlanmasında gerekli bilgiler sunulmaktadır.

B. HESAP KABULLERİ

1. GENEL BİLGİLER

1.1 YAPI SINIFI

Servis ömrü ve proje sahası, korozyona karşı feda edilen donatı kalınlığını belirler.

Çizelge A.1: Feda edilen kalınlık
Minimum feda edilen kalınlık (milimetre cinsinden)

	Servis ömrü							
	5 yıl		30 yıl		70 yıl		100 yıl	
Metal	S	G.S.	S	G.S.	S	G.S.	S	G.S.
Saha Durumu								
Kuru	0.5	0	1.5	0.5	3	1.0	4	1.5
Su altında	0.5	0	2.0	1.0	4	1.5	5	2.0

S. = Siyah Çelik

G.S. = Sıcak daldırma galvaniz kaplamalı çelik, 500g/m².

1.2 R.E. ÇELİK ŞERİTLER

Malzeme olarak yüzeyi galvaniz ile işleminden geçirilmiş çelik kullanılmaktadır. Yapının inşaatında kullanılan tüm çelik şerit tiplerinin geometrik ve mekanik özellikleri daha önceden tanımlanmıştır.

Genişlik, b,

kalınlık, eo,

feda edilecek kalınlık, es (önceden tanımlandı),

çeliğin kalitesi, σ_r.

İzin verilen gerilme kuvvetleri, Tr ve Tro tam kesit ve bağlantı noktalarında bir şerit için verilmiştir.

$$Tr = \sigma_r \cdot (b - bt) \cdot (eo - et - es) / \gamma_{mt}$$

(tüm boyutlar mm cinsindendir)

bt ve et genişlik ve kalınlık toleransları (hesap çıktılarında 'Complementary Data' sayfasında verilmiştir.).

γ_{mt}'nin tanımı için Bölüm D'ye bakınız.

Tro aynı yöntem kullanılarak ve bağlantı noktaları dikkate alınarak hesaplanır.

1.3 CEPHE KAPLAMASI

Burada cephe kaplamalarının özellikleri belirtilmiştir. Standart paneller ' + ' şeklinde 14cm ve 18cm kalınlığında beton panellerdir.

1.4 SİSMİK BİLGİ

Maksimum yatay ivme, ao/g : ao, değerinin proje sahasında zemin kotundaki maximum yatay ivme olarak alındığı varsayılırsa, reinforced earth yapı ve dolgu bölümündeki yatay dizayn ivmesi, ad, aşağıdaki formül kullanılarak bulunur.

$$\frac{a_d}{g} = \frac{a_o}{g} \times \left(1.45 - \frac{a_o}{g} \right)$$

Referans olarak alınan maksimum yatay nominal ivme, an ,zemin cinsi (S1 to S3) ve sismik bölge (0'dan III'e) dikkate alınarak 'Association Française du génie Para-Sismique' (AFPS) tarafından belirlenen kurallara göre belirlenir. AFPS'nin önerileri doğrultusunda reinforced earth yapılarına dair bir ilişki aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned} a_o &= a_n \text{ S1 saha, sert zemin} \\ a_o &= 0.9a_n \text{ S2 saha, orta sert zemin} \\ a_o &= 0.8a_n \text{ S3 saha, zayıf zemin} \end{aligned}$$

Dinamik değişim katsayısı aşağıdaki koşullarda ya 0'a yada 1'e eşittir
0 (düşey ivme hesaba dahil edilmediği durumda)
1 (düşey ivme hesaba dahil edildiği durumda)

C. KESİT ÖZELLİKLERİ

2. KESİT

Programı çalıştırırken birden fazla kesit dizayn edilmişse, aşağıdaki noktalar her bir kesit için tekrarlanmaktadır.

2.1 KESİT BİLGİLERİ

2.1.1 GEOMETRİ

Yapı kesitinin tanımlanması için gerekli boyutlar ve uygulanan sürşarj yükleri aşağıda gösterilmiştir.

Notasyonlar için Şekil.A-1'e bakınız.

Şekil A.1 : Toprakarme duvar enkesiti

Değişken şerit boylu kesit kullanıldığında şeritlerin boyları ve numaraları her blok için yukarıdan aşağıya doğru numaralandırılır.
Dikdörtgen kesitlerde (tek bloklu değişken şerit boylu kesite denktir) sadece şeritlerin boyları verilir.

2.1.2 ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Hesapta dikkate alınacak zemin özellikleri buradan sonraki bölümlerde verilmiştir:

R.E. DOLGU (1) : Maksimum ve minimum yoğunluk (γ_{max}) ve içsel sürtünme açısı (ϕ_1).

