

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PUZOLAN İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ İNŞAAT VE YIKINTI ATIKLARININ
GRANÜLER DOLGU OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ

TALHA SARICI

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ARALIK 2019

Tezin Başlığı: Puzolan ile Güçlendirilmiş İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Granüler Dolgu Olarak Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi

Tezi Hazırlayan: Talha SARICI

Sınav Tarihi: 18.12.2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL
İnönü Üniversitesi



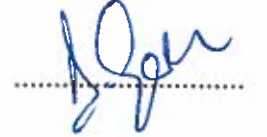
Prof. Dr. Kazım TÜRK
İnönü Üniversitesi



Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN
Adıyaman Üniversitesi



Doç. Dr. Didem EREN SARICI
İnönü Üniversitesi



Dr. Öğr. Üyesi Bahadır OK
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve
Teknoloji Üniversitesi



Prof. Dr. Kazım TÜRK

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum **“Puzolan ile Güçlendirilmiş İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Granüler Dolgu Olarak Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi”** başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Talha SARICI



ÖZET

Doktora Tezi

PUZOLAN İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ İNŞAAT VE YIKINTI ATIKLARININ GRANÜLER DOLGU OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Talha SARICI

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

310 + xxii sayfa

2019

Danışman: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL
İkinci Danışman: Doç. Dr. Hüseyin Süha AKSOY

Bu çalışmada, mühendislik uygulamaları için genellikle uygun olmayan inşaat ve yıkıntı atıklarının (CDW), puzolan ve geogrid ile iyileştirilerek, granüler dolgu olarak kullanılabilme potansiyeli araştırılmıştır.

Bu amaçla, CDW içerisine kütlece %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) puzolan katkı olarak eklenerek test numuneleri hazırlanmıştır. Katkisız ve puzolan katkılı numuneler üzerinde kompaksiyon deneyleri yapılarak daha sonra serbest basınç ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) gibi mukavemet deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu deneylerde puzolanların karışımdaki reaktivitesini aktive etmek amacıyla alkali aktivatör çözeltileri (AAÇ) kullanılmıştır. Serbest basınç ve CBR deneyleri 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda gerçekleştirilmiştir. En efektif katkı oranı belirlendikten sonra, model yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Zayıf bir zemin üzerine inşa edilmiş güçlendirilmemiş, geogridle güçlendirilmiş, puzolanla güçlendirilmiş ve hem puzolan hem de geogrid ile güçlendirilmiş CDW dolguları üzerine bir model temel yerleştirilerek, bu model temel in yük-deformasyon davranışı incelenmiştir. Model yükleme deneyleri 7 günlük kür süresi sonunda gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, puzolan katkı oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmaks}) değerleri azalmıştır. Bununla birlikte, puzolan katkı oranı arttıkça, YFC hariç, optimum sıvı oranı (ω_{opt} ya da $\omega_{optAAÇ}$) azalmıştır. Serbest basınç ve CBR deneylerinden, AAÇ eklenmiş %20 oranında YFC katkısının, en yüksek dayanım değerini sağladığı belirlenmiştir. Bu test numunesinin güçlendirilmemiş numuneye göre, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda sırasıyla, serbest basınç mukavemetinin 14.72 ve 23.20, CBR değerinin ise 11.78 ve 25.00 kat yüksek çıktığı görülmüştür. Model yükleme deneylerinde, en yüksek dolgu durumunda, güçlendirilmemiş, geogridle güçlendirilmiş, puzolanla güçlendirilmiş, hem puzolan hem de geogrid ile

güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atığı dolgularının, zayıf zemine göre taşıma gücü değerlerinin sırasıyla 7.01, 8.93, 32.84 ve 42.56 kat yüksek çıktığı belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasının sonucunda, CDW ile oluşturulmuş dolguların doğal agrega ile oluşturulmuş dolgulara göre performansının nispeten düşük olduğu ancak geogrid ve puzolan ile iyileştirme ile performansının oldukça iyi bir oranda artırılacağı belirlenmiştir. Doğal agrega yerine CDW kullanılmasının hem çevreye hem de ekonomiye önemli katkılar sunacağı düşünülmüştür. Bu yüzden, ülkemizdeki CDW malzemelerinin geri dönüştürülerek tekrar kullanılmasının ülkemize önemli katkılar sağlayacağı öngörülmüştür.

ANAHTAR KELİMELEER: Zemin stabilizasyonu, inşaat ve yıkıntı atığı, granüler dolgu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, alkali aktivatör, geogrid.



ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EVALUATION OF USABILITY OF POZZOLAN REINFORCED CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTES AS A GRANULAR FILL

Talha SARICI

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

310 + xxii pages

2019

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tacettin GEÇKİL
Co Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Süha AKSOY

In this study, the potential usability of construction and demolition wastes (CDW), which are not suitable for engineering applications, together with pozzolan and geogrid as a granular filling materials was investigated.

For this purpose, test samples were prepared by adding 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% fly ash and blast furnace slag as an additive to the CDW. Compaction tests were carried out on samples with and without additives and then, unconfined compression and California bearing ratio (CBR) tests were conducted. Also, in these tests, alkali activator solution was used to increase the reactivity of pozzolans in the mixture. Unconfined compression and CBR tests were carried out at the end of 7 and 28 days curing periods. After determining the most effective additive rate, model loading experiments were executed. The load-deformation behavior of the model foundation was investigated by placing a model foundation on the unreinforced, geogrid reinforced, pozzolan reinforced, both pozzolan and geogrid reinforced CDW fill built on a weak soil. Model loading experiments were carried out after 7 days curing period. Experimental results indicated that the maximum dry unit weight (γ_{kmax}) values decreased with increasing pozzolan additive ratio. However, the optimum fluid rate (ω_{opt} or $\omega_{optAAÇ}$) decreases, with an increase in a pozzolan additive rate, except for blast furnace slag. According to unconfined compression and CBR tests, 20% YFC additive with alkali activator has been determined to provide the highest strength value. This test sample's unconfined compressive strength was 14.72 and 23.20, CBR value was also 11.78 and 25.00 times higher than unreinforced test sample at the end of the 7 and 28 day curing periods, respectively. When model loading experiments were examined, it was determined that in the highest filling case, the strength of unreinforced, geogrid reinforced, pozzolan reinforced and pozzolan-geogrid reinforced CDW fill were 7.01, 8.93, 32.84 and 42.56 times higher than weak soil, respectively.

As a result of this thesis, it was determined that the CDW fill have relatively low performance compared to the natural aggregate fill, but its performance can be increased by using geogrid and pozzolan. It was considered that using CDW aggregate instead of natural aggregate can make important contributions to both environment and economy. Therefore, it was predicted that recycling and re-using CDW materials in our country can make important contributions to our country.

KEYWORDS: Soil stabilization, construction and demolition waste, granular fill, fly ash, blast furnace slag, alkali activator, geogrid.



TEŞEKKÜR

Benden katkılarını esirgemeyen ve bana daima yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e ve ikinci danışman hocam Doç. Dr. Hüseyin Süha AKSOY'a,

Tüm doktora eğitimim boyunca, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve yeri geldiğinde büyük fedakârlıklar yapan çok değerli Eşim Fatmanur SARICI'ya, yoğun çalışma temposunda bana moral kaynağı olan biricik kızım Yüstra SARICI'ya,

Maddi ve manevi her zaman bana destek olan tüm Aileme,

Her zaman yanımda olan zorlu süreçlerde bulduğu pratik çözümleri ile bana yol gösteren çok değerli Bahadır OK hocama,

Tez çalışmam süresince bana yardımcı olan ve yol gösteren hocalarım Prof. Dr. Kazım TÜRK'e ve Doç. Dr. Didem EREN SARICI'ya,

Ayrıca katkılarından dolayı, Semih İSSİ'ye, Arş. Gör. Enes GÜL'e, Arş. Gör. Alper ÖZMEN'e, Arş. Gör. Enes EKİNCİ'ye, Dr. Öğr. Üyesi Fatih Kantarcıya ve tüm değerli çalışma arkadaşlarıma,

FDK-2018-1459 kodlu Doktora Tez Projesi kapsamında tezime destek olan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne,
Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xx
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	6
2. KURAMSAL TEMELLER	9
2.1 İnşaat ve Yıkıntı Atıkları.....	9
2.1.1 İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının İçeriği	11
2.1.2 Dünyada ve Ülkemizde İnşaat ve Yıkıntı Atıkları	13
2.1.3 İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Geri Dönüştürülme Etkisi.....	16
2.1.4 İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Tekrar Kullanımı.....	19
2.1.5 İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Geri Dönüştürülme İşlemi	20
2.2 Puzolanlar	25
2.2.1 Puzolanların Sınıflandırılması.....	25
2.2.2 Doğal Puzolanlar.....	27
2.2.3 Yapay (Suni) Puzolanlar.....	29
2.2.3.1 Uçucu Kül	31
2.2.3.2 Yüksek Fırın Cürufu.....	33
2.2.4 Puzolanik Reaksiyon ve Aktivite.....	35
2.2.5 Alkali Aktivatörler	37
2.2.6 Puzolanların Kullanım Alanları.....	41
2.3 Zemin Stabilizasyonu.....	43
2.3.1 Kompaksiyon Metodu.....	48
2.3.2 Drenaj.....	51
2.3.3 Mekanik Stabilizasyon.....	52
2.3.4 Patlayıcılar ile Stabilizasyon.....	53
2.3.5 Vibrokanat (Vibrotij)	54
2.3.6 Vibrokompaksiyon (Vibroflotasyon)	55
2.3.7 Zemin İçerisinde Çeşitli Kolon Formlarının Oluşturulması.....	57
2.3.8 Önyükleme.....	65
2.3.9 Isıtma ve Dondurma Metotları.....	66
2.3.10 Elektro-osmoz Yöntemi.....	67
2.3.11 Puzolanlar ile Stabilizasyon.....	68
2.3.12 Geosentetikler	71
2.4 Zeminlerde Göçme Mekanizmaları ve Taşıma Gücü.....	85
2.4.1 Güçlendirilmemiş Zeminlerde Taşıma Gücü.....	87
2.4.2 Geosentetik ile Güçlendirilmiş Zeminlerin Taşıma Gücü ve Temel Göçme Mekanizmaları.....	95
2.5 Literatür Özetleri.....	100
2.6 Önceki Çalışmaların Değerlendirilmesi.....	123
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	126
3.1 Materyal	126

3.1.1	İnşaat ve Yıkıntı Atığı	126
3.1.2	Kohezyonlu (İnce Daneli) Zemin.....	134
3.1.3	Puzolanlar	144
3.1.4	Alkali Aktivatör Çözeltisi (AAÇ)	146
3.1.5	Geosentetikler	146
3.1.6	Kullanılan DeneY Düzenekleri ve Ekipmanlar.....	148
3.1.6.1	Modifiye Proktor Deneyi.....	149
3.1.6.2	Serbest Basınç Deneyi.....	150
3.1.6.3	Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi	153
3.1.6.4	Model Yükleme Deneyi	153
3.2	Yöntem.....	161
3.2.1	Modifiye Proktor Deneylerinin Gerçekleştirilmesi.....	161
3.2.2	Serbest Basınç Deneylerinin Gerçekleştirilmesi	165
3.2.3	Kaliforniya Taşıma Oranı Deneylerinin Gerçekleştirilmesi.....	170
3.2.4	SEM Analizlerinin Gerçekleştirilmesi	173
3.2.5	Model Yükleme Deneylerinin Gerçekleştirilmesi.....	174
3.2.6	DeneySEL Çalışmaların Programları.....	183
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	188
4.1	Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulguların Değerlendirilmesi.....	188
4.1.1	UK Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular	188
4.1.2	YFC Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular	189
4.1.3	UY Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular	190
4.1.4	AAÇ Eklenmiş UK Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular.....	192
4.1.5	AAÇ Eklenmiş YFC Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular.....	193
4.1.6	AAÇ Eklenmiş UY Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular.....	195
4.2	Serbest Basınç Deneylerine ait Bulguların Değerlendirilmesi.....	197
4.2.1	UK Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular	197
4.2.2	YFC Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular	201
4.2.3	UY Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular	204
4.2.4	AAÇ Eklenmiş UK Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular..	207
4.2.5	AAÇ Eklenmiş YFC Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular.....	211
4.2.6	AAÇ Eklenmiş UY Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular..	214
4.2.7	Serbest Basınç Deneylerinin Kendi İçerisinde Kıyaslanması.....	217
4.3	CBR Deneylerine ait Bulguların Değerlendirilmesi.....	223
4.3.1	UK Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular.....	223
4.3.2	YFC Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular.....	225
4.3.3	UY Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular.....	228
4.3.4	AAÇ Eklenmiş UK Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular	231
4.3.5	AAÇ Eklenmiş YFC Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular	233
4.3.6	AAÇ Eklenmiş UY Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular	236
4.3.7	CBR Deneylerinin Kendi İçerisinde Kıyaslanması.....	239
4.4	Model Yükleme Deneylerine ait Bulguların Değerlendirilmesi.....	245
4.4.1	Zayıf Zemin Durumuna ait Bulgular (Seri I).....	246
4.4.2	Güçlendirilmemiş Dolgu Durumuna ait Bulgular (Seri II).....	248
4.4.3	Geotekstil Ayırıcı Kullanılmış Dolgu Durumuna ait Bulgular (Seri III)	250

4.4.4	YFC-AAÇ Katkılı Dolgu Durumuna ait Bulgular (Seri IV).....	252
4.4.5	Geogridle Güçlendirilmiş Dolgu Durumuna ait Bulgular (Seri V)....	254
4.4.6	YFC-AAÇ Katkılı Geogridle Güçlendirilmiş Dolgu Durumuna ait Bulgular (Seri VI).....	256
4.4.7	Model Yükleme Deneylerinin Kendi İçerisinde Kıyaslanması.....	259
4.5	Serbest Basınç Deneylerinin Farklı Çalışmalar ile Kıyaslanması.....	265
4.6	CBR Deneylerinin Farklı Çalışmalar ile Kıyaslanması.....	269
4.7	Model Yükleme Deneylerinin Farklı Çalışmalar ile Kıyaslanması.....	272
4.8	Model Yükleme Deneyleri için Analitik Çözümler.....	275
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	280
5.1	Modifiye Proktor Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar.....	280
5.2	Serbest Basınç Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar.....	281
5.3	CBR Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar.....	283
5.4	Model Yükleme Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar.....	284
5.5	Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler.....	287
6.	KAYNAKLAR	289
	ÖZGEÇMİŞ	310

SİMGELER ve KISALTMALAR

γ	Birim hacim ağırlık
γ_k	Kuru birim hacim ağırlık
γ_{kmaks}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_s	Dane birim hacim ağırlığı
γ_t, γ_1	Üst tabaka birim hacim ağırlık
γ_b, γ_2	Alt tabaka birim hacim ağırlık
φ	İçsel sürtünme açısı
δ	Toplam zemin itki basıncının yatayla yaptığı açı
β	Yükü yayma açısı
μ	Ara yüzey sürtünme katsayısı
ω	Su içeriği
$\omega_{AAÇ}$	Alkali aktivatör içeriği
ω_{opt}	Optimum su içeriği
$\omega_{optAAÇ}$	Optimum alkali aktivatör içeriği
ν	Poisson oranı
ϵ	Birim şekil değiştirme (%)
ϵ_{cr}	Serbest basınç mukavemeti değerindeki birim şekil değiştirme (%)
σ	Normal basınç
%*UK	CDW içerisinde ağırlıkça %* UK eklenmiş test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)
%*UY	CDW içerisine ağırlıkça %* UY eklenmiş test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)
%*YFC	CDW içerisine ağırlıkça %* YFC eklenmiş test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)
%*UK-*g	CDW içerisine ağırlıkça %* UK eklenmiş ve * gün kür edilmiş test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)
%*UY-*g	CDW içerisine ağırlıkça %* UY eklenmiş ve * gün kür edilmiş test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)
%*YFC-*g	CDW içerisine ağırlıkça %* YFC eklenmiş ve * gün kür edilmiş test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)
%*UK-*g-AAÇ	CDW içerisine ağırlıkça AAÇ katkılı %* UK eklenmiş ve * gün kür edilmiş test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)
%*UY-*g-AAÇ	CDW içerisine ağırlıkça AAÇ katkılı %* UY eklenmiş ve * gün kür edilmiş test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)
%*YFC-*g-AAÇ	CDW içerisine ağırlıkça AAÇ katkılı %* YFC eklenmiş ve * gün kür edilmiş test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)
%*UK (AAÇ)	CDW içerisine ağırlıkça %* UK eklenmiş ve AAÇ katılmış test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)
%*UY (AAÇ)	CDW içerisine ağırlıkça %* UY eklenmiş ve AAÇ katılmış test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)

%*YFC (AAÇ)	CDW içerisine ağırlıkça %* YFC eklenmiş ve AAÇ katılmış test numunesi (* bir doğal sayı değerini temsil etmektedir)
AAÇ	Alkali aktivatör çözeltisi
B	Temel genişliği
BCR	Taşıma kapasitesi oranı
BCR _{CBR}	CBR deneyleri için taşıma kapasitesi oranı
BCR _{MYD}	Model yükleme deneyleri için taşıma kapasitesi oranı
BCR _{UCS}	Serbest basınç deneyleri için taşıma kapasitesi oranı
c	Kohezyon
c _u	Drenajsız kayma mukavemeti
C _c	Eğrilik katsayısı
C _u	Üniformluk katsayısı
CB	Geri dönüşümlü tuğla
CBR	Kaliforniya taşıma gücü oranı
CBR _u	BCR _{CBR} değerinin hesaplanmak istendiği deneyin CBR değeri
CBR _o	Su ile hazırlanan CDW test numunesinin CBR değeridir.
CDW	İnşaat ve yıkıntı atığı malzeme
CDW-*g	* gün kür edilmiş CDW test numunesi
D	Temel çapı
D ₁₀	Efektif dane çapı
D ₃₀	Granülometre eğrisinde %30'a karşılık gelen dane çapı
D ₆₀	Granülometre eğrisinde %60'a karşılık gelen dane çapı
D _r	Sıklık derecesi
E	Elastisite modülü
f _c	Zemin-donatı ara yüzey kohezyonunun zemin kohezyonuna oranı
FWDT	Ağırlık düşürme deneyi
GS	Güvenlik sayısı
G _s	Özgül yoğunluk
H	Dolgu tabakası kalınlığı
K ₁ , K ₂	Temel şekil katsayıları
L	Temel uzunluğu
LA	Los Angeles aşınma yüzdesi
LL	Likit limit
LVDT	Deplasman ölçer
NA	Doğal zemin
N _c , N _q , N _γ	Taşıma gücü katsayıları
PI	Plastisite indeksi
PL	Plastik limit
Q	Yük
q	Gerilme
q _{uo}	Nihai taşıma kapasitesi (zayıf zemin durumunda)
q _{ur}	Nihai taşıma kapasitesi (güçlendirilmiş zemin durumunda)
q _u	Nihai taşıma kapasitesi
q _{uUCS}	Serbest basınç mukavemeti
q _{uUCSo}	Su ile hazırlanan CDW test numunesinin serbest basınç mukavemeti
R _a	Bitüm yüzdesi
R _b	Tuğla, kâgir, fayans yüzdesi
R _c	Beton ve beton ürünleri yüzdesi

R_g	Cam yüzdesi
R_M	Esneklik modülü
R_s	Zemin yüzdesi
R_u	Doğal agrega yüzdesi
RAP	Geri dönüşümlü asfalt kaplama
RCA	Geri dönüşümlü beton agrega
s	Deplasman (oturma)
s/D	Deplasman oranı (%)
u	Geogrid yerleştirme derinliği
UK	Uçucu kül
UY	Uçucu kül ile yüksek fırın cürufunun kütlece yarı yarıya karışımı
YFC	Yüksek fırın cürufu
Yİ	Yassılık indeksi



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Bazı taş ocağı görselleri: a) Kuzey ormanları Göktürk kesimi (Anonim, 2019a), b) Maçka/Trabzon (Anonim, 2019b), c) Kocadağ/Samsun (Anonim, 2019c), d) Saros Körfezi/Edirne (Anonim, 2019d).....	2
Şekil 2.1.	Dünya genelinde bazı ülkelere ait CDW yönelimi (The Cement Sustainability Initiative, 2009).....	14
Şekil 2.2.	Agrega üretimi (ülkeye ve agrega üretim türüne göre, milyon ton cinsinden) (Anonim, 2019e).....	16
Şekil 2.3.	CDW'nin çeşitli kullanım alanları; 1-Beton yol, 2-Bitümlü yol, 3-Hidrolik bağlayıcı yol, 4-Zemin iyileştirme, 5-Toprak işleri (set), 6-Toprak işleri (kesici), 7-Yüzeysel temeller, 8- Derin temeller, 9-Kamu hizmetleri, 10-Yolların bakımı ve yenilenmesi, 11-Beton altyapılar, 12-Beton yapılar, 13-Binalar (endüstriyel), 14-Binalar (konut) (The Cement Sustainability Initiative, 2009).....	20
Şekil 2.4.	Tipik bir CDW geri dönüşüm tesisi sistemi (The Cement Sustainability Initiative, 2009).....	21
Şekil 2.5.	CDW geri dönüşüm tesisi genel görünümü (Karaca, 2012).....	22
Şekil 2.6.	Odayeri/İstanbul düzenli CDW depolama sahası (Karaca, 2012).....	22
Şekil 2.7.	CDW'nin geçici biriktirilmesi (Karaca, 2012).....	23
Şekil 2.8.	CDW'nin eleğe alınması (solda) ve CDW'den demirin ayrıştırılması (Karaca, 2012).....	23
Şekil 2.9.	CDW'nin farklı elek gruplarına ayrılması (Karaca, 2012).....	23
Şekil 2.10.	CDW'nin geri dönüşümü sonucunda elde edilen bazı ürünler (Karaca, 2012).....	24
Şekil 2.11.	Puzolanların detaylı bir sınıflandırma örneği (Massazza, 1989).	27
Şekil 2.12.	İngiltere oluşan uçucu küllerin kullanım alanları (Aruntaş, 2006).....	42
Şekil 2.13.	Zemin stabilizasyonu teknikleri (Uzuner, 2016b).....	45
Şekil 2.14.	Kompaksiyon öncesi ve sonrası durumu (DeJong-Hughes, 2001).....	48
Şekil 2.15.	Yüzeysel kompaksiyon için kullanılan çeşitli sıkıştırma araçları (Anonim, 2019f).....	50
Şekil 2.16.	Dinamik kompaksiyon uygulaması (Anonim, 2019g).....	50
Şekil 2.17.	Bazı drenaj yöntemleri (ERA, 2016; Anonim, 2019h).....	52
Şekil 2.18.	Vibrokanat probunun (tjinin) ayrıntıları (Çetin, 2019).....	55
Şekil 2.19.	Vibrokompaksiyon yönteminin uygulama aşamaları (Bauer Maschinen GmbH, 2012).....	57
Şekil 2.20.	Bulamaç yöntemiyle fore kazık inşası (Arıoğlu vd., 2007).....	60
Şekil 2.21.	Derin karıştırma kolonunun inşası aşamaları (Anonim, 2019i)....	62
Şekil 2.22.	Taş kolonunun inşası aşamaları (Anonim, 2019j).....	63
Şekil 2.23.	Jet Grout uygulamasının genel olarak aşamaları (Anonim, 2019k).....	64
Şekil 2.24.	Önyükleme yönteminin düşey drenler ile birlikte kullanımı (Gofar ve Mohamed, 2008).....	66

Şekil 2.25.	Zeminde elektro-osmoz olayı (Briaud, 2013).....	67
Şekil 2.26.	Üç düzlemlili (solda) ve iki düzlemlili (sağda) geonet (Yarahmadi vd., 2017).....	77
Şekil 2.27.	Geomembran uygulaması (Anonim, 2019m).....	78
Şekil 2.28.	Geokompozit çeşitleri (Anonim, 2019n).....	79
Şekil 2.29.	Geocell'in uygulama örneği (Anonim, 2019o).....	79
Şekil 2.30.	Dokunmuş (altta) ve dokunmamış (üstte) geotekstiller (Anonim, 2019p)	81
Şekil 2.31.	Geogridin bileşenleri (Stadler, 2001).....	82
Şekil 2.32.	Çift eksenli, üç eksenli ve tek eksenli geogridler (soldan sağa) (Anonim, 2019q).....	83
Şekil 2.33.	Zemin daneleri ve geogrid arasında kenetlenme mekanizması (Wrigley, 1989)	83
Şekil 2.34.	Yanal sınırlandırma etkisi (Ok, 2018).....	84
Şekil 2.35.	Gerilmeyi yayma etkisi (Ok, 2018).....	85
Şekil 2.36.	Membran etkisi (Ok, 2018).....	85
Şekil 2.37.	Zeminde kırılma modelleri (Örnek, 2009).....	87
Şekil 2.38.	Terzagi taşıma gücü teorisi (Örnek, 2009).....	88
Şekil 2.39.	Rijit bir temelde meydana gelen oturma ve basınç dağılımı (Örnek, 2009).....	90
Şekil 2.40.	Alt tabakada zayıf (kil) zeminin üst tabaka ise güçlü (sıkı kum) zeminin bulunduğu tabakalı durumlarda yenilme yüzeyi (Ok, 2018).....	92
Şekil 2.41.	Yükü yayma modeli (Ok, 2018).....	94
Şekil 2.42.	Geosentetik ile güçlendirilmiş zeminlerde göçme mekanizmaları (Biquet ve Lee, 1975).....	96
Şekil 2.43.	Geosentetikler ile güçlendirilmiş zeminlerde çeşitli göçme mekanizmaları (Wayne vd., 1998).....	98
Şekil 2.44.	Geosentetikler ile güçlendirilmiş zeminlerde tipik göçme mekanizması (Demir, 2011).....	99
Şekil 3.1.	Osmaniye ili Düziçi ilçesinde bulunan İl Özel İdaresi Binası'nın yıkılmadan önceki hali (Ok ve Demir, 2018).....	127
Şekil 3.2.	İl özel idaresi binasının yıkılması işlemi (Ok ve Demir, 2018)...	128
Şekil 3.3.	Molozların konkasöre yüklenmesi ve kırılması işlemi (Ok ve Demir, 2018).....	129
Şekil 3.4.	Konkasörde kırılma işlemi sonucu oluşan 0-20 mm aralığında dane çapına sahip CDW.....	129
Şekil 3.5.	CDW'nin granülometri eğrisi.....	130
Şekil 3.6.	CDW içinde bulunan malzemeler: a) yüzen x malzemesi, b) batan x malzemesi, c) cam, d) tuğla, e) beton, f) agrega (Ok ve Demir, 2018).....	131
Şekil 3.7.	CDW'ye ait kompaksiyon eğrisi.....	132
Şekil 3.8.	CDW'nin CBR deneyi sonucu oluşan yük-deformasyon eğrisi..	132
Şekil 3.9.	CDW'nin modifiye proktor deneyi öncesi ve sonrası gradasyon değişimi.....	133
Şekil 3.10.	Temin edilen kohezyonlu zemin numunesi ve çeneli kırıcı	135
Şekil 3.11.	Kohezyonlu zeminin çeneli kırıcı ile kırıldıktan sonraki hali.....	135
Şekil 3.12.	Kohezyonlu zemin üzerinde yıkamalı elek analizi (a, b) ve hidrometre (c) deneyleri.....	136
Şekil 3.13.	Kohezyonlu zeminin granülometri eğrisi.....	136

