

171002

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DONATILI ZEMİN DAYANMA DUVARLARININ PROJELENDİRİLMESİ

İnş. Müh. Tufan ÇAKIR

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İnşaat Yüksek Mühendisi"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13.06.2005
Tezin Savunma Tarihi : 05.07.2005**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mustafa AYTEKİN

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fikri BULUT

Mustafa Aytekin
Zekai Angin
Fikri Bulut

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Emin Zeki Başkent

Trabzon 2005

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu çalışmayı bana öneren, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dekanlığı görevini yürütürken bile tezimin her aşamasında ilgisini esirgemeyen, bana araştırma ruhunu aşıl原因an, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım yönetici hocam, değerli büyüğüm Sayın Prof. Dr. Mustafa AYTEKİN'e teşekkür eder, saygılar sunarım.

Trabzon'daki çalışmalarım sırasında orada bulunmamı sağlayarak çalışmalarımı gerçekleştirmemde önemli katkıları olan Fakültemiz Dekanı Sayın Prof. Dr. Fikri BULUT'a, önceki Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Ümit UZMAN'a, şimdiki Bölüm Başkanımız Sayın Yrd. Doç. Dr. Yüksel TURCAN'a ve Bölüm Başkan Yardımcımız Sayın Yrd. Doç. Dr. Evin NAS'a teşekkür ederim.

Öğrenimim boyunca üzerimde emeği olan, başta Geoteknik Anabilim Dalı'ndaki hocalarım olmak üzere tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Çalışmam süresince bana vakitlerini ayıran, bilgisayar konusundaki bilgilerinden yararlandığım mesai arkadaşlarım Arş.Gör. Ercan YOZGAT'a ve Arş. Gör. Fatih SAKA'ya teşekkür ederim.

Tezimin yazımı sırasında yardımlarını gördüğüm Arş Gör. Enver AKARYALI'ya, Arş. Gör. Selahattin ALBAYRAK'a ve kaynak ile katalog ihtiyaçlarım sırasında desteklerini gördüğüm Geoduvar İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti.'ye teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca hep yanımda olan, bana güven ve sevgi veren, maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiren, bütün zorluklara katlanarak yetişmemde büyük rol oynayan başta annem ve babam olmak üzere aileme şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım süresince bana moral, sevgi ve güven aşıl原因an, desteğini her zaman hissettiren, başarılarımla mutlu olan gönül sırdaşım, arkadaşım Sayın Fatoş KAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Tufan ÇAKIR

Trabzon 2005

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ.....	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Donatılı Zeminler.....	3
1.2.1. Donatılı Zemin Kavramı.....	3
1.2.2. Donatı Elemanları.....	4
1.2.2.1. Geosentetikler.....	4
1.2.2.1.1. Geotekstilller.....	5
1.2.2.1.1.1. Geotekstillerin Uygulama Alanları.....	12
1.2.2.1.2. Geogridler.....	14
1.2.2.1.3. Geoembranlar.....	15
1.2.2.1.4. Geokompozitler.....	16
1.2.2.1.5. Geonetler.....	17
1.3. Donatılı Zemin Uygulamaları.....	17
1.3.1. Donatılı Yol Dolguları.....	18
1.3.2. Donatılı Şevler.....	19
1.3.3. Köprü Kenar Ayakları.....	20
1.3.4. Donatılı Dolgu Barajlar.....	21
1.3.5. Donatılı Zemin İstinat Duvarları.....	22
1.3.5.1. Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Malzeme Özellikleri.....	23
1.3.5.1.1. Dolgu.....	24
1.3.5.1.2. Donatı Malzemesi.....	25

1.3.5.1.3.	Ön Yüz Kaplama Elemanları	26
1.3.5.2.	Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Stabilite Analizleri....	28
1.3.5.2.1.	İç Stabilite Analizleri.....	28
1.3.5.2.2.	Dış Stabilite Analizleri	32
1.4.	Türkiye’de Donatılı Zemin Uygulamaları	36
1.5.	Donatılı Zeminlerin Üstünlükleri, Sakıncaları ve Maliyet Durumu	40
1.5.1.	Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Üstünlükleri	40
1.5.2.	Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Sakıncaları	41
1.5.3.	Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Maliyet Durumu	41
1.6.	Donatılı Zeminlerle İlgili Önceki Çalışmalar	44
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	50
2.1.	Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Projelendirme Adımları	50
2.2.	Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarı Projelendirilmesi	54
2.2.1.	Geotekstil Donatılı Zemin İstinat Duvarı Uygulaması.....	54
2.3.	Geogrid Donatılı Zemin İstinat Duvarı ile Betonarme Konsol İstinat Duvarının Ekonomik Açından Değerlendirilmesi.....	62
2.3.1.	Betonarme Konsol İstinat Duvarının Analizi	63
2.3.1.1.	Betonarme Konsol İstinat Duvarının Tasarımı	63
2.3.1.2.	Betonarme Konsol İstinat Duvarının Stabilite Analizleri.....	66
2.3.1.3.	Betonarme Konsol İstinat Duvarının Yapısal Çözümlemesi.....	68
2.3.1.4.	Betonarme Konsol İstinat Duvarının Betonarme Kesit Hesapları	72
2.3.1.5.	Betonarme Konsol İstinat Duvarının Toplam Maliyetinin Belirlenmesi	76
2.3.2.	Geogrid Donatılı Zemin İstinat Duvarının Analizi	78
2.3.2.1.	Geogrid Donatılı Zemin İstinat Duvarının Toplam Maliyetinin Belirlenmesi	86
3.	BULGULAR VE İRDELEME	88
4.	SONUÇLAR	90
5.	ÖNERİLER.....	91
6.	KAYNAKLAR	92
7.	EKLER	96
	ÖZGEÇMİŞ	99

ÖZET

Zemin nispeten ucuz ve bolca bulunan bir yapı malzemesidir ve bu onu inşaatta kullanımı için ideal yapmaktadır. Zemin sadece basınç gerilmelerini taşıyan bir malzemedir. Donatılı zemin ise çekme gerilmelerine dayanabilen ve zeminle sürtünme veya adhezyon yoluyla etkileşen bir malzeme ile güçlendirilmiş zemin anlamına gelir. Betonarme yapılarda beton ile çelik bir kompozit sistem oluştururken, donatılı zeminde ise çelik yerine donatı olarak metalik veya polimerik malzemeler kullanılmaktadır. Böylece zemin ve çeşitli metalik veya polimerik donatıların birlikte çalışması ile donatılı zemin sistemi oluşmaktadır.

İstinat yapılarının geosentetik donatılı olarak tasarlanması özellikle son yıllarda geoteknik mühendisliği alanlarında geniş uygulama alanı bulan bir tasarım yöntemidir. Donatılı zemin istinat yapıları, yaygın bir şekilde mekanik olarak stabilize edilmiş zemin (MSE) istinat yapıları olarak anılmaktadır. MSE istinat yapısı uygulamaları yeni bir teknoloji olmasına rağmen bu yöntemin kullanıldığı bir çok yapı mevcuttur.

Bu çalışmada; donatılı zeminin gelişimi, değişik mühendislik alanlarındaki uygulamaları, donatılı zemini oluşturan ana malzeme çeşitleri, donatılı zeminin üstünlükleri ve sakıncaları, Türkiye'deki önemli donatılı zemin uygulamaları incelenmiştir. Ayrıca geosentetik donatılı zemin istinat duvarlarının projelendirme adımları ve geotekstil donatılı zemin istinat duvarı uygulama örneği verilmiştir.

Son olarak geogrid donatılı zemin istinat duvarı ve betonarme konsol istinat duvarı üzerine bir maliyet değerlendirme ve karşılaştırma çalışması sunulmuştur.

Maliyet analizi sonuçlarının değerlendirilmesi, geosentetik donatılı zemin istinat duvarının teknik üstünlükleri yanında oldukça ekonomik bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Donatılı Zemin, Geosentetik, Geotekstil, Geogrid, İstinat Duvarı, Maliyet Karşılaştırması, Mekanik Olarak Stabilize Edilmiş Zemin

SUMMARY

Design of Reinforced Earth Retaining Walls

Soil is a relatively inexpensive and abundant construction material, which makes it ideal for use in construction. Soil is a material capable of bearing only compression stresses but reinforced soil refers to a soil strengthened by a material able to resist tensile stresses and interacts with the soil through friction and adhesion. While concrete and steel form a composite system in reinforced concrete structures, in reinforced soil metallic and polymeric materials are used for the purpose of the reinforcement instead of steel. Thus, reinforced soil system is formed with the cooperation of soil and various metallic or polymeric reinforcements.

Especially, in the recent years, the design of retaining structures with geosynthetic reinforcement has become a widely used method in geotechnical engineering areas. Reinforced soil retaining structures are commonly referred as mechanically stabilized earth (MSE) retaining structures. Despite the fact that the applications of MSE retaining structure are based on a new technology, many structures are constructed by this method.

In this study, the development of reinforced soil, its applications in different engineering areas, the main material types forming reinforced soil, the advantages and disadvantages of reinforced soil, important reinforced soil applications in Turkey have been investigated. Also the design procedures of geosynthetic reinforced earth retaining walls and the worked example of geotextile reinforced earth retaining wall were presented.

Finally, a cost evaluation and comparison study on geogrid reinforced earth retaining wall and reinforced concrete retaining wall was presented.

The evaluation of the results of cost analysis indicates that the geosynthetic reinforced earth retaining wall is a fairly economic solution beside its technical advantages.

Key Words: Reinforced Earth, Geosynthetic, Geotextile, Geogrid, Retaining Wall, Cost Comparison, Mechanically Stabilized Earth

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. İstinat duvarlarının kullanım amaçlarına örnekler ((a) ve (b) yamaç yolları, (c) büyük dolgu gerektiren yollar, (d) büyük yarma gerektiren yollar, (e) zemin tutma, (f) kanal ve eklüzler, (g) taşkın duvarları, (h) köprü kenar ayakları).....	2
Şekil 2. Geotekstillerin ayırıcı olarak kullanılması.....	7
Şekil 3. Geotekstillerin donatı ve güçlendirme amaçlı kullanımı.....	8
Şekil 4. Takviye tabakalarında geotekstil uygulaması.....	9
Şekil 5. Farklı geotekstil tipleri için çekme gerilmesi –deformasyon ilişkileri.....	10
Şekil 6. Farklı geotekstil türlerinin çekme dayanımlarının karşılaştırılması.....	11
Şekil 7. Basit bir geomembran kaplama sistemi enkesiti.....	16
Şekil 8. Tipik bir geonet şekli.....	17
Şekil 9. Donatılı şev uygulamaları.....	19
Şekil 10. Geosentetik malzemeler ile şev stabilizasyonunda tabaka teşkili ((a) eşit uzunluk ve eşit aralıkta, (b) eşit uzunluk ve farklı aralıkta, (c) eşit uzunluk, eşit aralıkta ve kısa tabakalarla, (d) farklı uzunluk ve eşit aralıkta kısa tabakalarla).....	20
Şekil 11. Donatılı zemin köprü kenar ayağı.....	21
Şekil 12. Metal donatılı zemin istinat duvarını oluşturan bileşenler.....	22
Şekil 13. Geosentetik donatılı zemin istinat duvarını oluşturan elemanlar.....	23
Şekil 14. Donatılı zemin duvarlar için donatı ara mesafesinin tipik dizilimi.....	26
Şekil 15. Değişik şekillerde prefabrik ön yüz kaplama elemanları.....	27
Şekil 16. İç stabilite analizlerinde göz önüne alınacak olası göçme mekanizmaları.....	28
Şekil 17. Geosentetik donatılı zemin istinat duvarına etkiyen gerilmeler.....	30
Şekil 18. Dış stabilite analizlerinde göz önüne alınacak olası göçme mekanizmaları.....	33
Şekil 19. Dış stabilite analizi şeması.....	34
Şekil 20. Türkiye’deki ilk donatılı zemin uygulaması (Elmadağ).....	37
Şekil 21. TAG otoyolu Nur Dağı geçişi inşaatı.....	37
Şekil 22. Toprakkale-İskenderun otoyolu istinat duvarları.....	38
Şekil 23. Betonarme konsol duvarlara göre donatılı zeminin maliyet oranının yapı yüksekliği ile değişimi.....	42

Şekil 24. Yapı yüksekliği-ekonomi ilişkisi.....	42
Şekil 25. Donatılı zemin duvarlarda yapı yüksekliği-maliyet ilişkisi.....	44
Şekil 26. Donatı düşey aralıkları.....	56
Şekil 27. Donatı uzunlukları ve etkiyen yatay basınçlar.....	58
Şekil 28. Betonarme konsol istinat duvarının enkesiti.....	64
Şekil 29. Betonarme konsol istinat duvarına etkiyen aktif basınçlar ve aktif kuvvetler....	65
Şekil 30. İstinat duvarı gövdesine etkiyen yatay toprak basınçları.....	69
Şekil 31. İstinat duvarı tabanına etkiyen gerilmeler.....	70
Şekil 32. Betonarme konsol istinat duvarının moment diyagramı.....	72
Şekil 33. Betonarme konsol istinat duvarının donatı detayı.....	75
Şekil 34. Geogrid donatı uzunlukları ve düşey aralıkları.....	83



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Geotekstil yapımında kullanılan polimerler ve karşılaştırmalı özellikleri.....	5
Tablo 2. Geotekstillerin uygulama alanlarındaki birincil ve ikincil işlevleri.....	12
Tablo 3. Geotekstil emniyet faktörleri.....	31
Tablo 4. Geogrid emniyet faktörleri.....	31
Tablo 5. Ülkemizde uygulanan donatılı zemin sistemi projeleri.....	39
Tablo 6. Şev açısı-minimum gömme derinliği ilişkisi.....	52
Tablo 7. Geotekstil boyları hesap tablosu.....	57
Tablo 8. Devrilmeye karşı koyan kuvvetler ve moment değerleri.....	67
Tablo 9. Moment ve kesme kuvveti değerleri.....	72
Tablo 10. Betonarme hesap tablosu.....	73
Tablo 11. Dağıtma donatıları hesabı.....	74
Tablo 12. Donatı miktarı hesabı.....	77
Tablo 13. Bir metre duvar uzunluğu için toplam maliyet.....	78
Tablo 14. Hesaplanan ve tasarımda kullanılacak donatı düşey aralıkları.....	81
Tablo 15. Geogrid donatı boyları hesap tablosu.....	82
Tablo 16. Geogrid donatı miktarı.....	86
Tablo 17. Bir metre uzunluk için geogrid donatılı zemin duvarı toplam maliyeti.....	87
Ek Tablo 1. Dikdörtgen basınç bölgesi için katsayılar.....	96
Ek Tablo 2. 100 cm genişlik için donatı enkesit alanları.....	97
Ek Tablo 3. Beton sınıfları ve dayanımları.....	98

SEMBOLLER DİZİNİ

A	:Tipik maliyet
A_s	:Donatı alanı
a_1	:Ön ampatman için kritik kesit noktası
a_2	:Arka ampatman için kritik kesit noktası
a_3	:Gövde için kritik kesit noktası
B	:Donatılı zemin maliyeti, betonarme konsol istinat duvarı taban genişliği
c	:Kohezyon
C_S	:Zemin dolgusu maliyeti
C_F	:Ön yüz kaplama elemanları maliyeti
C_R	:Donatı birleşim elemanları maliyeti
C_L	:Taşıma işleri maliyeti
C_C	:İnşaat maliyeti
C_{MT}	:Malzemelerin test edilmesi maliyeti
C'_S	:Taşıma, yerleştirme, sıkıştırma ve malzemelerin test edilmesini içeren dolgu maliyeti
C'_R	:Donatının taşınması ve yerleştirilmesi maliyeti
C'_F	:Ön yüz elemanlarının taşınma ve inşa maliyeti
C20	:Beton sınıfı
C_r	:Geogrid kaplama oranı
D_{max}	:Maksimum dane çapı
d	:Faydalı yükseklik
d'	:Paspayı
e	:Eksantrisite
f_{ck}	:Karakteristik basınç dayanımı
f_{ctk}	:Karakteristik aksenal çekme dayanımı
f_{cd}	:Tasarım basınç dayanımı
f_{ctd}	:Tasarım aksenal çekme dayanımı
GS_g	:Global güvenlik sayısı
GS_k	:Kopmaya karşı güvenlik sayısı

GS_s	:Sıyrılmaya karşı güvenlik sayısı
GS_i	:Hasar emniyet faktörü
GS_c	:Sünmeyi önlemek için emniyet faktörü
GS_{kt}	:Kimyasal etkilere karşı emniyet faktörü
GS_b	:Biyolojik etkilere karşı emniyet faktörü
GS_{kayma}	:Kaymaya karşı güvenlik sayısı
$GS_{devrilme}$:Devrilmeye karşı güvenlik sayısı
H	:Duvar yüksekliği
H_1	:Gömme derinliği
K_a	:Aktif toprak basıncı katsayısı
K	:Beton sınıfına bağlı katsayı
k_s	:Çelik sınıfına bağlı katsayı
L	:Donatı toplam uzunluğu
L_R	:Kayma kaması içi boyu
L_E	:Ankraj bölgesi içerisindeki donatı boyu
L_O	:Geosentetik donatının kıvrım boyu
$L_{tasarım}$:Geosentetik donatı tasarım uzunluğu
L_2	:En alt tabakadaki donatı boyu
MSE	:Mekanik olarak stabilize edilmiş zemin
M_R	:Devrilmeye karşı koyan moment
M_O	:Devirmeye zorlayan moment
M	:Donatılı duvar tabanının orta noktasına göre toplam moment
M_D	:Gövdede kritik kesitteki moment
M_F	:Ön ampatmanda kritik kesitteki moment
M_G	:Arka ampatmanda kritik kesitteki moment
P	:Toplam aktif toprak basıncı kuvveti
P_L	:Tekil yük
P_P	:Çizgisel yük
P	:Kâr
P_s	:Dolgudan dolayı oluşan aktif toprak basıncı kuvveti

P_q	:Sürşarjdan dolayı oluşan aktif toprak basıncı kuvveti
R_v	:Duvar tabanına etkiyen toplam düşey kuvvet
S_h	:Donatı yatay aralığı
S_v	:Donatı düşey aralığı
S420	:Çelik sınıfı
T_i	:Belli yüksekliklerdeki çekme kuvvetleri
$T_{müs}$:Donatının müsaade edilir çekme mukavemeti
T_{nih}	:Donatının nihai çekme mukavemeti
T_f	:Kaymaya karşı koyan kuvvetler
T	:Kaydırmaya çalışan kuvvetler
TC	:Toplam maliyet
t	:Püskürtme beton kalınlığı
V_D	:Gövdede kritik kesitteki kesme kuvveti
V_F	:Ön ampatmanda kritik kesitteki kesme kuvveti
V_G	:Arka ampatmanda kritik kesitteki kesme kuvveti
V_{cr}	:Kesmede çatlama dayanımı
V_{dmax}	:Yapıya gelen en büyük kesme kuvveti
V	:Hacim
z	:Zemin yüzeyine göre derinlik
W	:Mukavemet momenti
W_1	:Dolgu ağırlığı
W_2	:Dolgu ağırlığı
q	:Sürşarj
β	:Eğimli arka yüzey açısı
δ	:Zeminle geosentetik donatı arasındaki sürtünme açısı
Δq	:Geçici noktasal hareketli yükler
α_g	:Sismik yükler
x_i	:Kuvvetlerin duvar topuğu (veya orta noktasına) uzaklıkları
γ_1	:Zeminin (dolgunun) birim hacim ağırlığı
γ_2	:Temel zemininin birim hacim ağırlığı
$\gamma_{betonarme}$:Betonarmenin birim hacim ağırlığı

ϕ_1	:Dolgu zemininin içsel sürtünme açısı
ϕ_2	:Temel zemininin içsel sürtünme açısı
$\sigma_{a(s)}$:Dolgudan dolayı oluşan yatay gerilme
$\sigma_{a(q)}$:Sürşarjdan dolayı oluşan yatay gerilme
$\sigma_{a(l)}$:Hareketli yüklerden dolayı oluşan yatay gerilme
σ_a	:Toplam yatay gerilme
σ_v	:Toplam düşey gerilme
σ_{\max}	:Maksimum gerilme
σ_{\min}	:Minimum gerilme
$\sigma_{z,em}$:Zemin emniyet gerilmesi



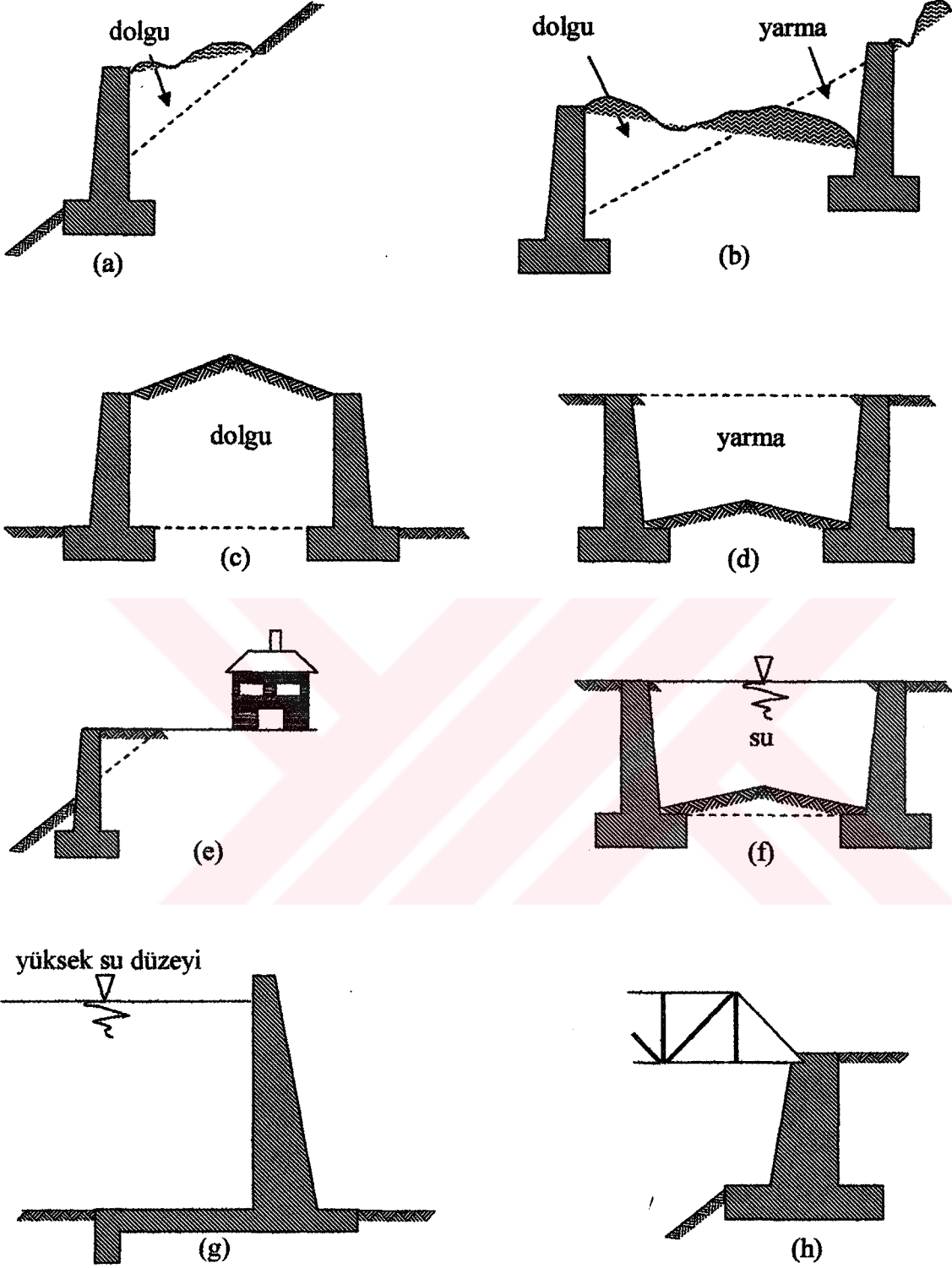
1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnşaat mühendisliğinde sık sık farklı kotlarda bulunan iki zemin düzeyi arasındaki bağlantı ile ilgili problemlerle karşılaşmaktadır. Farklı kotlar arasında düşey veya düşeye yakın bir açıyla geçiş isteniyorsa, bu amacı gerçekleştirecek bir yapı gerekir. Bu yapıya 'istinat duvarı' adı verilmektedir. Dolayısıyla istinat duvarları (dayanma duvarları), iki farklı düzeydeki zeminden oluşan yanal toprak itkisini istenen bir güvenlikle karşılayan ve zeminin doğal şev açısını almasını önleyerek dengeyi koruyan yapı elemanlarıdır [1]. İstinat duvarları doğal yamaçlarda kayma olasılığı olan yerlerde yamaç dengesini(stabilitesini) sağlamak için ya da yapılan kazılar sonucunda oluşturulan şevlerin dengeyi bozacak kadar dik olması halinde şev dengesini sağlamak amacıyla yapılmaktadır [2, 3]. İstinat duvarları ayrıca kısıtlı depolama alanı söz konusu olduğunda fazla miktardaki kömür, maden cevheri ve benzeri malzemeleri tutmak için de kullanılabilir. Genellikle kendi ağırlıkları ile stabilizeyi sağlayabilen istinat duvarlarının kullanım amaçlarına örnekler şekil 1'de gösterilmektedir.

İstinat duvarları, uzun yıllar boyunca genellikle ağırlık ve konsol istinat duvarları olmak üzere iki tipte inşa ediliyordu. Son yıllarda ise teknolojinin hızla gelişmesiyle geosentetik donatı kullanılarak yapılan istinat duvarlarının kullanımı hızla artmaktadır. Geosentetikler ailesinden olan geotekstil ve geogridler, diğer işlevleri yanında özellikle donatı olma özelliklerinden dolayı donatılı zemin uygulamalarının en önemlilerinden olan istinat duvarlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Mekanik olarak stabilize edilmiş zemin (MSE) istinat duvarları klasik betonarme ve beton ağırlık istinat duvarlarıyla karşılaştırıldığında bir çok üstünlüğe sahiptir. MSE istinat duvarlarının en önemli tercih nedenleri esnekliği, temellerde zayıf temel zemini şartlarından oluşan deformasyonları adsorbe etmeleri, klasik tip istinat duvarlarına göre daha ekonomik olmaları ve klasik tip istinat duvarlarının uygulanamadığı yüksekliklerde yapılabilmeleridir.

Bu çalışmada; geoteknik literatürden yararlanarak donatılı zeminlerin geçmişi, uygulama sahaları, Türkiye'deki uygulamaları üzerine geniş bilgiler verildikten sonra MSE duvarlarının projelendirilerek tasarım ve projelendirme ilkelerini tanıtmak, üstünlük ve sakıncalarını ortaya koymak ve etkili olan parametreleri dikkate alarak aynı yükseklik



Şekil 1. İstinat duvarlarının kullanım amaçlarına örnekler ((a) ve (b) yamaç yolları, (c) büyük dolgu gerektiren yollar, (d) büyük yarma gerektiren yollar, (e) zemin tutma, (f) kanal ve eklüzler, (g) taşkın duvarları, (h) köprü kenar ayakları)

ve zemin özelliklerindeki bir betonarme konsol istinat duvarı ile maliyet karşılaştırmalarını yapabilmek amaç olmaktadır. Ayrıca donatılı zemin kullanımının üstünlükleri, sakıncaları ve maliyet kalemleri araştırılarak geniş biçimde sunulmuştur.

1.2. Donatılı Zeminler

1.2.1. Donatılı Zemin Kavramı

Donatılı zemin, zeminin kritik yönleredeki mukavemetini artırmak amacı ile içerisine çekmeye dayanıklı ve zeminle arasında yeterli sürtünmeye sahip metal şeritler veya polimer hammaddelerden üretilmiş geosentetikler yerleştirilerek elde edilen kompozit bir malzeme olarak tanımlanabilir. Donatılı zeminlerin kayma mukavemeti, zeminin özelliklerine bağlı olduğu kadar donatı malzemesi özelliklerine ve donatı yerleşim düzenine de bağlıdır. Bu yüzden donatılı zeminlerin istenilen davranışı sağlayabilmesi için donatı çekme mukavemeti ve donatı-zemin sürtünme katsayısı yeterli büyüklükte olmalıdır. Ayrıca zemin içerisine yerleştirilen donatı elemanlarının, efektif çalışabilmesi için asal çekme birim deformasyonları doğrultusunda olmaları gerekmektedir [4]. Polimer hammaddelerden üretilen geosentetiklerin metal donatılara oranla daha yüksek donatı-zemin sürtünme katsayısına sahip oldukları ve dolayısıyla da zemin uygulamalarında daha etkili oldukları bir seri laboratuvar model deneyi ile gösterilmiştir [5].

Donatılı zemin uygulaması insanoğlunun ilk çağlardan beri başvurduğu zemin iyileştirme yöntemlerinden birisidir. Örneğin; yumuşak zeminler içerisine ağaç dalları, küçük çalılar ve ağır keten kumaşlar gibi çekme mukavemeti yüksek elemanlar yerleştirilerek zeminlerin ıslahına çalışılmıştır. Ancak uygulamalar esnasında pek çok zorlukla karşılaşmıştır. Karşılaşılan zorluklardan bazıları donatı olarak kullanılan malzemenin yumuşak zemin içerisine batması, yumuşak zeminin donatı malzemesinin boşluklarından kabarması ve donatı malzemesinin zamanla çürümesiydi. Zaman içerisinde karşılaşılan tüm bu zorluklar insanları daha dayanıklı ve kullanışlı çözümler üretmeye itmiştir. Örneğin; yaklaşık eşit boyutlardaki ağaç gövdeleri birbirine sıkıca bağlanarak daha etkin çözümler üretilmeye çalışılmıştır. Bu tür çalışmaların geçmişi milattan önce 3000'li yıllara kadar uzanmaktadır [6].

Binlerce yıl boyunca bu tür donatılı zemin uygulamaları devam etmesine rağmen bu alandaki esas gelişme 1960'lı yılların sonlarına doğru gerçekleşmiştir. Bilimsel anlamda donatılı zemin kavramı ilk kez Fransız mühendis Henri Vidal tarafından ortaya atılmış ve

daha sonra birçok bilimsel çalışmaya konu olmuştur [7]. Henri Vidal, Fransa'da bir sahilde dolaşırken küçük kum yığınları içerisine yerleştirilen çam yapraklarının kumun stabilitesini artırdığını fark etmiştir. Bu gözlemi Henri Vidal'da donatılı zemin fikrini oluşturmuştur.

1970'li yılların ortalarında Bob Holtz, geotekstillere metal donatıların yerine zemin içerisinde donatı olarak kullanılmasına yönelik ilk çalışmayı gerçekleştirmiştir [8]. Dokuma türü malzemenin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılması fikri daha önceleri de ortaya atılmış ve denenmiş olsa da 'geosentetik' veya 'geotekstil' olarak adlandırılan malzemenin geliştirilmesi 1960'lı yılların sonlarında gerçekleşmiştir. Bu gelişmeyi etkileyen en önemli faktör; ikinci dünya savaşı sonrasında yüksek teknolojiye ve sentetik hammadde kullanımına yönelen batı tekstil endüstrisinin kapasite fazlalığı yaşaması nedeniyle inşaat sektöründe pazar arayışına başlamasıdır.

1.2.2. Donatı Elemanları

Donatılı zemin uygulamalarında kullanılan donatı elemanlarını başlıca iki gruba ayırarak incelemek mümkündür. Bunlar; metal elemanlar ve polimer (geosentetik) elemanlardır.

1.2.2.1. Geosentetikler

Geosentetikler; sentetik malzemelerden üretildiklerinden, daha çok geoteknik mühendislerinin ilgi alanına girmesinden ve genellikle zemin ile ilgili işlerde kullanılıyor olmasından dolayı bu adı almaktadır. Geosentetik malzemelerin gerek uygulama alanları gerekse kullanım miktarı her geçen gün hızla artmaktadır. 1970'de sadece beş veya altı çeşit geosentetik ürünü varken, bugün dünyada 600'den fazla geosentetik ürünü bulunmakta ve satılmaktadır [9]. Başlıca geosentetik türleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Geotekstillere
- Geogridler
- Geomembranlar
- Geokompozitler
- Geonetler.

1.2.2.1.1. Geotekstiller

Geotekstiller, ASTM D 4833'e [10] göre 'proje, yapı veya sistemin bir parçası olarak temel elemanı, zemin, kaya ve toprakla veya geoteknik mühendisliği ile ilgili herhangi bir malzeme ile beraber kullanılan geçirimli bir tekstil ürünü' olarak tanımlanmaktadır. Genel anlamda geotekstil, fabrikada belirli bir standartta üretilmiş, çekme dayanımı yüksek polimer malzemedir. Sentetik lifler kullanılarak üretildiklerinden biyolojik çürüme bir sorun olmamaktadır. Geotekstillerin yapımında kullanılan polimerler ve bunların karşılaştırmalı özellikleri tablo 1'de ayrıntılı olarak verilmektedir.

Tablo 1. Geotekstil yapımında kullanılan polimerler ve karşılaştırmalı özellikleri [11].