GENEL ARKA ZEMİN (2) : Yoğunluk (γ_{max}) ve içsel sürtünme açısı (ϕ_2).

TEMEL ZEMİNİ (3) : İçsel sürtünme açısı (ϕ_3) ve kohezyon (C_3).

Notasyonlar için Şekil.1'e bakınız.

2.1.3 TOPRAK BASINCI

Duvarın arkasına uygulanan toprak basıncının diyagramı zemin özelliklerinin yanı sıra toprak setin geometrisine ve sürüşarj yüküne de bağlıdır.

Toprak basıncı yapının esnekliğine bağımlı olarak yatayla delta açısını yapar. Bu değer '*annex F*' standardına göre hesaplanır.

Statik toprak basınç katsayıları, K_{2x} ve K_{2y} , da '*annex F*' standardına göre hesaplanır.

Sismik dizayn yaparken kullanılan dinamik toprak basınç katsayıları, K_{aex} ve K_{aey} , Mononobe-Okabe formülü kullanılarak ve *AFPS* tavsiyeleri dikkate alınarak hesaplanır.

D. YÜKLEME DURUMLARI VE GÜVENLİK SEVİYESİ

Her yükleme durumu için gerekli olan yükleme faktörleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge A.2 : Yükleme faktörleri

Yükleme durumu	Yapının öz ağırlığı γ_{F1G}	Dolgunun itme kuvveti γ_{F1G}	Duvar üstü sürüşarj yükü γ_{F1q}	Duvar arkası sürüşarj yükü γ_{F1q}	R.E dolgusu yoğunluğu
Tem. 1 (A)	1.20	1.20	1.33	1.33	Max
2 (B)	1.00	1.20	0	1.33	Min
3 *	1.00	1.00	0	0	Max
Tes. 1s	1.00	1.00	0	0	Min
2s	1.00	1.00	0	0	Max

Durum 1s, standartlardaki dış stabilite için S hali'ne, durum 2s ise standartlardaki iç stabilite için S hali'ne karşılık gelmektedir.

Durumların herbiri iki alt-duruma ayrılmaktadır:

. +dW : yukarı doğru düşey ivme,

. -dW : aşağı doğru düşey ivme.

E. GENEL STABİLİTE

Valdez Programı, genel stabilite analiz sonuçlarını içermemektedir. Genel stabilite analizleri, geoteknik rapor doğrultusunda yapılacak kabuller ışığında yapılmalıdır.

Çizelge A.3 : Kısmi güvenlik ve yöntem faktörleri

	Statik (Temel)			Sismik (Tesadüfî)		
	Kısmi Güvenlik Faktörü		Yöntem faktörü (γ _{F3})	Kısmi Güvenlik Faktörü		Yöntem faktörü (γ _{F3})
	(sıradan yapılar)	(hassas yapılar)		(sıradan yapılar)	(hassas yapılar)	
DIŞ STABİLİTE						
. Taban kayması			1.000			1.000
Sürtünme	γ _{mφ} : 1.20	1.20		1.10	1.10	
Kohezyon	γ _{mc} : 1.65	1.65		1.50	1.50	
. Dönme *	γ _{mr} : 1.50	1.50	1.000	1.50	1.50	1.000
. Taşıma Kapasitesi	γ _{mq} : 1.50	1.50	1.125	1.50	1.50	1.000
İÇ STABİLİTE						
. Gerilme	γ _{mt} : 1.50	1.65	1.125	1.50	1.65	1.000
. Aderans	γ _{mf} : 1.20	1.30	1.125	0.96**	1.04**	1.000

2.2.1. DIŞ STABİLİTE İÇİN LİMİT DURUM

Her yükleme durumu için program aşağıdakileri hesaplar:

- Yapının tabanındaki, düşey ve yatay kuvvetler (kN/m cinsinden), R_v ve R_h,

- Tabandaki referans basıncı (kPa cinsinden), q_{ref},

H_m ≥ L olduğu durumda, Meyerhof basıncı R_v · γ_{F3} / 2.x eşittir

H_m ≤ L olduğu durumda, yüzeyin H_m/4 kadar uzağındaki basınç

- 2.x, basıncın uygulandığı taraftaki kalınlık.

Normal zeminlerde temelin en az gömme derinliği verilmiştir.