Şekil 3.14.	Kohezyonlu zemin üzerinde gerçekleştirilen kıvam limitleri deneyleri.....	137
Şekil 3.15.	Kohezyonlu zemin üzerinde gerçekleştirilen standart proktor deneyi.....	138
Şekil 3.16.	Kohezyonlu zeminin standart proktor deneyi sonucu oluşan kompaksiyon eğrisi.....	138
Şekil 3.17.	Kohezyonlu zeminde CBR deneyinin gerçekleştirilmesi.....	139
Şekil 3.18.	CBR deneyinde oluşan kohezyonlu zeminin farklı su içeriklerindeki yük-deformasyon davranışı.....	139
Şekil 3.19.	Kohezyonlu zeminin su içeriği ile CBR değeri ilişkisi.....	140
Şekil 3.20.	Kohezyonlu zeminde serbest basınç deneyi.....	141
Şekil 3.21.	Kohezyonlu zeminin farklı su içeriklerinde serbest basınç deneyleri sonucu oluşan eksenel gerilme-birim şekil değiştirme davranışı.....	141
Şekil 3.22.	Kohezyonlu zeminin su içeriği-drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi.....	142
Şekil 3.23.	El tipi vane ve el tipi penetrometre aletleri ile kohezyonlu zeminin drenajsız kayma mukavemetinin belirlenmesi.....	142
Şekil 3.24.	Serbest basınç (UCS), el tipi vane ve el tipi penetrometre deneyleri sonucu elde edilen farklı su içeriklerindeki drenajsız kayma mukavemeti değerleri.....	143
Şekil 3.25.	Deneyisel çalışmalarda kullanılan UK (solda) ve YFC (sağda)...	144
Şekil 3.26.	Tez çalışması kapsamında kullanılan puzolanların SEM görüntüleri; a) UK, b) YFC, c) UY.....	145
Şekil 3.27.	AAÇ'nin hazırlanması.....	146
Şekil 3.28.	Deneyisel çalışmalarda kullanılan geotekstil.....	147
Şekil 3.29.	Deneyisel çalışmalarda kullanılan geogrid.....	148
Şekil 3.30.	Modifiye proktor deneyinde kullanılan temel aletler.....	149
Şekil 3.31.	Serbest basınç deneyinde kullanılan bazı temel aletler.....	150
Şekil 3.32.	Düşük yük kapasiteli serbest basınç sistemi.....	151
Şekil 3.33.	Büyük yük kapasiteli serbest basınç sistemi.....	151
Şekil 3.34.	Düşük yük kapasiteli serbest basınç sisteminin yük hücresi (solda) ve deplasman ölçer (mm) sensörlerinin kalibrasyon eğrileri.....	152
Şekil 3.35.	Büyük yük kapasiteli serbest basınç sisteminin yük hücresi (solda) ve deplasman ölçer (mm) sensörlerinin kalibrasyon eğrileri.....	152
Şekil 3.36.	Model yükleme deney sistemi genel görünümü.....	154
Şekil 3.37.	Model yükleme deney düzeneğinin şematik çizimi.....	154
Şekil 3.38.	Yükleme motoru (solda) ve yük kontrol paneli (sağda).....	155
Şekil 3.39.	Model yükleme deneyinde kullanılan rijit deney tankı.....	156
Şekil 3.40.	Model yükleme deneyinde kullanılan model temel.....	156
Şekil 3.41.	Model yükleme deneylerinde kullanılan düşük (solda) ve büyük (sağda) yük kapasiteli yük hücreleri.....	157
Şekil 3.42.	Model yükleme deneylerinde kullanılan düşük (solda) ve büyük (sağda) yük kapasiteli yük hücrelerinin kalibrasyon eğrileri.....	157
Şekil 3.43.	Model yükleme deneyinde kullanılan deplasman ölçer (LVDT)	158
Şekil 3.44.	Model yükleme deneyinde kullanılan deplasman ölçerlerin kalibrasyon eğrileri.....	158

Şekil 3.45.	Model yükleme deneylerinde kullanılan basınç ölçer.....	159
Şekil 3.46.	Model yükleme deneylerinde kullanılan bilgisayar yazılımı ve veri toplama ünitesi.....	159
Şekil 3.47.	Zayıf zeminleri sıkıştırmak için kullanılan sıkıştırma ekipmanı.	160
Şekil 3.48.	Dolgu oluşturmak için kullanılan sıkıştırma ekipmanları.....	160
Şekil 3.49.	Zemin numunelerinin deneylerden önce etüvde kurutulması....	161
Şekil 3.50.	Modifiye proktor deneyi için hazırlanan numunelerin karıştırılması.....	162
Şekil 3.51.	Modifiye proktor moldunun boyutlarının belirlenmesi.....	162
Şekil 3.52.	Zemin numunesinin modifiye proktor molduna yerleştirilmesi ve sıkıştırılması.....	163
Şekil 3.53.	Modifiye proktor moldunun üst yüzeyinin düzeltilmesi ve kütlelerin ölçülmesi.....	163
Şekil 3.54.	CDW'nin ve puzolan katkının kütlelerinin belirlenmesi.....	166
Şekil 3.55.	Serbest basınç deneyi için hazırlanmış numune.....	166
Şekil 3.56.	Serbest basınç moldunun boyutlarının belirlenmesi.....	167
Şekil 3.57.	Serbest basınç moldunun yağlanması.....	167
Şekil 3.58.	Zeminin mold içerisinde sıkıştırılması (soldaki) ve moldun deney sonunda yakası çıkartılarak üst yüzeyinin düzeltilmesi (sağdaki).....	168
Şekil 3.59.	Mold içerisinde çıkartılmış serbest basınç test numunesi.....	168
Şekil 3.60.	Düşük kapasiteli yükleme sisteminde yapılan bir serbest basınç deneyinin ilk ve son anı.....	169
Şekil 3.61.	Büyük kapasiteli yükleme sisteminde yapılan bir serbest basınç deneyinin ilk ve son anı.....	169
Şekil 3.62.	Düşük kapasiteli yükleme sisteminde yapılan bir CBR deneyi...	172
Şekil 3.63.	Büyük kapasiteli yükleme sisteminde yapılan bir CBR deneyi...	173
Şekil 3.64.	Etüv kurusu numunelerin kütlelerinin belirlenmesi.....	175
Şekil 3.65.	Etüv kurusu numunelerin karıştırılması ve AAÇ eklenmesi.....	175
Şekil 3.66.	Etüv kurusu numunelerin AAÇ ile karıştırılması.....	175
Şekil 3.67.	Rijit deney tankının yağlanması.....	176
Şekil 3.68.	Rijit deney tankı için gerekli yağ kohezyonlu zemin kütlelerinin ayarlanması (solda) ve su içeriği kontrolü (sağda).....	177
Şekil 3.69.	Kohezyonlu zemin tabakalarının sıkıştırılması.....	177
Şekil 3.70.	Kohezyonlu zemin tabakasının sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra vane (solda) ve penetrometre (sağda) deneylerinin gerçekleştirilmesi.....	177
Şekil 3.71.	Tabakanın bir sonraki tabaka ile kenetlenmesi için çizilmesi.....	178
Şekil 3.72.	Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra kohezyonlu zemin yüzeyinin düzgünlüğünün kontrol edilmesi.....	178
Şekil 3.73.	Dolgu tabakalarının sıkıştırılması işlemleri.....	180
Şekil 3.74.	Geotekstil yerleştirilmesi ve üzerine dolgu malzemesinin dökülmesi.....	180
Şekil 3.75.	Geogridin yerleştirilmesi ve üzerine dolgu malzemesinin dökülmesi.....	181
Şekil 3.76.	Basınç ölçerin dolgu içerisine yerleştirilmesi.....	182
Şekil 3.77.	Zayıf zemin ortamı üzerinde yapılan model yükleme deneyinden sonra oluşan görüntü.....	182
Şekil 3.78.	Dolgu üzerinde yapılan model yükleme deneyinden sonra oluşan görüntü.....	183

Şekil 3.79.	Model yükleme deneylerinde deney serilerine ait kesit görüntüleri.....	187
Şekil 4.1.	UK katkılı CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri.....	189
Şekil 4.2.	YFC katkılı CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri.....	190
Şekil 4.3.	UY katkılı CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri.....	191
Şekil 4.4.	AAÇ eklenmiş UK katkılı CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri.....	192
Şekil 4.5.	UK için hem su ile hem de AAÇ ile yapılan modifiye proktor deney sonuçları.....	193
Şekil 4.6.	AAÇ eklenmiş YFC katkılı CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri	194
Şekil 4.7.	YFC için hem su ile hem de AAÇ ile yapılan modifiye proktor deney sonuçları.....	195
Şekil 4.8.	AAÇ eklenmiş UY katkılı CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri	196
Şekil 4.9.	UY için hem su ile hem de AAÇ ile yapılan modifiye proktor deney sonuçları.....	197
Şekil 4.10.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri	198
Şekil 4.11.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri	199
Şekil 4.12.	CDW-28g test numunesine ait SEM görüntüleri.....	200
Şekil 4.13.	%5UK-28g test numunesine ait SEM görüntüleri.....	200
Şekil 4.14.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri	201
Şekil 4.15.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri	202
Şekil 4.16.	%20YFC-28g test numunesine ait SEM görüntüleri.....	203
Şekil 4.17.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri.....	204
Şekil 4.18.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri.....	205
Şekil 4.19.	%15UY-28g test numunesine ait SEM görüntüleri.....	206
Şekil 4.20.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri.....	207
Şekil 4.21.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri.....	209
Şekil 4.22.	CDW-28g-AAÇ test numunesine ait SEM görüntüleri.....	210
Şekil 4.23.	%15UK-28g-AAÇ test numunesine ait SEM görüntüleri.....	211
Şekil 4.24.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri.....	211

Şekil 4.25.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri.....	213
Şekil 4.26.	%20YFC-28g-AAÇ test numunesine ait SEM görüntüleri.....	214
Şekil 4.27.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri.....	215
Şekil 4.28.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri.....	216
Şekil 4.29.	%20UY-28g-AAÇ test numunesine ait SEM görüntüleri.....	217
Şekil 4.30.	Seri C, Seri D ve Seri E serbest basınç deneyleri için BCR _{UCS} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişimi.....	219
Şekil 4.31.	Seri F, Seri G ve Seri H serbest basınç deneyleri için BCR _{UCS} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişimi.....	220
Şekil 4.32.	7 gün kür sonunda yapılan tüm serbest basınç deneyleri için BCR _{UCS} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişimi...	222
Şekil 4.33.	28 gün kür sonunda yapılan tüm serbest basınç deneyleri için BCR _{UCS} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişimi...	222
Şekil 4.34.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	223
Şekil 4.35.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	224
Şekil 4.36.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	226
Şekil 4.37.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	227
Şekil 4.38.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	228
Şekil 4.39.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	230
Şekil 4.40.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	231
Şekil 4.41.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	232
Şekil 4.42.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	234
Şekil 4.43.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	235

Şekil 4.44.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	237
Şekil 4.45.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri.....	238
Şekil 4.46.	Seri C, Seri D ve Seri E CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişimi.....	240
Şekil 4.47.	Seri F, Seri G ve Seri H CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişimi.....	242
Şekil 4.48.	7 gün kür sonunda yapılan tüm CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişimi.....	244
Şekil 4.49.	28 gün kür sonunda yapılan tüm CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişimi.....	244
Şekil 4.50.	Seri I deneyleri için mukavemet ve su içeriği kontrolü.....	247
Şekil 4.51.	Zayıf zemin durumu için (Seri I) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri.....	247
Şekil 4.52.	Seri II deneyleri için mukavemet ve su içeriği kontrolü.....	248
Şekil 4.53.	Güçlendirilmemiş dolgu durumu için (Seri II) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri.....	249
Şekil 4.54.	Seri III deneyleri için mukavemet ve su içeriği kontrolü.....	251
Şekil 4.55.	Geotekstil ayırıcı kullanılmış dolgu durumu için (Seri III) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri.....	251
Şekil 4.56.	Seri IV deneyleri için mukavemet, su içeriği ve AAÇ içeriği kontrolü.....	253
Şekil 4.57.	YFC-AAÇ katkılı dolgu durumu için (Seri IV) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri.....	254
Şekil 4.58.	Seri V deneyleri için mukavemet ve su içeriği kontrolü.....	255
Şekil 4.59.	Geogrid ile güçlendirilmiş dolgu durumu için (Seri V) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri.....	256
Şekil 4.60.	Seri VI deneyleri için mukavemet, su içeriği ve AAÇ içeriği kontrolü.....	257
Şekil 4.61.	YFC-AAÇ katkılı geogrid ile güçlendirilmiş dolgu durumu için (Seri VI) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri.....	258
Şekil 4.62.	Seri II ve Seri III deneyleri için $BCR_{MYD-s/D}$ ilişkisi.....	260
Şekil 4.63.	Geotekstilin deneyden sonra çıkartılmasıyla kil zemin yüzeyinde oluşan görüntü.....	261
Şekil 4.64.	Seri III ve Seri IV deneyleri için $BCR_{MYD-s/D}$ ilişkisi.....	262
Şekil 4.65.	Seri III ve Seri V deneyleri için $BCR_{MYD-s/D}$ ilişkisi.....	263
Şekil 4.66.	Seri III, Seri IV ve Seri VI deneyleri için $BCR_{MYD-s/D}$ ilişkisi.....	264
Şekil 4.67.	Tüm deney serileri için $BCR_{MYD-s/D}$ ilişkisi.....	265
Şekil 4.68.	AAÇ eklenmiş UK katkılı 7 gün kür edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin Arulrajah vd. (2016b) ve TxDOT (2013) ile kıyaslanması.....	266
Şekil 4.69.	AAÇ eklenmiş %10 puzolan katkılı 7 gün kür edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin Arulrajah vd. (2016a), TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) ile kıyaslanması...	267

Şekil 4.70.	7 günlük kür süresine tabi tutulmuş test numunelerinin serbest basınç mukavemetlerinin TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) tarafından önerilen değerlerle kıyaslanması.....	268
Şekil 4.71.	7 gün kür edilmiş farklı test numunelerinin CBR değerleri ile literatürdeki doğal (NA) ve CDW numunelerinin CBR değerlerinin karşılaştırılması.....	270
Şekil 4.72.	Seri III model yükleme deneylerinin Ok (2018) tarafından yapılan çalışmalar ile kıyaslanması.....	272
Şekil 4.73.	Seri IV model yükleme deneylerinin Ok (2018) tarafından yapılan çalışmalar ile kıyaslanması.....	273
Şekil 4.74.	Seri V model yükleme deneylerinin Ok (2018) tarafından yapılan çalışmalar ile kıyaslanması.....	273
Şekil 4.75.	Seri VI model yükleme deneylerinin Ok (2018) tarafından yapılan çalışmalar ile kıyaslanması.....	274
Şekil 4.76.	Zayıf zemin için hesaplanan teorik çözümler ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	275
Şekil 4.77.	CDW dolgusu için teorik çözümler ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	276
Şekil 4.78.	Yükü yayma modeli ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerlerinin model yükleme deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	278
Şekil 4.79.	Ağırlık faktörü yönteminin Terzaghi ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerlerinin model yükleme deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	279
Şekil 4.80.	Ağırlık faktörü yönteminin Vesic ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerlerinin model yükleme deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	279

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Farklı katı atık türleri ve kaynakları ve bunların inşaat malzemeleri için geri dönüşüm ve yeniden kullanım potansiyelleri (Pappu vd., 2007).....	10
Çizelge 2.2.	Başlıca katı atıklar ve inşaat malzemeleri üretiminde kullanım alanları (Safiuddin vd., 2010).....	10
Çizelge 2.3.	Bazı ülkelerde oluşan CDW miktarları ve oluşan bu atığın tekrar kullanım oranları (Vieira ve Pereira, 2015b).....	15
Çizelge 2.4.	CDW kullanılarak yapılan bir yol inşaatında enerji tasarrufu örneği.....	18
Çizelge 2.5.	Puzolanların basitçe sınıflandırılması (Erdoğan, 2003).....	26
Çizelge 2.6.	Puzolanların yapısal ve yapısal olmayan alanlarda kullanımları (Krivenko, 1997).....	41
Çizelge 2.7.	Uçucu küllerin kullanıldığı çeşitli alanlar (Aruntaş, 2006)....	42
Çizelge 2.8.	Yüksek fırın cüruflarının uygulama örnekleri (Euroslag ve Eurofer, 2012).....	43
Çizelge 2.9.	Farklı zemin türleri için farklı stabilizasyon metotları (Hunt, 1986; Hunt, 1994).....	46
Çizelge 2.10.	Farklı amaçlar için farklı stabilizasyon metotları (U. S. Army Corps. of Eng., 2003).....	47
Çizelge 2.11.	Geosentetiklerin türleri ve özellikleri (Ghafoori ve Sharbaf, 2016).....	75
Çizelge 2.12.	İşlevlerine göre geosentetikler (Anonim, 2019l).....	76
Çizelge 3.1.	Alınan karot numunelerinin basınç mukavemeti değerleri (Ok ve Demir, 2018).....	127
Çizelge 3.2.	CDW içerisinde bulunan malzemelerin oranları.....	130
Çizelge 3.3.	CDW malzemesinin özellikleri.....	134
Çizelge 3.4.	Kohezyonlu zeminin özellikleri.....	143
Çizelge 3.5.	Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu külün (Kıma, 2019) ve yüksek fırın cürufunun özellikleri (Özcan, 2018).....	145
Çizelge 3.6.	NaOH'ın özellikleri.....	146
Çizelge 3.7.	Geotekstilin özellikleri.....	147
Çizelge 3.8.	Geogridin özellikleri.....	148
Çizelge 3.9.	Modifiye proktor deneylerine ait deneysel çalışma programı.	184
Çizelge 3.10.	Serbest basınç ve CBR deneylerine ait deneysel çalışma programı.....	185
Çizelge 3.11.	Model yükleme deneylerine ait deneysel çalışma programı...	186
Çizelge 4.1.	UK katkılı CDW numunelerinin ω_{opt} ve γ_{kmaks} değerleri.....	189
Çizelge 4.2.	YFC katkılı CDW numunelerinin ω_{opt} ve γ_{kmaks} değerleri.....	190
Çizelge 4.3.	UY katkılı CDW numunelerinin ω_{opt} ve γ_{kmaks} değerleri.....	191
Çizelge 4.4.	AAÇ eklenmiş UK katkılı CDW numunelerinin $\omega_{optAAÇ}$ ve γ_{kmaks} değerleri.....	193
Çizelge 4.5.	AAÇ eklenmiş YFC katkılı CDW numunelerinin $\omega_{optAAÇ}$ ve γ_{kmaks} değerleri.....	194
Çizelge 4.6.	AAÇ eklenmiş UY katkılı CDW numunelerinin $\omega_{optAAÇ}$ ve γ_{kmaks} değerleri.....	196

Çizelge 4.7.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	198
Çizelge 4.8.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	199
Çizelge 4.9.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	202
Çizelge 4.10.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	203
Çizelge 4.11.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	205
Çizelge 4.12.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	206
Çizelge 4.13.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	208
Çizelge 4.14.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	209
Çizelge 4.15.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	212
Çizelge 4.16.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	213
Çizelge 4.17.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	215
Çizelge 4.18.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri.....	216
Çizelge 4.19.	Seri C, Seri D ve Seri E serbest basınç deneyleri için BCR_{UCS} değerleri.....	219
Çizelge 4.20.	Seri F, Seri G ve Seri H serbest basınç deneyleri için BCR_{UCS} değerleri.....	221
Çizelge 4.21.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	224
Çizelge 4.22.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	225
Çizelge 4.23.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	226
Çizelge 4.24.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	227
Çizelge 4.25.	7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	229

Çizelge 4.26.	28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	230
Çizelge 4.27.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	232
Çizelge 4.28.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	233
Çizelge 4.29.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	234
Çizelge 4.30.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	235
Çizelge 4.31.	7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	237
Çizelge 4.32.	28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri.....	238
Çizelge 4.33.	Seri C, Seri D ve Seri E CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerleri.....	241
Çizelge 4.34.	Seri C, Seri D ve Seri E CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerleri.....	243
Çizelge 4.35.	Zayıf zemin durumu için (Seri I) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri.....	248
Çizelge 4.36.	Güçlendirilmemiş dolgu durumu için (Seri II) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri...	249
Çizelge 4.37.	Geotekstil ayırıcı kullanılmış dolgu durumu için (Seri III) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri.....	252
Çizelge 4.38.	YFC-AAÇ katkılı dolgu durumu için (Seri IV) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri...	254
Çizelge 4.39.	Geogrid ile güçlendirilmiş dolgu durumu için (Seri V) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri...	256
Çizelge 4.40.	YFC-AAÇ katkılı geogrid ile güçlendirilmiş dolgu durumu için (Seri VI) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri.....	258
Çizelge 4.41.	Seri II deneyleri için hesaplanan BCR_{MYD} değerleri.....	260
Çizelge 4.42.	Seri III deneyleri için hesaplanan BCR_{MYD} değerleri.....	260
Çizelge 4.43.	Seri IV deneyleri için hesaplanan BCR_{MYD} değerleri.....	262
Çizelge 4.44.	Seri V deneyleri için hesaplanan BCR_{MYD} değerleri.....	263
Çizelge 4.45.	Seri VI deneyleri için hesaplanan BCR_{MYD} değerleri.....	264
Çizelge 4.46.	TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) tarafından önerilen serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha büyük değerlere sahip test numuneleri.....	269
Çizelge 4.47.	7 gün kür edilmiş farklı test numunelerinin CBR değerleri ile literatürdeki değerlerin küçükten büyüğe doğru sıralanması..	271

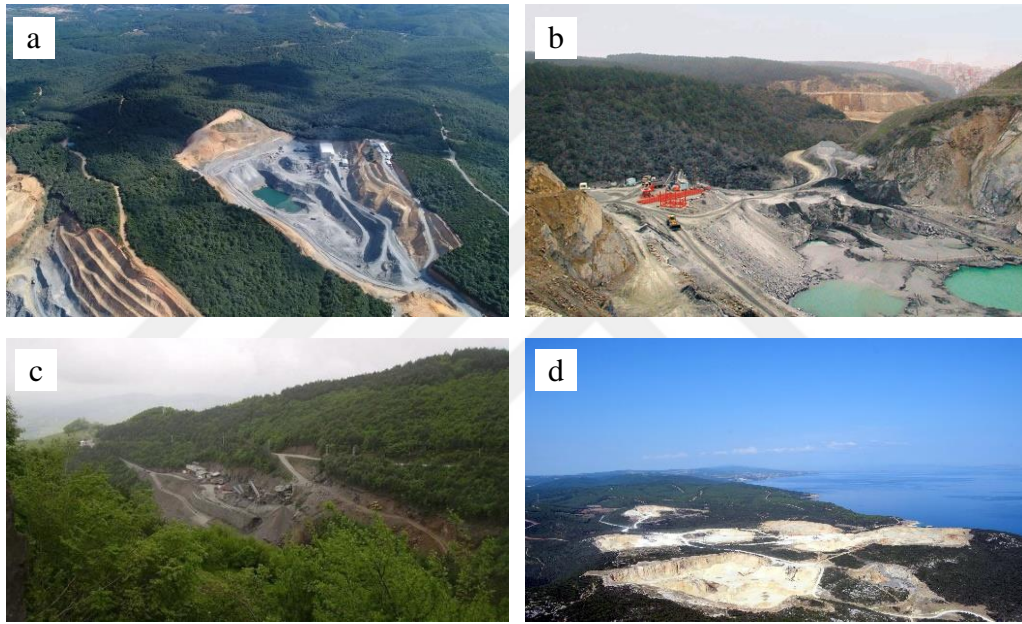
1. GİRİŞ

Taşıma gücü açısından zayıf zemin koşullarının hâkim olduğu arazilerde yapılacak yapıların tasarımı ve inşası mühendisler için genellikle büyük problemler oluşturmaktadır. Bu tür zayıf zemin ortamları üzerine inşa edilecek yapılarda, zeminin taşıma kapasitesinin düşük olması nedeniyle, aşırı oturmalar ya da göçmeler meydana gelebilmektedir. Bu problemin geleneksel çözüm yöntemlerinden bir tanesi zayıf zemin üzerine granüler zemin ile dolgu inşa etmektir. Dolgu yapımı, optimum su içeriğinde bulunan granüler zeminin belirli kalınlıkta tabakalar halinde serilip çeşitli kompaksiyon yöntemleri kullanılarak sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Dolgu yapımı için granüler zemin gereksinimi, inşaat sektörü büyüdükçe artmaktadır. Yüksek kaliteli taş ocağından çıkarılan granüler zeminin azlığı ve bu taş ocaklarından granüler malzemeleri çıkarırken doğaya verilen büyük zararlar, araştırmacıları alternatif ve sürdürülebilir çözümler üretmeye zorlamaktadır. Alternatif ve sürdürülebilir çözümlerden biri inşaat ve yıkıntı atığı (CDW, construction and demolition waste) gibi malzemelerin geleneksel dolgu malzemesi yerine bir alternatif olarak kullanılmasıdır.

Son yıllarda mevcut kaynaklar hızla tüketilerek yüksek miktarlarda atık malzemeler üretilmektedir. Oluşan yüksek miktardaki atıklar ise geleneksel çözüm olarak depolama sahalarında biriktirilmektedir. Bu döngü sonucunda hem ham maddeler tükenmekte hem de atık depolama sahalarında atık biriktirme maliyetleri oldukça artmaktadır. Dünyada genelinde, bu problemi çözmek için, mevcut atıkların geri dönüştürülerek yeniden kullanılması en çok tercih edilen seçeneklerden biri olduğu görülmüştür. Giderek önem kazanmaya başlayan bu çözüm dünya genelinde çeşitli uygulamalar ile gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde, 2017 yılında uygulanmaya başlayan “Sıfır Atık” projesi de bunlardan bir tanesidir. Bu proje ile ülkemiz ekonomisine önemli katkılar sağlanması hedeflenmektedir.

İnşaat sektörü en fazla hammadde tüketen ve en çok atık üreten sektörlerden birisidir. Bu nedenle inşaat sektöründeki en önemli sorunlardan birisi hammadde elde etmek ve oluşan atıkları bertaraf etmektir. Taş ocaklarından elde edilen doğal agregalar, çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan önemli doğal kaynaklardandır. Taş ocağı, özellikle inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmak üzere taş ve benzeri malzemelerin açık ocak madenciliği yoluyla çıkarıldığı madenlere verilen addır. Taş ocaklarından granit, kum taşı, volkanik kayalar, kaolin,

mermer vb. malzemeler çıkartılabilmektedir. Taş ocaklarından çıkarılan doğal agregalar, inşaat sektörünün çok çeşitli alanlarında çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Zayıf zeminleri güçlendirme amaçlı dolgular ile taş kolon gibi zemin ıslahı yöntemlerinde, kara ve demir yolu üst ve alt yapı dolgularında, beton üretiminde ve daha pek çok alanda agregaya ihtiyaç duyulmaktadır. İnşaat sektörünün dünya genelinde çok hızlı büyümesi, bu doğal kaynakların tüketimini de önemli oranda artırmaktadır (Arulrajah vd., 2011). Agregaya tüketimi arttıkça, agregaların çıkarıldığı taş ocaklarına talepte doğru orantılı olarak artmaktadır. Açılan her yeni taş ocağı ise Şekil 1.1’de görüldüğü gibi çevreye ve doğal yaşama büyük zararlar verebilmektedir.



Şekil 1.1. Bazı taş ocağı görselleri: a) Kuzey ormanları Göktürk kesimi (Anonim, 2019a), b) Maçka/Trabzon (Anonim, 2019b), c) Kocadağ/Samsun (Anonim, 2019c), d) Saros Körfezi/Edirne (Anonim, 2019d)

Bilindiği üzere taş ocaklarındaki kaynaklar yenilenebilir değildir. Bu yüzden bir taş ocağının rezervi bittiğinde, yeni bir taş ocağının açılması gerekmektedir. Bu durum böyle devam ettikçe doğaya daha fazla zarar verilecektir. Bu doğal kaynakların sabit bir rezervi olduğundan, bir gün tükenmesi de söz konusu olacaktır. Dünya genelinde, taş ocaklarının çevreye verdiği zararı minimize etmek ve kontrol altında tutmak için, madencilikle ilgili çok sıkı kuralları olan yönetmelikler getirilmiştir. Bahsedilen bu ve buna benzer sebeplerden ötürü taş ocaklarından doğal agrega çıkartılması özellikle ekonomik açıdan iyice zorlaşmıştır (Arulrajah vd., 2011).

İnşaat sektörünün oluşturduğu atıklardan başında CDW gelmektedir. CDW malzemeleri dünya çapındaki depolama sahalarında bulunan atıkların çok önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Yüksek kaliteli taş ocağı agregalarının azalması ya da taş ocağından malzeme üretmenin maliyetinin artması, CDW gibi malzemelerin geleneksel dolgu malzemesi yerine bir alternatif olarak dikkate alınmasına neden olmaktadır. Özellikle, CDW gibi malzemelerin sürdürülebilir kullanımının önemli çevresel faydalar sağlayabileceği düşünülmektedir. CDW malzemeleri katı atıklar grubuna girmekte, bu katı atığın yönetiminde ise geleneksel atık bertaraf hiyerarşisi kullanılabilir. Bu hiyerarşide, sakınma ve kaynaktan azaltma ilk seçenek olup nihai bertaraf yöntemi son çare olarak tercih edilmektedir. CDW malzemeleri, bina, yol, baraj, tünel, köprü vb. alt ve üst yapıların yapımı, tadilatı, tamirata, yıkımı, doğal bir afete maruz kalması vb. sonucu oluşan atıklar olarak tanımlanabilmektedir. CDW heterojen bir karışımdır ve CDW'nin içerdiği malzemeler yapı inşa edilirken kullanılan malzemelerin cinsine bağlı olarak değişim göstermektedir. CDW malzemelerinin depolanması diğer katı atık bertarafına göre daha kolay ve ucuz olabileceği düşünülse de işletme maliyeti, çevresel kaygılar, kanun koyucuların kısıtlamaları ve bu atıkların çok fazla alan kaplaması CDW'nin depolanmasını zorlaştırmaktadır.