POLİMER GRUBU		Poliester	Poliamid	Polipropilen	Poliçiftilen
DAYANIM		Yüksek	Orta	Düşük	Düşük
ELASTİSİTE MODÜLÜ		Yüksek	Orta	Düşük	Düşük
KOPMADA UZAMA		Orta	Orta	Yüksek	Yüksek
SÜNME		Düşük	Orta	Yüksek	Yüksek
BİRİM AĞIRLIK		Yüksek	Orta	Düşük	Düşük
MALİYET		Yüksek	Orta	Düşük	Düşük
ÇEVRE ŞARTLARINA DAYANIM					
ALKALİ		Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek
MİKRO ORGANİZMA VB.		Orta	Orta	Orta	Yüksek
FUEL OİL		Orta	Orta	Düşük	Düşük
DETERJAN		Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
U.V. IŞIĞI	Stabilize	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
	Stabilize olmayan	Yüksek	Orta	Orta	Düşük

Tablodan görülebileceği gibi bu polimerlerin çoğu hidrokarbon ürünüdür. Bunlardan ucuz olan polipropilen diğerleri de sıklıkla kullanılmasına rağmen en fazla kullanılan hammaddedir [12 ,13]. İkinci olarak en çok kullanılan polimer olan poliester ise ph değeri yüksek alkali maddelere karşı daha az olan dayanımı dışında olumlu özelliklere sahiptir. Geotekstillerin özelliklerini kullanılan esas hammaddelerin yanı sıra kullanılan katkı

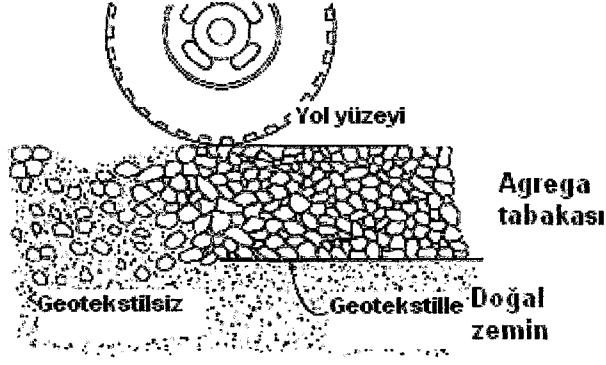
malzemeleri ve imalat yöntemleri de önemli ölçüde etkilemektedir. Yani geotekstiller üretim yöntemlerine göre farklı görünüme ve mühendislik özelliklerine sahiptirler [14].

Geotekstiller, örgülü ve örgüsüz olmak üzere iki tiptir. Bunlardan örgülü olanları tıpkı dokunmuş kumaş gibi olan malzemelerdir. Örgüsüz tipler ise mekanik (iğneleme), fiziksel (ısı) ve kimyasal yöntemlerle dokumasız olarak imal edilen ve tıpkı keçe gibi olan malzemelerdir. Örgülü tipler ilk çıkan tipler olup geotekstillerde esas gelişme örgüsüz tiplerin ortaya çıkışı ile olmuştur ve halen pazar payının önemli bir kısmını örgüsüz tipler oluşturmaktadır.

Geoteknik uygulamalarında geotekstil genellikle aşağıda sıralanan işlevlerden biri esas olmak üzere birkaç işlevi bir arada yerine getirmektedir. Geotekstillerin yerine getirdiği başlıca işlevler şunlardır:

- Ayırma
- Filtrasyon
- Drenaj
- Güçlendirme (Donatı)
- Koruma
- Yalıtım

'Ayırma' işlevi, özellikle farklı iki zeminin, çoğunlukla agrega ve kilin karışmasını önleme fonksiyonudur. Burada kullanılan geotekstil kil ile agrega daneleri arasında sentetik esnek bir bariyer oluşturmakta ve agrega danelerinin yumuşak zemin içerisine batmasına engel olmaktadır. Geotekstil yumuşak zemine dolgudan dolayı gelen yüklerin bir kısmını alıp yükü üniform olarak dağıttığından dolayı oturmalar üniform olur. Bunun sonucunda daha az oturma meydana gelerek dolgunun stabilitesi artar. Ancak geotekstil zeminin doğal sıkışabilirliğini değiştirmez [15]. Organik zemin üzerine yapılan dolgularda, zemin üzerine serilen geotekstillerin esas olarak yatay hareketleri azalttığı ve düşeyde meydana gelen hareketleri çok az etkilediği görülmüştür [16]. Bu yüzden geotekstil kullanmak dahi yumuşak zemin üzerine yapılan dolguların yapacağı büyük konsolidasyon oturmalarını engelleyemez. Şekil 2'de geotekstillerin ayırıcı olarak kullanılmasına bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 2. Geotekstillerin ayırıcı olarak kullanılması [17].

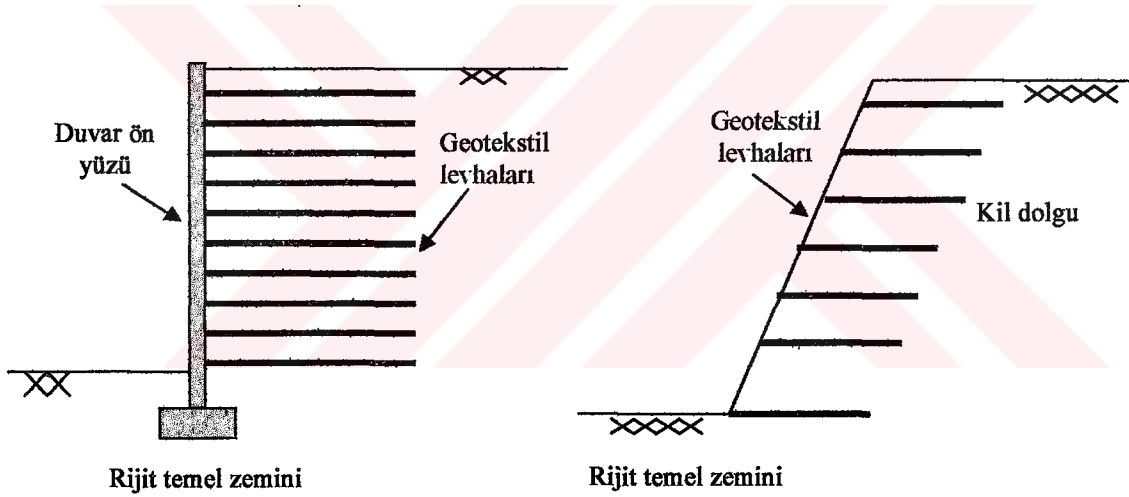
'Filtrasyon' işlevi, geotekstilin suyun geçişini sağlarken küçük parçaların taşınmasını engelleyerek ince daneli zeminlerde borulanmayı önleme fonksiyonudur. Filtrasyon işlevinde kullanılacak geotekstilin uygun maksimum gözenek açıklığına, yeterli su geçirgenliğine sahip olması, sıkışmadan az etkilenmesi ve yüksek poroziteye sahip olması istenmektedir. Geotekstillerin filtre dizaynı için; zemin partiküllerinin geotekstil tarafından tutulması (filtre kriteri), yer altı suyunun rahatlıkla geçirilmesi (permeabilite kriteri), dren yapısının ömrü boyunca hizmet etmesi (tıkanma direnci kriteri) göz önüne alınmalıdır. Ayrıca su akışına engel olmamak ve boşluk suyu basıncı oluşumunu önlemek için geotekstilin geçirgenliği en az zeminin geçirgenliği kadar olmalıdır.

'Drenaj' işlevi, geotekstilin düzlemi içerisinde gaz ve sıvı (su) akımını sağlamasıdır. Geotekstillere yapılan drenajlar uygulaması kolay ve ekonomiktirler. Örgülü ve ısı ile birleştirilen geotekstil türleri ince olmaları nedeniyle drenaj amaçlı kullanılmamaktadırlar. Diğer taraftan mekanik (iğneleme) yol ile üretilen kalın örgüsüz geotekstillere yapılarında geniş boşlukların bulunması nedeniyle drenaj açısından oldukça kullanışlıdırlar. İyi bir drenaj fonksiyonu için geotekstilin kendi düzleminde yüksek geçirgenlik, basınca karşı yüksek dayanım ve iyi bir filtre özelliğine sahip olması gerekmektedir. Geçirgenliği yüksek olan geotekstil, suyun geçişini kolaylaştırır ve ince zemin daneciklerini tutarak zamanla drenin tıkanmasını önler. Yapılan deneyler geotekstilin ince danecikler tarafından tıkanma oranının geotekstil ve zemin özelliklerine bağlı olduğunu göstermiştir [18].

'Güçlendirme' işlevi, zemin içerisindeki geotekstilin zeminde oluşan çekme gerilmelerine karşı zeminin çekme mukavemetini artırma işlevidir. Geotekstillere çekme dayanımı oldukça yüksek olan malzemelerdirler. Bu nedenle zemin gibi çekme dayanımı zayıf bir malzeme ile birlikte kullanıldığı zaman zeminin dayanımını önemli ölçüde arttırabilmektedirler. Geotekstillere bu tür uygulamalarda zemin içerisinde bir nevi donatı

görevi görmektedirler. Yani toprak yapılarındaki zemin-geotekstil ilişkisi, betonarme yapılardaki beton-çelik ilişkisine benzemektedir. Betonarmede çekme gerilmelerini çelik karşılarken, zeminde ise bu görevi geotekstillere yerine getirmektedir. Geotekstillerin mukavemeti, zemin içerisindeki dengeyi oluşturmak için gerekli olan çekme kuvvetini sağlayacak kadar yüksek olmalıdır [19].

Donatı olarak geotekstilin, mukavemeti dışında rijitliği ve zemin ile etkileşimi de önemlidir. Donatının rijitliği zemin içinde dengeyi oluşturmak için gerekli olan kuvveti mobilize etmek için yeterli büyüklükte olmalıdır. Bu kuvvet mobilize olurken oluşan çekme deformasyonu zeminin izin verilebilir deformasyonuna uygun olmalıdır. Zemin ile geotekstilin etkileşimi de geotekstilde oluşan kuvveti zemine aktarabilecek kadar iyi olmalıdır. Bu etkileşim zemin ile geotekstil arasındaki sürtünme kuvvetinden oluşmaktadır. Geotekstillerin güçlendirme ve donatı amaçlı kullanımına ait uygulamalar şekil 3'de gösterilmektedir.

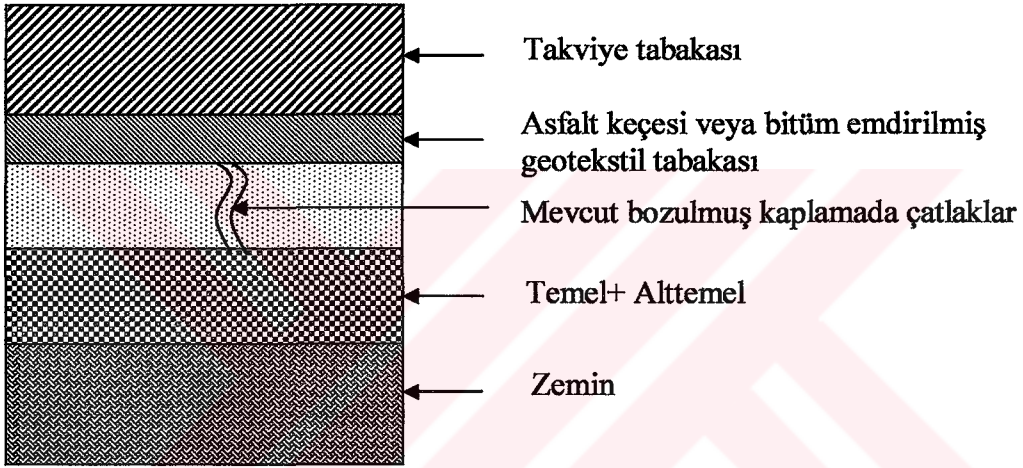


Şekil 3. Geotekstillerin donatı ve güçlendirme amaçlı kullanımı

'Koruma' işlevi, geotekstilin deformasyonu ve gerilmeyi azaltarak veya yayarak malzemenin tahribatını önleme işlevidir. Nehir ve kanal kıyılarındaki, dalga etkisiyle değişime maruz kalması sonucu kıyı stabilitesi, kanal akışı veya su trafiği için ciddi sorunlar doğmaktadır. Geotekstillere bu tahribatı önleyerek uzun süreli kullanım ve bakım maliyetlerinde düşüş sağlamaktadır. Ayrıca büyük göletlerin, çöp toplama alanlarının yapımı gibi su geçirmezliği istenen yüzeylerde kullanılan geomembran malzemeler, iki geotekstil arasında sıkıştırılarak koruma altına alınmaktadır. Bitümlenerek su geçirmezlik kazandırılmış yüzeylere gerek açıkta gerek toprak altında fiziksel hasar görmemeleri için geotekstil serilmekte veya sarılmaktadır. Deniz suyu ve diğer etkenler nedeniyle aşınmaya

maruz kalacak kazıkların çevresine de geotekstil bir ceket gibi giydirilip sarılarak kazıklar bu etkenden korunmaktadır.

'Yalıtım' işlevi, geotekstillere bitümlü malzeme emdirilerek özellikle yeni kaplama yapılacak eski kaplamaların üzerine serilmekte kullanılır. Yollarda aşınma tabakasının iyileştirilmesi için asfalt kaplamaların üzerine takviye tabakaları yapılır. Ancak eski kaplamadaki çatlaklar kısa bir süre sonra takviye tabakasında da oluşacağından mevcut bozulmuş kaplama ile takviye tabakası arasına bitüm emdirilmiş geotekstiller yalıtım işlevi görmek üzere yerleştirilerek bu sorun giderilmektedir. Şekil 4'de takviye tabakalarında geotekstil uygulamasına bir örnek gösterilmektedir.

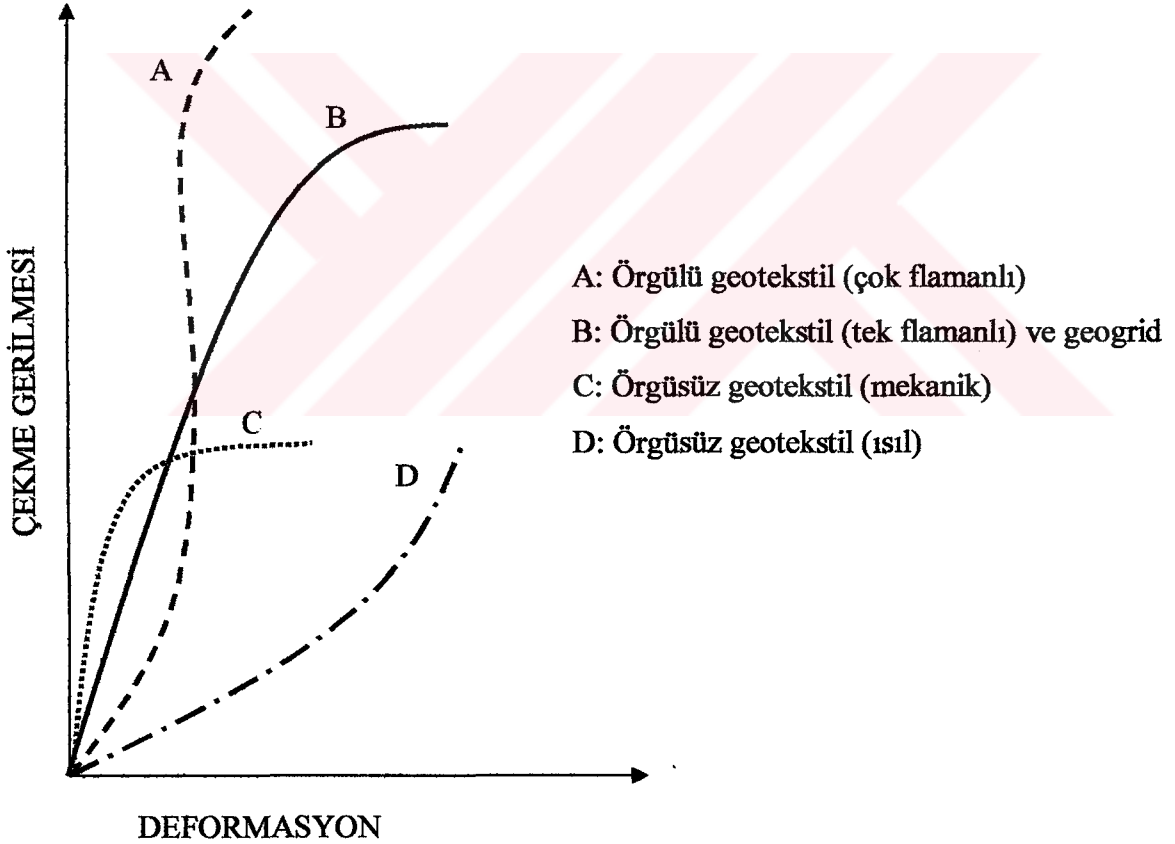


Şekil 4. Takviye tabakalarında geotekstil uygulaması

Uygulamada kullanılacak geotekstil tipinin seçiminde geotekstilin yerine getireceği işlevin büyük önemi vardır. Uygun geotekstil tipinin belirlenebilmesi amacıyla üretici firmalar geotekstillerin mühendislik özelliklerini tanımlamaktadırlar. Çekme dayanımı, gerilme-deformasyon özellikleri, sünme, delinme dayanımı, yırtılma dayanımı, patlama dayanımı, zemin-geotekstil arası sürtünme özellikleri gibi mekanik özellikler ile geçirgenlik, gözenek boyutu gibi hidrolik özellikler geotekstillerin mühendislik özellikleridir. Geotekstillerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla çekme, delinme, yırtılma ve patlama deneyleri yapılmaktadır. Bu deneyler genellikle geotekstillerin yerleştirme esnasında maruz kalacağı yüklere karşı olan dayanımını belirlemek amacıyla yapılmaktadır.

Geotekstillerin çekme dayanımını belirlemek amacıyla üç farklı çekme deneyi geliştirilmiştir. Bunlar, dar mesnetli çekme deneyi, dar numune çekme deneyi ve geniş

numune çekme deneyleridir. Dar mesnetli çekme deneyi; kalite kontrolü ve aynı türden geotekstillerin karşılaştırılması amacıyla yapılır. Özellikle serilme işlevi sırasında geotekstilin agrega uçları arasında gerilmesi durumunu modellemek için uygundur. Dar numune çekme deneyi, tasarımda kullanılacak çekme dayanımını belirlemede kullanılmaktadır. Ayrıca geotekstilin bir süre kullanıldıktan sonra özelliklerinin bozulup bozulmadığını belirlemek için de uygun olduğundan çevre şartlarına olan dayanımın belirlenmesi amacıyla da kullanılabilir. Geniş numune çekme deneyi, geotekstilin tasarım çekme dayanımı ve gerilme-deformasyon ilişkisinin bulunması için en uygun deney olmaktadır. Şekil 5’de farklı geotekstil tipleri için lineer olmayan çekme gerilmesi deformasyon (uzama) eğrileri verilmektedir. Burada çekme gerilmesi, geotekstilin kalınlığını hesaba katmamak için ‘kuvvet /genişlik’ (kN/m) olarak ifade edilmektedir.



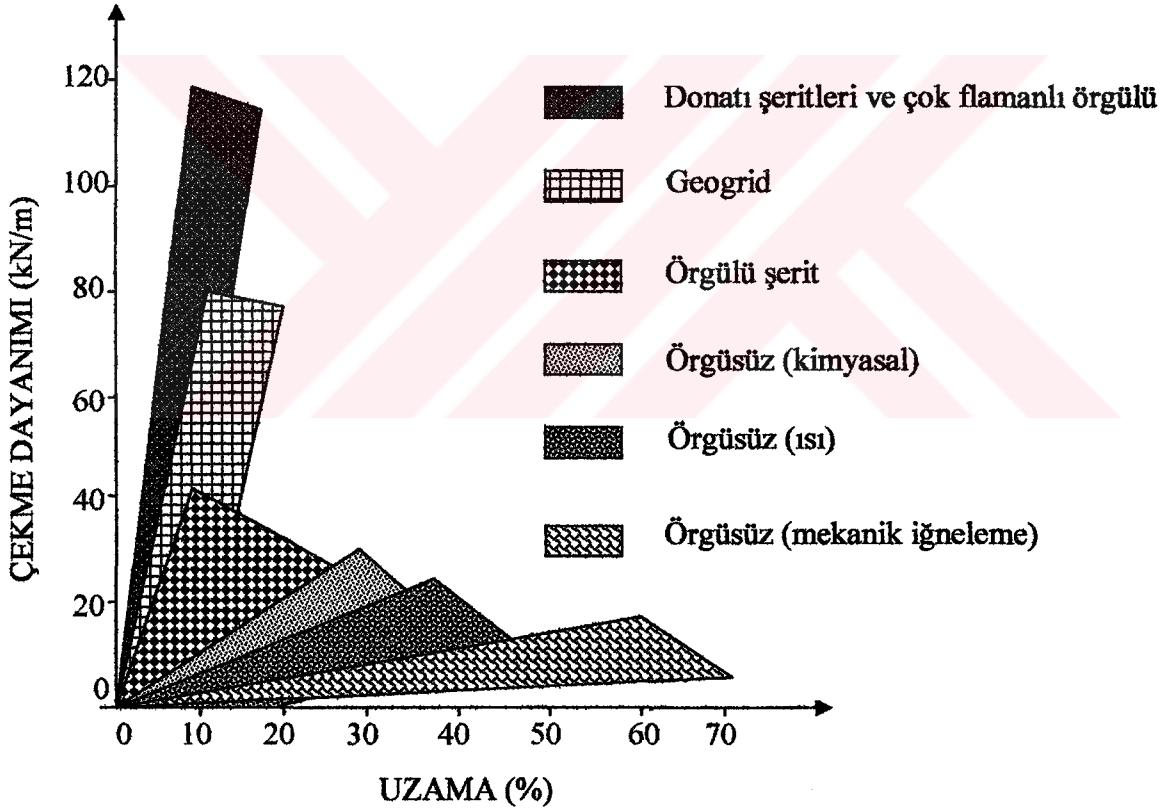
Şekil 5. Farklı geotekstil tipleri için çekme gerilmesi-deformasyon ilişkileri [20].

Şekil 6’da da farklı geotekstil türlerinin çekme dayanımlarının karşılaştırılması verilmektedir.

Delinme dayanımı deneyi, geotekstilin statik bir ortamda kaya ve dal gibi nesnelere karşı olan dayanımını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Delinme dayanımı çekme dayanımı ile doğru orantılıdır.

Yırtılma dayanımı deneyi, geotekstilin meydana gelen bir yırtığın uzamasına karşı olan direncini belirlemek için yapılmaktadır. Geotekstiller özellikle serilme aşamasında yırtmaya zorlayan gerilmelere maruz kalmaktadırlar.

Patlama dayanımı deneyi, geotekstilin patlamaya karşı olan direncini belirlemek için yapılmaktadır. Gerilmelerin etkisiyle geotekstilde belirli bir limit değere kadar deformasyonlar devam etmekte, ancak bu değer aşıldığı zaman geotekstilde patlama meydana gelmektedir. Patlama direnci geçirimsiz bir geomembran üzerine geotekstil yerleştirilip hidrolik basınç uygulanarak ölçülmektedir.



Şekil 6. Farklı geotekstil türlerinin çekme dayanımlarının karşılaştırılması [21].

1.2.2.1.1.1. Geotekstillerin Uygulama Alanları

Günümüzde inşaat mühendisliği uygulamalarında geotekstiller farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Geotekstiller bu uygulamalarda yerine getirdikleri birincil işlevler yanında bir takım ikincil işlevleri de yerine getirmektedirler. Tablo 2’de geotekstillerin yaygın uygulama alanları ve bu uygulamalardaki birincil ve ikincil işlevleri verilmektedir.

Tablo 2. Geotekstillerin uygulama alanlarındaki birincil ve ikincil işlevleri [11].

İŞLEV UYGULAMA ALANI	AYIRMA	FİLTREASYON	DRENAJ	GÜÇLENDİRME	KORUMA	YALITIM
	KAPLAMASIZ YOLLAR	1	2	2	2	
KAPLAMALI YOL. UÇUŞ PİSTİ	1	2	2	2		
YOL DOLGULARI ALTINDA DRENAJ ŞİLTESİ	1	2	2	2		
SPOR SAHALARI	1	2	2			
KAPILARİTE ŞİLTESİ	1	2				
ASFALT-BETON TAKVIYE TABAKASI				2		1
DEMİRYOLLARI	1	1	2	2		
DRENAJ SİSTEMLERİ	2	1	2			
ŞEV YÜZEYİ KORUMASI	2	1	2			
NEHİR, GÖL VE DENİZ KIYI KORUMASI	2	1	2			
KÖPRÜ AYAKLARI OYULMA PROBLEMİ	2	1	2			
DONATILI ZEMİN DUVARLAR				1		
DONATILI ŞEVLER				1		
YOL DOLGULARI				1		
DONATILI DOLGULAR				1		
KAZIKLI SİSTEMLE TAŞINAN DOLGULAR				1		
ESNEK KALIP		1	2	2		
GEOMEMBRANLARLA BİRLİKTE			1		1	

1 : BİRİNCİL İŞLEV

2 : İKİNCİL İŞLEV

Kaplamasız yollar geotekstillerin en eski ve en sık kullanıldıkları alanlardır. Yumuşak zeminler üzerine yapılan kaplamasız yollarda özellikle yağışlı havalarda tekrarlı yük etkisi altında zeminde yerel göçmeler meydana gelebilir. Bu durumda agrega

tabakasının yumuşak zemine karışması veya batması ile yük dağıtıcı agraga tabakasının kalınlığı azalır. Bu durumda bakım yapılarak belirli aralıklarla agraga serilmesi veya agraga tabakasının daha kalın teşkili gibi çözümler ekonomik olmamaktadır. Benzer şekilde temel zemininin kohezyonsuz veya silt gibi az kohezyonlu suya doymun bir zemin olduğu durumlarda tekrarlı yük etkisi altında boşluk suyu basınçlarında artışlar meydana gelebilir ve bu da zeminin kısmi sıvılaşmasına neden olabilir. Kaplamasız yollarda geotekstil kullanıldığında yumuşak zemin ile agraga tabakası arasında serilen geotekstil agraga ile yumuşak zeminin karışmasını önler. Bu tür uygulamalarda geotekstil, filtrasyon işlevi de görerek dinamik tekerlek yüklerinin neden olduğu boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesini sağlar.

Kaplamalı yol ve uçuş pisti uygulamalarında alt temel ve drenaj tabakaları arasında yerleştirilen geotekstiller granüler malzeme ile yumuşak temel zemininin karışmasını engellemek amacıyla kullanılırlar. Kaplamalı yollarda geosentetik (geotekstil veya geogrid) malzemeler ayırma işlevi yanında yol kaplamasının kayma mukavemetinde, taşıma gücünde ve taban çekme mukavemetinde artışlar sağlayarak donatı görevi de görmektedir. Bunlara ilaveten zeminde aşırı su içeriğinden dolayı oluşan boşluk suyu basınçları geosentetik malzemenin dren yapabilmesi sonucu sönümlenmekte ve konsolidasyon sırasında zamanla mukavemet kazanabilmektedir.

Geotekstiller, demiryollarında da karayollarındaki gibi farklı tabakalar arasında ayırma ve filtrasyon amaçlı, balast yenileme ve güçlendirme uygulamalarında ayırma ve donatı amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra geotekstillerin demiryollarında drenaj amaçlı kullanıldığı uygulamalarda vardır.

Geotekstiller (veya geogridler), taşıma kapasitesi düşük yumuşak ve sıkışabilir zeminler üzerine oturan temellerde veya zayıf zemin koşullarının mevcut olduğu ortamlarda da kullanılmaktadır. Çünkü bu alanlara yapı inşa etmek için iyileştirme yapmak gereklidir. Bu durumda temel zemini içerisine çekme dayanımı yüksek donatı malzemeleri yerleştirmek suretiyle zeminin taşıma kapasitesi artırılabilir. Bu konuda önceki yıllarda yapılan çalışmalarda, temel zemini içerisine çekmeye dayanıklı ve yeterli sürtünmeye sahip farklı donatı malzemeleri yerleştirilmek suretiyle zeminin taşıma kapasitesinin ve oturma davranışının önemli ölçüde iyileştirilebileceği belirtilmiştir [22, 23, 24, 25, 26]. Ayrıca yapılan bazı deneysel çalışmalarda temeller altına serilen geotekstilin temel taşıma kapasitesini ancak bir miktar oturmanın gerçekleşmesinin ardından artırmaya başladığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, zemin-geotekstil etkileşiminin gerçekleşmesi ve

geotekstilin zemini güçlendirici bir donatı özelliği gösterebilmesi için deformasyonların gerçekleşmesine ihtiyaç duyulmasıdır.

1.2.2.1.2. Geogridler

Geogrid, geoteknik mühendisliği alanında kullanılan ve yüzeyi gözenekli olan sentetik ürünlere verilen addır. Bu tür polimer malzemeler geoteknik mühendisliği uygulamalarında yaklaşık 35 yıldır kullanılmaktadır. Geogridler farklı yöntemlerle üretilirler [12, 13]. Geogridlerin hammaddesini oluşturan başlıca polimer malzemeler polipropilen ve yüksek yoğunluklu polietilendir.

Üretimin ilk aşamasında yaprak formunda olan malzeme üzerinde ilk olarak delikler açılır ve daha sonra bir veya iki yönde germe işlemi yapılır. Germe işlemi belirli bir sıcaklıkta ve kontrollü olarak gerçekleştirilir. Malzemenin kopmamasına ve moleküllerin izotropik olarak yayılmasına özen gösterilir. Üretimin germe hızının doğru ayarlanması çok önemlidir. Germe işlemi sonucunda dayanımda ve elastisite modülünde bir artış gözlenirken akmaya karşı hassasiyet azalmaktadır [6].

Geogridler, geotekstillerin kullanıldığı alanların hemen hepsinde kullanılmaktadır. Buna göre geogridlerin başlıca kullanım alanları şunlardır:

- Donatılı şevler
- Donatılı zemin istinat yapıları
- Toprak dolgu barajlar
- Karayolu, demiryolu ve havaalanı temelleri
- Kaplamasız yollar
- Donatılı dolgular ve yol dolguları
- Toprak kayması kontrolü
- Drenaj uygulamaları

Geogridler bu uygulamalarda genellikle ayırma, drenaj ve donatı işlevlerini yerine getirmek için kullanılırlar. Zemin danelerinin geogridlerin boşluklarına girmesi ile zemin ve geogrid arasında sıkı bir bağ oluşmakta ve zemin-geogrid etkileşimi güçlenmektedir. Geogridler yüksek çekme dayanımına sahip malzemeler olmaları ve zeminle iyi bir bağ oluşturmaları nedeniyle donatılı zemin uygulamalarında oldukça sık kullanılmaktadırlar. Günümüzde farklı uygulamalar için farklı tipte üretilmiş geogrid malzemeler bulunmaktadır. Geogridlerde de geotekstillerde olduğu gibi uygun geogrid tipinin

belirlenmesi için üretici firmaların geogridin mühendislik özelliklerini tanımlaması gerekmektedir. Bu özelliklerin belirlenmesinde geotekstiller için kullanılan deney yöntemleri geogridler için de kullanılmaktadır.

1.2.2.1.3. Geomembranlar

Geomembranlar su veya buhar geçirmeyen (çok az geçirimli), genellikle ince polimer esnek tabakalardan oluşan geosentetiklerdir. Geomembranlar için kullanılan polimer malzeme türleri termoplastik veya termoset olabilmektedir [27]. Önceleri paketleme işlerinde kullanılan geomembranlar 1930'lu yılların sonlarına doğru geoteknik mühendisliği uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır. Geomembranlar geotekstillere ve zemine oranla çok daha az geçirimli olduklarından su tutucu bariyer olarak veya zararlı sıvıların zemin suyuna karışmasını önlemek amacıyla kullanılmaktadırlar. Şekil 7'de bir dolgu için basit bir geomembran kaplama sistemi en kesiti görülmektedir.

Geomembranların büyük bir kısmı polimer esaslı termoplastik malzemelerdir ve fabrikalarda çeşitli üretim aşamalarından geçtikten sonra uygulamaya hazır olarak pazarlanmaktadır. Bazıları ise uygulama alanında geotekstillere bitüm emdirilerek yerinde üretilmektedir. Geomembranların kullanılmasında en önemli işlem ek yerlerinin oluşturulmasıdır. Bu eklerde başarılı olunamazsa membranın esas görevi olan geçirimsizlik sağlanamaz. Geomembranlar başlıca;

- Su toplama haznelerinde
- Asfalt yol kaplamaları altında
- Esnek kalıp oluşturulmasında
- Katı atık depolama sahaları altında
- Yer altı depolama tanklarında
- Su taşıma kanallarında
- Toprak veya kaya dolgu barajlarda şev yüzlerinde

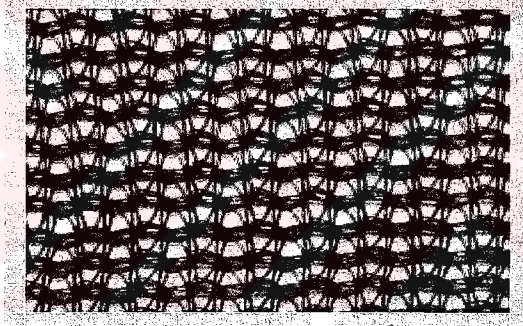
kullanılmaktadır. Geomembranlar, su toplama haznelerinde ve su taşıma kanallarında toplanan ve taşınan suyun sızarak azalmasını önlemek amacıyla, atık depolama sahaları vb. uygulamalarda ise zararlı sıvıların ve radyoaktif maddelerin yeraltına sızarak yer altı suyunu kirletmesine engel olmak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca mevcut yapıların tamirinde, sahil koruma yapılarında ve klasik kalıpların kullanılmasının zor olduğu

1.2.2.1.5. Geonetler

Geosentetikler ailesinin en yeni ürünü geonetlerdir. Geonetler görünüş itibarıyla geogridlere benzemektedir, fakat fonksiyonları itibarıyla geogridlerden ayrılırlar. Geonetler yüksek bir mukavemete sahip olmalarına karşın çoğunlukla drenaj amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bütün geonetler esas madde olarak polietilen kullanılarak üretilmektedir. Geonetler başlıca;

- Spor sahalarının altında
- Don ihtimali olan zeminlerde
- Dayanma yapılarında
- Yapı temelleri altında
- Katı atık dolgu şevlerinde

kullanılmaktadır. Şekil 8'de tipik bir geonet şekli görülmektedir.