Dış stabilite tahkiki için aşağıda belirtilen kriterler kontrol edilmelidir.

a. Taşıma gücü

Taşıma gücü aşağıda belirtilen durumda kontrol edilir:

$$q_{ref} \leq \frac{q_{fu}}{\gamma_{mq}}$$

Buradaki q_{fu} zemin karakteristiklerini ve oluşan net kuvvetin eğimini (tanjantı R_h/R_v olan) dikkate alan taşıma gücünün gerçek değeridir.

b. Taban kayması

Taban kayması aşağıda sunulan durumlarda kontrol edilir.

$$R_v \times \frac{\tan \phi}{\gamma_{m\phi}} + \frac{c}{\gamma_{mc}} \times L \geq \gamma_{F3} \times R_h$$

Buradaki φ ve c değerleri takviye edilmiş veya edilmemiş zeminin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleridir.

2.2.2 TABAN ÜSTÜNDE KAYMA-DÖNME

Program aşağıdaki elemanları vermektedir:

* Overdesign faktörü, Γ, taban kayması göz önüne alınarak:

$$\Gamma = \frac{R_v \times \frac{\tan \phi}{\gamma_{m\phi}} + \frac{c}{\gamma_{mc}} \times L}{\gamma_{F3} \times R_h}$$

Bu overdesign faktörü 1'den (birden) büyük olmalıdır..

* Temel dolgusu ile toprakarme arasındaki kontakt düşünüldüğünde, sürtünmeli dolgulara minimum içsel sürtünme açısının değeri ve kohezyonlu dolgulara minimum kohezyon değeri, tüm güvenlik katsayılarını sağlamak zorundadır.

* Standartlarda yer almadığı için, dönme etkisini dikkate alan overdesign faktörü sadece bilgi amaçlı verilmiş olup, dönmeye karşı duran momentler ile döndürmeye çalışan momentlerin birbirine oranıdır.

F. İÇ STABİLİTE

Hesap kesiti genişliği, cephe kaplama sistemine bağlıdır.

2.3.1 ŞERİT KOPMASI – PANELLERE GELEN YÜK : Overdesign faktörleri

Her şerit tabakası için hesap değerleri aşağıda açıklanmıştır.

Söz konusu şerit seviyeleri kolon 1 ve 2'de referans numarası ve derinlik, z (metre cinsinden) gösterilmiştir. (bakınız Şekil.2)

. Kolon 3 – S_v , Şerit tabakaları düşey aralığı.

. Kolon 4 – K , Statik toprak basıncı katsayıları, standartlara göre aşağıda belirtilen şekilde hesaplanır.

Şekil A.2 : Statik toprak basıncı katsayısı

. Kolon 5 – type, Şerit tipleri.

. Kolon 6 – Num, Aynı seviyedeki şerit sayısının hesap genişliğine (Standart paneller için 3m alınır).

. Kolon 7 – case, Yükleme durumu.

. Kolon 8 – sh, Yatay gerilme:

$$sh = K \cdot sv$$

K kolon 4'te verilmiştir. sv ise Meyerhof formülüyle hesaplanmış, dikkate alınan seviyedeki düşey gerilmedir.

. Kolon 9 – T_{max} , Bir şeritteki maksimum gerilme

$$T_m = \gamma_{F3} \cdot \sigma_h \cdot S_v / n$$

n , metre başına şerit sayısı ve γ_{F3} , gerilme kontrolü için kullanılan yöntem faktörü.

. Kolon 10 – T_o , Bir şeritte meydana gelen yüzeydeki gerilme.

$$T_o = i \cdot T_m$$

. Kolon 11 – T_r/T_m , Şeritlerdeki maksimum gerilme dikkate alınarak hesaplanan overdesign faktörü.

. Kolon 12 – T_{ro}/T_o , Şeritlerdeki yüzeyde oluşan maksimum gerilme dikkate alınarak hesaplanan overdesign faktörü.

. Kolon 13 – Kullanılan panel tipi

Paneller için, program hangi tip kullanılacağını gösterir:

UR = donatısız paneller

R = donatılı paneller

RS = 18 cm kalınlığında özel paneller

2.3.2 ADERANS : Overdesign faktörü

. Kolon 1 ve 2 referans numarası ve hesaplanan şerit seviyelerinin derinliklerini (metre cinsinden) gösterir. (Şekil.1)

. Kolon 3 – μ^* , Standartların §6.3 maddesine göre hesaplanan sürtünme katsayısı.

. Kolon 4 – L , Hesaplanan katmandaki şerit boyu. (metre cinsinden)

. Kolon 5 – La , Hesaplanan katmandaki şeritlerin aderans uzunluğu. (metre cinsinden, standartların §3.1 maddesine göre)

. Kolon 6 – ha , Aderans uzunluğunun ortalama derinliği. (standartların §6.3 maddesi).

. Kolon 7 – $type$, Şerit tipleri.

. Kolon 8 – Num , Hesap genişliğine göre katmandaki şerit sayısı.

. Kolon 9 – $case$, Yükleme durumu.

