

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DONATILI VE DONATISIZ ZEMİN GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

İbrahim AKYÜZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2009**

Yrd. Doç. Dr. Halil Murat Alđın danışmanlığında, İnaşaat Mühendisi İbrahim Akyüz'ün hazırladığı “Donatılı ve Donatısız Zemin Güçlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması” konulu bu çalışma 28/01/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnaşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Halil Murat Alđın

Üye: Doç. Dr. M. İrfan Yeşilnacar

Üye: Yrd. Doç. Dr. Reşit Gerger

Bu Tezin İnaşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım

Prof.Dr.İbrahim Bolat
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
SİMGELER DİZİNİ	vi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Zemin Güçlendirme Konusunda Yapılmış Bilimsel Çalışmalar	3
2.1.1. Gogrid ve geotekstil kullanılarak yapılmış çalışmalar	3
2.1.2. Taşkolonlar ile ilgili yapılmış çalışmalar	8
2.1.3. Kompakte edilmiş zeminlerde fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişimi konusunda akademik çalışmalar	9
2.1.4. Karışımlar ile ilgili yapılmış çalışmalar	10
2.1.5. Zemin güçlendirme ile ilgili yapılmış diğer çalışmalar	13
2.2. Alınmış Patentler	14
3. MATERYAL ve YÖNTEM	17
3.1. Sıkıştırma ile Zemin İyileştirmesi	17
3.1.1. Üst yüzey sıkıştırılması	17
3.1.2. Ön yükleme ile sıkıştırma (ön konsoladasyon, preloading)	18
3.1.3. Derin sarsma ile sıkıştırma (Vibrokompaksiyon, Vibroflotasyon)	18
3.1.4. Sıkıştırma kazıkları (şişleme kazıkları) ile sıkıştırma	19
3.1.5. Üst yüzeyden vuruşlu (düşen plaka ile) sıkıştırma (dinamik kompaksiyon, ağırlık düşürme)	20
3.1.6. Derinden vuruşlu sıkıştırma (patlatma sıkıştırması)	21
3.1.7. Kompaksiyon kazıkları	21
3.2. Zemin Değiştirme İle Zemin İyileştirmesi	22
3.2.1. Kuruda zemin değiştirme	22
3.2.2. Kuruda kısmi zemin değiştirme (yastık tabakası, tampon tabakası)	22
3.2.3. Sarsma tıkaçı metodu	22
3.2.4. Taş sütunlar (vibro-replacement, taş kolon)	23
3.2.5. Su içinde zeminin tümüyle değiştirilmesi	25
3.3. Kazıklar	25
3.3.1. Çakma kazıklar	25
3.3.2. Fore kazıklar	26
3.3.3. Mini kazıklar	26
3.3.4. Zemin çivileri	26
3.3.5. Derin karıştırma (kireç kazıkları)	28
3.4. Sağlamaştırma İle Zemin İyileştirme	30
3.4.1. Zeminin dondurulması	30
3.4.2. Zeminin ısıtılması	31
3.4.3. Elektro-osmoz yöntemi	32
3.4.4. Çimento ile stabilizasyon	32
3.4.5. Kireç ile stabilizasyon	33
3.5. Enjeksiyon Yöntemi	34
3.5.1. Permeasyon (sızdırma – emdirme) enjeksiyonu	40
3.5.2. Çatlatma enjeksiyonu	41
3.5.3. Kompaksiyon enjeksiyon	42
3.5.4. Jet-Grouting (Jet Enjeksiyonu)	44
3.6. Geotekstiller (Geosentetikler), Geogridlerin Mekanik Stabilizasyonda Kullanımı	47
3.7. Atık Mermer Tozu İle Zemin İyileştirme	55
3.8. Geopier Uygulaması	55
3.9. Geocell Sistemler	58
3.10. Biyoteknik Yöntemler	60
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	61

4.1. Göçme Modlarında Minimum Güçlendirme Uzunluğunun Belirlenmesi	66
4.1.1. Dış (harici) stabilite	66
4.1.2. İç stabilite	69
4.2. Parametrik Çalışma	70
4.2.1. Yaklaşım metodu	70
4.2.2. Parametre değer aralıkları	70
4.3. Değerlendirme	71
4.3.1. Duvar yüksekliği etkisi	72
4.3.2. Dolgu ve mevcut zeminin etkisi	72
4.3.3. Güçlendirme dikey aralığının etkisi	73
4.3.4. Güçlendirilmiş zeminin etkisi	74
4.3.5. İlave yük etkisi	75
4.3.6. Temel zeminin etkisi	76
4.4. Geosentetiklerin Efektif Uzunluklarının Belirlenmesi Konusunda Yapılan Araştırmanın Sonuçları ve Tartışma	76
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	78
5.1. Sonuçlar	78
5.2. Öneriler	79
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	87
ÖZET	88
SUMMARY	90

ÖZ

Yüksek Lisans Tezi

DONATILI VE DONATISIZ ZEMİN GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

İbrahim AKYÜZ

**Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Halil Murat ALGIN

Yıl: 2009 , Sayfa: 100

Zemin iyileştirmeleri genel olarak sıkıştırma, zemin değiştirme, sağlamlaştırma, enjeksiyonlama ve jet-grouting tekniği ile yapılmaktadır, ayrıca bu tür güçlendirmelerde, geosentetik ve atık mermer tozu da son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tekniklere ek olarak, geopier tekniği, yakma, dondurma ve biyoteknik yöntemler de kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin bir çoğu yaygın olarak uygulanırken, bazıları akademik araştırma seviyesinde, bir kısmı ise uygulamaya son yıllarda girmiştir. Kendi içlerinde de pek çok farklı uygulama teknikleri olan bu metotların seçiminde dikkat edilecek hususlar belirlenmiştir.

Bu çalışma mevcut zemin güçlendirme yöntemlerini inceleyerek hangi zeminde hangi yöntemin daha uygun olabileceğini tartışmaktadır. Ayrıca bu çalışmada geotekstil kullanılarak güçlendirilmiş istinat duvarlarının güçlendirme uzunlularının kısaltılmasına yönelik analitik temelli parametrik bir araştırmada yapılmıştır.

Yapılan çalışmalarda, uygulanan zemin güçlendirme yöntemlerinden biri olan geosentetikle güçlendirilmiş istinat duvarlarında geosentetik güçlendirme uzunluklarının kısaltılabileceği üzerine bir fikir oluşmuştur. Oluşan bu fikrin araştırması yapıldığında günümüzdeki bazı dünya standartlarına rağmen bu güçlendirme uzunluklarının kısaltılabileceği görülmüştür. İstinat duvarlarının geosentetikle güçlendirilmesi metoduna pek çok açıdan katkıda bulunan bu çalışmanın, mevcut standartların yeniden gözden geçirilmesine ve bu bağlamda uygulamalarda geosentetikle güçlendirilmiş istinat duvarlarının daha avantajlı bir hale gelmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Zemin güçlendirme metotları, Zemin iyileştirme metotları, Geosentetik, Geogrid, İstinat yapıları

ABSTRACT

MSc Thesis

THE COMPARISON BETWEEN REINFORCED AND UNREINFORCED SOIL STABILIZATION METHODS

İbrahim AKYÜZ

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Halil Murat ALGIN
Year: 2009 , Page: 100**

In this research, the current available soil improvement methods are compared in terms of the soil types and the conditions where their appropriate applications taken place. Additionally, the failure behaviour governing reinforcement length of geosynthetic reinforced soil retaining walls is also investigated.

The stabilization of weak or loose soils to improve their load bearing capacity and reduce their potential settlement characteristics has proved to be cost effective in achieving an economical substructure solution to many developments. The research undertaken in this thesis provides the most important ground improvement techniques. Considerable developments have occurred recently not only in technical matters but also in plant and equipment, and rate of production. The selection of the correct ground improvement technique at an early stage in design can have an important effect on foundation choice and can often lead to more economical solutions when compared to traditional approaches. In the decision sequence, the engineers must consider applicable site specific techniques for improvement of soft ground conditions, before resorting to deep foundations. This research gives the details of techniques that are commonly used by specialty contractors in Turkey to improve the performance of the ground in situ, including less specialized methods of ground improvement such as surface compaction with vibratory rollers. The methods that involve the placement of geotextile or geogrid materials in soil fill are also investigated. The techniques are divided into categories such as compaction, reinforcement and fixation. The reflected developments in this research are the increasing degree of standardisation of the various methods in codes and technical recommendations that cover geotechnical design.

Failure behaviour governing reinforcement length of geosynthetic reinforced soil retaining walls is also investigated in this research. The research concludes that the reinforcement length could be shorter in some design conditions than those suggested by the international standards. Research also provides parametric analysis for the retaining walls constructed with geosynthetic reinforcements.

KEY WORDS: Soil stabilization methods, Soil improvement methods, Geosynthetics,
Geogrids, Retaining walls

TEŐEKKÖR

Desteklerinden dolayı tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Halil Murat ALGIN'a ve Arş. Gör. Zeynep ALGIN'a, sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca başta babam Halil AKYÜZ olmak üzere bütün aileme desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Bloklar arasına geotekstil yerleştirilerek elde edilen güçlendirme yöntemi.....	15
Şekil 2.2. Bağlayıcı geogrid uygulaması	16
Şekil 3.1. İnceler yüzdesinin vibroflotasyonla elde edilen penetrasyon direnci artışına etkisi.....	19
Şekil 3.2. Sıkıştırılmış kum kazıkları oluşturma aşamaları	20
Şekil 3.3. Düşen plakların uygulama şekilleri.....	21
Şekil 3.4. Sarsma tıkaçı metodu uygulaması.....	23
Şekil 3.5. Şerit sömeler altında önerilen bir uygulama.....	23
Şekil 3.6. Taş sütun uygulama aşamaları	24
Şekil 3.7. Kazık makineleri.....	25
Şekil 3.8. Zemin çivisi uygulamasından 2 görünüm	27
Şekil 3.9. Zemin çivisi uygulamasının detayları	27
Şekil 3.10. Derin karıştırma(kireç kazıkları) uygulamasının aşamaları	29
Şekil 3.11. Enjeksiyon uygulaması yapılarak zemin iyileştirilmesi.....	36
Şekil 3.12. Enjeksiyon malzemelerinin, temel zemininin dane dağılımına göre uygulanabilme sınırları	39
Şekil 3.13. Tube'a Manchette sisteminin detayı	41
Şekil 3.14. Çatlatma Enjeksiyonu	42
Şekil 3.15. Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik gösterimi.....	43
Şekil 3.16. Kompaksiyon enjeksiyonu karışımındaki kum için öngörülen dane çapı dağılım aralığı..	44
Şekil 3.17. Jet-grouting uygulama aşamaları	45
Şekil 3.18. Jet-grouting ekipmanları ve uygulamaları.....	46
Şekil 3.19. Jet-groting sistemleri.....	47
Şekil 3.20. Geosentetik uygulamasındaki gelişmeler.....	48
Şekil 3.21. a)Kuyunun açılması, b)agreganın yerleştirilmesi,c) konik tokmakla tokmaklanarak sıkıştırılması, d) geopier kolon.....	57
Şekil 3.22. Geopier uygulama şekli.....	57
Şekil 3.23.a) Geopier basınç kolonları b)Geopier donatılı çekme kolonlar	58
Şekil 3.24. Geopier donatılı çekme kolon uygulaması.....	58
Şekil 3.25. Tipik bir Geocell hücre sistemi	59
Şekil 4.1. Dış stabilite analizi için şematik olarak gösterilmiş geogridle güçlendirilmiş istinat duvarı.....	67
Şekil 4.2. Geosentetik güçlendirmeli istinat duvarının içsel stabilite tasarımı için potansiyel yenilme yüzeyinin yeri.....	69
Şekil 4.3. Kullanılan boyut ve parametreler.....	71
Şekil 4.4. Duvar yüksekliğinin güçlendirme uzunluğu üzerindeki etkisi	72
Şekil 4.5. Dolgu birim ağırlığının güçlendirme uzunluğu üzerinde etkisi.....	73
Şekil 4.6. Güçlendirme dikey aralığının güçlendirme uzunluğu üzerinde etkisi.....	74
Şekil 4.7. Güçlendirilmiş zemin birim ağırlığının güçlendirme uzunluğu üzerinde etkisi	75
Şekil 4.8. İlave yükün güçlendirme uzunluğu üzerinde etkisi.....	75
Şekil 4.9. Temel zemin birim ağırlığının güçlendirme uzunluğu üzerindeki etkisi.....	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. Tahmin edilen oturma değerleri ile gerçek oturma değerlerinin karşılaştırılması.....	8
Çizelge 3.1. Enjeksiyon malzemelerinin sınıflandırılması	40
Çizelge 3.2. Çeşitli uygulama alanlarındaki enjeksiyon malzemesi cinsleri.....	44
Çizelge 4.1. Tahkiklerin güvenlik katsayıları.....	66
Çizelge 4.2. Kullanılan parametrik aralıklar	71

SİMGELER DİZİNİ

C	Yüzey alanı geometrik faktörü
F*	Çekme direnci faktörü
FS _p	Çekme güvenlik faktörü
e	Eksantrisite
H	Duvar yüksekliği
L	Güçlendirme uzunluğu
K _{a,b}	Dolgu/mevcut zemin yanal basıncı katsayısı
L _a	Aktif bölge
L _e	Direnen bölge
N γ	Taşıma kapasitesi faktörü
R _c	Kaplama faktörü
T _{max}	Maksimum uygulanan kuvvet
α	Ölçek doğrultma faktörü
α_v	Dikey stres
γ_f	Temel zemin birim ağırlığı
γ_r	Güçlendirilmiş zemin birim ağırlığı
Φ	Güçlendirilmiş zemin veya temel zeminin sürtünme açısının küçük olanı
γ_b	Dolgu/mevcut zemin birim ağırlığı
q _s	İlave yük

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği uygulamalarında önemli bir konu olan zemin güçlendirme metotları zeminin taşıma kapasitesini artırmaya yönelik olarak, ülkemizde yaygınlaşmaktadır. Özellikle günümüzde deprem etkisi ve zemin sıvılaşması gibi pek çok etkiye cevap vermeye yönelik olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Yeryüzünde yapılaşmaya müsait olmayan alanları yapılaşmaya uygun hale getirebilmek için birçok zemin güçlendirme metotları geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Bu metotlar geliştirilirken depremlere ve doğal felaketlere tanıklık eden mühendisler, zeminin dayanımına verdikleri önemi her geçen gün artırmaktadır. Günümüzde özellikle artan yapısal yükler, zeminlerin önemini ileri derecede ön plana çıkarmıştır. Dolayısıyla, günümüzde aynı zemin koşullarına uygun mevcut metotların ve araştırılma sürecindeki yeni metotların karşılaştırılması önem kazanmıştır. Üst yapının hizmet ömrünü uzatmakta olan bu metotlar, yeni yapılara uygun zemin sağlanmasında, yapıların depremlere ve diğer doğal felaketlere direncini artırmasında, dolgu alanlardaki yapılarda, sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde, taşıma gücü yetersiz zeminlerde, çökme tehlikesi olan zeminlerde, aşırı oturmanın olabileceği alanlarda ve benzeri durumlarda oldukça faydalı olmaktadır. Zemin iyileştirilmesi ile ilgili tarihte pek çok uygulama yapılmıştır. Venedik'te ahşap kazıklar üzerine oturtulmuş yapılar, Çin ve Roma da uygulanan kireç ile stabilizasyon gibi birçok metot geçmişte de zemin iyileştirme ye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. İstanbul'da da Haydarpaşa Tren İstasyonu ahşap kazıklar üzerine oturtulmuştur (Öztürk, 2006).

Bu tez araştırmasında, mevcut zemin iyileştirme yöntemleri kıyaslanarak bunların avantajları ve dezavantajları detaylı olarak incelenmiş, uygulama esasları araştırılmıştır. Ayrıca, zemin iyileştirme yöntemlerinden olan geogridin istinat yapılarında kullanımı detaylandırılmış, bu malzemenin optimum kullanımı ile ilgili standartlar incelenmiş ve bu malzemenin minimum kullanımına yönelik standart tasarım yöntemini içeren analitik bir hesap prensibi bu tezde geliştirilmiştir.

Parametrik yaklaşımla elde edilen bulgular mevcut standartların öngördüğü çelişkili değerlerle karşılaştırılmış ve gerekli optimum boyutların standartların önerdiğinden daha az olabileceği sonucuna varılmıştır. Bu geogrid güçlendirme

uzunluğu konusunda standartlar farklı değerler önerdiğinden gereken donatı uzunluğu standart yöntemle analitik olarak çözülmüş ve sonuç ifadeler parametrik olarak sayısallaştırılıp gerekli minimum donatı uzunluğuna yaklaşılmaya çalışılmıştır. Bu analitik hesaplama prensibi sayesinde daha ekonomik olarak bu malzemenin istinat yapılarında kullanılabilmesi sağlanmıştır. Bu tezde, çeşitli iklim ve zemin cinsini bünyesinde barındıran ülkemizde zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanabilirliği, ekonomik boyutları, gereklilikleri ve yeterlikleri detayları ile incelenmiştir.

Mevcut uygulanan yöntemlere ek olarak günümüz istinat duvarlarının geotekstil, geogrid gibi malzemelerle güçlendirilme metotları araştırılarak, bu güçlendirmelerin daha ekonomik olarak uygulanmasına yönelik prensipler bu tezde araştırılmıştır. Bu konuya yönelik olarak geogrid güçlendirmeli istinat duvarlarının kayma tahkiki, devrilme tahkiki, taşıma kapasitesi tahkiki, çekme başarısızlığı tahkiki ve eksantrisite etkisi incelenmiştir. Geogrid güçlendirmeli istinat duvarlarının stabilite tahkikleriyle ilgili geçmişte yapılmış çalışmalar incelenerek bazı şartnamelerde verilen minimum güçlendirme uzunluklarının azaltılmasının mümkün olduğu görülmüştür. Stabiliteden ödün vermeyerek bu tezde önerilen teknik sayesinde daha ekonomik bir tasarım yapılması sağlamaktadır. İstinat duvarlarının arkasında yeterli mesafenin olmadığı durumlarda bu yarar daha da ön plana çıkmaktadır. Geosentetik malzemelerin birim fiyatları göz önüne alındığında, optimum boyutlarda daha az bir malzemeyle güçlendirme yapılabileceği için bu ekonomik faydanın göz ardı edilemeyeceği görülür.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

19. yüzyılda çimentonun icadı ile yaygınlaşan betonarme yapılar, köprüler, barajlar vb. yapıların inşasında en önemli şart olan zemin dayanımının arttırılmasına yönelik olarak zemin güçlendirme metotları geliştirilmiştir. Bu metotlara yönelik yapılmış araştırmalar ve alınmış patentler aşağıda özetlenmiştir.

2.1. Zemin Güçlendirme Konusunda Yapılmış Bilimsel Çalışmalar

Zemin güçlendirme ile ilgili pek çok bilimsel çalışma literatürde mevcuttur. Bu çalışmaların bir kısmı daha önceden yapılmış çalışmalara yönelik olup bir kısmı ise tamamen yeni ürünler sunan çalışma ve araştırmalardır.

2.1.1. Gogrid ve geotekstil kullanılarak yapılmış çalışmalar

Geotekstillere, teknolojinin gelişmesiyle inşaat mühendisliğinde oldukça önem kazanmıştır. Pamuklu bez dokumalar, 1950'li yılların başında Amerika Birleşik Devletleri'nde, zemin yollarda stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmıştır. Kuzey Denizi'nde yapılan su bentlerinde sentetik ayırıcılar kullanılmıştır. Modern geotekstillere kullanılmaya başlaması 60'lı yılların sonlarına doğru hız kazanmıştır. 2. Dünya Savaşından sonra Avrupa'da tekstil sektöründe önemli gelişmeler yaşanmıştır. İlk defa Paris'te 1977 yılında, ikincisi 1982'de Las Vegas'ta ve üçüncüsü ise 1986'da Viyana'da olan çeşitli konferanslar yapılmış, bültenler çıkarılmıştır. "Geotechnical Fabric Report" adı altında, geotekstilde test standartları ve özellikleri geliştirilmiştir. Bu test standardı "International Organization for Standardisation (ISO)" tarafından uygulanmaya başlanmıştır. Ayrıca "International Geotextile Society (IGS)" tarafından standartlar geliştirilmiştir. Tekstilin gelişmesiyle, pamuk türü malzemelerin ıslanması sonucu çürümeye sebep olduğundan, keten ve kendir türü dokumaların kullanımı terk edilmiş, bunun yerine plastik tercih

edilmiştir. Blacburn (1975) almış olduğu patent bu günkü geotekstillerin temeli olmuştur. Rainey (2001) blokların aralarına, zemine uzayacak bir şekilde geogridlerin yerleştirilmesi sonucu elde edilen istinat duvarlarının uygulamada avantaj sağladığını göstermiştir. Jones ve ark. (1999) tarafından geogrid ve geosentetiklere benzer bir patent alınmıştır(www.uspto.gov).

Love (1984) tarafından yapılan doktora tez araştırması bilinen en eski bilimsel çalışmalardan biridir ve Oxford üniversitesinde yapılmış bu araştırma, yollarda geogrid uygulaması sonucu elde edilen ek stabiliteyi incelemiştir. Jones ve ark. (1995), geosentetikle güçlendirilmiş zemin dolguların, güçlendirilmiş dolgu yapılarının boşluklardan ve oyuklar üzerinde etkisini analiz etmişlerdir. Güçlendirmeyi eğilme olmadan sadece gerilme olacak şekilde modellemişlerdir. Model FLAC, sonlu farklar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Çubuk element modeli kullanarak, Burd (1995) membran hareketlerini zayıf zeminler üzerinde güçlendirilmiş kaplamasız yollarda analiz etmiştir. Düzenli ve düzlem gerilme ortamında monotonik yükler uygulanmıştır. Geniş deplasmanların kabul edilebildiği durumlar için bu yöntemin uygun olduğu belirtilmiştir. Geosentetiklerin üsteki dolgu ve altaki yumuşak kil arasında ayırıcı olarak kullanımı üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Zhan ve Yin (2001) geosentetikle güçlendirilmiş zemin yapısında zemin-geosentetik arayüzündeki etkileşimi elastik olarak analiz etmiştir. Winkler yayları ve yatay kesme yayları kullanılarak yatay ve dikey yönlerde etkileşim analiz edilmiştir. Geosentetikler elastik malzeme olarak, kesme ve eğilme dayanımlarının olmadığı kabulüyle modellendirilmiştir. Sonuçlar FLAC programının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak daha yüksek rijitliği olan geosentetiklerin yumuşak zeminleri güçlendirebileceği görülmüştür. Villard ve Giraud (1998) üç boyutlu zemin-geotekstil etkileşimini sonlu eleman metodu kullanarak analiz etmişlerdir. Düzenli dikey yükler membrana uygulanarak geosentetiğin davranışı analiz edilmiştir. İzotropik ve elastik olmayan ortamlar için bu analizin iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Artan eğilme rijitliğinin önemini belirlemek amacıyla Fakher ve Jones (2001) geosentetik güçlendirmeyi iki farklı metodla modellemişlerdir. Oldukça yumuşak kilin üzerinde güçlendirilmiş tabaka ile üsteki kum tabakasını analizi yapılmıştır. Yumuşak kilin yüksek miktarda su içerdiği ve kesme dayanımının çok az

olduğu düşünülmüştür. Birinci model geosentetik eğilme rijitliği olmayan çubuk elemanlarla. İkinci model ise elastik eğilme dayanımı olan iki boyutlu kiriş elementlerle yapılmıştır. Analizler, yumuşak killerin üzerinde yapılan güçlendirmelerde geosentetiğin eğilme dayanımını arttırdığını göstermiştir. Han ve Gabr (2002) yumuşak killerde kolon destekli dolgu üzerine bir sayısal analiz yapmışlardır. Çalışma, geosentetiğin gerilme dayanımı etkisini, dolgunun yüksekliğini, dolgu malzemesinin elastik modülünü araştırmıştır. Sistem FLAC programı kullanılarak modellenmiştir. Basitlik için, sadece bir tabaka geosentetik kullanılmıştır ve geosentetik-zemin arasında tam temas olduğu kabul edilmiştir. Analizler, güçlendirmedeki gerilmenin düzensiz olduğunu ve dolgu kenarlarında maksimum gerilmenin meydana geldiğini göstermiştir. Aynı zamanda, geosentetiğin zeminin gerilme dayanımını artırdığı görülmüştür.

Daniele ve ark. (1993), zemin-geosentetik etkileşimini modelleyebilmek için bir alet tasarlamış, değişik tipte geogridler ile güçlendirilmiş siltli kum ve çakıllar üzerinde yapılan doğrudan kesme deneyleri sonucu, geosentetik kullanımının zeminin kohezyonunda bir artışa sebep olmadığı ve bu karışımların alışılmamış türde göçtüğü gözlenmiştir. Long ve ark. (1997), ayrılmış kil ve siltli kumda zemin-geotekstil arayüzündeki davranışı çekme (pull-out) deneyleri ile araştırmış, geleneksel metodların kayma dayanımı ve pik kayma dayanımını eksik tahmin ettiğini göstermiştir. Tan ve ark. (1998), zemin-geotekstil arayüzündeki kayma mukavemetini halka kesme deneyi ile değerlendirmişlerdir. Kum geotekstil arayüzündeki pik ve rezidüel (kalıntı) sürtünme açıları geotekstilin nominal kütlelerinden ve yükleme hızından büyük oranda etkilenmediğini savunan yazarlar, aynı şartlarda oluşturdukları numuneleri hem direkt kesme, hem de halka kesme deneylerinde test etmiş ve sonuçları karşılaştırmışlardır. 3 mm küçük kayma deformasyonu geçildiğinde, direkt kesme deneyinde halka kesme deneyinden daha yüksek içsel sürtünme açısı elde edildiği çalışmada rapor edilmiştir. Haeri ve ark. (2000) üç eksenli basınç deneyleri ile kuru sahil kumu ile geotekstil arayüzündeki gerilme-deformasyon ve genleşme davranışını belirlemeye çalışmıştır. Kompozit malzemenin mekanik davranışını geotekstil tabaka sayısı, çevre basıncı ve geotekstil yerleşimi parametreleri dahilinde araştırmıştır. Sonuç olarak zeminin geotekstil ile

donatılandırılması sonucu pik dayanımda, aksel deformasyonda ve kırılmalıkta artışa sebep olduğu bulunmuştur. Aiban ve Ali (2001) pull-out deneyleri ile, Kızıldeniz sahilindeki iyileştirilmesi gereken Sabhka zemini kullanarak geotekstil-kum etkileşimini araştırmıştır. Elastikiyeti az olan geotekstilin sıyırılma için en yüksek çekme kuvvetine ihtiyaç duyduğu çalışmanın bir sonucu olmakla beraber, geotekstilin bu zeminlerin kayma dayanımında artışa sebep olduğu çalışmada belirtilmiştir.

Yetimoğlu ve Salbaş (2003), rastgele fiber içeren kumların dayanımlarını direkt kesme deneyleri ile incelemiştir. Fiber donatı oranının kayma dayanımına etkisini inceleyen yazarlar, pik dayanımın ve kumun ilk rijitliğinin fiber donatı oranından etkilenmediğini bulmuşlardır. Rezidüel kayma dayanımında sünekliğin artmasına bağlı bir artış elde edilmiştir. Bununla birlikte, Lee ve Manjunath (2000), Zhang ve ark. (2006) ve daha birçok çalışma da geosentetiğin zeminlerin dayanımına etkisinin, değişik zeminlerde değişik tipte geotekstil malzemelerle incelenmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Geogrid donatılı zeminler üzerinde günümüze kadar çok çeşitli bilimsel araştırmalar yapılmış olup bunlardan birkaç tanesi aşağıda özet olarak verilmiştir.

Yetimoğlu ve ark. (1994), tek eksenli geogrid donatılı kum zemin üzerine oturan dikdörtgen temellerin taşıma kapasitesini araştırmıştır. Çalışma sonucunda; donatılı zeminlerde yapılan deneylerde, göçme anındaki oturmaların daha fazla olduğu, donatılı zeminin nihai taşıma gücünün donatısız zemine göre dört kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Adams ve Collin (1997), model deneylerle donatılı kum zemin üzerine oturan kare tekil temellerin göçme oluşuncaya kadar belirli yükler altında, donatı parametrelerinin taşıma gücüne ve oturmaya olan etkilerini araştırmıştır. Donatı parametreleri olarak, donatılar arası düşey aralık, donatı tabakasının boyutu, donatı tabaka sayısı, zemininin sıklık derecesi seçilmiştir. Donatı sayısı $N=3$ durumunda en büyük taşıma kapasitesi değerine ulaşılmış, zeminde iyileşmenin sadece tabaka sayısına göre değil, toplam donatı derinliği ve donatılar arası düşey mesafeye göre de değiştiği belirtilmiştir. Shin ve Das (2000) tarafından yapılan çalışmada, geogridle güçlendirilmiş kum zemin üzerindeki şerit

temelin taşıma kapasitesi incelenmiştir. Çok tabakalı geogrid donatılı, orta sıklıkta sıkıştırılmış kum zemin üzerine oturan şerit temelin, değişik derinlikteki ve yüzey temel koşulları göz önünde tutularak, taşıma kapasitesi değerleri araştırılmıştır. Temel derinliği temel genişliğinden daha küçük tutulmuştur. Deney sonucunda ilk donatı tabakası derinliğinin $u=0.3B$ değerinde, maksimum taşıma kapasitesine ulaşıldığı belirtilmiştir. Alawaji (2001), kumlu ve yumuşak zeminler üzerine oturan ($D=100$ mm) dairesel temelin taşıma kapasitesi araştırılmıştır. Deneylerde, 450 mm çapında, 350 mm yüksekliğinde dairesel çelik tank içinde % 80'i yumuşak, % 20'si kum zemin ve TENSAR SS2 geogrid donatı malzeme kullanılmıştır. Çalışmada oturma miktarı, elastisite modülü ve taşıma kapasitesi, geogrid tabakasının derinliği ve genişliği değiştirilerek araştırılmıştır. Atalar ve ark. (2002), geogrid takviyeli ayrık daneli zemin üzerine yerleştirilen, düzenli yüklü dairesel plaklarla iletilen gerilmeyi ölçmek için, okyanustan kazanılmış arazi üzerinde (Güney Kore'deki Inchon Uluslararası Havalimanı İnşaatı) yükleme deneyleri yapmışlardır. Çalışmada, gerilme dağılımı, temel üzerindeki yükün büyüklüğü, takviye için kullanılan geogrid donatı levhalarının sayısı ve geogrid takviyeli zeminin kalınlığı araştırılmıştır. Laman ve Yıldız (2003), geogrid donatılı kum zeminler üzerine laboratuarda model deneyler yaparak taşıma kapasitesi değişimini araştırılmıştır. Patra ve ark. (2005), çok tabakalı geogridle güçlendirilmiş orta sıklıktaki kum zemin üzerinde, eksantrik yüklü şerit temelin değişik derinlikte ve temel koşullarındaki durumunu dikkate alarak zeminin taşıma kapasitesini incelemiştir. Deneyde içsel sürtünme açısı 42.4° ve rölatif sıklığı %71 olan doğal kum ile, tekyönlü TENSAR BX1100 geogrid donatı kullanılmıştır. Yıldız ve ark. (2006), tarafından yapılan çalışmada, geogrid donatılı kum üzerine oturan dairesel temellerin taşıma kapasitesi, sonlu elemanlar analizi ve PLAXIS bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde donatı konfigürasyonu parametrelerine göre, donatıdan dolayı taşıma kapasitesinde meydana gelen artışlar, taşıma kapasitesi oranı *Bearing Capacity Ratio* (BCR) terimi ile ifade edilmiştir. Kumar ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada, düşük taşıma kapasitesine sahip bir kum dolgu üzerinde güçlü bir kum tabakasından oluşan (donatılı/donatısız) temel zemini üzerinde inşa edilmiş, şerit temellerin nihai taşıma kapasitesi incelenmiştir. Bu çalışmada, geogrid donatılı kum üzerine oturan sürekli temellerde, taşıma gücünü etkileyen beş faktör (temel genişliği, temel derinliği,

donatı uzunluğu, donatı tabaka sayısı ve donatılar arası uzaklık) dikkate alınarak faktörlerin taşıma gücü üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma hakkında ayrıntılı bilgi Demiröz (2008)'de bulunmaktadır.