Ülkemizde, son yıllarda giderek artan kentsel dönüşüm projelerinden dolayı CDW miktarı da önemli derecede artmıştır. Oluşan bu CDW malzemeleri ise yönetimler tarafından belirlenen katı atık depolama sahalarına depolanması gerekmektedir. CDW'nin büyük hacimler kaplamasından dolayı, hem büyük miktarlarda arazi alanı işgal edecek hem de doğal yaşama zarar verilebilecektir. Bununla birlikte, ülkemizde, depolama maliyetlerinden kaçınmak için boş arazilere CDW malzemelerinin izinsiz bir şekilde döküldüğü de görülmektedir. Bu durum doğal hayata çok daha büyük zararlar verebilecektir.

Avrupa Birliği komisyonu tarafından, 1999 yılında hazırlanmış bir raporda, 350 milyon nüfusa sahip 15 üye ülkenin her yıl ortalama yaklaşık 180 milyon ton CDW ürettiği bildirilmiştir. Bu CDW malzemelerinin ortalama olarak %28'i geri dönüştürülürken, %78'inin ise depolandığı belirtilmiştir. Ülkemizde yaklaşık olarak 19 milyon konutun olduğu düşünülmektedir. Yaklaşık olarak 14 milyon konutun 2000'li yıllardan önce yapıldığı, bu yapıların afet riski yönünden incelenmesi gerektiği düşünülmektedir. Özellikle, bu 14 milyon konuttan yaklaşık olarak 3 milyonunun

1975 yılından önce inşa edildiği, o zaman uygulanan yönetmeliklerin eksikliklerinden ve kontrol mekanizmalarının yetersizliğinden çok büyük deprem riski taşıdığı tahmin edilmektedir. Ayrıca, çok az mühendislik hizmeti almış ve/veya gelişigüzel yapılmış kaçak yapılarda düşünüldüğünde en az 6-7 milyon konutun yıkılıp yeniden yapılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Ülkemizde bu durum göz önüne alınarak kentsel dönüşüm projeleri uygulanmaktadır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, ülkemizde CDW miktarının yıllık 4-5 milyon ton civarında olduğunu belirtmişlerdir. Yürürlüğe giren “Kentsel Dönüşüm Kanunu” ile ilk 3 yılda yıllık 10 milyon ton CDW oluşacağı, geri dönüştürülecek malzeme miktarının ise yıllık 6 milyon ton olacağı bildirilmiştir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2004 yılından yayınlanan “Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği” ile CDW malzemelerinin önce kaynağında azaltılması gerekmektedir. Eğer kaynağından azaltılamıyorsa, ayrı toplanması, tekrar kullanılması ve geri kazanılması gerekliliği vurgusu yapılmaktadır. CDW malzemelerinin kaynağından azaltılması günümüzdeki kentsel dönüşüm projeleri ile imkânsız olacağından bu atıkların tekrar kullanılması ve geri kazanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu konunun öneminden dolayı Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından “Yıkım İşlemleri ile Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği Taslağı” genel görüşe açılmış ve düzenlenme aşamasındadır. Yürürlükte olan yönetmelikte geri kazanılan atıkların, ilgili standartları sağlaması şartı ile orijinal malzemeler ile birlikte veya kendi başına çeşitli uygulamalarda (alt ve üst yapı inşaatlarında, yol dolgusunda, yürüyüş yollarında, beton üretiminde, drenaj çalışmalarında vb.) kullanılabileceği belirtilmiştir. CDW herhangi bir dolgu inşasında kullanılacaksa, mühendislik özelliklerinin çok titiz bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Çünkü bu atıkların mühendislik özellikleri elde edildiği yapıda kullanılan malzemenin çeşidi ile kalitesine ve yapıda bulunduğu bölgeye (kolon, kiriş, döşeme vb.) göre çok büyük değişiklikler gösterebilmektedir.

CDW malzemelerinin potansiyel olarak bir dolgu malzemesi gibi kullanılabileceği görülmüştür. Dolgu yapımı ise genellikle bir zemin ıslahı gibi düşünülebilir. Her zemin ıslahı projesinde olduğu gibi CDW ile dolgu yapmak için de iyi bir mühendislik hizmeti almak gerekmektedir. Dolgu inşaatı ile hem daha sağlam hem de topografik olarak daha düzgün bir yüzeye sahip zemin tabakaları inşa edilebilmektedir. İnşa edilen dolgu kalınlığının fazla olması durumunda ise bu yöntem ekonomik olmayabilmektedir (Mısır, 2008). CDW ile oluşturulmuş dolgular doğal

agrega ile oluşturulmuş dolgulara göre yük altında daha fazla oturma yapacaktır. Bu olumsuzluğu gidererek CDW'nin performansını artırmak için puzolan katkı (Arulrajah vd., 2016a; Arulrajah vd., 2016b) ve geogrid ile güçlendirme (Rahman vd., 2013; Arulrajah vd., 2013) alternatif olarak literatürde bildirilmiştir. Puzolan katkı ve geogrid ile güçlendirme esasen zemin stabilizasyon yöntemleridir. Bu zemin stabilizasyon yöntemleri ile esas amaç CDW malzemelerinin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Son yıllarda zeminlerin özelliklerini iyileştirmek için pek çok araştırma yapılmaktadır. Bunun en önemli sebebi, hızlı nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme gibi etkenlerden ötürü yapılar için uygun bir zemin ortamının bulunmasının güçlüğüdür. İnsanlık tarihinde, yapılan ilk araştırmalarda bitkisel malzemeler zemine katılarak ve zemindeki su uzaklaştırılarak zemin özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Daha sonra araştırmacılar tarafından pek çok zemin ıslahı yöntemi bulunmuştur. Zemin ıslahı yöntemlerinden birisi atık malzemelerle zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Atık halde olan malzemelerin zemin ıslahında kullanılması ile atıkların doğada birikmesi engellenerek hem doğal hayat korunmakta hem de ekonomik bir zemin ıslahı gerçekleşmektedir (Aytekin, 2002). Puzolanlar, zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kullanılacak atık malzemelerden birisidir. Kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olması ya da bağlayıcılık özelliğinin çok az olması puzolan malzemelerin en belirgin özelliğidir. Bu malzemelerin dane boyutları küçültüldüğünde, sulu bir ortamda kalsiyum hidroksitle birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanabilirler (ASTM C 618, 2015). Genel itibari ile puzolanlar, doğal puzolanlar ve yapay puzolanlar olarak iki ana sınıfta incelenmektedir. Yeryüzünde doğal olarak bulunan ve puzolanik özellik gösteren malzemeler doğal puzolan, endüstriyel bir üretim sırasında yan ürün olarak oluşan ve yine puzolanik özellik gösteren malzemeler ise yapay puzolan olarak bilinmektedirler. Pişirilmiş kil, volkanik kül, diatomlu toprak, volkanik tüf vs. doğal puzolanlara; uçucu kül, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu vs. ise yapay puzolanlara örnek olarak verilebilir. Puzolanların zemin stabilizasyon uygulamalarında kullanılması son yıllarda popülerlik kazanmaktadır. Son yıllarda popülerlik kazanan bir diğer zemin ıslahı yöntemi ise geogrid kullanımıdır. Geogridler, yüksek mukavemetli ve düşük sünme özelliğine sahip olan genellikle yüksek yoğunluklu polietilenden üretilen geosentetik malzemelerdir. Zemin ile geogrid donatının birlikte kullanılması ile genellikle bu ikili arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan kalıcı ve sağlam kompozit

malzeme, geogrid ile güçlendirilen zeminde güçlendirme mekanizmasının temelini oluşturmaktadır. Geogrid kullanılmasının amacı, zeminin stabilitesini ve taşıma kapasitesini arttırmak, oturmalar ve yanal deformasyonları azaltmaktır.

Bu çalışmada, yıkılmış bir binadan elde edilmiş CDW malzemesinin granüler dolgu olarak kullanılabilme potansiyeli incelenmiştir. Genellikle, bu tür atık malzemelerin mühendislik özelliklerinin uygun olmaması beklenmektedir. Bu yüzden atık malzeme içine puzolan katkı eklenerek mühendislik özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, CDW ile oluşturulmuş granüler dolgu içine geogrid donatı yerleştirilerek geogridin taşıma gücüne etkisi araştırılmıştır.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı, CDW'nin zayıf zeminlerde dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmaktır. Özellikle kentsel dönüşüm için yıkılan bir binadan elde edilen CDW, beton kalitesinin düşüklüğünden ve yer yer değişkenlik gösterebileceğinden kaliteli bir dolgu malzemesi olamayabileceği düşünülmüştür. Bu nedenle, tez çalışmasının bir diğer amacı CDW ile oluşturulacak granüler dolgunun puzolan ve geogrid donatı ile güçlendirilerek sağlanabilecek avantajları araştırmaktır.

Avrupa komisyonu üretilen atıkların yaklaşık %50'sinden ve tüketilen doğal kaynakların ise yaklaşık %50'sinden inşaat sektörünü sorumlu tutmaktadır (European Commission, 2001). Avrupa genelinde CDW'nin tekrar kullanılma ortalaması yaklaşık olarak %46 olduğu belirtilmiştir (European Commission DG ENV, 2011). Fakat, Avrupa parlamentosunun talimatında belirtildiği üzere bu oranın 2020'ye kadar en az %70 olması gerekmektedir (Directive, E.C., 2008). Atık malzemelerin (CDW, puzolan vb.) tekrar kullanımından dolayı oluşacak ekonomik ve çevresel avantajlar, taş ocaklarının gün geçtikçe tükenmesi, her geçen gün artan atıklarının depolanma ihtiyacı vb. sebepler geri dönüştürme işlemlerinin daha fazla yaygınlaşmasını tetiklemektedir. Ülkemizde, 2012 yılında yürürlüğe giren "Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun" ile riskli alanlarda bulunan pek çok yapının yıkılması planlanmaktadır. Bundan dolayı, son yıllarda çok sayıda "Kentsel Yenileme Projesi" yapılmaktadır. Yıkılacak binalardan oluşacak atıkların değerlendirilmesi hem ekonomik hem de sürdürülebilirlik açısından çok önemlidir. Bu fikirler doğrultusunda, bu çalışmada, CDW'nin kullanılabilirliği gösterilmeye çalışılmıştır.

Tez konusunun amaçlarını gerçekleştirmek için aşağıda belirtilen çalışmalar yapılmıştır:

- a) Osmaniye ili içerisinde bulunan, depreme karşı riskli bir yapı olduğu tespit edildiği için yıkılmasına karar verilen çok katlı betonarme bir yapıdan CDW temin edilmiştir. Öncelikle, bu atık içerisinde bulunan metaller ayrılmış daha sonra uygun gradasyona getirmek için konkasörde kırılmıştır. Heterojen bir karışım olan CDW içerisindeki malzemeler ve bunların oranı saptanmıştır.
- b) Temin edilen CDW malzemesi üzerinde, malzemenin mühendislik özelliklerini belirlemek için çeşitli laboratuvar deneyleri (elek analizi, modifiye proktor, bağıl yoğunluk, su emme, yassılık indeksi, Los Angeles aşınma ve CBR deneyleri) yapılmıştır.
- c) CDW'nin performansını artırmak için puzolan katkı kullanılmıştır. Bunlar uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufudur (YFC). nce UK, sonra YFC daha sonra da uçucu kül-yüksek fırın cürufunun kütlece yarı yarıya karışımı (UY) kütlece %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında CDW içerisine eklenmiştir. Laboratuvar ortamında hazırlanan puzolan ile glendirilmif ve güçlendirilmemiş CDW numuneleri üzerinde mukavemet deneyleri (serbest basınç ve CBR deneyleri) yapılmıştır. Deneyler sonucunda, dayanım açısından en iyi karışım oranı belirlenmiştir. Ayrıca, puzolan eklenen numunelerin daha yüksek dayanım değerlerine ulaşması için, alkali aktivatör çözeltisi de (AA) kullanılmıştır. Serbest basınç ve CBR deneyleri test numunelerinin 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda gerçekleştirilmiştir.
- d) Tabii zeminin taşıma gücünün düşük olduğu durumlarda (yumuşak veya gevşek zemin koşulları), bu zeminler üzerine yapılacak yapılardan dolayı (bina, yol vs.) zeminde aşırı oturma ya da göçme oluşabilmektedir. Bu problem, geleneksel bir çözüm olarak, zemine dolgu yapılması ile çözülmektedir. Bu alışmada, CDW'den inşa edilecek dolgunun performansı araştırılırken güvenli tarafta kalmak adına bu dolgunun zayıf zemin üzerindeki davranışı araştırılmıştır. Bu araştırmayı yapmak için laboratuvar ortamında model yükleme deneyleri yapılmıştır. Model yükleme deneylerinde, zayıf zemin tabakası oluşturulmuş, zerine CDW kullanılarak dolgu inşa edilmiştir. Bu tabakalı zemin sistemi üzerine bir model temel

yerleştirilerek model yükleme (plaka yükleme) deneyleri gerçekleştirilmiştir.

- e) CDW ile inşa edilen dolgunun model yükleme deneylerindeki performansı puzolan ve geogrid güçlendirme ile artırılarak doğal agrega ile oluşturulmuş dolgulardan daha fazla yük taşıyabileceği dşnlmştir. Bu sebeple zayıf zemin üzerine hem puzolan hem de geogrid ile güçlendirilmiş CDW dolguları inşa edilerek, model yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde dolgu kalınlığının etkisi, puzolan katkının etkisi, geogrid donatının etkisi, puzolan ve geogrid güçlendirmenin birlikte kullanılmasının etkisi gibi parametreler araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak güçlendirme için en uygun olabilecek öneriler getirilmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER

İlk olarak, literatürde bahsedilen CDW ile alakalı detaylı bilgilere yer verilmiştir. CDW'nin içeriğinden, dünyada ve ülkemizdeki durumundan, geri dönüştürülme etkisinden, tekrar kullanımından ve geri dönüştürülme işleminden bahsedilmiştir. Daha sonra puzolanlar ile alakalı detaylı açıklamalar yapılmıştır. Puzolanların sınıflandırılması, puzolanik reaksiyon, alkali aktivatörler ve puzolanların kullanım alanları anlatılmıştır. CDW'ye puzolan eklenmesi ve CDW dolgularında geogrid kullanılması zemin stabilizasyon yöntemi olduğundan, zemin stabilizasyonuna ve çeşitlerine dair detaylı bilgilere yer verilerek puzolanların ve geosentetiklerin zemin stabilizasyonundaki yeri açıklanmıştır. Ayrıca, zeminlerin geosentetik ile güçlendirildiği veya güçlendirilmediği durumlar için statik yükler altındaki göçme mekanizmaları ve taşıma gücü kavramları açıklanmıştır. Son olarak, bu tez çalışması ile alakalı literatürde bulunan çalışmalar özetlenmiş ve ardından önceki tüm çalışmalar değerlendirilmiştir. Böylece bu tez çalışmasının özgünlüğü belirtilmiştir.

2.1 İnşaat ve Yıkıntı Atıkları

Atık malzemeler, değeri olmayan ve doğrudan insan faaliyetleri, inşaat veya sanayi sektörleriyle bağlantılı istenmeyen veya işe yaramaz malzemeler olarak tanımlanabilir (Aatheesan vd., 2010). Geri dönüştürülmüş malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanılması ekonomik ve çevresel faydalar sunar. Bu malzemelerin atık depolama alanlarında biriktirilmesi maliyetlidir ve çeşitli çevresel zararlar verme potansiyeli vardır (Elias vd., 2001; Rathje vd., 2006).

Günümüzde, çevreye çok fazla zarar verme potansiyeli olan büyük miktarlarda farklı atık türleri oluşmaktadır. Katı atıkların inşaat mühendisliği uygulamalarında geri dönüşümü ve yeniden kullanımı, nispeten uzun bir süre boyunca önemli sayıda araştırma konusu olmuştur. Farklı katı atık türleri ve kaynakları ile bunların inşaat malzemesi olarak geri dönüşüm ve kullanım olanakları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir (Pappu vd., 2007). Çizelge 2.2'de gösterildiği gibi inşaat malzemelerinin üretiminde birçok katı atık malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır (Safiuddin vd., 2010).

İnşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılabilecek potansiyele sahip geri dönüştürülmüş malzemeler arasında inşaat ve yıkıntı atığı (CDW), geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA), geri dönüştürülmüş asfalt kaplama atığı (RAP), uçucu kül (FA) vb. sayılabilir.

Çizelge 2.1. Farklı katı atık türleri ve kaynakları ve bunların inşaat malzemeleri için geri dönüşüm ve yeniden kullanım potansiyelleri (Pappu vd., 2007)

Katı Atık Türü	Kaynak Detayları	Geri Dönüşüm ve Kullanım Potansiyelleri
Tarımsal atık (organik)	Pirinç ve buğday samanı ve kabuğu, öğütülmüş fındikkabuğu, jüt, sisal, kereste katrağı atıkları, pamuk sapı, sebze artıkları	Çimento levha, yalıtım levhaları, sunta levhalar, duvar panelleri, bağlayıcı, çatı levhaları, elyafli yapı paneli, tuğlalar, asit geçirmez çimento, güçlendirilmiş kompozitler ve polimer kompozitler
Sanayi atığı (inorganik)	Artıklar, çelik çürufu, boksit kırmızı çamuru, bina kalıntıları, kömür yanması	Tuğlalar, bloklar, çimento, fayans, boya, ince ve kaba agregalar, beton, seramik ürünler, ahşap yerine kullanılan ürünler
Madencilik-Mineral atık	Kömür yıkama atıkları, demir, çinko, bakır, altın ve alüminyum endüstrilerinden maden atıkları	İnce ve kaba hafif agregalar, tuğlalar ve fayanslar
Tehlikesiz atık	Kireç çamuru, kireçtaşı atıkları, atık alçı taşı, kırık cam ve seramikler, mermer işleme artıkları, fırın tozu	Tuğlalar, bloklar, çimento klinker, hidrolik bağlayıcı, alçı sıva, elyafli alçı panolar ve süper sülfatlı çimento
Tehlikeli atık	Galvaniz atıkları, bozulmuş patlatma malzemeleri, metalurjik artıklar, tabakhane atıkları, atıksu ve atık arıtma tesislerinden çıkan çamur	Tuğla, çimento, Tahtalar, seramik ve fayans

Çizelge 2.2. Başlıca katı atıklar ve inşaat malzemeleri üretiminde kullanım alanları (Safiuddin vd., 2010)

Katı Atık Adı	Katı Atık Tipi	Kullanım Potansiyeli
İnşaat ve yıkıntı atığı (beton molozu, atık tuğla, fayans vb.)	Sanayi	Kaba ve ince agregalar, beton, bloklar, tuğlalar, yol alt temel tabakası malzemeleri
Fosfoalçı, atık cam, granüle yüksek fırın çürufu, atık çelik çürufu, kauçuk lastik	Sanayi	Kaba ve ince agregalar, beton, bloklar, tuğlalar, fayanslar, seramik ürünler, katkılı çimento.
Taban külü, uçucu kül, pirinç kabuğu külü, palm yağı yakıtı külü, organik lif	Tarımsal Sanayi	Agrega, beton, katkılı çimento, ek çimentolama malzemeleri, çimento levhaları, tuğlalar, fayanslar, bloklar, sunta levhalar, yalıtım levhaları, duvar panelleri, çatı levhaları, güçlendirilmiş polimer kompozitler.
Taş ocağı tozu	Madencilik	Kaba ve ince agregalar, beton, fayans, tuğla, blok, yüzey kaplama malzemeleri.

CDW gibi geri dönüştürülmüş malzemeler karayolları için temel/alttemel tabakasında, çeşitli dayanma duvarları için geri dolguda, yeni asfalt ve beton üretiminde kullanılabilir (FHWA, 2004; Anderson vd., 2009; Soleimanbeigi vd., 2015).

CDW malzemeleri istenmeyen maddelerden oluşur ve doğrudan inşaat endüstrisinden üretilen katı atık malzemeleri olarak adlandırılabilir (Aatheesan vd., 2010). CDW; bina, tünel, köprü, yol vb. inşaat mühendisliği uygulamalarının yapımı, tamiratı, tadilatı, yenilenmesi, yıkımı veya herhangi bir doğal afete maruz kalması sonucunda ortaya çıkan atıklar olarak tanımlanabilir (Ölmez ve Yıldız, 2008).

CDW malzemelerinin ana bileşenleri (Portas, 2004):

- Beton parçaları,
- Tuğla,
- Fayans,
- Bitümlü malzemeler,
- Asbest,
- Zemin ve kaya,
- Cam,
- Odun parçaları,
- Farklı plastik malzeme çeşitleri,
- Çeşitli metallere,
- Kâğıt,
- Karton kutu,
- Sentetik malzemeler,
- Yalıtım malzemeleri vb.

2.1.1 İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının İçeriği

CDW'nin daha efektif bir şekilde geri kazanımı için bu atıkların nasıl oluştuğunun iyi bilinmesi gerekmektedir. CDW oluştukları kaynağa göre 4 ana grup altında ele alınabilir (Öztürk, 2005).

- Kazı malzemeleri: Çeşitli kazı faaliyetleri sırasında oluşan zeminler ile kazı sırasında çıkan diğer malzemeler. Ayrıca çeşitli doğa olaylarıyla

(taşkın ve heyelan vb.) da kazı malzemeleri oluşabilir. Atık olarak oluşan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kazının yapıldığı yer ile ilişkilidir.

- Yol yapım ve bakım malzemeleri: Kaplamalı/kaplamasız karayollarının yapımı ve bakımı sırasında oluşan malzemelerdir. Yol, drenaj, sanat yapıları vb. yapımında kullanılan malzemeler oluşan atığın karakteristiğini belirler.
- Yıkıntı atıkları: Özellikle bina gibi yapıların yıkımında oluşan atıklardır. Oluşan atıklar yıkılan inşaat mühendisliği yapısının özelliğine bağlıdır. Oluşan atık homojen değildir ve çok farklı özelliklerdeki malzemeleri (zemin, beton, sıva, briket, tuğla, fayans vb.) ihtiva eder. Atığın içindeki malzeme cinsi ve oranı, yapının tipine, yapımında kullanılan malzemeye, yaşına vb. gibi özelliklere bağlıdır. Ayrıca coğrafı, tarihi, kültürel, ekonomik vb. etkenlere göre de değişim gözlenebilmektedir.
- Çalışma bölgesindeki atık malzemeler: Bu atıklar inşaat mühendisliği yapılarının tamiri, güçlendirilmesi, büyütülmesi ve yenilenmesi gibi işlemlerinden dolayı oluşur. Bunlar boya, metal, tahta, çeşitli kimyasallar, plastik, cam, kâğıt, lastik, yapıştırıcı vb. malzemeler olabilir.

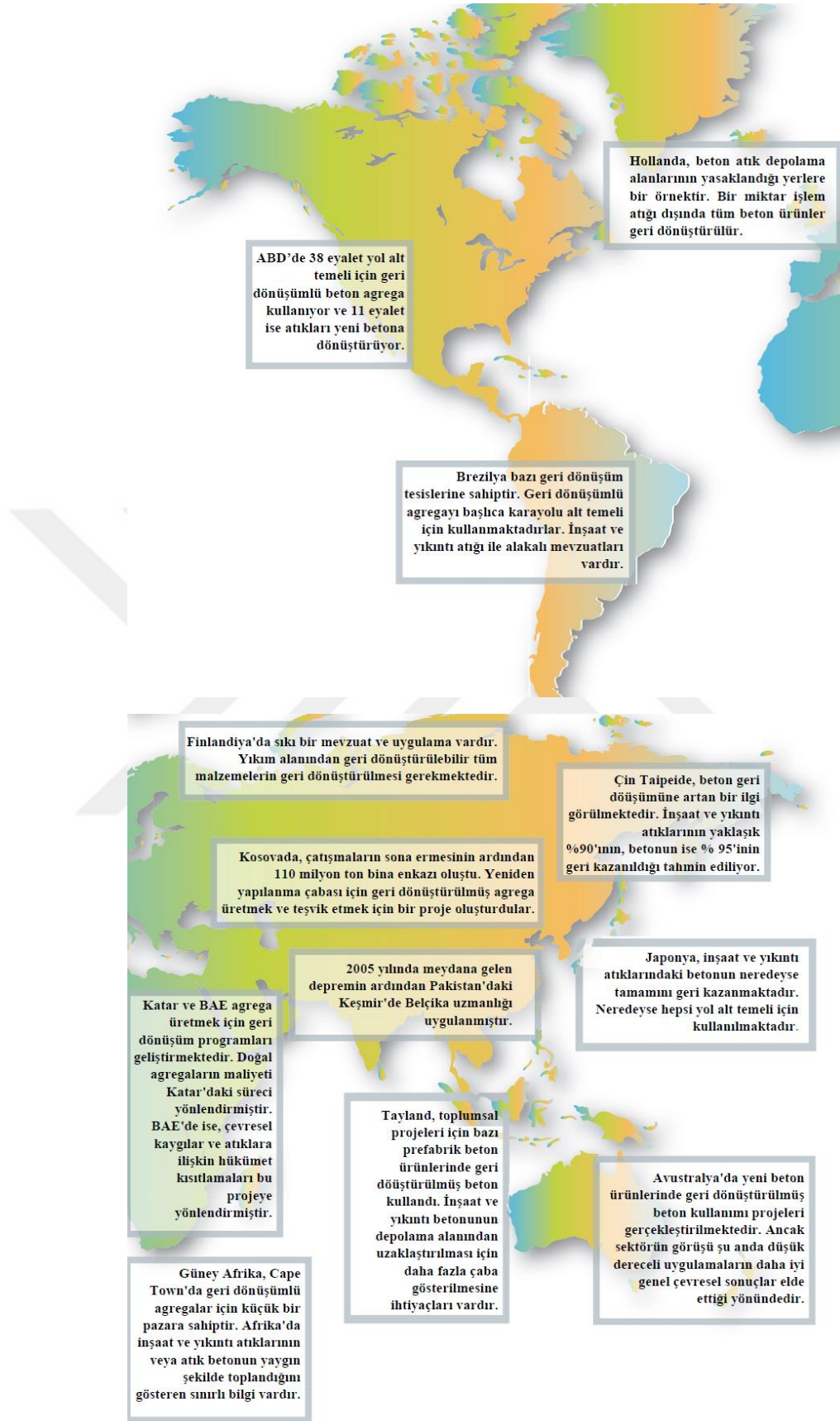
Farklı kültürler ve coğrafyalar inşaat mühendisliği yapılarının da farklı olmasına neden olabilmektedir. Ayrıca bu farklılığa ekonomik ve yaşam tarzı gibi sebeplerde eklendiğinde kimi bölgelerde yapılar ahşap ve kerpiç ağırlıklı olurken kimi bölgelerde ise çelik ve betonarme ağırlıklı olabilmektedir. Ayrıca yapının yapıldığı zaman da CDW'nin özelliğini etkileyebilmektedir. Ülkemizde, eskiden kırsal hayatın daha yoğun etkisiyle kerpiç ve ahşap tipi yapılar sıklıkla tercih edilirken, günümüzde beton ve çelik malzemeler daha yaygın kullanılmaktadır. Eski yapılarda yalıtım malzemesinin kullanılması zorunlu olmadığı için genel olarak hiç bulunmazken, yeni yapılarda yalıtım malzemesinin kullanılması zorunludur. Sonuç olarak farklı bölgelerde farklı özelliklerde CDW oluşmaktadır. Ayrıca bu farklılığa yapının inşa edildiği tarih de neden olmaktadır. Danimarka ve Hollanda'da oluşan CDW'nin %80'inden fazlasını beton ve duvar malzemeleri içermektedir. Kuveyt'te ise beton oranı sadece %30'dur. Tayvan da oluşan CDW'nin %51.7'si beton, %29.5'i tuğla-kiremit, %10.9'u ahşap, %5.4'ü çelik ve demir ve %2.4'ü plastik malzemelerden

oluşmaktadır (Huang vd., 2002). Oikonomou (2005) yaptığı çalışmada CDW içeriğinin genel olarak %40 beton, %30 seramik, %10 ahşap, %5 plastik, %5 metal ve %10 diğer malzemelerden oluşacağını bildirmiştir.