. Kolon 10 – $Tmax$, Bir şeritteki maksimum gerilme.

. Kolon 11 – Tf , Şerit çekme kapasitesi, kısmi güvenlik faktörü dahil olarak.

$$Tf = rf / (N \times gmf.)$$

rf standartlarda §8.2.4 maddesinde verilmiştir.

. Kolon 12 – Tf/Tm , Şerit çekme kapasitesi gözetilerek hesaplanan overdesign faktörü.

Bu kolonda ayrıca aşağıdaki bilgilerde tanımlanmıştır.

. Kullanılan şerit tipleri

. Kullanılan şerit tiplerinde, kaplama genişliği için gerekli şerit miktarı, hesap genişliğinde gerekli miktara eşittir

. Kaplamanın her metrekaresi için şerit ağırlığı

G. TAMAMLAYICI DATA

1. STANDARDIZASYON DOSYASI

Valdez programı standardizasyon dosyaları arasında, ilgili ülkeye ait uygulama kurallarını içeren dosyayı arar ve kullanır. (örneğin: NF P 94-270-0/1 Fransız Standartları)

2. HESAP YÖNTEMİ

İlgili ülkenin kullandığı hesap yöntemi: Limit Durum (Ultimate State) Yöntemi.

3. FAKTÖRLER

Yük, kısmi güvenlik ve yöntem faktörleri, bu belgenin D bölümündeki tablolara göre sunulmuştur.

4. ŞERİTLER

Kullanılan her şerit tipi için, toleranslar, bağlantılardaki boyutlar gibi tamamlayıcı bilgiler burada detaylandırılmıştır.

5. KAPLAMA

Bu bölümde katmanların düşey aralıkları ve kaplamanın esneklikleri verilmektedir.

EK: B

Şekil B.1: Analiz kesiti

VALDEZ --- PROJECT:rozak RUN:01

INPUT DATA - R.E WALL

WALL GEOMETRY

CROSS SECTION TYPE TRAPEZOIDAL

R.E. backfill height H1 (m) 9.730

Coping height Hc (m) 0.000 Free board Ht (m) 0.000

Facing height Hf (m) 9.730 Slope height H2 (m) 0.00

Facing thickness E(m) 0.000 Set back F (m) 0.00

Slope angle Beta (deg) 0.00

Terrace angle Omega (deg) 0.00

Angle at toe Betas (deg) 0.00

Number of blocks J 2

SURCHARGE

Q (kPa) 150.00

Lq (m) 5.00

Type Road traffic

Temperature (°C) 20

☐ FALSE ABUTMENT

FACING Std. half step

STRIP HA 40&50(NFP94270)

SOIL PROPERTIES

R.E Backfill

Density(min) G1min (kN/m3) 18.00

Density (max) G1max (kN/m3) 20.00

Friction Phi1 (deg) 34.00

Material maximum size 125 mm

General backfill

Density(max) G2 (kN/m3) 20.00

Friction Phi2 (deg) 30.00

Foundation

Friction Phi3 (deg) 34.00

Cohesion C3 (kPa) 0.00

CALCULATION TYPE

Seismic Seismic

Safety Factors Ord. security level

Load Factors Standard

DURABILITY

Life 50 Site No water Protection Galvanized

CANCEL [ESC] VALID [Alt F10]

MAXIMUM VALUE: 40

Şekil B.2 : Analiz data tablosu

VALDEZ --- PROJECT:rozak RUN:01

EXTERNAL STABILITY

BEARING PRESSURE

	Rv (kN/m)	Rh (kN/m)	M (kNm/m)	qref (kPa)	2.x(m)
1	3,566.33	1,079.81	13,983.46	454.78	7.84
2	1,896.99	1,079.81	5,636.74	319.21	5.94
3	1,983.11	294.83	9,146.85	214.98	9.23
1s [+dw]	2,220.93	854.71	7,662.09	321.88	6.90
[-dw]	1,824.08	802.35	5,941.31	280.01	6.51
2s [+dw]	2,004.98	814.90	6,768.35	296.97	6.75
[-dw]	1,647.03	762.53	5,242.09	258.74	6.37

SLIDING ON THE BASE

	real coef. / required coef.		minimum value	
	slip in R. E.	slip in foundation	phi (deg.)	cohesion (kPa)
case1	2.37	2.37	15.89	0.00
			0.00	118.78
case2	1.10	1.10	31.64	0.00
			0.00	118.78
case1s	1.41	1.41	25.59	0.00
			0.00	94.02

EMBEDMENT

D (m) 0.682

INCLINATION

deltax 20.00

deltay 7.18

OVERTURNING

real coef. / required coef.