Şekil 8. Tipik bir geonet şekli [28].

1.3. Donatılı Zemin Uygulamaları

İnşaat mühendisliği alanında donatılı zemin uygulamalarında son yıllarda önemli bir artış meydana gelmiştir. Kolay, hızlı, ekonomik çözümler üretilmesine imkan sağlamanın yanında zaman içerisinde bu yöntemle inşa edilen yapıların sergilediği başarılı performans bu yönteme duyulan güveni artırmıştır. Bu etkenlerin yanı sıra farklı donatı malzemelerinin üretilmesi ve yeni tekniklerin geliştirilmesi donatılı zeminlerin uygulama alanlarının da genişlemesine neden olmuştur. Buradan hareketle donatılı zemin uygulamalarının klasik inşaat yöntemlerine göre başlıca üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

- a) Daha estetik yapıların yapımına olanak sağlar.

- b) Daha esnek yapıda olmaları nedeniyle sıkışma potansiyeli yüksek yumuşak zeminler ve göçmeye karşı hassas zeminler ile şevler üzerine doğrudan inşaat yapma olanağı sağlar.
- c) Meydana gelen kompozit yapının statik ve dinamik yüklere karşı dayanımı donatısız zemine göre daha yüksektir.
- d) Donatı malzemesinin yerleştirilmesinin kolay olması nedeniyle inşaat kolaylığı sağlar.
- e) Malzeme ve zamandan tasarruf sağlayarak daha ekonomik yapıların yapılmasına olanak sağlar.

Günümüzde pek çok farklı alanda donatılı zemin uygulamalarına rastlamak mümkündür. Donatılı zeminlerin başlıca uygulama alanları şunlardır:

- a) Donatılı yol dolguları
- b) Donatılı şevler
- c) Köprü kenar ayakları
- d) Donatılı dolgu barajlar
- e) Donatılı zemin istinat yapıları

Bu yaygın uygulama alanlarının yanı sıra bazı özel uygulamalarda da donatılı zemin yöntemi kullanılmaktadır. Örneğin, demiryolu inşaatlarında, endüstriyel silo inşaatlarında, kıyı mühendisliğinde rıhtım, kanal ve dalgakıran inşaatlarında da donatılı zemin uygulamalarına sıkça yer verilmektedir.

Bu çalışmanın temel konusu olması dolayısıyla donatılı zemin istinat yapılarının üzerinde çok ayrıntılı olarak (tasarım ilkeleri, hesap yöntemleri, stabilite analizleri, maliyet analizleri, ekonomik üstünlükleri v.b.)durulacak, diğer uygulama alanları hakkında ise genel bilgiler verilecektir.

1.3.1. Donatılı Yol Dolguları

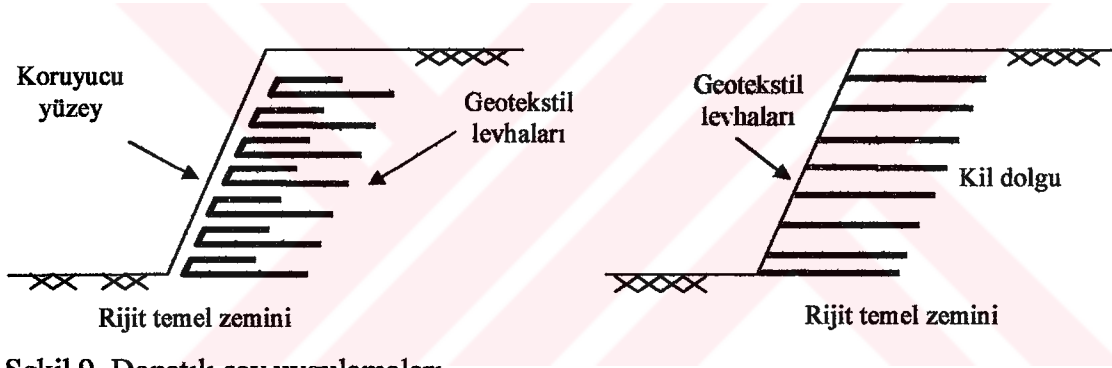
Yol dolgularında donatı kullanılarak dik dolgu şevleri oluşturulabilmektedir ve böylece yeni bir yol inşaatı için ihtiyaç duyulan alan önemli miktarda azalmaktadır. Özellikle şehir içlerindeki mevcut yolların genişletilmesinde inşaat için gerekli alanın dar olması nedeniyle dik şevlerin oluşturulabilmesinin büyük önemi vardır.

Zemin içerisine yerleştirilen donatı dolgu içerisinde oluşan çekme gerilmelerini kendi üzerine almaktadır. Böylece yüksek çekme dayanımına ve sürtünme katsayısına sahip donatı malzemeleri kullanılarak dolgunun çekmeye karşı olan direnci artırılırken dolgu üzerine etkiyen yerel yüklerin de homojen bir şekilde temel zeminine iletilmesi

sağlanmaktadır. Geotekstiller bu tür uygulamalarda donatı görevi yanında ayrıca farklı tabakalar arasında seperasyonu sağlayarak farklı özelliklerdeki temel zemini ile dolgu zemininin karışmasını da önlemektedir.

1.3.2. Donatılı Şevler

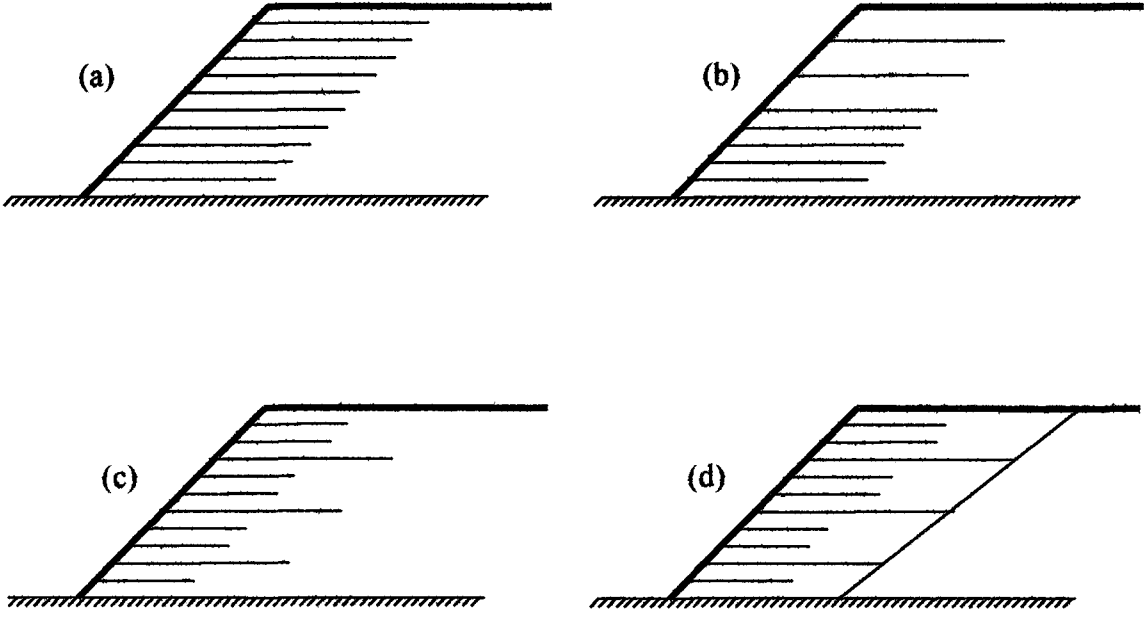
Son yıllarda göçmeye karşı hassas şevlerin stabilizasyonunda ve dik şevlerin teşkilinde donatılı zemin uygulamalarına sıkça rastlamak mümkündür. Şekil 9'da donatılı şev uygulamalarına, şekil 10 'da da geosentetik malzemeler ile şev stabilizasyonunda tabaka teşkiline örnekler gösterilmektedir. Şev yüksekliğine ve açısına oranla zeminin kayma mukavemetinin düşük olduğu şevler göçmeye karşı hassas şevlerdir. Özellikle zeminin izafi sıklığının düşük olduğu granüler zeminlerde ve su muhtevası yüksek kohezyonlu zeminlerde bu tür sorunlarla karşılaşılmaktadır.



Şekil 9. Donatılı şev uygulamaları

Geosentetiklerle donatılı şev teşkilinde şev boyunca zemin içerisine belirli aralıklarla donatı malzemesi yerleştirilmektedir. Yerleştirilen donatı malzemesi kayma yüzeyi boyunca şevin göçmeye karşı stabilitesini artırmaktadır. Özellikle geogridler zemin ile sıkı bir bağ oluşturmaları nedeniyle bu tür uygulamalar açısından çok kullanışlıdır.

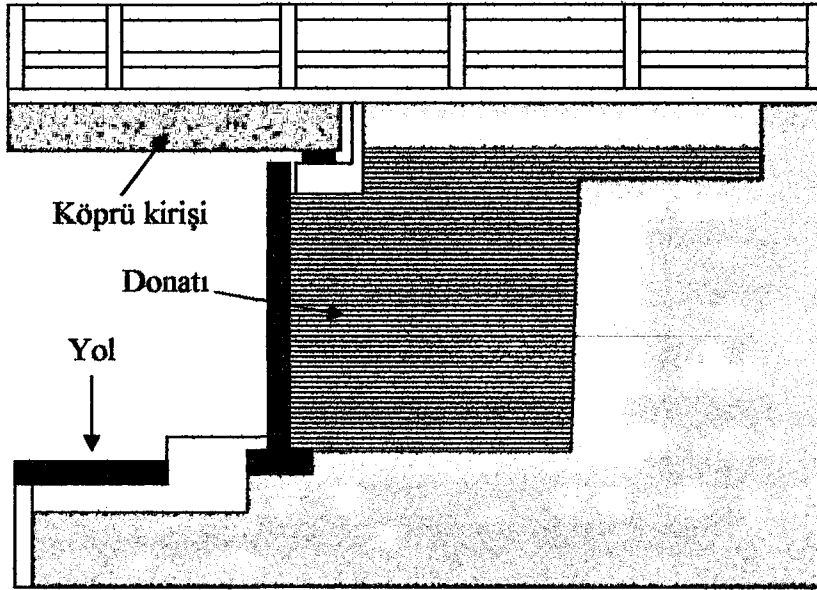
Yapılan çalışmalar donatılı şevlerde meydana gelen oturmaların donatısız şevlere oranla daha az olduğunu göstermiştir. Böylece donatı kullanılarak stabilite artışı sağlanmasının yanı sıra zamanla şev üzerinde oturmalar meydana gelebilecek çukur ve çatlakların oluşması da önlenmiş olmaktadır. Günümüzde gerek mevcut şevlerin göçmesini önlemede gerekse yeni oluşturulacak dik şevlerin teşkilinde donatılı zemin uygulamalarına gidilerek daha ekonomik ve hızlı çözümler elde edilmektedir [6].



Şekil 10. Geosentetik malzemeler ile şev stabilizasyonunda tabaka teşkili ((a) eşit uzunluk ve eşit aralıkta, (b) eşit uzunluk ve farklı aralıkta, (c) eşit uzunluk, eşit aralıkta ve kısa tabakalarla, (d) farklı uzunluk ve eşit aralıkta kısa tabakalarla)

1.3.3. Köprü Kenar Ayakları

Otoyol ve demiryolu köprülerinin kenar ayakları donatılı zemin uygulamalarının yaygın olarak görüldüğü yerlerdir. Köprü kenar ayaklarının genellikle yüksek olmaları nedeniyle bu tür yapılarda ayak duvarlarına gelen yanal yükler oldukça yüksektir. Gerek devrilmeye karşı stabiliteyi artırmak, gerekse kalın duvar kesitlerine ihtiyaç duyulmaması açısından bu yanal yüklerin azaltılması için duvar arkası dolgularda donatılı zemin uygulamasına gidilmektedir. Ayrıca donatılı zemin uygulaması sayesinde yüklerin temel zeminine homojen dağılımı sağlanmakta ve köprü yaklaşım dolgularındaki oturmalar azalmaktadır. Şeki 11'de köprü kenar ayağında donatılı zemin uygulamasına bir örnek verilmektedir.



Şekil 11. Donatılı zemin köprü kenar ayağı

1.3.4. Donatılı Dolgu Barajlar

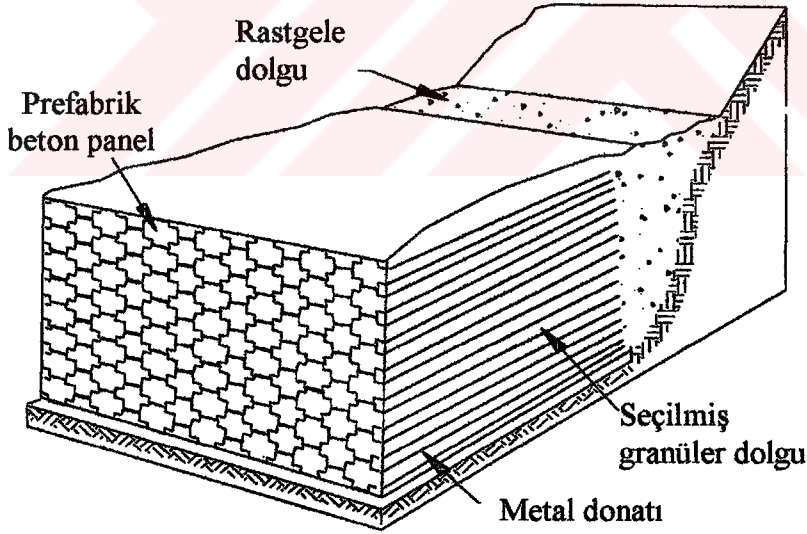
Barajlarda geosentetik malzemelerin kullanımı ile temel olarak filtre kriterlerinin bu malzemeler vasıtasıyla gerçekleştirilmesi, drenaj, geçirimsizliğin sağlanması, dolgu malzemesinin temel mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Buradan hareketle barajlarda filtrasyon ve ayırma amacı ile geotekstiller, güçlendirme amacı ile geogridler ve geçirimsizlik amacı ile de geomembranlar kullanılmaktadır.

Suya karşı bir bariyer olarak düşünülen geomembranlar geçirimsizlik işlevleri ile birçok dolgu ve beton barajlarda uygulama alanı bulmuşlardır. Filtrasyon amaçlı malzeme kullanımında, zemin (kil) ile drenaja açık olan çakıl ve kaya gibi malzeme grupları arasında zemin daneciklerinin yıkanmasının veya borulanmasının kontrol altına alınması amaçlanmaktadır. Kalın ve geçirimli geosentetikler olan geonet ve geokompozitler kendi düzlemi içinde suyun taşınması (drenajı) amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca geomembran gibi diğer geosentetikler arasında kullanılan geotekstiller bir yastık tabakası oluşturarak iki malzeme arasındaki gerilme ve birim şekildeğiştirme transferini sağlamakta, yüksek sürtünme açısı ile kaymaya karşı güvenliği artırmakta ve destek olmaktadır [29].

1.3.5. Donatılı Zemin İstinat Duvarları

İstinat yapıları 1960'lı yılların sonlarına kadar genellikle ağırlık ve konsol istinat yapıları olmak üzere iki tipte inşa ediliyordu. Taş ve betonarme malzemeler kullanılarak inşa edilen bu geleneksel istinat yapıları ağırlıkları ile yanal toprak itkilerine karşı koyarlar. İlerleyen zamanlarda inşaat malzemeleri teknolojisindeki gelişmelerden ötürü yapı mühendisliğinde çok büyük atılımlar olmuştur [30]. 1960'larda Fransız mühendis ve mimar Henri Vidal'ın geliştirdiği donatılı zemin fikri istinat yapıları uygulamalarında bir devrim yaratmış ve bu alanda mevcut uygulama tekniklerinden çok farklı bir yöntemin gelişmesini sağlamıştır.

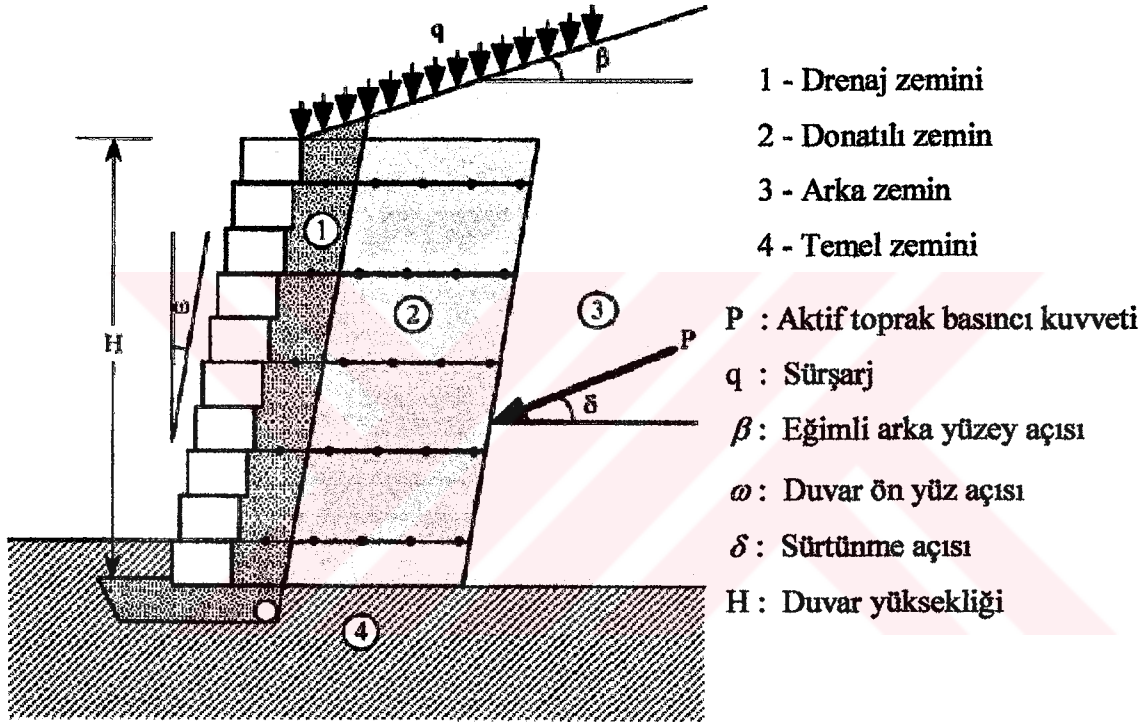
Henri Vidal'ın gerçekleştirdiği ilk donatılı zemin istinat duvarı uygulamasında donatı malzemesi olarak metal şeritler kullanılmıştır. Bu uygulamada duvar yüzeyine yerleştirilen kaplama panelleri arkada seçilmiş granüler dolgu içerisine yerleştirilen metal çubuklara tutturulmuştur. Bu şekilde zemin ile metal şeritler arasında oluşan sürtünme kuvvetiyle yanal toprak itkilerine karşı koymak hedeflenmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Metal donatılı zemin istinat duvarını oluşturan bileşenler [31].

Teknolojinin hızla gelişmesiyle başlangıçtaki metal şeritlerin yerini bugünlerde de oldukça çok kullanılan geotekstiller ve geogridler almıştır [32]. Geogrid veya geotekstillerle donatılmış istinat duvarları (özellikle prefabrik beton blok kaplamalı) büyük bir gelişim periyodu içerisinde. Günümüzde bu tür duvarlardan değişik duvar

yüksekliklerinde yaklaşık 35000 adet bulunmaktadır [33]. Geosentetikler metal çubuklara oranla zeminle daha uyumlu bir davranış sergilemelerinden dolayı ve çekme gerilmelerinin mobilize olabilmesi için çok daha az deformasyona ihtiyaç olması nedeniyle zeminde donatı malzemesi olarak daha kullanışlıdır. Ayrıca uzun süreli performans açısından metal çubuklar korozyon sorunu yaratırken, geosentetikler için böyle bir sorun bulunmamaktadır. En genel durumdaki geosentetik donatılı zemin istinat duvarı elemanları şekil 13’de görülmektedir.



Şekil 13. Geosentetik donatılı zemin istinat duvarını oluşturan elemanlar [33].

1.3.5.1. Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Malzeme Özellikleri

Donatılı zemin istinat duvarının inşaatı için gerekli olan üç temel malzeme vardır.

Bunlar:

- Zemin veya dolgu
- Donatı malzemesi
- Gerekli ise ön yüz kaplama elemanıdır.

1.3.5.1.1. Dolgu

(MSE) istinat duvarlarında kullanılacak dolgu malzemesi dayanım, iyi drenaj, inşa edilebilirlik ve iyi zemin-donatı etkileşimi gibi belirli özellikleri sağlamalıdır. Bu nedenle dolgu olarak kullanılacak malzemenin seçiminde aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir.

- a) Yapının uzun süreli stabilitesi
- b) Yapım sırasında kısa süreli stabilite
- c) Dolgu malzemesinin fizikokimyasal özellikleri [34].

Zemin veya dolgu malzemesinin seçimi, yapının teknik gereksinmelerine ve ekonomik seçeneklere bağlıdır. Genellikle yerli veya atık uygun zemin tercih edilmektedir. Donatılı zemin yapısını oluşturmak için kullanılan zeminin kayma direnci parametreleri gerekli durumlarda iyileştirilebilir.

Zeminde oluşacak hacimsel genişlemeye uyabilecek şekilde sıkıştırılabilen kohezyonsuz dolgu türleri iyi derecelenmiş, kaliteli dolgu olup yüksek içsel sürtünme açısına sahiptir. Kırmataş, nehir kumu ve çakıl örnek olarak verilebilir. Kohezyonsuz dolguların en önemli avantajları serbest drene olabilmeleri ve dona duyarısız olmalarıdır. Bu malzemelerin özellikle drenajlarının iyi olması halinde her tabaka dolgu yerleştirildiğinde donatı ile dolgu malzemesi arasındaki etkili basınç yayılımı derhal gerçekleşmekte ve kesme mukavemetindeki artış düşey yüklemenin gerisinde kalmamaktadır. Donatılı zemin duvarlardaki normal yükleme şartlarında granüler malzemeler elastik malzemeler gibi davranırlar. Bu nedenle çalışma basınçlarına göre projelendirilmiş yapılarda iç sıkışmalar veya oturmalar beklenmemelidir.

Diğer taraftan kohezyonlu dolgular yalnız başlarına tam olarak uygun değildir. Genelde drenaj özellikleri düşüktür ve etkili basınç yayılımı derhal meydana gelmez. Kohezyonlu malzemeler çoğunlukla elastoplastik veya plastik gibi davranarak yapım sonrası hareket ihtimalini artırırlar. Kohezyonlu zeminler donmaya karşı duyarlıdırlar ve bu malzemelerin geçirgenlik özellikleri çok zayıf olduğundan bir geosentetik donatılı zemin istinat duvarı yapısına gelen yatay su basıncı bir hayli yüksek olmaktadır. Öte yandan dolgu malzemesi olarak kohezyonlu zemin türlerinin seçilmesi üzerine son yıllarda yapılan deneysel araştırmalar ve sonlu eleman analizleri bu tür dolguların donatılı zemin yapılarda kullanılabileceğini ancak bunun bazı şartları olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin; arka dolgu drenajına izin vermek için donatı amacıyla gözenekli geotekstil

kullanılırsa, kohezyonlu zeminin kullanılması mümkün olabilmektedir. Bu tür malzemelerin dolgu olarak seçilmesinin en önemli faydası, maliyeti önemli ölçüde düşürmesidir.

TS 7994'e [1] göre granüler dolgunun ağırlıkça %10'unu geçmeyen ince malzeme içermesi ve kayma direnci açısının toplam kesme kutusunda gerilme analizine göre 25° , efektif gerilme analizine göre ise 20° 'den büyük olması gerekmektedir. Kohezyonlu-sürtünmeli dolgu malzemesinde kil yüzdesinin %10'u, likit limitin 45 'i ve plastisite indisinin 20 'yi aşmaması ve her iki tip dolgu için 125mm maksimum dane çapı ve 30° 'lik kayma direnci açısı öngörülmektedir. Dayanımı yüksek donatılarda D_{max} , 250mm'ye yükseltilebilir.

1.3.5.1.2. Donatı Malzemesi

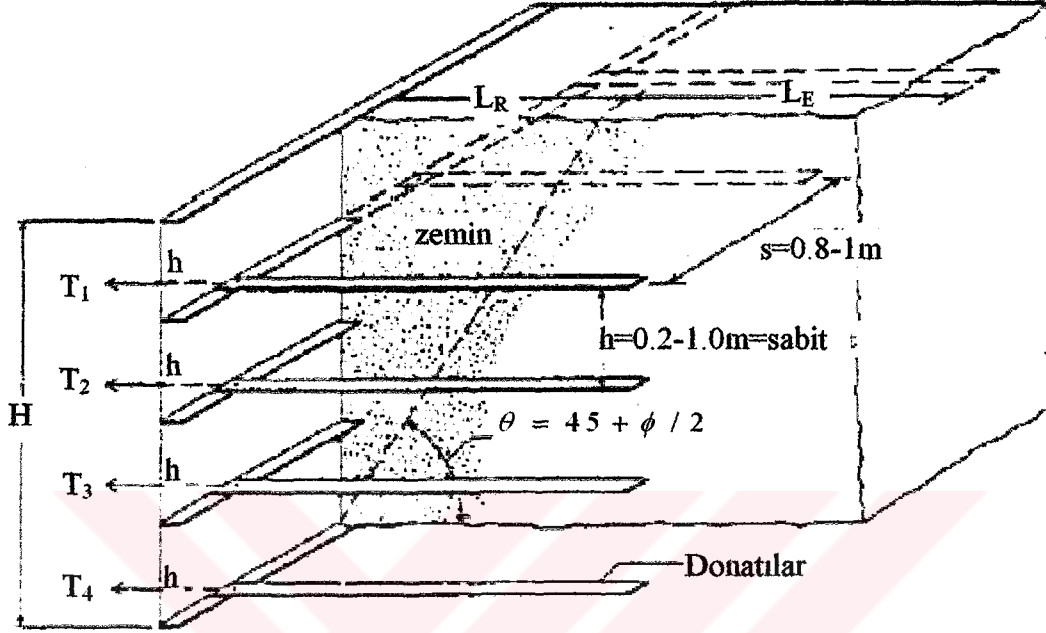
Donatı elemanı olarak çok değişik çeşitte malzemeler kullanılabilmektedir. Donatı elemanları hakkındaki ayrıntılı bilgiler çalışmanın (1.2.2.) kısmında verilmiştir. Donatılar aşağıdaki özellikleri sağlamalıdır:

- Çekmeye karşı yüksek dayanıma sahip olmalıdır.
- Arka dolgu malzemesi ile birlikte yüksek sürtünme katsayısı sağlamalıdır.
- Hareketli yükler altında düşük şekildeğiştirme özelliği sunmalıdır.
- Kolay bir inşa sağlamalıdır.
- Yeteri kadar esnek olmalıdır.
- Ekonomik olmalıdır.

Donatı malzemelerinin tasarımında ara mesafeler çok önemli bir yer tutmaktadır. Yatay ara mesafe, S_h , geosentetik tabakalar için anlamsızdır. Bu malzemeler için uygun düşey ara mesafe, S_v , saptanmaktadır. Düşey ara mesafe genelde 0.2-1.5 m arasında değişebildiği gibi derinlikle de değişmektedir. Yatay şerit ara mesafesi 0.8-1.5 m arasında olabilir. Yanal toprak basıncı yatay ara mesafe ile doğru orantılıdır. Mesafe artarsa donatı sayısı azalır. Böylece donatılara daha çok görev verilmiş olur. Donatı ara mesafesinin tipik dizilimi şekil 14'de verilmektedir.

Düşük ve orta yükseklikli duvarlar ($H < 5$ m) genellikle tek yönde dayanımlı geosentetik ile inşa edilmektedir. Daha yüksek duvarlarda yüksek dayanımlı geosentetikler kullanılır.

Mekanik olarak stabilize edilmiş zeminler veya donatılı zemin şev sistemlerinde donatı geometrisi, gerilme taşıma mekanizması, donatı malzemesi, donatı malzemesinin uzayabilme kabiliyeti, ön yüz elemanları ve birleşimlerinin tipi oldukça önemlidir [35].



Şekil 14. Donatılı zemin duvarlar için donatı ara mesafesinin tipik dizilimi [36].

1.3.5.1.3. Ön Yüz Kaplama Elemanları

Geosentetik donatılı zemin istinat duvarlarında ön yüz kaplamaları hem estetik görünüm hem de erozyon ve ultraviyole ışınlarından korunma amacıyla kullanılmaktadır.

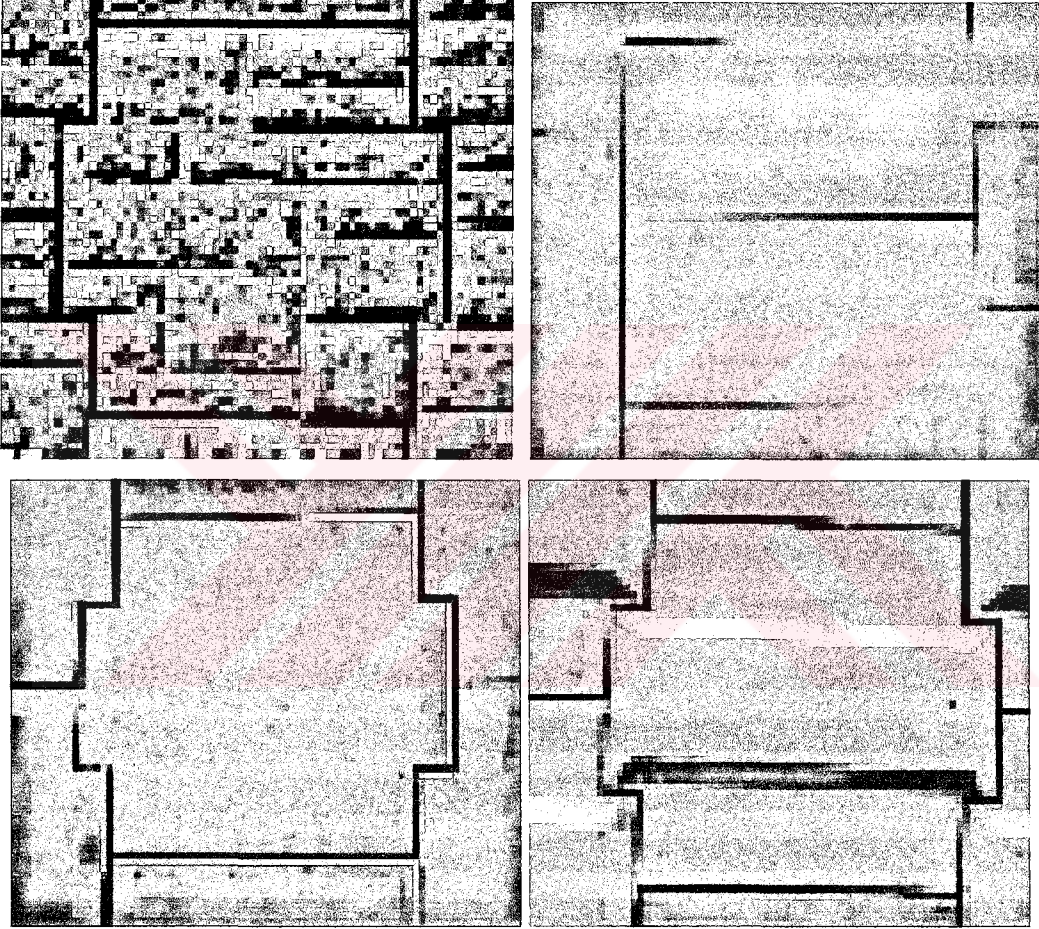
Prefabrik beton paneller, parçalı prefabrik beton paneller, ahşap kaplamalar, yerinde dökme beton paneller, kaynaklanmış tel kafesler, geosentetik ön yüzler ve püskürtme betonlar bu amaçla kullanılmaktadır.

Beton panel elemanlar standart boyutlarda üretilmekte ve kalınlıkları belli değerler arasında değişmektedir. Donatısız betondan imal edilirler. Düşey montaj pimleri paneller arasındaki bağlantıyı sağlamakta ve yatay harekete imkan vermektedir. Yatay basınç ek yerleri, paneller arasına yerleştirilmiş olup kaplamaya düşey şekildeğiştirebilme özelliği vermektedir. Paneller, boyutlarının kurallara uygunluğunu sağlamak üzere kalıplarda prefabrik olarak üretilmektedir.

İstinat duvarlarının önyüzünü oluşturmak için geosentetik ön yüzler de yaygın olarak kullanılmaktadır ve değişik tipteki geotekstil donatı ön yüzde sarılarak oluşturulmaktadır.

Bu durum hem donatıyı ultraviyole ışınlarına karşı korumakta hem de güzel bir görünüş oluşturmaktadır.

Mekanik olarak stabilize edilmiş donatılı zemin sistemlerinde kullanılan yüzey elemanlarının tipi, sistemlerin estetiklerini etkilemektedir. Çünkü bunlar tamamlanmış yapının görünen kısımlarıdır. Yüzey, arka dolguda erozyona karşı koruma sağlamaktadır. Ayrıca yüzey tipi de oturma miktarlarını etkilemektedir.