2.1.2. Taşkolonlar ile ilgili yapılmış çalışmalar

Lawton ve ark. (1994), kısa taş kolonlar kullanarak zemin güçlendirmesi yapılan iki ayrı projede, oturma hesaplamalarını ve değerlerini karşılaştırmışlardır. İlk projede, taş kolonlar kullanılarak tekil ve radye temellerde oturmanın azalması hedeflenmiştir. Uygulama öncesi yapılan hesap ile gerçek oturmanın birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Bu karşılaştırma değerleri Çizelge 2.1'de verilmektedir. Mevcut dört katlı bir hastanenin genişletilmesi amacıyla uygulanan proje, mevcut dört katlı binanın yirmi kata çıkarılması ve yanına onaltı katlı yeni bir binanın yapılmasını kapsamaktadır. Zemin formasyonu, sertten katıya değişen kil, kumlu silt, sıkı siltli kum üzerinde gevşek siltli kum ve en altta kaya şeklinde tanımlanmaktadır.

Çizelge 2.1. Tahmin edilen oturma değerleri ile gerçek oturma değerlerinin karşılaştırılması (Lawton ve ark.,1994)

Çalışma Yeri ve Temel Şekli	Tahmin Edilen Oturma Miktarı (mm)		Ölçülen Değer (mm)
	İyileştirilmemiş	Agrega Kolonlu	
Güney Kulesi, Kare Temel	40-43	8-12	<6
Güney Kulesi, Dikdörtgen Temel	52-58	10-16	<10
Kuzey Kulesi, Geniş Radye Temel	29-71	13-38	<10
Kuzey Kulesi, Küçük Radye Temel	62-98	24-48	<20

Özkuzey (1990) tarafından yapılmış olan çalışma, taş kolonlar kullanılarak yumuşak zeminlerde granüler kazık yardımıyla taşıma kapasitesinin, kayma mukavemetinin artırılması konusu araştırılmış ve bu tür bir zemin iyileştirmesinin oturmanın azalmasında faydalı olduğu sonucuna varılmıştır. Raju (1997) yumuşak killerde taş kolonlar yönteminin konsolidasyon üzerindeki etkisini, Malezya'daki Kinrara ve Kebun isimli şehirlerde gerçekleştirilen çalışmalar ile incelemiştir. Araştırmada taş kolonlar yönteminin yumuşak killer için uygun bir güçlendirme yöntemi olduğunu belirtmiştir. Wissmann (1999) taş kolonlara benzer bir uygulama

olan geopier uygulamasının taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini incelemiş ve tasarım hesaplamaları konusunda bir çalışma yapmıştır. Yöntemin zemine yarattığı gerilmeyi göz önüne alarak, geopierlerin tekil veya bir grup olarak çalışma mekanizmalarını incelemiştir. Wissmann ve ark. (2002) geopier yönteminin stabilite ve oturmalar üzerinde etkisini incelemiştir. Bu yöntemde kullanılan agregaların kayma direncinin fazla olmasından dolayı, yöntemin şevlerde ve dolgularda kullanılabilirliği önerilmiştir. Ayrıca Wissmann ve ark.(2002) laboratuvar ve arazi deneyleri yaparak, geopierlerin kesme dayanımlarını incelemiştir. White ve ark. (2002), taş kolonla geopier yöntemini Des Moines, Iowa'daki bir otoyol genişletmesinde uygulamalı olarak kıyaslamıştır. Sıkışabilirliği azaltan ve kayma dayanımını artıran taş kolon belli bir bölgede uygulanmış, belli bir bölgede ise oturmaların hızlı bir şekilde oluşması sağlanmıştır. Demir (2007) yapılmış olan taş kolon ve geopier uygulamalarının zemin iyileştirmesine önemli katkı yaptığını açıklamıştır.

2.1.3. Kompakte edilmiş zeminlerde fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişimi konusunda akademik çalışmalar

Nielsen ve ark. (1972) permeabilite katsayısı üzerinde çalışarak, permeabilite katsayısının, dane boyutu, sürtükürü v.s. gibi unsurlardan dolayı geniş bir aralıkta değişebildiğini ifade etmişlerdir. Perloff ve Baron (1976) ve Lambe ve Whitman (1979) permeabilitenin bağlı olduğu unsurları detaylı olarak incelemiştir. Capper ve Cassie (1984), Özyayın (1989) ve Uzuner (1990) kompakte olmuş zeminlerde penetrasyon direnci, serbest basınç mukavemeti ve iç sürtünme açılarını incelemiştir. Raats (1970) lineer olmayan akım ifadesinin, akım ağları ile çözümü üzerinde çalışmış ve denklemi akım potansiyeli şekline dönüştürerek, Poisson tipi diferensiyel denkleme dönüştürmüş ve Fourier serilerine göre çözmüştür. Yine aynı çalışmada, toplam hidrolik yük için doğal logaritmalı bir ifade kullanılarak denklem lineer hale getirilmiştir. Parlange (1970) akım ifadesini Wolterra integral denklemine benzer bir duruma sokup, iteratif bir yaklaşım geliştirmiştir. Selim ve ark.(1976), su içerisindeki katkı maddelerine ait konsantrasyonun lineer olarak dağıldığını varsayarak, Darcy yasasında yerine koymuş ve hızı saptamıştır. Sonra akım ifadesi, hız cinsinden bir diferensiyel denklem verecek şekilde düzenlenmiş ve nümerik yolla

çözülmüştür. Batu (1979), Raats'ın çözümüne benzer sonuçlar elde etmiş ve zeminin doygun ve doygun olmamasına göre, akım ağlarının değişmesini incelemiştir. Philip (1985) bir sondaj kuyusu içine doldurulan suyun, zemine sızmasını teorik yoldan incelemiş ve suyun bir ıslanma soğanı biçiminde, zemin yüzünden derinlere doğru arttığını göstermiştir. Elde edilen ıslanma soğanı içindeki; doygun bölgede oluşan akımla, soğanın doymamış bölge içindeki yayılmasına ait ifedeleri vermiştir.

Birçok çevre kuruluşu yönetmelikleri, zemin tabakalarının yeterliliğini onaylamak için, yerinde hidrolik iletkenlik ölçümleri talep etmektedir. Day ve Daniel (1985), arazi ve laboratuvar hidrolik iletkenliği değerleri arasında, dikkate değer bir farklılığı bildirmiştir (Kahya, 1995). Bu sonuç, tek ve çift halka infiltrometreler kullanılarak iki prototip kil tabakası üzerinde gerçekleştirilen deneylere dayanmaktadır. Bu yayında, Austin, Texas yakınlarında bir bölgede, düşük ve yüksek plastisiteye sahip killeri kullanarak, iki prototip tabakası inşaa edilmiştir. Tabakalar, %100 proctor yoğunluğunda, optimum su muhtevasının ıslak tarafında, keçi ayaklı silindirlerle uygun şekilde sıkıştırılmışlardır. Arazi ve laboratuvar değerleri arasındaki bu fark, öncelikle kalite kontrol yetersizliğine bağlanmıştır.

Küçük boyutlu numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinin fazla güvenilir olmaması, mühendisleri arazi deneylerine yöneltmiştir. Özellikle kompaksiyon ile hazırlanmış geçirimsiz kil tabakalarının permeabilitelerinin tayini için kapalı çift halkalı infiltrometre deneyi geliştirilmiştir (Kahya, 1995). Bu çalışmalarda, sahada yapılan kapalı çift halkalı infiltrometre deneyleri, bir kil tabakasına uygulanmış ve elde edilen saha verileri nümerik model ile incelenmiştir.

2.1.4. Karışımlar ile ilgili yapılmış çalışmalar

Bell ve Tyrer (1989) tarafından yapılan araştırmada zeminin kimyasal ve minerolojik birleşiminin stabilizasyona etki ettiği düşünülmüştür. Üç ana kil mineralinden A,B,C gibi üç değişik numune türü oluşturmuş ve %2, 3,4,6,8 kireç ve çimento karışımları hazırlanıp bunlar üzerinde deneyler yapılmıştır.

A zemini: %70 Kaolinit %20 Kuvars %10 Montmorillonit

B zemini: %20 Kaolinit%70 Kuvars %10 Montmorillonit

C zemini: %20 Kaolinit %10 Kuvars %70 Montmorillonit

Deney sonuçlarında, minerolojinin elastisite modülü ve taşıma gücünde oldukça dikkate değer etkisi gözlenmiştir. Zengin kuvars zeminine (*B* zemini) kireç veya çimento ilave edildiğinde bu özelliklerde çok önemli değişiklikler olduğu gözlenmiştir. Aksine montmorillonit ağırlıklı *C* zeminindeki etkisi daha az olmuştur. Kaolinit ağırlıklı *A* zemininde, kireç veya çimento kullanıldığında elastisite modülü ve taşıma gücünde önemli artış bulunmuştur. Kireç ile stabilizasyon, kilin mukavemet özelliklerini iyileştirmek için çok uzun yıllardan beri başarı ile kullanılmaktadır. Ancak permeabilite üzerine muhtemel etkileri fazla araştırılmamıştır. Mevcut araştırmalar çelişkili sonuçlar vermektedir. Evans ve Bell (1981) kireç ile stabilizasyonun kilin yapısını pıhtı hale getireceğini, dolayısıyla kilin permeabilitesinin artacağı fikrini savunmaktadır(Kahya,1995). McCallister ve Petry (1991) ise kireç ile stabilize edilmiş bir kilde, önce bir permeabilite artışı olmasına karşın zamanla permeabilitede bir düşüş gözlendiğini ifade etmiştir(Kahya,1995). Balasubramaniam ve Buensuceso (1997) ise, Asya Teknoloji Enstitüsü kampüsünden aldıkları yumuşak Bangkok kilne %2.5,5,7.5,10,12.5,15 oranlarında kireç karıştırılarak ve numuneleri bir ve iki aylık zamanlarda küre tabi tutarak deneyler yapmışlardır(Kahya,1995). Serbest Basınç deneylerinde, bir aylık kür süresi sonunda numunelerde önemli değişiklik gözlenmemiş, fakat iki ve daha fazla aylık kür zamanlarındaki sonuçların çok belirgin olduğu görülmüştür. Serbest basınç deneylerinde, karışım oranının artmasıyla mukavemetin arttığı gözlenmiştir. Dinçer ve Berilgen (1991) tarafından yapılan bir araştırma da İstanbul Zekeriya köy mevkiinden alınan volkanik kökenli ayrışmış tüflerden oluşan yüksek plastisiteli, killi silt bir zeminin, stabilizasyon özellikleri incelenmiştir. Zemine, %4 ve %6.5 oranlarında kireç katılmış ve yedi ile yirmisekiz gün küre tabi tutulmuştur. Yapılan deney sonuçlarında, zemine %4 kireç katılmasıyla, likit limiti %76, plastik limiti %37 olan zemin non-plastik hale gelmiştir. Yapılan California Bearing Ratio(CBR) şişme deneyleri sonucunda, kireç katkısız numunelerde şişme potansiyeli %1.5 ile %4, kireç katkılı numunelerde şişme potansiyeli %0.3'e, %6.5 kireç katkılı

numunelerde ise şişme potansiyeli %0.1'e düşmüştür. Yapılan serbest basınç deneyleri ve CBR deneyleri sonucunda zemine kireç karıştırılmasıyla başlangıçta mukavemette azalma olmuştur. Artan kireç yüzdelere bağlı olarak, serbest basınç mukavemeti de artmaktadır. CBR deney sonuçlarına göre, zemine kireç katılması sonucu CBR değeri %11.63'den %29.75'e kadar yükselmiştir. Zemine kireç katılmasıyla, deformasyon özelliklerindeki değişimi göstermek amacıyla yapılan ödometre deney sonuçlarında, kireç yüzdesi arttıkça konsolidasyon oturmalarının azaldığı, yük kaldırıldığında ise şişme miktarlarında büyük azalmalar olduğu görülmüştür.

Kalava (1992), zeminin kireç ve çimento ile stabilizasyonuna ait bir çalışma yapmıştır. Stabilize malzeme üretilmesinde, kireç için ağırlıkça %1,2,3,4,6,8,10,15; çimento için ağırlıkça %4,6,7,8,10,12.5,15,20 karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda, zeminin kireç ve çimento ile stabilizasyonu sonucu karışımların plastisite indisi azalmış ve dolayısıyla zemin daha az plastik hale gelmiştir. Stabilizasyon sonucunda kireç ve çimentonun bağlayıcı etkisiyle, karışımlar aşırı konsolide davranış özelliği göstermişlerdir. Bunun sonucu olarak, zemine kireç ve çimento ilave edilmesiyle karışımların sıkışma indisi azalarak deformasyon miktarının azaldığı görülmüştür. Buna paralel olarak da karışımların kabarma indisi azalmış, dolayısıyla kabarma potansiyeli azalmıştır. Konsolidasyon hızı artarak, konsolidasyon katsayısı artmıştır. Konsolidasyon basıncı değeri aşıldığında karışımlar normal konsolide zemin gibi davranacaklar ve kabarma indisi ile sıkışma indisi artarak konsolidasyon katsayısı azalacaktır.

Arıoğlu (2000), Uludağ Wolfram Maden İşletmesinden alınan artık malzemenin çimento ve kireç ile karışım oranlarına ve kür süresine göre mekanik özelliklerini (basınç, çekme direnci, elastisite vb.) incelemiştir(Kahya,1995). Hazırlanan numuneler %5 oranında ve 7 ile 14 günlük kür sürelerinde incelenmiştir. İnceleme sonunda, artık malzeme içerisindeki kireç veya çimento miktarı arttıkça suya karşı dayanımın arttığı sonucuna varılmıştır. Stabilize malzemenin basınç direncinin kür süresi ile birlikte arttığı görülmüştür. Çekme direncinin de kür süresi ile artış gösterdiği ifade edilmiştir. Ancak bu artış yüksek karışım oranlarında düşük

karışım oranlarına göre fazladır. Malzemenin kohezyonu da kür süresine bağlı olarak artmaktadır. Kohezyon, karışım oranına göre de artmaktadır. Elastisite modülü kür süresiyle ve karışım oranlarıyla artmaktadır.

Gelişmekte olan ülkelerin kırsal kesimlerinde, inşaat malzemesi olarak kullanılan kırmızı kil zeminler çok dayanıklı değildir. Zira, gerekli mukavemeti sağlayamazlar ve nemli iklimlerde büyük miktarlarda suyu emerek mukavemetin azalmasına ve kuruma ile oluşan çatlaklara neden olmaktadır. Bu zeminlere, kireç, çimento ve kimyasal malzemeler eklenerek bazı karışımlar yapılarak, dayanım ve su emme kapasiteleri test edilmiştir. Chandra (1987), bir inşaat malzemesi olarak kullanılmaktan kaçınılan bu killerin, düşük mukavemet ve yüksek su emme kapasitesi gibi bazı özelliklerinin geliştirilebildiğini göstermiştir.

Portland çimentosu ve kireç ile stabilize edilen zeminlerin, inşaat malzemesi olarak özellikleri iyileşir ve yerleştirme işlemi düşük maliyetle gerçekleştirilebilir. Diğer yandan, doğal ve sentetik polimerler uzun yıllardır kil stabilizasyonu için kullanılmaktadır. Fakat, büyük miktarlarda gerekli olduğunda, pahalı bir çözümdür. Chandra (1987), çimento-kil-kum ve kireç-kil-kum karışımları üzerinde sistematik bir araştırma yapmış ve kimyasal katkıların, su emme özelliği üzerinde etkisini araştırmıştır. Genel olarak, bu çalışma sonucunda killi zeminlerin düşük mukavemet ve yüksek su emme özelliği gibi özelliklerinin geliştirilerek, daha dayanıklı olmasının mümkün olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu karışımlar üzerinde iklimsel koşulların etkisinin test edilmesi ve arazi deneyleri yapılması için daha birçok çalışma yapılmıştır.

2.1.5. Zemin güçlendirme ile ilgili yapılmış diğer çalışmalar

Ünver (1992) tarafından yapılmış araştırmada, titreşimli derin sıkıştırma ve titreşimli kolon dolgu metotları ile zemin iyileştirmesi incelenmiştir. Bu çalışmada, 1987 ve 1990 yıllarında Bandırma ve İskenderun da yapılan betonarme tahıl silolarının temellerinde uygulanan zemin güçlendirme metotları incelenmiştir. Çapar (1992) tarafından yapılmış araştırmada, kompakte edilmiş zeminlerde fiziksel ve

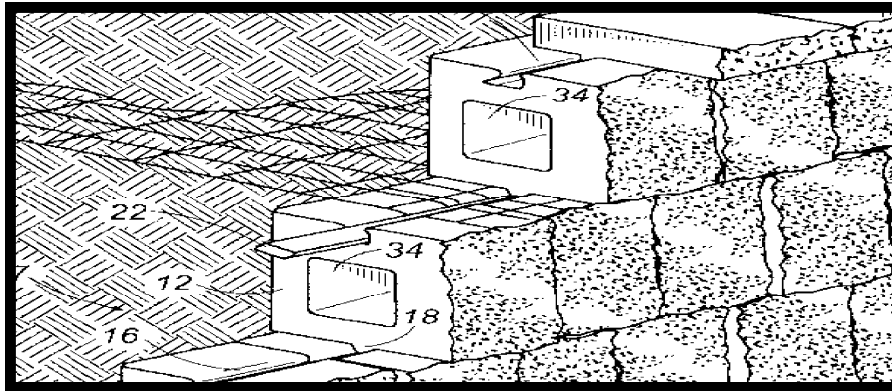
mekanik özelliklerin değişimi araştırılmış. Edi (1993) tarafından yapılmış araştırmada ise, ön yükleme ile zemin ıslahı araştırılmış ve ön yükleme, kum drenler yöntemi, elektro osmoz yöntemi, ısı ile stabilizasyon, vibroflatasyon gibi metotlar incelenmiştir. Kahya (1995) tarafından yapılmış araştırmada, geçirimsiz perde ve levhalar için kullanılan zemin iyileştirmeleri incelenmiştir. Şahin (1995) tarafından yapılmış araştırmada, düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerde yapılan temellerde ve şevlerde koruma tabakası oluşturulması araştırılmış ve püskürtme beton, enjeksiyon, ankraj, hasır çelik gibi metotlar incelenmiştir. Sözen (1996) yumuşak zeminlerin iyileştirilmesi ve iyileştirme yöntemlerini tartışmıştır. Tümer (1999) sıvılaşmaya karşı güçlendirme metotları, sıvılaşmadan dolayı karşılaşılabilecek problemleri ve bunlara karşı iyileştirme ve güçlendirme metotlarını incelemiştir. Çetinkaya (2002) tarafından yapılan çalışmada, farklı zemin sınıfları ve farklı perde tiplerine göre yüksek yapı güçlendirilmesi ve bunların karşılaştırılması analizi yapılmıştır. Öztürk (2006) yapmış olduğu çalışmada, Adapazarı Ovasındaki zeminlerin genel dağılımı ve uygun zemin iyileştirme yöntemlerinin belirlenmesi üzerine çalışmış, pek çok zemin iyileştirme ve güçlendirme yöntemleri hakkında bilgiler sunarak, özellikle Adapazarı çevresinde büyük bir zemin problemi olan sıvılaşmayı yoğun bir şekilde işlemiştir.

2.2. Alınmış Patentler

Son yüzyıllarda zemin güçlendirmesine duyulan ihtiyaçta önemli artışlar gözlenmiş ve beraberinde yeni buluşlar ortaya çıkmıştır. www.uspto.gov internet sitesinde verilen bazı patentler aşağıda sunulmuştur.

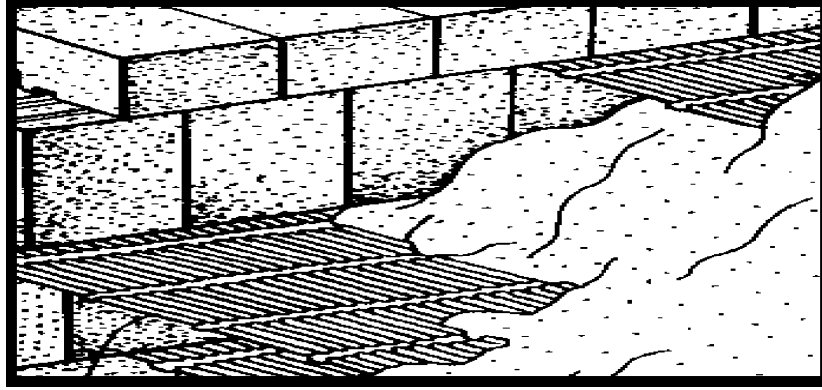
Upson (1911) tarafından alınan patent, zemin güçlendirme metotlarıyla ilgili ilk patentlerden biri olup beton kazıkların sürtünmesinden yararlanılarak zemini güçlendirmek fikrini temel alır. Daha sonraları Ramsey (1939) tarafından alınan patent, şevlerde set yapılarak stabilite kazanılması ile ilgili bir metoda yöneliktir. Meheen ve Nielson (1977) tarafından alınan patent ise modüler istinat duvarlarının gelişiminde etkili bir rol oynamıştır. Mercer(1985) tarafından yine geotekstillerle ilgili bir patent alınmıştır. Kolombiyalı araştırmacı Freed (1989) tarafından fiber ile

zemin güçlendirilmesi patenti alınmıştır. Ayrıca yine aynı araştırmacı tarafından 1989 yılında zeminlerin donatı ile güçlendirilmesi hakkında bir patent alınmıştır. Crambes (1989) tarafından sondaj yardımıyla zemin güçlendirme metoduyla ilgili bir patent alınmıştır. Willibey ve ark.(1990) tarafından ahşap geogrid patenti alınmıştır. Peirce ve Weather(1990) tarafından ankrajlama ile ilgili bir patent alınmıştır. Fox (1992) tarafından alınan patent, sürtünmeden faydalanarak zemin güçlendirme metodu ile benzerlik göstermektedir. Kitziller (1992) tarafından istinat duvarlarıyla ilgili bir patent alınmıştır. Scales (1995) tarafından da istinat duvarları hakkında bir patent alınmıştır. Forsberg (1996) tarafından alınan patent, blokların üst üste açılı bir şekilde konulması sonucu elde edilen istinat duvarı uygulamasına yöneliktir. Shimade(1996) da istinat duvarı hakkında bir patent almıştır. Fage ve ark. (1997) tarafından alınan patent, zemine dışardan granüler malzeme serilmesiyle ilgilidir. John (2000) tarafından alınan modüler istinat duvarıyla ilgili patent ile Novich (2000) tarafından alınan fiberli zemin patentleri, zemin güçlendirme metotlarına farklı yaklaşımların getirilmesine başlangıç niteliğindedir. Rainey (2001) tarafından alınan patent, istinat duvarlarında yeni bir uygulama yöntemin başlangıcı sayılabilir. Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi blokların aralarına geotekstil serilerek zemin doğrultusunda devam ettirilerek bir tür mekanik satabilize istinat duvarı düşünülmüştür.



Şekil 2.1. Bloklar arasında geotekstil yerleştirilerek elde edilen güçlendirme yöntemi, Rainey (2001)

Kittson (2001) tarafından geotekstillere ilgili alınan patentten sonra, Scales (2002) tarafından istinat duvarı uygulamaları ile ilgili alınan patent Şekil 2.2.'de sunulmuştur.



Şekil 2.2. Bağlayıcı geogrid uygulaması, Scales (2002)

Race (2003) istinat duvarları hakkında bir çalışma sonrası bir patent almıştır. Neden ve ark. (2005) kemerler hakkında çalışma yapmış ve bu kemerleri donatı ile güçlendirerek bir patent almışlardır. Kimberlin ve Chirbas (2005) tarafından alınan patent erozyonu önlemeye yönelik şevlerle ilgili bir patenttir. Short (2006) tarafından alınan patent, ankrajla ilgili bir patent olup, literatürlerde karşılaşılan son patentlerdendir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Aşağıda zemin güçlendirme metotlarının kullanım alanları ve uygulama metotları karşılaştırmalı bir şekilde detaylandırılmıştır.

3.1. Sıkıştırma ile Zemin İyileştirilmesi

3.1.1. Üst yüzey sıkıştırılması

Bu metot, zemin boşluklarını ortadan kaldırılarak zemin oturmasını asgari düzeye indirmeye yönelik bir metottur. Genelde silindirler yardımıyla yapılan bu uygulama, yollarda ve aşırı zemin dayanımına ihtiyaç duyulmayan zeminlerinde yapılan bir zemin güçlendirme metodudur. Etkisi yüzeysel olduğundan bazı uygulamalarda dışardan getirilen uygun dolgu malzemeleri 25-30cm tabaklar halinde serilerek ve sulanarak sıkıştırılır. Bu sulanma Proctor deneyinde öngörülen optimum su muhtevasında yapılır. Bazen de bu uygulamalar el aletleriyle veya küçük vibrasyon makineleri yardımıyla yapılmaktadır. Bu daha çok büyük makinelerin giremeyeceği küçük alanlar veya büyük makinelerin girdiği zaman diğer yapılara zarar verebilme ihtimalinin olduğu alanlarda yapılmaktadır. Yüzeysel kompaksiyonu gerçekleştirmek için, aşağıdaki ilkelerin bir veya daha fazlasını temel alan çeşitli tip aletler kullanılmaktadır.

- taşıma kapasitesi limitleri içinde zemini yükleyen büyük kayma gerilmesi uygulaması
 - ✓ tandem silindirler(ağır ve hafif):bazen tandemde üç silindir
 - ✓ keçi ayaklı silindirler:ayrıca bazen tandem silindirleri birlikte
 - ✓ hareketli akslar üzerinde sabitleştirilmiş pnömatik şişirilmiş silindirler
- sıkıştırma enerjisinin uygulanması
 - ✓ darbeli sıkıştırıcılar

- ✓ kurbağa ayaklı sıkıştırıcılar
- ✓ normal tokmaklar
- titreşim (vibrasyon) enerjisinin uygulanması
- kayma gerilmesi ve vibrasyon enerjisinin birleşimi
- ✓ vibrasyonlu silindirler

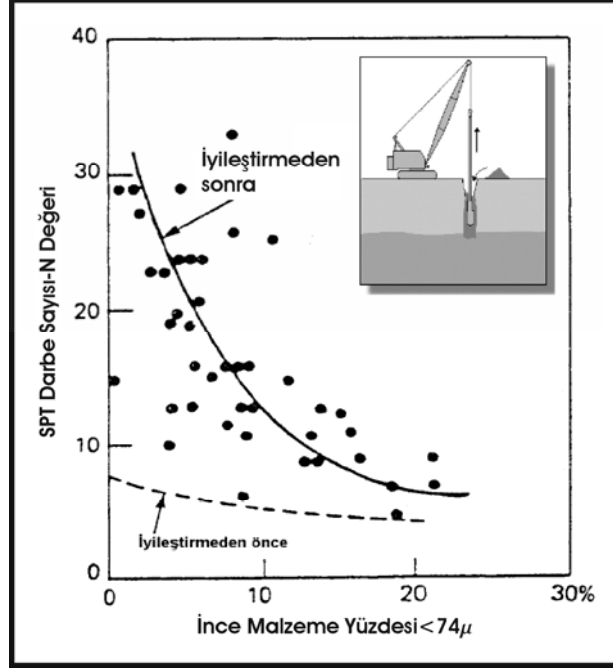
3.1.2. Ön yükleme ile sıkıştırma (ön konsolidasyon, preloading,)

Amaç, yapısal yükler altında zamanla oluşacak konsolidasyonun yapı yapılmadan önce oluşturulmasıdır. Yapının yapılacağı zemine belirli bir süre önce yapılan yüklemedir. Özellikle suya doymuş kil tabakaları üzerine yapılacak yapılarda uygulanan bu metot, iyileştirilecek olan zeminin üzerine belirli bir süre dolgu (genelde kum ve çakıl) malzemesi yerleştirilerek ve daha sonra bu dolgu malzemesinin yerinde bırakılarak veya kaldırılarak elde edilen iyileştirme yöntemidir.