2.1.2 Dünyada ve Ülkemizde İnşaat ve Yıkıntı Atıkları

İnşaat mühendisliği sektörünün en büyük sorunları; doğal kaynakların azalması, CDW'nin çok fazla oluşması, depolama sahalarının yetersiz kalmasıdır (Radonjanin, 2013). CDW büyük hacimli atıklardır. Bu atıklardan yüksek miktarlarda oluşması ve bu atıkların heterojen olması nedeniyle pek çok ülkede önemli atıklar sınıfına alınmıştır (Coşkun vd., 2009). Çoğu ülkede CDW ile alakalı çalışmalar yapılmakta, istatistikler tutulmakta ve bunların geri kazanılması için gereken çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bazı ülkelerde, yıkıntı atıklarının toplam atıklar içindeki yüzdesi; İspanya'da %70, Avustralya'da %44, Hong Kong'da %38, Danimarka'da %25–50, Japonya'da %36, İtalya'da %30 olarak belirtilmiştir (Tam ve Tam, 2008). Dünya genelinde bazı ülkelere ait CDW yönelimi Şekil 2.1'de gösterilmiş (The Cement Sustainability Initiative, 2009). Ülkemizde, oluşan katı atıkların yaklaşık %30'unu oluşturan CDW'nin miktarında kentsel dönüşüm projeleri ile birlikte büyük artış olacağı düşünülmektedir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye'de CDW miktarının yıllık yaklaşık 4-5 milyon ton olduğunu belirtmişlerdir. Kentsel Dönüşüm Kanunu ile bu miktarın ilk 3 yıl boyunca yıllık yaklaşık 10 milyon ton, geri dönüştürülecek atık miktarının da yıllık yaklaşık 6 milyon ton olacağını öngörmüşlerdir. Bu artışa rağmen ülkemizdeki depolama sahaları yeterli değildir. Bunun için yeni depolama sahaları açılmaktadır. Bu durum ülke ekonomisine ek bir yük getirecektir. Hem ekonomik hem de çevresel sebepler göz önüne alındığında, atıkların geri kazanım yoluyla yeniden değerlendirilmesi, göz ardı edilemeyecek bir zorunluluk haline gelmektedir.

Çeşitli nedenlerden dolayı CDW miktarında son derece hızlı bir artış gözlenmektedir. Öncelikle, Türkiye'deki inşaat sektörü, ülkedeki ekonomik faaliyetlerin bel kemiği olarak kabul edilmektedir. Son zamanlarda, ülkemiz genelinde yapımı son derece hızlı bir şekilde artan yeni konut projeleri ve altyapı yatırımları nedeniyle inşaat sektörünün rolü önemli ölçüde artmıştır (Arslan vd., 2012).



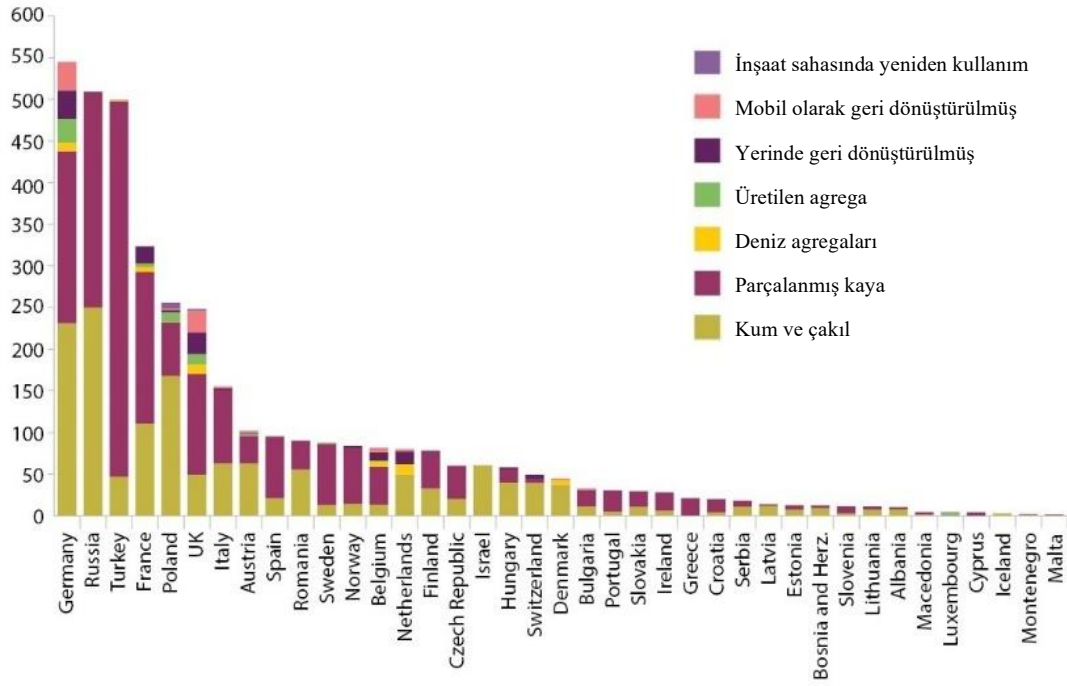
Şekil 2.1. Dünya genelinde bazı ülkelere ait CDW yönelimi (The Cement Sustainability Initiative, 2009)

Bununla birlikte, yüksek deprem riski nedeniyle güçlendirme ve yıkım çalışmaları ile ciddi risk altındaki alanlarda çalışmalar devam etmektedir. Örneğin 1999 Marmara depremi nedeniyle, büyük miktarda moloz (yaklaşık 13 milyon ton) meydana gelmiştir. Bir diğer neden, gecekondular gibi yasadışı inşaatların düzenli olarak imha edilmesi nedeniyle sürekli atık üretimi meydana gelmektedir. Ek olarak, Türkiye'deki inşaat sektörünün gelişimi boyunca, birçok nedenden dolayı, inşaat malzemelerinin ve bileşenlerinin üzerinde sık sık değişiklikler yapılmış bu da inşaat atıklarının birikmesine neden olmuştur. Oluşan zarar sadece ekonomik değil aynı zamanda çevre üzerinde de olumsuz etkilere yol açmaktadır (Esin ve Coşgun, 2007). Çizelge 2.3'de bazı ülkelerde oluşan CDW miktarları ve oluşan bu atıkların tekrar kullanım oranları verilmiştir (Vieira ve Pereira, 2015b).

Çizelge 2.3. Bazı ülkelerde oluşan CDW miktarları ve oluşan bu atığın tekrar kullanım oranları (Vieira ve Pereira, 2015b)

Ülke	Atık (Milyon Ton)	Tekrar Kullanım (%)	Ülke	Atık (Milyon Ton)	Tekrar Kullanım (%)
Almanya	72.4	86	Kıbrıs	0.73	0
Avusturya	6.60	60	Letonya	2.32	46
Belçika	11.02	68	Litvanya	3.45	60
Bulgaristan	7.80	-	Lüksemburg	0.67	46
Çekya	14.70	23	Macaristan	10.12	16
Danimarka	5.27	94	Malta	0.80	-
Estonya	1.51	92	Polonya	38.19	28
Finlandiya	5.21	45	Portekiz	11.42	5
Fransa	85.65	14	Romanya	21.71	-
Hollanda	23.90	98	Slovakya	5.38	-
İspanya	31.34	14	Slovenya	2.00	53
İsveç	10.23	-	Türkiye	10	60
İtalya	46.31	-	Ukrayna	99.10	75
İzlanda	2.54	80	Yunanistan	11.04	5

Ayrıca, Şekil 2.2'de, ülkelerin agrega üretim miktarları ve 39 ülkenin tümü için üretim türleri özetlenmiştir. 2016 yılında 592 milyon ton üreten Rusya en çok agrega üreten ülke olurken, Türkiye 522 milyon ton ile 3. sırada gelmektedir (Anonim, 2019e). Şekil 2.2'de açıkça görüldüğü gibi ülkemiz çok fazla agrega üretmekte diğer bir deyişle çok fazla agrega kullanmaktadır. Bu durum sürdürülebilir değildir. Bu kadar yüksek miktarlarda agrega üretmek yerine hâlihazırda yüksek miktarlarda CDW'yi geri dönüştürerek agrega olarak kullanmak hem ülkemizin ekonomisine hem de doğal hayata önemli derecede katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 2.2. Agrega üretimi (ülkeye ve agrega üretim türüne göre, milyon ton cinsinden) (Anonim, 2019e)

2.1.3 İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Geri Dönüştürülme Etkisi

CDW'nin geri dönüşümü sadece kendi içinde değerlendirilmemelidir. Geri dönüştürülmüş tüm atıkların sürdürülebilir kalkınma faydalarının tam anlamıyla değerlendirilmesi gerekmektedir. Örneğin; beton, üretim malzemeleri bakımından, özellikle çimento üretim aşamasında, yüksek oranda çevresel etkiye sahiptir. Üretimin tüm aşamalarında nakliye ve teslimat diğer önemli etkileridir. Ancak, son derece dayanıklıdır ve kullanıldığında pek çok çevresel avantaj sağlayabilir.

Geri dönüştürülmüş agrega ile doğal agregayı veya diğer yapı malzemelerini karşılaştırırken dikkate alınması gereken önemli faktörler vardır ve aşağıdaki şekilde sıralanabilir (The Cement Sustainability Initiative, 2009):

- Yakıt kullanımı ve karbondioksit (CO₂) emisyonları dahil nakliye maliyetleri: CDW, genellikle inşaat alanına yakın veya kentsel bir alanda bulunurken, doğal malzemeler genellikle daha uzak ocaklardan ve doğal alanlardan temin edilmektedir. Tersine, geri dönüşümlü agrega kullanılırken nakliye masrafları bazen artabilir, çünkü sahada her zaman işlenmesi uygun olmayabilir.

- İmal yöntemlerinin enerji ihtiyaçları: Farklı malzemeler için sistemler karşılaştırılabilir. Kaba agrega üretmek, ince agrega üretmekten daha az etkiye sahip olacaktır fakat agreganın gelecekteki kullanımı göz önünde bulundurulmalıdır.
- Arazi kullanım etkisi: Geri dönüşümlü agrega araçlarının kullanılması ile atık depolama sahasına giden malzeme azalır. Doğal agrega alternatifleri korunabildiğinden, daha az arazi tahrip edilir.
- Kullanım aşamasında çevresel etkiler: Geri dönüşümlü agrega, normal doğal beton ile benzer özelliklere sahiptir. Bu nedenle, bu perspektiften kullanım aşamasında etkilenmede genellikle daha az fark vardır. Diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında, betonun ısı kütlesi, betonla inşa edilen bir binanın işletimi sırasında ısıtma ve soğutma için diğer birçok malzemeye göre daha az enerji gerektiğinden, enerji tasarrufunun yapılabileceği anlamına gelir.
- Faydalı ömür beklentileri: Betonun ve geri dönüştürülmüş betonun dayanıklılığı, uzun kullanım ömrünün diğer malzemelerle karşılaştırıldığında sürdürülebilirlik açısından bir kazanç olabileceği anlamına gelir.

Sürdürülebilir gelişme tartışmalarının çoğu, sera gazı emisyonlarını azaltmaya odaklanmaktadır. Betonun geri dönüşümü karbon emisyonlarını azaltmak için bazı faydalar sağlayabilir. Sera gazı emisyonunun azaltılması, yüksek miktarda karbon ayak izinin azaltılması ile yapılabilir. Betonun agregaya geri dönüşümü, nakliye gereklilikleri azaltılabildiği sürece, doğal agrega kullanmaya kıyasla bir tasarruf üretme eğilimindedir. Araştırmalar, uzun süre içerisinde betonun, özellikle ezilmiş betonun karbonatlaşabileceğini ve CO₂'yi yeniden emebileceğini göstermektedir. Ancak, bu noktada gerçek bir pratik veri bulunmamakta ve tahminler ve araştırmalar hala devam etmektedir. Çimento üretimi, en fazla sera gazı etkisinin meydana geldiği üretim türlerinden biri olduğu için karbon emisyonlarını azaltma çabaları için hedef alan olmaktadır (The Cement Sustainability Initiative, 2009).

Çevresel faydalara ek olarak, duruma ve yerel koşullara bağlı olarak geri dönüştürülmüş CDW'nin kullanılması ekonomik olabilir. Bu duruma etki edebilecek faktörler şunlardır (The Cement Sustainability Initiative, 2009):

- Mevcut doğal agregaların yakınlığı ve miktarı,
- CDW arzının, niteliğinin ve miktarının güvenilirliği (malzemelerin mevcudiyeti ve geri dönüşüm tesisinin kapasitesi),
- Geri dönüştürülmüş ürünlerin kalitesine ilişkin genel algılar,
- Devlet tedarik teşvikleri,
- Birincil malzemeye göre geri dönüştürülmüş agrega için farklı muamele gerektiren standartlar ve düzenlemeler,
- Doğal agrega ve katı atık depolama sahasına uygulanan vergi ve harçlar.

Belirli bir durumda CDW kullanımının sağlayabileceği enerji tasarrufu da belirlenmelidir. Örneğin; Edens Otoyolu 1950'lerin başında Chicago'da inşa edildiğinde, yaklaşık olarak 300000 ton CDW (esas olarak beton) kullanılsaydı, bu durumun enerji tasarrufu sağlayıp sağlamayacağı Yrjanson (1989) tarafından araştırılmıştır. Eğer bu şartlarda Edens Otoyolu yapılsaydı, önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmiştir (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4. CDW kullanılarak yapılan bir yol inşaatında enerji tasarrufu örneği

Geri dönüşümsüz durum		CDW'nin Geri Dönüştürülmesi Durumu	
350000 ton CDW depoya	350000 ton birincil malzeme	52500 ton depoya	52500 ton birincil malzeme 297500 ton ikincil malzeme
Depolama sahasına 7900 seyahat ile inşaat sahasına 7900 seyahat (geri dönüş)	Taş ocağına 7900 seyahat ile inşaat sahasına 7900 seyahat (geri dönüş)	Depolama sahasına 1200 seyahat ile inşaat sahasına 1250 seyahat (geri dönüş)	Taş ocağına 1200 seyahat ile inşaat sahasına 1200 seyahat (geri dönüş)
Nakliye		Nakliye	
1.64 x10 ¹¹ MJ	1.97 x10 ¹¹ MJ	0.249 x10 ¹¹ MJ	0.805 x10 ¹¹ MJ
Yıkım İçin Enerji Tüketimi		Yıkım ve İşleme İçin Enerji Tüketimi	
0.0132 x10 ¹¹ MJ		(0.0132+0.0008) x10 ¹¹ MJ	
Geri Dönüşüm Olmadan Enerji Tüketimi		Geri Dönüşüm Olduğu Zaman Enerji Tüketimi	
3.61 x10 ¹¹ MJ (%100)		0.818 x10 ¹¹ MJ (%22.6)	
Temel varsayımlar:			
• Kurtarma oranı: %85			
• Yük taşıma kapasitesi: 44 ton			
• Malzemenin taşınması için enerji tüketimi: ton ve km başına 1.22 MJ			
• CDW işlemlerinde enerji tüketimi: ton başına 285 MJ			
• Yıkım için enerji tüketimi: ton başına 92 MJ			

2.1.4 İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Tekrar Kullanımı

CDW, agrega olarak (kaba ve ince) ve orijinal veya küçültülmüş formda blok olarak kullanılabilir. CDW'nin yol temel ve alt temeli için agrega olarak değerlendirilmesi en yaygın kullanım alanıdır. Örneğin, ABD'de CDW'nin kullanım yanlısı bir politika benimseyen ve bu alanda araştırmalar yapan Federal Karayolu İdaresi (FHWA) bu atıkların tekrar kullanılmasını teşvik etmektedir. Çeşitli inşaat mühendisliği projelerinde de kaba agregadan faydalanılabilir. Ancak, geri dönüştürülmüş beton agreganın yapısal betonda kullanılmaması gerektiği yönünde yaygın bir yanlışlığı vardır. Yönergeler ve düzenlemeler çoğu zaman geri dönüştürülmüş beton agreganın fiziksel sınırlamalarını göz önünde bulundurur, ancak ideal olarak kullanımlarını da teşvik etmeleri gerekir.

ABD'deki Ulusal Hazır Beton Birliği (NRMCA) tarafından yapılan bir araştırma, %10'a varan oranda geri dönüştürülmüş beton agreganın, yapısal beton dahil olmak üzere çoğu beton uygulaması için doğal agregaya alternatif olabileceği sonucuna varmıştır. Avustralya yönergeleri, yapısal betondaki %30'a kadar geri dönüştürülmüş agrega içeriğinin, doğal agrega ile karşılaştırıldığında işlenebilirlik ve mukavemette gözle görülür bir fark olmadığını belirtmişlerdir. Geri dönüştürülmüş beton agrega içinde çimento bulunduğundan, daha yüksek su emilimine ve doğal agregadan daha düşük mukavemete sahip olabileceği de belirtilmiştir. Bunun için bazen daha fazla çimento gerekebilir.

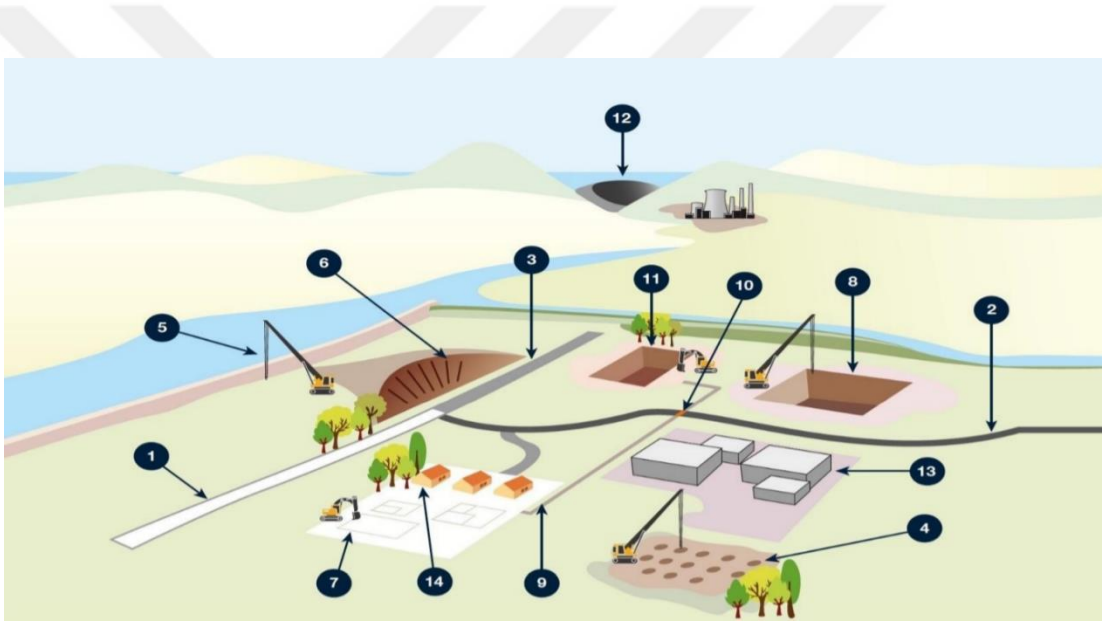
Doğal kum yerine CDW'den oluşan ince agregalar kullanılabilir. Bununla birlikte, harç içeriği, yüksek su emme nedeniyle işlenebilirliği, dayanıklılığı ve büzülme etkileyebilir. Bu durumda da oturmayı ve büzülme çatlağını artırabilir. CDW'den oluşan ince agregalar ayrıca alçı içerir ve malzemenin temizlenmesi hem ekonomik hem de çevresel olarak daha maliyetlidir. İnce agregalar, doğal zemin ile karıştırıldığında kurutma maddesi olarak etki edebildiklerinden, doğal zemin iyileştirmeleri için iyi bir dolgu olabilir. Kumların nehirlerden ve denizlerden çıkarılmasının etkisi göz önüne alındığında, alternatif kaynaklar artan bir öneme sahiptir ve bunun sonucunda CDW kullanımını artabilir.

Binalarda, blokların orijinal formunda veya daha küçük bloklar halinde kesilerek tekrar kullanılması daha az çevresel etkiye sahip olacaktır. Ancak, şu anda yalnızca sınırlı bir uygulama alanı vardır. Döşemelerin yeniden kullanılmasına ve yıkım

olmadan bina dönüşümüne izin veren geliştirilmiş bina tasarımları bu kullanımı artırabilir.

CDW'nin ilginç bir kullanım alanı da inşaat ve yol molozlarından elde edilen geri dönüştürülmüş betonun istiridye restorasyon projelerine yardımcı olmak için değerlendirilmesidir. Bu atıkların, ABD'nin Chesapeake Körfezi'ndeki yapay resifler için iyi bir malzeme olduğu belirlenmiştir. CDW'nin düzensiz yüzeyleri ve ezilmiş betondaki boşluklar, küçük istiridyelere avcılardan daha iyi bir koruma sağlayabilmektedir. ABD'nin doğu kıyılarındaki yapay balıkçılık resifleri de genellikle hurda betondan oluşturulmaktadır (The Cement Sustainability Initiative, 2009).

CDW, Şekil 2.3'de gösterildiği gibi, çeşitli inşaat uygulamalarında kullanılabilir.

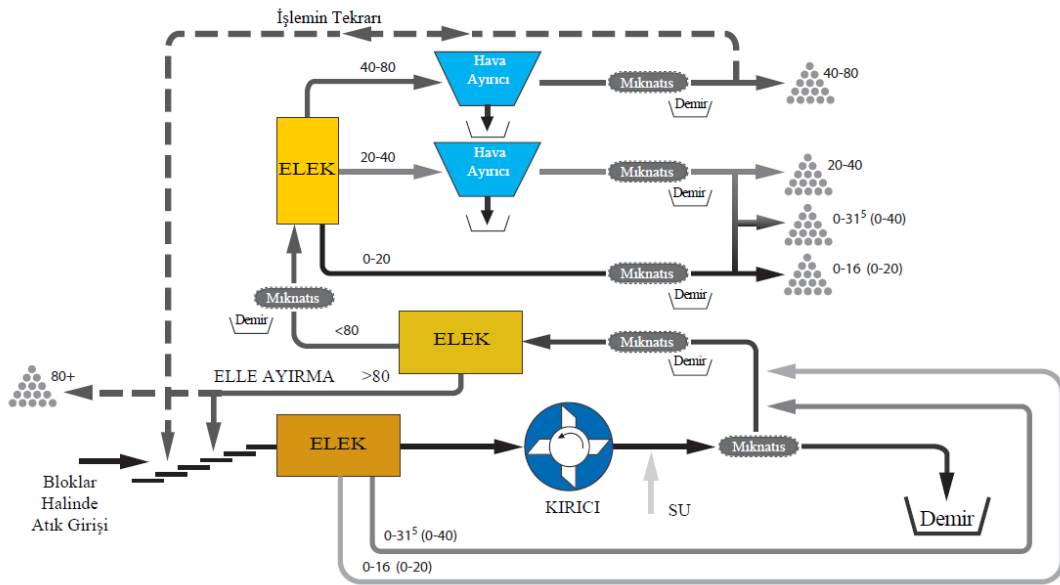


Şekil 2.3. CDW'nin çeşitli kullanım alanları; 1-Beton yol, 2-Bitümlü yol, 3-Hidrolik bağlayıcı yol, 4-Zemin iyileştirme, 5-Toprak işleri (set), 6-Toprak işleri (kesici), 7-Yüzeysel temeller, 8- Derin temeller, 9-Kamu hizmetleri, 10-Yolların bakımı ve yenilenmesi, 11-Beton altyapılar, 12-Beton yapılar, 13-Binalar (endüstriyel), 14-Binalar (konut) (The Cement Sustainability Initiative, 2009)

2.1.5 İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Geri Dönüştürülme İşlemi

CDW'nin geri dönüşümü için en yaygın yöntem, atık içerisindeki demirleri ayıklayarak konkasörde istenen boyutlarda kırılması ve elenmesidir. Mobil ayıklayıcılar ve kırıcılar genellikle bir bina yıkılması gibi atık elde edilebilecek durumlarda kullanıldıklarında hem atığın daha ucuza geri dönüşümünü sağlar hem de

zamandan tasarruf edilir. Dünya genelinde artık daha donanımlı ve CDW'nin heterojenliğini azaltan geri dönüşüm tesisleri kurulmaktadır. Bu durumda oluşan atığı değerlendirmemiz daha kolay olacaktır. Bu gibi tesislerde ahşap, derz dolgu macunları ve plastik gibi daha hafif malzemeleri ayırmak için hava ayırıcılar bulunmaktadır. Atık içerisindeki metalleri çıkarmak için mıknatıs ve çeşitli başka işlemler kullanılabilir. Ayrılan bu metal malzemeler ayrıca geri dönüştürülür. Şekil 2.4'de tipik bir CDW geri dönüşüm tesisi sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Tipik bir CDW geri dönüşüm tesisi sistemi (The Cement Sustainability Initiative, 2009)

Ülkemizde de CDW'nin geri dönüşümü için tesisler kurulma aşamasındadır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin bir iştiraki olan "İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi" (İSTAÇ) CDW'nin geri dönüşümü için hizmet vermektedir. Ülkemizde henüz çok kısıtlı sayıda CDW geri dönüşüm tesisi olduğundan, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından bu konu ile alakalı belediyeleri ve özel sektörü teşvik edici çalışmalar yapılması gerekmektedir. Şekil 2.5, Şekil 2.6, Şekil 2.7, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da İSTAÇ tarafından işletilen tesiste, CDW'nin geri dönüşüm süreci görülmektedir. Geri dönüşüm süreci sonunda Şekil 2.10'da görülen malzemelerin elde edildiği belirtilmiştir (Karaca, 2012).



Şekil 2.5. CDW geri dönüşüm tesisi genel görünümü (Karaca, 2012)



Şekil 2.6. Odayeri/İstanbul düzenli CDW depolama sahası (Karaca, 2012)



Şekil 2.7. CDW'nin geçici biriktirilmesi (Karaca, 2012)



Şekil 2.8. CDW'nin eleğe alınması (solda) ve CDW'den demirin ayrıştırılması (Karaca, 2012)



Şekil 2.9. CDW'nin farklı elek gruplarına ayrılması (Karaca, 2012)



Şekil 2.10. CDW'nin geri dönüşümü sonucunda elde edilen bazı ürünler (Karaca, 2012)

2004 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından “Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği” çıkarıldığı daha önce belirtilmişti. Bu yönetmelikte çok çeşitli konularda yönlendirmeler yapılmıştır. Bu yönetmelikte CDW sınıflandırılmış ve tanımlanmıştır. Ayrıca atık yönetiminin nasıl yapılacağı tarif edilmiştir. Yönetmelik kapsamında bakanlığın kendisinin, mülki amirlerin, belediyelerin, bu atıkları üretenlerin, depolama ve geri kazanım tesislerinin, kriz merkezinin görev ve sorumlulukları belirtilmiştir. Bu yönetmelikte pek çok önemli sorun için çözümler olsa da bu atıkların yönetimi ve özellikle geri dönüşümü için daha detaylı yönlendirmelere ve teşviklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bakanlık bu eksikleri gidermek ve yönetmeliği güncellemek için bir taslak oluşturmuş ve bu taslak için görüş almaya devam etmektedir. Ülkemizde CDW'nin yönetimi ve kontrolü amacıyla bazı yönetmelikler ve kanunlarda mevcuttur. Bunlar; 2872 sayılı Çevre Kanunu, 5216 sayılı Büyükşehir Belediyesi Kanunu, 3194 sayılı İmar Kanunu, 5326 sayılı Kabahatler Kanunu, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. Ülkemizde yürürlükte olan kanun ve yönetmeliklere rağmen CDW ya depolama alanlarına gönderilmekte ya da mühendislik özellikleri bilinmeden kontrolsüz bir biçimde tekrar kullanılmaktadır. CDW malzemeleri tekrar kullanılacaksa, mühendislik özellikleri çok

iyi bir şekilde belirlenmelidir. Bu konu hakkında ülkemizde henüz bir kanun ya da yönetmelik mevcut değildir.