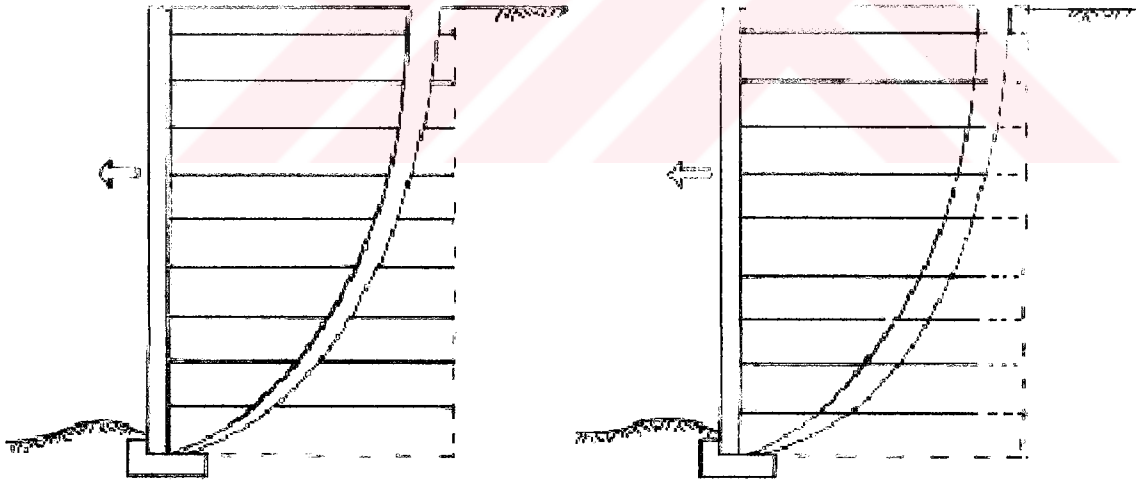
Şekil 15. Değişik şekillerde prefabrik ön yüz kaplama elemanları [37].

1.3.5.2. Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Stabilite Analizleri

Geosentetik donatılı zemin istinat duvarlarının tasarımında, iç ve dış stabilite analizleri yapılarak yapının farklı göçme durumları için yeterli güvenliğe sahip olup olmadığı araştırılmaktadır.

1.3.5.2.1. İç Stabilite Analizleri

İç stabilite analizlerinde, kullanılan geosentetik donatının (geotekstil veya geogrid) kopması veya sıyrılması sonucu göçmenin oluşmaması için gerekli donatı boyu, çekme dayanımı ve donatı aralıkları belirlenmeye çalışılmaktadır. Donatılı zeminlerde donatılara etkiyen çekme gerilmelerinin derinlikle artmasından dolayı donatının kopması alt kısımlarda daha kritiktir. Ayrıca donatının üzerine etkiyen düşey basınç gerilmelerinin de derinlikle artmasından dolayı üst tabakalarda daha az düşey basınç oluşarak donatının sıyrılması üst kısımlarda daha kritik olmaktadır. Şekil 16'da iç stabilite analizlerinde göz önünde bulundurulacak olası göçme mekanizmaları görülmektedir.



a) Donatı kopması sonucu göçme

b) Donatı sıyrılması sonucu göçme

Şekil 16. İç stabilite analizlerinde göz önüne alınacak olası göçme mekanizmaları [38].

Geosentetik donatılı zemin istinat duvarlarında donatılı zemin kütesinin dıştan herhangi bir desteğe ihtiyaç duyulmadan kendi halinde stabil olması istenmektedir. Ayrıca donatılı kesimin arkasındaki donatısız kesimden gelecek yanal toprak itkilerini de güvenli bir şekilde karşılayabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle iç stabilite analizlerinde ilk olarak

duvara etki eden yanal toprak basınçlarını belirlemek gerekmektedir. Klasik yöntemlerle analiz yapılırken genellikle basit bir yaklaşım olarak Rankine teorisinin geçerli olduğu kabul edilmekte ve duvara etkiyen yanal toprak basınçları buradan hareketle hesaplanmaktadır. Buna göre yatay gerilme;

$$\sigma_a = \sigma_v K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (1)$$

Burada; ' σ_a ' yatay gerilme, ' σ_v ' düşey gerilme, ' K_a ' aktif toprak basıncı katsayısı ve ' c ' zeminin kohezyonudur.

Aktif toprak basıncı katsayısının ve düşey gerilmenin değerleri ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$K_a = \tan^2(45 - \phi/2) \quad (2)$$

$$\sigma_v = \gamma z \quad (3)$$

Burada; ' ϕ ' zeminin içsel sürtünme açısı, ' γ ' zeminin birim hacim ağırlığı, ' z ' geosentetik donatının zemin yüzeyine göre derinliğidir.

Yapı üzerine sürşarj yükü ve hareketli yüklerin etkimesi durumunda bu yükler etkisinde oluşacak yanal kuvvetlerin de analizlerde göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Geotekstil veya geogrid donatılı zemin istinat duvarlarına etkiyen yanal toprak basınçlarının derinlikle değişimi ve olası kayma yüzeyinin geometrisi şekil 17'de gösterilmektedir. Bu şekle göre donatılı zemin istinat duvarlarına etkiyen yatay basınç gerilmeleri aşağıda gösterilmektedir. Buna göre yatay basınçlar:

Zemin veya dolgudan dolayı:

$$\sigma_{a(s)} = \gamma z K_a \quad (4)$$

Sürşarjdan dolayı:

$$\sigma_{a(q)} = q K_a \quad (5)$$

$$T_{müs} = T_{nih} / GS_g \quad (8)$$

Burada; ' T_{nih} ' donatının nihai çekme mukavemeti, ' GS_g ' global güvenlik sayısı olup

$$GS_g = GS_i \times GS_c \times GS_{k1} \times GS_b \quad (9)$$

formülüyle hesaplanmaktadır. Bu formülde; ' GS_i ' uygulama sırasında hasar emniyet faktörü, ' GS_c ' kullanım süresinde sünmeyi önlemek için emniyet faktörü, ' GS_{k1} ' kimyasal etkilere karşı emniyet faktörü, ' GS_b ' biyolojik etkilere karşı emniyet faktörüdür. Bu emniyet faktörlerinden biri veya tercihen birkaçı bazen dikkate alınmayabilir. Tüm geosentetik malzemeler zaman içinde bir takım etkiler (kimyasal, biyolojik, ultraviyole gibi) ile özelliklerini kaybetmekte yani durabilitelerinde azalma olmaktadır. Bu nedenle uzun dönemdeki durabilite kayıpları tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Bu emniyet faktörleri geotekstil donatılar için tablo 3'de, geogrid donatılar için tablo 4'de verilmektedir.

Tablo 3. Geotekstil emniyet faktörleri [6].

Kullanım Alanı	GS_i	GS_c	GS_{k1}	GS_b
Kaplamasız yollar	1.1-2.0	1.5-2.5	1.0-1.5	1.0-1.2
Kaplama takviyesi	1.1-1.5	1.0-2.0	1.0-1.5	1.0-1.1
Dolgular	1.1-2.0	2.0-3.5	1.0-1.5	1.0-1.3
Şev stabilizasyonu	1.1-1.5	2.0-3.0	1.0-1.5	1.0-1.3
İstinat duvarları	1.1-2.0	2.0-4.0	1.0-1.5	1.0-1.3
Taşıma gücü	1.1-2.0	2.0-4.0	1.0-1.5	1.0-1.3
Demiryolları	1.5-3.0	1.0-1.5	1.5-2.0	1.0-1.2
Ayırma	1.1-2.5	1.5-2.5	1.0-1.5	1.0-1.2

Tablo 4. Geogrid emniyet faktörleri [6].

Kullanım Alanı	GS_i	GS_c	GS_{k1}	GS_b
Kaplamasız yollar	1.1-1.6	1.5-2.5	1.0-1.5	1.0-1.2
Kaplamalı yollar	1.2-1.5	1.5-2.5	1.0-1.6	1.0-1.2
Dolgular	1.1-1.4	2.0-3.0	1.0-1.4	1.0-1.3
Şevler	1.1-1.4	2.0-3.0	1.0-1.4	1.0-1.3
İstinat duvarları	1.1-1.4	2.0-3.0	1.0-1.4	1.0-1.3
Taşıma gücü	1.2-1.5	2.0-3.0	1.0-1.6	1.0-1.3

Donatı dişey aralıkları yukarıdaki bilgiler ışığında hesaplandıktan sonra donatı malzemesinin uzunluğu aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$L = L_R + L_E \quad (10)$$

Burada; 'L_R' kayma kaması içi boyu (Aktif bölge içerisinde kalan donatı boyu) olup

$$L_R = (H - z) \tan(45 - \phi/2) \quad (11)$$

formülü ile, 'L_E' ankraj bölgesi içerisindeki donatı boyu (efektif boy) olup

$$L_E = \frac{S_v \sigma_a G S_s}{2(c + \gamma z \tan \delta)} \quad (12)$$

formülü ile hesaplanmakta ve minimum uzunluğu 1m olarak alınmaktadır. Bu bağıntılarda; 'H' geosentetik donatılı zemin istinat duvarı yüksekliği, 'z' zemin yüzeyine göre derinlik, 'G S_s' sıyılmaya karşı güvenlik sayısı (genellikle 1.3-1.5 arasında alınır.), 'c' zeminin kohezyonu (granüler malzeme kullanıldığında c=0 olur.), 'γ' zeminin birim hacim ağırlığı, 'δ' zemin ile donatı arasındaki sürtünme aıdır. (bilinmiyorsa $\delta = \frac{2}{3}\phi$ alınır.)

Kıvrım boyu veya bindirme uzunluğu da;

$$L_o = \frac{S_v \sigma_a G S_s}{4(c + \gamma z \tan \delta)} \quad (13)$$

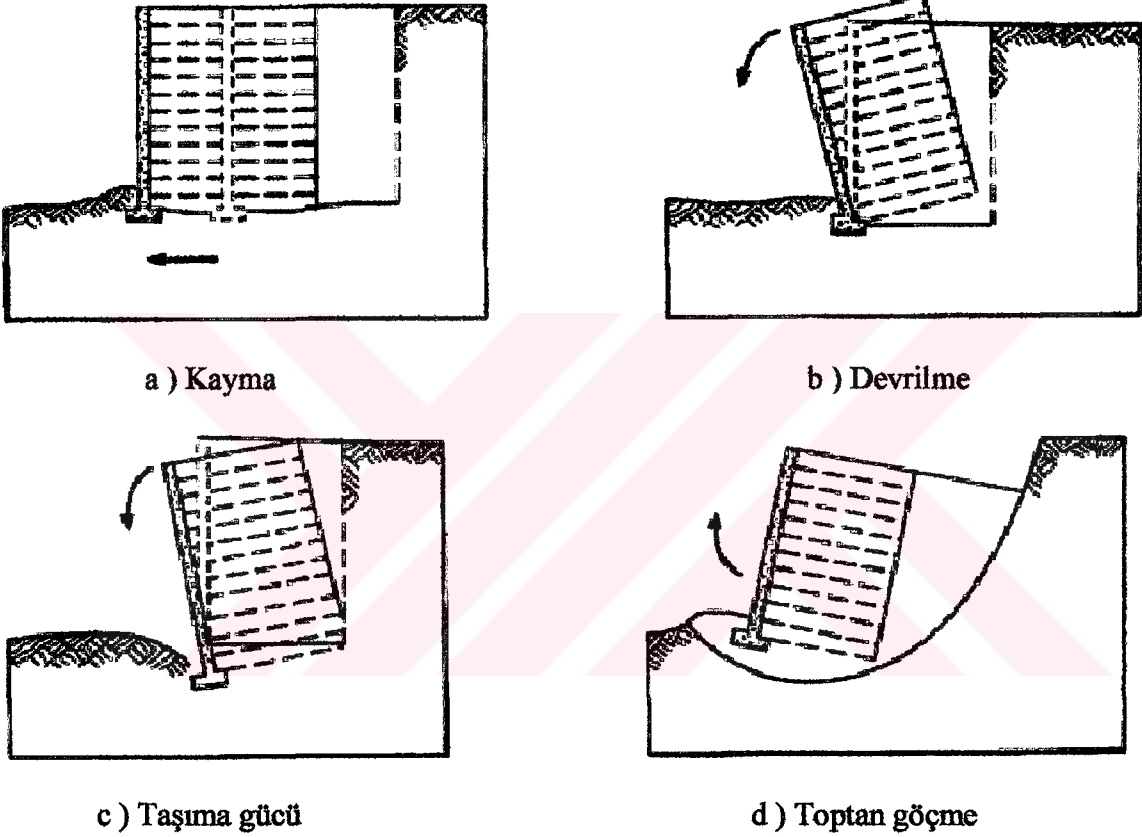
formülü ile hesaplanmakta ve minimum uzunluğu 1m olarak alınmaktadır.

Yukarıdaki eşitlikler yardımı ile her tabaka için gerekli donatı boyları hesaplanmaktadır. Hesaplar sonucu her tabaka için farklı donatı boyları bulunmakla birlikte uygulamada genellikle her tabaka için eşit boyda donatı kullanılmakta ve hesaplanan en uzun donatı boyu seçilerek tasarım yapılmaktadır.

1.3.5.2.2. Diř Stabilit Analizleri

Geosentetik donatılı zemin istinat duvarlarının i stabilit analizi yapıldıktan sonra diş stabilit analizleri de yapılarak yapının bir bütün olarak dengesi araştırılmaktadır. Diř

stabilite analizlerinde klasik istinat duvarlarında olduğu gibi devrilme, kayma ve taban basıncı denetimleri yapılmaktadır. Ayrıca gerekirse genel şev stabilitesi analizleri yapılarak donatılı kesim dışından ve donatılı kesimden geçen bir çok farklı göçme yüzeyi incelenerek bunlardan en kritik olanına göre göçmeye karşı güvenlik belirlenmeye çalışılmaktadır. Şekil 18’de dış stabilite analizlerinde göz önünde bulundurulacak olası göçme mekanizmaları gösterilmektedir.



Şekil 18. Dış stabilite analizlerinde göz önüne alınacak olası göçme mekanizmaları [39].

Dış stabilite analizlerinde ilk olarak donatılı kütlenin yanal toprak itkilerinin etkisiyle en alt donatı üzerinden kaymaması için analizler yapılmakta ve kaymaya karşı güvenlik sayısı belirlenmeye çalışılmaktadır. Çünkü istinat duvarı, yanal itkilerin etkisi altında öne doğru kaymamalı ve kaymaya karşı belli bir güvenlik olmalıdır [40]. Buna göre şekil 19’da kaymaya karşı koyan kuvvetler ‘ T_f ’, kaydırmaya çalışan kuvvetler ‘ T ’ ise;

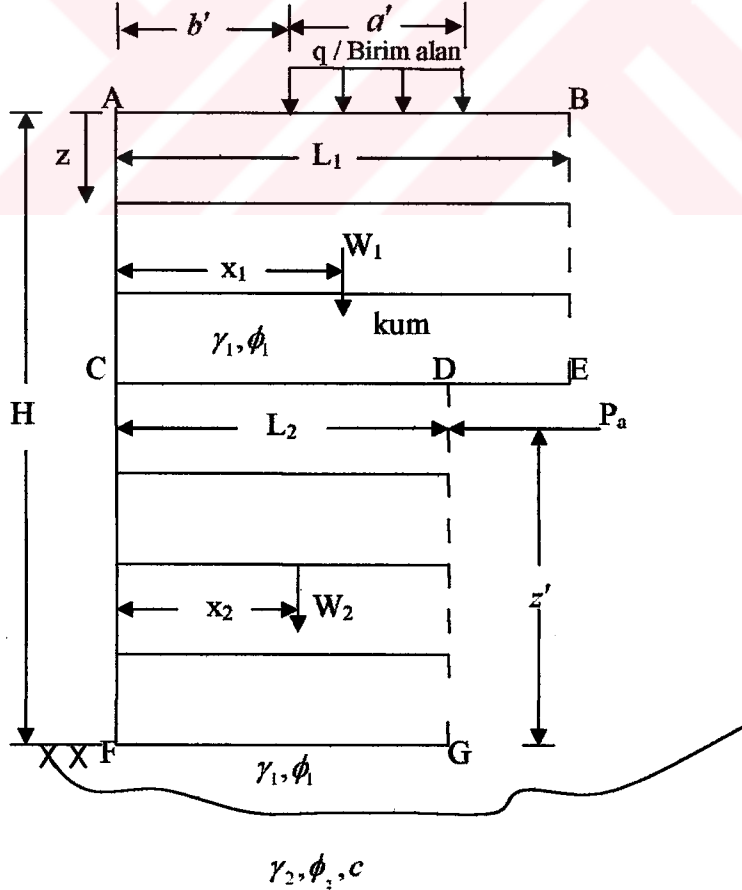
$$T_f = (W_1 + W_2 + qa') \tan \delta + c'L_2 \quad (14)$$

$$T = P_a = P_s + P_q \quad (15)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada W_1 ve W_2 dolgu ağırlıkları, δ sürtünme açısı (bilinmiyorsa genelde $\delta = \frac{2}{3}\phi$ olarak alınır.), c' azaltılmış kohezyon (genelde $c' = \frac{2}{3}c$ olarak alınır.), P_a dolgu ve sürşarjdan dolayı oluşan aktif toprak kuvveti olmak üzere kaymaya karşı güvenlik sayısı;

$$GS_{kayma} = \frac{T_f}{T} = \frac{(W_1 + W_2 + qa') \tan \delta + c'L_2}{P_a} \quad (16)$$

olarak hesaplanır ve bu güvenlik sayısının genellikle 1.5'dan büyük olması istenir. Hesaplanan güvenlik sayısının yeterli olmaması durumunda donatının boyu uzatılarak analizler tekrarlanmakta ve minimum güvenliği sağlayacak donatı boyu belirlenmeye çalışılmaktadır.



Şekil 19. Dış stabilite analizi şeması

Dış stabilite analizlerinde kayma denetiminden sonra donatılı kütlelerin yanıl toprak itkilerinin etkisiyle devrilmeye karşı stabilitesi araştırılır. Çünkü bir istinat duvarı, yanıl zemin basınçlarının etkisi ile devrilmemeli ve devrilmeye karşı belli bir güvenlik olmalıdır [40]. Bu amaçla yine şekil 19'dan yararlanarak donatılı duvarın topuk noktasına (şekilde F noktası) göre moment alınarak devrilmeye zorlayan momentlerle devrilmeye karşı koyan momentlerin oranı belirlenmeye çalışılır.

Devrilmeye karşı koyan moment ' M_R ', devrilmeye zorlayan moment ' M_O ' olmak üzere;

$$M_R = W_1x_1 + W_2x_2 + qa' \left(b' + \frac{a'}{2} \right) \quad (17)$$

$$M_O = P_a z' \quad (18)$$

$$P_a = \int_0^H \sigma_a dz \quad (19)$$

olarak hesaplanmaktadır. Buna göre devrilmeye karşı güvenlik sayısı;

$$GS_{devrilme} = \frac{M_R}{M_O} = \frac{W_1x_1 + W_2x_2 + qa' \left(b' + \frac{a'}{2} \right)}{P_a z'} \quad (20)$$

olarak hesaplanır ve bu güvenlik sayısının genellikle 2'den büyük olması istenir. Kayma denetiminde olduğu gibi devrilme denetiminde de hesaplanan güvenlik sayısı yeterli değilse donatı boyunu artırmak gerekir.

Dış stabilite analizlerinde son olarak taban basıncı denetimleri yapılır. Burada geosentetik donatılı yapıdan zemine iletilen yüklerin temel zemini tarafından güvenli bir şekilde karşılanabilmesi gerekmektedir. Yani temel zemini eksantrik yüklü duvarı güvenle taşımalıdır [40]. Analizler bir metre duvar boyu için yapılmaktadır ve yapının stabilitesi için tabanın tüm genişliğinde basınç gerilmesi olması gerekmektedir. Bunun için de eksantrisitenin $L_2/6$ 'dan büyük olmaması yani çekirdek bölgesi dışında kalmaması istenir. Çünkü eksantrisitenin çekirdek bölgesi dışında olması durumunda duvar tabanında zeminden kopma olmaktadır. Şekil 19'dan yararlanarak duvar tabanındaki maksimum ve minimum gerilmeler şöyle hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{\max} = \frac{R_v}{L_2} \left(1 + \frac{6e}{L_2} \right) \quad (21)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{R_v}{L_2} \left(1 - \frac{6e}{L_2} \right) \quad (22)$$

Bu formüllerde 'R_v' duvar tabanına etkiyen toplam düşey kuvvet, 'L₂' duvar taban genişliği veya geosentetik donatı boyu, 'e' eksantrisite olmaktadır ve eksantrisite;

$$e = \frac{M}{R_v} \quad (23)$$

formülüyle hesaplanmaktadır. Burada 'M' donatılı duvar tabanının orta noktasına göre toplam momenttir.

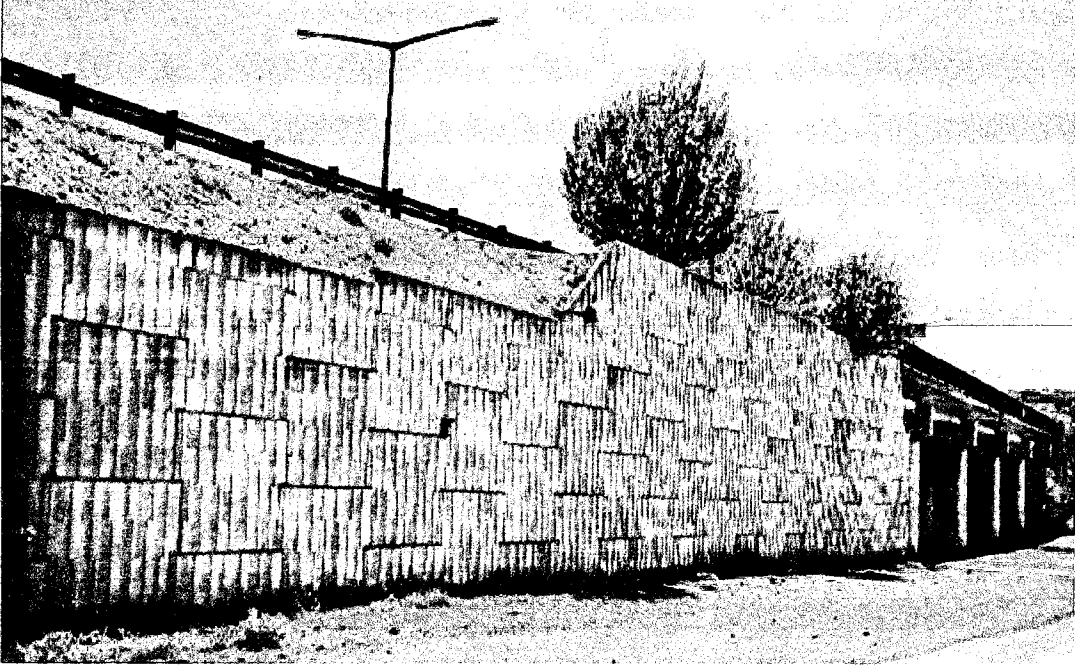
Hesaplanan minimum gerilme değeri sıfırdan büyük, maksimum gerilme değeri de zemin emniyet gerilmesinden küçük olmalıdır. Yine gerekli güvenlik şartlarının sağlanamaması durumunda donatı boyunu artırmak gerekmektedir.

1.4. Türkiye'de Donatılı Zemin Uygulamaları

Türkiye'de ilk donatılı zemin duvar uygulaması 1986 yılında Ankara-Samsun yolunda Elmadağ'daki üst geçit köprüsünün inşasında gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama aynı zamanda Türkiye'deki ilk ticari donatılı toprak duvar uygulamasıdır. Maksimum yükseklik 7.00 m olup toplam alan 4400 m²'dir (Şekil 20).

Tarsus-Adana-Gaziantep (TAG) otoyolunun Nur Dağı geçişinde şimdiye kadarki en yüksek polimer şeritli donatılı zemin duvar yapılmıştır. Maksimum yükseklik 29.60 m ve toplam alan 23500 m²'dir (Şekil 21).

Toprakkale-İskenderun otoyolu istinat duvarlarında maksimum yükseklik 26.00 m, toplam alan 15000 m²'dir (Şekil 22).



Şekil 20. Türkiye'deki ilk donatılı zemin uygulaması (Elmadag) [41].



Şekil 21. TAG otoyolu Nur Dağı geçişi inşaatı [41].



Şekil 22. Toprakkale-İskenderun otoyolu istinat duvarları [41].

Türkiye’de 1986 yılından beri uygulanan bu sistem ile 150000 m²’nin üzerinde duvar yapılmıştır ve halen devam eden uygulamalar mevcuttur. Ülkemizde bugüne kadar donatılı zemin sisteminin uygulandığı projelerin bir kısmı tablo 5’de verilmektedir.

Tablo 5. Ülkemizde uygulanan donatılı zemin sistemi projeleri

Proje Adı	Duvar alanı (yükseklik)	İşveren	Bitiş yılı
2. Boğaz Köprüsü çevre yolları istinat duvarları	60000 m ² (20 m)	KGM	1987-1989
Korumar oteli istinat duvarı-Kuşadası	1200 m ² (12 m)	Korumar Oteli	1988
Tanyeli Caddesi istinat duvarları-Ankara	2300 m ² (11 m)	Ankara Belediyesi	1991
Üzümcü sokak istinat duvarları-Ankara	2300 m ² (22 m)	Ankara Belediyesi	1993
Keçiören köprü kenar ayak ve istinat duvarları-Ankara	1500 m ² (8 m)	Keçiören Belediyesi-Ankara	1994
Tuzlu çayır yolu istinat duvarları	4500 m ² (12 m)	Ankara Belediyesi	1995
Bahçeşehir konutları	750 m ² (8 m)	Emlak Bankası	1995
Yerköy Üstgeçidi-Yozgat	4200 m ² (9 m)	KGM	1996
Bozyaka Kavşağı İstinat Duvarları	1200 m ² (7 m)	İzmir Belediyesi	1996
Güngören Kavşağı İstinat Duvarları	1000 m ² (7 m)	İstanbul Belediyesi	1997
Kağıthane Başak Konutları İstinat Duvarları	1200 m ² (14 m)	İstanbul Belediyesi	1997
Sarıyer-İstinye Bağlantı Yolu İstinat Duvarları	7000 m ² (14 m)	İstanbul Belediyesi	1997
Rahmanlar-E5 Bağlantı Yolu	2600 m ² (8 m)	İstanbul Belediyesi	1997
Bayrampaşa Üstgeçidi ve Davutpaşa Bağlantı Yolu	2300 m ² (8 m)	İstanbul Belediyesi	1997
T.S.K. Rehabilitasyon ve Bakım Merkezi İstinat Duvarları	10700 m ² (13.6 m)	M.S.B. İnşaat Emlak Dairesi	1998
Bosna Bulvarı-Küçüksu Bağlantı Yolu	7500 m ² (8 m)	İstanbul Belediyesi	1998
Kartal-Yakacık A2-E5 Bağlantı Yolu	5500 m ² (10 m)	İstanbul Belediyesi	Devam ediyor
İstinye 'C' Yolu Büyükdere Caddesi Bağlantı Yolu	5500 m ² (10 m)	İstanbul Belediyesi	Devam ediyor
Beykoz Dedeoğlu Sazlıdere-Soğuksu Arası Bağlantı Yolu	1425 m ² (8 m)	İstanbul Belediyesi	1998
Tuzla Aydınli Köy Yolu ve İçmeler Kavşağı İnşaatı	3500 m ² (12 m)	İstanbul Belediyesi	1999
Karadeniz Sahil Yolu Araklı-İyidere Yolu İnşaatı	20000 m ² (10 m)	KGM 10. Bölge Müdürlüğü	Devam ediyor
Tarsus Ayırımı-Mersin Otoyolu	10000 m ² (9.60 m)	KGM 5. Bölge Müdürlüğü	Devam ediyor
Nevruz D.D.Y. Üstgeçit Köprüsü-Sivas	620 m ² (7.60 m)	KGM 16. Bölge Müdürlüğü	2001
TAG Otoyolu	23500 m ² (29.6 m)	KGM	1994-1998
Elmadağ Köprüsü İstinat Duvarları	4400 m ² (7 m)	KGM 5. Bölge Müdürlüğü	1987

1.5. Donatılı Zeminlerin Üstünlükleri, Sakıncaları ve Maliyet Durumu

1.5.1. Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Üstünlükleri

Geosentetik donatılı zemin istinat duvarları normal tip betonarme ve beton ağırlık istinat duvarlarıyla karşılaştırıldığında bir çok üstünlüğe sahiptir. Bu üstünlüklerin en önemlileri şöyle sıralanabilir.

- Geosentetik donatılı duvarlar mühendislik açısından oldukça emniyetli yapılardır. Bu duvarlar gerek statik gerekse de deprem yükleri altında daha sağlıklı davranabilmektedir. Özellikle zayıf temel zemini koşullarında temele daha az yük aktarması ve dönmeye karşı büyük dirençleri olması sebebi ile büyük emniyet sağlamaktadır.
- Yapım kolaylığı ve inşaat hızı projenin hızla gerçekleştirilmesini sağlamak ve doğal olarak kısa sürede tamamlanmaya bağlı olarak ekonomik kazanç sağlanmaktadır.
- Basit ve hızlı inşaat yöntemi kullanıldığı için büyük inşaat ekipmanı ve inşaat için özel yetenekli işçi gerektirmez.
- Donatılı zemin duvarlar klasik betonarme istinat duvarlarına göre daha ekonomiktir ve bu ekonomi artan duvar yüksekliği ile daha da belirginleşir. Belli bir yükseklikten sonra betonarme istinat duvarlarının yapımı imkansızdır ancak donatılı zemin istinat duvarları için üst sınır yoktur. 25m'yi aşan yükseklikler için bile teknik olarak uygulanabilmektedir.
- Donatılı zemin duvarlarda dolgu malzemesinin temiz çakıl gibi pahalı ve kaliteli malzeme olması gerekmez. Çok geniş aralıktaki zeminler dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Hatta lokal olarak temin edilebilen, herhangi bir yol dolgusunda kullanılacak özellikte olan bir malzeme bile dolgu olarak kullanılabilir. Bu sebeple hem nakliye hem de dolgu malzemesi bedelinden büyük oranda tasarruf sağlanabilmektedir.
- Bu tip duvarlar son derece estetik görünümlüdür. Bunda ön yüz elemanlarına verilebilecek şekil, doku ve renkler etkili olmaktadır. Bu duvarlar çok değişik geometrik şekillere uydurulabilmekte, iç ve dış kurpları kolayca dönebilmekte, tam düşey veya istenilen ön cephe eğiminde oluşturulabilmekte ve istenildiği gibi kademelendirilebilmektedir [42].

- Donatılı zemin duvarlar deformasyonlara dayanımlı olması dolayısıyla rijit temel desteğine ihtiyaç yoktur.
- Alternatiflere göre daha az ön saha hazırlıkları gerektirir ve inşaat işlemleri için yapının önünde daha az çalışma alanına ihtiyaç duyulur.

1.5.2. Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Sakıncaları

Geosentetik donatılı duvarların pek çok üstünlüğü yanında birtakım sakıncaları da mevcuttur. Bu sakıncalar şunlardır.

- İçsel ve dışsal stabilite için yeterli duvar genişliği elde etmek için duvar arkasında veya dış yüzde geniş alan gerektirir.
- Bu tür duvarlar granüler dolgu malzemesi gerektirir. Granüler dolgunun az olduğu yerlerde uygun dolgu malzemesi elde etmek sistemin ekonomikliğine neden olur.
- Geosentetiklerin ultraviyole ışınlarıyla bozulması gibi durumları önlemek için uygun proje kriteri gerekmektedir.

1.5.3. Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Maliyet Durumu

Donatılı zemin yapısının maliyeti; arazi çalışması, yarma dolgu ihtiyaçları, duvar tipi, arazi zemin tipi, uygun arka dolgu malzemeleri, ön yüz işleri, geçici ve daimi uygulamaları içeren pek çok faktörün fonksiyonudur. Prefabrik beton ön yüz elemanlı MSE duvarlar, 3m'den yüksek durumlarda betonarme konsol istinat duvarlarından daha ucuzdur. Donatılı zemin duvarlar üzerinde yapılan çalışmalar, özellikle 5m'den yüksek duvarlarda %20-65 oranında tasarruf sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca derin temellerin elimine edilmesiyle de önemli tasarruflar elde edilmektedir. Çünkü donatılı zemin yapıları toplam ve farklı oturmaları adsorbe ederler. Diğer ekonomiklik sebepleri inşaat kolaylığı ve hızı olmaktadır.