3.1.3. Derin sarsma ile sıkıştırma (Vibrokompaksiyon, Vibroflotasyon)

Taneli zeminlerde derine vinç ve uzatma boruları yardımıyla bırakılan vibratör ile yapılan sıkıştırma. Boşluk oranları ve sıkışabilirliği azaltarak içsel sürtünme açıları, taşıma güçleri ve sıvılaşmaya karşı olan dirençleri artırmaktadır. Genelde, sıvılaşma ihtimali bulunan zeminlerde ve boşluk oranı yüksek zeminlerde kullanılır. Kumlar ve killi kumlar için daha elverişli olduğu düşünülmektedir. Şekil 3.1.'de derin sarsma ile ilgili olarak, iyileştirme öncesi ve sonrası dayanım sonuçları verilmiştir. Derine indirilen sondanın yatay titreşimi sonrası oluşan bir sıkıştırma yöntemidir. Bazen bütün eksen boyunca sıkıştırma yapılırken bazen de sadece sondanın ucunda sıkıştırma yapılır. Sonda hangi derinlikte olursa olsun verilen enerji sabittir. Yeraltı su seviyesi altındaki kum zeminin sıkışması için uygundur. Taneli malzeme içerisinde ince daneli malzeme oranı %20'yi, içerisindeki aktif kil oranı ise %3 ü aşmamalıdır (Bell,1993). Vibroflotasyon zeminin yüzeyinde koni şeklinde bir çöküntüye sebep olur. Bu sorun dışarıdan malzeme getirilerek giderilebilir.

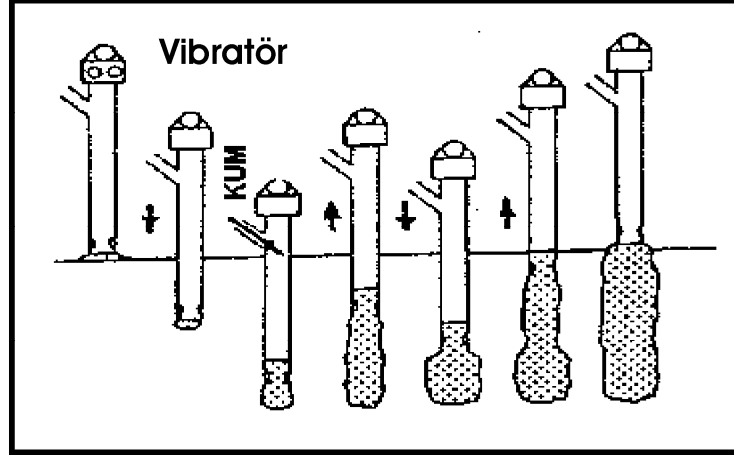
Vibroflotun 2 ila 5 dakika arasında çalıştırılması yeterlidir. Fazlası gereksiz ve ekonomik değildir.



Şekil 3.1. İnceler yüzdesinin vibroflotasyonla elde edilen penetrasyon direnci artışına etkisi (Saito,1977)

3.1.4. Sıkıştırma kazıkları (şişleme kazıkları) ile sıkıştırma

Mischell(1970)'in “compaction pile” (kompaksiyon kazığı) metodu olarak tanımladığı bu metot, kum kazıkları olarak ta adlandırılmaktadır(Kahya,1995). 1973 yılında Japon-Tanimato firması tarafından geliştirilen bu araç, basınçla zemine çakılan kazıkların zemin sıkıştırmasına yardımcı olmasını esas alır. Bu yöntem, yumuşak zemin içerisinde titreşimli bir muhafaza borusu yardımıyla kum veya benzer bir malzeme kullanılarak oluşturulan kum kazıklardır. Kum sıkıştırma kazıkları (SCP) ekipmanları, projedeki derinliğe ulaştıktan sonra projede belirlenen ebatta kum ekipmandan kademeli olarak boşaltılır ve vibratörlenir. Bu vibratörleme çapı ve kumun yoğunluğunu artırarak sıkıştırılmış kum kolonlar oluşmasını sağlar. Kum kazık oluşturma aşamaları Şekil 3.2.'de verilmiştir.

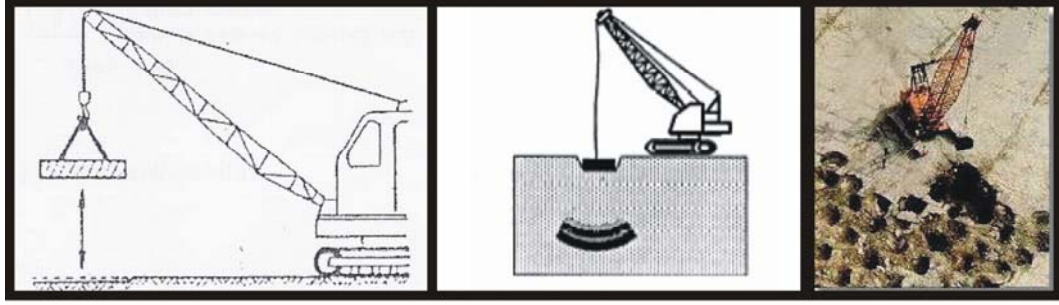


Şekil 3.2. Sıkıştırılmış kum kazıkları oluşturma aşamaları (Tanimoto, 1973)

Taş kolona göre yapımları daha hızlı ve ekonomiktir. Ayrıca, kuyu duvarlarındaki göçme de kum kazıklarında olmamaktadır. Ancak dolgu malzemesi olarak kum kullanılması dayanım açısından diğer metotlara göre daha zayıf bir formasyonun oluşması anlamına gelir. Aynı zamanda, kuyu muhafaza borusunun çakılması, kuyu duvarlarını geçirimsiz bir hale getirdiğinden dolayı, drenaj özelliği ve zemini sıkıştırma özelliği azalmaktadır. İnce malzemenin %20'den fazla olması durumunda yöntemin verimliliği düşmektedir.

3.1.5. Üst yüzeyden vuruşlu (düşen plaka ile) sıkıştırma (dinamik kompaksiyon, ağırlık düşürme)

Ağır bir nesnenin aynı yere tekrarlı bir şekilde düşürülmesi sonucu bu zemin iyileştirilmesi yapılmaktadır. Genellikle sıkıştırma, 5 ile 27 ton arasındaki yükün, 12 ila 30 metre arasındaki yükseklikten düşürülmesiyle oluşur. İyileştirme derinliği 9 metreye kadar çıkabilmektedir. Bilinen en eski metotlardan olan bu metot, günümüze kadar gelişerek gelmiştir. Held und Franki firması tarafından geliştirilen düşen plakanın ağırlığı 20 ton ve düşme yüksekliği 20 m olarak seçilmiştir. Bazen bu uygulamalar 40 metreden 155 tonluk ağırlığın düşürülmesi gibi büyük rakamlara ulaşabilir. Ağırlık genelde 3 ile 8 arasında bir tekrarlamayla aynı yüzeye düşürülür. Gerekli olan derinlikteki zemini iyileştirmek için farklı ağırlık ve düşme yüksekliği seçilmektedir. Şekil 3.3.'de yöntemin uygulama şekli ve iyileştirdiği zemin gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Düşen plakların uygulama şekilleri

3.1.6. Derinden vuruşlu sıkıştırma (patlatma sıkıştırması)

Suya doymun kohezyonsuz zeminlerde patlayıcı maddelerin patlatılması sonucu oluşan sıkıştırma yöntemidir. Proje derinliğine kadar muhafaza borusu yardımıyla uzatılan patlayıcı maddenin sondaj kuyusunun kapatılmasının ardından sıralı veya toplu bir şekilde patlatılmasıyla oluşur. Suya doymun olmayan zeminlerde uygulanması sıkıştırmanın homojen olamayacağından dolayı verimsizdir. Tabaka kalınlığı 10 metreyi geçtiğinde birkaç tabaka halinde uygulanır. Üsten veya alttan fitillenecek işlem yapılır. Zemin derinliklerine patlatma (Amonyum Nitrat, TNT, vb.) ile verilen basınç sonucu, ortaya çıkan zemin iyileştirme yöntemidir. 1951 yılında ilk defa, Sovyet Rusya’da Volga barajı inşaatında kullanılmıştır. A.B.D’ de patlayıcı madde olarak genelde dinamit seçilmektedir. Dinamit içindeki nitro gliserinin olmasından dolayı bu uygulama çok tehlikeli olabilmektedir. Tan (1976) tarafından Vietnam’da kum kazık ile patlatma metodu birleştirilerek yeni bir metot elde edilmiştir.

3.1.7. Kompaksiyon kazıkları

Bu teknik, kazık çakılarak elde edilen titreşim ve basınç sonucu zemin iyileştirme metodudur. Granüler zeminlerde uygulanır. İnce oranının %20’nin üzerine çıkması durumunda daha sık kazık çakılması gerekmektedir.

3.2. Zemin Değişirme İle Zemin İyileştirmesi

3.2.1. Kuruda zemin değişirmesi

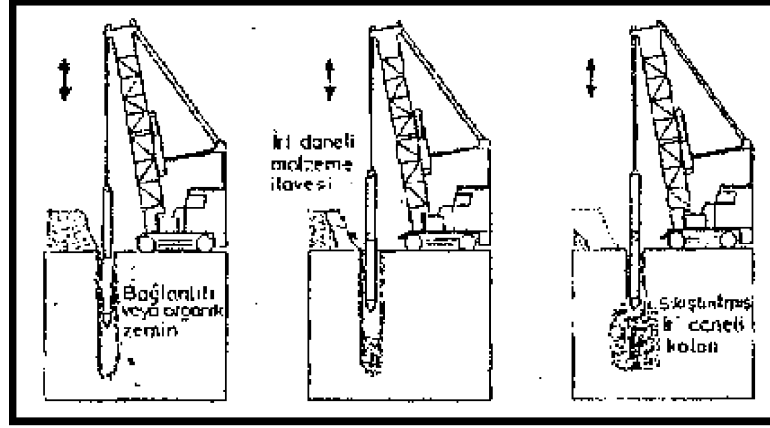
Yüzeydeki problemleri gidermek için uygulanan bir metottur. Sağlam zemin elde edilinceye kadar yapılan kazının ardından, çukurun içersine taşıma gücü yüksek malzemelerin tabakalar şeklinde serilip sıkıştırılmasıdır. Bu tür uygulamalarda yapı temelleri altında oluşan ek gerilme artışlarının yayılarak dağıldıkları göz ardı edilmemelidir.

3.2.2. Kuruda kısmi zemin değişirmesi (yastık tabakası, tampon tabakası)

Belirli alanlarda farklı taşıma gücü gösteren zeminlerin, taşıma gücünün dengelenmesi amacıyla oluşturulan tabakadır. Bu tabakanın kalınlığı ile oturmalar ters orantılıdır.

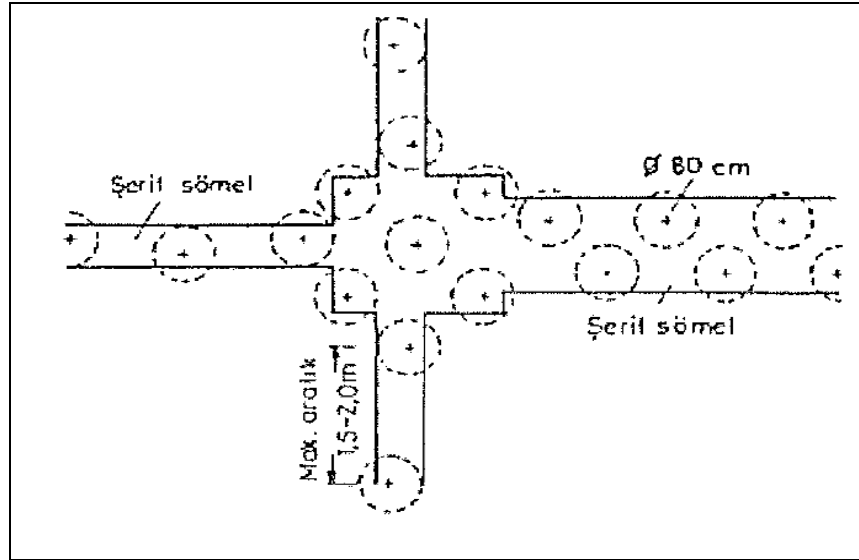
3.2.3. Sarsma tıkaçı metodu

Vibro-kompaksiyon metodunun çok iyi işlemediği ince daneli ve bağlantılı zeminlerde uygulanan bu yöntem, vibratörün titreşimle boşluklarını alamadığı fakat ittiği zeminlerde bu itmeden kaynaklanan boşluklara dışarıdan malzeme konulmasıyla bu teknik uygulanır. Bazen bu uygulama, tabakalar halinde yapılarak daha sağlam bir zemin elde edilir. Keller (2003)'in geliştirmiş olduğu “savaklı sarsıcı” aracı ile bu uygulama daha popüler bir hal almıştır. Savaklı Sarsıcı denilen araç vibratörün yaratmış olduğu boşluğu anında dışardan getirilen malzemeyle doldurarak, oluşan boşluğun çökmesi, tabakaların kalınlığından dolayı sıkışmaması gibi sorunları ortadan kaldırmıştır. Şekil 3.4.'de sarsma tıkaçı yönteminin uygulama aşamaları sunulmuştur.



Şekil 3.4. Sarsma tıkaçı metodu uygulaması

Hilmer (1975) tarafından yapılan çalışma, yükler altında bu çukurların yerlerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmakta olup, Şekil 3.5.'de verilmiştir.

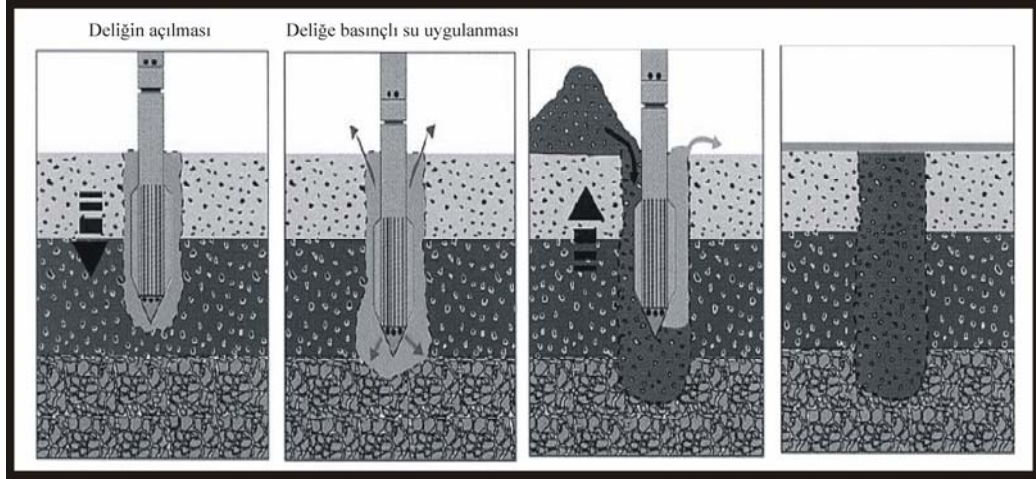


Şekil 3.5. Şerit sömeller altında önerilen bir uygulama, Hilmer (1975)

3.2.4. Taş sütunlar (vibro-replacement, taş kolon)

Temel Mühendisliğinde zemin koşullarının uygun olmaması durumunda üst yapı yüklerinin daha uygun tabakalara aktarılması veya zemin tabakalarının iyileştirilmesi gerekmektedir. Elverişsiz zeminin temel altından kazılarak uzaklaştırılması ve yerine daha iyi nitelikli malzeme doldurulması bu yöntemlerin en eskilerinden birisi olarak bilinmektedir.

Kaymaların görülebileceği yerlerde, zemin taşıma gücünün artırılarak üst yapıdaki maliyetlerin düşürülmesi ihtiyacı duyulduğunda, sıvılaşma ihtimali bulunan bölgelerde, oturmaların zarar verebileceği bölgelerde, dolgularda, sıg temellerde uygulanabilen bu metot, taş sütunlar veya tanecikli sütunların zemin uygulanmasıyla sağlanmaktadır. Bu yöntemin uygulama aşamaları Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Taş sütun uygulama aşamaları

Taş kolonlar ilk olarak 1830 yılında Fransa'da doğal zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmıştır. 1972'den sonra Amerika'da kötü zemin koşullarındaki sahalarda inşa edilecek yapılarda, geleneksel temel inşaatı yöntemlerinin pahalıya mal olduğu ve ekonominin önemli olduğu yumuşak kil, silt ve siltli kumlarda güçlendirme amacıyla kullanılan bir yöntemdir (Durgunoğlu,1992).

Taş kolon tekniği, başta konsolidasyonu hızlandırmak, zeminlerde taşıma kapasitesi artırılması, sıvılaşma potansiyelinin azaltılması ve dolgu ve şev stabilitesinin sağlanması amacıyla kullanılır. Taş kolon yapımı sırasında oluşan titreşim ve yer değiştirmeler sayesinde zeminin rölatif sıkılık derecesinde artış sağlar, taş kolonlar sahip oldukları yüksek dayanım ve yoğunluk nedeniyle, zeminin taşıma gücü kapasitesini de artırırlar, aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu engellerler ve taş kolon uygulaması ile kolon etrafındaki zeminde yanıl gerilme artışı meydana gelir.

3.2.5. Su içinde zeminin tümüyle değiştirilmesi

Genelde liman inşaatlarında uygulanan bu yöntemin uygulanabilirliği değiştirilmesi gereken zeminin kitesiyle ters orantılıdır. Mekanik yollarla (koyalı tarak, kesici başlıklı-emici tarak v.b. aletler kullanılarak) zemin gevşetilir. Daha sonra bu malzeme dubalar veya boru hattı ile taşınarak yerine yeni malzeme dökülür. Bu uygulama yol yapımında da kullanılmaktadır.

3.3. Kazıklar

3.3.1. Çakma kazıklar

Çakma kazıklar, taşıma gücü yetersiz ve zaman içerisinde limiti aşan oturmaların görülebileceği yerlerde, kırılmaların veya göçmelerin görülebileceği yerlerde kullanılır. Ayrıca bu teknik, yapıya ve zemine göre sığ temellerin daha sağlam zeminlere oturtulması veya zeminin ağırlığıyla yapının ağırlığını sürtünme kuvveti yardımıyla dengeleyerek yapılan bir zemin güçlendirmesidir. Taşıma gücü yetersiz zeminlerde, yapıdan gelen yükü sağlam zemine aktaran kazıklar uç kazıklardır. Yük direk olarak kayaya veya kısmen daha sağlam zemine aktararak uygulanan bu metot, basınç soğanı yöntemiyle ölçülendirilir. Ayrıca bu kazıkların çakılması durumunda oluşan titreşimler sayesinde zemin sıkışarak kazıklarla bütünleşir. Şekil 3.7.'de uygulamada kullanılan bazı makineler gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Kazık makineleri

3.3.2. Fore kazıklar

Sondaj yardımıyla, problemlı zemin içerisine açılan belirli bir çap ve uzunluktaki çukura beton dökölmesiyle yapılan bir metottur. Yüku zemin içerisinde homojen olarak yayarak zeminin ağırlığından faydalanılır. Çapları genelde 40 ila 60 cm arasında olup boyları 6 ila 15 m derinliğindedir. Bazı uygulamalarda çapları 150 cm'ye boyları 60 m'ye kadar çıkabilmektedir. Bu esit kazıklar, sağlam kil zeminlerde ve yapı temellerinde sıkça kullanılmaktadır. Bu kazıkların inşasında bazen, ucu acık bir kaplama borusu sondaj yoluyla zemine sokulur ve içindeki zemin tamamen çıkartıldıktan sonra yerine beton doldurulur. Bu Şekilde imal olunan kazıklar küçük bir ayak temel gibi düşünölebilir.

3.3.3. Mini kazıklar

Değişik yöntemlerle açılan küçük çaplı deliklerin betonarme ile doldurulmasıyla uygulanan bu yöntem pratik ve ekonomik oluğu ile pek çok yerde kullanılabilir. Yamaçlarda, yapılara gelecek hesaplanmamığ yükler için mevcut temelin sağlamlaştırılmasında ve başka metotların uygulanamadığı dar ve küçük alanlarda avantajlıdır. Günümüzde, betonun pompalar yardımıyla basınçlı ve istenilen yerlere dökölebilir oluğu bu metodu daha avantajlı hale getirmektedir. Genellikle apı 30cm den az burguyla aılmığ kuyuların betonlama yapılarak güçlendirme yöntemidir. Çevreye ve çevredeki yapılara en az zarar veren yöntemlerden biridir. Uygulamada yüksek tavan boşluğuna ihtiyaç duyulmaz. Bundan dolayı mevcut yapılarda uygulanması kolaydır. Yüksek derecede beton-zemin arayüzünde tutunma değerleri sağlamaktadır.

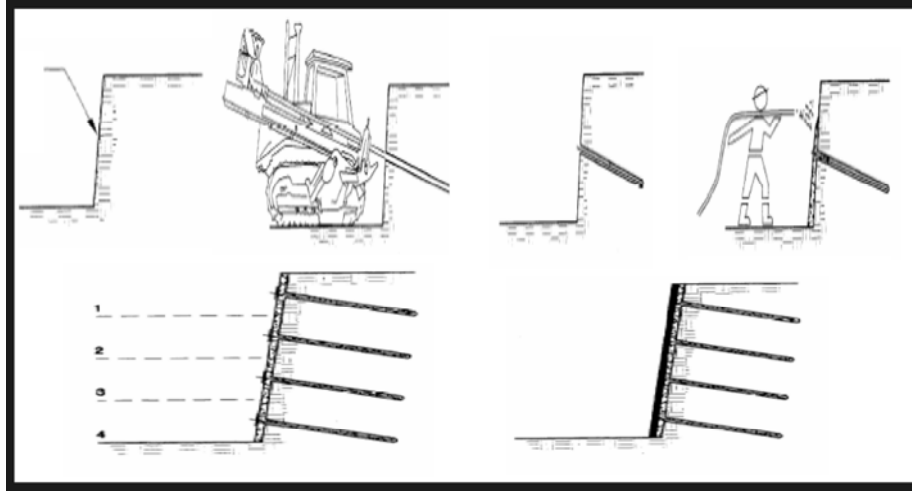
3.3.4. Zemin ivileri

Çapları 10 ila 30cm arasında boyları 0.5 ila 2.5 m arasında değişmekte olan çeliklerin zemine çakılmasıyla yapılan zemin iyileştirme yöntemidir. Bazen direk olarak zemine çakılarak bazen de herhangi bir delici vasıtasıyla açılan deliğe çeliğin yerleştirilip boşlukların enjeksiyonla (genelde imento enjeksiyonu) doldurulmasıyla

uygulanan bu yöntem, zeminin kesme kuvveti direncini artırır. Ayrıca bu enjeksiyon korozyonu da önlemektedir. Projeye göre metrekaresine düşen zemin çivisi sayısı 1 ila 5 arasında değişmektedir. Yapıdan gelecek yükler altında veya şevlerde zemini bir bütün haline getirir ve çökmelere oturmalara karşı direncini artırır. Otopanlarda sık karşılaşılan bu yöntemin uygulama tekniği Şekil 3.8. ve Şekil 3.9.'da sunulmaktadır.



Şekil 3.8. Zemin çivisi uygulamasından 2 görünüm



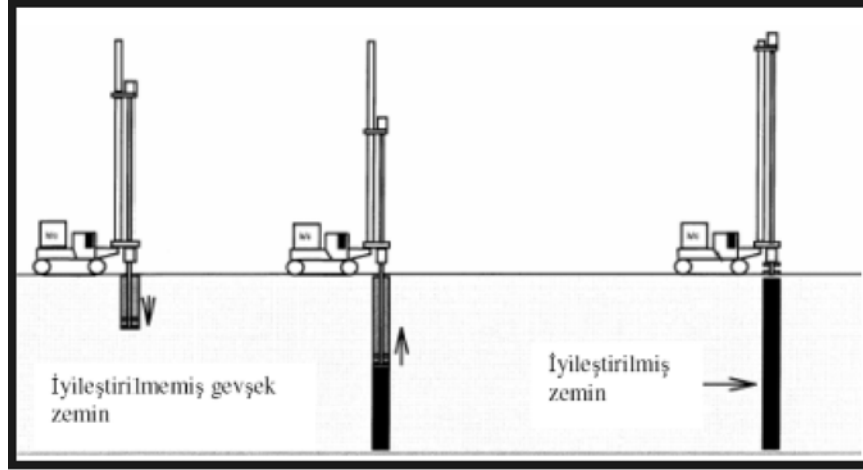
Şekil 3.9. Zemin çivisi uygulamasının detayları

Çekmeye karşı zayıf zeminlerde çeliğin çekme dayanımından yararlanılarak yapılan bir zemin güçlendirme yöntemidir. Çelik çubukların enjeksiyonlararak yerleştirilmesi esasın dayanır. Şevlerde eğim belli bir açıyı geçtiğinde veya yüzey bozursa yüzey kaplaması yapılmalıdır. Zemin çivilerinin ekipmanlarının uygunluğu, hızlı uygulanabilirliği, küçük çalışma alanları, taşıma ve ulaşım gibi avantajları

vardır. Kohezyonsuz zeminlerde, yer altı suyunun olduğu zeminlerde uygulanması uygun değildir. Çapı 10cm ila 30cm arasında olan çelik donatı sondaj deliğine yerleştirildikten sonra tremie borsu (açık delik uygulaması) yardımıyla yapısal enjeksiyon dolgusu uygulanmak suretiyle yapılır. Enjeksiyon çelik donatıyı zemine bağlar. İstinat duvarlarına göre daha ekonomiktir. Bina kazıları için geçici ve kalıcı duvarlar, yol genişletme ve kötü durumdaki yollar için yarma şevlerinin muhafazası, köprü ayakları-mevcut köprü ayaklarının önündeki şevlerin kaldırılarak yeni yol şeritlerinin eklenmesi, şev stabilizasyonu, mevcut yapıların tamiri veya yeniden yapılması gibi yerlerde yaygın olarak uygulanmaktadır.

3.3.5. Derin karıştırma(kireç kazıkları)

Kirecin kil gibi yumuşak ve ince daneli zeminlerde puzolan bir reaksiyona girerek bu tür zeminlerine hızlı bir şekilde konsolidasyon yaptırarak mukavemetini artırmasıyla oluşan bir zemin iyileştirme metodudur. Bu uygulamalar genelde kolon, duvar veya tabakalar şeklinde uygulanırlar. Bu uygulamalarda homojenlik önemli bir unsurdur. Bazı uygulamalarda kirece çimentoda katılmaktadır. Bazen dışarıda hazırlanan çimento-kireç harcı, zemine enjekte edilerek uygulanan bu yöntem şevlerde, yol yapımlarında ve zeminin taşıma gücünü artırmasında yaygın bir yöntemdir. Kil ve siltli zeminlerde uygulanır. Kireç karıştırma aracı kullanılır. Dolgu, yol dolgusu, derin hendekler (mecra ve suyolu) gibi yerlerde uygulanır. Taşıma kapasitesini artırır, oturmayı azaltır, işlenmiş zeminlerde taşıma gücünü artırır. Şekil 3.10.'da kolon şeklinde uygulama yapılan derin karıştırma yöntemi sunulmaktadır.



Şekil 3.10. Derin karıştırma(kireç kazıkları) uygulamasının aşamaları

Kireç kolonlar, çimentonun yerine kirecin veya çimentoyla kirecin bir arada kullanılmasıyla oluşan bir derin karıştırma yöntemidir. Kirecin hidrasyon sonucu ortaya çıkan ısı, çevredeki su muhtevasını düşürürken hızlı konsolidasyon sağlayarak zeminin dayanımını artırır. Yüksek plastiseli zeminlerde daha fazla kireç kullanılır. Bazen kirece alçıda karıştırılmaktadır. Yüksek dayanıma ihtiyaç duyulan yerlerde kireç-çimento karışımları kullanılır. En eski stabilizasyon malzemelerinden biri olan kireç, çimentonun icadından önce yapılarda bağlayıcı madde olarak kullanılmıştır. Söndürülmüş veya söndürülmemiş kireç kile karıştırıldığında, ortamın pH'ı hızla yükselmekte ve reaksiyon başlamaktadır. Bu reaksiyonların istenilen düzeyde gitmesi için pH değerinin yüksek tutulması gerekmektedir. Buda, kilin flok halden çıkıp dağınık hal almasına sebeptir. Dolayısıyla, dağınık hale gelen kil daha kolay işlenebilir bir hal almaktadır. Ayrıca, kompaksiyon sırasında optimum su muhtevası artarken, kuru birim hacim ağırlık düşmektedir. Yapının floklanması sonucu, geçirimsizlik artmakta, killerin en problemliliği olan şişme/büzülme özelliğinde de düşüşler gözlenmektedir. İyileştirmelerden en anlamlısı, çekme ve basınç dayanımındaki yükselmelerdir. Yeterli katkı maddesi ilavesi ile, homojen biçimde karıştırıldıktan sonra, sıkıştırılan zeminin serbest basınç dayanımında 10 kata varan artışlar ölçülmüştür (Mitchell, 1993). Sonuçta, plastik kil, gevrek bir katıya dönüşmekte, reaksiyonlar bundan sonrada sürmektedir. Reaksiyonların uzun sürmesine bağlı olarak, kilde otojen onarım özelliğinin kazanıldığı bulunmuştur. Bir başka anlatımla, karışımda priz başladıktan sonra bir nedenle, aşırı yükleme veya donma-çözülme sonucu belirecek fissür ve çatlaklar, zaman içinde kaybolarak,

mekanik özellikler, eski değerlerine yükselebilmektedir (Önalp, 1993). Kireç ilavesi genellikle, zemin yoğunluğunda bir düşüğe, zeminin plastisite özelliklerinde bir değişikliğe ve mukavemette bir artışa sebep olmaktadır. Düşük plastisiteli zemin için kireç, likit ve plastik limit değerlerini ve plastisite indisini artırır. Yüksek plastisiteli zeminler için kireç, genellikle likit limiti düşürür ve plastik limiti artırır. Dolayısıyla, plastisite indisinde bir azalma olur. Tüm değinilen iyileşmelerin sağlanabilmesi, kürün nemli, hatta doygun ortamda ve belirli sıcaklık düzeyinde gerçekleştirilmesine bağlıdır. Bu da, stabilizasyonun ılıman ve tropik iklim koşullarında daha başarılı olacağının göstergesidir.

Whitehurst ve Yoder'in yaptıkları deneyler göstermiştir ki, zeminle reaksiyona girecek kirecin derecesi, miktarı, zeminin tipi ve kireç-zemin karışımının kürlendiği zamanın uzunluğu gibi değişkenlere bağlıdır. Kireç miktarını ve kür süresini arttırmakla, dayanıklılık artmaktadır. Kireç tipinin de dayanıklılık üzerinde etkisi fazladır. Bir kilde istenen iyileşmelerin getirilebilmesi için, hangi oranda kireç katkısı gerekeceği ve katkının yararı, sürecin bilimsel açıklamasıyla sağlanabilir. 1950'lerden günümüze değin yapılmış araştırmalar, konuya değişik bakış açıları getirmiş, ancak kesin görüş birliği sağlanamamıştır. Kil-kireç etkileşiminin klasik açıklaması şöyle yapılmıştır: Çimento, ortama bağlayıcı özellik getiren silikayı bol miktarda sağlarken, kireç bunu kil yüzeylerinden sökerek almaktadır. Kısa vadede, kirecin sağladığı kalsiyum katyonları pH'ı yükselterek, kil yüzeylerine bağlı tek değerlikli iyonları almakta, Ca(OH)_2 ise silt boyutundakiler de dahil, dane yüzeylerine absorbe olarak bunları birbirine bağlamaktadır. Uzun vadede ise, yüksek pH ortamında, kilin kristal kafesinin parçalanması sonucu ikincil reaksiyonlar ve yapılar oluşmaktadır.