case1 4.02

case2 1.64

case1s 1.94

Navigation buttons: [Previous] [Next]

Şekil B.3 : Güvenlik katsayıları

VALDEZ --- PROJECT:rozak RUN:02

INPUT DATA - R.E WALL

WALL GEOMETRY

CROSS SECTION TYPE: RECTANGULAR

R.E. backfill height H1 (m): 4.480

Coping height Hc (m): 0.000 Free board Ht (m): 0.000

Facing height Hf (m): 4.480 Slope height H2 (m): 9.73

Facing thickness E(m): 0.000 Set back F (m): 2.00

Terrace angle Omega (deg): 0.00

Angle at toe Betas (deg): 0.00

Strip length L (m): 9.00

SURCHARGE

Q (kPa): 150.00

Lq (m): 5.00

Type: Road traffic

Temperature (°C): 20

DURABILITY

Life: 50 Site: No water Protection: Galvanized

☒ FALSE ABUTMENT

FACING

Std. half step

STRIP

HA 40&50(NFP94270)

SOIL PROPERTIES

R.E Backfill

Density(min) G1 min (kN/m3): 18.00

Density(max) G1 max (kN/m3): 20.00

Friction Phi1 (deg): 34.00

Material maximum size: 125 mm

General backfill

Density(max) G2 (kN/m3): 20.00

Friction Phi2 (deg): 34.00

Foundation

Friction Phi3 (deg): 34.00

Cohesion C3 (kPa): 0.00

CALCULATION TYPE

Seismic: Seismic

Safety Factors: Ord. security level

Load Factors: Standard

CANCEL [ESC] VALID [Alt F10]

MAXIMUM VALUE: 40

Şekil B.5 : Analiz data tablosu

VALDEZ --- PROJECT:rozak RUN:02

EXTERNAL STABILITY

BEARING PRESSURE

	Rv (kN/m)	Rh (kN/m)	M (kNm/m)	qref (kPa)	2.x(m)
1	3,821.12	1,452.84	13,865.87	609.80	7.26
2	2,395.25	1,452.84	5,261.47	573.10	4.39
3	2,319.79	495.28	10,135.67	274.64	8.74
1s [+dw]	2,696.66	1,397.80	5,773.79	653.55	4.28
[-dw]	2,147.73	1,304.55	3,643.60	573.64	3.39
2s [+dw]	2,453.77	1,345.75	4,877.12	615.64	3.98
[-dw]	1,956.89	1,252.50	3,013.83	539.70	3.08

SLIDING ON THE BASE

	real coef. / required coef.		minimum value	
	slip in R. E.	slip in foundation	phi (deg.)	cohesion (kPa)
case1	1.61	1.61	22.70	0.00
			0.00	177.57
case2	1.01	1.01	33.71	0.00
			0.00	177.57
case1s	1.01	1.01	33.75	0.00
			0.00	170.84

Embedment

D (m): 0.915

Inclination

deltax: 22.67

deltay: 16.98

OVERTURNING

real coef. / required coef.

case1: 1.85

case2: 1.14

case1s: 1.03

← →

Şekil B.6 : Güvenlik katsayıları

```

*****
*
*      Reinforced Earth : Program Valdez      *
*
*
*
*
*****

```

5.1

Job number : rozak
=====

Run number : 01
=====

Structure : 14.98 m
=====
 üst palye
 reinforced earth wall

Designed by : t.y.
=====

```

*****
*      1 .      GENERAL DATA      *
*****

```

```

1 . 1  STRUCTURE CLASS :
-----

```

Service life : 50 years

Site : No water

```

1 . 2  R.E. STRIPS :
-----

```

protection : Galvanized

Type 1: HA 40X4

grade : 510.0 MPa

width b : 40.0 mm

thickness eo : 4.0 mm

Allowable tensile strength :

full section Tr : 45.05 kN

connection Tro : 39.17 kN

Type 2: HA 50X4

grade : 510.0 MPa

width b : 50.0 mm

thickness eo : 4.0 mm

Allowable tensile strength :

full section Tr : 56.32 kN

connection Tro : 53.67 kN

```

1 . 3  FACING: TERRACASS
-----

```

```

1 . 4  SEISMIC DATA :
-----

```

Maximal horizontal acceleration a_0/g : 0.40

Reduction factor of live loads : 0.00

Importance coefficient G_1 : 1.00

$m=avg/ag$: 1.00

Factor r : 2.00

Response spectrum S : 1.00

 * 2 . SECTION 01 *

2 . 1 SECTION DATA :

2 . 1 . 1 GEOMETRY :