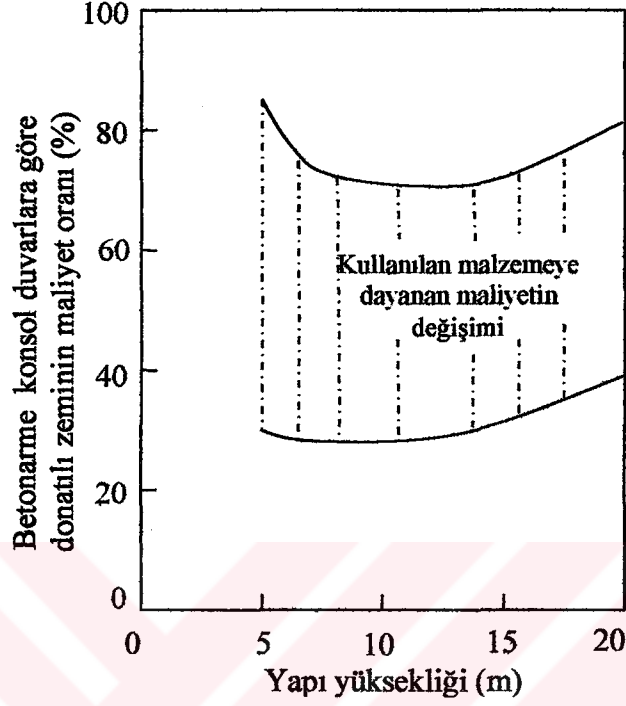
MSE duvarların inşaatının gerçek maliyeti, temel bileşenlerinin her birinin maliyetine dayanmaktadır. Örneğin; parçalı prefabrik beton ön yüz yapıları için tipik maliyet şöyle olmaktadır:

Toplam maliyetin %20-30 kadarı panellerin inşası ve müteahhitlik karı,

Toplam maliyetin %20-30 kadarı donatı elemanları,

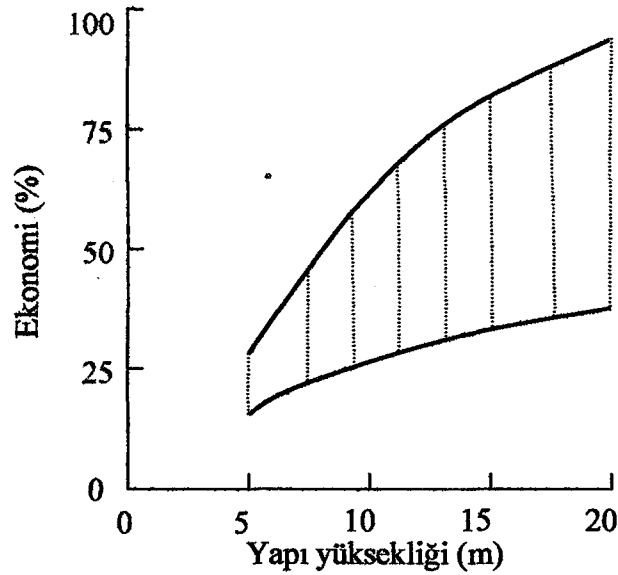
Toplam maliyetin %35-40 kadarı yerleştirmenin dahil olduğu arka dolgu malzemesi [35].

Donatılı zemin yapılarının betonarme konsol istinat duvarları ile maliyetinin karşılaştırılması şekil 23'de gösterilmektedir.



Şekil 23. Betonarme konsol duvarlara göre donatılı zeminin maliyet oranının yapı yüksekliği ile değişimi [43].

Şekil 24'de ise yapı yüksekliği-ekonomi ilişkisi verilmektedir.



Şekil 24. Yapı yüksekliği-ekonomi ilişkisi [43].

Donatılı zemin yapısının ekonomisi:

A = Tipik maliyet

B = Donatılı zemin maliyeti olmak üzere;

$$\text{Ekonomi} = \left[\frac{A-B}{B} \right] \times 100 \quad (24)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Donatılı zemin yapısının toplam maliyeti ise çeşitli maliyet kalemlerinden oluşmaktadır. Bu kalemler şunlardır:

- Zemin dolgusu maliyeti, C_S
- Ön yüz kaplama elemanları maliyeti, C_F
- Donatı birleşim elemanları maliyeti, C_R
- Taşıma işleri maliyeti, C_L
- İnşaat maliyeti, C_C
- Malzemelerin test edilmesi maliyeti, C_{MT}
- Kâr, P

Buradan toplam maliyet;

$$TC = (C_S + C_F + C_R + C_L + C_C + C_{MT} + P) \quad (25)$$

olarak bulunur. Bu ifadeyi kısaltacak olursak toplam maliyet şu şekilde yazılabilir:

$$TC = (C'_S + C'_R + C'_F) \quad (26)$$

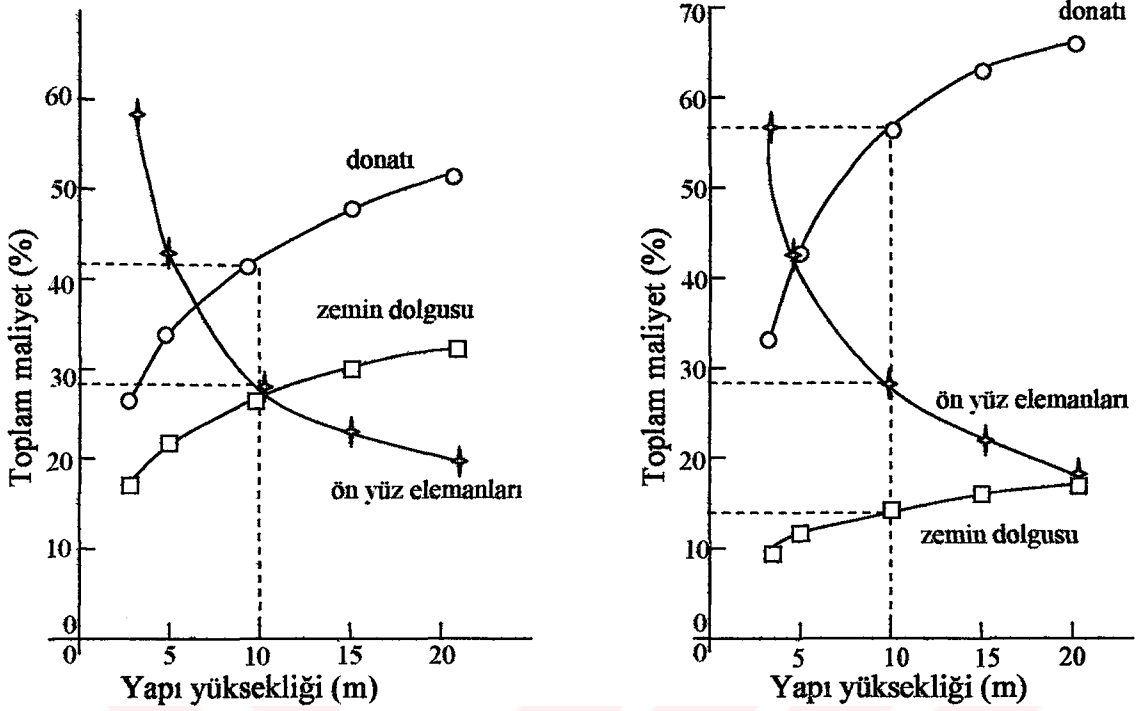
Bu ifadede karlar da dahil edilmiş olarak;

C'_S , taşıma, yerleştirme, sıkıştırma ve malzemelerin test edilmesini içeren dolgu maliyeti

C'_R , donatının taşınması ve yerleştirilmesi maliyeti

C'_F , ön yüz elemanlarının taşınma ve inşa maliyetidir.

Toplam maliyeti oluşturan parametrelerin, maliyet üzerindeki oransal etkileri üzerine pek çok araştırma yapılmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmalardan birinde inşaatın boyut ve ölçeğinin maliyet üzerindeki etkileri şekil 25'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 25. Donatılı zemin duvarlarda yapı yüksekliği-maliyet ilişkisi [43].

Şekil 25'de görüldüğü gibi donatının ve zemin dolgusunun maliyeti duvar yüksekliği arttıkça artmakta fakat ön yüz elemanlarının maliyeti azalmaktadır. Ön yüz elemanlarının etkisi, düşük yükseklikli yapılarda ilk sırada ortaya çıkmakta ve maliyetin çok büyük kısmını oluşturmaktadır. Duvar yüksekliği arttıkça ön yüz elemanlarının maliyeti azalmakta ve özellikle 5-6 m yüksekliklerden sonra donatı malzemesi maliyet üzerinde çok önemli bir etkinlik kazanmaktadır. Donatılı zemin istinat duvarları üzerine yapılan maliyet analizi çalışmalarının sonuçlarına göre ön yüz kaplama elemanları ve donatı malzemesi maliyeti, toplam maliyetin %65-70'ini oluşturmakta, işgücü ve teçhizat maliyeti ise %15-18 civarında kalmaktadır.

1.6. Donatılı Zeminlerle İlgili Önceki Çalışmalar

Berg vd. [44] iki adet donatılı zemin istinat yapısının inşaat esnasındaki ve inşaat sonrasındaki performansını incelemiştir. Arizona yakınlarda inşa edilen bu duvarlarda yüksek çekme dayanımına sahip geogridler kullanılmıştır. Tucson duvarı olarak isimlendirilen ilk duvarda 0.15m kalınlığında, 1.5m genişliğinde ve yüksekliği duvar yüksekliğine eşit yüzey kaplamaları kullanılmıştır. Lithonia duvarı olarak adlandırılan ikinci duvarda ise 1.65m genişliğinde ve 1.2m yüksekliğinde prekast yüzey kaplaması

panelleri kullanılmıştır. Yapının inşaat esnasındaki ve sonrasındaki performansını inceleyebilmek amacıyla kaplama panelleri üzerine yük ölçüm hücreleri yerleştirilmiştir. Dolgu içerisine ise düşey deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Geogridlerde meydana gelecek deformasyonları ölçmek için ise geogridler üzerine yanal deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde Tucson duvarının üst kesimlerindeki kaplama panellerinin dışa doğru yaklaşık 65mm hareket ettiği görülmüştür. Yapının topuk kesiminde ise dışa doğru bir hareket gerçekleşmemiştir. Bu davranışın inşaat öncesi yapılan analizler sonucu beklenen davranışa uygun olduğu ve bu tip duvarlarda inşaat esnasında duvara (1:60)'lık bir yüzey eğimi verilmesinin uygun olacağı belirtilmiştir. Lithonia duvarı da analizler sonucu beklenen davranışa uygun bir davranış sergilemiştir. Yapılan gözlemler sonucunda bu tip duvarlar içinse başlangıç yüzey eğiminin (1:40) olmasının uygun olacağı belirtilmiştir. Yük ölçüm hücreleri yardımı ile belirlenen yanal yük ölçümlerinden yararlanarak yüzey kaplamalarına ve birleşim noktalarına gelen yükler tespit edilmiştir. Yapılan ölçümler analiz sonucu hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Burada duvarın alt ve üst kesimlerinde ölçülen değerler teorik değerlere yaklaşmaktadır. Orta kesim için hesaplanan değerler ise ölçülen değerlerden oldukça yüksektir. Dolgu içerisine yerleştirilen yük ölçüm hücreleri yardımıyla elde edilen düşey gerilme değerleri ve davranışları benzer olmakla beraber teorik olarak hesaplanan değerlerden farklıdır. Geogridler üzerine yerleştirilen birim deformasyon ölçerlerden elde edilen değerler maksimum şekildeğiştirmelerin, şev topuğundan geçen ve düşeyle 18–19° açı yapan bir doğru üzerinde yer aldığını göstermiştir.

John [45] donatılı zeminlerde geotekstillerin performansını incelemek amacıyla üç adet test dolgusu üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Test dolgularından ikisi yer altı su seviyesinin değişkenlik gösterdiği bir alanda inşa edilmiştir. Böylece yer altı su seviyesi değişiminin geotekstil donatıda oluşacak çekme gerilmelerini ne şekilde etkilediği incelenebilmiştir. Tasarımda aderans boyu hesaplanırken yanal kuvvetlerin dengesine dayalı basit bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde geotekstilin göçme bölgesi dışında kalan kısmının stabiliteye katkı sağladığı düşünülmüş ve yanal toprak itkisinin geotekstillere ile zemin arasında oluşan sürtünme kuvvetleriyle karşılandığı düşünülmüştür. Yapıların performansını incelemek amacıyla pek çok ölçüm aletinden faydalanılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda yapının üst kesiminde ölçülen yanal toprak basınçlarının aktif toprak basıncına yakın olduğu ancak duvarın alt kısımlarına inildikçe ölçülen değerlerin aktif toprak basıncı değerlerinden oldukça küçük olduğu görülmüştür. Ayrıca yer altı su

seviyesinin yükselmesi yanal basınçları artırmakta ve geotekstil ile zemin arasında oluşacak sürtünmelerin azalmasına neden olmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda yer altı su seviyesi değişiminin aderans boyu için gerekli güvenlik sayısını büyük oranda azalttığı görülmüştür. Her ne kadar yapılan yapıların tasarımında alınan yüksek güvenlik katsayıları nedeniyle bu durum genellikle yapı güvenliğini tehlikeye sokmasa da yine de yapının davranışını doğru modelleyebilmek için bu durumun göz ardı edilmemesi gerektiği vurgulanmıştır.

Juran ve Christopher [46] geotekstil donatılı yapıların performansını incelemek ve tasarımda yapılan kabullerin doğruluğunu araştırmak amacıyla laboratuarda küçük ölçekli modeller üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Model deneylerin analizinde kullanılacak parametreleri belirlemek amacıyla çekme deneyleri yapılarak kullanılacak donatıların zemin içerisinde gömülü olduğu durumdaki ve serbest haldeki gerilme-deformasyon eğrileri elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada zeminin içsel sürtünme açısının $40-45^\circ$ arasında değişen değerler aldığı düşünülmüştür. Yapılan deneyler göçmenin dolgu ön yüzündeki kaplama panellerinde aşırı deformasyonlar oluşması, donatının kopması veya sıyrılması sonucu meydana gelebileceğini göstermiştir. Yapılan çalışma sonucunda geotekstil donatılı yapıların davranışının oldukça kompleks olduğu ve yapının performansının inşaat adımları ile donatı esnekliğinden önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür.

Lo ve Xu [47] yumuşak kil tabakaları üzerinde yer alan donatılı dolgularda meydana gelecek drenajsız dairesel göçme için yeni bir limit denge analiz yöntemi geliştirmiştir. Analizde kayma yüzeyi boyunca meydana gelecek deformasyon yumuşamaları da göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca göçme anında kayma yüzeyi boyunca oluşacak deformasyonların esnek geotekstilin çekme dayanımının mobilize olabilmesi için uygun olup olmadığı da araştırılmıştır. Dolgu malzemesinin homojen olduğu ve drenajlı koşullarda göçtüğü kabul edilmiştir. Temel zeminini oluşturan kilde ise göçme anında drenajsız koşulların geçerli olduğu düşünülmüştür. Geotekstil donatıların stabiliteye olan katkısını incelemek amacıyla farklı sayıda ve dayanımdaki geotekstillerin kullanıldığı deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak kullanılan geotekstil donatı sayısı ve geotekstillerin elastisite modülleri arttıkça geotekstillerin stabiliteye olan katkılarının da arttığı vurgulanmıştır.

Rowe vd. [48] yumuşak zeminler üzerine inşa edilen geotekstil donatılı zeminlerin inşaat esnasındaki ve göçme anındaki performansını incelemek amacıyla Kanada'da çeşitli

ölçüm aletleri ile donatılmış bir test dolgusu inşa etmiştir. Yüksek sıkışabilirliğe sahip, yumuşak bir temel zemini üzerine inşa edilen dolguda donatı malzemesi olarak yüksek dayanımlı örgülü geotekstiller kullanılmıştır. Çalışmada ilk olarak dolgunun inşa edileceği temel zeminini incelemek amacı ile arazide sondaj çalışması, koni deneyleri ve arazi veyn deneyleri yapılmıştır. Dolgunun inşaatına yaklaşık 0.3-0.5m kalınlıkta granüler örtü tabakasının yerleştirilmesi ile başlanmıştır. Kademe kademe yapılan dolgu esnasında oluşan boşluk suyu basınçları, gerilmeler, şekildeğişiklikler ve geotekstilde meydana gelen uzamalar kullanılan ölçüm aletleri yardımıyla ölçülmüştür. Geotekstilde meydana gelen uzamalar, boşluk suyu basıncı değişimleri, yatay ve düşey deplasmanlar birlikte göz önüne alındığında temel zemininin 5.7m dolgu yüksekliğinde göçmeye ulaştığı görülmektedir. Geotekstilde meydana gelen uzamalara bakıldığında geotekstilin stabiliteye olan katkısı 3.4m dolgu yüksekliğine kadar belirgin olmamakla birlikte dolgu yüksekliğinin 4.5m'ye ulaşmasının ardından yavaş yavaş artmaktadır. Dolgu 5.7m yüksekliğe ulaştıktan sonra geotekstilin stabiliteye olan katkısı belirgin olarak artmaktadır. 8.2m dolgu yüksekliğine ulaşıldığında geotekstildeki uzama %8.5 seviyelerindedir. Sonuç olarak dolgu yüksekliği 8.2m'de sabit iken deformasyonların ve geotekstildeki uzamaların devam ettiği ve geotekstildeki uzamanın %25'lere ulaşmasının ardından geotekstilin koptuğu belirlenmiştir.

Porbaha ve Goodings [49] dolgu malzemesi olarak kohezyonlu zeminlerin kullanıldığı dik ve az eğimli şevler üzerinde santrifluj deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Rijit ve yumuşak zemine oturan 24 ayrı donatılı şev modeli santrifluj aleti ile test edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kohezyonlu zeminlerin donatılı zemin uygulamalarında dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi görülmüştür. Yüzeyi eğimli şevlerde tüm geotekstillerin göçme yüzeyi ile kesişmesine olanak sağlayacak yani geotekstillerin tamamının stabiliteye katkı sağlamasına imkan tanıyacak geotekstil boyunun $L = 0.67 H$ ve dik şevler için $L = 0.75 H$ (H:Duvar yüksekliği) olduğu bulunmuştur. Duvar yüzeyinin eğik olması ihtiyaç duyulan geotekstil donatı boyunun önemli miktarda azalmasına imkan tanımakta ve ekonomik açıdan da önemli kazanç sağlamaktadır. Sonuç olarak kohezyonlu dolgu zeminin kullanıldığı dik ve az eğimli şevlerde, şev yüksekliğinin fazla olduğu durumlarda geotekstillerde kopma gerçekleşirse de büyük deformasyonların oluşabileceği görülmüştür. Bu etkiyi azaltmak için şev yüzeyinin daha eğimli hale getirilmesi önerilmekte ve böylece göçmeye zorlayan kuvvetlerin göçmeye karşı koyan kuvvetlerle daha iyi dengelenebileceği belirtilmektedir.

Springman ve Balachandran [50] küçük ölçekteki donatılı zemin modelleri üzerinde santrifüj deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde iki farklı tip geotekstil donatı kullanılarak iki ayrı model deney oluşturulmuştur. Her iki deneyde de uygulanan santrifüj ivmesinin yanı sıra şev üzerine sürşarj yükü de uygulanmıştır. Elde edilen deney sonuçları iki farklı nümerik analiz yöntemi ile hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılarak deney ve analiz sonuçlarının uyumu araştırılmıştır. Sonuç olarak analizlerde, zemin ve geotekstil donatının ayrı ayrı modellenmesinin geotekstil donatılı zeminin deformasyon davranışını incelemek açısından daha uygun olduğu anlaşılmıştır. Ancak santrifüj modeli ile analiz modeli arasında daha iyi bir uyum elde edebilmek için, gerilme artışı ile gerilme tarihçesine bağlı olarak zeminin dayanım ve sıklığındaki değişimi modelleyebilmek açısından daha gerçekçi analiz yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır.

Zornberg vd. [51] geotekstil donatılı zeminlerin göçme anındaki performansını ve göçme mekanizmasının oluşumunu incelemek amacı ile bir seri santrifüj deneyi gerçekleştirmiştir. Çalışmada geotekstil donatı aralığı, geotekstil çekme dayanımı ve dolgu malzemesi kayma mukavemeti gibi limit denge denklemlerinde göz önünde bulundurulmuş parametreler değiştirilerek bu değişikliklerin yapının performansına ve göçme mekanizmasının oluşumuna olan etkisi araştırılmıştır. Deneylerde göçme yüzeyi, limit denge denklemlerinde yapılan kabuldeki gibi şev topuğundan geçen ve rahatlıkla görülebilen bir kayma yüzeyi olarak tanımlanmıştır. Ancak yapılan deneyler sonucunda göçmenin pek çok tasarım yönteminde yapılan kabulün aksine şev topuğundan değil şevin orta kısmından başladığı görülmüştür. Farklı geotekstil aralığı, farklı geotekstil çekme dayanımı ve farklı kayma mukavemetine sahip kum dolgu malzemesi kullanılarak yapılan deneylerde kritik göçme yüzeyinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Santrifüj deneyleri esnasında şev üzerinde meydana gelen oturmaların dolgu malzemesi özelliğine bağlı olarak değişiklik gösterdiği ve geotekstil çekme dayanımı ile geotekstil aralığı değişiminden etkilenmediği anlaşılmıştır. Sonuç olarak santrifüj deneylerinin geotekstil donatılı şevlerin stabilitesi için uygun bir yöntem olduğu ve yapıların gerçekçi yükler altındaki performansının incelenmesi açısından da santrifüj deneylerinin oldukça faydalı olabileceği belirtilmektedir.

Porbaha [52] daha önce Goodings ile yapmış oldukları araştırmanın devamı niteliğindeki çalışmada şev eğimini ve kullanılan geotekstilin boyunu değiştirmenin kayma yüzeylerinin oluşumuna olan etkisini araştırmak amacıyla bir seri santrifüj deneyi gerçekleştirmiştir. Göçme yüzeyinin yerinin donatı boyuna ve şev eğimine bağlı olarak

değiştirdiğini belirlemiştir. Kullanılan geotekstil donatının boyu $L=0.5H$ 'dan $L=0.75H$ 'ya doğru arttıkça göçme yüzeyinin donatılı şevin ön yüzüne doğru yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca geotekstil donatılı şevlerde oluşan göçme yüzeyleri her durumda geotekstil donatısız şevlerdeki göçme yüzeylerinin gerisinde oluşmuştur. Kullanılan geotekstil donatı boyunun kısa olduğu durumlarda donatılı kısım ince, uzun, stabil olmayan bir istinat duvarı gibi davranmaktadır ve öne doğru devrilmeye zorlanmaktadır. Bu durumda donatı sadece şevin alt kısmında belirli bir kısımda göçme yüzeyi ile kesişmekte ve stabiliteye çok az oranda katkı sağlamaktadır. Donatı boyu uzadıkça göçme yüzeyi ile kesişen donatı sayısı artmakta ve dolayısıyla geotekstil donatıların stabiliteye olan katkısı da artmaktadır.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Geosentetiklerin mühendislik amaçları için kullanımını dünyada ve ülkemizde hızla artan ve kabul gören bir gerçektir. Geosentetikler ailesinden olan geotekstil ve geogridlerin özellikle donatı olma özelliğinin ön plana çıktığı donatılı zemin uygulamalarından olan istinat yapılarında kullanımı bazen ekonomik nedenlere bazen de zorunlu nedenlere dayanmaktadır [53]. Bu amaçla, çalışmanın bu bölümünde geosentetik donatılı zemin istinat duvarları için projelendirme yöntemi tanıtılmış ve bir geotekstil donatılı zemin istinat duvarı projelendirilmiştir. Daha sonra betonarme konsol bir istinat duvarı ile geogrid donatılı zemin istinat duvarının analizleri yapılarak ekonomik açıdan değerlendirilmiştir.

2.1. Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Projelendirme Adımları

Geosentetik (geotekstil veya geogrid) donatılı zemin istinat duvarlarının projelendirilmesi birbirini izleyen birkaç aşamadan oluşmaktadır. Aşağıda genel olarak bir donatılı zemin istinat duvarının projelendirme adımları verilmektedir.

I. Aşama: Projelendirme sınırları ve dış yüklerin tespit edilmesi

A. Duvar uzunluğu, L

B. Duvar yüksekliği, H

C. Yüzey eğim açısı

D. Dış yükler

1. Üniform sürşarj yükler, q

2. Geçici noktasal hareketli yükler, Δq

3. Sismik yükler, α_g

E. Kaplama tipi ve birleşimler

1. Parçalı beton birimler, ahşap elemanlar, arttırılmış yükseklikte prefabrike paneller

2. Tam yükseklikte beton paneller

3. Sarılmış elemanlar

F. Kaplama birleşimlerine, tabaka kalınlığına, yapım esnasındaki stabiliteye ve yerleştirmeye dayanan ara mesafe gereksinimleri ve donatı dayanımı

G. Donma etkisi, şişme ve büzülme, drenaj, sızma, oyulma, yağış akışı, arka dolgunun kimyasal karakteri, sızma suyu gibi çevresel faktörler (mesela; hidroliz potansiyeli, pH sınırı, sülfatlar, kloritler, kimyasal çözücüler, dizel yakıt ve diğer hidrokarbonlar)

H. Projelendirme ve servis ömrü süreleri

II. Aşama: Temel zemininin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi

A. Duvar tabanı altındaki zemin profilinin belirlenmesi

İnceleme derinliği duvar yüksekliğinin en az iki katı kadar olmalıdır. Sondajlar duvar güzergahı boyunca en az her 30-45 m'de bir yapılmalıdır.

B. Her temel tabakası için temel zemininin dayanım parametrelerinin, birim hacim ağırlığının, konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi

C. Yer altı su seviyesinin belirlenmesi

Duvar altında ve arkasındaki drenaj ihtiyacı kontrol edilmelidir.

III. Aşama: Donatılı dolgu zemininin ve tutulan arka dolgu zemininin özelliklerinin belirlenmesi

A. Su muhtevası, dane dağılımı ve plastisite (Mekanik olarak stabilize edilmiş zemin duvarları için ince daneli zeminler, silt ve killer, tavsiye edilmemektedir.)

B. Kompaksiyon karakteristikleri (maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği)

C. İçsel sürtünme açısı

D. Oksidasyon etkeni, kloritler ve pH

IV. Aşama: Projelendirme güvenlik sayılarının belirlenmesi

Aşağıdaki değerler minimum değerler olarak tavsiye edilmektedir, yerel kodlar daha farklı değerler gerektirebilir.

A. Dış stabilite

1. Kayma: $GS \geq 1.5$

2. Devrilme: $GS \geq 2$

3. Taşıma gücü: $GS \geq 2$

4. Derin (toptan) göçme stabilitesi: $GS \geq 1.5$

5. Oturma: Proje performansının gerektirdiklerine dayanan maksimum müsaade edilen toplam ve farklı oturmalar

6. Dinamik yükleme: $GS \geq 1.1$

B. İç stabilite

1. Kısmi emniyet faktörlerini dikkate alarak donatının müsaade edilen uzun süreli çekme dayanımının belirlenmesi
2. İç stabiliteye karşı minimum güvenlik sayısı 1.3-1.5 değerlerini kullanarak donatının uzun süreli projelendirme dayanımının belirlenmesi

V. Aşama: İlk duvar boyutlarının belirlenmesi

A. İlk deneme kısmının analizi için donatılı kısmın uzunluğunun $L=0.7 H$ olduğu varsayılır.

B. Duvar gömme derinliğinin belirlenmesi

1. Duvarın önünde minimum gömme derinliği H_1 'dir. Tablo 6'da minimum gömme derinliği-şev açısı ilişkisi gösterilmektedir.

Tablo 6. Şev açısı-minimum gömme derinliği ilişkisi

Duvarın önündeki şev açısı	Minimum H_1
Yatay (duvarlar)	$H / 20$
Yatay (köprü kenar ayakları)	$H / 10$
$3H : 1V$	$H / 10$
$2H : 1V$	$H / 7$
$3H : 2V$	$H / 5$

2. Temel zeminlerinin olası don etkisi, büzülme ve şişme potansiyeli, genel stabilite ve sismik aktivitenin dikkate alınması. (Her durum için minimum H_1 değeri 0.45 m'dir.)

VI. Aşama: Donatılı bölge için içsel ve dışsal yanal toprak basıncı diyagramlarının elde edilmesi

Dış stabilite analizlerinde donatılı zemin kütlelerinin ve kaplamanın rijit bir kütle olduğu varsayılarak hesaplar yapılmaktadır. İç stabilite analizlerinde de basitleştirilmiş yöntem kullanılması tavsiye edilmektedir.

- A. Donatılı zemin dolgusunun ve arka dolgunun zemin özelliklerinin belirlenmesi ve projelendirme yaklaşımının seçilmesi
- B. Donatılı zemin dolgusundan, ölü yükten ve hareketli yükten oluşan içsel gerilmelerin göz önüne alınması

- C. Arka dolgudan, ölü yükten ve hareketli yükten oluşan dışsal gerilmelerin göz önüne alınması
- D. Projelendirme için zemin, sürşarj ve hareketli yük basınç diyagramlarının birleştirilerek kompozit bir diyagrama dönüştürülmesi

VII. Aşama: Dışsal duvar stabilitesinin kontrolü

- A. Kayma direnci
- B. Temel zemininin taşıma gücü
- C. Devrilme
- D. Derin göçme (global stabilite)
- E. Sismik analiz

VIII. Aşama: Klasik oturma analiz yöntemlerini kullanarak donatılı bölgenin oturmasının tahmin edilmesi

IX. Aşama: Her bir donatı tabakasındaki maksimum yatay gerilmelerin hesaplanması

- A. Her bir donatı seviyesinde, donatılı dolgu ağırlığından, üniform sürşarjdan ve dışsal kuvvetlerden dolayı oluşan düşey gerilme dağılımının belirlenmesi
- B. Her bir donatı seviyesinde, herhangi bir noktasal sürşarjdan dolayı ek düşey gerilmelerin belirlenmesi
- C. 6. adımdaki yatay toprak basıncı diyagramlarını kullanarak yatay gerilmelerin hesaplanması

X. Aşama: İçsel stabilite kontrolü ve donatı ihtiyaçlarının belirlenmesi

- A. İçsel yanal basınçlara dayanacak donatı tabakalarının düşey aralıklarının ve donatının uzun dönem proje dayanımının belirlenmesi. Bu dayanım müsaade edilebilir çekme dayanımının içsel göçmeye karşı gereken güvenlik sayısına bölünmüş değeridir.
- B. Modüler bloklu duvar kaplamalarda ve ahşap kaplamalarda donatı birleşiminin dayanımı donatının dayanım büyüklüğünü kontrol etmez. Duvar kaplaması olarak kullanılan modüler bloklu duvar birimleri ile ahşap veya beton panellerin lokal stabilitesi kontrol edilir.
- C. Rankine kırılma kamasının ötesinde sıyrılma dayanımını sağlamak üzere gerekli olan donatı uzunluğu L_e 'nin kontrolü. (Minimum L_e uzunluğu 1m olarak tavsiye edilmektedir.)

XI. Aşama: Planların ve şartnamelerin hazırlanması

2.2. Geosentetik Donatılı Zemin İstinat Duvarı Projelendirilmesi

Geosentetik donatılı zemin istinat duvarları için projelendirme ilkeleri tanıtıldıktan sonra bu ilkeler doğrultusunda bir uygulama örneği aşağıda verilmektedir.

2.2.1. Geotekstil Donatılı Zemin İstinat Duvarı Uygulaması

Duvara 20 kN/m^2 sürşarj yükü olarak etki eden bir maden depolama alanını taşımak üzere 5m yüksekliğinde bir geotekstil donatılı zemin istinat duvarı projelendirilecektir. Duvarın arka dolgusu granüler zeminden oluşacaktır. Donatılı zemin dolgusu ve arka dolgu aynı zemin özelliklerine sahip olup birim hacim ağırlığı $\gamma=18.5 \text{ kN/m}^3$, içsel sürtünme açısı $\phi = 35^\circ$ ve kohezyonu $c=0 \text{ kN/m}^2$, dolgu zemini ile donatı arasındaki sürtünme açısı $\delta = 25^\circ$, geotekstilin nihai enine çekme mukavemeti 75 kN/m olarak belirlenmiştir. Temel zemini siltli kumdan oluşmaktadır. Temel zemininin birim hacim ağırlığı $\gamma=17 \text{ kN/m}^3$, içsel sürtünme açısı $\phi = 30^\circ$, kohezyonu $c=40 \text{ kN/m}^2$ olarak belirlenmiştir. Geotekstil donatının tüm yüzeyi kapladığı varsayılmaktadır. Sismik etkiler dikkate alınmamaktadır. $\sigma_{z,em} = 200 \text{ kN/m}^2$ dir. Diğer veriler aşağıdaki gibidir.