3.4. Sağlama İle Zemin İyileştirme

3.4.1. Zeminin Dondurulması

Zemin dondurulması yöntemi, genelde kısa süreli yapıların temellerinde kullanılan bir teknik olup, ilk olarak yaklaşık 100 yıl önce kullanılmıştır. Hemen

hemen bütün zemin türlerinde uygulanabilen bu yöntem, zeminin soğutularak dondurulması ve bu dondurmanın akabilinde zeminin belirli bir enerji harcanarak sürekli soğutulmasıyla sıcaklığın sabit kalması yoluyla yapılan bir yöntemdir. Uzun ömürlü yapılar için kullanılamaz. Fakat kısa süreli yapılar için zemini değiştirmeye, sıkıştırmaya, herhangi bir enjeksiyon enjekte etmeye gerek kalmadan uygulanabilir. Amonyak, karbondioksit, nitrojen gibi maddelerin dondurma borularından soğuk taşıyıcı akışkanlar (magnezyum klor, kalsiyum klor) yardımıyla dolaştırılarak etrafını soğutması sonucu oluşur. Geçici bir süre için sağlam zemine ihtiyaç duyulan kanalizasyon ve tünel çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Kayma mukavemetine oldukça yarar sağlamaktadır. Hatta bazı kısa süreli sağlam zemine ihtiyaç duyulan yerlerde, dışarıdan su getirilip zemine dökülerek ve bu suyun zemindeki boşlukları doldurmasının ardından su dondurularak, kısa süreli zemin iyileştirilmesi yapılmaktadır. Dolayısıyla zemin dondurularak sabitlenmektedir. Zemindeki yeraltı suyu akımını kesmek ve zeminin kayma dayanımı ile beraber yapısal kapasitesini artıran bir zemin iyileştirme yöntemidir.

3.4.2. Zeminin ısıtılması

Zeminin yakılması (ısıtarak iyileştirme), zeminin ısıtılarak fiziksel yapısının değiştirilmesi sonucu oluşan zemin iyileştirme yöntemidir. Araştırma aşamasında olduğundan dolayı pek yaygın bir uygulama metodu değildir. Açılan sondaj deliğine yakıt ve basınçlı hava aynı anda verilerek elde edilen ısı, sondaj deliğinin etrafındaki suyu kaçırmaması sonucu kuru zemin elde edilir. Isı kaybını engellemek için deliğin ağzı kapalı tutulur. Yakıt olarak bazen benzin bazen ise elektrotlar kullanılır. Henüz araştırma aşamasında olan bu yöntem, kirli zeminlerin temizlenmesinde uygulama alanı bulmuştur. Zeminin ısıtılması uçucu organik bileşiklerin buharlaşmasına da yardımcı olmaktadır.

3.4.3. Elektro-osmoz yöntemi

Elektro-osmoz, suya doygun killi bir zeminde doğru akım elektrik potansiyeli uygulanırsa, katyonlar katoda anyonlar anota çekilecektir. Katyonlar ve anyonlar hareket ederken kendi hidrasyon sularını ve viskoz sürtünmeden kaynaklanacak ek suları taşırlar. Net negatif yük dolayısıyla hareketli katyonlar anyonlardan daha çok olup killi zemin içerisindeki net boşluk suyu akımı katoda doğru olacaktır. Eğer katot bir noktada ise, kattota toplanan su kuyudan çekilebilir ve elektrotlar arasındaki zemin de konsolide olur. Konsolidasyon anotta en fazla, katotta ise en azdır. Katotun kendisinde ise hiç konsolidasyon olmayacaktır. Elektroosmoz işlemi daha düşük bir su muhtevası, sıkışabilirlik ve daha yüksek bir dayanım sağlamaktadır. Doğru akım elektrik potansiyelinin suya doygun bir kile uygulanmasıyla iyon ve mineral değişime yol açan elektrokimyasal bir sertleşmeden dolayı, dayanımda ek bir artış plastisitede de bir düşüş gerçekleşebilir.

3.4.4. Çimento ile stabilizasyon

Çimento ile stabilizasyon, zemin-çimento stabilizasyonu, 1935 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde yol inşasında uygulanmış ve o tarihten itibaren geniş çapta kullanılmıştır. Zemin-çimento karışımı İngiltere’de de bir derceye kadar, bina briketlerinde ve ev inşaatları temellerinde kullanılmıştır. İlk olarak A.B.D.’nin Johnsonville yakınında uygulanan bu uygulama tekniği, baraj ve yol yapımında oldukça yaygın olup her geçen gün popülaritesini artırmaktadır. Çimento stabilizasyonu, sıkışma problemi olan ve suya direnci zayıf olan zeminlerde kullanılır. Çimento ile zemin stabilizasyonunda genel olarak, %5 ile %15 ağırlık oranında çimento, zemine karıştırılarak bir zemin-çimento malzemesi meydana getirilir. Bu meydana gelen malzeme, zeminden daha mukavemetli ve dayanıklıdır. Zeminin kayma direncini artırır ve zemine çimento katıldığından, zeminin su geçirimsizliği artar. Genel olarak literatürde, maksimum dane büyüklüğü 8 cm, likit limiti 50’den küçük, plastiklik indisi 18’den küçük olan zeminlerde, çimento stabilizasyonunu uygulamasının iyi sonuç verdiği gözlenir. Çimento stabilizasyonundan dolayı, zeminin likit limiti düşer, buna karşılık plastik limiti

oldukça artar, dolayısıyla plastisite indisi azalır. Fakat plastisite indisi, kireç stabilizasyonunkinden daha küçüktür. Çimento stabilizasyonu, killi zeminlerde uygulandığında hacim değişmelerinde büyük azalmalar görülür. Stabilizasyonun etkisiyle şişme potansiyeli sıfıra yakındır. Zemin-çimento karışımında arzu edilen neticeleri elde etmek için, sıkışma yüzdesinin en az %95 ve tercihen %100 olması gerekir. Buna ilaveten sıkıştırma işi, çimento prizini yapmadan evvel, sona erdirilmelidir. Aksi halde düşük yoğunluklar meydana gelecektir. Sertleşme işinin devam etmesi için, zemin-çimento karışımının küre tabi tutulması şarttır. Genel olarak, zemin-çimento karışımları 7-8 günlük bir kür müddeti içinde sertleşir. Bu sertleşme çimento miktarına bağlıdır. Kür müddeti süresince, zemin-çimento karışımı rutubetli tutulmalıdır.

3.4.5. Kireç ile stabilizasyon

Kireç stabilizasyonu dünyada en çok uygulanan yüzeysel zemin iyileştirme metotlarından bir tanesidir. Kireç stabilizasyonu sonucunda killi zeminlerde likit limit düşerken plastik limit artmakta ve plastisite indisinde daha keskin düşüşler oluşarak, zeminin plastiklik özellikleri azalmaktadır. Bunun yanında maksimum kuru birim hacim ağırlık düşmekte, optimum su muhtevaları artmakta ve Proctor eğrisi düzleşerek sudan daha bağımsız sıkışabilirlik özellikleri kazanmaktadır. Serbest basınç, ve CBR gibi mukavemete dayalı deneylerde de çok yüksek artışlar gözlenmekte, ayrıca şişme değerleri keskin olarak düşmektedir. Bu etkiler Kavak (2007) tarafından Ankara kili ile yapılan çalışmalarda da nümerik olarak gösterilmiştir. Kavak (1996) tarafından yapılan araştırmada, saf bentonit ve kaolin killeri, kireçle stabilize edilerek serbest basınç mukavemetleri incelenmiştir. Bu deneyler sonucunda kilin serbest basınç mukavemetlerinde, bentonit için 1 ayda 6 kat, kaolin için ise 12 kata varan artışlar gözlenmiştir. Aynı çalışmada, bir aydan sonra da mukavemetlerde artışların zaman içinde devam ettiği gösterilmiştir. Killi bir zemine kireç katılması sonucu çeşitli kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir (Clare ve Crunchley, 1957). Bu reaksiyonların sonucunda katyon değişimi, (topaklaşma) çökeltme-yığışma ve çimentolaşma meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlardan bazıları ilk saatlerde başlamakta ve devam etmektedir. Özellikle

pozolonik reaksiyonlar uygun su muhtevasında ve sıcaklıkta zaman içinde yıllarca devam edebilmekte ve mukavemetler çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Katyon değişimi reaksiyonu sonucunda genellikle killerle birleşen tek değerli katyonlar çift değerli kalsiyum iyonlarıyla yer değiştirirler. Çökeltme-yığışma ile kil parçacıkları birbirlerine yönelerek, daha büyük parçacıklar oluşturarak, killi zeminlerin dokusunda bir değişiklik oluştururlar. Broderick ve Daniel, (1990) kil parçacıklarının birbirleriyle yumaklaşarak daha büyük boyutlu parçacıklar oluşturduğunu belirtmişlerdir. Ladd vd. (1960), kirecin killi zeminlerin plastikliğini azaltarak mukavemetlerini yüksek oranlarda arttırması, ayrıca diğer katkı maddelerine göre genellikle daha ucuz olması ve yaygın bulunabilmesi sebebiyle gelişmiş veya gelişmekte olan birçok ülkede uygulama alanı bulabileceğini belirtmiştir. Türkiye karayollarında 1960'lı ve 1980'li yıllarda kireç stabilizasyonu kullanılmış olmasına rağmen, yaklaşık son 20-25 senedir kireç stabilizasyonuna ait kayda değer bir çalışma yapılamamıştır.

3.5. Enjeksiyon Yöntemi

Enjeksiyon, kayma direncini arttırmak ve geçirimsizliği azaltmak için zemin kitlesine basınç altında bir sıvı yollama işlemidir. Zemin boşluklarının doldurulması, ya da gevşek bölgenin kısmen sıkıştırılması sağlanmaktadır. Enjeksiyon barajlarda sızmanın kontrolünde kullanılan en popüler yöntemlerden birisidir. Bu amaçla dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Enjeksiyon, özellikle barajlarda büyük ölçüde başvurulan bir zemin iyileştirme metodudur.

Baraj inşaatlarında; barajın oturacağı ana kayanın geçirimsizliğinin ve stabilitesinin sağlanması amacıyla bazı önlemler alınması zorunludur. Baraj aksı boyunca, temel kayaya kadar kazı yapılarak, ana kayaya enjeksiyon yapılması işlemi, bu önlemler arasında en yaygın olanıdır. Enjeksiyon; zemin içindeki yapısal ve litolojik kusurlara veya zemin ile yapı arasında kalan boşluklara; genellikle sondaj deliklerinden, basınçlı olarak akışkan malzemenin doldurulması olarak tanımlanır (Kutzner, 1996). Belli zaman periyodu içinde akışkan malzeme, sertleşmiş hale gelir.

Enjeksiyonun temel amacı; daha yüksek dayanımlı ve daha az geçirgen temel zemin veya kayaç kitlesini oluşturmaktır (Tosun, 2000).

Dalaman - Akköprü Barajı aksı boyunca yer alan serpantinleşmiş harzburjit bileşimli ultra bazik temel kayalarda mevcut süreksizlikler boyunca su sızıntılarının varlığı tespit edilmiş ve sızmanın uzun dönemde baraj eksenini boyunca önemli mühendislik problemlerini oluşturacağı düşüncesiyle, ultrabazik kayaçlardaki sızma problemini önlemek amacıyla tek sıra perde enjeksiyonu yapılması düşünülmüş ve böylece çatlaklı yapıya sahip temel kayayı sağlamlaştırmak amaçlanmıştır. Ana kayaya yapılan temel enjeksiyonu uygulamaları, yapılma sebepleri ve yapılma şekilleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan iyileştirme çalışması ve uygulama şekli incelenerek farklı uygulamalarda bilgi birikimi oluşturmaya çalışılmıştır (Alkaya ve Çobanoğlu, 2008).

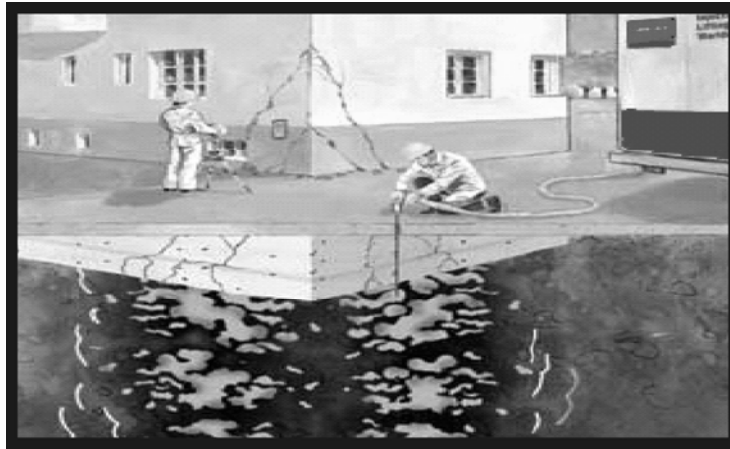
İlk kez 1802 yılında Fransız mühendis Charles Berigny tarafından su ve puzolanlı çimento karışımı zemin enjeksiyonunda kullanılmıştır. Daha sonra, çimentonun ve hidrolik bağlayıcıların geliştirilmesi ile inşaat ve maden mühendisliğinde enjeksiyonların kullanılması yaygınlaşmıştır. 1914'lerde baraj temellerinin boşluklarının doldurulması için enjeksiyon uygulamaları yapılmıştır. Buna paralel olarak zeminlerin hidrolik geçirgenliğinin azaltılması ve taşıma kapasitesinin artırılması problem enjeksiyonla çözülmeye çalışılmıştır. Enjeksiyon teknolojisinin ilerlemesi yeraltı yapılarında ve baraj enjeksiyon uygulamalarında gelişmelere yol açmıştır. Zemin ortamlarının iyileştirilmesinde uygulanan enjeksiyon yöntemleri şu başlıklar altında sıralanmaktadır.

- Permeasyon (sızdırma, emdirme) Enjeksiyonu; Bu işlemde, enjeksiyon karışımı doğal yapıyı bozmayacak bir şekilde kaya çatlakları veya zemin boşlukları içerisine şırınga edilir. Enjeksiyon malzemesi olarak daha likit harçlar kullanılır.
- Çatlatma Enjeksiyonu; Basınç altındaki karışım çatlaklı kaya veya zemin ortama şırınga edilerek malzemelerin doğal yapısı bozulur ve karışımın çatlaklı bölgeye nüfuz etmesi sağlanır.

- Kompaksiyon Enjeksiyonu; Enjeksiyon karışımının zemin içinde kontrollü yer değiştirmesine müsaade edilerek bozulmadan bir kütle olarak kalması sağlanır, sonuçta enjeksiyon kuyusu etrafındaki zayıf bölge basınçlı enjeksiyon karışımı ile sıkıştırılır.

Şekil 3.11.'de enjeksiyon uygulaması sunulmaktadır. Enjeksiyonların kullanım yerleri şöyle sıralanabilir;

- Suyun akışını durduracak ya da azaltacak perde çekilmesi,
- Aşırı oturmaların önlenmesi için boşlukların doldurulması
- Yer altı suyu seviyesi altındaki temel inşaatında kurutma ve destek işlerinden kaçınma,
- Zeminin kuvvetlendirilerek komşu kazı, kazık çakma gibi çalışmalar sonucu oluşabilecek hareketlerin önlenmesi,
- Tünel kazısında kazı duvarları ve üstteki tabakaların hareketinin kontrolü,
- Yanal zemin basıncını kısıtlama
- Kazıkların yanıl yük kapasitesini artırma
- Yamaç stabilitesini sağlama
- Eski temellerin onarımı sırasında destek sağlama,
- Hacim değişimleri gösteren zeminlerde büzülme-şişmenin azaltılması,
- Gevşek kumlarda titreşimden dolayı sıvılaşmanın önlenmesi



Şekil 3.11. Enjeksiyon uygulaması yapılarak zemin iyileştirilmesi

Enjeksiyon ile uygun çözümü verecek yöntem araştırması yapmak gereklidir. Bunun için şunlar göz önünde bulundurulmalıdır.

- Delme ve enjeksiyon aracı bakımından,
- En iyi karışımının seçimi bakımından,
- Enjeksiyon tekniği bakımından yöntem ve araştırma yapmak

Enjeksiyondan önce sahanın iyi bir şekilde etüt edileceği açıktır. Bu etütlerde başlıca şu durumların tespiti gerekmektedir:

- Enjeksiyon amacı; sağlamlaştırma ve geçirimsizliği azaltmak,
- Enjeksiyon yapılacak ortamda boşluk özellikleri,
- Enjeksiyonun nüfuz etme mesafesi ve karışımın viskozitesi.

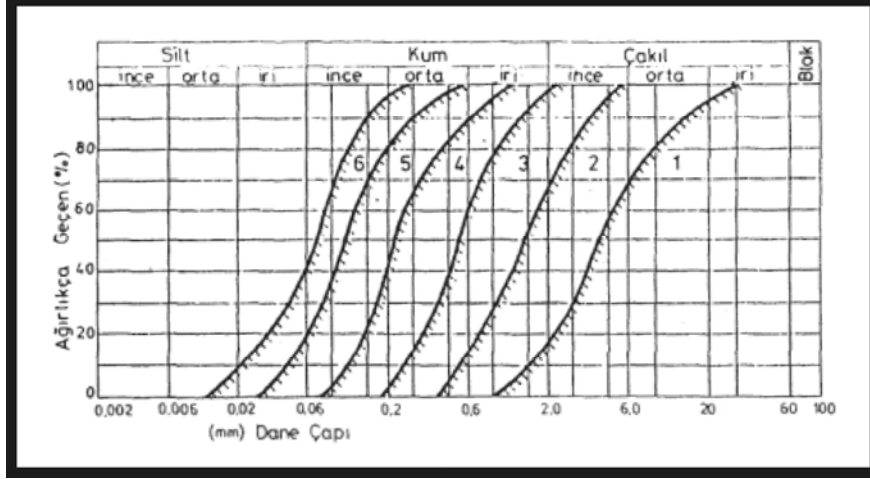
Zeminde yapılacak enjeksiyonlar için zemin deneyleri yapılarak, bilhassa zeminin dane dağılımı ve geçirgenliği tespit edilmelidir. Bazen sondajla belirlenemeyen ince daneli tabaka, zeminin geçirgenliğini önemli ölçüde etkileyebileceğinden zeminin permabilitesi de arazi deneyleri ile belirlenmelidir.

Sağlamlaştırma amacıyla kullanılan karışımın priz yaptıktan sonra yüksek mukavemet vereceği açıktır. Sızdırmazlığı sağlamak amacıyla kullanılan karışımlarda ise karışımın nihai mukavemetinin yüksek olması gerekmemektedir. Ancak, bunların içsel erozyona karşı koyacak mukavemette olması (kendini tutması) gerekir. Enjeksiyon karışımındaki dane çapları, ortamın boşluk çapına göre ayarlanmalıdır. Boşluk çaplarının, karışımın dane çapının çok üstünde olacağı açıktır. Ayrıca karışıma yeterli derecede akışkanlığı artırıcı katkı maddesi ilave ederek enjeksiyonun yeterli mesafelere erişmesi sağlanır. En çok kullanılan enjeksiyon malzemeleri; çimento türleri, silikatlar gibi süspansiyonlar ve son yıllarda rağbet edilen lignin, akrilamid, reorsinol, formol gibi kimyasal bileşimler ve harçlar (kum veya çakıl karıştırılan)'dır. Etketif bir çimento enjeksiyonu yapılabilmesi için, zemin iri daneli olmalıdır. Özellikle zeminin mukavemetinin artımına ihtiyaç varsa, çimento enjeksiyonu kullanılır. En yaygın malzeme, su-çimento karışımlarıdır. Bu

karışımlarda oran 1.0-0.5 arasında tutulmalıdır. Çimento danelerinin mesafesi ve büyüklükleri, karışımın çökme davranışını ve viskozitesini etkilemektedir. Çimentonun dane büyüklüğüne, cinsine ve karışımın oranına göre farklı çökme hızları elde edilmektedir. Çimentosu zengin karışımlarda çökme daha yavaş olmaktadır. Çimento dane çapı küçüldükçe ve danelerin birbirine mesafesi azaldıkça çökme hızı da azalmaktadır. Diğer yönden, çimento şerbetindeki su oranının artması, akışkanlığı arttırmaktadır. Eğer istenirse, katkı maddeleri ilave edilerek, su oranları ve diğer özellikler değiştirilebilir.

Çimento çok çabuk çökler. Bu çökmeyi yavaşlatmak için, bentonit ilave edilebilir. Bentonit, %4 oranına kadar ilave edildiği takdirde, enjeksiyonun nihai mukavemetine herhangi bir etkide bulunmaz. Ancak, daha yüksek ilavesi halinde enjeksiyon mukavemetini düşürür. Zira, bentonit çok su emer. Bentonit-çimento karışımları, hidrolik sızdırmazlık ve stabil karışım hazırlamak amacıyla da kullanılır. Bentonit-çimento karışımları iyice karıştırıldığında, pekleşmiş malzemenin permeabilitesi azalmakta ve karışımın gevrekliği artmaktadır. 1930'lu yıllardan itibaren kimyasal enjeksiyonlar geliştirilmiştir. Bunlar genellikle su camı bazlı silikat enjeksiyonları veya su bazlı reçinelerdir. Silikat enjeksiyonunda, su camının bir katman ilavesi ile zemin içinde bir jel etkisi sağlanmaktadır. Birçok kimyasal enjeksiyon yönteminin geliştirilmesiyle birlikte, en çok kullanılan; Joosten tekniğidir. Bu, konsantre bir su camının kalsiyum klorit eriyiği ile zemine enjekte edilmesiyle elde edilmektedir. Önce su camı çözeltisi zemine enjekte edilir, sonra çok akışkan olan kalsiyum klorit enjekte edilir ve oluşan reaksiyon sonucu, çok kısa sürede bir katılma sayesinde bir jel meydana gelmektedir. İki katmanlı olan bu sistem daha sonra bırakılarak tek katmanlı enjeksiyona geçilmiştir. Tek katmanlıda, reaktif madde ve su camı bir defada enjekte edilmektedir. Bu enjeksiyonun avantajı, zeminlere, kum boyutuna kadar enjekte edilebiliyor olmasıdır. Suni reçineler de (poliüretan, polyester reçineleri, acrylamid, formaldehit vs.) daha ince zeminlere tesir edebilirler. Tüm olumlu özellikleri yanında, kimyasal maddelerle enjeksiyon en pahalı yöntemdir. Son yıllarda çevresel etkileri açısından kimyasal enjeksiyondan uzak durulmaktadır. Şekil 3.12. değişik zemin türleri için uygun enjeksiyon

malzemeleri göstermektedir. Bu diyagram aşağıdaki tanımlarla birlikte kullanılmaktadır.



Şekil 3.12. Enjeksiyon malzemelerinin, temel zemininin dane dağılımına göre uygulanabilme sınırları(Kahya,1995)

1. Çimento,
2. Kil-çimento karışımı,
3. Bentonit,
4. İki katmanlı silikatlar,
5. Bir katmanlı silikatlar,
6. Suni reçineler.

Uygulanacak zemindeki dane çapına göre enjeksiyon maddesi de değişmektedir. Çakıllarda ve kumlarda çimento, kireç ve bentonit gibi malzemeler kullanılırken silt ve ince daneli kumlu zeminlerde kimyasal killer ve siltler kullanılmaktadır. Zeminde % 20'den fazla silt veya kil varsa kimyasalların uygulanması kaçınılmazdır. Bu kimyasalların başında silikatlar, krom-lignin, poliüretan ve reçine ağırlamit gelmektedir. Enjeksiyon uygulanırken yapılan basınç zeminde yapılacak yapının birim yükünden fazla olmalıdır. Çizelge 3.1.'de enjeksiyon malzemeleri ve kullanım yerleri sunulmuştur.

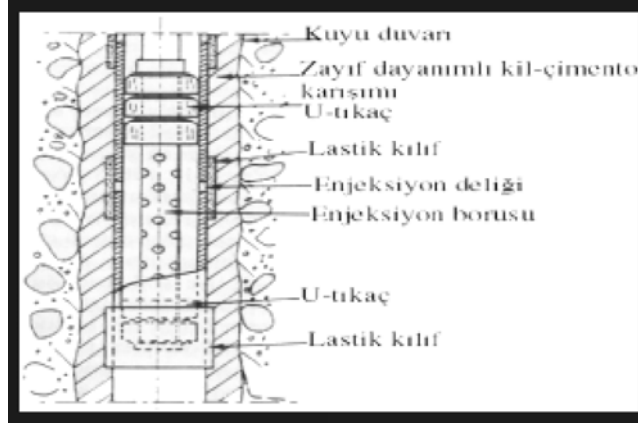
Çizelge 3.1. Enjeksiyon malzemelerinin sınıflandırılması (Öztürk, 2006)

Reolojik Kategori	Partiküler Süspansiyonlar (Bingham Akışkanları)		Çözeltiler (Newton Akışkanları)				Gaz Emülsiyonları		
	Kararsız	Kararlı	Koloit Çözeltiler (Viskozite zamanla artmakta)		Saf Çözeltiler (Viskozite zamanla değişmemekte)				
Enjeksiyon Malzemelerinin Ana Türleri	Sadece Çimento	Bentonit veya kil ile birlikte çimento	Zeminleşmemiş Bentonit	Kimyasal Enjeksiyon Malzemeleri				Şişebilen Enjeksiyon malzemeleri	
				Sodyum Silikat Bazlı		Organik Reçineler bazlı		Çimento bazlı	Organik Ürünler bazlı
Uygulama Alanları	Çatlaklı Kaya ve duvar			Mikro fisürlü ve geçirimli kaya					
		GRANÜLER ZEMİNLER							
		Çakıl	Kaba kumlar	Orta-İnce Kum		İnce siltli Kumlar (Kumlu siltler)			
Geçirimsizlik Katsayısı, k, (m/s)		>5.10 ⁻⁴	>5.10 ⁻⁵	>5.10 ⁻⁵	>1.10 ⁻⁵	>1.10 ⁻⁶			
Özgül Yüzey, S _s , (m ² /N)		<0.5	<1.5	<1.5	<4	<10			
Temel enjeksiyon tekniği	Yüksek basınç	Kontrollü hacim ve basınç						Düşük basınç (boşlukların doldurulması)	

Enjeksiyon teknolojisinin kökeni diğer zemin iyileştirme teknikleri gibi eskiye dayanmakla beraber, bu teknoloji hem yeni enjeksiyon malzemeleri hem de bu malzemelerin zemin içerisine nüfuz ettirilmesi şekilleri bakımından sürekli bir gelişim içerisindedir.

3.5.1. Permeasyon (sızdırma – emdirme) enjeksiyonu

Diğer enjeksiyon malzemelerine göre daha likit harçlarla yapılan bir enjeksiyon tekniğidir. Genelde çimento şerbeti ve kolloid yapıdaki saf kimyasallar kullanılabilir. Genellikle kullanımında karşılaşılan sorunlar, harçtaki malzemenin dane boyutunun büyüklüğünden dolayı harcın ilerleyememesi, harcın akışkanlığından kaynaklanan ilerleyememeler ve mevcut zemin malzemesinin harca göstereceği sürtünme direncidir. Enjeksiyon, ince daneli zeminlerde uygulama harcındaki malzemenin boyutundan dolayı zorlaşabilmektedir. Genelde uygulama, malzeme ve basınç kaybının oluşmaması için yüzeyden derine doğru iner. Bazı zeminlerde ise sadece yüzeysel enjeksiyon yeterli gelmektedir. Özellikle tünellerde kullanılan Tube'a Manchette tipi enjeksiyon borusu en yaygın sistemdir. Tube'a Manchette yöntemi Şekil 3.13.'de sunulmuştur.



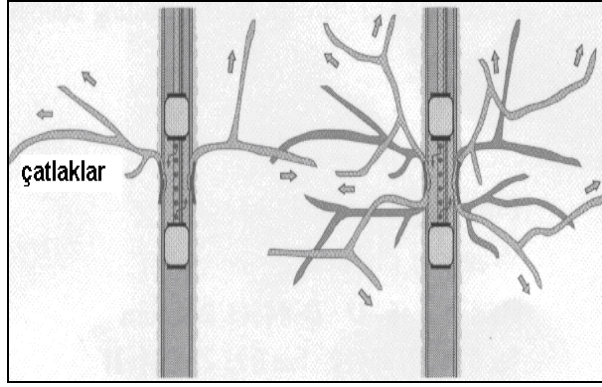
Şekil 3.13. Tube'a Manchette sisteminin detayı

Uygulanacak alana kadar kılıf içerisinde indirildikten sonra basınçlı bir şekilde harcı enjekte eden bu sistem dikey uygulanması zor yerlerde yatay yönlü foraj (horizontal directional drilling) sistemi kullanılarak uygulanır. Emdirme enjeksiyonunun hedefi zeminin hacminde bir değişiklik olmadan, boşlukların enjeksiyon malzemesiyle doldurulmasıdır. Uygulama aşamasında sıvı olan enjeksiyon malzemeleri, zemine enjekte edildikten belli bir süre sonra sertleşerek zeminin boşluklarını yok eder. Uygulamanın en önemli unsurlarından biri enjeksiyon malzemesini homojen bir şekilde yayılmasıdır. Enjeksiyon malzemesinin içinde zemin içerisindeki boşluklardan daha büyük cisim olmaması, zeminin iç kayma direnci ve enjeksiyon malzemesinin vizkozitesi en önemli unsurlardır. Uygulamada enjeksiyon malzemesinin seçiminde, enjeksiyon malzemesinin vizkozitesi, filtrasyonu, segragasyonu, priz zamanı gibi unsurlar göz önüne alınmalıdır.