R.E MASS

Facing height	Hf : 9.730 m	R.E.backfill height	H1 : 9.730 m
Coping height	Hc : 0.000 m	Free board	Ht : 0.000 m
Slope height	H2 : 0.00 m	Mechanical height	Hm : 9.730 m
Slope angle	Beta : 0.00 deg.	Terrace angle	Omega : 0.00 deg.
Setback	F : 0.00 m	Angle at toe	Beta_s : 0.000

Number of blocks : 2 (From top to bottom)

Layers number	Strip Length (m)
3	11.00
10	10.00

SURCHARGES

Load	q : 150.00 kPa	Position Lq :	5.00 m
Type	: Road traffic		

2 . 1 . 2 SOIL PROPERTIES :

R.E. BACKFILL

Density	gamma1 maxi : 20.00 kN/m3	Friction	phi1 : 34.00 deg.
	gamma1 mini : 18.00 kN/m3		

GENERAL BACKFILL

Density	gamma2 : 20.00 kN/m3	Friction	phi2 : 30.00 deg.
---------	----------------------	----------	-------------------

FOUNDATION

Cohesion	C3 : 0.00 kPa	Friction	phi3 : 34.00 deg.
----------	---------------	----------	-------------------

2 . 1 . 3 EARTH PRESSURE :

Inclination of earth pressure at back of R.E. mass:
 deltaX = 0.00 deg. - deltaY = 7.18 deg.

Earth pressure coefficients:

k2x	= 0.000	k2y	= 0.314 (Static)
x	= 0.000 m	y	= 9.730 m
kaex+	= 0.000	kaey+	= 0.442 (Dynamic)
x+	= 0.000 m	y+	= 9.730 m
kaex-	= 0.000	kaey-	= 0.478
x-	= 0.000 m	y-	= 9.730 m

2 . 2 EXTERNAL STABILITY

2 . 2 . 1 EXTERNAL STABILITY :

case	Rv kN/m	Rh kN/m	M kNm/m	qref kPa	2.x m
1	3566.33	1079.81	13983.46	454.78	7.84
2	1896.99	1079.81	5636.74	319.21	5.94
3	1983.11	294.83	9146.85	214.98	9.22
1s +dW	2220.93	854.71	7662.09	321.88	6.90
-dW	1824.08	802.35	5941.31	280.01	6.51
2s +dW	2004.98	814.90	6768.35	296.97	6.75
-dW	1647.03	762.53	5242.09	258.74	6.37

Minimum embedment depth = 0.68 m

2 . 2 . 2 SLIDING ON THE BASE - OVERTURNING :

case	SLIDING ON THE BASE			OVERTURNING	
	Overdesign factor slip in R.E.	minimal value slip in found.	phi(°)	minimal value Cohesion(kPa)	Overdesign factor
1	2.37	2.37	15.89	-	4.02
2	1.09	1.09	31.64	118.78	1.64
1s	1.41	1.41	25.59	94.02	1.94