Geotekstil emniyet faktörleri:

$GS_i=1.4$ (Hasar emniyet faktörü), $GS_c=3.1$ (Sünmeyi önlemek için emniyet faktörü), $GS_{k1}=1.3$ (Kimyasal etkilere karşı emniyet faktörü), $GS_b=1.1$ (Biyolojik etkilere karşı emniyet faktörü), $GS_k=1.4$ (Kopmaya karşı güvenlik sayısı), $GS_s=1.4$ (Sıyrılmaya karşı güvenlik sayısı)

a) Donatının müsaade edilir çekme mukavemetinin bulunması

Global güvenlik sayısı:

$$GS_g = GS_i \times GS_c \times GS_{k1} \times GS_b$$

$$GS_g = 1.4 \times 3.1 \times 1.3 \times 1.1 = 6.206$$

$$T_{mus} = \frac{T_{mh}}{GS_g} = \frac{75}{6.206} = 12.09 \text{ kN/m}$$

b) Yatay basıncın derinliğin fonksiyonu olarak bulunması

$$K_a = \tan^2(45 - \phi/2) = \tan^2(45 - 35/2) = 0.27$$

$$\sigma_{a(s)} + \sigma_{a(q)} = \gamma z K_a + q K_a = 18.5 \times z \times 0.27 + 20 \times 0.27 = 5z + 5.4$$

c) Donatı düşey aralıklarının belirlenmesi

$$S_v = \frac{T_{mıs}}{\sigma_a G S_k} = \frac{12.09}{(5z + 5.4) \times 1.4}$$

z = 5m için

$$S_v = \frac{12.09}{(5 \times 5.0 + 5.4) \times 1.4} = 0.28 \text{ m}$$

z = 4m için

$$S_v = \frac{12.09}{(5 \times 4.0 + 5.4) \times 1.4} = 0.34 \text{ m}$$

z = 3.0m için

$$S_v = \frac{12.09}{(5 \times 3.0 + 5.4) \times 1.4} = 0.42 \text{ m}$$

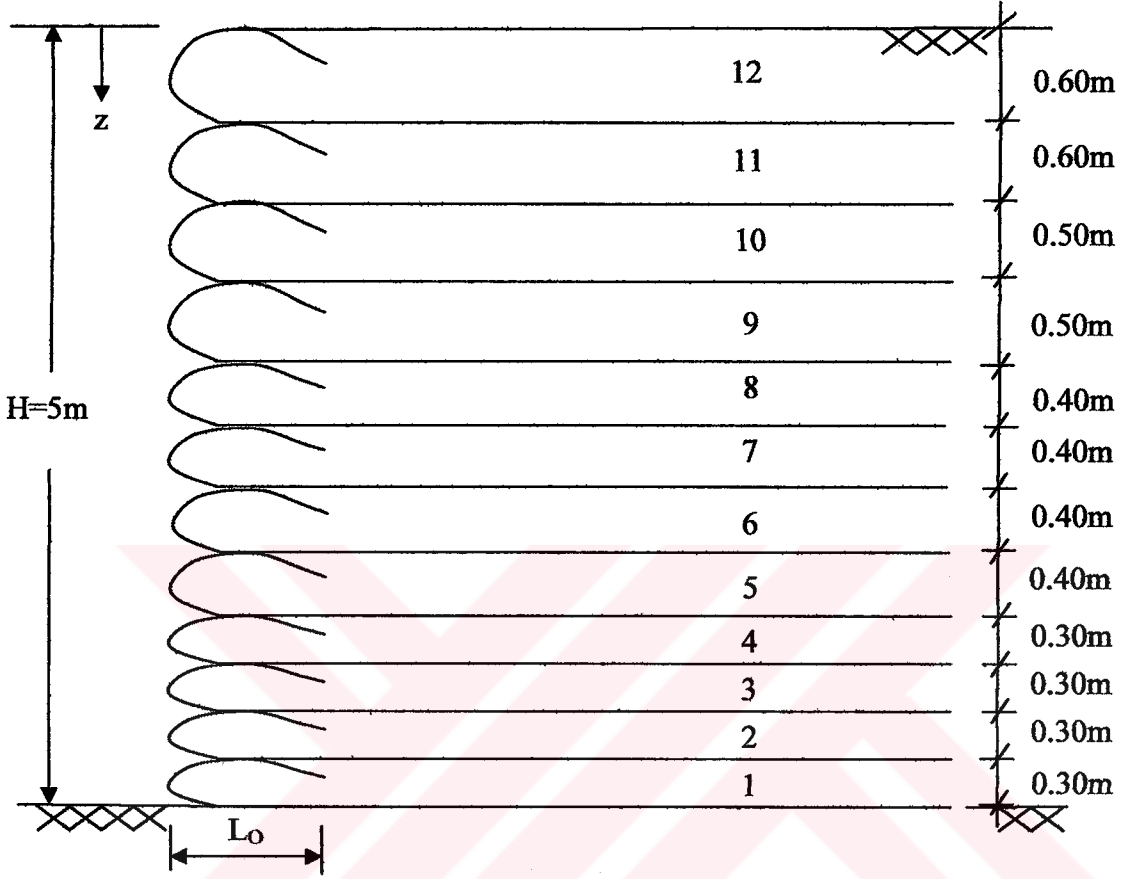
z = 2.0m için

$$S_v = \frac{12.09}{(5 \times 2.0 + 5.4) \times 1.4} = 0.56 \text{ m}$$

z = 1.0m için

$$S_v = \frac{12.09}{(5 \times 1.0 + 5.4) \times 1.4} = 0.83 \text{ m}$$

olarak belirlenir. Hesaplanan bu donatı düşey aralıkları dikkate alınarak seçilen donatı düşey aralıkları şekil 26'da gösterilmektedir.



Şekil 26. Donatı düşey aralıkları

d) Donatı uzunluklarının belirlenmesi

Kayma kaması içi boyu;

$$L_R = (H - z) \tan(45 - \phi/2)$$

$$L_R = (5 - z) \tan(45 - 35/2) = (5 - z) \tan 27.5 = (5 - z) 0.52$$

Ankraj bölgesindeki donatı boyu (efektif boy);

$$L_E = \frac{S_r \sigma_a G S_s}{2(c + \gamma z \tan \delta)}$$

$$L_E = \frac{S_v(5z+5.4) \times 1.4}{2(0+18.5 \times z \times \tan 25)} = \frac{S_v(7z+7.56)}{17.25z}$$

Kıvrım boyu veya bindirme uzunluğu;

$$L_O = \frac{S_v \sigma_a G S_s}{4(c + \gamma z \tan \delta)}$$

$$L_O = \frac{S_v(5z+5.4) \times 1.4}{4(0+18.5 \times z \times \tan 25)} = \frac{S_v(7z+7.56)}{34.5z}$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır. Hesaplanan bütün donatı boyları ve projelendirmede dikkate alınacak donatı boyları tablo 7'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

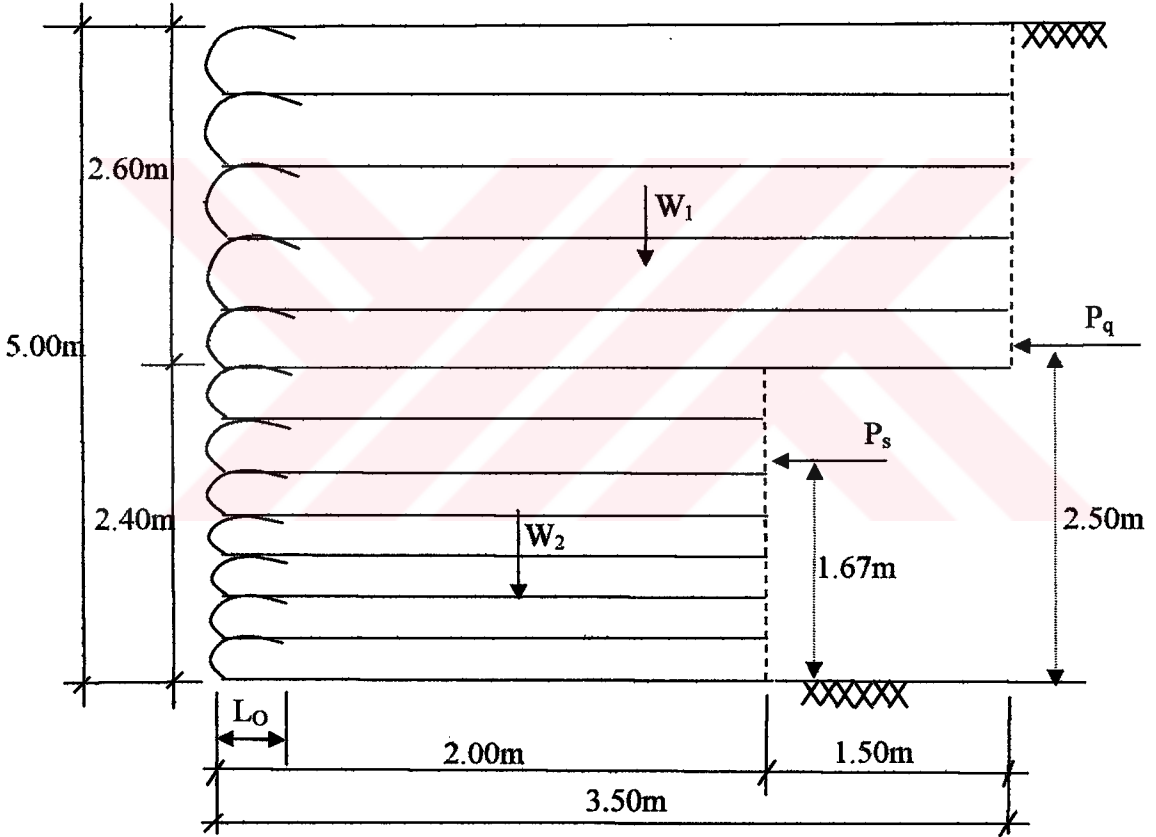
Tablo 7. Geotekstil boyları hesap tablosu

Tabaka no	z (m)	S _v (m)	L _R (m)	L _E (m)	min L _E (m)	L _O (m)	min L _O (m)	L (m)	L _{tasarım} (m)
12	0.60	0.60	2.29	0.68	1.00	0.34	1.00	3.29	3.50
11	1.20	0.60	1.98	0.46	1.00	0.23	1.00	2.98	3.50
10	1.70	0.50	1.72	0.33	1.00	0.17	1.00	2.72	3.50
9	2.20	0.50	1.46	0.30	1.00	0.15	1.00	2.46	3.50
8	2.60	0.40	1.25	0.23	1.00	0.12	1.00	2.25	3.50
7	3.00	0.40	1.04	0.22	1.00	0.11	1.00	2.04	2.00
6	3.40	0.40	0.83	0.21	1.00	0.11	1.00	1.83	2.00
5	3.80	0.40	0.62	0.21	1.00	0.11	1.00	1.62	2.00
4	4.10	0.30	0.47	0.15	1.00	0.08	1.00	1.47	2.00
3	4.40	0.30	0.31	0.15	1.00	0.08	1.00	1.31	2.00
2	4.70	0.30	0.16	0.15	1.00	0.08	1.00	1.16	2.00
1	5.00	0.30	0.00	0.15	1.00	0.08	1.00	1.00	2.00

Tablo 7'de görülebileceği gibi kıvrım boyu L_O en üstteki tabakada (z=0.60m) maksimumdur ve z=0.60m için kıvrım boyu L_O=0.34m olarak bulunmuştur. Projelendirmede dikkate alınacak minimum kıvrım boyu 1m olduğundan bütün tabakalarda

bu boy 1m olarak alınmıştır. Aynı şekilde ankraj bölgesindeki donatı boyu L_E en üstteki tabakada ($z=0.60m$) maksimumdur ve $z=0.60m$ için ankraj bölgesindeki donatı boyu $L_E=0.68m$ olarak bulunmuştur. Projelendirmede dikkate alınacak ankraj bölgesindeki minimum donatı boyu da 1m olduğundan bütün tabakalarda bu boy 1m olarak alınmıştır. Kayma kaması içi boyu L_R de belirlendikten sonra toplam donatı boyu $L=L_R+L_E$ ifadesiyle hesaplanmış ve buna bağlı olarak projelendirmede kullanılacak toplam donatı boyu belirlenmiştir.

Hesaplanan donatı düşey aralıklarına göre belirlenen donatı boyları ve yatay basınçların etkisi şekil 27'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 27. Donatı uzunlukları ve etkiyen yatay basınçlar

e) Dış stabilite analizleri

Getekstil donatılı zemin istinat duvarının iç stabilite analizi yapıldıktan sonra dış stabilite analizleri de yapılarak yapının bir bütün olarak dengesi araştırılmaktadır. Dış stabilite analizlerinde klasik istinat duvarlarında olduğu gibi kayma, devrilme ve taban basıncı denetimleri yapılmaktadır.

- Kayma denetimi:

Burada donatılı kütlenin yanal toprak itkilerinin etkisiyle en alt donatı üzerinde kaymaması için denetimler yapılmaktadır. Hesaplanan güvenlik sayısı yeterli değilse donatı boyları uzatılarak minimum güvenliği sağlayacak donatı boyu belirlenmeye çalışılır.

Kaymaya karşı koyan kuvvetlerin belirlenmesi:

$$W_1 = \gamma H_1 L_1 + q L_1 = 18.5 \times 2.60 \times 3.50 + 20 \times 3.50 = 238.35 \text{ kN/m}$$

$$W_2 = \gamma H_2 L_2 = 18.5 \times 2.40 \times 2.00 = 88.8 \text{ kN/m}$$

Temel zemininde, zemin ile donatı arasındaki sürtünme açısı $\delta = \frac{2}{3}\phi$ olarak, temel zemini kohezyonlu olduğundan kohezyon değeri de $c' = 0.8c$ olarak dikkate alınmıştır. Buna göre $\delta = \frac{2}{3}30 = 20^\circ$ ve $c' = 0.8 \times 40 = 32 \text{ kN/m}^2$ olmaktadır. Bu durumda donatılı zemin duvarın kaymasına karşı koyan kuvvet şöyle hesaplanır.

$$T_f = (W_1 + W_2) \tan \delta + c' L_2 = (238.35 + 88.8) \tan 20 + 32 \times 2.0 = 183.07 \text{ kN/m}$$

Kaydırmaya çalışan kuvvetlerin belirlenmesi:

Zeminden (dolgu) ve sürşarjdan dolayı oluşan aktif kuvvetler şöyle hesaplanır:

$$P_s = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a = \frac{1}{2} 18.5 \times 5^2 \times 0.27 = 62.44 \text{ kN/m}$$

$$P_q = q H K_a = 20 \times 5 \times 0.27 = 27 \text{ kN/m}$$

Buna göre kaydırmaya çalışan kuvvet şöyle belirlenir:

$$T = P_a = P_s + P_q = 62.44 + 27 = 89.44 \text{ kN/m}$$

Bu durumda kaymaya karşı güvenlik sayısı:

$$GS_{\text{kayma}} = \frac{T_f}{T} = \frac{183.07}{89.44} = 2.05 > 1.50$$

olduğundan yapı kaymaya karşı güvenlidir.

- Devrilme denetimi:

Burada donatılı kütlelin yanal toprak itkilerinin etkisiyle devrilmeye karşı stabilitesi araştırılır. Yine hesaplanan güvenlik sayısı yeterli değilse donatı boyları uzatılarak minimum güvenliği sağlayacak donatı boyu belirlenmeye çalışılır.

Devrilmeye karşı koyan momentlerin belirlenmesi:

$$M_R = W_1x_1 + W_2x_2 = [(2.60 \times 3.5 \times 18.5 + 20 \times 3.5) \times 1.75 + (2.40 \times 2.0 \times 18.5) \times 1.0] \\ = 417.11 + 88.8 = 505.91 \text{ kN m}$$

Devirmeye çalışan momentlerin belirlenmesi:

$$M_O = P_s \frac{H}{3} + P_q \frac{H}{2} = 62.44 \times 1.67 + 27 \times 2.5 = 171.77 \text{ kN m}$$

Bu durumda devrilmeye karşı güvenlik sayısı:

$$GS_{devrilme} = \frac{M_R}{M_O} = \frac{505.91}{171.77} = 2.95 > 2$$

olduğundan yapı devrilmeye karşı güvenlidir.

- Taşıma gücü denetimi:

Dış stabilize analizlerinde son olarak taban basıncı denetimleri yapılmıştır. Burada donatılı yapıdan zemine iletilen yüklerin temel zemini tarafından güvenli şekilde karşılanabilmesi gerekmektedir. Yine gerekli güvenlik şartlarının sağlanamaması durumunda donatı boyları artırılarak donatı boyları uzatılarak minimum güvenliği sağlayacak donatı boyu belirlenmeye çalışılır.

Taşıma gücü denetiminde yapıya etkileyen bütün kuvvetler donatılı duvar tabanının orta noktasına taşınır. Buna göre yapıya etkileyen kuvvetler ve orta noktaya olan uzaklıklar aşağıdaki gibidir:

$$\begin{array}{ll} W_1 = 238.35 \text{ kN/m} & x_1 = 0.75 \text{ m} \\ W_2 = 88.8 \text{ kN/m} & x_2 = 0 \text{ m} \\ P_s = 62.44 \text{ kN/m} & x_3 = 1.67 \text{ m} \\ P_q = 27 \text{ kN/m} & x_4 = 2.5 \text{ m} \end{array}$$

Bu durumda toplam düşey kuvvet:

$$R_v = W_1 + W_2 = 238.35 + 88.8 = 327.15 \text{ kN/m}$$

Yapının orta noktasına göre toplam moment:

$$\sum M = -62.44 \times 1.67 - 27 \times 2.5 + 238.35 \times 0.75 = 7 \text{ kN m}$$

olmaktadır. Duvar tabanındaki eksantrisite:

$$e = \frac{\sum M}{R_v} = \frac{7}{327.15} = 0.02 \text{ m} < L / 6 = 2 / 6 = 0.33 \text{ m}$$

olduğundan eksantrisite çekirdek bölgesi içinde kalmaktadır ve çekme gerilmesi oluşmamaktadır. Bu durumda duvar tabanında zeminden kopma veya ayrılma tehlikesi yoktur. Son olarak yapı tabanındaki maksimum ve minimum gerilmeler hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{\max} = \frac{R_v}{L_2} \left(1 + \frac{6e}{L_2} \right) = \frac{327.15}{2.0} \left(1 + \frac{6 \times 0.02}{2.0} \right) = 173.39 \text{ kN/m}^2 < 200 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{\min} = \frac{R_v}{L_2} \left(1 - \frac{6e}{L_2} \right) = \frac{327.15}{2.0} \left(1 - \frac{6 \times 0.02}{2.0} \right) = 153.76 \text{ kN/m}^2 > 0 \text{ kN/m}^2$$

olduğundan zeminin taşıma gücü açısından da bir problem bulunmamaktadır.

Klasik geoteknik prensipleriyle yapılan dış stabilite analizlerinden sistemin stabil olduğu görülmüştür. Sonuç olarak bir miktar fazla seçilen geotekstil donatı boyları stabilite yönünden yeterince emniyetlidir.

2.3. Geogrid Donatılı Zemin İstinat Duvarı ile Betonarme Konsol İstinat Duvarının Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde aynı yüklemelere maruz, aynı yüksekliğe, dolgu ve temel zemini özelliklerine sahip bir betonarme konsol istinat duvarı ile geogrid donatılı zemin istinat duvarı tasarımı yapılarak maliyet unsurları üzerinde etkili olan parametreler dikkate alınıp maliyet karşılaştırması yapılmıştır (Çalışmanın (1.5.3) bölümünde MSE duvarlar için maliyet unsurları ayrıntılı olarak açıklanmıştır.). Bilindiği üzere donatılı zemin istinat duvarı direkt olarak zemin yüzeyine inşa edilebilmektedir. Fakat betonarme konsol istinat duvarı için genellikle 1m civarında temel derinliği gerekmektedir. Bu nedenle malzeme, kazı ve dolgu miktarı artmaktadır.

Daha önce yapılan çalışmalar tipik toplam maliyetin; genellikle yükseklik, donatı malzemesi ve seçilmiş dolgu malzemesi maliyetinin bir fonksiyonu olduğunu ortaya koyduğundan her iki duvar tipi için maliyet analizinde temel olarak donatı malzemesi, dolgu malzemesi ve ön yüz kaplama elemanları gibi maliyet üzerinde birinci dereceden etkili olan parametreler ile kalıp, kalıp iskelesi ve taban betonu gibi geçici ve daimi uygulamaları içeren faktörler göz önüne alınmıştır. Maliyet analizindeki bu bileşenlerin çoğu işgücü maliyetini içermekte olup duvar inşaatlarının yapıldığı yerin ulaşım mesafesi belli olmadığından bu çalışmada nakliye maliyeti her iki duvar tipi için de dikkate alınmamıştır. Geogrid donatılı zemin istinat duvarında, duvarı ultraviyole ışınları vb. etkilere karşı korumak amacıyla ön yüz kaplama elemanı olarak püskürtme beton uygulanmıştır.

Her iki duvar tipi için toplam maliyet belirlenirken Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın 2005 yılında yayınlamış olduğu birim fiyat listeleri kullanılmıştır. Fakat Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın birim fiyat listelerinde olmadığından ön yüz kaplama elemanı olarak kullanılan püskürtme betonu uygulaması için Türkiye Cumhuriyeti Karayolları'na ait birim fiyat listesi kullanılmıştır. Geogrid donatı için ise bu birim fiyat listelerinde yer olmadığından dolar bazlı fiyatlar dikkate alınmıştır. Şunu belirtmek gerekir ki; geosentetik donatıların çekme gerilmelerine, üretildiği hammaddeye, üretim yerine ve taşınma maliyetine bağlı olarak fiyatlarının değişebilirliğinden ve toplam maliyetin de birçok faktörün fonksiyonu olmasından ötürü tam ve kesin bir toplam maliyetin belirlenebilmesi mümkün olmamaktadır. Fakat yapılan bu maliyet analizi ve betonarme konsol istinat duvarı ile karşılaştırılması MSE duvarlarının ekonomisi hakkında bir fikir vermektedir.

2.3.1. Betonarme Konsol İstinat Duvarının Analizi

Betonarme konsol istinat duvarı için öngörülen ilk boyutların stabilite yönünden uygun olduğu kontroller sonucu anlaşıldıktan sonra, istinat duvarının her bir elemanının yapısal çözümlemesi ve betonarme hesapları yapılmıştır. Betonarme istinat duvarlarının kırılma ve büyük çatlaklara karşı emniyetinin sağlanması için bu elemanlarda kesit zorlarının en olumsuz değerleri hesap edilmiştir.

Bir konsol istinat duvarı gövde ve taban olmak üzere iki taşıyıcı elemandan oluşmaktadır. Bunlardan tabanı da ön ve arka çıkma (ampatman) diye ikiye ayırmak mümkündür.

Gövde plağı tabana ankastre bir düşey konsol olarak dikkate alınmakta ve gövdede çekme gerilmeleri zemin itkileri nedeniyle arka yüzde oluşacağından ana donatı arka yüzde bulunmaktadır.

Ön ampatman gövde ön yüzüne ankastre bir konsol plak olarak göz önüne alınır. Ön ampatmanla ilgili kesit zoru değerleri, yukarıya doğru etkileyen zemin tepkisinden kendi ağırlığı ve varsa üzerindeki zemin ağırlığı çıkarılarak bulunan yüke göre hesaplanır. Ön ampatmanda çekme gerilmeleri alt yüzde oluşacağından ana donatı alt yüzde bulunur.

Arka ampatman ise gövde arka yüzüne ankastre bir konsol plak olarak göz önüne alınır. Arka ampatman, yukarıya doğru yönelmiş zemin tepkisi, kendi ağırlığı ve üzerindeki büyük zemin ağırlığının etkisinde olduğundan kesit zorları bu yüklere göre hesaplanır. Arka ampatmanda çekme gerilmeleri üst yüzde oluşacağından ana donatı üst yüzde bulunur.

Bütün bu elemanlardaki yüklere göre, birim duvar boyu için boyutlandırmaya esas olan kesit zorları bulunduktan sonra elemanların betonarme hesabı ve donatının belirlenmesi bir metre genişlikli dikdörtgen kesit olarak yapılır. Diğer doğrultuda ana donatının beşte biri kadar dağıtma donatısı konulmalıdır. Ayrıca gövde ön yüzüne sıcaklık değişmesi ve rötre etkilerini karşılamak amacıyla ve zemindeki belirsizliklerden dolayı yardımcı donatı konulmaktadır [54].

2.3.1.1. Betonarme Konsol İstinat Duvarı Tasarımı

Ön bilgiler:

Duvar yüksekliği = $H = 7\text{m}$

Sürşarj yükü = $q = 15\text{ kN/m}^2$

Dolgu zemini özellikleri: $\gamma_1 = 18 \text{ kN/m}^3$, $\phi_1 = 32^\circ$, $c_1 = 0 \text{ kN/m}^2$

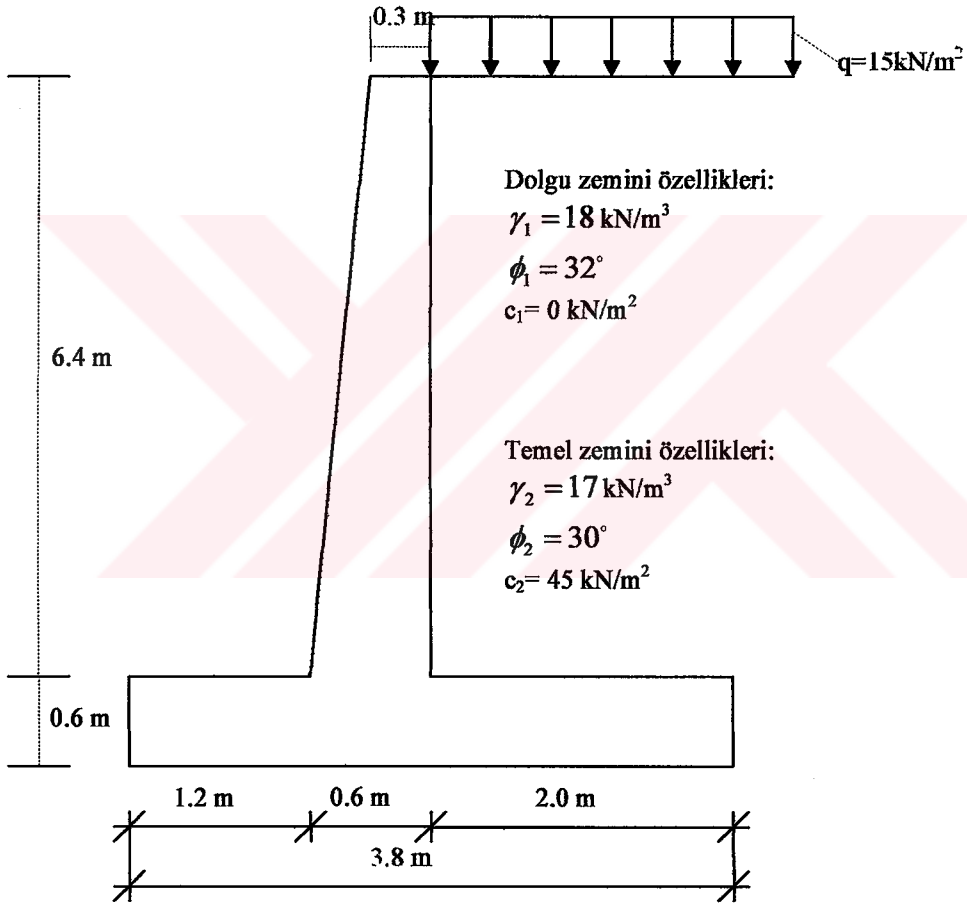
Temel zemini özellikleri: $\gamma_2 = 17 \text{ kN/m}^3$, $\phi_2 = 30^\circ$, $c_2 = 45 \text{ kN/m}^2$

Malzeme özellikleri: C20 / S420, $\gamma_{\text{betonarme}} = 24 \text{ kN/m}^3$

Zemin emniyet gerilmesi = $\sigma_{z,em} = 350 \text{ kN/m}^2$

Pasif etki ihmal edilmektedir.

Bütün bu veriler ışığında tasarıma esas olan betonarme istinat duvarının enkesiti şekil 28'de görülmektedir.



Şekil 28. Betonarme konsol istinat duvarının enkesiti

- Aktif toprak basıncı katsayısının, aktif toprak basınçlarının ve aktif kuvvetlerin elde edilmesi:

$$K_a = \tan^2(45 - \phi/2) = \tan^2(45 - 32/2) = 0.307$$

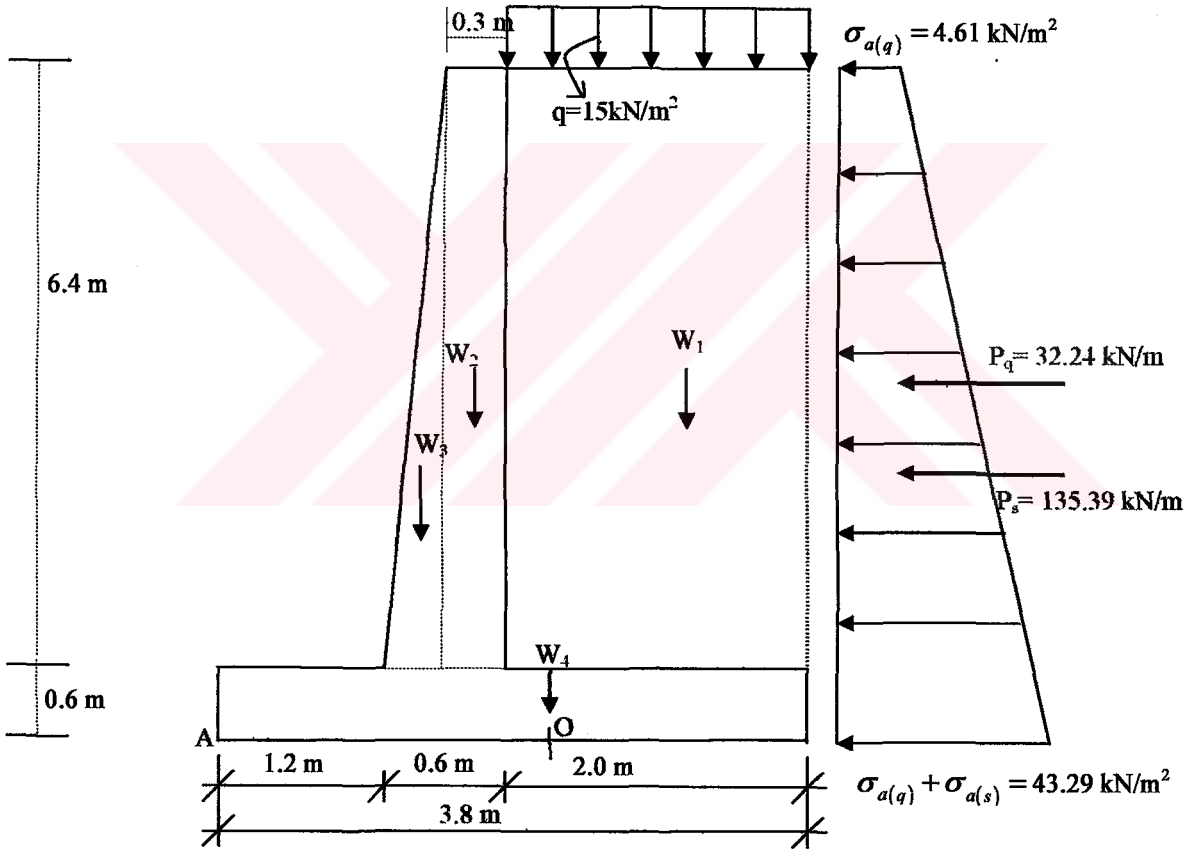
$$\sigma_{a(q)} = qK_a = 15 \times 0.307 = 4.61 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{a(s)} = \gamma HK_a = 18 \times 7 \times 0.307 = 38.68 \text{ kN/m}^2$$

$$P_q = qHK_a = 15 \times 7 \times 0.307 = 32.24 \text{ kN/m}$$

$$P_s = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a = \frac{1}{2} \times 18 \times 7^2 \times 0.307 = 135.39 \text{ kN/m}$$

Hesaplanan bu yatay basınçlar ve kuvvetler şekil 29'da gösterilmektedir.



Şekil 29. Betonarme konsol istinat duvarına etkiyen aktif basınçlar ve aktif kuvvetler

- Zemin ve duvar ağırlıklarının belirlenmesi:

$$W_1 = 6.4 \times 2.0 \times 18 + 15 \times 2 = 260.4 \text{ kN/m}$$

$$W_2 = 0.3 \times 6.4 \times 24 = 46.08 \text{ kN/m}$$

$$W_3 = \frac{1}{2} \times 0.3 \times 6.4 \times 24 = 23.04 \text{ kN/m}$$

$$W_4 = 0.6 \times 3.8 \times 24 = 54.72 \text{ kN/m}$$

2.3.1.2. Betonarme Konsol İstinat Duvarının Stabilité Analizleri

- Kayma denetimi:

Kaymaya karşı koyan kuvvetlerin belirlenmesi:

Temel zemininde, zemin ile duvar arasındaki sürtünme açısı $\delta = \frac{2}{3}\phi$ olarak (TS 498'e [55]

göre beton yüzeyler pürüzlü kabul edildiğinden $\delta = \frac{2}{3}\phi$ olarak alınabilir.), temel zemini

kohezyonlu olduğundan kohezyon değeri de $c' = 0.67c$ olarak dikkate alınmıştır. Buna

göre $\delta = \frac{2}{3}30 = 20^\circ$ ve $c' = 0.67 \times 45 = 30.15 \text{ kN/m}^2$ olmaktadır. Bu durumda betonarme

konsol istinat duvarının kaymasına karşı koyan kuvvet şöyle hesaplanır.

$$T_f = (W_1 + W_2 + W_3 + W_4) \tan \delta + c'B = 384.24 \times \tan 20 + 30.15 \times 3.8 = 254.42 \text{ kN/m}$$

Kaydırmaya çalışan kuvvetlerin belirlenmesi:

$$T = P_a = P_s + P_q = 135.39 + 32.24 = 167.63 \text{ kN/m}$$

Bu durumda kaymaya karşı güvenlik sayısı:

$$GS_{\text{kayma}} = \frac{T_f}{T} = \frac{254.42}{167.63} = 1.52 > 1.5$$

olduğundan yapı kaymaya karşı güvenlidir.

- Devrilme denetimi:

Devirmeye çalışan momentlerin belirlenmesi:

Şekil 29'daki A noktası etrafında duvarı devirmeye çalışan momentler şunlardır:

$$M_o = P_s \frac{H}{3} + P_q \frac{H}{2} = 135.39 \times 2.33 + 32.24 \times 3.5 = 428.30 \text{ kNm}$$

Devrilmeye karşı koyan momentlerin belirlenmesi:

Şekil 29'daki A noktası etrafına duvarın devrilmesine karşı koyan kuvvetler, moment kolları ve moment değerleri tablo 8'de gösterilmektedir.

Tablo 8. Devrilmeye karşı koyan kuvvetler ve moment değerleri

KISIM	AĞIRLIK(kN/m)	MOMENT KOLU(m)	MOMENT(kNm)
W ₁	260.4	2.80	729.12
W ₂	46.08	1.65	76.03
W ₃	23.04	1.40	32.26
W ₄	54.72	1.90	103.97

Tablo 8'e göre devrilmeye karşı koyan momentler toplamı:

$$M_R = 729.12 + 76.03 + 32.26 + 103.97 = 941.38 \text{ kNm}$$

olmaktadır. Buna göre devrilmeye karşı güvenlik sayısı:

$$GS_{devrilme} = \frac{M_R}{M_O} = \frac{941.38}{428.30} = 2.20 > 2.0$$

olduğundan yapı devrilmeye karşı güvenlidir.