2.2 Puzolanlar

Yalnız başına kullanıldıklarında bağlayıcı özelliği çok az veya hiç olmayan fakat çok ince öğütüldüklerinde ve/veya kalsiyum hidroksitle birlikte karıştırıldığında, uygun su miktarı ile bağlayıcılık özelliği kazanan maddeler puzolan olarak isimlendirilmektedir (ASTM C 618, 1991). Puzolan malzemelerin içeriğinde genellikle yüksek oranda silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) bulunmaktadır. Ayrıca, puzolanların içeriğinde demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir. Puzolanların çok farklı kökenleri, yapıları, kimyasal ve mineralojik bileşenleri vardır. Puzolanlara su katılarak bağlayıcılık özelliği kazandırmak ve hidrasyon ürünleri oluşturmak için puzolanların kireçle birleşme eğilimi vardır (Turriziani, 1964). İçeriğinde camlaşmış silis (SiO_2) olan zeminler kireçle karıştırıldıklarında puzolanik özellik gösterebilir. Antik Mısır'da pişmiş kil öğütülerek kireçle karıştırılmasıyla "horasan harcı" oluşturulmuştur. Osmanlılar bu harcı geliştirerek kullanmıştır. Benzer şekilde Napoli civarındaki Puzzuoli kasabasının zemini de bağlayıcı özellikli sağlam bir yapı elemanı üretmek için kullanılmıştır. Puzolan sözcüğü buradan gelmektedir. Almanlar puzolan malzemeleri "tras" olarak isimlendirmekte, ülkemizde de bu deyim kullanılmaktadır (Akman, 1990).

Puzolanik özellikli malzemeler, eski çağlardan günümüze kadar özellikle inşaat sektöründe çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle beton üretiminde kullanımı yaygın olan puzolanların zemin özelliklerini iyileştirmek için de değerlendirilmesi popülerleşmektedir. Betonunun ve zeminlerin temel bileşenlerinden olmayan puzolanlar, betona ve zemine eklendiğinde, fiziksel ve mekanik özellikleri değiştirebilmektedir.

2.2.1 Puzolanların Sınıflandırılması

Günümüzde, puzolanları sınıflandırılmak için birçok farklı sistem bulunmaktadır. En yaygın kullanılan sınıflandırma sisteminde puzolanlar doğal ve yapay (suni) olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Doğal puzolanlar sıklıkla volkanik kaynaklı tortul kayaların az miktar değişime uğraması ile oluşurlar. Fakat farklı kaynaklardan oluşmuş maddeleri ihtiva edebilirler. Doğal puzolanlar genellikle

öğütme dışında bir işleme ihtiyaç duymazlar. Yapay puzolanlar ise puzolanik özelliği olmayan ya da çok az olan ürünlerin kimyasal ve/veya yapısal işlemlerin bir sonucudur. Yapay puzolanlar, bir üretimin kalıntısıdır ya da bir üründen özel olarak türetilirler (Massazza, 1998). Puzolanların basitçe sınıflandırılması sonucu doğal ve yapay puzolan çeşitleri Çizelge 2.5'te görülmektedir (Erdoğan, 2003).

Çizelge 2.5. Puzolanların basitçe sınıflandırılması (Erdoğan, 2003)

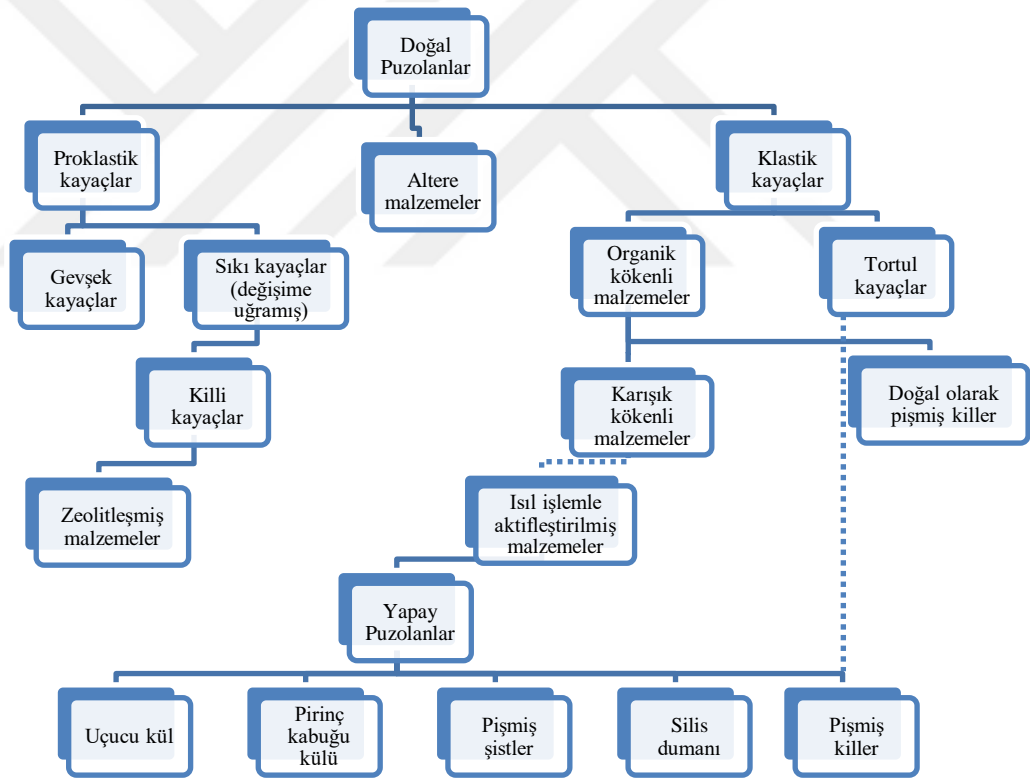
Doğal Puzolanlar	Yapay (Suni) Puzolanlar
Opalin silika	Granüle yüksek fırın cürufu
Volkanik tüfler	Pirinç kabuğu külü
Volkanik küller	Uçucu kül
Volkanik camlar	Silis dumanı
Diatomit topraklar	Demirli olmayan cüruf
Isıl işlem görmüş küller	Pişirilmiş kül

Genellikle tüm puzolanların esası silistir. Puzolanlar %40'dan %90'a kadar SiO₂ içermesi beklenmektedir. Puzolanik maddeler kullanılmak istenildiğinde dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bunlar; puzolanın üretimi ve/veya teslim durumu dikkate alınmalı, homojen olmasına özen gösterilmeli, kurutulmalı ya da ısıl işlemden geçirilmeli ve öğütülmelidir (TS EN 197-1, 2002). Tüm puzolanlar, reaksiyon kapasiteleri dikkate alınarak genellikle üç bileşenden oluştuğu görülmektedir. Bu bileşenler (Rudolf, 1984):

- Aktif tertip bileşenleri: Opal, az ya da çok değişmiş cam fazları, silisli zeolitler, vb.,
- Atıl bileşenler: Zeolitlerden farklı olan kristal fazlar (piroksen, saf çini, augit, vb.),
- Zararlı bileşenler: Karbon ve kalay maddeleri, organik maddeler vb. (Dayı, 2006)

Literatürde puzolanların çok farklı şekillerde sınıflandırıldığı görülmüştür (Mielenz vd., 1951; Mehta, 1986; Massaza, 1989). Şekil 2.11'de Massaza (1989) tarafından yapılmış bir sınıflandırma şekli görülmektedir. Bu sınıflandırmaya göre puzolanlar 3 ana gruba ayrılmıştır. İlk grup olan proklastik kayalar, eriyik haldeki magmanın şiddetle dışarı atılmasıyla oluşur ve atılan malzemelerin hızla soğuması ile son halini alır. İkinci grup, yüksek oranda silis içeren değişime uğramış

malzemelerden oluşur. Doğal puzolanların 3. grubu klastik (parçalardan oluşmuş) kayalar olan diatomit ve kil zeminlerdir. Bu malzemelerin içeriğinde yüksek oranda silika vardır. Ayrıca içeriğinde önemli miktarda kil ihtiva ederler. Kendi başına kilin puzolanik özelliği yetersizdir ve bu yüzden çimento ikame malzemesi olarak kullanılamazlar. Fakat killerin ısı ile işleme tabi tutulması ile kilin puzolanik özelliği önemli derece artmaktadır. Diatomit topraklar ise yüksek silisli organik çözeltilerdir. Diatomit toprak içeriğinde genellikle kil ve diğer çökeltiler olur. Diatomit toprak hem öğütüldüğü hem de öğütülmediği durumlarda puzolanik özellik göstermektedir. Eğer içinde kil varsa kalsinasyon yapılarak puzolanik özellik kazandırılabilir. Bu sınıflandırmada uçucu kül, pirinç kabuğu külü, pişmiş şistler, ısı ile işleme aktifleştirilmiş malzemeler, silis dumanı, pişmiş killer gibi malzemeler ile yapay puzolan grubu oluşturulmuştur (Swamy, 1986).



Şekil 2.11. Pozolanların detaylı bir sınıflandırma örneği (Massazza, 1989)

2.2.2 Doğal Pozolanlar

Doğal puzolanlar, doğada oluşurlar ve gerekli ise bir ön işlem uygulanarak veya tane boyutunu düşürmek için öğütülerek kullanılırlar. Doğal puzolanlar, genellikle

eski volkanik kütlelerin olduğu kesimlerde oluşurlar. Doğal puzolanların kimyasal davranışı ve aktivitesi, oluştuğu bölgeye göre değişiklik göstermesi muhtemeldir (Mazlum, 1989). Doğal puzolanları oluşturan taneler ne kadar ince olursa puzolanik aktifliği de o kadar fazla olur. Genellikle doğal puzolanın inceliğinin $3000-7200 \text{ cm}^2/\text{g}$ arasında olması uygun görülmektedir. TS 25 standardına göre kullanılacak puzolanın özgül yüzeyinin en az $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ olması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle kullanılacak puzolanın öğütülmesi çok önemlidir (Koçu, 1997).

Volkanik küller, volkanik tüfler, killi maddeler, zeolitli maddeler, diatomit toprağı, tras, bims vb. malzemeler doğal puzolanlara örnek olarak gösterilebilir. Bazen doğal puzolanları kalsinasyon işlemine tabi tutmak gerekebilir. Bunun nedeni, kalsinasyon işlemi ile eğer var ise puzolanın yapısındaki karbonatlar, oksitli bileşiklere dönüştürülür (Lea, 1991).

Lapili ve volkanik küllerin birikmesiyle oluşan kayaçlar tuf olarak adlandırılırlar. Volkanik kökenli doğal puzolanlar, magmanın püskürmesi ile meydana gelirler. Magma şiddetli bir şekilde püskürerek, yüksek puzolanik aktiviteye sahip camsı malzemelerin oluşmasına neden olur. Eğer, daha zayıf şiddette bir püskürme olursa kireçle daha az kimyasal reaksiyon yapabilen volkanik küller oluşur. Temel olarak volkanik cam parçalarından oluşan tüflere camsı tüfler denilmektedir. Esasında kristal parçalarından meydana gelen tüfler kristalli tüfler olarak isimlendirilmektedir. Bunlarda kırılmış, aşınmış ve köşeli taneler şeklinde oluşurlar. Riyolit içerikli kristalli tüfler sanidin, kuvars, hornblent, biyotit gibi maddeler içerir. Kuvars ve alkali feldispatlardan meydana gelen kayalar riyolitiklerdir. Kuvars malzemesi iri taneli olup genellikle yapılarında %60-75 oranında SiO_2 bulunur. Doğal puzolanların performansını artırmak için çok ince öğütülmesi gerekmekte fakat doğal olarak çok ince parçacıklara ayrılmış sünger taşları gibi malzemeleri öğütmeye ihtiyaç yoktur. Doğal puzolanların puzolanik aktivite davranışları içeriğindeki çeşitli maddelerin (kil minerali, opal, zeolit, alüminyum hidroksit vb.) varlığı ile oluşur. Genellikle, çoğu lav tipinde bulunan oksitler aynı olmakla birlikte, oranları farklıdır. SiO_2 oranı %35 den %75 e kadar değişkenlik gösterirken, bu değişkenlik lavların farklı sınıflandırılmasına neden olur. SiO_2 oranı fazla ise ($> \%66$) asit lav, SiO_2 oranı biraz az ise nötr lav, daha da az ise ($< \%52$) bazik lav, SiO_2 oranı %45'den de düşük olduğunda ultrabazik lav olarak sınıflandırılırlar. Özellikle asit lavlarda alkalilerin fazla olmasına rağmen bazik lavlarda demir, magnezyum ve kalsiyum daha az oranda yer alırlar. Gaz bakımından

zengin bir magmadan püsküren malzemeler ani soğuduğu zaman genellikle kabarcıklı cam oluşur. Silisli toprakların kirece karşı reaksiyon kapasiteleri oldukça yüksek olmakla birlikte mikrosellülar yapısı nedeniyle su emme kapasiteli yüksektir. Bundan dolayı hidrolik bağlayıcı hazırlarken bu su emme kapasitesine dikkat etmek gerekir (Koçu, 1997).

Isıl işleme tabi tutulmuş killer ve şeyller de bazı sınıflandırma sistemlerinde doğal puzolan olarak isimlendirilebilmektedir (Erdoğan, 2003). Kil genellikle plaka veya çubuk şekline sahiptir ve tane boyutu 0.002 mm' den küçüktür. Genellikle kimyasal ve fiziksel aşınma sonucu olarak oluşurlar. Şeyller ise, killer ile benzer bileşenleri içerir fakat su içerikleri kilden azdır. Kil mineralleri genellikle kristal yapılıdır. Killer ve şeyller doğal halde kimyasal içeriğine de bağlı olarak genellikle puzolanik özellik göstermezler. Ancak yüksek sıcaklıklarda ısıl işleme tabi tutulursa kalsine olabilirler ve puzolanik özellik kazanabilirler. Yüksek sıcaklık bu malzemelerin kristal yapılarını bozarak yarı amorf şekle ya da bozulmuş alümina silikat yapısına çevirir. Laterit toprakları da doğal puzolanlar kapsamında değerlendirilebilirler. Bunlar yüksek oranlarda demir minerallerine sahiptir. Hava ile temas ettiği zaman sertleşebilirler. Laterit içerikli topraklar genellikle tropikal ortamlarda kimyasal bozulma sonucu oluşmaktadırlar. Diatomitler de doğal puzolanlar içerisinde değerlendirilebilmektedir. Diatomitler genellikle mikroskopik su bitkisi olan diatomların kalıntılarıdır. Bu canlıların hücre duvarları genelde silikadan oluşur, opal ve hidrate silika içerirler. Diatomlar ortalama olarak %94 oranında silis ihtiva ederler. Diatomların ihtiva ettiği amorf silis miktarı, puzolanik aktiviteyi etkilemektedir. Eğer bir diatomun için kil minerali yüksekse puzolanik aktivite azalabilmektedir (Gündeşli, 2008).

2.2.3 Yapay (Sunî) Puzolanlar

Yapay puzolanlar genellikle endüstriyel ve sanayi yan ürünlerdir. Silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu küller, yapay puzolanlara bazı örneklerdir (Erdoğan, 2003). Massazza (1989) tarafından yapılan daha detaylı bir sınıflandırmada uçucu kül, pirinç kabuğu külü, pişmiş şistler, ısıl işleme aktifleştirilmiş malzemeler, silis dumanı, pişmiş killer yapay puzolanlardır. Yapay puzolanların içeriğinde doğal puzolanların temelini oluşturan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO ve MgO olduğundan puzolan olarak değerlendirilmiştir (Mazlum, 1989).

Silis dumanı, ergime yöntemiyle silisyum veya çeşitli silisyum alaşımlarının üretilmesi esnasında elde edilen yan üründür. Silis dumanının ana bileşeni 1 µm'den küçük, amorf, küresel, camsı silis partikülleridir. Ayrıca içeriğinden dolayı, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahiptir (Koca, 1996). Silisyum metalinin ya da alaşımlarının oluşturulması için yüksek saflıktaki kuvars malzemesine, yaklaşık olarak 2000 °C sıcaklıkta indirgeme işlemine uygulanır. Bu uygulama sonucunda gaz oluşmakta bu gazın içeriğinde de yüksek oranda silisyum oksit (SiO) bulunmaktadır. SiO, oksijenin ve hızlı bir şekilde soğumanın etkisiyle camsı yapıdaki SiO₂ parçacıklarına dönüşmektedir. Fiber filtrelerden, oluşan bu parçacıklar geçirilirse yoğunlaştırılmış silis dumanı parçacıkları meydana gelmektedir (Yeğinobalı, 2003). Silis dumanları amorf yapıdadırlar ve silis oranları çok fazladır. SiO₂ oranı ortalama olarak %85'ten fazladır. Silis dumanının özgül ağırlığı ise genel olarak ortalama 2.2 gr/cm³'tür. Silis dumanının genel özelliklerinden olan aşırı ince parça ve yüksek reaktivite, çok yüksek dayanım veya erken yaşta yüksek dayanım özelliklerini gösteren beton üretiminde silis dumanı kullanmaya teşvik eder. Ek olarak, silis dumanının kimyasal yapısına ve puzolanik etkisine, üretilmek istenen ürünün tipi ile kullanılan kuvars ve kömürün kompozisyonu önemli derecede etki etmektedir (Malhotra, 1997).

Pirinç kabuğu, çeltik (kabuğu ayıklanmamış pirinç) üretimi sonucunda meydana gelen zirai bir yan üründür. Pirinç kabuğunun yapısında SiO₂ bulunmaktadır. Pirinç kabukların yakılması ile bir kül oluşmaktadır. Meydana gelen külün soğutulması sonucu amorf (hızlı soğutma) veya kristal (yavaş soğutma) SiO₂ meydana gelmektedir. Pirinç kabuğu külünün amorf şekilde özgül yüzeyi büyük olduğundan puzolanik aktivitesi de yüksektir (Mazlum, 1989).

Kalsine edilen killer puzolanik özellik göstermektedir. Bundan dolayı toprak veya kiremit öğütülerek ve ufalanarak kullanılmıştır. Puzolanik aktivitesi olmayan bir kil yüksek sıcaklıklarda (500-800°C) yandıktan sonra puzolanik özellik gösterebilmektedir. Eğer kil saf ise, 600-700°C civarı, marn içeriyorsa da yaklaşık 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmalıdır. Yanma sıcaklığı dikkatli seçilmelidir (Koçu, 1997).

2.2.3.1 Uçucu Kül

Termik santrallerde, elektrik üretimini gerçekleştirmek için gereken enerji pulverize fosil yakıtlarının (linyit kömürü, taş kömürü vb.) yakılması ile sağlanmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucu da atıklar oluşmaktadır. Bu atıkların bir kısmı kül halinde tabanda birikirken büyük bir kısmı ise (yaklaşık %80) gaz ve toz halde bacalardan tahliye edilmektedir. Siklon ya da elektrofiltreler gibi yardımcı elemanlar ile toplanan bu malzemeler (küller) “uçucu kül” ya da “pulverize yakıt külü” olarak isimlendirilmektedir. Kullanılan fosil yakıtın ve kullanılan filtrenin özelliği ile oluşan basınç ve sıcaklığın değeri oluşan uçucu külün karakteristiğini belirlemektedir (Erdoğan, 2004). Oluşan kül tanecikleri çok ince tane çapına (0.5–150 µm) sahip olup baca gazlarıyla sürüklenmelerinden dolayı uçucu kül ismini almışlardır (Kavas, 2003). Oluşan uçucu külün tane boyutunu, kül toplama yöntemi ve ekipmanları belirler. Açık bej, kahverengi, gri, siyah gibi değişik renk tonlarında uçucu kül oluşabilmektedir. Uçucu külün içinde yanmamış karbon miktarı ne kadar fazla olursa oluşan uçucu külün rengi o kadar koyu olur. Al, Ca, Si, Fe ve S elementleri genel olarak bir uçucu külün kimyasal yapısında bulunmaktadır. Bu elementler yanma/yakılma metoduna bağlı olarak Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , SiO_2 , FeO , Fe_3O_4 ve SO_3 oluşturabilmektedir. Ayrıca az miktarda olsa TiO_2 , Na_2O , MgO , K_2O vb. oksitler uçucu kül içeriğinde bulunabilmektedir. Bir uçucu külün içeriğindeki karbon genellikle termik santrallerin verimine bağlıdır. Yaklaşık olarak bu değer %3’tür (Şimşek 2007).

Değişik şekiller halinde oluşabilen uçucu kül parçacıkları aşağıda belirtilen formlardan birinden ve birkaçından oluşmaktadır (Yazıcı 2004):

- Yüzeyi kristal ile kaplı yapı,
- İçi boşluklu ya da boşluksuz yapı,
- Camsı küresel şekilli tanecik,
- Büyük bir kürenin içerisindeki küçük küreler kümesi şeklindeki yapı,
- Deforme yapı,
- Yüzeyi şekilsiz birikimlerden oluşan yapı,
- Yüzeyi sıvı damlacıkları ile oluşan yapı,
- Yüzeyinde şekilsiz ve düzensiz dağılmış boşluklar olan yapı.

Türkiye’de aktif olarak çalışabilen 11 adet (Seyitömer, Afşin-Elbistan, Soma, Çatalağzı, Kangal, Orhaneli, Çayırhan, Kemerköy, Yatağan, Tunçbilek, Yeniköy) termik santral bulunmaktadır. Bu 11 termik santrallerden yaklaşık olarak yıllık toplam 13 milyon ton uçucu kül oluşmaktadır. Ayrıca, oluşan uçucu kül miktarının önümüzdeki yıllarda çok daha fazla artacağı düşünülmektedir (Türker vd. 2009). Uçucu küllerin toplanması bacadan kaçan kül miktarının azaltılması çevre kirliliğini önemli derecede azaltmaktadır. Ancak oluşan uçucu küllerin katı atık depolama sahalarında depolanması yerine verimli bir şekilde değerlendirilmesi hem doğanın korunmasına yardımcı olacak hem de ekonomiye önemli ölçüde katkı sağlayacaktır.

Uçucu küller sınıflandırılırken, içeriğindeki mineral ve kimyasal bileşenleri oranları dikkate alınmaktadır. ASTM C 618 (2012) ve TS EN 197-1 (2002) standartları uçucu küllerini sınıflandırmışlardır.

ASTM C 618 (2012) standardı uçucu küllerini F ve C olmak üzere iki sınıfa ayırmıştır. Uçucu küllerini düşük kireç ve yüksek demir ihtiva etmesi durumunda F sınıfı, düşük kireç ve yüksek kalsiyum olması durumunda C sınıfı olarak isimlendirmiştir (Dickson, 2015). F ve C sınıfı uçucu küllerinin özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilirler. Bu sınıf uçucu küllerinin toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranı %70’den fazla olmalıdır. Ayrıca, bu sınıf uçucu küllerinde CaO oranı %10’un altındadır. Bu yüzden düşük kireçli olarak bilinirler. F sınıfı olarak adlandırılan uçucu küllerinin genellikle sadece puzolanik özelliğe sahip olduğu görülmüştür.
- C sınıfı uçucu küller, yarı-bitümlü kömürden ya da linyitten üretilirler. Toplamı %50’den fazla olan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içerirler. C sınıfı uçucu küller yüksek kireçli olarak isimlendirilirler. Bunun nedeni CaO oranının %10’dan fazla olmasıdır. C sınıfı uçucu küller hem puzolanik hem de bağlayıcı özellik gösterirler.

TS EN 197-1 (2002) uçucu küllerini iki sınıfa ayırmıştır. Bunlar silissi (V) ve kalkersi (W) uçucu küllerdir. V ve W sınıfı uçucu küllerinin özellikleri aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- V sınıfı uçucu küller, genellikle puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden oluşmaktadır. Bu sınıfa giren uçucu küller reaktif SiO_2 ve

Al_2O_3 ihtiva eder. Ayrıca, demir oksit ile diğer bazı bileşenleri içerir. V sınıfı uçucu küllerde reaktif kireç oranı %10'dan azdır. Ek olarak, reaktif silis oranının %25'ten fazladır.

- W sınıfı uçucu küller, hidrolik ve puzolanik özelliklerin birini ya da her ikisini birden gösterirler. Bu sınıftaki küller temel olarak CaO, SiO_2 ve Al_2O_3 ihtiva ederken geriye kalan kısmında Fe_2O_3 ve diğer bazı bileşenleri vardır. Bu sınıftaki küllerde, reaktif kireç oranının %10'dan, reaktif silis oranının ise %25'ten fazla olması beklenmektedir.

Uçucu kül puzolanik özelliğini çok yavaş göstermektedir. Genel olarak, uçucu kül ve kireç birleşimi en az 2-3 gün sonra dayanım kazanabilmektedir. Sıcaklığın artması ve malzemenin daha da inceltmesi tepkime hızını artırabilmektedir (Ağar 2007). Uçucu küllerin puzolanik davranışları, genellikle mineralojik yapıları ile alakalıdır. Silis ve alüminadan meydana gelen amorf veya camsı faz düşük kireçli uçucu küllerin temel olarak aktif bileşenidir. Düşük kirece sahip uçucu küller, sönmüş kireçle reaksiyona girebildiklerinden dolayı puzolanik özellik gösterirler. Yüksek kirece sahip uçucu küllerde ise hem puzolanik özellik vardır hem de içerdikleri serbest kireç, amorf silis, trikalsiyum alüminat, alümina vb. nedeniyle bağlayıcı özellik gösterebilirler (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Bağlayıcılık özelliği gösteren uçucu küllerin reaksiyonu ve reaksiyon sonucunda oluşan ürünler aşağıdaki gibi tarif edilmiştir (Pollard vd., 1992):

- $Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O = (CaO)_x(SiO_2)_y(H_2O)_z$
Kalsiyum–Silikat–Hidrat (C-S-H)
- $Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O = (CaO)_x(Al_2O_3)_y(H_2O)_z$
Kalsiyum–Alüminat–Hidrat (C-A-H)
- $Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + SiO_2 + H_2O = (CaO)_x(Al_2O_3)_y(SiO_2)_z(H_2O)_w$
Kalsiyum–Alüminat–Silikat–Hidrat (C-A-S-H)
- $Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + SO_3 + H_2O = (CaO)_x(Al_2O_3)_y(CaSO_3)_z(H_2O)_w$
Kalsiyum–Alüminat–Sülfat–Hidrat (C-A-S-H)

2.2.3.2 Yüksek Fırın Cürufu

Cevherin içinde bulunan demirin çıkartılması için, içeriğindeki yabancı maddelerin uzaklaştırılması ayrıca demir oksidin de ayrıştırılarak içinde bulunan

oksijenin alınması şarttır. Bunu yapabilmek için demir cevherleri, yüksek fırınlarda yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılarak erimeleri sağlanmaktadır. Demir cevheri ile kok kömürü ve kalker taşı, fırının üst ucundan beslenmektedir. Fırındaki yüksek sıcaklığın etkisiyle, kok kömürü içinde bulunan karbon, cevherin demiroksitinde bulunan oksijen ile birleşip gaz halindeki karbondioksit ve karbonmonoksit oluşumuna neden olmaktadır. Gaz halindeki karbondioksit ve karbonmonoksit fırını terk ederken, geride aşağıda sıralanan malzemeler kalmaktadır (Erdoğan 1995).

- Eriyik durumdaki demir,
- Eriyik durumdaki kireç,
- Kok kömürünün külü,
- Silis,
- Alümin,
- Cüruf (Diğer yabancı maddelerden oluşan malzeme topluluğu).

Demir-çelik endüstrisinden yan ürün olarak oluşan yüksek fırın cürufları serbest kireçle karıştırıldığında bağlayıcı özelliği gösterdiğinden dolayı yapay puzolan grubunda yer almaktadır. Yüksek fırın cürufu yaklaşık 1400-1600 °C sıcaklıkta oluşmaktadır. Yüksek fırın cürufu, hafif olmasından ötürü ham demirin üstünde yer alır. Eritilmiş halde bulunan yüksek fırın cürufuna, hızlı bir soğutma işlemi yapılırsa, yüksek fırın cürufu hidrolik bağlayıcı özelliğine sahip camsı bir yapıya sahip olur. Bu durumda, bu malzeme, granüle yüksek fırın cürufu olarak isimlendirilebilir (Tokyay ve Erdoğan, 2009). Erimiş halde bulunan cüruf yüksek fırından çıkarıldığı zaman hızlı bir şekilde soğutulduğunda akışkanlığındaki ani azalmadan dolayı kristal yapılaşma oluşmaz ve camsı yapıda bir katı eriyik oluşur. Oluşan yarı kararlı camsı malzemenin bağlayıcılık özelliği kazanması için, cüruf taneleri çok ince olacak şekilde öğütülebilir, kalsiyum hidroksit ya da sodyum hidroksit gibi aktivatörler kullanılabilir. Aktivasyonun sonunda oluşan ürün kalsiyum silikat hidratlardır (Spellman, 1982). Bununla birlikte, granüle yüksek fırın cürufunun kendi başına su ile reaksiyonu yavaş gelişir (Tumluer, 2006; Yılmaz, 1998).