3.5.2. Çatlatma enjeksiyonu

Yüksek basınçla uygulanan akışkan çimento harcının basınçtan yararlanarak kendine ilerleyebileceği çatlaklar açması sonucu yapılan zemin iyileştirme yöntemidir. Yeni bir uygulama metodu olan bu yöntem basınç sonucu oluşan çatlakların çimento şerbetiyle doldurulması ile zeminde oturmalara ve çökmelere

karşı direnç kazandırır. Avrupa’da ortaya çıkan bu yöntem diğerleriyle kıyaslandığında daha yenidir. Zemine yüksek basınçla düşük viskoziteli çimento enjeksiyonu kontrollü bir şekilde uygulanır (Şekil 3.14.). Genel olarak, düşük geçirirliği olan zeminlerde uygulanır. Çimento şerbeti yüksek basıncın etkisiyle kendine yol açarak ilerler. Çatlatma enjeksiyonunun gelişimi tünel veya kazı aktiviteleri esnasında meydana gelen oturmaları önleme (kompense etme) çalışmalarına dayanmaktadır. Türkiye’de henüz uygulama alanına girmemiş bu enjeksiyon tekniği genellikle permeasyon enjeksiyonunun mümkün olmadığı düşük geçirirliğe sahip ince daneli zeminlerin stabilizasyonunda uygulanmaktadır.



Şekil 3.14. Çatlatma Enjeksiyonu (Keller, 2003)

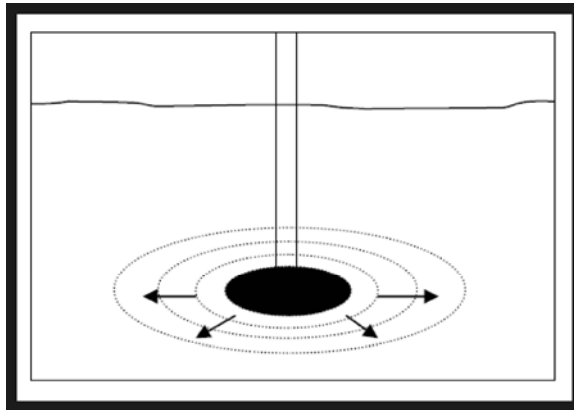
Çatlatma enjeksiyonunun gelişimi tünel veya kazı aktiviteleri esnasında meydana gelen oturmaları önleme çalışmalarına dayanmaktadır. Bu doğrultuda, tünel ile üstündeki yapı arasında meydana gelen oturmalara bağlı olarak çatlatma enjeksiyonu işlemleri yapılmaktadır.

3.5.3. Kompaksiyon enjeksiyon

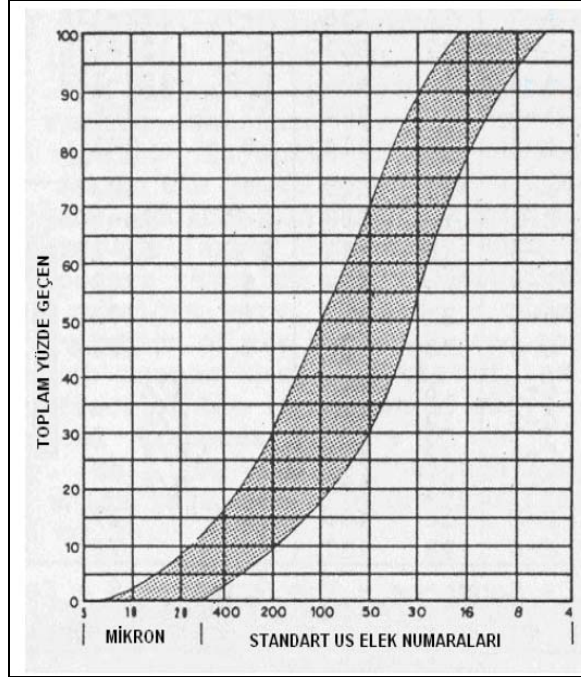
Bu yöntem zemindeki malzemeye enjeksiyon yaparak boşluklarının doldurulması yerine zemine dışardan getirilen siltli ve kumlu malzemenin belli bir yere enjekte edilerek ve daha sonra bu malzemenin sıkıştırılarak hem mevcut zemini hem de kendi kendini sıkıştırılmasıyla elde edilen bir uygulama şeklidir. Akışkanlığa

ihtiyaç duyulmadığından dolayı katı malzeme enjeksiyon malzemesi olarak kullanılır. Bu uygulama tekniği, mevcut oturma yapmış yapı temellerinde de kullanılabilirdiğinden dolayı diğerlerine göre güçlendirmede de avantaj sağlamaktadır. Çok yumuşak zeminlerde boşluk suyu basıncını artıracığından, kullanımı uygun değildir.

1980 yılında toplanan Amerikan İnşaat Mühendisleri Cemiyeti(ASCE) enjeksiyon komitesi, kompaksiyon enjeksiyonunu 25 mm'den daha az çökme değeri olan, yeterli plastisiteyi sağlayacak kadar silt ve içsel sürtünmeyi sağlayacak kadar da kum içeren, katı enjeksiyon malzemesinin zemin boşlukları içerisine girmeksizin, enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir kütle oluşturarak ve bu sayede etrafındaki gevşek zeminleri sıkıştırarak, yüksek basınçlarda enjekte edilmesine olarak sağlayacak tarzda tanımlamıştır. Uygulamada dışardan getirilen malzemenin çökme ve oturma dayanımı da göz ardı edilmemelidir. Son 10 yılda kompaksiyon enjeksiyonunun, sıvalaşmaya karşı uygulanmaya başlandığı görülmektedir. Şekil 3.15.'te uygulamanın şematik gösterimi sunulmuştur. Kompaksiyon enjeksiyonunda kullanılacak dane çapı dağılımı Şekil 3.16.'te sunulmuştur. Enjeksiyon harcının geleneksel biçimleri için Alman Standartları Enstitüsü(DIN) 4093 Çizelge 3.2.'de genel görüşü vermektedir.



Şekil 3.15. Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik gösterimi (Esler ve ark.,2000)



Şekil 3.16. Kompaksiyon enjeksiyonu karışımındaki kum için öngörülen dane çapı dağılım aralığı (Warner ve Brown, 1974)

Çizelge 3.2. Çeşitli uygulama alanlarındaki enjeksiyon malzemesi cinsleri

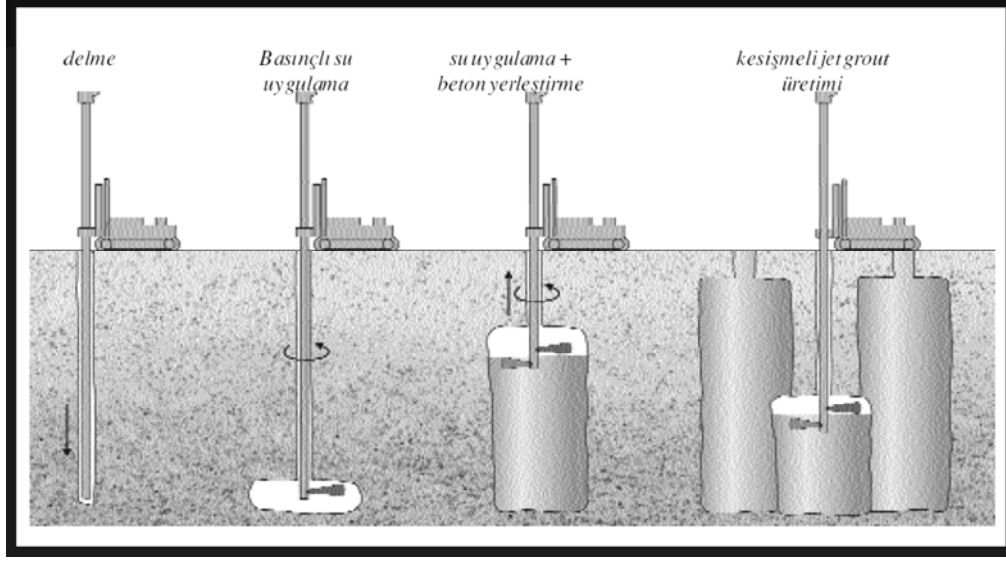
Enjeksiyon harcı biçimi	Solüsyonlar	Emülsiyonlar	Süspansiyonlar	Macunlar ve harçlar
Uygulama alanı	İnce kumlar ve ince çatlaklardaki sıkıştırma ve sağlamlaştırmalar	İnce kumlar ve ince çatlaklardaki sıkılaştırmalar	İri kumlar çakıllar ve çatlaklardaki sıkılaştırmalar	Yassı çakıl, çakıl, yarı ve oyuklardaki sıkılaştırma ve sağlamlaştırmalar

Süspansiyon, macun ve harçların su, çimento, kum ve ince çakıl gibi maddelere, bentonit, kil, silt, taş unu veya uçucu kül gibi katkı maddeleri katılarak elde edilir. Emülsiyonlar için taş kömürü, taş kömür katranı, bitüm, yağ ve sulu reçine kullanılabilir. Solüsyonlar ile gerçek kimyasal solüsyonlar amaçlanır ve bununla kimyasal enjeksiyon uygulanır.

3.5.4. Jet-Grouting (Jet Enjeksiyonu)

Bir enjeksiyon yöntemi olan bu metot, projeye göre uygulanması gereken derinliğe kadar su yardımıyla delinerek, bu derinlikte tij deki deliklerden basınçlı (minimum 300 bar) bir şekilde çimento şerbetinin enjeksiyonuyla oluşan bir zemin

iyileştirme tekniğidir. Tijden basınçlı bir şekilde çimento şerbeti enjekte edilirken tij kendi eksenini etrafında dönerek belirli bir çapa enjeksiyonu yayar. Basınç altında püskürtme bir yandan zeminin parçalanmasına yol açarken bir yandan da belirli çaplı zemin-çimento kolonları oluşturarak zemin özelliklerini iyileştirmektedir (Şekil 3.17.).



Şekil 3.17. Jet-grouting uygulama aşamaları

Uygulamada, sert zeminlerde veya geniş çaplı kolonlara ihtiyaç duyulduğunda su ve havayla basınç artırılmaktadır. Jet-grouting metodu dikey basınca maruz kalacak zeminlere uygulandığı gibi, yatay basınca maruz kalan yerlerde ve zeminin diğer çevresindeki zeminlerden bağımsız bir zemin haline getirilmesini de sağlar. Buna örnek olarak 2004 yılında inşaat yüksek mühendisi Osman Pekarun ve inşaat mühendisi Kaan Doğanışık tarafından yapılan mini kazık ve jet-grout yöntemleri kullanılarak oluşturulan geçirimsizlik perdesine ait bir vaka analizi çalışmasıdır. Bu çalışma, İstanbul Vaniköy’de yapılması planlanan bir yalı zeminin güçlendirilmesi ile ilgilidir. Bu çalışmada amaç boğazın kıyısında yapılması planlanan yapının, zemininin etrafına jet-grout metodu yardımıyla su yalıtımı yapmaktır. Şekil 3.18.’de Jet-Grouting imalatına ait araçlar gösterilmiştir.

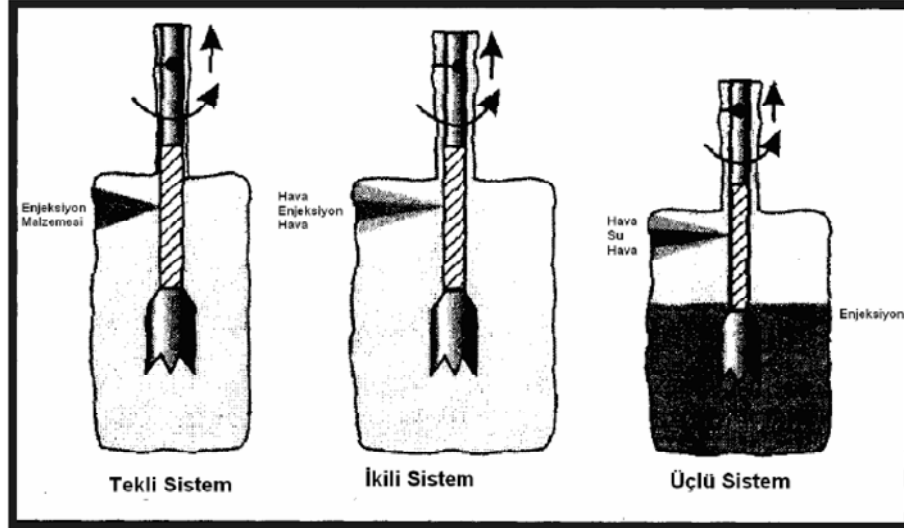


Şekil 3.18. Jet-grouting ekipmanları ve uygulamaları

Kazığa benzer bu kolonlar zeminin taşıma kapasitesini artırmakta ve sıkışabilirliğini azaltmaktadır. Önce, yüksek düşey basınçla sonda döndürülerek, kuyu çeperi genişletilir ve sıkıştırılır. Sonra, su jeti yanal olarak yöneltilerek 3 m'ye varabilen çaplarda oyulan kuyuda, doğal zemine çimento enjeksiyonu yapılarak boşluklar doldurulur. Sondaj için kullanılan katkı maddesi ve su, yüzeye kadar itilir. Sondaj kuyusunun yerleşimi, derinliği ve düzenlenmesi profesyonel bir tasarımcılık gerektirir. Bu yöntemin avantajları, ıslah edilen bölgelerin yakından kontrol edilmesi ve her türlü zeminde uygulanabilmesidir. İşlem sonucu serbest basınç direncinde 3, deformasyon modülünde 200 kata kadar varan artışlar ölçüldüğü bildirilmiştir. Jet-Groting uygulamasında sadece enjeksiyon malzemesini püskürten tekli sistem, hava ve enjeksiyon püskürten ikili sistem, hava, su ve enjeksiyon püskürten üçlü sistem mevcuttur (Şekil 3.19.). Jet grout yöntemi, hemen her tür zayıf zemin tiplerinde ve kum, çakıl, kil gibi doğal zemin elemanlarının oluşturduğu kombinasyonlarda, diğer iyileştirme metotlarından daha hızlı, güvenilir, kalıcı ve ekonomik bir çözümdür .

Jet enjeksiyonu yöntemi, mevcut yapıların alttan desteklenmesi, tünellerin, açık kazılar, kanallar ve barajların geçirimsizliğini sağlamak üzere duvarlar yapılması, kazı ve şaftlarda destek sağlanması, yeni yapılar, dolgular ve istinat yapıları için temel zemin ıslahı ve heyelanların stabilizasyonu alanlarında kullanılmaktadır. Likit malzemenin zemindeki boşluklara enjekte edilmesi sonucu zeminin kayma mukavemetini ve geçirimsizliğini artırmasıdır. Günümüzde bu uygulamanın pazar payının büyümesiyle birlikte birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Tünel Kazımların da çevredeki yapıların oturmasını engellemesinde, deprem bölgelerinde sıvılaşmaya müsait zeminlerin ıslahında, şevlerde, yeraltı sularının kontrol altına alınmasında, yapı temellerine ek destek olarak, zemin emniyet gerilmelerinin

artırılmasında, maden ocaklarında, barajlarda su kaybını önlemekte ve bunun gibi birçok alanda uygulanmaktadır.



Şekil 3.19. Jet-groting sistemleri

3.6. Geotekstiller (Geosentetikler), Geogridlerin Mekanik Stabilizasyonda Kullanımı

Gelişen yapı tekniklerine uyum sağlayabilen zemin ve zemin güçlendirme metotlarına ihtiyaç duyan araştırmacılar, yükün uygulandığı alanı sağlamlaştırarak veya yükün uygulandığı alanı genişleterek birim alana düşen yükü azaltma yöntemlerini araştırmışlardır. Bu araştırmalar sonucu birim alana düşen yükü dağıtmak, zemin yığınlarına daha az alan kaplayarak dikey bir şekilde istiflemek, istinat duvarlarının arkasındaki zeminle bir bütün halinde çalışmasının sağlamak gibi pek çok alanda yarar sağlayan geotekstiller geliştirilmiştir. Başlarda kafeslenmiş demir donatı, şerit veya tellerden imal edilen malzemeler daha sonraları yerlerini geogrid, geosentetik gibi malzemelere bırakmışlardır (Şekil 3.20.). Zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan bu malzemeler, sentetik hammaddeli bir üründür. Takviye, koruma, ayırma, filtre, drenaj, yük dağıtıcı, seperatör, mekanik koruyucu, kalıplama malzemesi, düzgün yüzey oluşturucu, izolasyon, stabilizatör, yataklama, geosentetikle güçlendirilmiş zemin tabakalar gibi pek çok alanda uygulanan geotekstillerin maliyetlerinin rekabet ve ucuz ham maddeden dolayı giderek daha uygun bir hal alması geotekstillerin uygulamasını günden güne daha yaygın bir hale getirmektedir.



Şekil 3.20. Geosentetik uygulamasındaki gelişmeler

Geogridler, kullanıldıkları zeminlerin taşıma gücünü artırır, muhtemel oturumların kontrolünü kolaylaştırarak dinamik yükler altında kalıcı, stabil ve ekonomik çözümler sunarlar. Bu malzemenin en çok kullanıldığı alanlardan biri de kaplamalı ve kaplamasız yollardır. Kaplamalı ve kaplamasız yollarda kullanılan geogridler, kullanıldıkları malzemenin izafi mukavemet katsayısını bununla bağlantılı olarak taşıma gücünü artırır. Bu ürünlerin avantajları için agrega miktarındaki azalmayla birlikte yapının hizmet ömrünü uzatması söylenebilir. Geosentetik malzemeler, zeminlerin ıslahı için oldukça yeni olmakla beraber gerek uygulama alanları gerekse kullanım miktarı olarak her geçen gün hızla artmaktadır. Geosentetikler kaplamasız yollarda, taban zemini stabilizasyonunda ve temel tabakası güçlendirmesi amacıyla 1970'li yıllardan beri kullanılmaktadır. Taban zemini ile temel tabakası arasına veya temel tabakası içerisine yerleştirilmiş olan geosentetikler kaplamasız yolların trafik taşıma performanslarını artırır. Güçlendirilmemiş bir kaplamasız yol ile kıyaslandığında geosentetik güçlendirmelerin kaplamasız yollara sağladığı faydalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Dolgu (alttemel) kalınlığının azalması
- Yumuşak taban zemini ile agreganın birbirinden ayrılması (Bu durum temel tabakasının bozulmasını engeller)
- Taban zemini taşıma gücünün artması
- Dolgunun (alttemel) yanal deformasyonunun azalması
- Daha etkin bir gerilme dağılımı sağlanması

- Membran etkisinden dolayı meydana gelen düşey deformasyonun azalması
- Yolun ömrünün uzaması
- Daha az periyodik bakım gerektirmesi
- Yolun yapım ve işletme maliyetlerinin azalması

Geosentetik kullanımı ile birlikte temel tabakası için kullanılacak malzeme kalitesinin düşürülebilmesi ise geosentetiklerin bir diğer avantajı olarak sayılabilir (Şenol ve ark., 2008). Geosentetikler taban zemini ile temel tabakası arasında bir ayırma tabakası olarak kullanılabilceği gibi taban zemini ve temel tabakasının güçlendirilmesi ve drenaj amacıyla da kullanılabilir.

Geotekstillere, teknolojinin gelişmesiyle inşaat mühendisliğinde oldukça önem kazanmıştır. Geotekstillere hammadde olarak polimerler; poliamid(naylon), poliester(terien), polivinil klorür (PVC) ve poliolefin (polipropilen ve polietilen) olarak, farklı karakterde malzemelerden oluşmaktadır. Bunların elastisite modülü, sünme gibi çok sayıda özellikleri, değişiklikler göstermektedir. Geoteknik mühendisliğinde iki tip geosentetik kullanılmaktadır. Bunlar örgülü (woven) ve örgüsüz (non-woven) olarak tanımlanabilir. Örgüsüzler, mekanik (iğneleme), ısı (belli bir sıcaklık altında liflerin yapışması) ve kimyasal işlemlerle üretilmektedirler. Genel olarak Poliamid (naylon), Polipropilen, poliester ve polietilenden üretilmektedirler. Geomembranlar izolasyon amaçlı kullanılırlar. Geosentetikler, geoteknik mühendisliğinde geniş bir kullanım alanına sahip polimer malzemeler olup, bu malzemeler; geotekstillere, geogridler, geonetler, geomembranlar ve geokompozitler olmak üzere altı türe ayrılırlar. Bu malzemelerin geoteknik uzmanlarınca kabul edilen fonksiyonları; ayırma, donatı, filtrasyon, drenaj, koruma ve geçirimsizlik olmak üzere altı tanedir. Normal olarak, herhangi bir geosentetik, bu fonksiyonların tümüne sahip değildir ve bazı fonksiyonlar birincil, bazıları ikincildir.

- *Geotekstillere*: yukarıda sayılan tüm fonksiyonları yerine getiren, geçirgen, polimerik, geoteknik uygulamalarda kullanılan, örgülü, dokumalı veya dokumasız geosentetiklerdendir.

- *Geogridler(geonetler)*: Nadiren ayırma, genellikle de donatı amacıyla kullanılırlar, polimeriktirler, gerilmeye karşı dirençlidirler ve birbirlerine bağlı düzgün bir yapı gösterirler.
- *Geomembranlar*: Geoteknik uygulamalarda kaplama ve geçirimsizliği sağlamak amacıyla kullanılan, ince, lastik veya plastik tabakalardır.
- *Geokompozitler*: Bir geokompozit, bir geotekstil ve geogridin veya geogrid ve geomembranın veya geotekstil, geogrid ve geomembranın veya bunlardan herhangi birinin, diğer malzemelerle (örneğin; zeminle çelik ankrajlarla, çelik kablolarla vs.) birleşiminden oluşan bir malzemedir. Adından da anlaşıldığı gibi, bileşimine giren tüm malzemelerin fonksiyonlarını taşır. Dolayısıyla, yukarıda sözü edilen altı fonksiyonu haizdir. Kullanım alanları oldukça geniştir ve gittikçe de artmaktadır. Geotekstiller ince, flexible, geçirgen şerit sentetik malzemeli, genellikle stabilizasyonda kullanılan ve zeminin direncini artıran bir malzemedir.

Gittikçe yaygınlaşan geotekstillerin kullanım fonksiyonları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- *Ayırma*: Büyük uzunluklardaki geotekstiller, değişik boyuttaki tabakaları birbirinden ayırır.
- *Filtrasyon*: Geotekstiller, bazı malzemelerin geçmesine izin verir, bazıları ise tutucu olarak görev yaparlar.
- *Donatı*: Geotekstiller zemin daneciğinin stabilitesini artırır.
- *Drenaj*: Geotekstiller, fonksiyon olarak drenaja yatkındır. Su taşıma kapasitesi, malzemeleri çevreleme özelliğinden daha büyüktür.
- *Geçirimsizlik*: Geomembran, malzemeleri veya suyu tabaklara geçirmez.

Geotekstil kullanarak zeminin kayma mukavemetini, taşıma kapasitesini artırmak, permeabilite ve kompresibilitesini azaltmak mümkündür. Dolgu inşaatında, geotekstilin en önemli fonksiyonu, çekme donatısı olarak kullanılarak kaymayı önlemeye çalışmasıdır. Pratik ve teorik çalışmalardan geotekstilin, donatı olarak kullanıldığında zeminin stabilitesini artırdığı kanıtlanmıştır. Kullanılan geotekstil

sayısı ve aralıkları, Geotekstil tasarım mukavemetine ve yeterli bir emniyet sayısı ile şev stabilitesini sağlayabilecek donatıya bağlıdır. Mühendisin görevi, dolguda kullanılacak malzemelere karar vermek ve böylece dolgu yüklerini, devirme momentlerini vs. belirlemektedir. Gerekli tasarım hesaplamalarından sonra, dolgu ve temel zemini şartlarında, zemin-geotekstil sürtünme açısı, çekme modülü ve çekme mukavemeti için, minimum geotekstil kriterlerinin bilinmesi gerekmektedir. İyi bir geotekstil tasarımı ile dolgunun kullanım süresi artırılabilir. Sahada rahat inşaa şartları sağlanabilir ve örneğin çok dik şevler, donatı kullanılarak oluşturulursa, dolgu inşası için gerekli malzeme miktarı azalır ve maliyet düşürülebilir.

Geotekstil kullanımı, yumuşak zemin üzerinde direk olarak uygun olmayan malzeme ile dahi, dolgu vs. inşasına imkan verir. Yüksekliği az olan dolgularda, donatı görevi yaparlar. Geotekstil kullanımının bir önemli amacında, deformasyonları önlemesidir. Yüksek mukavemetli geotekstil, dolgu yükü altında düşey deformasyonları azaltabilmektedir. Yanal kaymayı önlemek için gerekli geotekstil çekme kuvvetleri, geotekstilde deformasyon oluşturmaktadır. Bu yanal hareket gözönüne alınmalı ve geotekstilin elastisite modülü ile kontrol edilmelidir. Geotekstil-zemin ilişkisinin zamana bağlı deformasyonunu kontrol altına almak ve karşı koymak için, yeterli dayanım esasına göre tasarım yapılmalıdır. Geotekstilin büyük çekme gerilmeleri altında olduğu durumlarda deformasyon özelliklerinin göz önüne alınması zorunluluğu önemli bir noktadır.

Geotekstillerin sık rastlanan diğer bir uygulama alanı ise demiryolları ve özellikle kaplamasız karayollarıdır. Yol dolgularında da kullanılan geotekstilin donatı, ayırma ve filtre aracı olarak buradaki fonksiyonu, zeminin kayma direncini artırmaktır. CBR değeri % 5'in altında olan zeminlerde özellikle tercih edilmektedir. Arzu edilen geotekstil, yüksek elastisite modülüne, yüksek çekme mukavemetine, kopma olmadan büyük deformasyonlara dayanma yeteneğine sahip olmalıdır. Ayrıca çalışma yükleri altında zamana bağlı deformasyonun ihmal edilebilir şartlarını sağlamalıdır.

Kullanımları hızla artan geotekstillerin belli standartlarda üretimi amacıyla, laboratuvar deney aletleri ve prosedürleri geliştirilmiştir. Mekanik özelliklerden çekme dayanımı, gerilme-deformasyon davranışı, sünme, delinme dayanımı, yırtılma dayanımı, patlatma dayanımı ve zemin-geotekstil sürtünmesi ile geçirgenlik, gözenek boyutu gibi hidrolik yönden önem taşıyan özellikler çok sayıda ASTM ve DIN standartları olarak, deneylerle tarif edilmektedir. Mekanik özelliklerin yanında ultraviyole ışınları, ısı, su, kimyasal maddeler, mikro organizmalar gibi çevre şartlarının, geosentetiklere etkisi mekanik özellikler için olduğu gibi deneyler ve standartlar ile tespit edilmeye çalışılmaktadır.

Günümüz inşaat mühendisliği uygulamalarında polimerler giderek daha fazla uygulama alanı bulmaktadır. Yüzyıllar boyunca hidrolik yapılarda düşük geçirimli malzeme olarak, sıkıştırılmış kil ve kil zeminler kullanılmıştır. Çok yaygın olarak rastlanan siltli killerin permeabilite katsayıları tipik olarak $k=10^{-9}$ m/s mertebesindedir. Çok iyi sıkıştırılmış yüksek plastisiteli bir kilin permeabilite katsayısı $k=10^{-11}$ m/s değerine kadar düşebilir. Polimerlerden yapılan geomembranlarda ise permeabilite katsayısı tipik olarak $k=10^{-13}$ ile $k=10^{-15}$ m/s mertebesindedir.

Polimerlerin genellikle kendi düzlemleri içinde yüksek elastik veya plastik deformasyonlara müsaade etmeleri önemli ve genellikle kullanımlarını avantajlı kılan özelliklerindedir. Bu özellikleri dolayısı ile geomembranlar, zemin yapılarıdaki oturmalar, zemin büzülme veya şişmeleri, öngörülme aşırı yüklemeler, şev stabilitelerinin bozulması gibi, sebeplerden dolayı meydana gelebilecek hareketler yüzünden kolayca hasar görmez ve suya karşı gösterdikleri dirençte bir azalma meydana gelmez. Geomembranların bir diğer avantajı da, kimyasal olarak atıl olmalarıdır. Bu özellikleri sayesinde su veya zemindeki çeşitli mineral veya organik maddelerden kimyasal olarak etkilenmezler. Bütün bu özelliklere, geomembranların yerine yerleştirilmelerinin son derece kolay olduğunu ve fabrika şartlarında üretilen malzemenin her noktasının güvenilirliğinin yüksek olduğunu da eklemek lazımdır. Bu avantajları dolayısıyla hidrolik yapılarda modern geomembranlar daha ekonomik ve teknik olarak daha üstün çözümler sağlanmaktadır.

Geomembranlar, hem taban kaplamasında, hem de üst kaplama tabakasında kullanılır. Geomembranların bir avantajı da kullanıldıkları amaçlara göre özelliklerinin değiştirilebilmesi ve böylece amaca tam uygun bir kaplama oluşturulabilmesidir. Aşağıda kullanım alanlarına göre geomembranların ne gibi etkilere maruz kalabilecekleri kısaca özetlenmiştir.

- Taban kaplamasındaki geomembran, sızıntı suyu ile temas eder, oysa ki üst kaplama sadece yağmur ve eriyen kar suyu ile temas eder.
- Taban kaplamasındaki geomembranlar çok daha büyük basınca maruzdurlar.
- Tabana konulan geomembranın altındaki zeminin büyük oturmalar yapmaması gerekir. Oysa, depolanan atık, büyük oturmalar yapar. Bu yüzden atık üzerine yerleştirilen geomembranların bu hareketlere uyum sağlayabilmesi gereklidir.
- Bir arıza olması halinde tabandaki geomembranın tamiri imkansız denecek kadar zor ve pahalıdır. Oysa üst örtüdeki bir hasar daha kolay onarılabilir.

Deponi tabanına konan geomembranların kimyasal maddelere karşı son derece dayanıklı olmak zorundadırlar. Günümüzde kullanılan geomembranlardan korosülfanatlı Poli Etilen (CSPE) ve Yüksek Yoğunluklu Poli Etilen (HDPE) genelde, her türlü kimyasal maddeye olan yüksek dayanımları ile tanınmaktadır. Son yıllarda Fleksibl Polipropilen geomembranlar da başarı ile kullanılmaktadır (Kahya, 1995). Üst kaplamada kullanılan geomembranların çok daha esnek olması gerekmektedir. Çünkü üzerlerine yerleştirilen atıklar çok büyük oturmalar yapmaktadırlar. Bu oturmalar ve bunların yol açacağı farklı oturmalar için bazı tahmin yöntemleri var ise de, elde mevcut çok az veri olduğundan kesin bir tahmin yapmak mümkün değildir. Üst kaplamada kimyasalların etkisi minimum olduğundan ve esneklik birinci dereceden önem kazandığından dolayı üst kaplamalarda genellikle Düşük Yoğunluklu Poli Etilen (VLDPE) geomembranlar kullanılır. Günümüzde geosentetik endüstrisi sürekli yeni gelişmeler yaparak, mühendislerin ihtiyaçlarını daha iyi karşılamaya çalışmaktadır. Geomembranlar, genellikle termoplastik veya

elastomer sınıfına giren malzemelerden üretilirler. Geomembran kaplaması basit ve hızlı bir işlem olmasına rağmen, bu iş hafife alınmamalıdır.