- Taşıma gücü denetimi:

Taşıma gücü denetiminde yapıya etkiyen bütün kuvvetler donatılı duvar tabanının orta noktasına taşınır. Buna göre istinat duvarı tabanının orta noktası olan O noktasına göre toplam moment aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sum M = 32.24 \times 3.5 + 135.39 \times 2.33 - 260.4 \times 0.9 + 46.08 \times 0.25 + 23.04 \times 0.5$$

$$= 216.98 \text{ kNm}$$

Toplam düşey kuvvet ise;

$$R_v = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 260.4 + 46.08 + 23.04 + 54.72 = 384.24 \text{ kN/m}$$

olmaktadır. Bu durumda eksantrisite:

$$e = \frac{\sum M}{R_v} = \frac{216.98}{384.24} = 0.56 \text{ m} < B / 6 = 3.8 / 6 = 0.63 \text{ m}$$

olduğundan eksantrisite çekirdek bölgesi içinde kalmaktadır ve çekme gerilmesi oluşmamaktadır. Bu durumda duvar tabanında zeminden kopma veya ayrılma tehlikesi yoktur. Son olarak istinat duvarı tabanındaki maksimum ve minimum gerilmeler;

$$\sigma_{z,\max} = \frac{R_v}{B.L} + \frac{\sum M}{W} \quad (27)$$

$$\sigma_{z,\min} = \frac{R_v}{B.L} - \frac{\sum M}{W} \quad (28)$$

formülleriyle hesaplanmaktadır. Burada $B = 3.8\text{m}$, $L = 1\text{m}$ olup, mukavemet momenti de;

$$W = \frac{L \times B^2}{6} = \frac{1 \times 3.8^2}{6} = 2.407 \text{ m}^3$$

olarak belirlenmektedir. Buna göre;

$$\sigma_{z,\max} = \frac{384.24}{3.8 \times 1} + \frac{216.98}{2.407} = 191.26 \text{ kN/m}^2 < \sigma_{z,em} = 350 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{z,\min} = \frac{384.24}{3.8 \times 1} - \frac{216.98}{2.407} = 10.97 \text{ kN/m}^2 > 0 \text{ kN/m}^2$$

olduğundan zeminin taşıma gücü açısından da bir sorun bulunmamaktadır.

2.3.1.3. Betonarme Konsol İstinat Duvarının Yapısal Çözümlemesi

Çalışmanın bu bölümünde stabilite yönünden herhangi bir problemi olmayan istinat duvarının betonarme kesit hesaplarının yapılabilmesi için kritik kesitlerdeki kesit zorları ve buna bağlı olarak yapıya etkiyen moment ve kesme kuvveti değerleri belirlenecektir. Buna göre kritik kesitlerdeki kesit zorları:

Ön ampatmanda $a_1 = 1.20 \text{ m}$ için:

$$\sigma_{z,1} = 191.26 - \frac{(191.26 - 10.97)}{3.80} \times 1.20 = 134.33 \text{ kN/m}^2$$

olmaktadır. Ön ampattan için bu zemin tepkisinden kendi ağırlığı olan

$$\sigma_{g,\text{ön}} = 0.60 \times 24 = 14.4 \text{ kN/m}^2$$

değeri çıkarılacaktır. Bilindiği gibi ön yüzdeki zemin ağırlığı ihmal edilmektedir.

Arka ampattanda $a_2 = 2.0$ m için:

$$\sigma_{z,2} = 10.97 + \frac{(191.26 - 10.97)}{3.80} \times 2.0 = 105.86 \text{ kN/m}^2$$

olmaktadır. Arka ampattanda ise kendi ağırlığı + dolgu ağırlığı + sürüşarj etkisi olan

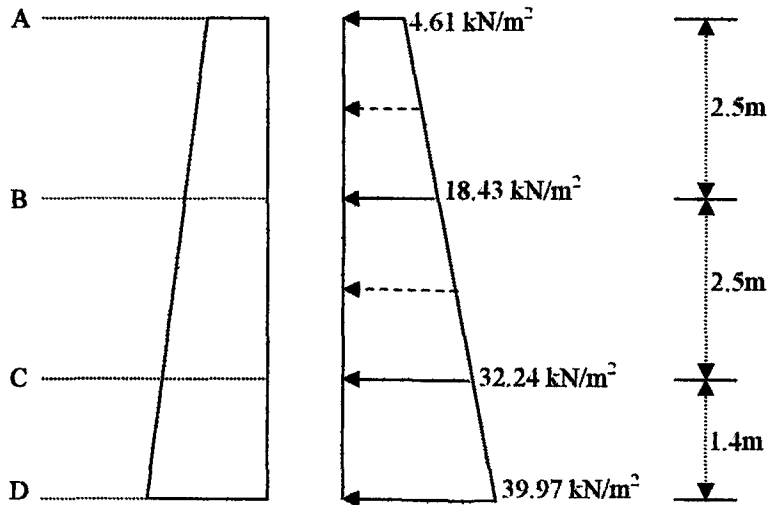
$$\sigma_{g,\text{arka}} = 0.60 \times 24 + 6.4 \times 18 + 15 = 144.6 \text{ kN/m}^2$$

değerinden zemin tepkisi çıkarılacaktır.

Gövdede $a_3 = 6.40$ m için:

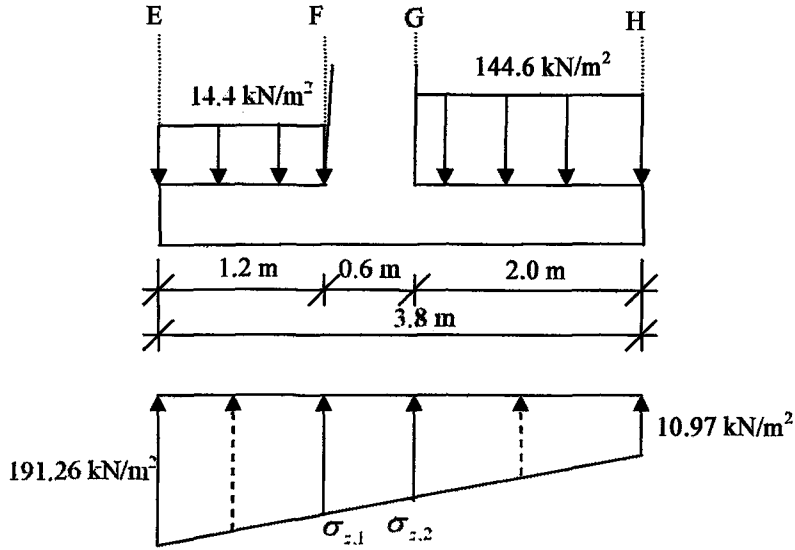
$$\sigma_a = 18 \times 6.4 \times 0.307 + 15 \times 0.307 = 39.97 \text{ kN/m}^2$$

olmaktadır. İstinat duvarı gövdesine etkiyen basınç dağılımı şekil 30'daki gibi olmaktadır.



Şekil 30. İstinat duvarı gövdesine etkiyen yatay toprak basınçları

İstinat duvarı tabanına etkiyen gerilmeler ise şekil 31’de gösterilmektedir.



Şekil 31. İstinat duvarı tabanına etkiyen gerilmeler

Duvar tabanına etkiyen net gerilmeler ise şöyle hesaplanmaktadır.

$$\sigma_E = 191.26 - 14.4 = 176.86 \text{ kN/m}^2 \text{ (yukarı yönlü)}$$

$$\sigma_F = 134.33 - 14.4 = 119.93 \text{ kN/m}^2 \text{ (yukarı yönlü)}$$

$$\sigma_G = 105.86 - 144.6 = -38.74 \text{ kN/m}^2 \text{ (aşağı yönlü)}$$

$$\sigma_H = 10.97 - 144.6 = -133.63 \text{ kN/m}^2 \text{ (aşağı yönlü)}$$

Betonarme kesit hesaplarında ortalama bir yük katsayısı kullanılmıştır. TS 500’e [56] göre yanal zemin itkisinin bulunduğu durumlarda sabit ve hareketli yüklere ek olarak zemin itkisi değerinin 1.60 ile çarpılması öngörülmüştür. Sabit yüklerin 1.40, hareketli yüklerin ise 1.60 ile çarpıldığı düşünülürse güvenli tarafta kalarak hepsinin içinde bulunduğu bir durumda yük katsayısı üst sınır olan 1.60 olarak alınacaktır. Buna göre tasarım kesit zorları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Ön ampatmanda $a_1 = 1.20$ m için

Kesme kuvveti:

$$V_F = 1.60 \times \left(\frac{176.86 + 119.93}{2} \right) \times 1.20 = 284.92 \text{ kN}$$

Moment:

$$M_F = 1.60 \times (2 \times 176.86 + 119.93) \times \frac{(1.20)^2}{6} = 181.88 \text{ kNm}$$

Arka ampatmanda $a_2 = 2.0$ m için

Kesme kuvveti:

$$V_G = 1.60 \times \left(\frac{133.63 + 38.74}{2} \right) \times 2.0 = 275.79 \text{ kN}$$

Moment:

$$M_G = 1.60 \times (2 \times 133.63 + 38.74) \times \frac{(2.0)^2}{6} = 326.40 \text{ kNm}$$

Gövdede $a_3 = 6.40$ m için

Kesme kuvveti:

$$V_D = 1.60 \times \left(\frac{4.61 + 39.97}{2} \right) \times 6.4 = 228.25 \text{ kN}$$

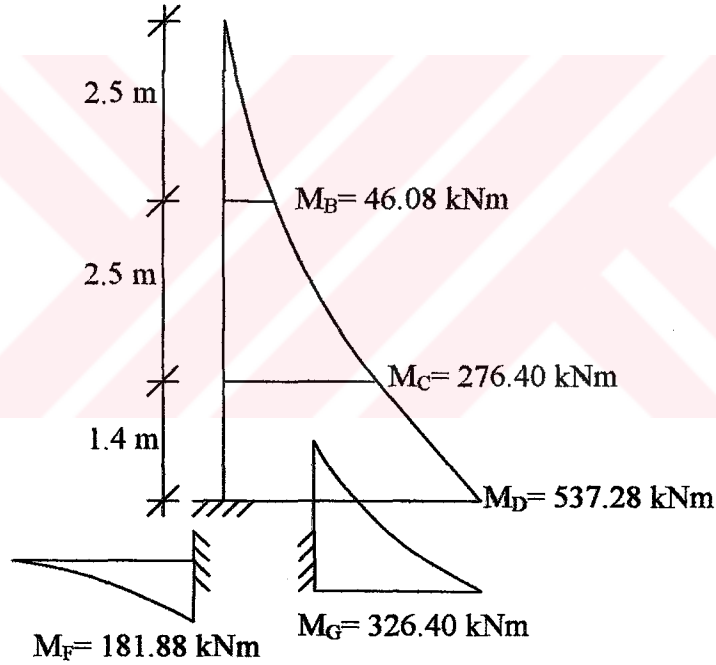
Moment:

$$M_D = 1.60 \times (2 \times 4.61 + 39.97) \times \frac{(6.4)^2}{6} = 537.28 \text{ kNm}$$

Hesaplanan bu tasarım kesit zorları ile diğer kısımlardaki moment ve kesme kuvveti değerleri tablo 9'da gösterilmektedir.

Tablo 9. Moment ve kesme kuvveti değerleri

KISIM	KESME KUVVETİ (kN)	MOMENT (kNm)
A	0	0
B	46.08	46.08
C	147.40	276.40
D	228.25	537.28
E	0	0
F	284.92	181.88
G	275.79	326.40
H	0	0



Şekil 32. Betonarme konsol istinat duvarının moment diyagramı

2.3.1.4. Betonarme Konsol İstinat Duvarının Betonarme Kesit Hesapları

Çalışmanın bu bölümünde hesaplanan moment değerlerine göre donatı hesabı yapılmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi bu betonarme hesap ve donatı belirlenmesi 1m genişlikli dikdörtgen kesit olarak yapılmaktadır ve beton sınıfı ile kullanılan donatı sınıfına bağlı olarak çeşitli çizelgelerden alınan katsayılarla göre hesaplar gerçekleştirilmektedir. Beton ve çelik sınıfına bağlı olarak belirlenen dikdörtgen basınç

bölge kesitler için katsayılar ek tablo 1’de verilmektedir. Burada betonarme hesaplar için standartlarda verilen sınırlamalara tümüyle uyulduğunu belirtmek gerekmektedir. Moment ve katsayı değerlerine bağlı olarak hesaplanan donatı alanları ve seçilen donatılar tablo 10’da sunulmaktadır.

Tablo 10. Betonarme hesap tablosu

Kısım	Moment (kNm)	Moment (tcm)	b / h (cm/cm)	$K=bd^2/M$ (cm ² /t)	k_s (cm ² /t)	A_s (cm ²)	Seçilen donatı
B	46.08	460.8	100/42	281.25	0.2823	3.61	ϕ 10/20 (3.93cm ²)
C	276.40	2764	100/53	79.92	0.2930	17.23	ϕ 16/10 (20.11cm ²)
D	537.28	5372.8	100/60	54.27	0.3020	30.05	ϕ 20/10 (31.41cm ²)
F	181.88	1818.8	100/60	160.33	0.2855	9.62	ϕ 16/20 (10.05cm ²)
G	326.40	3264	100/60	89.34	0.2913	17.61	ϕ 16/10 (20.11cm ²)

Tablodan da görülebileceği gibi moment değerine, beton sınıfına ve çelik sınıfına bağlı olarak donatı alanları belirlenmektedir. Hesaplanan donatı alanlarına göre ek tablo 2’den yararlanarak donatılar seçilmektedir. Tabloda, beton sınıfına bağlı olan katsayı, K;

$$K = \frac{b.d^2}{M} \quad (29)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Burada ‘b’genişlik, ‘d’ faydalı yüksekliktir. Faydalı yükseklik; duvar kalınlığı ‘h’ ve paspayı ‘d’ ye bağlı olarak:

$$d = h - d' \quad (30)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Bu uygulamada paspayı 6 cm olarak alınmıştır. Donatı sınıfına bağlı katsayı olan ‘ k_s ’ ise ‘K’ değerinden hareketle ve ara değerler için enterpolasyon uygulanarak belirlenmektedir. Son olarak donatı alanları:

$$A_s = \frac{k_s M}{d} \quad (31)$$

ifadesiyle hesaplanmakta ve donatılar seçilmektedir.

TS 500 standardında betonarme duvarların iki yüzündeki yatay ve düşey donatı alanlarının toplamının, duvar tüm kesitinin 0.0015’inden az olmaması öngörülmektedir.

Ayrıca düşey ve yatay donatı aralıkları da duvar kalınlığının 1.5 katından ve 300 mm'den fazla olamamaktadır. Buna göre minimum donatı alanları:

$h = 42$ cm için:

$$A_{s \min} = 0.0015 \times 100 \times 42 = 6.30 \text{ cm}^2$$

$h = 53$ cm için:

$$A_{s \min} = 0.0015 \times 100 \times 53 = 7.95 \text{ cm}^2$$

$h = 60$ cm için:

$$A_{s \min} = 0.0015 \times 100 \times 60 = 9 \text{ cm}^2$$

olarak belirlenmektedir. Görüldüğü gibi diğerleri için minimum donatı oranı şartı sağlanmasına rağmen $h = 42$ cm için seçilen ve tabloda gösterilen 3.93 cm^2 donatı alanı minimum donatı şartını sağlamadığı için bu değer $\phi 14/20$ (7.69 cm^2) olarak değiştirilmiştir.

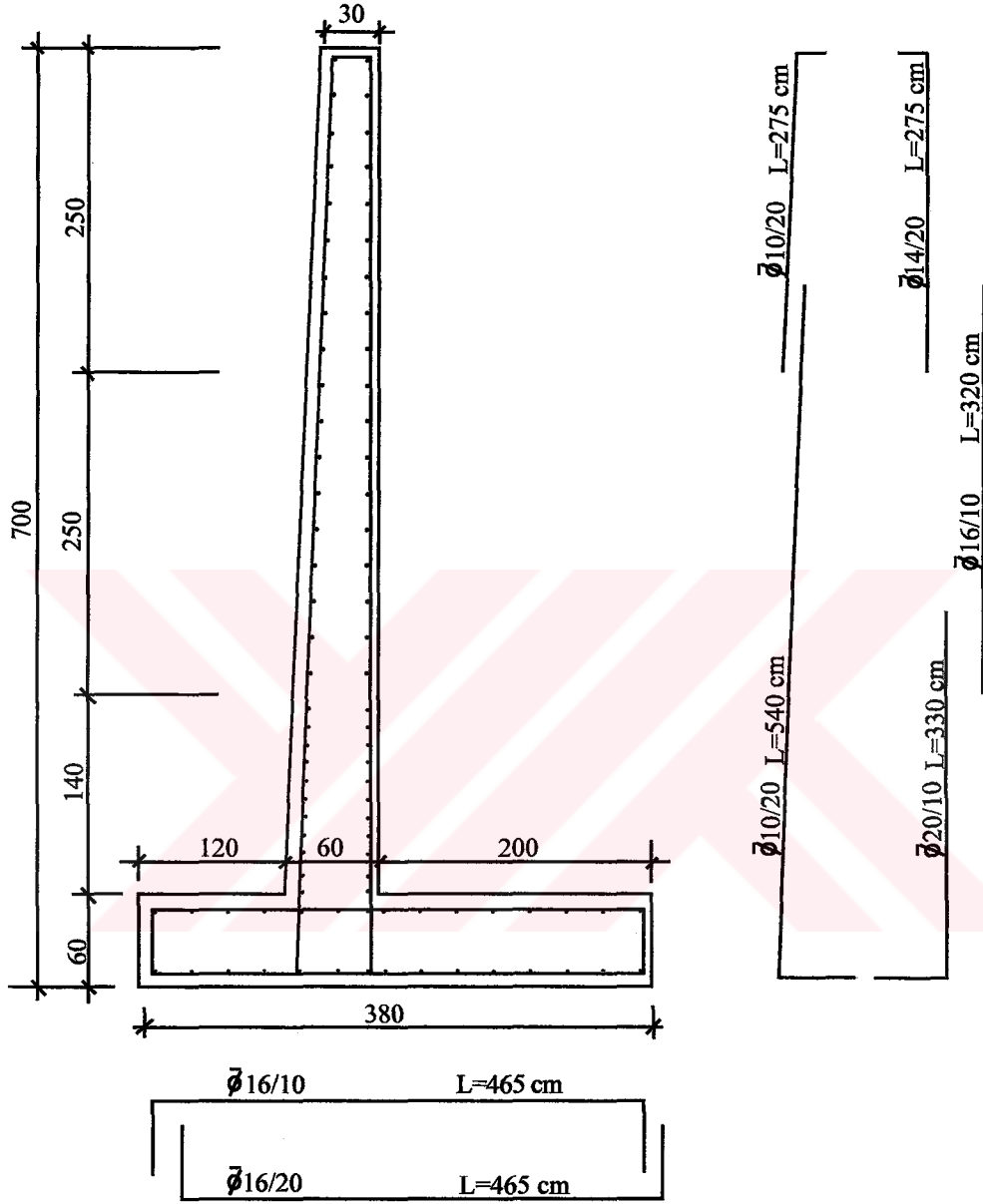
Dağıtma donatılarının hesabı:

Daha önce de vurgulandığı gibi ana donatının beşte biri kadar dağıtma donatısı konulmalıdır. Buna göre hesaplanan ve seçilen dağıtma donatıları tablo 11'de sunulmaktadır.

Tablo 11. Dağıtma donatıları hesabı

Kısım	Hesaplanan donatı (cm^2/m)	Seçilen donatı (cm^2/m)
A-B	$3.61 / 5 = 0.72$	$\phi 10/20$ (3.93)
B-C	$17.23 / 5 = 3.45$	$\phi 10/20$ (3.93)
C-D	$30.05 / 5 = 6.01$	$\phi 10/10$ (7.85)
E-F	$9.62 / 5 = 1.92$	$\phi 10/20$ (3.93)
G-H	$17.61 / 5 = 3.52$	$\phi 10/20$ (3.93)

Ayrıca gövde ön yüzünde ısı ve rötre için yatay ve düşey doğrultularda $\phi 10/20$ ($3.93 \text{ cm}^2/\text{m}$) donatı konulacaktır. Seçilen donatılara göre tasarlanan betonarme konsol istinat duvarının donatı detayı şekil 33'de gösterilmektedir.



Şekil 33. Betonarme konsol istinat duvarının donatı detayı

Kesme güvenliğinin kontrol edilmesi:

$h = 60$ cm, $d = 60 - 6 = 54$ cm, $b = 100$ cm olmak üzere kesmede çatlama dayanımı:

$$V_{cr} = 0.65 f_{ctd} b d \quad (32)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada f_{ctd} , beton tasarım eksenel çekme dayanımı olup beton sınıfına bağlı olarak tablolardan alınmaktadır. Bu değerler ek tablo 3'de verilmektedir. C20 (BS20) beton sınıfında $f_{ctd} = 1$ N/mm² = 1000 kN/m² olmaktadır. Buna göre:

$$V_{cr} = 0.65 \times 1000 \times 1 \times 0.54 = 351 \text{ kN}$$

olarak bulunur. Yapıda meydana gelen en büyük kesme kuvveti $V_{d_{max}} = 284.92$ kN olduğundan ve $V_{d_{max}} = 284.92$ kN < $V_{cr} = 351$ kN şartı sağlandığından kesme güvenliği açısından bir problem bulunmamaktadır.

2.3.1.5. Betonarme Konsol İstinat Duvarının Toplam Maliyetinin Belirlenmesi

Çalışmanın bu bölümünde 1m duvar uzunluğu için ekonomi üzerinde etkili olan parametreler (kazı hacmi, granüler arka dolgu miktarı, kalıp, kalıp iskelesi, kalıp, beton ve donatı miktarı) ayrı ayrı belirlenecektir. Bu miktarlar belirlendikten sonra Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın 2005 yılı birim fiyat listelerindeki birim fiyatları ile çarpılarak maliyeti hesaplanacaktır.

- Kazı hacmi:

Burada yapı inşaatı için sadece temel için düzeltme betonu kazısıyla temel kazısı dikkate alınmaktadır. Bu amaçla 10 cm kalınlığında düzeltme betonu kullanılmaktadır. Şev (2/3) eğimle kazılmaktadır ve 25 cm çalışma payı bırakılmaktadır. Bu amaçla kazı hacmi:

$$V = 1 \times \left[(3.80 + 2 \times 0.25) + (3.80 + 2 \times 0.25 + 2 \times 1 \times 2/3) \right] \times \frac{1}{2} = 4.97 \text{ m}^3/\text{m}$$

olarak belirlenmektedir.

- Düzeltme betonu:

$$V = 3.80 \times 0.10 = 0.38 \text{ m}^3/\text{m}$$

- Sıkıştırılmış granüler dolgu miktarı:

$$V = 6.4 \times 2 = 12.8 \text{ m}^3/\text{m}$$

- Kalıp iskelesi:

$$V = 2 \times \frac{1}{2} [6.4 \times (6.4/2)] + \frac{1}{2} [6.4 \times 0.3] = 21.44 \text{ m}^3/\text{m}$$

- Kalıp:

$$V = 2 \times 6.4 + 2 \times 0.60 = 14 \text{ m}^2/\text{m}$$

- Donatı miktarı:

Betonarme hesap kısmında belirlenen donatılar, donatı uzunluklarına, çaplarına ve birim ağırlıklarına göre değerlendirilip toplam miktarı tablo 12'de sunulmaktadır.

Tablo 12. Donatı miktarı hesabı

Donatı çapı (mm)	Kısım	Seçilen donatı	Adet	Uzunluk (m)	Toplam uzunluk (m)	Birim ağırlık (kg/m)	Toplam ağırlık (kg/m)	Toplam
φ 10	B (sol)	φ 10/20	5	2.75	13.75	0.62	8.525	129.425
	C-D (sol)	φ 10/20	5	5.40	27		16.740	
	Gövde dağıtma	φ 10/20	80	1.40	112		69.440	
		φ 10/10						
	Taban dağıtma	φ 10/20	40	1.40	56	34.720		
φ 14	B (sağ)	φ 14/20	5	2.75	13.75	1.21	16.638	258.913
φ 16	C (sağ)	φ 16/10	10	3.20	32	1.58	50.560	
	F	φ 16/20	5	4.65	23.25		36.735	
	G	φ 16/10	10	4.65	46.5		73.470	
φ 20	D (sağ)	φ 20/10	10	3.30	33	2.47	81.51	

- Beton miktarı:

$$V = \left[\left(\frac{0.30 + 0.60}{2} \right) \times 6.4 \right] + [3.80 \times 0.60] = 5.16 \text{ m}^3/\text{m}$$

Yukarıdaki gibi yapılan işlerin miktarları belirlendikten sonra birim fiyat cetvelindeki birim fiyatlarla bu miktarlar çarpılarak toplam maliyet belirlenmektedir. Yapılan işler, miktarları ve toplam bedelleri tablo 13'de ayrıntılı olarak verilmektedir.

Tablo 13. Bir metre duvar uzunluğu için toplam maliyet

Poz No	Yapılan iş	Miktar	Birim	Birim fiyat (YTL)	Toplam maliyet (YTL)
23.014	Donatı $\phi 8 - \phi 12$	0.129	t	1176.38	151.75
23.015	Donatı $\phi 14 - \phi 28$	0.259	t	1115.25	288.85
16.058/1-B	Beton	5.16	m ³	74.78	385.865
15.006/2	Kazı	4.97	m ³	3.34	16.600
21.011	Kalıp	14	m ²	10.93	153.020
21.059	Kalıp iskelesi	21.44	m ³	4.99	106.986
16.002	Düzeltilme betonu	0.38	m ³	66.81	25.388
15.140/5	Sıkıştırılmış dolgu	12.8	m ³	5.71	73.088
Toplam maliyet (YTL)					1201.547

2.3.2. Geogrid Donatılı Zemin İstinat Duvarının Analizi

Bu bölümde betonarme konsol istinat duvarı ile aynı yüklemelere maruz, aynı yüksekliğe, dolgu ve temel zemini özelliklerine sahip bir geogrid donatılı zemin istinat duvarı tasarımı yapılarak maliyet unsurları değerlendirilecektir. Buna göre ön bilgiler aşağıda verilmektedir.

Ön bilgiler:

Duvar yüksekliği = H = 7m

Üniform sürşarj = q = 15 kN/m²

Dolgu zemini özellikleri: $\gamma_1 = 18 \text{ kN/m}^3$, $\phi_1 = 32^\circ$, $c_1 = 0 \text{ kN/m}^2$

Temel zemini özellikleri: $\gamma_2 = 17 \text{ kN/m}^3$, $\phi_2 = 30^\circ$, $c_2 = 45 \text{ kN/m}^2$

Zemin emniyet gerilmesi = $\sigma_{z,em} = 350 \text{ kN/m}^2$

Geogrid donatı özellikleri:

Geogrid nihai enine çekme mukavemeti = $T_{nih} = 160 \text{ kN/m}$

Geogrid kaplama oranı = $C_r = 0.80$

$GS_i=1.20$ (Hasar emniyet faktörü), $GS_c=2.60$ (Sünmeyi önlemek için emniyet faktörü),

$GS_{k1}=1.30$ (Kimyasal etkilere karşı emniyet faktörü), $GS_k=1.5$ (Kopmaya karşı güvenlik sayısı), $GS_s=1.5$ (Sıyrılmaya karşı güvenlik sayısı).

a) Donatının müsaade edilir çekme mukavemetinin bulunması

Global güvenlik sayısı:

$$GS_g = GS_i \times GS_c \times GS_{k1}$$

$$GS_g = 1.20 \times 2.60 \times 1.30 = 4.056$$

$$T_{mus} = \frac{T_{nih}}{GS_g} = \frac{160}{4.056} = 39.45 \text{ kN/m}$$

$$T_{tasarım} = \frac{T_{mus}}{GS_k} = \frac{39.45}{1.5} = 26.3 \text{ kN/m}$$

b) Yatay basıncın derinliğin fonksiyonu olarak bulunması

$$K_a = \tan^2(45 - \phi/2) = \tan^2(45 - 32/2) = 0.307$$

$$\sigma_{a(s)} + \sigma_{a(q)} = \gamma z K_a + q K_a = 18 \times z \times 0.307 + 15 \times 0.307 = 5.526z + 4.61$$

c) Donatı düşey aralıklarının belirlenmesi

$$S_v = \frac{T_{tasarım} \cdot C_r}{\sigma_a} = \frac{26.3 \times 0.80}{(5.526z + 4.61)} = \frac{21.04}{(5.526z + 4.61)}$$

$z = 7\text{m}$ için

$$S_v = \frac{21.04}{(5.526 \times 7.0 + 4.61)} = 0.49 \text{ m}$$

$z = 6\text{m}$ için

$$S_v = \frac{21.04}{(5.526 \times 6.0 + 4.61)} = 0.56 \text{ m}$$

$z = 5\text{m}$ için

$$S_v = \frac{21.04}{(5.526 \times 5.0 + 4.61)} = 0.65 \text{ m}$$

$z = 4\text{m}$ için

$$S_v = \frac{21.04}{(5.526 \times 4.0 + 4.61)} = 0.79 \text{ m}$$

$z = 3\text{m}$ için

$$S_v = \frac{21.04}{(5.526 \times 3.0 + 4.61)} = 0.99 \text{ m}$$

$z = 2\text{m}$ için

$$S_v = \frac{21.04}{(5.526 \times 2.0 + 4.61)} = 1.34 \text{ m}$$

$z = 1\text{m}$ için

$$S_v = \frac{21.04}{(5.526 \times 1.0 + 4.61)} = 2.08 \text{ m}$$

Hesaplanan bu aralıklara göre tasarımda kullanılacak düşey aralıklar tablo 14'deki gibidir.

Tablo 14. Hesaplanan ve tasarımda kullanılacak donatı düşey aralıkları

z (m)	$S_r = \frac{T_{tasarım} \cdot C_r}{\sigma_a}$ (m)	$S_{v,kullanılan}$ (m)
7	0.49	0.55
6	0.56	0.55
5	0.65	0.70
4	0.79	0.70
3	0.99	0.90
2	1.34	0.90
1	2.08	0.90

Geogrid donatı düşey aralığının, S_v , genellikle 30-70 cm arasında olması istenmektedir. Fakat yatay basınçların nispeten az olduğu durumlarda düşey aralıklar bu değerleri aşabilir. Bu durumda muhtemel duvar deformasyonlarını önlemek amacıyla iki geogrid tabakasının ortasına 1m uzunluklu ek donatı konulması önerilmektedir. Bu amaçla güvenli tarafta kalmak amacıyla 90cm aralıklı donatılar arasına ikişer metrelik ek donatılar konmuştur. Bu durum şekil 34'de görülmektedir.

d) Donatı uzunluklarının belirlenmesi

Kayma kaması içi boyu;

$$L_R = (H - z) \tan(45 - \phi/2)$$

$$L_R = (7 - z) \tan(45 - 32/2) = (7 - z) \tan 29 = (7 - z) 0.554$$

Ankraj bölgesindeki donatı boyu (efektif boy);

$$L_E = \frac{S_v \sigma_a G S_s}{2(c + \gamma z \tan \delta)}$$

$$L_E = \frac{S_v (5.526z + 4.61) \times 1.5}{2 \left(0 + 18 \times z \times \tan \left(\frac{2}{3} 32 \right) \right)} = \frac{S_v (8.29z + 6.92)}{14.06z}$$

Kıvrım boyu veya bindirme uzunluğu;

$$L_O = \frac{S_v \sigma_a G S_s}{4(c + \gamma z \tan \delta)}$$

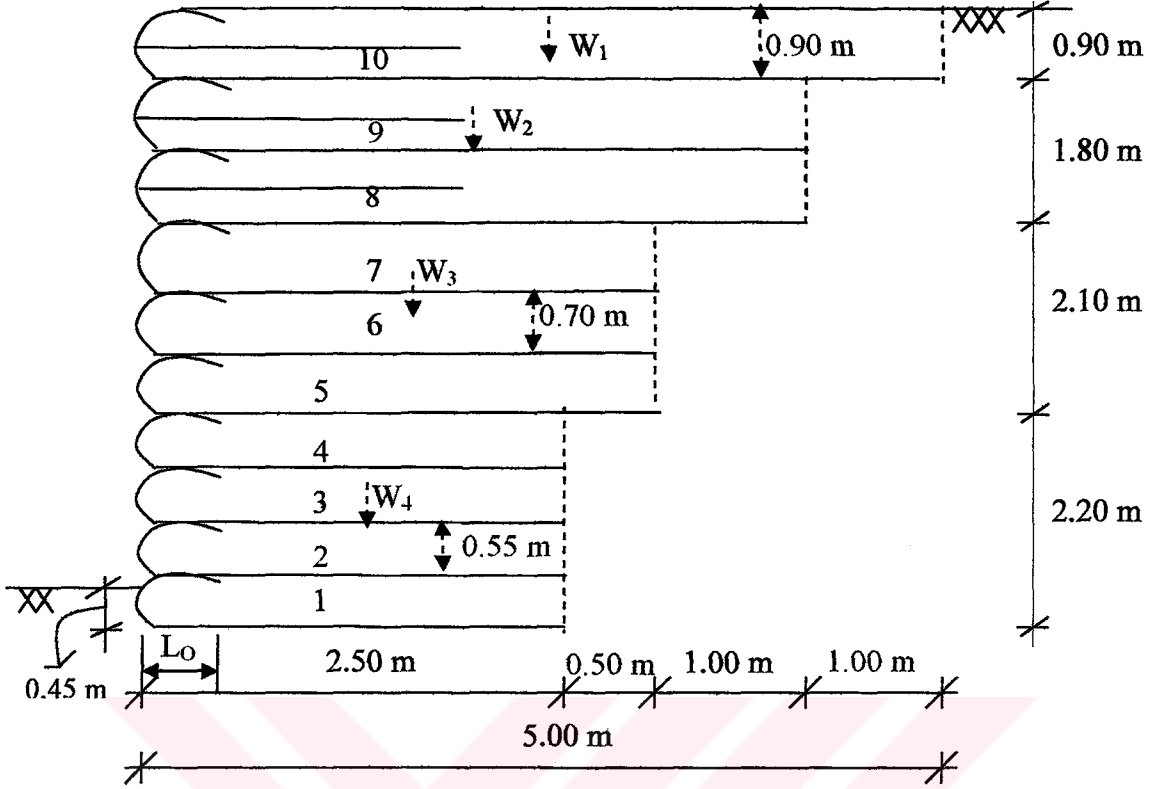
$$L_o = \frac{S_v (5.526z + 4.61) \times 1.5}{4 \left(0 + 18 \times z \times \tan \left(\frac{2}{3} 32 \right) \right)} = \frac{S_v (8.29z + 6.92)}{28.12z}$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır. Tablo 15’de görülebileceği gibi kıvrım boyu L_o en üstteki tabakada ($z=0.90m$) maksimumdur ve $z=0.90m$ için kıvrım boyu $L_o=0.51m$ olarak bulunmuştur. Projelendirmede dikkate alınacak minimum kıvrım boyu $1m$ olduğundan bütün tabakalarda bu boy $1m$ olarak alınmıştır. Aynı şekilde ankraj bölgesindeki donatı boyu L_E en üstteki tabakada ($z=0.90m$) maksimumdur ve $z=0.90m$ için ankraj bölgesindeki donatı boyu $L_E=1.02m$ olarak bulunmuştur. Projelendirmede dikkate alınacak ankraj bölgesindeki minimum donatı boyu da $1m$ olduğundan en üst tabaka hariç diğer tabakalarda bu boy $1m$ olarak alınmıştır. Kayma kaması içi boyu L_R de belirlendikten sonra toplam donatı boyu $L=L_R+L_E$ ifadesiyle hesaplanmış ve buna bağlı olarak projelendirmede kullanılacak toplam donatı boyu belirlenmiştir.