2 . 3 INTERNAL STABILITY

Calculation width : 3.00 m

2 . 3 . 1 STRIP RUPTURE - TENSILE LOAD AT FACING : Overdesign factors

layer	z m	deltah m	Strip type	Strip Num.	Ties Num.	case	k	sigmah kPa	Tmax kN	To kN	Tr/Tm	Tro/To
1	0.365	0.740	1	4	4	1	.431	40.31	22.37	19.02	2.01	2.06 UR4
						2	.431	2.87	1.59	1.35	28.29	28.93
						1s	.431	3.15	8.39	7.13	5.37	5.49
						2s	.431	2.83	7.55	6.42	5.96	6.10
2	1.115	0.750	1	4	4	1	.411	46.39	26.09	22.18	1.73	1.77 UR4
						2	.411	8.57	4.82	4.10	9.35	9.56
						1s	.411	9.18	11.91	10.13	3.78	3.87
						2s	.411	8.27	10.72	9.11	4.20	4.30
3	1.865	0.750	1	4	4	1	.392	51.99	29.25	24.86	1.54	1.58 UR4
						2	.392	14.00	7.87	6.69	5.72	5.85
						1s	.392	14.65	15.09	12.83	2.99	3.05
						2s	.392	13.19	13.59	11.55	3.32	3.39
4	2.615	0.750	1	4	4	1	.372	57.51	32.35	27.50	1.39	1.42 UR4
						2	.372	19.25	10.83	9.20	4.16	4.26
						1s	.372	19.57	17.15	14.57	2.63	2.69
						2s	.372	17.63	15.44	13.12	2.92	2.98
5	3.365	0.750	1	4	4	1	.352	62.92	35.39	30.08	1.27	1.30 UR4
						2	.352	24.36	13.70	11.65	3.29	3.36
						1s	.352	23.96	19.72	16.76	2.28	2.34
						2s	.352	21.59	17.76	15.10	2.54	2.59
6	4.115	0.750	1	4	4	1	.332	67.80	38.13	32.41	1.18	1.21 R4
						2	.332	29.28	16.47	14.00	2.74	2.80
						1s	.332	27.82	21.99	18.69	2.05	2.10
						2s	.332	25.09	19.82	16.85	2.27	2.32
7	4.865	0.750	1	4	4	1	.313	72.12	40.57	34.48	1.11	1.14 R4
						2	.313	33.99	19.12	16.25	2.36	2.41
						1s	.313	31.16	23.97	20.37	1.88	1.92
						2s	.313	28.12	21.61	18.37	2.08	2.13
8	5.615	0.750	1	4	4	1	.293	75.85	42.67	36.27	1.06	1.08 R4
						2	.293	38.49	21.65	18.40	2.08	2.13
						1s	.293	33.97	25.65	21.80	1.76	1.80
						2s	.293	30.68	23.15	19.68	1.95	1.99
9	6.365	0.750	2	4	4	1	.283	81.75	45.98	40.02	1.22	1.34 R4
						2	.283	44.29	24.91	21.68	2.26	2.48
						1s	.283	37.52	29.59	25.76	1.90	2.08
						2s	.283	33.93	26.72	23.26	2.11	2.31
10	7.115	0.750	2	4	4	1	.283	90.86	51.11	45.96	1.10	1.17 R4
						2	.283	52.28	29.41	26.44	1.92	2.03
						1s	.283	42.39	32.72	29.42	1.72	1.82
						2s	.283	38.38	29.57	26.59	1.90	2.02
11	7.865	0.750	2	5	5	1	.283	100.64	45.29	42.03	1.24	1.28 R(4+6)
						2	.283	61.32	27.59	25.61	2.04	2.10
						1s	.283	47.42	30.59	28.39	1.84	1.89
						2s	.283	42.99	27.67	25.68	2.04	2.09
12	8.615	0.750	2	5	5	1	.283	111.20	50.04	47.89	1.13	1.12 R(4+6)
						2	.283	71.67	32.25	30.86	1.75	1.74
						1s	.283	52.64	33.32	31.89	1.69	1.68

layer	z m	deltah m	Strip type	Num.	Ties Num.	case	k	sigmah kPa	Tmax kN	To kN	Tr/Tm	Tro/To
							2s .283	47.79	30.17	28.88	1.87	1.86
13	9.365	0.740	2	6	6	1	.283	122.64	45.38	44.74	1.24	1.20 R6
						2	.283	83.67	30.96	30.52	1.82	1.76
						1s	.283	58.06	31.50	31.05	1.79	1.73
						2s	.283	52.80	28.55	28.15	1.97	1.91