Geomembranlarda dikkat edilmesi gereken ilk husus, teknik özelliklerine göre seçilmiş olan malzeme ile şantiyeye gelen malzemenin aynı olup olmadığının tahkikidir. Bu işleme batılı dillerde “parmak izi işlemi” denmektedir ve esas itibarı ile son derece de zor bir tahkiktir. Geomembranların fonksiyonlarını başarılı bir biçimde yerine getirmeleri için hayati önem taşıyan hususlardan birisi de, geomembranların ek yerleridir (Kahya, 1995). Fabrika şartlarında yüksek bir kalite kontrol sistemi altında üretilen levhalar, arazide birbirlerine kaynatılmak zorundadır.

Fiber güçlendirme, galvanizli çelik veya plastik geogridlerin zemine uygulanması sonucu çekme dayanımını artırmaya yönelik bir güçlendirme yöntemidir. Uygulama sürtünme esasına dayanmaktadır. Bundan dolayı yeterli derecede sürtünme oluşturacak şekilde uygulama yapılmalıdır. Paslanma uygulamayı olumsuz bir şekilde etkileyeceğinden dolayı çelik veya alüminyum şeritler, fiber-camla güçlendirilmiş plastik veya polimerik geosentetik malzemeler kullanılmıştır. Uygulama alanları dolgu, istinat duvarları veya köprü ayakları yapımında, temel döşemelerinde, dalga kıran ve sel önleme yapıları gibi hidrolik yapılarda ve göçmüş şevlerin iyileştirilmesinde uygulanır. Geogridler yüksek çekme dayanımına, yüksek çekme modülüne ve yüksek kenetlenme kapasitesine sahip materyallerdir, bu sebeple taban zemini üzerinde uygulandıklarında taban zemini üzerindeki dolgu kalınlığının azalmasını sağlarlar. Özellikle yüksek çekme dayanımına sahip olan ve bir tür geosentetik olan geotekstiller zeminin kayma mukavemetinde iyileşmeye neden olarak zemini güçlendirme görevini görürler, bu nedenle geotekstillerle güçlendirilmiş zeminler donatılı zemin olarak da adlandırılırlar.

Geosentetik kullanılarak yapılan zemin güçlendirme çalışmalarında en önemli tasarım parametresi, zemin/geosentetik arayüzeyinin kayma dayanımı davranışıdır. Zemin ve geosentetiğin fiziksel ve mekanik özellikleri, kayma dayanımının belirlenmesi için kullanılan deney yöntemi, arayüzey davranışının belirlenmesinde etkili olan en önemli öğelerdir. Kumların çekme gerilmesi alamaması, bu tür zeminlerin dayanımının artırılması için fiber veya geogridlerle güçlendirilebileceği

gerçeğini ortaya çıkarmaktadır. Bu anlamda, bu tip tekstil ürünlerinin tabakalar halinde veya rasgele zeminin içine karıştırılması ile zeminin dayanımında meydana gelen artışlar çoğu projede fiyat/performans açısından geosentetiklerin kullanımını özellikle kimyasal katkılara göre oldukça verimli hale getirmektedir.

3.7. Atık Mermer Tozu İle Zemin İyileştirme

Henüz araştırma aşamasında olan bu yöntemle ilgili olarak literatür taramalarında, Zorluer ve Usta (2003) AKÜ Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Bölümünde, yapmış oldukları zeminlerin atık mermer tozu ile iyileştirilmesi çalışmasıyla karşılaşmaktadır. Türkiye 4. mermer sempozyumu (Mersem 2003) bildiriler kitabında karşımıza çıkan bu çalışma mermer fabrikalarından çıkan atık mermer tozlarının killere karışımı sonucu killerin şişme potansiyelini etkileyerek zemin iyileştirmesinde kullanılabilir bir madde olduğunu vurgulamaktadır. Mermer fabrikalarında çökeltme havuzlarında biriken atık mermer tozu taneciklerinin küçük boyutlu olması ince daneli zeminlerin kireç yerine atık mermer tozu ile stabilize edilebileceği fikrini doğurmuştur. Ayrıca mermer tozunun ve kirecin kimyasal bileşenlerinin CaO oluşu da kireçle mermer tozu arasındaki diğer bir benzerliktir (Zorluer ve Usta, 2003).

3.8. Geopier Uygulaması

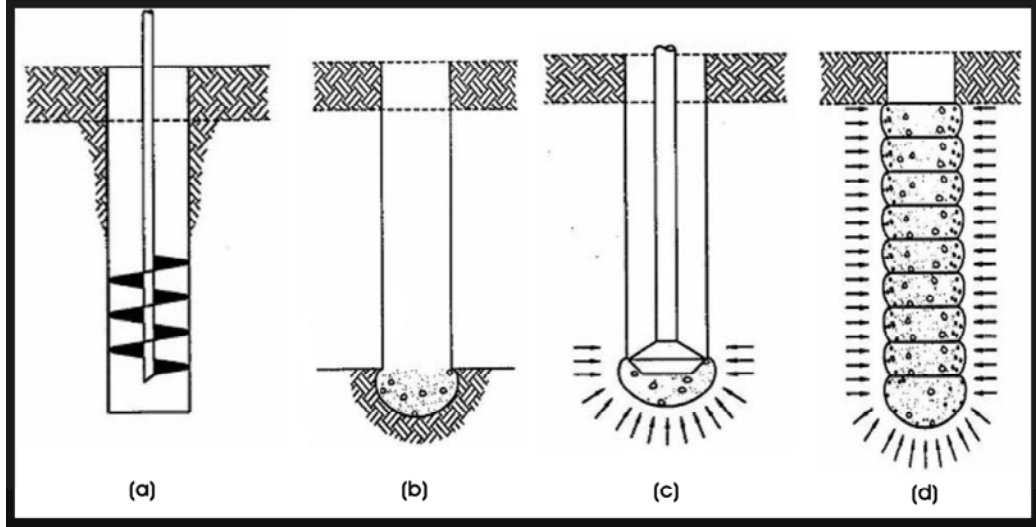
Henüz yeni bir uygulama olan bu teknik özellikle Amerika'da yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Bu yöntem önceden kazılmış kuyulara ince daneli agreganın tabakalar halinde doldurularak konik uçlu çekiç ile sıkıştırılmasıyla oluşmaktadır (Lawton ve Fox,1994; Lawton ve ark.,1994; Fox ve Cowell,1998; Wissman ve ark.2001). Geopier uygulaması olarak, sıkıştırılmış çakıl kolonlar ile zemin iyileştirilmesi kavramı, 1980'lerin ortalarında geliştirilmiştir. Başlangıçta geliştirilen teknolojide zeminde forajla bir boşluk oluşturulmakta, daha sonra tabana 30cm

kalınlıkta üniform dane boyutlu (5-15cm) taşlar yerleştirilip pahlı bir plakanın vurulması ile sıkıştırılarak, taban soğanı elde edilmektedir. Kolon gövdesi için kullanılan agrega, iyi derecelenmiş çakıl 30cm kalınlıkta tabakalar halinde sıkıştırılırken kolon malzemesi etraftaki zemine doğru itilerek kolon etrafında yanal gerilmeler artırılmaktadır. Yanal gerilmelerin artırılması, daha sonraki yüzey yüklemeleri için taşıma gücünü artırmakta ve böylece oturmaları azaltmaktadır. Daha sonra geliştirilen yer değiştirmeli yöntemde, oluşturulacak kolon boyundaki özel bir kılıf borusu (alt ucu pahlı) sıkıştırıcı görevi görürken, üst ucuna kazık malzemesinin depolandığı hazne tutturulmuştur. Boru, zemine konulan çelik bir plakaya serbestçe oturarak birlikte çakılmaktadır. Tüm boy çakıldıktan sonra, malzeme haznesi doldurulmakta, boru belirli bir miktar kaldırılıp, aşağı bastırılması yolu ile uçtan boşalan malzeme sıkıştırılmaktadır. Bu işlem tekrarlanarak tüm boyda sıkıştırılmış çakıl kolon elde edilmektedir. Dolayısıyla, tabaklar kendi içinde sıkışırken hem alttaki tabakaya hem de etrafını çevreleyen zemine basınç uygulayarak sıkışma sağlanmaktadır (Şekil 3.21a, b,c). Uygulamada kolonun üst yüzeyi zeminden alçakta bırakılır. Bunun sebebi iz oluşmasını engellemek ve kazılacak yapı temelinin geopier kolonlarını etkilemesidir (Şekil 3.21d). Geopier uygulama yöntemi Şekil 3.22.'de sunulmuştur.

Geopier kolon türü olarak iki geopier çeşidi vardır:

- *Basınç kolonlar:* Basınç kolonları sıkıştırılmış ince daneli agregalardan oluşan klasik geopier kolonlardır (Demir, 2007)(Şekil 3.23a).
- *Donatılı çekme kolonlar:* En dip kısmın üzerine, çelik bir plakaya geçmiş çelik çubukların vidalanarak, kuyuya yerleştirilip üzerine rutin geopier kolon imal edilmesi şeklindedir (Şekil 3.23b ve Şekil 3.24.).

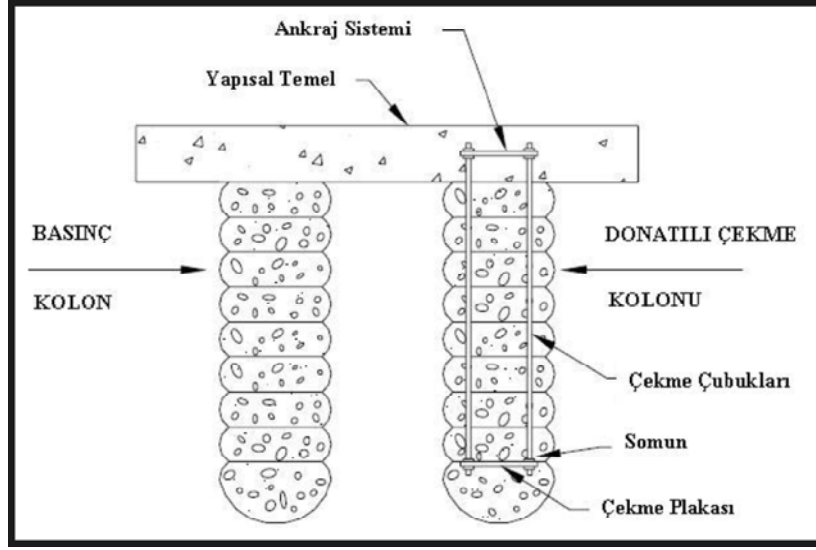
Taş kolonlarla kıyaslandığında her ne kadar benzer görünseler de, yapısal anlamda çok farklıdırlar. En alt tabakayı sıkıştırmak, kolon boyunun daha kısa olması (çapının 2 veya 8 katı), çevre zemine öngerilme uygulamak gibi avantajları vardır (Demir, 2007).



Şekil 3.21. a) Kuyunun açılması, b) agreganın yerleştirilmesi, c) konik tokmakla tokmaklanarak sıkıştırılması, d) geopier kolon



Şekil 3.22. Geopier uygulama şekli



Şekil 3.23.a) Geopier basınç kolonları b) Geopier donatılı çekme kolonları



Şekil 3.24. Geopier donatılı çekme kolon uygulaması

3.9. Geocell Sistemler

Genel olarak, yumuşak zeminlerle karşılaşılmca yük desteği için projelendirme ihtiyacı ortaya çıkar. Yüzeysel zemin tabakalarının stabil olmamaları veya estetik ve çevresel sorunların varlığı da, yük altında destek verecek tabakaların oluşturulması ihtiyacını doğurur. Geocell destek sistemlerde konulan granüler dolgu tabakalarının yük-deformasyon performansı, tekil hücrelerin kuşatılmış dayanımı ve komşu hücrelerdeki dolgu malzemesinin pasif direnci sayesinde sağlanır ve düşey gerilme komşu hücrelere kesme gerilmeleri sayesinde aktarılır ve bu sayede interlock

oluşumu sağlanarak kenetlenme mekanizması gelişir. Bu nedenle üç boyutlu geocell hücrelerin rijitliği fazladır (Şekil 3.25.). Geocell, içine konulan granüler dolgu tabakalarının kayma mukavemetini belirgin olarak artırır, aynı zamanda daha düşük kalitede agreganın kullanılabilmesine de imkân sağlar. Hücresel sistem ve yapı konsantre yükleri aynı zamanda komşu hücrelere dağılarak doğal zemine aktarılacak yük azaltılır. Böylece gerekli olan dolgu kalınlığı da azaltılmış olur.



Şekil 3.25. Tipik bir Geocell hücre sistemi

Zemin iyileştirme amacı ile geocell kullanımının faydaları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Hangi tür geocell kullanılırsa kullanılsın, geocellsiz duruma nazaran önemli bir malzeme/dolgu tasarrufu yapılmaktadır.
- Doğal zemin şartlarındaki en kötü şartlar ve CBR'ın en düşük değerleri için, dayanım artışının önemli olduğu görülmektedir. Zeminin doğal dayanımı arttıkça, daha büyük yüklemeler altında daha ekonomik sonuçlar sağlanmaktadır.
- Geocellin en önemli faydalarından biri, genel davranış olarak 150–190 kPa kadar yüksek bir zahiri kohezyon davranışı sergilenmesi ve bu nedenle müsaade edilen taşıma kapasitesi değerini önemli mertebede arttırmasıdır. Bu nedenle de daha ekonomik olabilecek temel seçeneklerinin uygulanabilirliği mümkün olmaktadır.

- Uygulanışı pratik ve kolaydır. Yol üst yapısında veya zemin stabilizasyonunda kullanılması dışında, pratik, yaşayan (yeşil) istinat duvarları yapımında da başarı ile kullanılmaktadır.
- Getirdiği en önemli ekonomi, belki de çoğu durumda, doğal zemin granüler yapıda olmasa da, hücre içinde sıkıştırılıp kullanıldığından, yine malzeme ve nakliye bedellerinden önemli kazançlar sağlanmasıdır (Yılmaz ve ark.,2008).

3.10. Biyoteknik Yöntemler

Biyoteknik iyileştirme ve zemin biyomühendisliği, şevlerin erozyona ve yüzeysel şev duyarsızlığına karşı kullanılabilir. Biyoteknik iyileştirme tekniği canlı bitki örtüsünün istinat duvarları, revetman ve zemin kaplama sistemleri gibi yapısal veya mekanik bileşenlerle beraber kullanılmasını içermektedir (ASCE, 1997). Örneğin bitki örtüsü set duvarları, hücreli gridler veya kademeli istinat duvarlarının banklarına yerleştirilebilir. Bitki örtüsü ve mekanik sistemler beraber çalışmakta ve bu sayede erozyon direnci ve şev duraylılığı sağlamaktadır. Zemin biyomühendisliği canlı bitki örtüsünün ağ şeklinde kullanılarak zemin güçlendirmesi ve zemin hareketine karşı hidrolik drenler ve bariyerler sağlanmasına yöneliktir. Biyoteknik iyileştirme ve zemin biyomühendisliği hakkında Gray ve Sotir (1996)'in çalışmalarına başvurulabilir. Bu metod genellikle nehir ve ırmak kıyılarında uygulanmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Zemin güçlendirme metotlarının karşılaştırılmasında önemli hususlar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Uygulanacak zeminin durumu,
- Zeminin üzerine gelecek yapının durumu,
- İhtiyaç duyulan dayanım artışı,
- Uygulanabilecek metotların maliyetleri,
- Uygun metotların araştırılması ve seçimi.

Projenin uygulanacağı alanda doğal afet riskleri göz ardı edilmemelidir. Deprem, sel baskınları, kasırgalar gibi kaçınılmaz doğal afetlerin yıkıcı etkisi oldukça büyüktür. Özellikle bir deprem ülkesi olan ülkemizde güçlü bir temelin tasarımı en az yapının statığı kadar önemlidir. 1999 yılında Gölcük'te kaybımızın fazla oluşu yapıların statığından çok, önlemi alınmamış veya iyileştirilmemiş zemin sıvılaşmasından ve depremden dolayı oluşan zeminin taşıma kapasitesindeki azalma ve bu durumlara yönelik zemin güçlendirmelerinin yapılmayışı, daha önemli hasarların oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca, projelerin tasarlanması ve yapım aşamasında, sel baskınları, zemin kaymaları da hesaba katılmalıdır. Altyapının yetersiz olduğu yerleşim alanlarında sel suları ve baskınları, yapıların temelini ve temelin direk olarak bağlı olduğu zeminleri olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Aynı zamanda, zemin kaymasının sebep olduğu yıkımlar da azımsanamayacak derecededir.

Proje ve uygulama aşamalarında, yeraltı ve yerüstü suları iyi bir şekilde araştırılıp incelenmelidir. Kanalizasyon, içme suyu şebekesi, yapının çevresinde sulama yapılan yerler ve yer altı suları göz ardı edilmemelidir. Aksi takdirde çok ciddi yıkımlara sebep olunabilir. Yeraltında bulunan su çatlağı, damarı gibi yapı

zeminini olumsuz şekilde etkileyecek sular için önceden jeolojik inceleme yapılmalıdır. Yakın bir zamanda, Şanlıurfa Karaköprü Tayip Erdoğan Bulvarında bulunan bir apartmanın altından geçen kanalizasyon borusunda oluşan çatlağın, temelde çökmeye ve dolayısıyla da apartmanın yıkılmasına neden olduğu gözlenmiştir. Binanın çökmesi önceden fark edildiği için can kaybı olmazken 17 aile evsiz kalmıştır.

Dolgularda, sıvılaştıran zeminlerde, yumuşak zeminlerde, taşıma gücü zayıf zeminlerde, denizlerde ve hatta okyanuslarda yapılaşmanın başlamış olması zemin çeşitliliğini artırmaktadır. Zemin yapısının nasıl olduğu, sağlam zeminin ne kadar derinlikte olduğu, zaman içerisinde zeminde karşılaşılabilecek problemlerin neler olduğu çok ciddi bir şekilde araştırılmalıdır. Zeminlere etki eden dinamik ve statik yüklerin, zemin profili ve özelliklerinin farklı oluşu, zemin güçlendirme metotlarında da, ihtiyaç duyulan dayanım artışını sağlamak için farklılaşma olmaktadır.

Günümüzde geosentetik ve geogrid kullanılarak, istinat duvarlarının mekanik olarak stabilizasyonu yapılmakta, bu yolla daha ekonomik bir tasarım imkanı doğmaktadır. Aşağıda bu araştırma kapsamı içerisinde bu tür modern istinat duvarı uygulamalarında asgari geosentetik malzeme kullanımı için analitik temelli bir parametrik çalışma yapılmıştır. Bu yolla optimum düzeyde malzeme kullanılarak tasarımın gerçekleştirilme imkanı doğacaktır.

Güçlendirilmiş istinat duvarlarının kullanımı 1970'lerden itibaren önemli bir artış göstermiştir. Özellikle ulaşım projelerinde, hızlı yapılarından, maliyetlerinden, estetiklerinden dolayı en çok kullanılan duvar tipi olmuşlardır. Ayrıca, güvenilirlikleri, denenmiş dayanırlıkları, basitleştirilmiş inşaat teknikleri, sismik performanslarının iyi oluşu, yapıya zarar vermeden büyük deformasyonlara karşı dayanıklı olmaları gibi birçok özellikleri vardır. Klasik tip istinat duvarlarında, metal şeritler kullanılarak duvarın yüzeyine ankrajlı hazır beton paneller yüzey kaplaması olarak uygulanmıştır. Kaynaklanmış ızgara tipi kafes kablolar 1970'lerde,

geosentetikler 1980'lerde, geçmeli duvar paneller 1990'larda, kullanılarak istinat duvarları tasarlanmıştır.

Günümüzde istinat duvarları, içsel ve dışsal stabilite limit yaklaşımına göre tasarlanmaktadır. Dolayısıyla, bu limit durumuna bağlı olarak istinat duvarları bazen çeşitli ek güçlendirmelere gereksim duymaktadır. Bu ek güçlendirmelerin en yaygını, istinat duvarının çeşitli malzemelerle zeminle bir bütün hale getirilmesidir. Esnek yapıya sahip donatıların, statik ve deprem koşullarında deformasyon toleransının ve eksenel mukavemetlerinin yüksek olması, ekonomik ve süratli imalatlara olanak tanınması en büyük tercih sebeplerindedir. Farklı oturma ve açılma dönmeye maruz kalabilen istinat duvarlarının stabilitesinin bozulması ile taşıyıcılık vasıfları kaybedebilmektedirler. Bunun için özellikle son 20 yılda "esnek duvar" kavramını doğuran geosentetik donatılı istinat duvarları sıkça kullanılır hale gelmiştir. Emniyet, ekonomi ve estetik bakımından çokça tercih edilen geosentetiklerle güçlendirilmiş istinat duvarlarının tasarımı, "Limit Equilibrium" olarak da bilinen "Dış" ve "İç" Göçme Mekanizmalarına göre geometrik boyutların ve donatı ihtiyaçlarının belirlenmesine dayanır. Donatı uzunluğunu genelde dış stabilite hesaplarıyla belirlendiği için, dış stabilite hesaplarını İçsel Stabilite hesaplarından önce yapmak daha doğru olacaktır. Dış stabilite hesapları, klasik rijit istinat duvarlarında da (betonarme ve ağırlık duvarlarında) geçerli olan göçme mekanizmalarına göre yapılır. Bunlar; kayma, taşıma gücü kapasitesi ve dönme (devrilme) mekanizmasının kontrol aşamalarından oluşur.

İçsel stabilite hesaplamalarında donatının kopması, donatının zeminden sıyrılması ve donatının uzaması gibi kriterler değerlendirilir. Duvar imalatında kullanılacak donatı tipi, yoğunluğu ve dolgu malzemesinin mühendislik parametreleri içsel stabilite bakımından en önemli kriterlerdendir.

Birçok uluslararası standart ve organizasyon istinat duvarlarındaki güçlendirme uzunluğu olarak, duvar yüksekliğinin %70'i kadarını yeterli görmesine rağmen, bazı otoritelere göre bu rakam yüksek bulunmakta, bazı otoritelere göre ise düşük kabul edilmektedir. Bu araştırma kapsamında, ihtiyaç duyulan asgari güçlendirme uzunluğu ve bu mesafenin optimum boyutunun belirlenmesine yönelik bir çalışma

gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, duvar yüksekliği, ilave yük, dikey aralığın güçlendirilmesi, zemin özellikleri, dolgu ve mevcut zemin özellikleri ve temel özellikleri gibi çeşitli parametrelerin etkisi çalışılmıştır. Bu araştırma, farklı parametreler kullanılarak yapılan parametrik çalışmalarda yenilme durumlarına göre minimum donatı uzunlukları araştırılmış ve sonuçlar mevcut standartlarla karşılaştırılmıştır.

Birçok uluslararası otorite, minimum güçlendirme uzunluğu olarak $0.7H$ 'ı önermektedir. Burada H duvarın yüksekliği, L ise güçlendirme uzunluğunu ifade eder. Ancak, bazı standartlar farklı kriterler aramaktadırlar. Örneğin Hong Kong standardı gerekli güçlendirme uzunluğunu $0.5H$ 'a kadar kabul ederken, Brezilya yetkilileri $0.8H$ 'ı öngörmektedirler (Zornberg ve Leshchinsky, 2003). FHWA, (2001) kılavuzunda minimum güçlendirme uzunluğunun duvar yüksekline oranını $0.7H$ olarak tavsiye edilmektedir. Ayrıca, yapılar için daha uzun güçlendirme istenirken, bazı özel durumlarda ise daha kısa güçlendirme uzunlukları yeterli görülmektedir (Elias ve ark., 2001). AASHTO, (2002) standardında gerekli uzunluk olarak duvar yüksekliğinin %70'inden ve 2.4m'den kısa güçlendirmeler kabul edilmemektedir. NCMA, (2002) standardı sınırlı boşluklarda minimum güçlendirme uzunluğunu $0.6H$ olarak kabul etmektedir. BS 8006 (1995) güçlendirme uzunluğunu en az $0.7H$ ve 3m olarak istemektedir. Bunlar gibi pek çok yayın minimum güçlendirme uzunluğunu $0.7H$ olarak tavsiye etmektedirler. Liu ve Evet (2004), $0.8H$ 'ı genel dayanıklılık olarak önermişlerdir. Sınırlı alanlardaki istinat duvarları Leshchinks ve Ark. (2004) tarafından çalışılarak, her koşulda uygulanamayan tasarım abakları geliştirilmiştir. Çekme direncini artırmak için güçlendirmenin en uç bitim tarafına ankrajlanmasını tavsiye etmektedirler. Aynı zamanda Lawson ve Yee (2005)'de, sınırlı güçlendirme alanlarında en fazla içsel çekme gerilmesi için, doldurulan alanda güçlendirme boyunun uzatılması veya arkadaki sağlam bölgeye ankrajlanarak sabitlenmesini tavsiye edilmektedir. Ling ve Leshchinsky (2003) ve Ling ve Ark. (2005), güçlendirme uzunluğu azaldığı zaman duvarda yan deplasmanlar ve deformasyonların arttığını rapor etmişlerdir. Chew ve Ark. (1991) tarafından geliştirilen çalışma, güçlendirme uzunluğunun $0.7H$ 'dan $0.5H$ 'a düşürülmesi ile, duvarda %50 deformasyon artmasının sağlandığı gösterilmiştir. Ancak, Ling ve

Leshchinsky (2003) tarafından yapılan analiz, güçlendirme tabakalarında maksimum deplasman ve çekme yükü harekete geçirildiği zaman, güçlendirme uzunluğunun $0.5H$ olduğu söylenmiştir.

Çeşitli diğer çalışmalar, güçlendirme uzunluğunun yapının sağlamlığı için gerekli olduğunu ve kısa güçlendirme uzunluklarının daha yüksek çekme direncine ihtiyaç doğurduğunu göstermiştir. Whitlow (2001), güçlendirme uzunluğunun dış stabilite koşullarıyla ilgili olduğunu, dikey aralıkların ise iç stabilite koşullarıyla ilgili olduğunu vurgulamıştır. NCMA (2002) kılavuzu, minimum güçlendirme uzunluklarının hesaplanmasında kullanılan kayma ve taşıma kapasitesi yetisizlik mekanizmaları için, dış stabilite analiz sonuçlarını göstermektedir. FHWA (2001) kılavuzu, bazı durumlarda iç stabilitenin güçlendirme uzunluğunu önemli bir şekilde etkilediğini ifade etmektedir. Yayınlanmış literatürlerde minimum güçlendirme uzunluğu hesaplamalarında bir fikir birliği sağlanamadığı gözlenmektedir. Bu çalışmada hedef istinat duvarlarında yetisizliklere karşı minimum gerekli geogrid güçlendirme uzunluğunun hesaplanması ve çeşitli durumlarda $0.7H$ 'ın altında güçlendirme uzunluğunun kullanılma olasılıklarının araştırılmasıdır. Bu çalışmada göz önüne alınan değişkenler; duvar yüksekliği, ilave yük (sürşarj), güçlendirme dikey aralığı, güçlendirilen zemin özellikleri, dolgu ve mevcut zemin özellikleridir.

Güçlendirilmiş istinat duvarı analizlerinde nümerik metotların kullanımı son yıllarda büyük artış göstermiştir. Sonlu elemanlar metodu günümüzde sıkça kullanılan bir nümerik analiz yöntemidir. Bunun yanında bazen sonlu farklar metodu da kullanılmaktadır. Nümeriksel metotlar istinat duvarının statik ve dinamik yükler altında davranışının anlaşılması için araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Nümeriksel metotlar, güçlendirilmiş istinat duvarlarında araştırmacılar tarafından en çok kullanılan metot olsa da, pratikte yaygın olarak yanal yük (limit denge yaklaşımı) etkisi yaklaşımı duvar tasarımlarında en çok kullanılan metot olmuştur. Günümüzde şartnamelerde, kılavuzlarda güçlendirilmiş istinat duvarlarının iki önemli gerekliliği vardır. Bunlar dış stabilite ve iç stabilitedir. Dış stabilite analizi, güçlendirilmiş zemini ilave yükler ve dolgu zemininden kaynaklanan yanal zemin basıncına maruz olarak rijit kabul eder. İç stabilite, güçlendirilmiş zemin içindeki

donatının dayanım ve pozisyonunu göz önünde bulundurur (Runser ve ark., 2001). Dış stabilite kırılma modları ise, taban kayması, devrilme, taşıma kapasitesi ve eksantrisite ile alakalıdır. İç stabilite, donatının çekme, kopma, kırılmalarını kapsamaktadır. İhtiyaç duyulan güçlendirme uzunluğu pozisyonu ve dayanımı şartnamelerde verilen minimum güvenlik faktörleriyle bütün kırılmalara, başarısızlıklara yeterli olacak şekilde tasarlanır. Bu çalışmada kullanılan minimum güvenlik faktörleri, AASHTO (2002) tarafından verilen kayma, taşıma gücü kapasitesi, eksantrisite ve çekme durumları güvenlik faktörleri ve NCMA (2002) tarafından verilen devrilme durumu güvenlik faktörü Çizelge 4.1. teki değerlerdir. Bu çalışmada, lokal kırılma durumları güçlendirme uzunluğunu etkilemediği için düşünülmemiştir.