Hesaplanan bütün donatı boyları ve projelendirmede dikkate alınacak donatı boyları tablo 15’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Tablo 15. Geogrid donatı boyları hesap tablosu

Tabaka no	z (m)	S_v (m)	L_R (m)	L_E (m)	min L_E (m)	L_o (m)	min L_o (m)	L (m)	$L_{tasarım}$ (m)
10	0.90	0.90	3.38	1.02	1.02	0.51	1.00	4.40	5.00
9	1.80	0.90	2.88	0.78	1.00	0.39	1.00	3.88	4.00
8	2.70	0.90	2.38	0.69	1.00	0.35	1.00	3.38	4.00
7	3.40	0.70	2.00	0.51	1.00	0.26	1.00	3.00	3.00
6	4.10	0.70	1.61	0.50	1.00	0.25	1.00	2.61	3.00
5	4.80	0.70	1.22	0.48	1.00	0.24	1.00	2.22	3.00
4	5.35	0.55	0.91	0.37	1.00	0.19	1.00	1.91	2.50
3	5.90	0.55	0.61	0.37	1.00	0.19	1.00	1.61	2.50
2	6.45	0.55	0.30	0.37	1.00	0.19	1.00	1.30	2.50
1	7.00	0.55	0.00	0.36	1.00	0.18	1.00	1.00	2.50



Şekil 34. Geogrid donatı uzunlukları ve düşey aralıkları

e) Dış stabilite analizleri

- Kayma denetimi:

Kaymaya karşı koyan kuvvetlerin belirlenmesi:

$$W_1 = 18 \times 0.90 \times 5 + 15 \times 5 = 156 \text{ kN/m}$$

$$W_2 = 18 \times 1.80 \times 4 = 129.6 \text{ kN/m}$$

$$W_3 = 18 \times 2.1 \times 3 = 113.4 \text{ kN/m}$$

$$W_4 = 18 \times 2.20 \times 2.5 = 99 \text{ kN/m}$$

$$R_y = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 498 \text{ kN/m}$$

Temel zemininde, zemin ile donatı arasındaki sürtünme açısı bilinmediğinden bu açı

$\delta = \frac{2}{3} \phi$ olarak, temel zemini kohezyonlu olduğundan kohezyon değeri de $c' = 0.67c$

olarak dikkate alınmıştır. Buna göre $\delta = \frac{2}{3}30 = 20^\circ$ ve $c' = 0.67 \times 45 = 30.15 \text{ kN/m}^2$ olmaktadır. Bu durumda donatılı zemin duvarın kaymasına karşı koyan kuvvet şöyle hesaplanır.

$$T_f = R_v \tan \delta + c' L_2 = 498 \times \tan 20 + 30.15 \times 2.5 = 256.63 \text{ kN/m}$$

Kaydırmaya çalışan kuvvetlerin belirlenmesi:

Zeminden (dolgudan) ve sürşarjdan dolayı oluşan aktif kuvvetler şöyle hesaplanmış idi:

$$P_s = 135.39 \text{ kN/m}$$

$$P_q = 32.24 \text{ kN/m}$$

Buna göre kaydırmaya çalışan kuvvet şöyle belirlenir:

$$T = P_a = P_s + P_q = 135.39 + 32.24 = 167.63 \text{ kN/m}$$

Bu durumda kaymaya karşı güvenlik sayısı:

$$GS_{\text{kayma}} = \frac{T_f}{T} = \frac{256.63}{167.63} = 1.53 > 1.5$$

olduğundan yapı kaymaya karşı güvenlidir.

- Devrilme denetimi:

Devrilmeye karşı koyan momentlerin belirlenmesi

$$M_R = W_i x_i = 156 \times 2.5 + 129.6 \times 2 + 113.4 \times 1.5 + 99 \times 1.25 = 943.05 \text{ kN m}$$

Devirmeye çalışan momentlerin belirlenmesi:

$$M_O = P_s \frac{H}{3} + P_q \frac{H}{2} = 135.39 \times 2.33 + 32.24 \times 3.5 = 428.30 \text{ kN m}$$

Bu durumda devrilmeye karşı güvenlik sayısı:

$$GS_{devrilme} = \frac{M_R}{M_O} = \frac{943.05}{428.30} = 2.20 > 2$$

olduğundan yapı devrilmeye karşı güvenlidir.

- Taşıma gücü denetimi:

Taşıma gücü denetiminde yapıya etkiyen bütün kuvvetler donatılı duvar tabanının orta noktasına taşınır. Buna göre yapıya etkiyen toplam düşey kuvvet:

$$R_v = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 498 \text{ kN/m}$$

Yapının orta noktasına göre toplam moment:

$$\begin{aligned} \sum M &= 32.24 \times 3.5 + 135.39 \times 2.33 - 156 \times 1.25 - 129.6 \times 0.75 - 113.4 \times 0.25 + 99 \times 0 \\ &= 107.75 \text{ kN m} \end{aligned}$$

olmaktadır. Duvar tabanındaki eksantrisite:

$$e = \frac{\sum M}{R_v} = \frac{107.75}{498} = 0.216 \text{ m} < L_2 / 6 = 2.5 / 6 = 0.417 \text{ m}$$

olduğundan eksantrisite çekirdek bölgesi içinde kalmaktadır ve çekme gerilmesi oluşmamaktadır. Bu durumda duvar tabanında zeminden kopma veya ayrılma tehlikesi yoktur. Son olarak yapı tabanındaki maksimum ve minimum gerilmeler hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{\max} = \frac{R_v}{L_2} \left(1 + \frac{6e}{L_2} \right) = \frac{498}{2.5} \left(1 + \frac{6 \times 0.216}{2.5} \right) = 302.47 \text{ kN/m}^2 < 350 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{\min} = \frac{R_v}{L_2} \left(1 - \frac{6e}{L_2} \right) = \frac{498}{2.5} \left(1 - \frac{6 \times 0.216}{2.5} \right) = 95.93 \text{ kN/m}^2 > 0 \text{ kN/m}^2$$

olduğundan zeminin taşıma gücü açısından da bir problem bulunmamaktadır.

Klasik geoteknik prensipleriyle yapılan dış stabilite analizlerinden sistemin stabil olduğu görülmüştür. Sonuç olarak bir miktar fazla seçilen geogrid donatı boyları stabilite yönünden yeterince emniyetlidir.

2.3.2.1. Geogrid Donatılı Zemin İstinat Duvarının Toplam Maliyetinin Belirlenmesi

Bu bölümde 1m uzunluğundaki geogrid donatılı zemin duvarının maliyeti üzerinde etkili olan parametrelerin miktarları belirlenecektir.

- Kazı hacmi:

$$V = (2.5 + 2 \times 0.25) \times 0.45 = 1.35 \text{ m}^3/\text{m}$$

- Sıkıştırılmış granüler dolgu miktarı:

$$V = 7.00 \times 5.00 = 35 \text{ m}^3/\text{m}$$

- Geogrid donatı miktarının belirlenmesi

Donatı tabakalarına, düşey aralıklarına, kıvrım boyuna ve seçilen donatı uzunluklarına bağlı olarak 1m uzunluktaki donatılı duvar için kullanılan toplam donatı miktarı tablo 16'da verilmektedir.

Tablo 16. Geogrid donatı miktarı

Tabaka No	S _v (m)	L _{kullanılan} (m)	L ₀ (m)	L _{gereken} (m)	Tabaka sayısı	L _{toplam} (m)
1-2-3-4	0.55	2.5	1.0	4.05	4	16.2
5-6-7	0.70	3.0	1.0	4.70	3	14.1
8-9	0.90	4.0	1.0	5.90	2	11.8
10	0.90	5.0	1.0	6.90	1	6.90
1 m duvar uzunluğu için toplam miktar (m ²)						49

- Ön yüz kaplama elemanı uygulaması

Geosentetik donatılı zemin duvarlarında ön yüz kaplamaları hem estetik görünüm hem de erozyon ve ultraviyole ışınlarından korunma amacıyla kullanılmaktadır. Kaplama olarak çok değişik alternatifler uygulanabilmektedir. Bu çalışmada 10 cm kalınlığında püskürtme beton uygulaması gerçekleştirilmiştir. Püskürtme betonun birim hacim ağırlığı 24 kN/m³ (2.4 t/m³) olarak alınmaktadır. Uygulanan püskürtme beton kalınlığı t = 10 cm ve 1m duvar uzunluğu için duvar alanı A = 7 m² olduğuna göre püskürtme beton hacmi şöyle hesaplanmaktadır.

$$V = 0.1 \times 7 = 0.7 \text{ m}^3$$

Buna göre kullanılan püskürtme beton miktarı $0.7 \text{ m}^3 \times 2.4 \text{ t/m}^3 = 1.68 \text{ ton}$ 'dur. (Birim fiyatlarda püskürtme betonun birimi ton olduğundan, birim olarak ton kullanılmıştır.)

Bütün bu hesaplamalardan sonra yapılan işler, miktarları ve geogrid donatılı zemin duvarının maliyeti tablo 17'de ayrıntılı olarak hesaplanıp gösterilmiştir.

Tablo 17. Bir metre uzunluk için geogrid donatılı zemin duvarı toplam maliyeti

Poz No	Yapılan iş	Miktar	Birim	Birim fiyat (YTL)	Toplam maliyet (YTL)
15.140/5	Sıkıştırılmış dolgu	35	m ³	5.71	199.85
15.006/2	Kazı	1.35	m ³	3.34	4.51
16.581/1	Önyüz kaplama (püskürtme beton)	1.68	t	49.12	82.52
-	Geogrid donatı	55	m ²	8.28	455.4
Toplam maliyet (YTL)					742.28

Buradaki hesaplamalarda geogrid donatı birim fiyatı 6 dolar ve bir doların da 1.38 YTL'ye karşılık geldiği kabul edilmiştir.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Gerek şevlerin gerekse derin kazıların stabilitesini sağlamak amacıyla çok çeşitli istinat yapısı mevcut olup her biri aynı amaç için yapılsa da özellikle maliyet, yapım kolaylığı ve uygunluğu, yapım şartları, estetik, çevre ilişkisi ile geometri ve performans şartları açısından birbirinden çok farklıdır. Dolayısıyla istinat yapıları;

- Geoteknik şartlar
- Maliyet
- Tasarım şartları

göz önüne alınarak uygulanmaktadır. Son yıllarda istinat duvarı yapımında yeni malzemelerin üretilmesi ile yeni uygulamalar hızla yaygınlaşmış ve klasik istinat duvarlarına ciddi bir alternatif olma durumuna gelmiştir. Bu düşünceden hareketle bu çalışmada mekanik olarak stabilize edilmiş zemin duvarlar veya geosentetik donatılı zemin duvarlar ayrıntılı olarak incelenmiş, standartlara uygun şekilde projelendirme ilkeleri tanıtılmıştır. Ayrıca betonarme konsol istinat duvarıyla karşılaştırılan bu tip duvarların pek çok üstünlüğe sahip olduğu ortaya konmuştur.

Maliyet analizinde aynı yüklemelere, yüksekliğe, dolgu zemini ve temel zemini özelliklerine sahip bir betonarme konsol istinat duvarı ile geogrid donatılı zemin istinat duvarı tasarımları yapılmış ve maliyet yönünden değerlendirilmiştir. Maliyet analizinin sonucu olarak donatılı zemin duvarlarının önemli oranda bir ekonomi sağladığı görülmüştür. Donatılı zemin yapısının ekonomisi:

$$\text{Ekonomi} = [(\text{Tipik maliyet} - \text{Donatılı zemin maliyeti}) / (\text{Donatılı zemin maliyeti})]$$

$$\text{Ekonomi} = [(1201.547 - 742.28) / (742.28)] = 0.61 (\% 61)$$

olarak belirlenmiştir. Burada şunu belirtmek gerekir ki maliyet mukayeselerini yapılan bu uygulamalarla sınırlandırmaya gitmek yanlış bir yaklaşım olacaktır. Çünkü donatılı zemin yapısının maliyeti; arazi çalışması, yarma dolgu ihtiyaçları, duvar tipi, arazi zemin tipi, uygun arka dolgu malzemeleri, ön yüz işleri, geçici ve daimi uygulamaları içeren pek çok faktörün fonksiyonu olmakta ve donatı malzemesi maliyet üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Yani geosentetik donatıların çekme gerilmelerine, üretildiği hammaddeye, üretim yerine ve taşınma maliyetine bağlı olarak fiyatlarının değişebilirliği maliyeti

değiştirebilmektedir. Ayrıca mekanik olarak stabilize edilmiş zemin duvarların ön yüz kaplamaları için de prefabrik beton paneller, parçalı prefabrik beton paneller, modüler bloklu duvar birimler gibi çok değişik seçenekler mevcuttur. Burada ön yüz kaplaması olarak kullanılan püskürtme beton yerine bu tür uygulamaların kullanılmasının maliyeti artıracığı kesindir. Fakat her iki uygulama için ele alınan parametrelerin denkliği bize donatılı zemin duvarların ekonomikliği hakkında önemli bir fikir vermektedir.



4. SONUÇLAR

Donatılı zemin uygulamalarının üstünlüklerinin, sakıncalarının, geosentetik donatılı zemin istinat duvarlarının tasarımının ve ekonomikliğinin değerlendirildiği bu çalışmada özetle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- a. Donatılı zeminlerin mühendislikte çok yaygın kullanım alanları mevcuttur, kullanımı dünyada ve Türkiye’de hızla artmaktadır.
- b. Geosentetik donatılı zemin istinat duvarları, uzun yıllar boyunca beton ağırlık ve betonarme olarak inşa edilen istinat duvarlarına önemli bir alternatif olmaktadır.
- c. Geosentetik donatılı zemin istinat duvarlarının kullanımı, betonarme konsol istinat duvarlarına göre önemli miktarda ekonomi sağlamaktadır. Duvar yüksekliği arttıkça sağlanan ekonomi artmaktadır.
- d. Geosentetik donatılı zemin istinat duvarları, klasik tip istinat duvarlarının uygulanamadığı yüksekliklerde uygulanabilmektedir.
- e. Geosentetik donatılı zemin istinat duvarlarında donatı malzemesinin yerleştirilmesi kolay olduğundan inşaat açısından önemli miktarda zaman ve kolaylık sağlanmaktadır.
- f. Geosentetik donatılı zemin istinat duvarları, ön yüz kaplama elemanlarına verilebilecek renk, doku ve şekiller yardımıyla son derece estetik görünümlü olmaktadır.
- g. Donatılı zemin uygulamalarında çok değişik donatı ve dolgu zemini kullanımı mümkün olup malzeme ihtiyacı genellikle problem oluşturmamaktadır.
- h. Donatılı zemin istinat yapıları esnek olmaları nedeniyle sıkışma potansiyeli yüksek yumuşak zeminler ve göçmeye karşı hassas zeminler ile şevler üzerine doğrudan inşaat yapma olanağı sağlamaktadır.
- i. Donatılı zemin istinat yapılarının zayıf temel zemini koşullarında uygulanabilmesi, gerilmeleri azaltabilmesi ve oturmalara uyum sağlayabilmesi dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardandır.
- j. Donatılı zemin istinat yapıları çok çeşitli geometrik şekillere kolayca uydurulabilmekte, iç ve dış kurpları kolayca dönebilmekte, tam düşey veya istenilen ön cephe eğiminde oluşturulabilmekte ve istenildiği gibi kademelendirilebilmektedir.

5. ÖNERİLER

- a. Donatılı zemin istinat yapılarının inşası giderek yaygınlaştığından bu yapıların deprem davranışlarının da nasıl olacağını bilmesi gerekmektedir. Bu nedenle arazi gözlemleri ile modeller üzerinde laboratuvar gözlemleri yapılabilir ve bu yapıların deprem yükleri altındaki performansları ile deprem sonrası işlevsellikleri araştırılabilir.
- b. Değişik donatı düzenleri kullanılarak deprem ivmeleri nedeniyle yapının göçmesine neden olacak deformasyonlar belirlenebilir ve optimum çözümler araştırılabilir.
- c. Bu çalışmadaki maliyet karşılaştırması değişik duvar yüksekliklerinde tekrarlanarak grafikler oluşturulabilir.
- d. Dolgu malzemesi olarak kullanılan iri daneli zeminlerde, zeminin eğrilik ve üniformaluluk katsayıları belirlenip iyi veya kötü derecelenmiş olduğu anlaşıldıktan sonra bu zeminlerin kullanılabilirliği karşılaştırılabilir.
- e. Değişik malzeme modelleri kullanılarak geoteknik mühendisliği problemlerinde yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile gerilmeler, yatay ve düşey hareketler, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı belirlenebilir.

6. KAYNAKLAR

1. TS 7994, Zemin Dayanma Yapıları; Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları, T.S.E., Ankara, 1. Baskı, Şubat 1990.
2. Aytekin, M., Deneysel Zemin Mekanîği, 2. Baskı, Teknik Yayınevi, Ankara, 2004.
3. Önalp, A., İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi, Cilt 2, 1. Baskı, K.T.Ü. Yayınevi, Trabzon, 1983.
4. Yetimoğlu, T., Donatılı Kohezyonsuz Zeminlerde Kırılma Zarfı, Zemin Mekanîği ve Temel Mühendisliği Üçüncü Ulusal Kongresi, 1990, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 59-68.
5. Tümay, M.T., Antonini, M. ve Arman, A., Metal versus Nonwoven Fiber Fabric Earth Reinforcement in Dry Sands: A Comparative Statistical Analysis of Model, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 2,1 (1979) 44-56.
6. Koerner, R.M., Designing with Geosynthetics, Second Edition, Printice Hall, New Jersey, 1990.
7. Schlosser, F. ve Guilloux, A., Reinforced Earth Uses on Soft Soils, Recent Developments in Ground Improvement Techniques, 1982, Bangkok, 145-151.
8. Barret, B., Ruckman, A. ve Richardson, G., Geotextile Reinforced Retaining Walls Using Granular Backfills, Geotechnical Fabrics Report, March 1998.
9. Holtz, R.D., Geosynthetic-Reinforced Retaining Structures: The Standard Wall of the Future?, Proceedings of the Fifth International Geotechnical Engineering Conference, January 2005, Cairo, 25-51.
10. ASTM D 4833, Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes and Related Products, ASTM, Philadelphia, 1991.
11. Özener, A., Geotekstil Donatılı Şevlerin ve İstinat Yapılarının Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
12. Koerner, R.M., Designing with Geosynthetics, Fourth Edition, Printice Hall, New Jersey, 1998.
13. Patawaran, M.A.B., Mechanically Stabilized Earth (MSE) Reinforcement Tensile Strength from Tests of Geotextile Reinforced Soil, Doctor of Philosophy, Graduate Faculty of Auburn University, Alabama, August 2004.
14. Corbet, S.P., The Design and Specification of Geotextiles and Geocomposites for Filtration and Drainage, Geotextiles in Filtration and Drainage, 1993, London, 29-40.

15. Rowe, R.K., Reinforced Embankments: Analysis and Design, Journal of Geotechnical Engineering, 110,2 (1984) 231-246.
16. Rowe, R.K., Maclean, M.D. ve Soderman, K.L., Analysis of A Geotextile-Reinforced Embankment Constructed on Peat, Canadian Geotechnical Journal, 21 (1984) 563-576.
17. URL-1, <http://images.google.com.tr/images?q=geotextiles&hl=tr&lr>, 12 Mayıs 2005
18. Masounave, J., Denis, R. ve Rolling, A.L., Prediction of Hydraulic Properties of Synthetic Nonwoven Fabric Used in Geotechnical Work, Canadian Geotechnical Journal, 17 (1980) 517-525.
19. Exxon Chemical, Designing for Soil Reinforcement, U.K., 1989.
20. Tunç, A., Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 2002.
21. Wasti, Y., Geotekstillerin Kullanım ve Seçim Esasları, Vateks A.Ş. Yayınları, 1991.
22. Omar, M.T., Das, B.M., Puri, V.K. ve Yen, S.C., Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundation on Sand with Geogrid Reinforcement, Can. Journal Geotech. Engrg., 30,3 (1993) 545-549.
23. Yetimoğlu, T., Wu, J.T.H. ve Sağlamer, A., Bearing Capacity of Rectangular Footings on Geogrid-Reinforced Sand, Journal of Geotechnical Engineering, 120,12 (1994) 2083-2099.
24. Alajavi, H.A., Settlement and Bearing Capacity of Geogrid-Reinforced Sand over Collapsible Soil, Geotextiles and Geomembranes, 19 (2001) 75-88.
25. Dash, S.K., Sireesh, S. ve Sitharam, T.G., Model Studies on Circular Footing Supported on Geocell Reinforced Sand Underlain by Soft Clay, Geotextiles and Geomembranes, 21,4 (2003) 197-219.
26. Laman, M. ve Yıldız, A.A., Donatılı Kum Zeminler Üzerine Oturan Dairesel Temellerin Analizi, Birinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, Ekim 2004, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 137-146.
27. Das, B.M., Principles of Geotechnical Engineering, Fourth Edition, PWS Publishing Company, Boston, 1998.
28. URL-2, www.manufacturers.com.tw/showroom-5578-3-1-0-11.php, 12 Mayıs 2005.
29. Batmaz, S., Gürbüz, A. ve Üstündağ, F., Dolgu Barajlarda Geosentetik Uygulamaları, Birinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, Ekim 2004, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 45-51.

30. Holtz, R.D., Geosynthetics for Soil Reinforcement, The Ninth Spencer J. Buchanan Lecture, College Station Hilton, November 2001.
31. Lee, K.L., Adams, B.D. ve Vagneron, J.M.J., Reinforced Earth Retaining Walls, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 99,10 (1973) 745-764.
32. Srbulov, M., Analysis of Stability of Geogrid Reinforced Steep Slopes and Retaining Walls, Computers and Geotechnics, 28 (2001) 255-268.
33. Koerner, R.M. ve Soong T.Y., Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Walls, Geotextiles and Geomembranes, 19 (2001) 359-386.
34. Yıldırım, M.H., Donatılı Zemin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2001.
35. Federal Highway Administration (FHWA), Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines, FHWA-SA-96-071, Washington D.C., September 1998.
36. Bowles, J.E., Foundation Analysis and Design, Fifth Edition, McGraw Hill, 1996.
37. Reinforced Earth Structures, Recommendations and Rules of the Art. French Ministry of Transport, English Translation 2nd Printing, August 1980.
38. Clayton, C.R.I., Milititsky, J. ve Woods, R.I., Earth Pressures and Earth Retaining Structures, Second Edition, Chapman&Hall, Glasgow, New Zealand, 1993.
39. Das, B.M., Principles of Foundation Engineering, Fourth Edition, Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, CA, 1998.
40. Uzuner, B.A., Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, 4. Baskı, Teknik Yayınevi, Ankara, 1998.
41. URL-3, [www.east.com.tr /index2.htm](http://www.east.com.tr/index2.htm), 10 Mayıs 2005.
42. Geoduvar İnş. San.ve Tic. Ltd. Şti., Geoduvar Tanıtım Dosyası, İstanbul, 2001.
43. Jones, C.J.F.P., Earth Reinforcement and Soil Structures, Revised Reprint, Butterworths Advanced Series in Geotechnical Engineering, 1988.
44. Berg, R.R., Bonaparte, R., Anderson, R.P. ve Choverly, V.E., Design, Construction and Performance of The Geogrid Reinforced Soil Retaining Walls, Third International Conference on Geotextiles, 1986, Vienna, 401-406.
45. John, N.W.M., Geotextile Reinforced Soil Walls in A Tidal Environment, Third International Conference on Geotextiles, 1986, Vienna, 331-336.
46. Juran, I. ve Christopher, B., Reinforced Soil Retaining Walls, Journal of Geotechnical Engineering, 115,7 (1989) 905-925.

47. Lo, S.C.R. ve Xu, D.W., Short Term Stability of Reinforced Embankment on Soft Clay: Modelling of Strain Softening and Reinforcement Extensibility, Soils and Foundations, 32,1 (1992) 189-204.
48. Rowe, R.K., Gnanendran, C.T., Landva, A.O. ve Valsangkar, A.J., Construction and Performance of A Full-Scale Geotextile Reinforced Test Embankment, Canadian Geotechnical Journal, 32,3 (1995) 512-534.
49. Porbaha, A. ve Goodings, D.J., Centrifuge Modelling of Geotextile-Reinforced Step Clay Slopes, Canadian Geotechnical Journal, 33 (1996) 696-704.
50. Springman, S.M., Balachandran, S. ve Jommic, C., Modelling Pre-Failure Deformation Behaviour of Reinforced Soil Walls, Geotechnique, 47,3 (1997) 653-663.
51. Zornberg, J.G., Sitar, N. ve Mitchell, J.K., Performance of Geosynthetic Reinforced Slopes at Failure, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124,8 (1998) 670-683.
52. Porbaha, A., Traces of Slip Surfaces in Reinforced Retaining Structures, Soils and Foundations, 38,1 (1998) 89-95.
53. Yılmaz, H.R. ve Aklik, P., Geotekstil veya Geogrid Kullanılarak Oluşturulan Dayanma Yapılarında Sağlanabilen Ekonomi Hakkında Bir İnceleme, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Ekim 2002, Eskişehir, Bildiriler Kitabı, Cilt 1, 312-321.
54. Aka, İ., Keskinel, F., Çılı, F. ve Çelik, O.C., Betonarme, 1. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2001.
55. TS 498, Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, T.S.E., Ankara, 1. Baskı, Kasım 1997.
56. TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, T.S.E., Ankara, 1. Baskı, Şubat 2000.

7. EKLER

Ek Tablo 1. Dikdörtgen basınç bölgesi kesitler için katsayılar

	K					k_s	
	C14	C16	C18	C20	C25	S220	S420
1	6694.4	5857.6	5206.7	4686.1	3748.9	0.526	0.276
2	1778.9	1556.6	1383.6	1245.2	996.2	0.530	0.277
3	841.1	735.9	654.2	788.8	471.0	0.533	0.279
4	503.8	440.8	391.8	352.7	282.1	0.536	0.281
5	343.7	300.7	267.3	240.6	192.5	0.540	0.283
6	254.8	222.9	198.2	178.3	142.7	0.543	0.285
7	200.1	175.1	155.6	140.0	112.0	0.547	0.286
8	164.0	143.5	127.6	114.8	91.8	0.550	0.288
9	139.0	121.6	108.1	97.3	77.8	0.554	0.290
10	121.0	105.9	94.1	84.7	67.8	0.558	0.292
11	107.7	94.2	83.8	75.4	60.3	0.561	0.294
12	97.5	85.3	75.8	68.2	54.6	0.565	0.296
13	89.4	78.2	69.5	62.6	50.1	0.569	0.298
14	82.9	72.5	64.5	58.0	46.4	0.573	0.300
15	77.5	67.8	60.2	54.2	43.4	0.577	0.302
16	72.1	63.1	56.1	50.5	40.4	0.582	0.305
17	66.8	58.4	52.0	46.8	37.4	0.588	0.308
18	61.5	53.8	47.8	43.0	34.4	0.595	0.312
19	56.2	49.2	43.7	39.3	31.5	0.604	0.317
20	51.0	44.6	39.6	35.7	28.5	0.616	0.323
21	45.8	40.0	35.6	32.0	25.6	0.632	0.331
22	40.6	35.6	31.6	28.4	22.8	0.655	0.343
23	39.5	32.0	28.4	25.6	20.5	0.683	0.358
24	34,8	30.5	27.1	24.4	19.5	0.698	0.366
25	30.8	27.0	24.0	21.6	17.3	0.754	0.395

Ek Tablo 2. 100 cm genişlik için donatı enkesit alanları

Donatı Aralığı (cm)	Çubuk Çapı (mm)								
	8	10	12	14	16	18	20	22	24
7.0	7.18	11.22	16.16	21.99	28.73	36.36	44.87	54.30	64.63
7.5	6.70	10.47	15.08	20.52	26.81	33.93	41.88	50.81	60.32
8.0	6.28	9.82	14.14	19.24	25.14	31.81	39.26	47.51	56.55
8.5	5.91	9.24	13.31	18.11	23.66	29.94	36.95	44.72	53.22
9.0	5.59	8.73	12.57	17.10	22.34	28.28	34.90	42.23	50.27
9.5	5.29	8.27	11.90	16.20	21.17	26.79	33.06	40.01	47.62
10.0	5.03	7.85	11.31	15.39	20.11	25.45	31.41	38.01	45.24
10.5	4.79	8.48	10.77	14.66	19.15	24.24	29.91	36.20	43.09
11.0	4.57	7.14	10.28	13.99	18.28	23.14	28.55	34.55	41.13
11.5	4.37	6.83	9.84	13.39	17.49	22.13	27.31	33.05	39.34
12.0	4.19	6.54	9.42	12.83	16.76	21.21	26.17	31.67	37.70
12.5	4.02	6.28	9.05	12.32	16.09	20.36	25.13	30.41	36.19
13.0	3.87	6.04	8.70	11.84	15.47	19.58	24.16	29.24	34.80
13.5	3.72	5.82	5.38	11.40	14.90	18.85	23.27	28.16	33.51
14.0	3.59	5.61	8.08	11.00	14.38	18.18	22.44	27.15	32.31
14.5	3.47	5.42	7.80	10.62	13.87	17.55	21.66	26.21	31.20
15.0	3.35	5.24	7.54	10.26	13.41	16.97	20.94	25.34	30.16
15.5	3.24	5.07	7.30	9.93	12.97	16.42	20.27	24.52	29.19
16.0	3.14	4.91	7.07	9.62	12.57	15.90	19.64	23.76	28.28
16.5	3.05	4.76	6.85	9.33	12.19	15.42	19.04	23.04	27.41
17.0	2.96	4.62	6.65	9.05	11.83	14.97	18.48	22.36	26.61
17.5	2.87	4.49	6.46	8.79	11.49	14.54	17.95	21.72	25.85
18.0	2.79	4.36	6.26	8.55	11.17	14.14	17.46	21.12	25.13
18.5	2.72	4.25	6.11	8.32	10.87	13.76	16.94	20.55	24.45
19.0	2.65	4.13	5.95	8.10	10.58	13.39	16.54	20.01	23.81
19.5	2.58	4.03	5.80	7.89	10.31	13.05	16.11	19.49	23.20
20.0	2.51	3.93	5.65	7.69	10.05	12.72	15.72	19.01	22.62

Ek Tablo 3. Beton sınıfları ve dayanımları

Beton Sınıfları	Karakteristik Basınç Dayanımı, f_{ck} MPa	Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı, f_{ctk} MPa	Tasarım Basınç Dayanımı, f_{cd} MPa	Tasarım Eksenel Çekme Dayanımı, f_{ctd} MPa
C12	12	1.2	8	0.80
C16	16	1.4	11	0.90
C20	20	1.6	13	1.00
C25	25	1.8	17	1.15
C30	30	1.9	20	1.25
C35	35	2.1	23	1.35
C40	40	2.2	27	1.45
C45	45	2.3	30	1.55
C50	50	2.5	33	1.65

ÖZGEÇMİŞ

Tufan ÇAKIR 16.09.1979 tarihinde Trabzon'da doğdu. İlkokul eğitimini Kurtuluş İlkokulu'nda, ortaokul eğitimini Kanuni Ortaokulu'nda ve lise eğitimini Fatih Süper Lise'sinde tamamladıktan sonra 1998-1999 eğitim öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazanarak lisans öğrenimine başladı. Lisans öğrenimi boyunca birçok kez 'Onur ve Yüksek Onur Öğrencisi' olarak ödüllendirildi. 2002 yılında lisans öğrenimini tamamladıktan sonra aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans yapmaya hak kazandı. Yine 2002 yılı ekim ayında KTÜ tarafından açılan sınavı kazanarak Gümüşhane Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı'na Araştırma Görevlisi olarak atandı.

Bekar olan Tufan Çakır, İngilizce bilmekte ve halen KTÜ Gümüşhane Mühendislik Fakültesi'nde görevine devam etmektedir.