Cürufun, bağlayıcı özelliği göstermesi için granülasyon ve peletleme yöntemleri tercih edilmektedir. Hem granülasyon hem de peletleme yönteminde cürufun düzensiz bir camsı yapı kazanması adına hızlı bir soğutma şarttır. Eğer cüruf yavaş bir şekilde soğutulursa bağlayıcılık özelliği olmayan kristal bir yapı oluşmaktadır (Newman ve

Choo, 2003). Bu durumda bazalta benzeyen mekanik özellikler göstermektedir. Bu özellikten ötürü beton agregası olarak değerlendirilebilir (Tokyay ve Erdoğan, 2009).

2.2.4 Puzolanik Reaksiyon ve Aktivite

Puzolanların bileşiminde büyük oranda silis ve alümin vardır. Herhangi bir öğütme metoduyla daneleri inceltmiş puzolan malzemeler, söndürülmüş kireç ve su ile karıştırıldığı zaman bazı kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Portland çimentosunda meydana gelen hidrasyona benzer şekilde, kalsiyum hidroksit, silis ve su bileşimindeki reaksiyonlar sonucu hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren kalsiyum–silika-hidrat (C-S-H) jeller oluşmaktadır. Kalsiyum–silika-hidrat (C-S-H), küçük (koloidal) boyutlarda, bağlayıcılık özelliği yüksek jellerdir. Bu reaksiyon çok yavaş bir şekilde oluşmaktadır (Erdoğan, 2003). Bu özellikten dolayı bu reaksiyon sırasında hem dayanım kazanma hızı ve hem de hidrasyon ısısı düşük değerlerdedir. Fakat portland çimentosundaki reaksiyonlara bakıldığında C₃S hidrasyonu hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bundan dolayı da puzolanların aksine dayanım kazanma hızı ve hidrasyon ısısı yüksek değerlere ulaşmaktadır. Puzolanik reaksiyonu hızlandırmak için sıcaklık artırabilir ya da alkaliler, sülfatlar vb. kimyasal katkıları kullanılabilir (Mehta, 1987; Memon vd., 2002).

Portland çimentosunun sadece su ile birleşiminden ve ince bir şekilde öğütülmüş puzolanın silikası ile kalsiyum hidroksit karışımından dolayı oluşan kimyasal reaksiyonlar aşağıda özetlenmiştir (Al₂O₃=A, Ca(OH)₂=CH, CaO=C, Fe₂O₃=F, H₂O=H, SiO₂=S harfleri ile gösterilmiştir) (Erdoğan, 2003):

- Portland çimentosu: (C₃S, C₂S)+H→C-S-H+CH
- Puzolanik reaksiyon: CH+S+H→C-S-H

Puzolanik özellik gösteren maddelerin söndürülmüş kireç ve su ile reaksiyona girebilme ve bağlayıcılık özelliği gösterebilme kapasitelerine “puzolanik aktivite” denilmektedir. Yeterli puzolanik aktiviteyi elde edebilmek için puzolanın tanelerinin yeterince ince olması, amorf yapıda olması ve yeterli oranda silis+alümin+demir oksit ihtiva etmesi şarttır. Puzolanik aktivite tanımının değerlendirilmesi, “dayanım aktivite indeksi” değerinin hesaplanmasıyla gerçekleştirilebilir. Dayanım aktivite indeksi aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Erdoğan, 2003):

- Dayanım aktivite indeksi= $(A/B) \times 100$ (A: Puzolanlı harç numunelerin ortalama basınç dayanımı; B: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı)

Massazza (1989) tarafından yapılan çalışmada, puzolanik aktiviteyi, kalsiyum hidroksit ile $(Ca(OH)_2)$ sulu ortamda “sertleşme” ve “reaksiyona girme” kapasitesi şeklinde tanımlamıştır. Puzolanik aktiviteden tam olarak bahsedebilmek için bu iki durumun aynı anda olması şarttır. Puzolanik aktivitesi yüksek olan maddelerin sahip oldukları özellikler aşağıda belirtilmiştir:

- Yüksek oranda camsı faz,
- Büyük özgül yüzey,
- Yüksek oranda alkali, Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 .

Bir puzolanın potansiyelini ortaya koymak ve kullanımının avantaj sağlayıp sağlamadığını belirlemek için o maddenin puzolanik aktivitesini belirlemek gerekmektedir. Puzolanik aktivite belirlemek için araştırmacılar pek çok çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalar sonucunda, puzolanik aktivitenin belirlenmesin zor olacağı ve bu nedenle birçok test yapılması gerektiği ortaya konulmuştur. ASTM ve TS bunun için gerekli standartlar hazırlamıştır (ASTM C311, 2005; TS 25, 2008).

Reaktiviteyi belirleyen ana unsurlar şu şekildedir:

- Camsı faz/kristallerden oluşan faz oranı,
- Morfoloji,
- Kimyasal ve mineralojik kompozisyon,
- Puzolanın tane çapı (öğütme inceliği).

Bir maddenin puzolanik aktivitesi aşağıda belirtilen yöntemlerle belirlenebilir (Bulut, 2007):

- Kimyasal değerlendirme yöntemleri: Puzolan ile kalsiyum hidroksit karışımının bir saat kaynatılması sürecinde, başlangıç ve bitiş anında serbest kireç miktarı ölçümü; puzolanın kireç ile tepkimesinde eriyen silis ve alüminyum oksit belirlenmesi; puzolan ile kalsiyum bileşiminden ve aynı bileşimin 1 saat boyunca $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kalsine

edilmiş halinden hidroklorik asitte çözünmeyen miktarın mukayese edilmesi vb.

- Fiziksel değerlendirme yöntemleri: Puzolan içeren çimento danelerinin özgül yüzeyinin artış hızını belirlemek, puzolanın nitrik-floridrik bileşiminin çözülmesi esnasında ve 1 saatlik aşındırmanın sonunda çözünmeyen kalıntının erimesi sonucu oluşan ısıнын ölçülmesi vb.
- Mekanik değerlendirme yöntemleri: Puzolan malzemeler ile oluşturulan karışımların kalıplanarak mekanik dayanımlarını (serbest basınç vb.) ölçmek.
- Mikro yapının değerlendirilmesi yöntemleri: X ışını floresan spektrometresi, termogravimetrik analiz, diferansiyel termal analiz, X ışını difraktometresi, vb.

Kalsiyum hidroksit ile doğal puzolan arasında oluşan reaksiyonlar sonucunda genel olarak aşağıda belirtilen ürünler oluşabilir (Massazza, 1974)

- Kalsiyum alüminat hidrat (C_4ASH_x ; x değeri, 9- 13 arasında değişir),
- Kalsiyum karboalüminat (C_4ACH_{12}),
- Hidrate olmuş gehlenit (C_4ASH_8),
- Monosülfat kalsiyum alüminat, (C_4ASH_{12}),
- Etrejit ($C_6AS_3H_{32}$),
- Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H).

Kalsiyum hidroksit ile doğal puzolanlar arasındaki reaksiyon sonucunda oluşan bütün ürünler aynı zamanda oluşmayabilir. Kalsiyum hidroksit varlığı, hidrasyon reaksiyonunun derecesi, çevre koşulları ve puzolanın kimyasal ve mineralojik içeriği bu durumu etkileyebilmektedir.

2.2.5 Alkali Aktivatörler

Puzolan malzeme ile oluşturulmuş bir karışımın potansiyel reaktivitesini aktive etmek için; mekanik (öğütme), ısıl (yüksek sıcaklıkta kür etme), kimyasal (kimyasal aktivatör eklenmesi) yöntemler önerilmiştir (Regourd, 1980).

Silika ve alümina içerikli neredeyse her malzeme alkaliler kullanılarak aktive edilebilmektedir. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi amorf karakterli malzemeler

bir aktivatör vasıtasıyla aktive edilerek bir bağlayıcı meydana getirilebilmektedir. Böylece çimento kullanılmadan bağlayıcı özellik gösteren harçlar oluşturulabilmektedir. Gerçekleştirilen araştırmalar sonucunda, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, metakaolin, kaolinitik killer, cüruf-kırmızı çamur karışımları vb. malzemeler çeşitli aktivatörler kullanılarak aktive edilebildiği belirlenmiştir. Alkali aktivatör ile oluşmuş bağlayıcıların mekanik dayanımı, alüminosilikat malzemelerin yapısıyla alakalıdır. Genelde, doğal malzemelerden düşük dayanıma sahip ürünlerin oluşmaktadır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi kalsine malzemelerden ise genellikle daha yüksek dayanım elde edilmektedir. Puzolanik aktiviteye benzer şekilde, amorf alüminyum ve silis içeriği alkali aktivasyon reaktivitesini etkilemektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008).

Kimyasal aktivatör olarak genellikle alkali tuzlar ve kostik alkaliler kullanılmaktadır (Shi vd., 2003). Aktivatör olarak kullanılacak alkaliler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (M harfi, Na, K, Li gibi alkali metalleri sembolize etmektedir) (Glukovsky vd., 1980):

- Alüminatlar ($M_2O.nAl_2O_3$)
- Alüminosilikatlar ($M_2O.Al_2O_3.(2-6)SiO_2$),
- Kostik alkaliler (MOH),
- Silikatlar ($M_2O.nSiO_2$),
- Silikatsız güçlü asit tuzları (M_2SO_4),
- Silikatsız zayıf asit tuzları (M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_2PO_4).

Alüminosilikat malzemeler için genellikle NaOH, Na_2CO_3 , $Na_2O.nSiO_2$ ve Na_2SO_4 gibi alkali ürünler tercih edilmektedir. Alkali aktivasyonu gerçekleştirmek için en fazla tercih edilen aktivatörler ise cam suyu/sodyum silikat ($nSiO_2Na_2O$), hidroksitler (NaOH, KOH) ve potasyum cam suyudur ($nSiO_2K_2O$) (Shi vd., 2003; Pacheco-Torgal vd., 2008).

Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının parçalanması alüminosilikat malzemelerin alkaliler ile aktivasyonunun başlangıcıdır. Çözünmenin gerçekleşmesi ve bu bağların koparılması için alkali hidroksitlerden faydalanılmaktadır (Mustafa Al Bakri, 2011). Optimum alkali aktivatör miktarı için henüz standartlaşmış bir metot yoktur. Bu yüzden, bir madde alkalilerle aktifleştirilmek istendiğinde, ön çalışma olarak optimum alkali oranı belirlenmelidir. Anlaşılacağı üzere, aktivatör miktarı her çalışmada

farklılık gösterebilmektedir. Aktivatör oranının dayanım ve mikro yapısal gelişim üzerindeki etkisi net bir şekilde bilinmemektedir (Bernal, 2015).

Yoğun miktarda Si ve Al içeren doğal veya yapay puzolan malzemelerin alkali aktivasyonu ile meydana gelen, üç boyutlu polimerik zincir (Si-O-Al-O) yapısında olan bağlayıcı malzeme türüne “Geopolimer” denilir. Geopolimer, alkali içeriğindeki reaktif katının aktivasyonu ile oluşup sertleşen geniş bir bağlayıcı grubunu tanımlar. Polikondenzasyon reaksiyonları amorf inorganik alüminosilikatların üç boyutlu ağ yapılarını meydana getirmekte, bu durum da priz almayı ve dayanımın oluşmasını sağlamaktadır. Geopolimerlerin üretiminde, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi yapay puzolanlar ya da kaolin gibi doğal alüminosilikat malzemeler kullanılabilir. Üretilen bir geopolimer bağlayıcının özelliğini, üretimi için tercih edilen malzeme ve aktivasyon koşulları (aktivatör türü, kür sıcaklığı vb.) etkilemektedir (Schneider vd., 2011).

Geopolimerler ile geleneksel çimento hemen hemen benzer amaçlar için kullanılmaktadır. İki malzemenin davranışları aşağıda kıyaslanmıştır (Mahbob, 2014):

- Geopolimerleşme dehidroksilasyon yoluyla, çimento (C-S-H) hidrasyonla dayanım kazanmaktadır. Bu iki süreç birbirine zıttır. Ancak, her iki süreçte dayanım kazanması için SiO₂ içeren bağlar oluşmaktadır.
- Çimento kullanımının maliyeti farklılık gösterebilmektedir. Kalite, nakliye vb. durumlar bu maliyeti etkilemektedir. Geopolimerin üretimi için genellikle yapay puzolanlar gibi yan ürünler kullanılmaktadır. Yüksek performans alınsa da genel itibari ile geopolimer ile üretim çimento ile üretimden maliyetli olabilmektedir. Performans-maliyet analizleri her proje için farklı olabileceğinden, seçim için hesaplamalar doğru yapılmalıdır.
- Çimento içeriğinde geopolimerlerden farklı olarak fosfatlar, çeşitli küller vb. bulunmaktadır.
- Geopolimerler daha düşük karbon salınımı yaparlar ve sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlayabilmektedir. Çimento üretim sürecinde çevreye zarar veren faaliyetler (madencilik, yakma, kalsinasyon vb.) olabilmektedir. Geopolimer üretilirken özellikle atık madde azaltımı, depolama alanlarının boşalması gibi olumlu etkileri olabilmektedir.

- Alüminatların ve silikat hızlı bir şekilde sertleşmesine aktivatörler yardımcı olmaktadır. Temel elementlerden metal katyon yapısını oluşturmak için OH- reaktivite için bir katalizördür. Çeşitli puzolanlara alkali aktivatör eklendiğinde, oluşan bileşimler çabuk bir şekilde çözülmeaktadır. Bundan dolayı, oluşan jelin iyi bir kristalleşmiş yapıya ulaşması için gereken zaman kalmamıştır.

Alkali aktivatör kullanılarak aktive edilmiş ürünlerin davranışını etkileyen faktörler aşağıda özetlendiği gibidir (Balun, 2019):

- Eklenecek alkali aktivatörün cinsi,
- Eklenecek alkali aktivatörün konsantrasyonu,
- Kullanılacak hammaddenin reaktivitesi,
- Kullanılacak hammaddenin fizikokimyasal özelliği,
- Kür koşulları (kür süresi, kür sıcaklığı vb.),
- Alkali ortamın pH'ı.

Geopolimerleşme anında meydana gelen reaksiyonlar aşağıdaki adımlarda özetlenmiştir (Soutsos vd., 2016):

- Alüminosilikatın çözünmesi: Puzolanikler içerisinde mevcut olan alüminosilikatlara, pH'ı yüksek olan alkali aktivatörler eklendiğinde alüminosilikatlar çözünmektedir. Böylece alüminat, alüminosilikat ve silikat formda yapı oluşmaktadır.
- Jel oluşumu: Sulu faz çözünme gerçekleşirken yayılanları tutmaktadır. Böylece, oligomerleri uzun ağlar ve zincirler olan bir jel oluşmaktadır. Bu adımda hem gözenekli hem de sulu bir yapı oluşmaktadır.
- Polikondensasyon: Yeniden düzenlenme jel parçalarında gözlenmeye devam etmektedir. Yeniden düzenlenme daha büyük bir ağ oluşumuna neden olmaktadır. Üç boyutlu geopolimer yapı oluşumu ile bu süreç son bulmaktadır.

2.2.6 Puzolanların Kullanım Alanları

Puzolanlardan faydalanmak için değişik yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan üçü aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Gündeşli, 2008):

- Direkt olarak kalsiyum hidroksit ile karıştırılarak,
- Çimento üretimi sırasında portland çimentosu klinkeriyle birlikte öğütülerek,
- Beton karışımı hazırlandığı sırasında ya da beton karışımı gerçekleştirilmeden önce karışıma puzolan ilave ederek.

İri taneli olarak oluşan puzolanlar agrega olarak da değerlendirilebilmektedir (Aruntaş, 2006).

Alkalilerle aktive edilerek oluşturulan bağlayıcılar da keşfedildikten sonra, çok çeşitli inşaat projelerinde puzolanlardan faydalanılmıştır. İnşaat projelerinden bazıları şu şekildedir: depo yapıları, drenaj kollektörü, yem deposu, demiryolu şev betonu, yerinde dökme beton, çeşitli konut inşaatları, ağır yüklü kamyon trafiğine açık döşemeler (beton yol), petrol kuyuları, ön gerilmeli donatılı beton demiryolu traversleri, duvarcılık işlerinde kullanılmak üzere blok ya da yarı blok elemanlar. Puzolanların yapısal ve yapısal olmayan alanlarda kullanımları Çizelge 2.6'da özetlenmiştir (Krivenko, 1997).

Çizelge 2.6. Puzolanların yapısal ve yapısal olmayan alanlarda kullanımları (Krivenko, 1997)

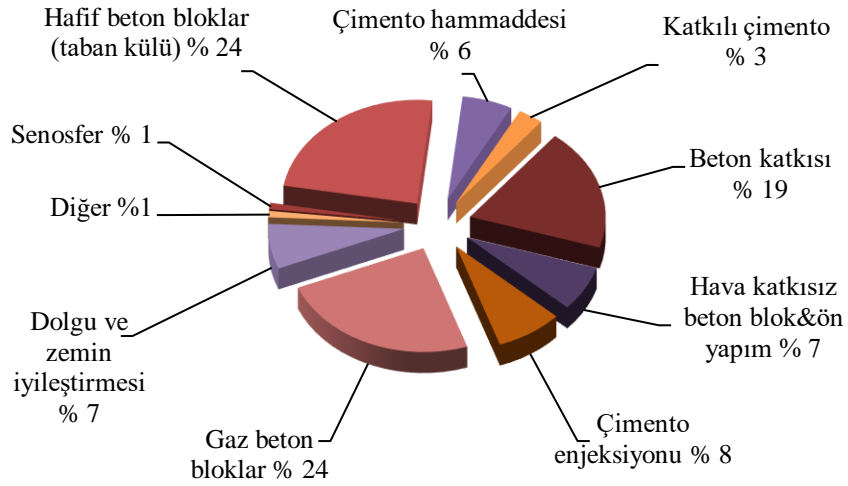
İnşaat Sektörü	Kullanım Alanı
Endüstriyel	Aside dayanıklı ya da dayanaksız yapı garajları, döşemeler, temeller, makine gövdeleri
Hidrolik	Çeşitli sulama sistemleri, enerji kırıcılar, dalgakıranlar, baraj gövdesi ve yüzeyi, kaplamalar
Konut	Prefabrik ve/veya yerinde üretim yapı elemanları, temeller, döşemeler.
Madencilik	Petrol kuyuları enjeksiyonları, çeşitli püskürtme beton uygulamaları, su yalıtımı uygulamaları, su penetrasyonunu engelleme, atık stabilizasyonu
Tarım endüstrisi	Çeşitli depolar
Yollar	Prefabrik ve yerinde dökme döşemeler, çeşitli sanat yapıları

Aruntaş (2006) uçucu küller hakkında yaptığı araştırmada uçucu küllerin kullanım alanlarını da değerlendirmiştir. Uçucu küllerin çeşitli özelliklerini

incelediğinde, bu puzolan türünün inşaat sektöründe verimli bir şekilde kullanılabileceğini belirtmiştir. Böylece hem hammadde ve enerji tüketimi konusunda tasarruf sağlanabildiğini hem de çevre kirliliğinin önlenmesinin mümkün olabileceğini belirtmiştir. Uçucu külün; agrega, beton, çimento, kerpiç, tuğla, yalıtım malzemesi, gaz beton vb. üretiminde, yol yapımında, baraj inşasında ve geoteknik alanındaki uygulamalarda değerlendirilebileceğini belirtmiştir. Uçucu küllerin inşaat sektöründe değerlendirilebileceği alanları Çizelge 2.7’de görüldüğü gibi bildirmiştir. Şekil 2.12’de ise İngiltere’de bulunan termik santrallerin çalışması sırasında oluşan uçucu küllerin nerelerde ve hangi oranlarda kullanıldığı görülmektedir (Aruntaş, 2006).

Çizelge 2.7. Uçucu küllerin kullanıldığı çeşitli alanlar (Aruntaş, 2006)

Malzeme	Kullanım Amacı/Yeri
Agrega	Çeşitli tane boyutlarında agrega olarak
Çimento	Hammadde, ikame ve katkı malzemesi şeklinde
Beton	İkame ve katkı malzemesi şeklinde
Tuğla vb.	Katkı maddesi şeklinde
Kerpiç	Bağlayıcı madde şeklinde
Çeşitli yapı malzemeleri	Harç, blok, duvar, panel, cam, beton boru, seramik, gaz beton, boya, plastik vb.
Çeşitli diğer yapılar ve uygulamalar	Yol, baraj, geoteknik uygulamalar vb.



Şekil 2.12. İngiltere’de bulunan termik santrallerin çalışması sırasında oluşan uçucu küllerin kullanım alanları (Aruntaş, 2006)

Avrupa ülkeleri için yapılan araştırmalarda “Yüksek Fırın Cürufplarının” oluşum aşamaları ve kullanım yerleri Çizelge 2.8’de görüldüğü gibidir (Euroslag ve Eurofer, 2012).

Çizelge 2.8. Yüksek fırın cüruflarının uygulama örnekleri (Euroslag ve Eurofer, 2012)

Cüruf Türü	Üretim Aşaması	Uygulama Örnekleri
Parça cürufu (hava soğutmalı yüksek fırın cürufu)	Öğütme ve eleme işlemleri Öğütülmemiş haliyle kullanım	-Hidrolik ve bitümlü bağlayıcı karışımlarında (yol, asfalt beton vb.), bağlayıcısız karışımlarda, atıksu arıtma işlemlerinde, demiryolu balast yapımında, dolgu işlemlerimde, çatı kaplama uygulamalarında ve zemin ıslahı projelerinde agrega olarak kullanımı -Taş yünü, cam (diğer bileşenler ile karıştırılarak) ve gübre imalatlarında kullanım
Granüle Yüksek Fırın Cürufu	Yüksek basınçlı ve büyük hacimde su spreyi kullanılarak eriyik cürufun hızlı bir şekilde söndürülmesi daha sonra granüle cürufun çimento inceliğine öğütülmesi işlemleri	-Hidrolik ve bitümlü bağlayıcı karışımlarında (yol, asfalt beton vb.), bağlayıcısız karışımlarda, dolgu inşaatında, kumlama işleminde, zemin ıslahı projelerinde agrega olarak kullanımı -Çimento ve diğer çeşitli hidrolik bağlayıcılar, beton, gübre, taş yünü ve cam (diğer bileşenlerle karıştırılarak) imalatlarında kullanım

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufları için verilen örneklerin çoğunda (Çizelge 2.7 ve Çizelge 2.8 gibi) diğer doğal ve yapay puzolanlar da değerlendirilebilmekte ve bunun için araştırmalar devam etmektedir.

2.3 Zemin Stabilizasyonu

Bir inşaat mühendisliği yapısı genellikle bir zemin üzerine teşkil edilmektedir. Bu durumda, zeminin yapılan yapıdan kaynaklı her türlü etkiye karşı koyabilmesi şarttır. Eğer bu zemin yapı için bir problem teşkil edecekse ya zayıf zeminin kazılıp tamamen kaldırılarak yerine problemi çözebilecek özellikte bir zemin getirilip sıkıştırılır ya da problem teşkil edebilecek zemine gelen etkiyi azaltmak için daha büyük ve maliyetli bir temel sistemi inşa edilir (Ingles ve Metcalf, 1973). Bu yöntemlere ek bir diğer yöntem zemin stabilizasyonudur. Zeminin stabilizasyonundaki (ıslahındaki, iyileştirmesindeki) temel prensip, zemindeki boşlukların çeşitli

yöntemler ile olabildiğince azaltılması, zeminde fazla miktarda bulunan suyun uzaklaştırılması, zeminin bir önceki halinden daha güçlü olmasının sağlanmasıdır (Sağlamer, 1985).

Zeminin zayıf performansı fiziksel, mekanik, hidrolik ve kimyasal olmak üzere çeşitli yöntemlerle artırılabilir. Zeminin taşıyabileceği yükü arttırmak, ani veya zamana bağlı yapabileceği oturma miktarını azaltmak, zeminden su geçişini azaltmak zemin stabilizasyon yöntemlerinin uygulanmasının temel nedenleridir. Zeminin özelliklerini iyileştiren yöntemler seçilirken zeminin tane çapına, zeminin kohezyon durumuna, su içeriğine, konsolidasyon potansiyeline ve içerisindeki organik madde oranına dikkat etmek gerekir (Yıldırım, 2002).

Zemin stabilizasyon uygulamaları, tasarlanan yapının inşası başlamadan önce yüksek bir masraf olarak algılanabilir. Fakat zemin stabilizasyon uygulamaları ile hem yapı daha güvenli bir yüzeye oturtulmuş olur hem de yapı için seçilecek temel sistemi gibi kısımların maliyetini azaltır.

Zemin stabilizasyonundaki temel amaçlar şu şekildedir:

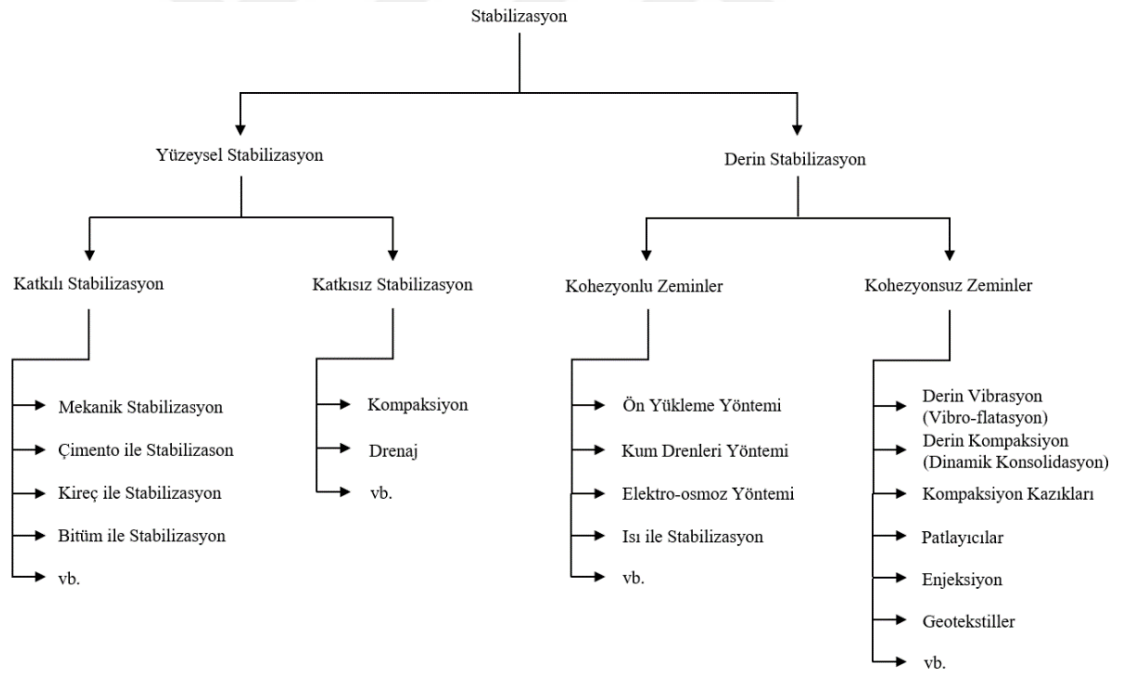
- Taşıma gücü açısından zayıf olan zeminlerin taşıma kapasitesini istenilen seviyeye çıkarmak,
- Toplam ve farklı oturma değerlerini izin verilebilir oturma değerlerine getirmek,
- Zeminin geçirimsizlik katsayısını azaltmak,
- Konsolidasyonu hızlandırmak,
- Zemin sıvılaşma riskini ortadan kaldırmak,
- İstinat duvarlarının dayanımını ve dayanıklılığını artırmak,
- Dolgu ve şevlerin stabilitesini artırmak.

Zemin stabilizasyon uygulamalarıyla aşağıdaki kazanımlar elde edilebilecektir (Çalık, 2012):

- Zeminin taşıma gücü artırılır,
- Temel zeminin oturma potansiyeli azaltılır,
- Temel zeminin oturma potansiyeli azaldığından yapıda oluşabilecek deformasyonlar azaltılır,
- Su geçirimsizliği azaltılır,

- Yeraltı suyu daha kolay drene edilir,
- Boşluk suyu basıncı azaltılır,
- Zeminlerin kabarma (şişme) ve büzülme potansiyeli azaltılır,
- Dolguların, eğimli zeminlerin (yamaç gibi) ve toprak barajların stabilitesi artırılır.