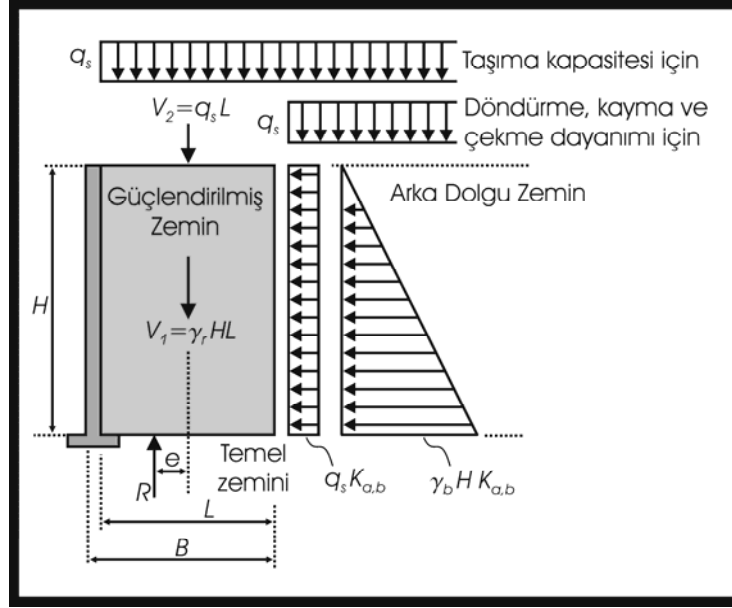
Çizelge 4.1. Tahkiklerin güvenlik katsayıları

Kayma	$FS_s \geq 1.5$
Devrilme	$FS_o \geq 2.0$
Taşıma kapasitesi	$FS_{BC} \geq 2.5$
Eksantrisite	$e \leq L/6$ (zemin) $e \leq L/4$ (kaya)
Çekme	$FS_p \geq 1.5$

4.1. Göçme Modlarında Minimum Güçlendirme Uzunluğunun Belirlenmesi

4.1.1. Dış (harici) stabilite

Dış stabilite analizlerinde güçlendirilen zemin bölgesi bir rijit birim olarak hareket ettiği farz edilir. Bu bölgenin bir bütün olarak hareket ettiği düşünüldüğünden dolayı, güçlendirilmiş istinat duvarlarında klasik istinat duvarları hesaplamasında kullanılan yıkılma durumları aynı zamanda dış stabilite analizlerinde de kullanılır (Elias ve ark.,2001). Tipik bir güçlendirilmiş zemin istinat duvarının şematik görünümü Şekil 4.1.'de gösterilmiş olup, dış stabilite analizinde kullanılan yük uygulamaları gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Dış stabilite analizi için şematik olarak gösterilmiş geogridle güçlendirilmiş istinat duvarı

Kayma mekanizması yetisizliği için güvenlik katsayısı Denklem 4.1'deki formül yardımıyla hesaplanmaktadır (Şekil 4.24).

$$FS = \frac{\gamma_r HL \tan \phi}{0.5 \gamma_b H^2 K_{a,b} + q_s H K_{a,b}} = \frac{\gamma_r L \tan \phi}{(0.5 \gamma_b H + q_s) K_{a,b}} \quad (4.1)$$

Dolayısıyla, kayma kontrolü için gerekli güçlendirme uzunluğu Denklem 4.2'deki formülle hesaplanabilmektedir;

$$L_{\min.S} = FS_S \left[\frac{(0.5 \gamma_b H + q_s) K_{a,b}}{\gamma_r \tan \phi} \right] \quad (4.2)$$

Devrilme güvenlik faktörü FS_0 , Denklem 4.3 ile hesaplanmaktadır.

$$FS_0 = \frac{\gamma_r HL(L/2)}{0.5 \gamma_b H^2 K_{a,b}(H/3) + q_s H K_{a,b}(H/2)} = \frac{\gamma_r L^2}{H K_{a,b} (\frac{1}{3} \gamma_b H + q_s)} \quad (4.3)$$

Dolayısıyla, devrilme kontrolü için gerekli güçlendirme uzunluğu Denklem 4.4 ile hesaplanabilmektedir.

$$L_{\min 0} = FS_0 \sqrt{\left[\frac{HK_{a,b} \left(\frac{1}{3} \gamma_b H + q_s \right)}{\gamma_r} \right]} \quad (4.4)$$

Taşıma gücü kapasitesi modu güvenlik faktörü FS_{BC} , Denklem 4.5'deki formül yardımıyla hesaplanmaktadır. Burada tam temas basınç konfigürasyonu dikkate alınarak Meyerhof'un lineer dağılan temas basınçları için önerdiği efektif alan metodu kullanılmıştır. Bu kabul uluslararası bir kabul olup bu istinat duvarı formasyonu altında tarafsız eksenin yeri taban temas alanı dışında olacağından makul bir kabuldür.

$$FS_{BC} = \frac{0.5 \gamma_f (L - 2e) N_\gamma}{\frac{\gamma_r H + q_s}{(1 - 2e/L)}} \quad (4.5)$$

Taşıma kapasitesi kontrolü için yeterli gelecek güçlendirme uzunluğu $L_{\min,BC}$, Denklem 4.6'da sunulduğu şekilde hesaplanabilir.

$$L_{\min,BC}^2 - \left[4e + \left(\frac{\gamma_r H + q_s}{0.5 \gamma_f N_\gamma} \right) FS_{BC} \right] L_{\min,BC} + 4e^2 = 0 \quad (4.6)$$

Eksantrisite (e), Denklem 4.7'deki formül yardımıyla hesaplanabilmektedir:

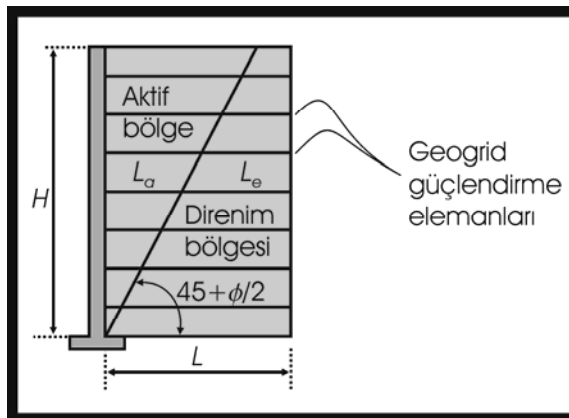
$$e = \frac{0.5 \gamma_b H^2 K_{a,b} (H/3) + q_s HK_{a,b} (H/2)}{\gamma_r HL + q_s L} = \frac{0.5 H^2 K_{a,b} \left(\frac{1}{3} \gamma_b H + q_s \right)}{L(\gamma_r H + q_s)} \quad (4.7)$$

Eksantrisite kontrolü için gerekli güçlendirme uzunluğu $L_{\min,E}$, Denklem 4.8'deki formül yardımıyla hesaplanmaktadır ($e=L/6$).

$$L_{\min E} = \sqrt{\left[\frac{0.5H^2 K_{a,b} \left(\frac{1}{3} \gamma_b H + q_s \right)}{(\gamma_r H + q_s)} \right]} \times 6 \quad (4.8)$$

4.1.2. İç stabilite

İstinat duvarı tasarımlarında, iç stabilite için iki yetisizlik durumu göz önüne alınmıştır. Bunlar çekme ve kopmadır. Güçlendirmedeki çekme kuvveti, güçlendirme ile zemin arasındaki sürtünme kuvvetini aştığında güçlendirme toprağı dışarı çeker ve çekme yıkılmalarıyla sonuçlanır. Güçlendirmedeki çekme kuvveti güçlendirme dayanımından büyük olduğu zaman güçlendirmede, uzama veya kırılma oluşur; buda kırılma yetisizliğine sebebiyet verir. Bundan dolayı, bu çalışmada sadece çekme yetisizliği durumu göz önüne alınarak, gerekli minimum güçlendirme uzunluğu hesaplanmıştır. Şekil 4.2., güçlendirilmiş zemin bölgede geosentetik ile güçlendirilmiş duvardaki potansiyel kırılma yüzeyini göstermektedir. Ancak, güçlendirme ve çekme dayanımı kıyaslanarak (kırılma yetisizliği) tasarımda kontrol edilmelidir. Güçlendirme stabilitesi, çekme kuvvetinden az olduğunda güçlendirme tabakaları arasındaki dikey mesafe azaltılmalıdır veya daha yüksek çekme dayanımlı malzemeleri kullanılmalıdır. Bu çalışmada, güçlendirme çekme yükleri 8.4 kN/m ile 62.3 kN/m arasında ve ortalaması 25.1 kN/m olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan aralıktaki çekme yüklerini kapsayacak dayanımda geogrid güçlendirme ürünleri mevcuttur.



Şekil 4.2. Geosentetik güçlendirmeli istinat duvarının içsel stabilite tasarımı için potansiyel yenilme yüzeyinin yeri

Çekme yetisizliği için, gerekli minimum güçlendirme uzunluğu aşağıdaki şekilde (Denklem 4.9 ve 4.10) hesaplanır:

$$L_{\min P} = L_a + L_e \quad (4.9)$$

$$L_e = \frac{T_{\max}}{F * \alpha \sigma_v CR_c} \times FS_p \quad (4.10)$$

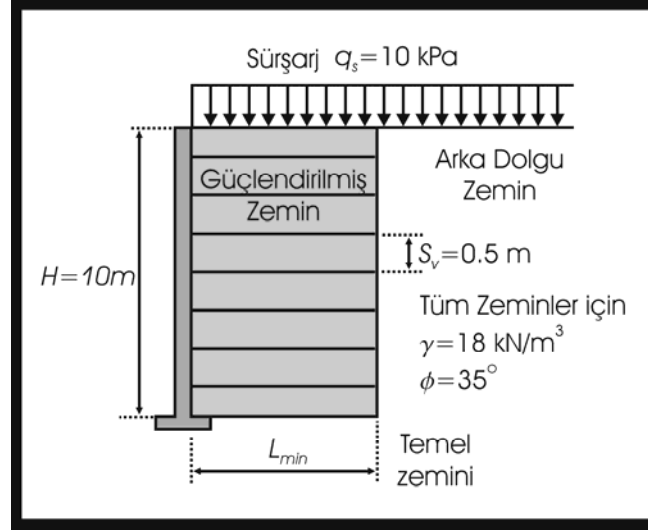
4.2. Parametrik Çalışma

4.2.1. Yaklaşım metodu

Çeşitli parametrelerin etkileri gerekli minimum güçlendirme uzunluğu hesaplamalarında düşünülmüş; her yetisizlik durumu için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Duvar yüksekliği, ilave yük, güçlendirme dikey aralığı, güçlendirme yapılan zeminin birim ağırlığı, güçlendirilmiş zemin sürtünme açısı, dolgu/mevcut zemin birim ağırlığı, dolgu/mevcut zemin sürtünme açısı parametreleri çalışma kapsamındadır. Bütün başarısızlık durumları göz önüne alındığında gerekli minimum güçlendirme uzunluğunun her çalışılmış parametre tarafından etkilendiği gözlenmiştir. Bu çalışmalardan ortalama değerler elde edilmiştir.

4.2.2. Parametre değer aralıkları

Tipik durumlar için kullanılan boyutlar ve parametreler Şekil 4.26.'da verilmiştir. Duvar yüksekliği (H) 10m, ilave yük (q_s) 10 kPa, güçlendirme dikey aralığı (S_v) 0.5m, bütün zeminlerin (güçlendirilmiş, dolgu ve temel zeminleri) birim ağırlığı 18 kN/m³ ve sürtünme açısı 35° olarak kabul edilmiştir. Güçlendirme arayüz sürtünme açısı, güçlendirilmiş zemin içsel sürtünme açısına eşit olarak alınmıştır. Çalışmada kullanılan parametrik aralıklar Çizelge 4.3.'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Kullanılan boyut ve parametreler

Çizelge 4.2. Kullanılan parametrik aralıklar

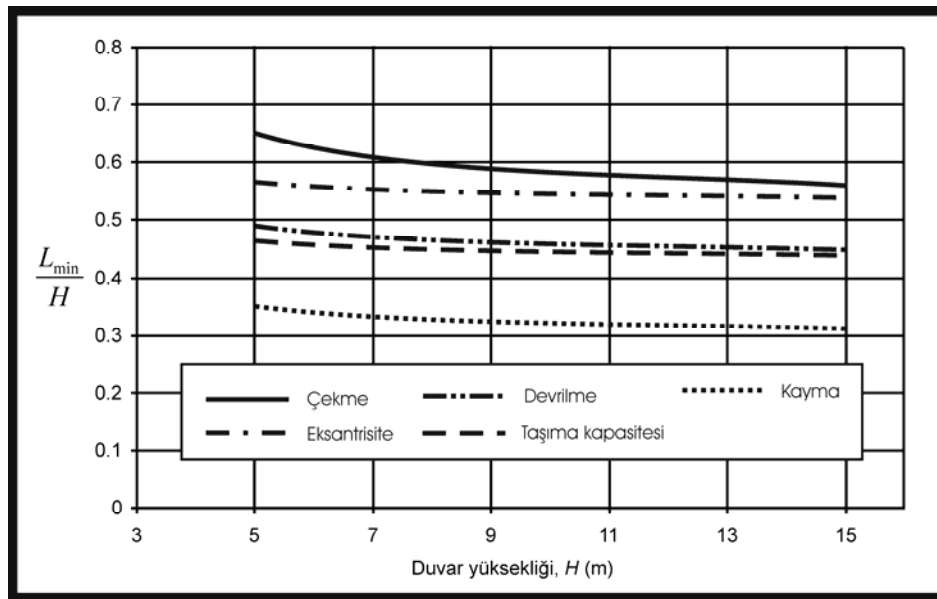
Parametreler	Aralıklar
Duvar yüksekliği	5-15 m
Sürşarj	0-25 kN/m ²
Dolgu birim ağırlığı	16-21 kN/m ³
Temel zemin birim ağırlığı	16-21 kN/m ³
Güçlendirilmiş zemin birim ağırlığı	16-21 kN/m ³
Dikey güçlendirme aralığı	0.2-0.7 m

4.3. Değerlendirme

Diğer parametreler sabit tutularak her parametrenin etkisi değiştirilerek araştırılmıştır. Sonuçlar minimum güçlendirme uzunluğunun, bazı değişkenlerin değiştirilmesi sonucu ciddi bir şekilde değişebildiğini göstermekte olup, içsel başarısızlık durumunda, gerekli minimum güçlendirme uzunluğunun hesaplamalarda genellikle çekme ölçütlerine bağlı olduğunu göstermiştir. Ancak, zemin parametreleri, özellikle sürtünme açısı, en fazla başarısızlık durumunu etkileyen faktördür. Bu çalışmada sonuçların, genellikle iç başarısızlık durumunu etkileyen ana faktörün çekme yetersizliği olduğunu göstermesine karşın, eksantrisite veya taşıma kapasitesinin, dış stabilite yetersizliğinde gerekli minimum güçlendirme uzunluğu hesaplarında, en etkili faktör olduğu görülmüştür.

4.3.1. Duvar yüksekliği etkisi

Performans kriterlerine yeterli gelecek duvar yüksekliği etkisinin, gerekli minimum güçlendirme uzunluğu oranları şekil 4.4’de verilmiştir. Gerekli minimum güçlendirme uzunluğu oranları, duvar yüksekliğinin artması ile azalmaktadır. Çeşitli duvar yüksekliklerinde en fazla başarısızlık durumu, en uzun güçlendirme uzunluğu olan çekme yıkılması durumu çalışılmıştır. Minimum gerekli güçlendirme uzunluğuna yeterli gelecek en yüksek uzunluk oranı yaklaşık olarak $0.65H$ ’tır.

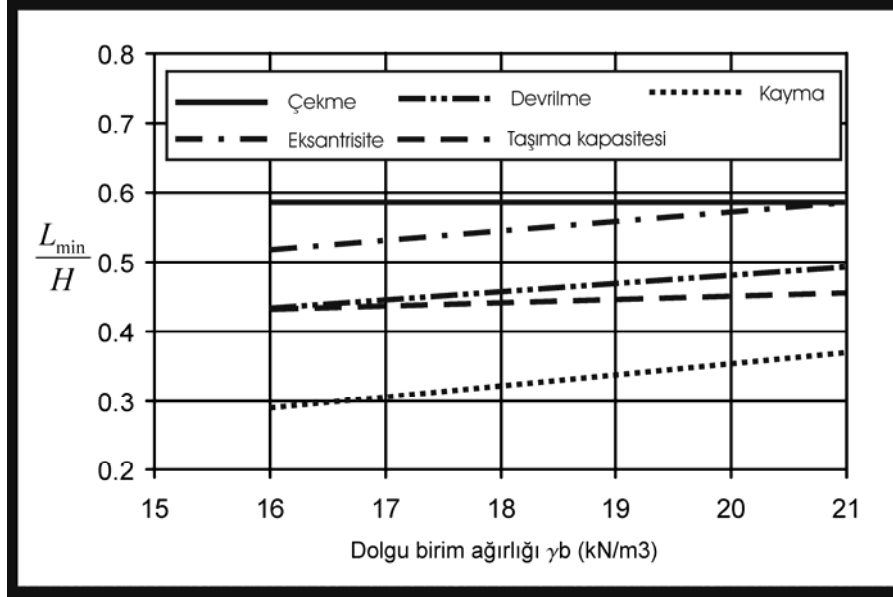


Şekil 4.4. Duvar yüksekliğinin güçlendirme uzunluğu üzerindeki etkisi

4.3.2. Dolgu ve mevcut zeminin etkisi

Performans açısından yeterli olan dolgu-mevcut zeminin (birim ağırlığı 16 ila 21 kN/m³ arasında) gerekli minimum güçlendirme uzunluğu üzerindeki etkisi Şekil 4.5’de sunulmuştur. Bütün dış stabilite yetisizliği durumları için, gerekli güçlendirme uzunluğu zeminin birim ağırlığı arttığında artmaktadır. Güçlendirilmiş zemin kitlesindeki kuvvetlere karşı direnci artırmak için ve momentleri sağlamak için, güçlendirilmiş zemin kitlesine etkileyen yükler dolgudaki zemin birim ağırlığından dolayı arttığından, daha uzun güçlendirme gereklidir. Çekme yetisizliği dolgu-mevcut zemin birim ağırlığının değişmesinden dolayı etkilenmez. Güçlendirme uzunluğunun zeminin birim ağırlığının bir fonksiyonu olmasından dolayı bu

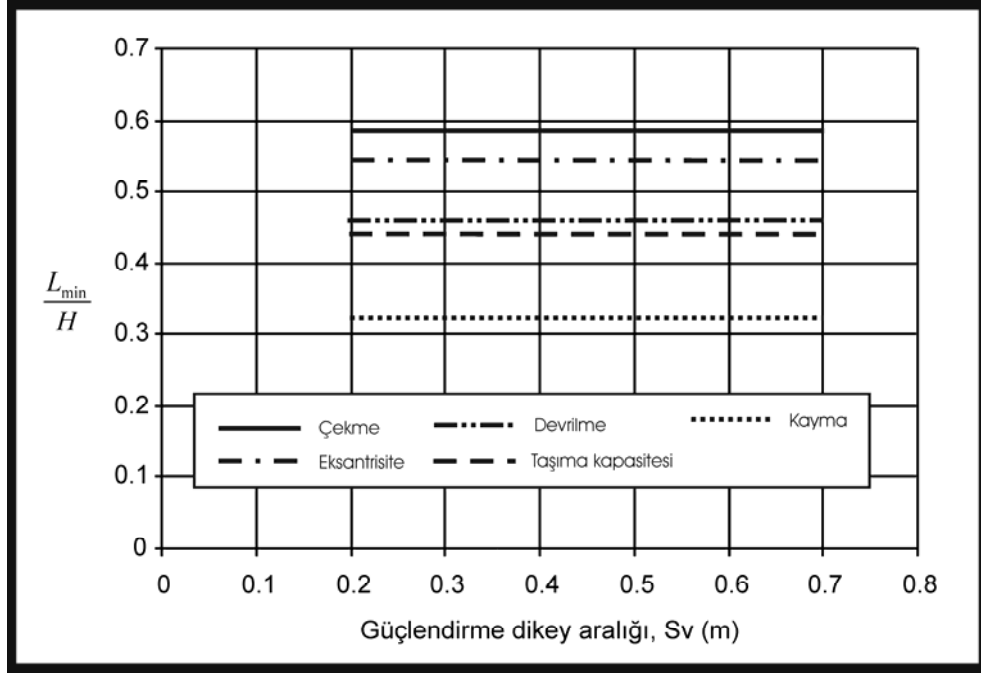
beklenebilir. Birim ağırlık aralığı düşünüldüğünde, güçlendirme uzunluğu $0.58H$ olduğunda bütün yıkılma yetisizliği durumlarında stabilite sağlanmaktadır.



Şekil 4.5. Dolgu birim ağırlığının güçlendirme uzunluğu üzerindeki etkisi

4.3.3. Güçlendirme dikey aralığının etkisi

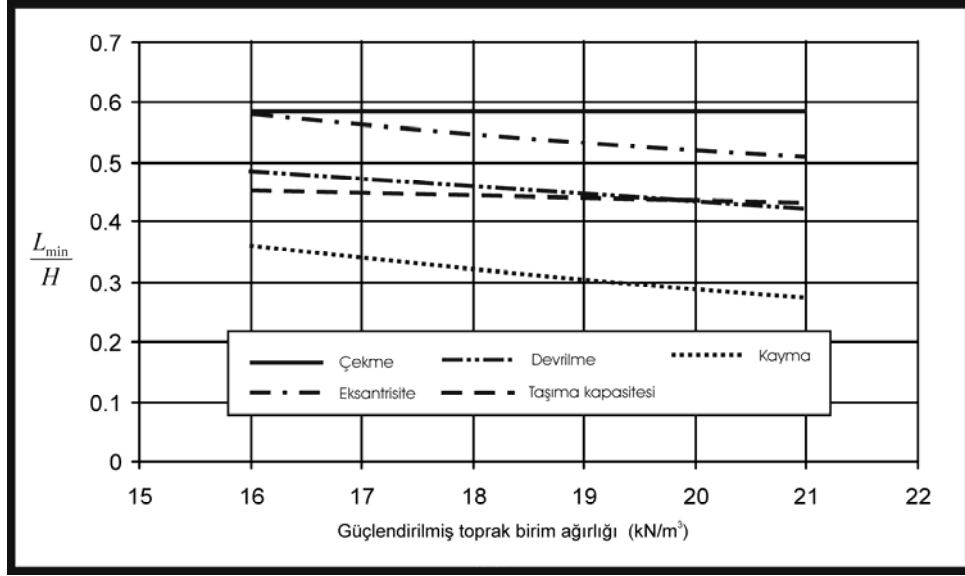
Güçlendirme dikey aralığının gerekli minimum güçlendirme uzunluğu üzerine etkisi Şekil 4.6.'da sunulmuştur. Parametrik çalışmalar boyunca, güçlendirme dikey aralıkları 0.2-0.7m arasında düşünülmüştür. AASHTO (2002) kılavuzu dikey güçlendirme aralığını 0.8m'den küçük olarak gerekli görmektedir. Sonuçlar dış stabilite durumlarında, dikey güçlendirme aralıklarının gerekli minimum güçlendirme uzunluklarını etkilemediğini göstermektedir.



Şekil 4.6. Güçlendirme dikey aralığının güçlendirme uzunluğu üzerindeki etkisi

4.3.4. Güçlendirilmiş zeminin etkisi

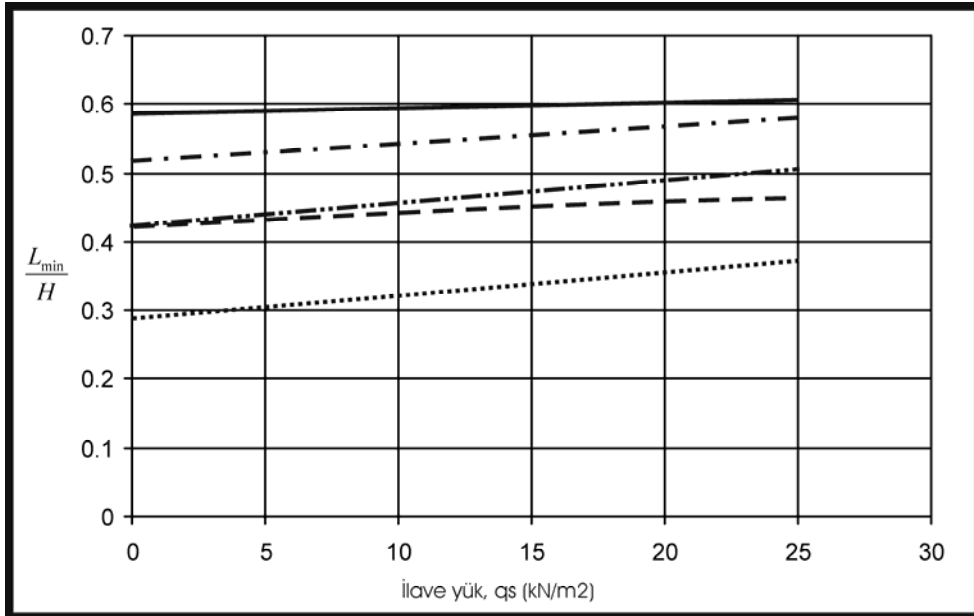
Şekil 4.7.'de birim ağırlığı 16 ila 21 kN/m³ aralığında olan güçlendirilmiş zeminin minimum güçlendirme uzunluğu üzerinde etkisi gösterilmiştir. Güçlendirilmiş zeminin birim ağırlığındaki artış, bütün dış yetisizlik durumlarında, gerekli güçlendirme uzunluğunun azalmasına yol açtığı görülmektedir. Bu azalma, taban kayması kontrolünde yaklaşık %20 iken, taşıma gücü kapasitesi kontrolünde yaklaşık %5'tir. Güçlendirilmiş zemin birim ağırlığındaki değişim, çekme yetisizliği durumunda gerekli güçlendirme uzunluğunu nispeten az etkiler. Güçlendirilmiş zeminin birim ağırlığındaki artış, dikey yüklerin artmasından dolayı, taşıma gücü durumu için güçlendirme uzunluğunun artışı sonucunu doğurmuştur. Ancak, nihai taşıma kapasitesi ve temeldeki toplam düşey yükler zemin yükü etkilerini artıracığından dolayı, eksantrisitedeki azalış gerekli güçlendirme uzunluklarının düşmesiyle sonuçlanır.



Şekil 4.7. Güçlendirilmiş zemin birim ağırlığının güçlendirme uzunluğu üzerinde etkisi

4.3.5. İlave yük etkisi

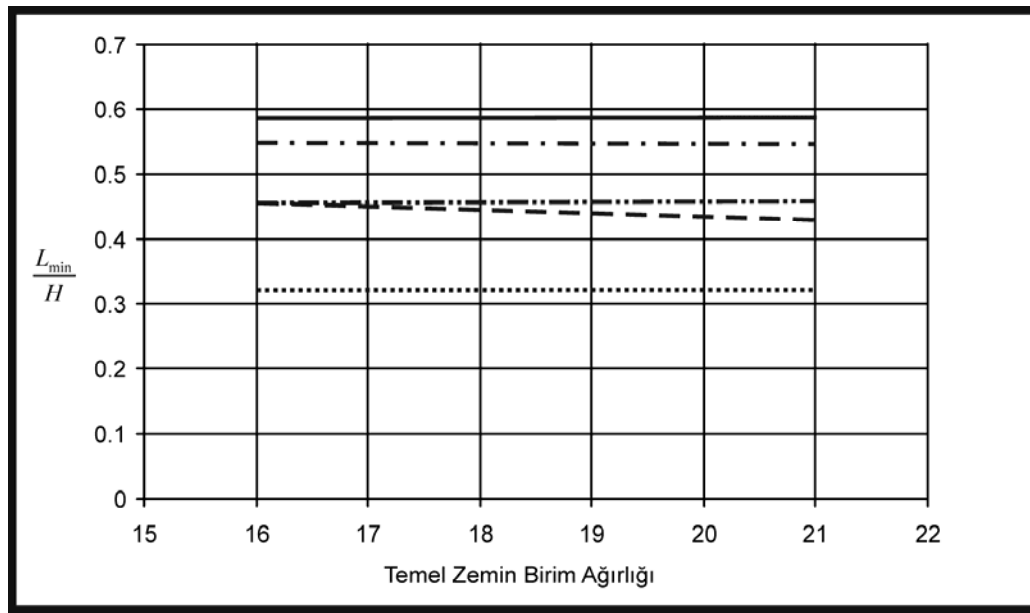
Gerekli minimum güçlendirme uzunluğu hesaplamalarında 0'dan 25 kN/m² aralığındaki ilave yük etkisi Şekil 4.8.'de sunulmuştur. Yatay gerilmelerin artmasından dolayı, iç ve dış yetersizlik durumlarının stabilitesini sağlayabilmek için, ilave yükteki artışı daha fazla güçlendirme uzunluğuna ihtiyaç duyar.



Şekil 4.8. İlave yükün güçlendirme uzunluğu üzerinde etkisi

4.3.6. Temel zeminin etkisi

Minimum güçlendirme uzunluğu üzerindeki temel zeminin birim ağırlığının etkisi Şekil 4.9.'da gösterilmiştir. Temel birim ağırlığındaki artış sadece taşıma gücü kapasitesini biraz etkiler, diğer yetisizlik durumları üzerinde bir etkisi yoktur. Parametre değişkenliği göz önüne alındığında, çekme yetisizliği en fazla başarısızlık durumudur. Sonuçlar minimum güçlendirme uzunluklarının $0.6H$ 'tan küçük olabileceğini göstermiştir.