2 . 3 . 2 ADHERENCE : Overdesign factor

layer	z m	L m	La m	type	Num.	Ties	case	f*	Za m	Tmax kN	Tf kN	Tf/Tm
1	0.665*	11.00	8.14	1	4	4	1	2.107	0.365	22.37	186.83	8.35
							2	2.107	0.365	1.59	12.17	7.64
							1s	2.107	0.365	8.39	13.52	1.61
							2s	2.107	0.365	7.55	12.17	1.61
2	1.115	11.00	8.27	1	4	4	1	1.917	1.115	26.09	181.59	6.96
							2	1.917	1.115	4.82	18.84	3.91
							1s	1.917	1.115	11.91	20.94	1.76
							2s	1.917	1.115	10.72	18.84	1.76
3	1.865	11.00	8.39	1	4	4	1	1.726	1.865	29.25	181.28	6.20
							2	1.726	1.865	7.87	28.81	3.66
							1s	1.726	1.865	15.09	32.01	2.12
							2s	1.726	1.865	13.59	28.81	2.12
4	2.615	10.00	7.52	1	4	4	1	1.535	2.615	32.35	150.62	4.66
							2	1.535	2.615	10.83	32.19	2.97
							1s	1.535	2.615	17.15	35.76	2.09
							2s	1.535	2.615	15.44	32.19	2.08
5	3.365	10.00	7.64	1	4	4	1	1.344	3.365	35.39	144.95	4.10
							2	1.344	3.365	13.70	36.88	2.69
							1s	1.344	3.365	19.72	40.97	2.08
							2s	1.344	3.365	17.76	36.88	2.08
6	4.115	10.00	7.77	1	4	4	1	1.154	4.115	38.13	135.92	3.56
							2	1.154	4.115	16.47	39.33	2.39
							1s	1.154	4.115	21.99	43.70	1.99
							2s	1.154	4.115	19.82	39.33	1.98
7	4.865	10.00	7.89	1	4	4	1	0.963	4.865	40.57	123.37	3.04
							2	0.963	4.865	19.12	39.44	2.06
							1s	0.963	4.865	23.97	43.82	1.83
							2s	0.963	4.865	21.61	39.44	1.82
8	5.615	10.00	8.02	1	4	4	1	0.772	5.615	42.67	107.12	2.51
							2	0.772	5.615	21.65	37.09	1.71
							1s	0.772	5.615	25.65	41.21	1.61
							2s	0.772	5.615	23.15	37.09	1.60
9	6.365	10.00	8.32	2	4	4	1	0.675	6.365	45.98	127.63	2.78
							2	0.675	6.365	24.91	47.61	1.91
							1s	0.675	6.365	29.59	52.90	1.79
							2s	0.675	6.365	26.72	47.61	1.78
10	7.115	10.00	8.69	2	4	4	1	0.675	7.115	51.11	139.64	2.73
							2	0.675	7.115	29.41	55.62	1.89
							1s	0.675	7.115	32.72	61.80	1.89
							2s	0.675	7.115	29.57	55.62	1.88
11	7.865	10.00	9.07	2	5	5	1	0.675	7.865	45.29	152.42	3.37
							2	0.675	7.865	27.59	64.14	2.32
							1s	0.675	7.865	30.59	71.26	2.33
							2s	0.675	7.865	27.67	64.14	2.32
12	8.615	10.00	9.44	2	5	5	1	0.675	8.615	50.04	165.95	3.32
							2	0.675	8.615	32.25	73.16	2.27
							1s	0.675	8.615	33.32	81.29	2.44
							2s	0.675	8.615	30.17	73.16	2.42
13	9.365	10.00	9.82	2	6	6	1	0.675	9.365	45.38	180.24	3.97
							2	0.675	9.365	30.96	82.69	2.67
							1s	0.675	9.365	31.50	91.87	2.92
							2s	0.675	9.365	28.55	82.69	2.90

 * COMPLEMENTARY DATA *

1 STANDARDISATION FILE : NFP94270

2 CALCULATION METHOD : Limit state

3 FACTORS :

load cases	LPw	Load factors			R.E density
		LPp	LPq1	LPq2	
1	1.35	1.35	1.50	1.50	2
2	1.00	1.35	0.00	1.50	1
3	1.00	1.00	0.00	0.00	2
1s	1.00	1.00	0.00	0.00	2
2s	1.00	1.00	0.00	0.00	1

R.E density : 1 = min - 2 = max

Safety factors	FSg	FSgc	FSr	FSc	FSf
Static	1.10	1.10	1.40	1.40	1.35
Seismic	1.10	1.10	1.40	1.40	1.08
Method factors					
Static	1.000		1.000	1.000	1.000
Seismic	1.000		1.000	1.000	1.000

4 STRIPS :

Strip type 1

Width tolerance : 0.00 mm Thickness tolerance : 0.00 mm
 Hole diameter : 12.70 mm
 -> tolerance : 0.30 mm
 Yield strength : 400.0 MPa

Material loss of strength:

A (loss of thickness per side over the 1st year) : 0.025

n (exponent) : 0.65

K (ratio coefficient) : 2.00

Zinc thickness : 0.07 mm

Corrosion Safety Factors:

SF yield strength : 1.00

SF ultimate strength : 1.25

Reduction Factors:

RF representing the loss of yield strength (average corrosion) : 0.86

RF representing the loss of ultimate strength (maximum corrosion) : 0.69

Strip type 2

Width tolerance : 0.00 mm Thickness tolerance : 0.00 mm
 Hole diameter : 12.70 mm
 -> tolerance : 0.30 mm
 Yield strength : 400.0 MPa

Material loss of strength:

A (loss of thickness per side over the 1st year) : 0.025

n (exponent) : 0.65

K (ratio coefficient) : 2.00

Zinc thickness : 0.07 mm

Corrosion Safety Factors:

SF yield strength : 1.00
SF ultimate strength : 1.25
Reduction Factors:
RF representing the loss of yield strength (average corrosion) : 0.86
RF representing the loss of ultimate strength (maximum corrosion) : 0.69

5 FACING :

Vertical strip spacing : 0.750 mm
bottom height : 0.365 mm
Facing flexibility : 2
Flexibility : 1 = rigid (ex: full height facing)
2 = discrete (ex: std panels)
3 = flexible (ex: steel facing)

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Tahir YILDIZ

Doğum Yeri ve Tarihi: Altındağ/ ANKARA 15.06.1988

E-Posta: tahir.yildiz88@gmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim: Proje Mühendisliği (3 Yıl)