Bir Geoteknik mühendisinin, yapının üzerine oturacağı zeminin mühendislik özelliklerini çok iyi bir şekilde belirlemesi gerekmektedir. Tespit edilen mühendislik özelliklerine göre, taşıma-oturma-ekonomi koşullarını da dikkate alarak, zemin stabilizasyona ihtiyaç duyup duymadığı, eğer ihtiyaç var ise hangi stabilizasyon yönteminin efektif olduğunu belirlemelidir. Çünkü farklı zemin türleri için farklı stabilizasyon teknikleri gerekmektedir. Ayrıca, her stabilizasyon yönteminin amacı da birbirinden farklı olabilmektedir. Uzuner (2016b) zemin stabilizasyon tekniklerini Şekil 2.13'te görüldüğü gibi bildirmiştir.



Şekil 2.13. Zemin stabilizasyonu teknikleri (Uzuner, 2016b)

Stabilizasyona tabi tutulması gerek zeminlerin özellikleri aşağıda özetlenmiştir (Özdemir ve Özdemir 2006):

- Yumuşak (taşıma gücü düşük) killere,

- Gevşek (taşıma gücü düşük) kumlar,
- Turbalık zeminler,
- Bataklık zeminler,
- Yer altı su seviyesinin yüksek olduğu zemin tabakaları,
- Rastgele (az sıkıştırılmış ya da hiç sıkıştırılmamış) oluşturulan dolgular.

Zemin stabilizasyon uygulamaları zeminin türü ve stabilizasyonun hangi amaç için yapılacağı dikkate alınarak seçilmelidir. Bunun için literatürde yol göstermek amacıyla bazı çalışmalar mevcuttur. Çizelge 2.9'da farklı zemin türleri için hangi zemin stabilizasyon yönteminin daha uygun olabileceği önerilmiştir (Hunt, 1986; Hunt, 1994). Ayrıca Çizelge 2.10'da ise yine benzer bir amaç için oluşturulmuş U. S. Army Corps. of Eng. (2003) tarafından hazırlanmış hangi amaç için hangi stabilizasyon yöntemini seçebileceğimizi öneren bir çalışma yapılmıştır.

Çizelge 2.9. Farklı zemin türleri için farklı stabilizasyon metotları (Hunt, 1986; Hunt, 1994)

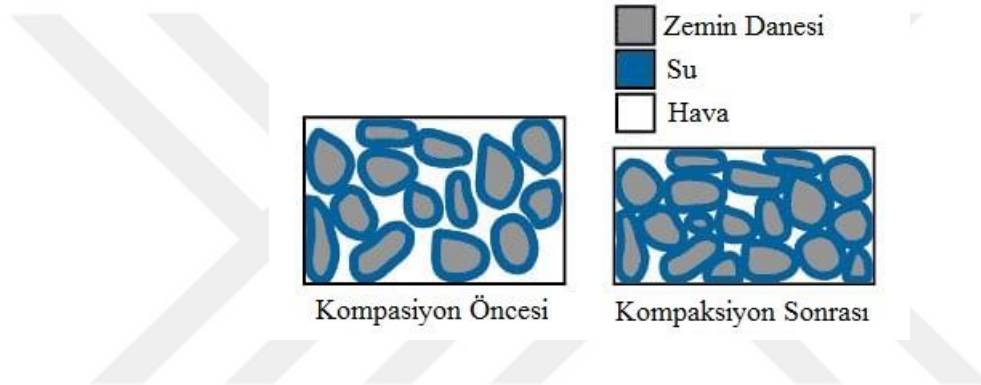
Zemin Türü		Önerilen Zemin Stabilizasyon Metotları
Organik zemin	Sığ	Kazı ve geri dolgu, geotekstil
	Derin	Kum kolonlar, sürşarj, geotekstil
	Tabakalı	Dinamik kompaksiyon, patlatma tekniği, sürşarj, kompaksiyon enjeksiyonu, kum ve taş kolonlar
Dolgu	Sığ	Kazı ve Geri dolgu
	Derin	Kum kolonlar, dinamik kompaksiyon
Yumuşak kil	Sığ	Kazı ve geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum veya kireç kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, kompaksiyon enjeksiyonu, dinamik kompaksiyon, kum, taş ve kireç kolonlar
Killer		Kimyasal (kireç) stabilizasyonu, mekanik stabilizasyon, termal (dondurma) işlem, geosentetik, elektro-osmoz, drenaj
Gevşek silt	Sığ	Kazı ve geri dolgu, bazı katkıları
	Derin	Sürşarj, dinamik kompaksiyon, taş kolonlar, vakum kuyuları, elektro-osmoz
Gevşek kum	Sığ	Kimyasal (çimento, bitüm vb.) stabilizasyon, dinamik kompaksiyon
	Derin	Vibrokompaksiyon, dinamik kompaksiyon, vibroflasyon, enjeksiyon, drenaj kuyuları, taş kolonlar, termal (dondurma)
Şişen zemin		Kimyasal (kireç, çimento vb.) stabilizasyon, drenaj
Sıvılaşılabilen zemin		Taş kolonlar, dinamik kompaksiyon, drenaj, enjeksiyon
Çatlaklı kaya		Enjeksiyon, püskürtme beton, ankraj, yüzey altı yatay drenaj

Çizelge 2.10. Farklı amaçlar için farklı stabilizasyon metotları (U. S. Army Corps. of Eng., 2003)

Stabilizasyonun Hangi Amaç için Yapıldığı	Önerilen Zemin Stabilizasyon Metotları
Farklı oturmanın, büyük miktarlarda deformasyonun ve kırılmanın oluşabileceği bir yapıda bu problemleri ortadan kaldırmak	-Jet grout -Kompaksiyon enjeksiyonu -Mini kazıklar
Şişme potansiyeli yüksek zeminlerin şişme davranışını azaltmak	-Kimyasal (çimento, kireç vb.) stabilizasyonu -Mekanik stabilizasyon -Drenaj
Zeminin geçirimsizlik katsayısını ve borulanmayı azaltmak	-Kompaksiyon enjeksiyonu -Penetrasyon enjeksiyonu -Palplanş perde
Sert zeminlerdeki ve kayalardaki çatlaklardan ve bileşim yerlerinden su sızıntısını engellemek	-Kompaksiyon enjeksiyonu -Geosentetik
Sıvılaşma riskini ve deplasmanlar azaltmak	-Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon -Vibrokompaksiyon -Derin dinamik kompaksiyon -Jet grout -Granüler kolonlar (taş, kum ve çakıl) -Kompaksiyon enjeksiyonu
Ani (ilk) oturmaları azaltmak	-Granüler kolonlar (taş, kum ve çakıl) -Vibrokompaksiyon -Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon -Derin dinamik kompaksiyon -Kompaksiyon enjeksiyonu -Jet grout
Şev stabilitesini artırmak	-Kompaksiyon enjeksiyonu -Çakıl drenler -Granüler kolonlar (taş, kum ve çakıl) -Payanda dolgusu -Jet grout -Zemin çivi ve vidaları
Konsolidasyon oturmalarını azaltmak	-Jetgrout -Kompaksiyon enjeksiyonu -Sürşarj (Ön yükleme) -Elektro-osmoz -Granüler kolonlar (taş, kum ve çakıl) -Sürşarj dolgulu veya dolgusuz yüzey drenler
Erozyon riskini azaltmak	-Kompaksiyon yöntemleri -Mekanik stabilizasyon -Bioteknik stabilizasyon
Göçen zeminlerdeki problemlerin çözümü	-Enjeksiyon -Derin dinamik kompaksiyon -Vibrokompaksiyon

2.3.1 Kompaksiyon Metodu

Kompaksiyon (sıkıştırma) yöntemi, zeminin tabakalar halinde serilmesi ve daha sonra bir enerji verilerek (titreşim, silindirme vb.) sıkıştırılması ile gerçekleşmektedir. Kompaksiyon işlemine maruz kalan zeminin daneleri arasındaki boşluk azalmaktadır. Pratik olarak zemin daneleri ve zeminin içinde bulunan su sıkışmaz olduğundan, bu işlemde ya hava sıkışmaktadır ya da hava zemin içinden dışarı çıkmaktadır. Bu yöntemdeki sıkışma kısa sürede (ani) gerçekleşmektedir (Uzuner, 2016a). Kompaksiyon öncesi ve sonrası bir zemin kesitindeki durum Şekil 2.14’te görülmektedir (DeJong-Hughes, 2001).



Şekil 2.14. Kompaksiyon öncesi ve sonrası durumu (DeJong-Hughes, 2001)

Daneler, uygulanan enerji altında hareket ederek yakınlaşırlar. Bir zeminin kompaksiyon ölçütü o zeminin kuru yoğunluk veya kuru birim hacim ağırlığı ile ölçülebilmektedir. Kompaksiyonu etkileyen en önemli faktörler ise uygulanan enerjinin büyüklüğü, zemin içindeki su miktarına ve zeminin türüdür. Zemin içerisinde bulunan su miktarı, belli bir orana kadar, zemin daneleri arasındaki sürtünmeyi azaltmaktadır. Bu durumda zemin danelerinin daha iyi sıkışmasını sağlamaktadır. Fakat su miktarı belli bir orandan sonra, suyun sıkışmaz olduğundan, kompaksiyon işlemini zorlaştırmakta danelerin birbirine yaklaşmasını engellemektedir. Suyu doymuş zeminlerde, uygulanan enerji hidrostatik basınçların artmasına neden olmakta ve zemin sıkışmasına engel olmaktadır. Bir zeminin en iyi sıkıştığı su içeriği olan optimum su içeriğini belirlemek için proktor (standart ve modifiye) deneyleri yapılmaktadır. (Uzuner, 2016a).

Kompaksiyon yöntemi sonucunda aşağıdaki kazanımlar elde edilmektedir (Uzuner, 2016a):

- Zeminin taşıma kapasitesi artırılır,
- Zeminin geçirimsizlik katsayısı azaltılır,
- Zeminin çeşitli etkiler (sabit, hareketli, dinamik yük) altında yapacağı oturma miktarı azaltılır.

Kompaksiyon yöntemi ile ayrıca, istenmeyen hacim değişikliklerini kontrol altına alınır, şişme ve büzülme davranışları azaltılır, don etkisine olan dayanıklılık artırılır. Kompaksiyonun çok çeşitli uygulama alanı vardır. Hem derin hem de yüzeysel kompaksiyon uygulamaları ile zemin stabilizasyonu gerçekleştirilmektedir. Kompaksiyon yönteminin uygulandığı örneklerden bazıları; çeşitli dolgular, ulaşım yapılarının temel ya da alttemel dolguları, toprak barajlar, akarsu seddeleri, su bentleri şeklinde sıralanabilir.

Genellikle, yol/havaalanı temel/alttemel ve kaplamalarının, çeşitli dolguların vb. uygulamalarında kullanılan kompaksiyon yöntemi yüzeysel kompaksiyon olarak isimlendirilebilmektedir. Yüzeysel kompaksiyonda, silindirler ve vibratörler (silindir, plaka, kiriş vb.) kullanılmaktadır. Silindirler çok çeşitlidir. Bunlardan en çok bilinenleri; düzayaklı silindirler, keçi ayaklı silindirler, lastik tekerlekli silindirler ve titreşimli silindirlerdir. Düzayaklı silindirlerde, silindir biçimli büyük tekerlerin tüm yüzeyi zemin ile temas halindedir. Genellikle kohezyonsuz zeminler için uygundur. Ayrıca asfalt tabakalarının sıkıştırılmasında da kullanılmaktadır. Lastik tekerlekli silindirler, çok sayıda fakat her biri arasında belli bir miktar mesafe olan sıkıştırma makinasıdır. Genellikle kohezyon içeriği fazla olan zeminler için uygun olan bu silindir kohezyonsuz zeminlerde de kullanılabilir. Keçi ayaklı silindirlerde, silindir şeklinde çelikten yapılmış bir gövde üzerinde çok sayıda çıkıntı bulunmaktadır. Bu çıkıntılar zemin yüzeyine girip çıkmakta, temas eden tüm yüzeyle birlikte zemin sıkıştırılmaktadır. Bu silindir ile yapılan kompaksiyonda sıkıştırma etkisine ek olarak zemini adeta yoğurmaktadır. Keçi ayaklı silindirler kohezyonlu zeminler için uygun bir sıkıştırma aracıdır. Bir yoğurma etkisi yaptığından, kohezyonlu zeminlerde hava çıkışını ve danelerin hareketini kolaylaştırmaktadır. Titreşimli silindirler ise kohezyonsuz zeminler için uygun bir sıkıştırma aracıdır. Kohezyonsuz zeminlerin titreşimli yükler altında iyi sıkıştığı düşünüldüğünde bu araç ile kohezyonsuz zeminler çok iyi bir şekilde sıkıştırılmaktadır. Silindirleme ile birlikte bu araçların oluşturduğu titreşim etkisi, zeminin sıkışmasını sağlamaktadır (Uzuner, 2016a; Özyayın, 2005).

Yüzeysel kompaksiyon için kullanılan çeşitli sıkıştırma araçları Şekil 2.15'te görüldüğü gibidir.



Şekil 2.15. Yüzeysel kompaksiyon için kullanılan çeşitli sıkıştırma araçları (Anonim, 2019f)

Zeminin daha derin tabakalarını etkilemek ve daha yüksek enerjiler ile sıkıştırma yapmak istendiği zaman dinamik kompaksiyon yöntemini kullanmak gerekmektedir. Bu yöntem suya doymun olmayan zeminlerde, özellikle uygun bir dolgu zemini hazırlamak istendiğinde tercih edilmektedir. Dinamik kompaksiyon yönteminde kullanılması gerekli temel ekipmanlar, ağır mobil bir vinç ve değiştirilebilir ağırlıklardır. Uygulama, özel olarak tasarlanmış vinçler vasıtası ile belirli bir ağırlığı belirli bir yükseklikten serbest düşüş ile zemin yüzeyine bırakılması ile gerçekleştirilmektedir. Bir ve birkaç vuruşla gerekli sıkıştırma sağlanmaktadır. Dinamik kompaksiyon uygulaması Şekil 2.16'da görülmektedir.



Şekil 2.16. Dinamik kompaksiyon uygulaması (Anonim, 2019g)

2.3.2 Drenaj

Zemin ortamında bir problem oluşmasına en çok suyun varlığı neden olmaktadır. Danelerin sıkışmaması, kaldırma kuvveti, sıvılaşma, boşluk suyu basıncı, yapılara ek basınç vb. gibi problemler suyun varlığı ile oluşmaktadır (Cedergren, 1989).

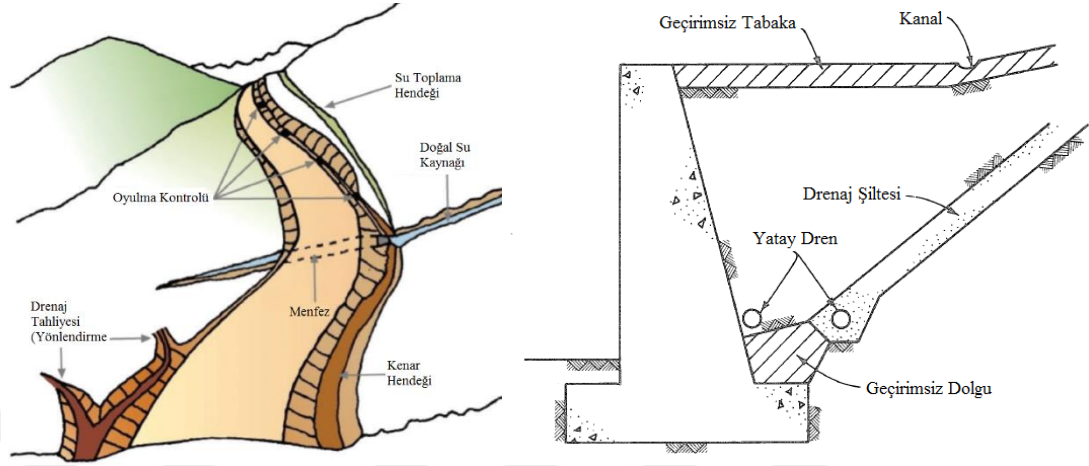
Yer altı suyu varlığının zemin ortamında neden olduğu başlıca problemler aşağıdaki belirtilmiştir (Cedergren, 1989):

- Kılcal basınç,
- Şev kayması (göçmesi),
- Rezervuar, sedde ve barajlarda borulanma,
- Hidrolik eğim kritik değere ulaştığında duraylılık bozulması ve kaynama oluşması,
- Toprak kayması,
- Yol ve havaalanı gibi yapıların dayanımının ve dayanıklılığın azalması,
- Askıda bulunan suyun neden olduğu göçmeler,
- Hidrostatik su basınçlarının neden olduğu istinat duvarı göçmeleri,
- Aşırı boşluk suyu basıncının sebep olduğu göçmeler,
- Oluşan fazla su basınçlarıyla kalkan çeşitli kaplamalar,
- Gevşek granüle zeminlerde dinamik yüklerin etkisiyle oluşan zemin sıvılaşması.

Genel olarak, yerüstü veya yeraltı sularının toplanarak zeminden uzaklaştırılması veya zemine girişinin engellenmesi drenaj olarak tanımlanır (Kara, 2012). Drenaj uygulamasının temel amaçları; sızıntı ve boşluk suyunun oluşturduğu basınçların olumsuz etkisini gidermek, zeminin içindeki suyun zeminden çıkışını kolaylaştırmak, zeminin taşıma kapasitesini arttırmak, don olayının olumsuz etkisini gidermek, konsolidasyon sürecini hızlandırmak (Çınar, 2014). Drenaj uygulaması, bir inşaat mühendisliği yapısının çalışma sahasının daha uygun bir hale getirmek için de gerçekleştirilir. Bina temellerinde, dolgularda, şevlerde, dayanma yapılarında, karayolunda, tünellerde vb. pek çok uygulamada drenaj yöntemi gerçekleştirilmektedir.

Drenaj yapıları, genellikle yüzeysel drenaj ve yüzey altı drenaj olmak üzere iki sınıf altında toplanabilir. Yüzey altı drenajlar dren şiltesi, dren borusu, dren hendekleri

gibi yapılar ile gerçekleştirilir. Yüzeysel drenaj ise drenaj hendeği, düşüm oluğu, bordür hendeği, menfez vb. gibi yapılar ile gerçekleştirilir (Tunç, 2001). Drenaj uygulamalarına dair bazı örnekler Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Bazı drenaj yöntemleri (ERA, 2016; Anonim, 2019h)

2.3.3 Mekanik Stabilizasyon

İki ya da daha fazla zemin türünün belirlenen oranlarda karıştırılarak arzu edilen özellikleri gösteren bir zemin yapısı oluşturulmasına mekanik stabilizasyon denilir (Aytekin, 2004). Mekanik stabilizasyon yöntemiyle çeşitli etkilere daha dayanıklı ve stabil yapıda zemin formasyonu oluşturulmuş olur (Tunç, 2002). Mekanik stabilizasyon uygulamalarında, genellikle ince taneli zeminlere belirlenen oranlarda kaba taneli (granüler) zeminler katılmaktadır. Bu sebeple mekanik stabilizasyon yöntemi granüler stabilizasyon olarak isimlendirilebilir. Ayrıca, mekanik stabilizasyon yönteminde zeminin bir kısmı uzaklaştırılır ve kalan zemine kompaksiyon yöntemi uygulanır. Mekanik stabilizasyon yöntemi uygulanırken uygun granülometri seçimi önemlidir (Uzuner, 2016b).

Mekanik stabilizasyon yöntemi arazide uygulanırken, öncelikle arazide var olan zemin kazınır, daha sonra karışım yapılarak zemin ıslah edilir ve yeniden yerine yerleştirme işlemi ile uygulama sonlandırılır (Edil vd., 2002). Mekanik stabilizasyon yöntemi uygulanırken, birbirinden farklı özellikleri olan zeminleri içeren zemin karışımı olabildiğince homojen olmalıdır. Zemini karıştırma işlemi çalışma alanında, sabit ya da hareketli bir plentte ya da malzeme ocağında yapılabilmektedir.

Karıştırılarak oluşturulmuş yeni zemin serilerek istenen veya maksimum yoğunlukta kontrollü bir şekilde sıkıştırılır.

Mekanik stabilizasyon yönteminin kullanım nedenleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Winterkorn ve Fang, 1975):

- Zeminin gradasyonunu istenen değerlere getirmek,
- Zeminin likit limitini ve plastisite indisini düşürmek,
- Zeminin geçirimsizlik katsayısının istenen değerlerde olmaması,
- Çeşitli etkiler altında oluşabilecek oturma değerlerini azaltmak,
- Donma-çözülme etkilerini azaltmak,
- Zeminin dayanımını ve durabilitesini artırmak,
- Zemindeki kapillariteyi azaltmak.

Mekanik stabilizasyon sonucu oluşturulan yeni zeminin gradasyonu ve ince tanelerinin plastisite özelliği mekanik stabilizasyonun iyi ya da kötü olduğunun bir ölçütüdür. Bu yöntemde, kohezyonlu zeminlerin kuru halde iken ufalanmalarının zor olduğundan, homojen bir karışım elde etmek için, çeşitli araçlar kullanılarak ufalanmaları sağlanmalıdır. Karışım zeminlerde, genel olarak, zeminlerin kaba daneleri stabilize ve içsel sürtünme açısını, ince taneler kohezyonu daha çok etkilemektedir. İnce taneler kaba tanelerin etrafını kaplayarak ve/veya bu taneler arasında köprü görevi görerek zeminin rijitliğini ve stabilitesini artırmaktadır (Tunç, 2002). Karışım zemininde maksimum dane boyutunun çok büyük olması işlenebilirliği azaltmaktadır. Ayrıca kaba kısım fazla ise segregasyona olma ihtimali da artmaktadır. Öte yandan, karışım zemininde ince malzemen fazla ise su içeriklerinde karışım oluşturmak zor olmakta, kuru halde ise topaklanmalardan karışım homojen olmamaktadır (Rodriquez vd., 1973). Bundan dolayı, büzülme, şişme (kabarma), taşıma gücünde değişim, su tutma potansiyelinde değişim vb. gibi etkilerden dolayı ince daneli kısmın likit limit ve plastisite indisi değerleri standartlarda öngörülen değerlerde olmalıdır.

2.3.4 Patlayıcılar ile Stabilizasyon

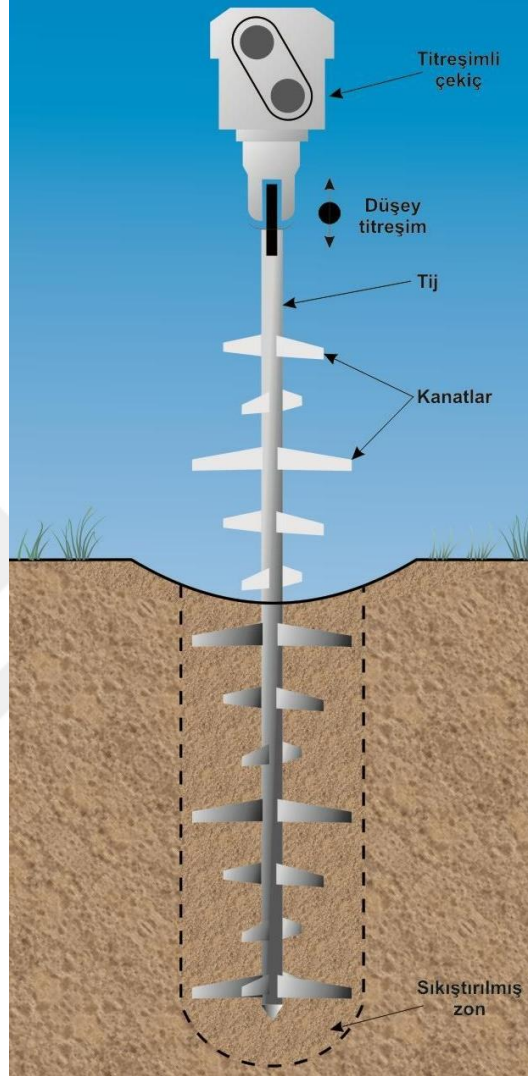
Patlayıcılar ile zemin iyileştirme yöntemi geleneksel yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntemde, projeye uygun olarak seçilmiş patlayıcılar zemin tabakaların içine belli aralıklarla yerleştirilip belirli bir düzende patlatılır. Patlayıcılar, sondaj ya da basınçlı

su ile açılmış kuyular içine 3-6 m düşey aralıklarla yerleştirilirler. Açılan kuyular arasındaki mesafe ise genellikle 5-15 m arasındadır. Ayrıca patlama işlemi öncesi arka dolgu yapılmalıdır. Patlama sonucu hızlı basınç dalgaları oluşmaktadır. Bu basınç dalgaları zemini daha küçük parçalara ayırarak sismik bir etki ile gevşek durumdaki kohezyonsuz zeminlerin sıkışmasını sağlamaktadır. Etkin, kolay, zeminin çok derin kesimlerinde kullanılabilme ve nispeten ekonomiklik bu zemin ıslahı yönteminin avantajlarından. Fakat uygulama sonrası etkinlik derecesini önceden belirleyememek ve çevrede varsa diğer yapılara dinamik etki oluşturarak zarar verebilmek yöntemin önemli dezavantajlarından. Patlayıcılar ile zemin stabilizasyonu %5'den az kil ve %20'den az silt zemin ihtiva eden gevşek kum zeminler için daha uygun olduğu söylenebilir. Kil miktarı patlatmanın etkinliğini belirlemektedir. Ayrıca, bu stabilizasyon yönteminin kuru zeminlerde etkili olabilme ihtimali varken kısmen doymuş zeminlerde oluşan kılcal çekim ve gaz kabarcıklarından dolayı etkinliğini yitirebilir. Genellikle tamamen doymuş zeminlerde bu yöntemin kullanılması önerilir. Patlatma anında oluşan şok dalgaları, tam doymuş ve gevşek kumlarda, geçici bir sıvılaşmaya neden olarak danelerin daha sıkı bir şekilde gelmesini sağlamaktadır (Çetin, 2019). Gevşek durumda bulunan yüzeye yakın zemin tabakaları, çeşitli yüzeysel kompaksiyon yöntemlerinden biri ile sıkıştırılabilir.

2.3.5 Vibrokanat (Vibrotij)

Vibrokanat yöntemi ile zemin stabilizasyonunda, titreşimli kazık çakma çekici kullanılarak zemin içindeki uzun bir probun (tijin) titreşmesi sağlanmaktadır. Genellikle granüler zeminlerin derin kompaksiyonu için uygun bir stabilizasyon yöntemidir (Çetin, 2019). Prob belli aralıklarla yerleştirilmiş kanatlara sahiptir. Titreşimi sağlayan kazık çakma çekicinin hangi titreşim frekansında çalışacağını belirlemek son derece önemlidir. Çünkü titreşim frekansı zeminin sıkışmasını önemli ölçüde etkilemektedir. Titreşim genliklerini artırarak zeminin daha iyi ve hızlı sıkıştırılması sağlanabilir (Massarch, 1991). Sıkıştırılması planlanan derinliğe kadar indirilen prob titreşirken yukarıya doğru hareket eder. Bu işlem ile zeminin sıkışması sağlanmış olur. Oluşturulan titreşim düşey yöndedir. Nispeten hızlı bir yöntem olmasına karşın etkilediği zemin hacmi düşüktür (Brown, 1977). Vibrokanat yönteminde kanat aralığı, tij boyu, kanat boyu vb. değişik özelliklerde olabilir. Bu yüzden vibrokanat sistemleri uygulamada farklı isimler alırlar. Örneğin; Franki Y-

Probe, Vibro-Wing, Terraprobe vb. gibi farklı probalar kullanılabilmektedir Şekil 2.18’de vibrokanat yönteminde kullanılan probun genel itibari ile ayrıntıları görülmektedir (Çetin, 2019).