Şekil 4.9. Temel zemin birim ağırlığının güçlendirme uzunluğu üzerindeki etkisi

4.4. Geosentetiklerin Efektif Uzunluklarının Belirlenmesi Konusunda Yapılan Araştırmanın Sonuçları ve Tartışma

Parametrik çalışmada görüldüğü gibi, minimum gerekli güçlendirme uzunluğu hesaplamalarında, çekme yenilmesi önemli bir etkendir, ayrıca, güçlendirilmiş istinat duvarı tasarımında parametrik değerlere bağlı olarak, dışsal stabilite yetisizlik durumları (eksantrisite ve taşıma gücü kapasitesi) da aynı zamanda önemli faktörlerdir. Sonuçlar aynı zamanda, zemin sürtünme açısının (dolgu, güçlendirilmiş veya temel zeminleri için), gerekli minimum güçlendirme uzunluğu üzerinde büyük etkiye sahip olduklarını göstermiştir. Aynı zamanda gerekli minimum güçlendirme uzunluğu hesaplamalarında, sürtünme açısı başarısızlık durumunun içsel veya dışsal olmasını da etkiler. AASHTO (2002) ve BS8006 (1995)'deki minimum güçlendirme

uzunluğunun tanımlamasından farklı olarak, bu uzunluğun %70'ten kısa olduğu pek çok durumlar da bu çalışmada belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, geçmişte uygulanmış olan zemin güçlendirme yöntemleri, mevcut ve araştırma aşamasında olan çalışmalar detaylandırılmış, tartışılmış ve kıyaslanmıştır. Literatürlerde bulunan zemin güçlendirme ile ilgili pek çok akademik çalışma, patent ve uygulamalar karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada yapılan karşılaştırmalar göstermiştir ki; organik zeminlerde ve sığ olan yerlerde, zemin değiştirme ve geosentetikler bu tür zeminlerin iyileştirilmesinde uygundur, derin organik zeminlerde ise geosentetikler ve kum kolonlar kullanılabilir. Tabakalı organik zeminlerde, patlatma, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum kolonlar ve taş kolonlar uygulanabilir. Sığ dolgularda, zemin değiştirme derin dolgularda ise dinamik kompaksiyon ve kum kolonlar kullanılabilir. Killerde, dondurma, elektro-osmoz, geosentetikler, düşey drenler, ön yükleme, jet-grouting ve kireç enjeksiyonu zemin güçlendirme yöntemleri olarak uygulanabilir. Ancak, yumuşak kilerde, sığ yerlerde, zemin değiştirme ve geosentetikler kullanılabilir, derin yerlerde ise, geosentetikler ile kum ve kireç kolonlar uygulanabilir. Tabakalı yumuşak killerde, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum ve kireç kolonları uygulanabilir. Sığ siltlerde ise, dinamik kompaksiyon ve zemin değiştirme uygulanabilir, ancak, derin siltlerde, taş kolonlar ve elektro-osmoz uygundur. Gevşek kumların sığ olanlarında, dinamik kompaksiyon ve çimento stabilizasyonu uygulanırken, derin gevşek kumlarda ise, dinamik kompaksiyon, vibrokompaksiyon, patlatma, kompaksiyon enjeksiyonu ve jet enjeksiyonu uygulanabilir. Sıvılaşabilen zeminlerde, dinamik kompaksiyon, taş kolonlar, düşey drenler ve enjeksiyon metodu uygulanmaktadır. Şişebilen zeminlerde ise, dinamik kompaksiyon, taş kolonlar, düşey drenler, jet enjeksiyonu uygulanmaktadır. Çatlaklı kayalarda ise sadece enjeksiyon yönteminin uygulanması uygundur.

Projedeki zemine uygun güçlendirme yöntemleri seçildikten sonra, bu yöntemler arasında şu hususlar göz önüne alınmalıdır;

- Zeminde katman farklılığının olup olmadığı,
- Projedeki yapının ihtiyaç duyduğu zemin dayanımı,
- İhtiyaç duyulan zemin dayanımını sağlayan yöntemlerin ömürleri,
- Yöntemlerin uygulanabilme kolaylığı,
- Yöntemlerin maliyetleri.

Bu kıyaslamalar birim alan olarak veya proje kapsamındaki zeminin tümü için yapılmalıdır.

Bu araştırma kapsamında yapılan parametrik çalışma göstermiştir ki;

- Pek çok uluslararası standartta belirtilenden farklı olarak, minimum güçlendirme uzunluğunun tanımlanandan daha küçük bir değer alabileceği pek çok durum mevcuttur.
- Çekme yenilmesi minimum güçlendirme uzunluğunun belirlenmesinde önemli bir etkidir
- Güçlendirilmiş istinat duvarı tasarımında parametrik değerlere bağlı olarak, dışsal stabilite yetisizlik durumları da önemli faktörler içermektedir.
- Zemin sürtünme açısının gerekli minimum güçlendirme uzunluğu üzerinde büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir.
- Sürtünme açısının, gerekli minimum güçlendirme uzunluğu hesaplamalarında, önemli bir parametre olduğu gösterilmiştir.

5.2. Öneriler

Çeşitli parametreler içeren güçlendirilmiş istinat duvarları tasarımında, minimum güçlendirme uzunluğu hesaplamalarında, zemin yetisizlik durumları çalışılmıştır. Her performans ölçütü için gerekli minimum güçlendirme uzunluğu

hesaplanmasında, günümüz tasarım uygulama teknikleri kullanılarak parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Çeşitli durumlar altında güçlendirme uzunlukları ve kullanılabilir en kısa uzunluklar hesaplanmıştır. Bu çalışmadan, aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Parametrik değerlere ve özellikli durumlara dayandırılarak, minimum gerekli güçlendirme uzunluğunun dışsal ve içsel yetisizlik durumları için önemli bir başarısızlık ölçütü olduğu gösterilmiştir.
- Çekme yetisizliği ve içsel stabilite durumları, geogridle güçlendirilmiş duvarlarda minimum güçlendirme uzunluğu üzerinde önemli ölçütlerdir. Ancak, parametrelere bağlı olarak en fazla başarısızlık durumunun çekme yetisizliğinde olduğu göz ardı edilmemelidir. Zeminlerin sürtünme açıları, özellikle güçlendirilmiş bölgedeki, minimum güçlendirme uzunluğu üzerinde en etkili ölçüttür.
- Güçlendirilmiş bölge’de daha yüksek sürtünme açılı zeminler kullanılarak, bazı koşullarda güçlendirme uzunluğunu %30’a kadar azaltmak mümkündür. Özelliklere bağlı olarak, minimum güçlendirme uzunluğu yaklaşık $0.6H$ kadardır. $0.7H$ ’tan küçük güçlendirme uzunlukları kullanmak mümkündür. Kısa güçlendirme uzunluklarında, oturma ve açısız dönme kontrollerinin yapılması gerekli olduğundan bu konuya dikkat edilmelidir.

KAYNAKLAR

- AASHTO, 2002. Standard Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, 7th ed., Inc., Washington DC.
- ADAMS, M. T., and COLLIN, J. G., 1997. Large Model Spread Footing Load Tests on Geosynthetic Reinforced Soil Foundation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(1):66-72.
- AIBAN, S. A., and ALI, S. M., 2001. Nonwoven Geotextile-Sabkha and -Sand Interface Friction Characteristics Using Pull-Out Tests. *Geosynthetics International*, 8(3):193- 220.
- ALAWAJI, H. A., 2001. Settlement and Bearing Capacity of Geogrid-Reinforced Sand over Collapsibe Soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 19:75-88.
- ALKAYA D., ve ÇOBANOĞLU İ., 2008. Dalaman-Akköprü Barajı Perde Enjeksiyonu Uygulaması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi, Selçuk Üniversitesi, 16-17 Ekim, Cilt II, Konya, s.669-679.*
- ATALAR, C., DAS., M. B., OMAR, M. T., ve SHIN, E. C., 2002. Geogrid Takviyeli Zemin Yastık Altında Gerilme Dağılımı. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği, Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Cilt II,, Eskişehir, s.509-518.*
- BATU, V., 1979. Flow Net For Unsaturated Infiltration From Strip Source. *Journal of The Irrigation and Drainage Division. ASCE*, 105(3):223-245.
- BELL, F. G., 1993. *Engineering Treatment of Soils, E&FN Spon*, 293p.
- BELL, F. G., and TYRER, M. J., 1989. The Enhancement of The Properties of Clay Soils by The Addition of Cement or Lime. *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.1339-1341.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BS8006), 1995. *Code of Practice for Strengthened/reinforced Soils and Other Fills*, BSI, London.
- BRODERICK, G. P., and DANIEL, D., 1990. Stabilizing Compacted Clay Against Chemical Attack. *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division*, 116(10):1549-1567.
- BURD, H. J. ,1995. Analysis of Membrane Action in Reinforced Unpaved Roads. *Canadian Geotechnical Journal*, 32:946-956.
- CAPPER, P. L. and CASSIE, W. F., 1984. Çeviri KUMBASAR V. ve KİP, F. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği. *Çağlayan Kitabevi, İstanbul*, 345s.
- CHANDRA, S., 1987. *Stabilization of Clayey Soils with Lime, Cement and Chemical Additives Mixing, Prediction and Performance in Geotechnical Engineering*, Calgary.
- CHEW, S. H, SCHMERTMANN, G. R., and MITCHELL, J. K., 1991. Reinforced Soil Wall Deformations by Finite Element Method. *Performance of Reinforced Soil Structures. McGown, A. et al. (eds). Thomas Telford, London*, pp. 35-40.
- CLARE, K. E., and CRUNCHLEY, A. E., 1957. Laboratory Experiments in The Stabilization of Clays with Hydrated Lime. *Geotechnique*, 3:97-111.

- ÇAPAR, Ö. F., 1992. Kompakte Edilmiş Zeminlerde Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Değişimi Üzerine Bir Araştırma. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 162s.
- ÇETİNKAYA, İ., 2002. Farklı Zemin Sınıfları ve Farklı Perde Tiplerine Göre Yüksek Yapı Güçlendirilmesi ve Bunların Karşılaştırılmalı Analizi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 189s.
- DANIELE, C., PICARELLI L., RICCIUTI A., and RIMOLD P., 1993. Laboratory Investigations on The Shear Strength of Geogrid Reinforced Soils. ASTM Special Technical Publication Symposium on Geosynthetic Soil Reinforcement Testing Procedures, 1190:119-137.
- DEMİR, H., 2007. Taş Kolon ve Geopier Uygulaması İle Zemin İyileştirmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 175s.
- DEMİRÖZ, A., 2008. Geogrid Donatılı Kum Üzerine Oturan Şerit Temellerde Taşıma Gücünü Etkileyen Tasarım Faktörlerinin Deneysel Olarak Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya, 247s.
- DİNÇER, E., ve BERİLGİN, M.M., 1991. İnce Daneli Bir Zeminin Kireç Stabilizasyonu, Anadolu Üniversitesi V. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 280-291s.
- DURGUNOĞLU, T., 1992. Taşkolonlar ile Zemin Islahı Üzerine Bir Uygulama. ZMTM 4, Cilt-II, İTÜ, İstanbul, s.19-30.
- EDİ, E. F., 1993. Ön Yükleme İle Zemin Islahı. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, 70s.
- ELIAS V., CHRISTOPHER B. R., and BERG R. R., 2001. Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Design and Construction Guidelines. Publication.
- FHWA-NHI-00-043, Federal Highway Administration (FHWA), Washington DC.
- ESSLER, R. D., DROOFF, E. R., and FALK, E., 2000. Compensation Grouting: Concept, Theory and Practice. Advances in Grouting and Ground Modification, ASCE, 104:1-15.
- FAKHER, A., and JONES, C., 2001. When the Bending Stiffness of Geosynthetic Reinforcement is Important. Geosynthetics International, 8:445-460.
- FOX, N. S., and COWELL, M. J., 1998. Geopier Foundation and Soil Reinforcement Manual Geopier Foundation Company Inc. Scottsdale.
- GRAY, D. H., and SOTIR, R., 1996. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization. John Wiley & Sons, New York NY.
- HAERI, S. M., NOORZAD, R., and OSKOOROUCHI, A. M., 2000. Effect of Geotextile Reinforcement on The Mechanical Behavior of Sand. Geotextiles and Geomembranes, 18(6):385-402.
- HAN, J. and GABT, M. A., 2002. Numerical Analysis of Geosynthetic-Reinforced and Pile-Supported Earth Platforms Over Soft Soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128:44-53.
- JONES, C., and AGAIBY, S. W., 1995. Design of Reinforced Fill Systems Over Voids. Canadian Geotechnical Journal, 32:939-945.

- KAHYA, Ş., 1995. Geçirimsizlik Perde ve Şilteler İçin Kullanılan Zeminlerin İyileştirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 229s.
- KALAVA, İ, 1992. Killerin Çimento ve Kireç İle Stabilizasyonu. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 318s.
- KARAYOLLARI GENEL MÜDÜRLÜĞÜ, 2007.Yol, Köprü, Bitümlü Kaplamalar ve Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi.
- KAVAK A., 1996. The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading. Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 167p.
- KAVAK A., 2007. A Field Application for Lime Stabilization. Environmental Geology, 51(6):987-997.
- KELLER PUBLICATIONS, 2003. The Soilfrac Process. Brochure 61-02.
- KUMAR, A., OHRİ, L. M., and BANSAL, K. R., 2007. Bearing Capacity Tests of Strip Footings on Reinforced Layered Soils. Geotechnical and Geological Engineering, 25:139-150.
- KUTZNER, C., 1996. Grouting of Rock and Soil (1st English Edit.). Rotterdam: A.A. Balkema, 251p.
- LADD, C. C., MOH, Z. C., LAMBE, T. W., 1960. Recent Soil-Lime Research at the Massachusetts I.T.. Highway Research Board, 262:64-85.
- LAMAN, M., and YILDIZ, A. A., 2003. Model Studies of Ring Foundations on Geogrid-Reinforced Sand. Geosynthetics International, 10(5):142-152.
- LAMBE, T. W., and WHITMAN, R. V., 1979. Soil Mechanics SI Version. John Wiley and Sons Company, New York, 553p.
- LAWSON, C. R., and YEE, T. W., 2005. Reinforced Soil Retaining Walls with Constrained Reinforced Fill Zones. Slopes and Retaining Structures Under Seismic and Static Conditions (GSP 140) Proceedings of Geo-Frontiers, Gabr et al. (eds).
- LAWTON, E. C., and FOX, N. S., 1994. Settlement of Structures Supported on Marginal or Inadequate Soil Stiffened with Short Aggregate Piers. Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE Geotechnical Special Publication, 2(40):962-974.
- LAWTON, E. C., FOX, N. S., and HANDY, R. L., 1994. Control of Settlement and Uplift of Structures Using Short Aggregate Piers. In-situ Deep Soil Improvement, Proc. ASCE National Convention, Atlanta, Georgia, 121-132p.
- LEE, K. M., and MANJUNATH, V. R., 2000. Soil-Geotextile Interface Friction by Direct Shear Tests. Canadian Geotechnical Journal, 37(1):238-252.
- LESHCHINSKY, D., and HAN, J., 2004. Geosynthetic Reinforced Multitiered Walls. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 130(12):1225-35.
- LING, H.I., and LESHCHINSKY, D., 2003. Finite Element Parametric Study of The Behavior of Segmental Block Reinforced-Soil Retaining Walls. Geosynthetics International, 10(3):77-94.
- LING, H.I., LIU, H., MOHRI, Y., 2005. Parametric Studies on The Behavior of Reinforced Soil Retaining Walls Under Earthquake Loading. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 131(10):1056-65.
- LIU, C., and EVETT, J. B., 2004. Soils and Foundations, 6th ed., Prentice Hall, 496p.

- LONG, P.V, BERGADO, D.T, BALASUBRAMANIAM A.S, DELMAS P.,1997. Interaction Between Soil and Geotextile Reinforcement. Proceedings of the 1997 1st National Conference of the ASCE Geo-Institute, Geo-Logan, USA, pp. 560-578.
- LOVE, J. P., 1984. Model Testing Of Geogrids in Unpaved Roads. Oxford University, Doctor's Thesis, Oxford, 219p.
- MITCHELL, J. K., 1993. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 2nd edition, 437p.
- NATIONAL CONCRETE MASONRY ASSOCIATION (NCMA), 2002. Design Manual for Segmental Retaining Walls, 2nd ed., Collin (ed). Herndon, 289p.
- NIELSEN, D. R., JACKSON, R.D., and CARY, J. W., 1972. Soil Water. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Wisconsin, 175p.
- ÖNALP, A., 1993. Rezidüel Killerin Stabilizasyonu. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, 46s.
- ÖZAYDIN, K., 1989. Zemin Mekaniği. Meya Matbaacılık ve Yayıncılık, İstanbul, 395s.
- ÖZKUZEY, Ü.M., 1990. Stone Columns A Soil Improvement Method For Foundation Soils. Boğaziçi University, B.S. in C.E., İstanbul, 119p.
- ÖZTÜRK, E., 2006. Adapazarı Ovasındaki Zeminlerin Genel Dağılımı ve Uygun Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Belirlenmesi. Sakarya Üniveristesii, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 196s.
- PARLANGE, J. Y., 1970. Theory of Water Moveement In Soils: One Dimensional Absorption. Soil Sience, 111(1):134-137.
- PATRA, C. R., DAS, M. B., and SHIN, E. C., 2005. Ultimate Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Strip Foundations on Sand Reinforced With Geogrids. Paper Presented in International Symposium on Tsunami Reconstruction with Geosynthetics, 1:335-344.
- PERLOFF, W. H., and BARON, C., 1976. Soil Mechanics Principles and Aplications. John Wiley and Sons Company, New York, 175s.
- PHILIP, J. R., 1985. Approximate Analysis of The Borehole Permeameter in Unsaturated Soil. Water Resources Research, 21(7):1025-1033.
- PHILIPS FIBER CORPORATION,1987.Stabilization Design Guide.
- RAATS, P. C., 1970. Steady Infiltration From Line Sources and Furrows. Soil Science Society of America, 34(5):709-714.
- RAJU, V. R., 1997. The Behavior of Very Soft Soils Improved by Vibro Replacement. Ground Improvement Conference, London.
- RUNSER, D. J., FOX P. J., and BOURDEAU P. L., 2001. Field Performance of a 17 m-High Reinforced Soil Retaining Wall. Geosynthetics International, 8(5):367-391.
- SAITO, A., 1977. Characteristics of Penetration Resistance of a Reclaimed Sandy Deposit and Their Change Through Vibratory Compaction. Soils and Foundations, 17:32-43.
- SELİM, H. M., MANSELL, R. S., and ELZEFTAWY, A., 1976. Distributions of 2,4-D and Water in Soil During Infiltration and Redistribution. Florida Agricultural Experiment Station Journal Series, 12:177-183.

- SHIN, E. C., DAS, M. B., 2000. Experimental Study of Bearing Capacity of a Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Sand. *Geosynthetics International*, 7(1):59-71.
- SÖZEN, S. B., 1996. Yumuşak Zeminlerin İyileştirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 113s.
- ŞAHİN, M., 1995. Zayıf Zeminlerde Yapı Temelleri ve Şev Yamaçları Koruma Cildi Oluşturulması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master Tezi, Adana, 46s.
- ŞENOL A., GÜMÜŞER C., ve BOSTANCIOĞLU M., 2008. Kaplamasız Yollarda Geogrid Kullanımının Farklı Hesap Yöntemleriyle Ekonomik Analizi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi, Selçuk Üniversitesi, 16-17 Ekim, Cilt II, Konya, s.649-659.
- TAN, S. A., CHEW, S. H., WONG, W. K., 1998. Sand-Geotextile Interface Shear Strength by Torsional Ring Shear Tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 16(3):161-174.
- TANIMOTO, K., 1973. Introduction to the Sand Compaction Pile Method as Applied to Stabilization of Soft Foundation Grounds. Division of Applied Geomechanics, GSIRO, Technical Report No.16, Australia.
- TOSUN, H. 2000. Dolgu Barajlarda Enjeksiyon Perdesi Tasarım Esasları ve Türkiye Pratiği. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, İTÜ, İstanbul
- TÜMER, R., 1999. Modelling of Soil Improvement and Reinforcement Against Liquefaction. Boğaziçi University, İstanbul, 178p.
- UZUNER, B. A., 1990. Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği. Teknik Kitabevi, Trabzon, 285s.
- ÜNVER, A. M., 1992. Ground Improvement By Vibro-Compaction and Vibro-Replacement. Middle East Technical University, A Master's Thesis, Ankara, 146p.
- VILLARD, P., and GIRAUD, H., 1998. Three-Dimensional Modeling of The Behavior of Geotextile Sheets as Membranes. *Textile Research Journal*, 68:797-806.
- WARNER, J., and BROWN, D.R., 1974. Planning and Performing Compaction Grouting, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 100(6):653-666.
- WHITLOW R., 2001. Basic soil mechanics, 4th Ed., Prentice Hall, 592p.
- WHITE, D. J., WISSMANN, K. J., BARNES, A. G., and GAUL, A. J., 2002. Embankment Support: A Comparison of Stone Column and Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement. Presented at Transportation Research Board, 81th Annual Meeting, Washington D.C.
- WISSMANN, K. J., 1999. Bearing Capacity of Geopier Supported Foundation Systems. Technical Bulletin No.2, Geopier Foundation Co., Inc., Arizona.
- WISSMANN, K. J., MESER, K. and PANDO, M., 2001. Reducing Settlement Risk in Residual Piedmond Soil Using Rammed Aggregate Pier elements. Proceeding ASCE Specialty Conference, June 9-13, Blacksburg.
- WISSMANN, K. J., WHITE, D. J., FITZPATRICK, B. T., and LIEN, B. H., 2002. Improving Global Stability and Controlling Settlement with Geopier Soil Reinforcing Elements. Proceeding of The 4th International Conference on Ground Improvement Techniques, Kuala Lumpur, March 26-28, Malasia.

- YETİMOĞLU, T., WU, J., and SAĞLAMER, A., 1994. Bearing Capacity of Rectangular Footing on Geogrids-Reinforced Sand. *Journal of Geotechnical Eng. ASCE*, 120(12):2083-2099.
- YETİMOĞLU, T., SALBAS, O., 2003. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(2):103-110.
- YILDIZ, A. A., LAMAN, M., ÖRNEK, M., ve DEMİR, A., 2006. Donatılı Kum Zeminlere Oturan Dairesel Temellerin Sayısal Analizi, İkinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, BÜ, İstanbul, s.75-84.
- YILMAZ, H., YURTCAN, U. E., ve UĞUR, N., 2008. Geocell Hücresel Destek Sistemlerinin Yol Üst Yapısında Kullanımı Üzerine Teorik Bilgiler ve Nümerik Bir Uygulama ile Faydaların Açıklanması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi*, 16-17 Ekim 2008, Selçuk Üniversitesi, Konya
- ZHAN, C., and YIN, J. H., 2001. Elastic Analysis of Soil-Geosynthetic Interaction. *Geosynthetics International*, 8:27-48.
- ZHANG, M. X, JAVADI, A. A., and MİN, X., 2006. Triaxial Tests of Sand Reinforced with 3D Inclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(4):201-209.
- ZORLUER, İ., ve USTA, M., 2003. Zeminlerin Atık Mermer Tozu ile İyileştirilmesi. *Türkiye 4. Mermer Sempozyumu (MERSEM'2003) Bildiriler Kitabı*, AKÜ Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Bölümü, 18-19 Aralık, Afyon, s.305-311.
- ZORNBERG, J.G., and LESHCHINSKY, D., 2003. Comparison of International Design Criteria for Geosynthetic-Reinforced Soil Structures. *Landmarks in earth reinforcement*. Ochiai et al.(eds), pp. 1095-106.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Şanlıurfa'da doğdu. İlköğretimini, ortaöğretimini ve liseyi Şanlıurfa'da tamamladı. 1999 yılında Doğu Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi'ni kazanarak eğitimine burada devam etti. 2004 yılında lisans eğitimini tamamlayarak lisan eğitimi için İngiltere'ye gitti. İngiltere'de lisan eğitimini tamamlayarak 2005 yılında Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı ve halen aynı bölümde öğrenimine devam etmektedir.

ÖZET

Zayıf zeminin varlığı, yerleşim yerleri ve yol güzergahları gibi, pek çok yapısal anlamadaki faaliyetlerin seçilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Nüfusun ve teknolojinin hızla artması, beraberinde zemin güçlendirme metotlarına da belli bir ivme kazandırmıştır. Elverişsiz alanlarda yapı yapılması ve özellikle deprem bölgelerindeki zemin yetisizlikler gibi gerekliliklerde ön plana çıkan zemin güçlendirme metotlarının, günümüzde uygulanması kaçınılmazdır.

Geçmişten günümüze hemen her bölgede değişik zemin güçlendirme metotları geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Mevcut zemin güçlendirme metotlarından biri olan sıkıştırma yöntemi en yaygın yöntemlerden biridir. Hemen her bölgede uygulanan bu yöntem, ekonomik ve daha yüzeyseldir. Bir başka yaygın uygulama şekli olan zemin değiştirme ile zemin iyileştirmesi, sıkıştırma yöntemine göre daha maliyetlidir. Özellikle son yıllarda enjeksiyon yöntemi oldukça ön plana çıkmaktadır. Birçok uygulama çeşidi olan bu yöntem, çeşitli enjeksiyon malzemelerinin zemine likit bir şekilde enjekte edilmesinin ardından, belli bir süre sonra enjeksiyon malzemesinin sertleşmesi esasına dayanmaktadır. Zeminin dondurulması, yakılması, elektro-osmoz gibi çeşitli metotlar ise maliyetlerinden, ihtiyaç duyulan ekipmandan dolayı yeterince uygulama alanı bulamamışlardır. Geosentetikler depolama, drenaj, ayırma, filtrasyon, donatı gibi uygulama alanlarında da uygulanabildiğinden dolayı giderek popüleritesini artırmaktadır. Henüz araştırma aşamasında olan fakat çevresel olduklarından dolayı ilgi uyandıran atık mermer tozu ile zemin güçlendirme ve biyoteknik zemin güçlendirme yöntemlerinin ise, zamanla daha yaygın kullanılabileceği düşünülmektedir.

Birçok uygulama alanı bulunan geosentetikler, istinat duvarlarında da güçlendirme malzemesi olarak kullanılmaktadır. İstinat duvarlarının, kayma, devrilme, taşıma kapasitesi gibi dayanımlarında önemli bir direnç artışı sağlayan geosentetik güçlendirmeler ile ilgili çeşitli araştırmalar ve çalışmalar yapılmış, ve bazı standartlar bu araştırmada tartışılmıştır. Bu çalışmada, bu standartların değişebileceği fikri oluşmuştur. Zira, gereksiz güçlendirme uzunluklarının ekonomi ve uygulama açısından bu yöntemin yeterince uygulama alanı bulamamasına ve

yapılan uygulamalarda fazla maliyete sebep olabileceği düşünülebilir. Yapılan araştırma ve çalışmalarda bazı standartların aşırı muhafazakar tarafta kaldıkları, bazen geosentetik güçlendirme uzunluklarının yarı yarıya fark ettiği bu çalışmada gözlenmiştir. Parametrik yaklaşım sonuçları, çeşitli standartlarla karşılaştırılmış ve gerekli geosentetik güçlendirme uzunluğunun dünya standartlarındaki değerlerden daha kısa olabileceği fikrine varılmıştır. Bu parametrik yaklaşımlar sonucu, geosentetiklerin daha ekonomik bir şekilde istinat yapılarında kullanılabileceği gösterilmiştir.

Bu konuya yönelik olarak geogrid güçlendirmeli istinat duvarlarının kayma, devrilme, taşıma kapasitesi kontrolleri, çekme yetisizliği ve eksantrisite etkisi incelenmiştir. Bu kontroller sonucu, bazı şartnamelerde verilen geogrid ve geosentetik güçlendirmeli istinat duvarlarında minimum güçlendirme uzunluklarının kısaltılmasının mümkün olduğu gösterilmiştir. İstinat duvarlarının arkasında yeterli mesafenin olmadığı durumlarda bu yarar daha da ön plana çıkmaktadır. Geosentetik malzemelerin birim fiyatları göz önüne alındığında, stabiliteden ödün vermeyerek, optimum boyutlarda daha az bir malzemeyle güçlendirme yapılabileceği için, bu ekonomik faydanın göz ardı edilemeyeceği görülür.

SUMMARY

The improvement of weak or loose soils to improve their load bearing capacity and reduce their potential settlement characteristics has proved to be cost effective in achieving an economical substructure solution to many developments. The research undertaken in this thesis provides the most important ground improvement techniques. Considerable developments have undertaken recently not only in technical matters but also in plant and equipment, and rate of production in the consideration of ground improvement. It has been many developments in the last decade in which the increasing demand for in-situ deep soil mixing work in Europe and North America have been observed, which are reflected in this thesis. As far as the traditional approaches are concerned, the selection of the correct ground improvement technique at an early stage in design can have an important effect on foundation choice and can often lead to more economical solutions. These considerations are explained in this research which provides an overview of the development of each specific technology as well as details of plant and equipment required. These developments are reflected in the increasing degree of standardisation of the various methods in codes and similar technical recommendations that cover geotechnical design that are considered in this research study and the comparisons are made between the techniques presented in this thesis.

Theoretical considerations on design aspects together with fields of application and limitations of the methods are also provided including aspects of monitoring and process controls complete the description of the various ground improvement methods. The comparisons are made with the ground improvement methods, the distinctions are made between methods of compaction or densification and methods of soil reinforcement through the introduction of additional material into the ground. Research concentrated on the methods of static compaction by preloading with and without consolidation aid, the most common methods are described and illustrated, the vibratory compaction by depth vibrators, the vibro stone column methods, dynamic compaction with current plant and equipment, the important ground improvement method of permeation grouting is presented with an emphasis on recent advances in cement grouting, the chemicals injection, jet grouting is described, the

compaction effect of grouting pressure and the reinforcing effect of the low strength grout material is introduced, similar soil improvement features to compaction grouting used to control building settlement is explained, the lime/cement stabilisation method, the in-situ deep soil mixing methods are described.

The main problem associated with providing foundations which perform satisfactorily on poor ground is the effect of differential settlements. The main object of ground improvement therefore is to achieve a reduction and more uniform ground settlement due to the applied loads thus reducing differential movements to within acceptable limits. Settlements are usually caused by the vertical load delivered by the building and its foundation, which can result in consolidation, compaction and shear strain of the soils. In addition, the rates of settlement are closely related to soil drainage. Ground improvement therefore aims to consolidate and compact the soil and improve its shear resistance and make its drainage characteristics more uniform. This reduces the magnitude of differential settlement under loading and improves the load-bearing capacity of treated soil. Soil stabilization requires a high degree of uniform particle bonding. A review of grouting processes illustrates that penetration by cements in most soils is impractical, but injection that displaces soil fabric and mixing that destroys it allows cement to be introduced into the soil. These processes are mainly applicable to surface layers, allowing the construction of roads, car parking areas and hard standings on otherwise unsuitable soils. In addition to the more common use of soil reinforcement in embankments and road construction, benefit can be gained from increased tensile resistance of soils for foundations. For example, reinforcement can improve soil behaviour during surface rolling for soil strengthening. The behaviour of the soil can be improved by restraint from side spread by the introduction of horizontal reinforcement between the layers of material.

The another goal of this study is to characterize the governing failure mechanism for the required minimum geogrid reinforcement length used in the reinforced soil retaining walls as well as to investigate the possibility of using the shorter reinforcement lengths than the world guidelines suggest. Effect of various

parameters on the optimum reinforcement length for each failure consideration in the design is investigated by the parametric study. The overturning, sliding and bearing capacity failures as well as the pullout failure mechanisms are analyzed. Guidelines regarding the minimum reinforcement lengths are decreased. In some cases, there is no enough space behind the wall, therefore, this investigation becomes more crucial since as it is concluded in this study that it is infect possible to shorten the geogrid length required in the improvement zone of the reinforced retaining wall without decreasing the stability required.