Şekil 2.18. Vibrokanat probunun (tjinin) ayrıntıları (Çetin, 2019)

2.3.6 Vibrokompaksiyon (Vibroflotasyon)

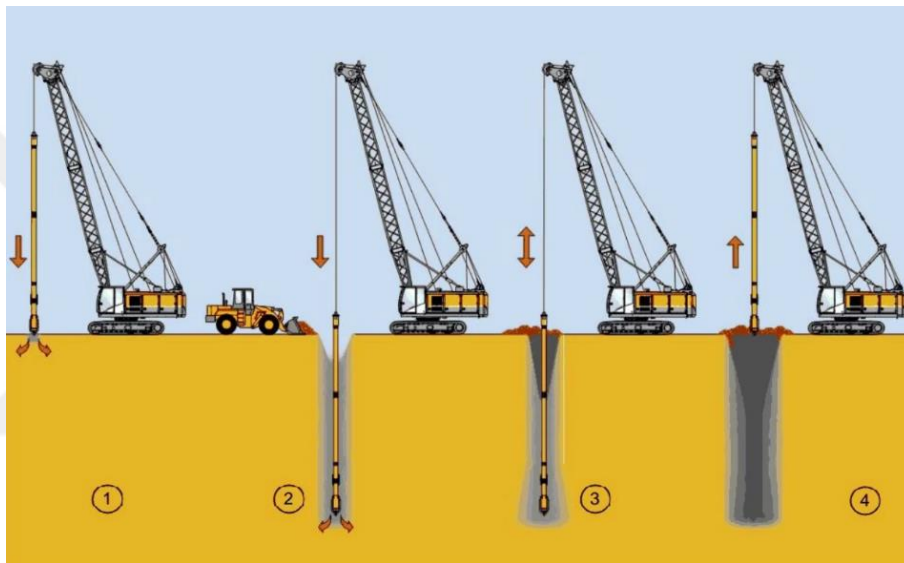
Vibrokompaksiyon (vibroflotasyon) ile zemin ıslahı yöntemi derin sıkıştırma ile zeminin sıkıştırılmasıdır. Bu stabilizasyon yönteminde, genel itibari ile özel olarak üretilmiş bir vince bağlı, 2.5 m uzunluğunda, 0.3-0.5 m çapında, büyük silindirik bir vibroflot (vibratörlü prop) kullanılır (Öksüz, 2006).

Uygulama adımları genel itibari ile aşağıda sıralandığı şekildedir (Braja, 1999):

- Projeye uygun bir vibroflot ve vinç seçilir,
- Vibroflot ile vinç bağlantısı yapılır,
- Vinç yardımı ile vibroflot zemin stabilizasyonunun yapılacağı yere getirilir,
- Vibroflot, ucundaki su jeti açılarak titreşimle beraber zemine indirilir (Bu aşamada su yerine basınçlı hava da tercih edilebilmektedir),
- Vibroflot, sıkıştırılması planlanan derinliğe geldiğinde suyun akış hızı düşürülür ve suyun bir kısmı yukarı yönlü verilir,
- Vibroflot planlanan derinlikte iken dolgu malzemesi (kum, kırma taş vb.) eklenebilir,
- Suyun akışından dolayı, eklenen dolgu malzemesi zeminin uç noktalarına ulaşır,
- Bu işlem devam ettiğinde, vibroflot çevresinde belirli bir alanda sıkışma gerçekleşir. Titreşim, zeminin sıkışması tetikleyen geçici bir sıvılaşma bölgesi meydana getirir,
- Adım adım sondanın yukarı çekilmesi ile açılan sondaj kuyusunun tamamına sıkıştırma işlemi uygulanır.

Vibrokompaksiyon yöntemiyle zemin stabilizasyonu genellikle gevşek kum zeminleri gibi kohezyonsuz zeminlerde oldukça etkilidir. Yeraltı su seviyesinin varlığı yöntemin etkinliğini artırır. İnce daneli zeminlerin varlığı sıkışmayı olumsuz etkilemektedir. Vibrokompaksiyon yönteminin daha etkin olması için, zeminin ince daneli malzeme oranının %20'den az olması, ayrıca içeriğinde %3'den az kil bulundurması önerilmektedir (Bell, 1993). Ayrıca sert zeminler için de bu yöntemi kullanmak hem kolay hem de ekonomik olmayacaktır. Vibrokompaksiyon yöntemini çok daha farklı yöntemler ile yapılabilir. Bunlardan biri direk güç kompaksiyonudur. Sıkıştırılması planlanan derinliğe kaplama borusu ve vibratör indirilir. Uç kısma kum yerleştirilir. Basınçlı hava verilerek kaplama borusu yavaşça yukarıya doğru çekilir. Daha sonra, boru vibrasyonla birlikte tekrar aşağıya doğru itilir. Titreşim ve basınçlı hava kumlu malzemenin sıkışmasını sağlayarak geniş bir ampül biçimini almasını sağlamaktadır. Tekrar eden bu işlemlerden sonra yüzeye varılır. Yüzeye varıldığında sıkıştırma işlemi tamamlanmış olur (Önalp, 1983).

Vibrokompaksiyon yönteminde vibroflot yukarı doğru çekildiği esnada alttan ya da üstten besleme metodu ile kum veya çakıl gibi granüler zemin eklenebilir. Ayrıca ıslah edilecek zeminin kendisi de kullanılabilir. Eklenen malzemeye göre oluşan kolon formları değişik isimler alabilir. Örneğin; eklenen malzeme kırmataş (çakıl) ise oluşan kolon formu taş kolon denilmektedir. Aynı şekilde, kum zemini eklendiğinde kum kolon olarak isimlendirilebilir. Oluşturulan taş kolon ve kum kolon gibi kolon formları hem zemini rijitleştirmiş hem de zemindeki suyun çıkışını kolaylaştırmış olacaktır (Sondermann ve Wehr, 2004). Vibrokompaksiyon yönteminin uygulama aşamaları Şekil 2.19’da görüldüğü gibidir (Bauer Maschinen GmbH, 2012).



Şekil 2.19.Vibrokompaksiyon yönteminin uygulama aşamaları (Bauer Maschinen GmbH, 2012)

2.3.7 Zemin İçerisinde Çeşitli Kolon Formlarının Oluşturulması

Zemin ortamına gelen çeşitli etkilere (statik ve dinamik yükler gibi), kendi başına veya zeminle birlikte karşı koyan rijit kolon formları zemin içerisine inşa edilerek, zemin ıslah edilebilmektedir. Zemin içine inşa edilen rijit kolon formları tasarlanırken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlar; taşınması gereken proje yükü, zemin ve rijit kolonun yük paylaşım oranı, kolonun ve zeminin rijitliğidir. Ayrıca, toplam kolon enkesit alanı ve boyu, yapım yöntemine göre yer değiştiren veya çıkarılan zemin miktarı da önemli parametrelerden bazılarıdır.

Tarihte muhtemelen, zemin içerisine bir kolon formu oluşturulması, ahşaptan imal kazık formlarının zemine çakılması ile başlamaktadır. Ahşap kazıklara uygulanan

emprenye ile bu kazıkların ömürleri artırılmış zararlı etkilere karşı zarar görmesi önlenmiştir. Farklı tiplerde rijit kolon formları vardır. Günümüzde, bunlardan en çok bilinenlerinden bazıları:

- Forek kazık,
- Mini kazık,
- Derin karıştırma kolonları,
- Taş kolonlar,
- Kum kolonlar,
- Jet grout.

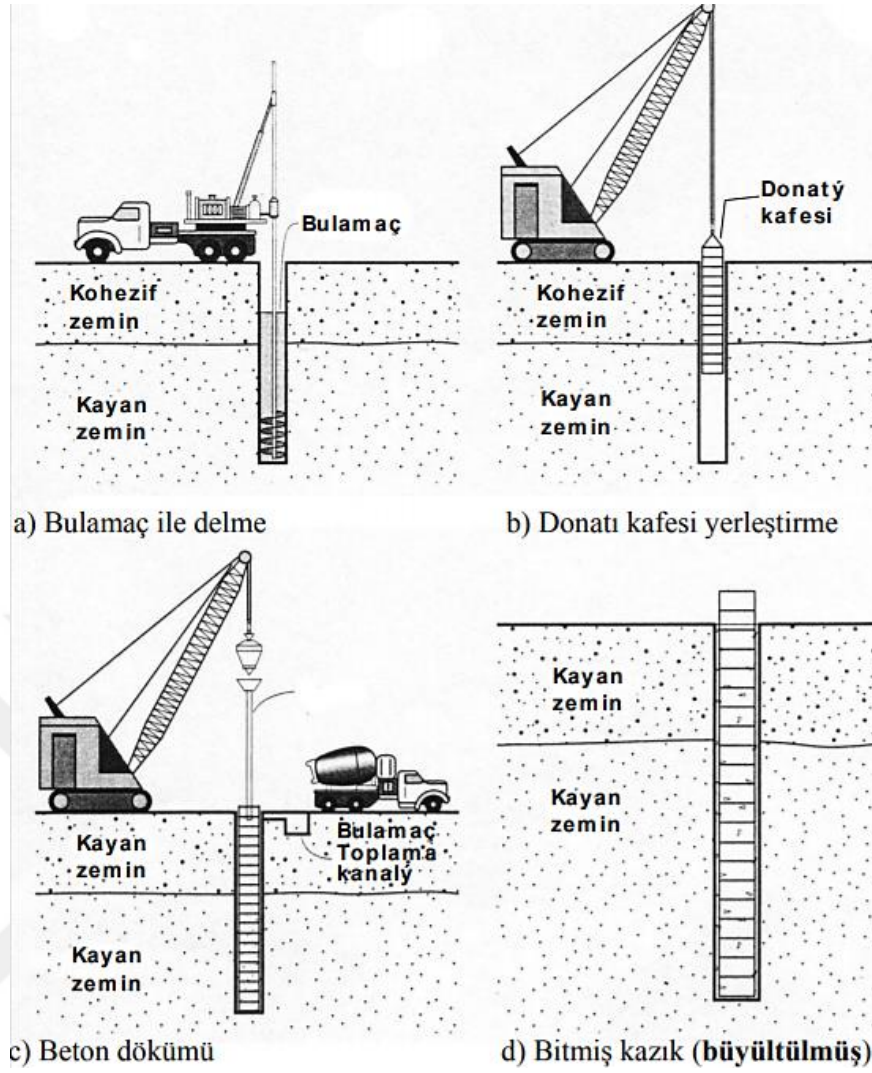
Ülkemizde en popüler kazık türü betonarme kazıklardır. Betonarme kazığın üretim durumuna göre iki kısma ayrılabilir. Zemine inşa edileceği yere getirilmeden önceden oluşturulan kazıklara “çakma (betonarme) kazık” denilir. Zemine inşa edileceği yerde oluşturulan kazıklara da “fore kazık” denilmektedir. Çakma kazıklar önceden hazırlanıp uygulamanın yapılacağı sahaya getirirler ve sonra zemin içine çakılmak suretiyle kazık formu oluşturulmuş olur. Çakma kazıklar zeminde kendi hacmi kadar zemini ötelemekte ve öteleme nedeniyle zemin ortamını sıkıştırmaktadırlar. Bu yüzden bu kazık türü deplasman yada öteleme kazığı isimleri ile de bilinmektedir. Fakat, fore kazıklar inşa edilirken zemine uygun bir teknikle delme işlemi uygulanır. Delme işlemi sonucu zemin ortamında oluşturulan deliğin içerisine donatı kafesi yerleştirilir. Daha sonra beton dökme işlemi gerçekleştirilerek inşası tamamlanır. Fore kazıklar, çakma kazıklardan farklı olarak zemin ortamında yanal bir öteleme oluşturmazlar (Birand, 2001).

Fore kazıklar, hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminlerde uygulanabilmesi ve çakma kazıklar gibi çakma işleminin oluşturacağı dinamik etkiyi ve gürültüyü oluşturmaması en önemli avantajlarından. Ayrıca fore kazık için gerçekleştirilen delme işleminden dolayı zemin profili de öğrenilmektedir. Ülkemizde TS EN 1536+A1 standardı fore kazıklar için kullanılmaktadır. Bir fore kazığının çapı 300 mm’den küçük ise bu kazıklar “mini kazık”olarak isimlendirilirler (Yeğit, 2017).

Günümüzde çok çeşitli fore kazık yapım yöntemi vardır. Bunlardan en çok bilinen üçü; kuru, kılıflı ve bulamaç yöntemleridir (Arioğlu vd., 2007):

- Kuru yöntem: Bu yöntem daha çok açılan sondaj çukurunun göçmediği zeminlerde uygulanır. Sondaj çukuru stabilitesini koruyabildiğinden farklı bir önlem almaya gerek yoktur. Sondaj çukurunun göçmediği zemine örnek yer altı su seviyesinin üstünde bulunan kohezyonlu zeminlerdir. Kuru yöntem ile fore kazık inşası üç aşamadan oluşur: Öncelikle istenilen derinliğe kadar ve istenilen çapta uygun bir yöntemle zemin ortamında bir delik açılır. Daha sonra, açılan deliğin içerisine beton dökümü gerçekleştirilir. Son aşama olarak donatı kafesi beton ile doldurulmuş deliğe yerleştirilir.
- Kılıflı yöntem: Bu yöntem yeraltı su seviyesinin hakim olduğu açılan sondaj çukurunun göçebildiği granüler zeminler için uygundur. Sondaj kuyusunun göçmesinin engellemek için delgi işlemi geçici ya da kalıcı bir muhafaza borusu (kılıfı) yardımı ile gerçekleştirilir. Delgi işlemi tamamlandıktan sonrası donatı kafesi indirilir ve beton dökümü gerçekleştirilir. Muhafaza borusu beton dökülürken çıkarılabildiği gibi çıkarılmadığı durumlar da olabilir.
- Bulamaç yöntemi: Bu yöntem de kendini tutamayan zeminler için uygundur. Çamur ya da bentonit (doğal veya sentetik) süspansiyonları kullanılarak açılan sondaj çukurunun göçmesi engellenir. Oluşturulan bulamaç delgi sırasında oluşan kırıntıların dibe ilerlemesini engellediğinden beton dökümü için daha iyi ve temiz bir ortam oluşturmaktadır. Donatı indirilmesi ve ardından beton dökümü gerçekleştirilir. Betonun yoğunluğu bulamacın yoğunluğundan daha büyük olduğu için, beton dökme işlemi esnasından bulamaç sondaj çukurundan çıkmaktadır. Bu yöntemin uygulama adımları Şekil 2.20’de görülmektedir.

Derin karıştırma yöntemi ile stabilizasyonda zemin çeşitli bağlayıcılar kullanılarak yerinde karıştırılır. Karıştırma işlemi sonunda rijit kolon formları meydana gelmektedir. Arazi ortamında karıştırma yapmak için özel karıştırma araçları kullanılmaktadır. Bağlayıcı malzeme olarak çimento, kireç, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. malzemeler kendi başlarına ya da birkaçının bileşimi şeklinde kullanılabilir.



Şekil 2.20. Bulamaç yöntemiyle fore kazık inşası (Arıoğlu vd., 2007)

Derin karıştırma yöntemi muhtemelen 1954 yılında ABD’de kullanıldığı, 1970’ten sonra Japonya’da popüler olmaya başladığı düşünülmektedir. 1967 yılından İsveç’te uygulanan bu yöntem buradan yayılarak tüm Avrupa ülkelerinde kullanılmaya başlanmıştır. Zeminin taşıma gücünü artırmak, sıvılaşma riskini azaltmak, geçirimsiz bir bölge oluşturmak, yanıl toprak basıncını engellemek vb. gibi pek çok amaç için derin karıştırma yöntemi tercih edilmektedir. Derin karıştırma yönteminin uygulanması nispeten kolay ve hızlıdır (Bruce, 2000).

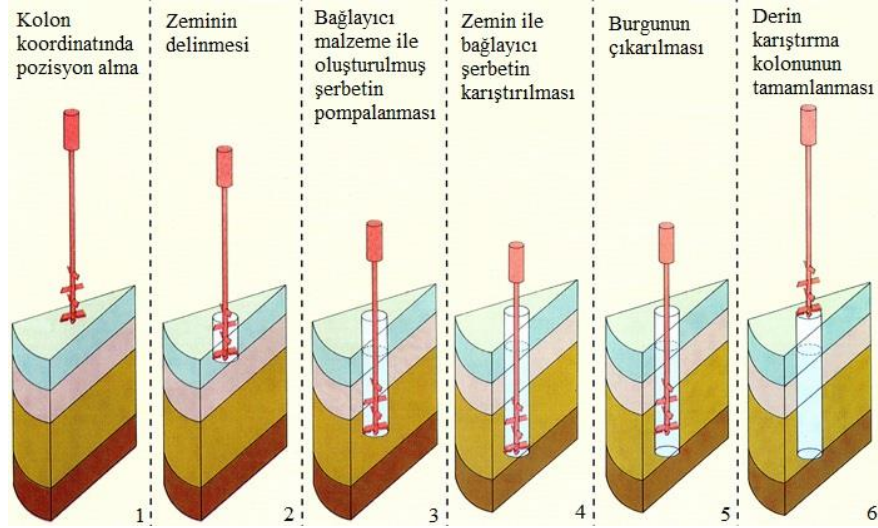
Derin karıştırma yönteminde, fore kazık metodunda olduğu gibi sondaj çukurundan çıkarılan zemini uzaklaştırma, donatı kullanma ve gerektiğinde muhafaza borusu kullanma gibi durumlar söz konusu olmadığından, bu yöntem gittikçe daha da

popülerleşmektedir. Derin karıştırma kolonunu inşa aşaması aşağıda özetlenmiştir (Onur vd., 2016):

- Zemini delecek makina kolon koordinatında pozisyon alır,
- Karıştırıcı şaft zemini parçalayarak ilerler,
- Kolon uç noktasına kadar karıştırıcı şaftın ilerlemesi devam eder,
- Karıştırıcı şaft istenilen derinliğe geldiğinde zemini karıştırma işlemi başlatılarak yukarıya doğru çekilir,
- Karıştırıcı şaftın aşağı inme ve/veya aşağı indikten sonra geri çekilme aşamalarında çimento gibi bağlayıcı malzeme ile oluşturulmuş şerbet zemine verilerek zemin ve bağlayıcının karıştırılma işlemi gerçekleştirilir.

Zemin türüne bağlı olarak, kullanılacak bağlayıcı malzemenin hacmi stabilize edilmesi planlanan zeminin hacminin %20-30'u kadar olmalıdır (Demiröz ve Karaduman, 2009). Derin karıştırma yöntemi uygulanmadan önce laboratuvar deneyleri ile zemin tipi, ne kadar bağlayıcı kullanılacağı, uygulanması gereken enerji gibi çeşitli parametreler araştırılmalıdır. Derin karıştırma yönteminde kullanılan bağlayıcı tipine göre oluşturulan kolon formu çeşitli isimler alabilir. Örneğin bağlayıcı olarak kireç kullanıldığında oluşturulan kolon formu “Kireç Kolon” olarak isimlendirilebilir. Şekil 2.21’de genel itibari ile derin karıştırma kolonun inşa aşamaları görülmektedir.

Zemin ortamında bir diğer kolon oluşturma formu taş kolon yöntemidir. Taş kolon ile zemin stabilizasyonu yönteminde genel olarak zeminin içine kırma taş gibi granüler malzemeler yerleştirilerek bir kolon formu oluşturulur. Böylece varolan zemin ortamı rijitleştirilmiş olur. İnşa edilecek taş kolonlar için granüler malzemele seçilirken, tanımda da belirtildiği gibi stabilizasyonu gerçekleştirilecek zeminden daha rijit olmasına dikkat edilmelidir (Sarıcı, 2014). Taş kolon yöntemi ile zemin ıslahı yönteminin muhtemelen ilk uygulamaları 1830’da Fransa’da ve 1972’de Amerika’da gerçekleştirilmiştir. Taş kolon oluşturma yöntemi 1960’lı yıllardan sonra Avrupa ülkelerinde kabul görerek giderek popüler bir zemin ıslahı metodu olmuştur (Ambily ve Gandhi, 2007). Taş kolon yönteminin zemin koşullarını iyileştirdiği ve böylece zemin ortamının mukavemetini artırdığı kabul görmüştür (Black vd., 2007).



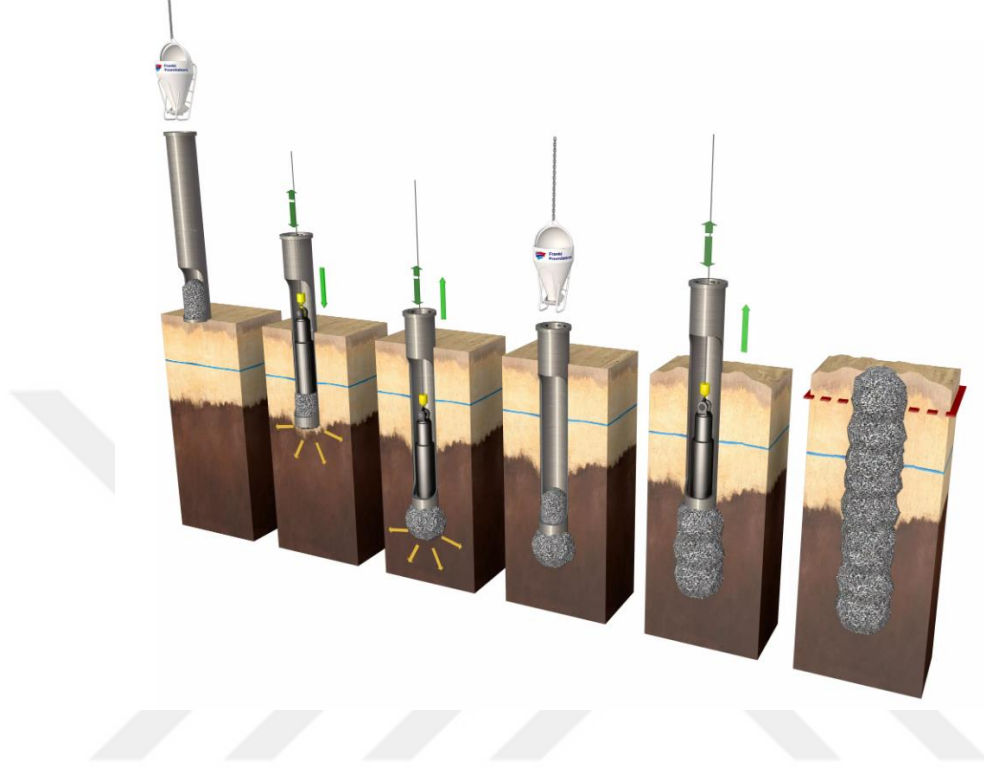
Şekil 2.21. Derin karıştırma kolonunun inşa aşamaları (Anonim, 2019i)

Taş kolonun farklı göçme mekanizmaları vardır. Taş kolonlarda göçme; genel kayma yenilmesi, yanal şişme, zımbalama ve ayrışma şeklinde gerçekleşebilmektedir. Taş kolonun boyu uzadıkça şişme göçmesini tetiklemektedir. Örneğin çapının 4 katından daha uzun olan taş kolonlar şişme yenilmesine uğrama ihtimalleri oldukça yüksektir. Rijit tabakaya oturan kısa taş kolonda kayma göçmesi oluşma ihtimali çok yüksektir. Sağlam bir zemine oturmayan kısa taş kolonlarda ise zımbalama şeklinde göçme oluşabilmektedir. Ayrıca taş kolonun uygulandığı zemin tabakaları çok yumuşak veya gevşek ise taş kolon malzemeleri ayrışarak kolon bütünlüğünü bozabilmektedir (Sarıcı, 2014).

Taş kolon yöntemi ile stabilize edilmiş zemin ortamına bir yük etkisi geldiğinde taş kolonlar ve varolan zemin bu yükü paylaşarak taşımaktadır. Genellikle taş kolon imal edilirken zeminin sıkıştırılması zemin ortamını daha da rijitleştirmektedir. Ayrıca taş kolonların geçirimsizlik katsayısı yüksek olduğundan zemin ortamında bir dren gibi görev yapabilmektedir. Taş kolonların uygulama alanları; dolguların ve doğal şevlerin stabilitesini artırma, çeşitli temel sistemlerinin taşıma gücünü artırmada, çeşitli yükler altında toplam ve farklı oturma miktarlarını azaltmada, kohezyonlu zeminlerin konsolidasyon hızını artırmada, kumlu zeminlerde oluşabilecek sıvılaşmayı azaltmada vb. şeklinde sıralanabilir (Mihalis ve diğ., 2003).

Taş kolonlar çeşitli metotlar ile inşa edilebilirler. Bunlardan birisi vibroflotasyon kullanılarak taş kolonun oluşturulmasıdır. Ayrıca muhafaza borusu kullanılarak ya da kullanılmayarak tepeden granüler malzeme doldurulması sonrası bir ağırlığın

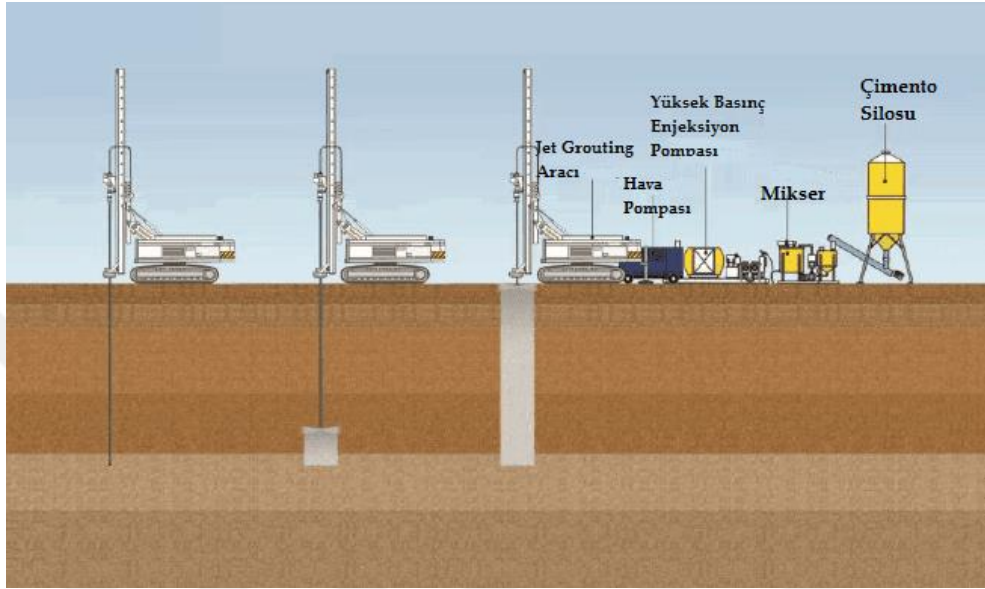
düşürülmesi yardımıyla sıkıştırılarak da inşa edilebilirler (Demiröz ve Karaduman, 2009). Muhafaza borusu kullanılarak ağırlık düşürme yöntemi ile inşa edilen bir taş kolonun genel olarak inşa aşamaları Şekil 2.22’de gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Taş kolonun inşa aşamaları (Anonim, 2019j)

Zemin içinde farklı bir kolon formu, jet grout yöntemi ile oluşturulabilmektedir. Bu yöntem dair muhtemelen ilk uygulama 1965’li yıllarda Japonyada gerçekleştirmiştir. Bu tekniğin sağladığı faydalar ortaya kondukça gelişerek Avrupa’da hızlı bir popülerite kazanmıştır. 1986 senesinde “Haliç Kolektörleri Projesi” gerçekleştirilirken Ayvansaray tünel aynasının zemini jet grout yöntemi ile stabilize edilmiştir. Jet grout yöntemi uygulanırken, genel olarak, belli bir hızla enjeksiyon borusu dönerken yüksek basınçlı hava yada su jetinin yardımıyla bir sondaj kuyusu açılarak yüksek basınç altında çimento (veya farklı bağlayıcı karışımlar) şerbetinin zemine gönderilmesidir (Karol, 2003). Jet grout yöntemi uygulanırken özet olarak bağlayıcı bir şerbetin sabit basınç, çekme ve dönme hızı ile zemine enjekte edilmesidir. Bağlayıcı şerbet zeminin içine yüksek basınç ile enjekte edilirken zemin ortamını yırtarak zemin ile karışır. Enjekte edilen çimento şerbeti ile zeminin taşıma gücü ve elastisite modülü artırılır, geçirimsizliği ise azaltılır. Oluşan karışım, zemin ortamına göre olabildiğince homojen ve sürekli bir yapıya sahiptir. Ayrıca karışımın

çeşitli etkiler altındaki davranışı çeşitli deneyler ile belirlenebileceğinden projelendirme yapının projelendirilmesi aşamasında kolaylık sağlar. Bağlayıcı şerbetin zemine aktarılması zemin ortamına sokulan sondaj tijlerinin ucunda bulunan enjektörler vasıtası ile yapılmaktadır. Jet grout uygulamasının genel olarak aşamaları Şekil 2.23'te görülmektedir.



Şekil 2.23. Jet Grout uygulamasının genel olarak aşamaları (Anonim, 2019k)

Jet grout yöntemi ile oluşturulan kolonları etkileyen bazı parametreler vardır. Bunlar; jet sistemi, enjeksiyon basıncı, nozul çapı, nozul sayısı, tijin döndürülme hızı, tijin çekilme hızı, seçilen bağlayıcının özellikleri, pompa kapasitesi vb. şeklinde sıralanabilir (Lunardi,1977).

Silt, kil, kum, çakıl ve alüvyon gibi çoğu zemin için jet grout yöntemi başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Kullanım alanlarından bazıları (Durgunoğlu, 2004):

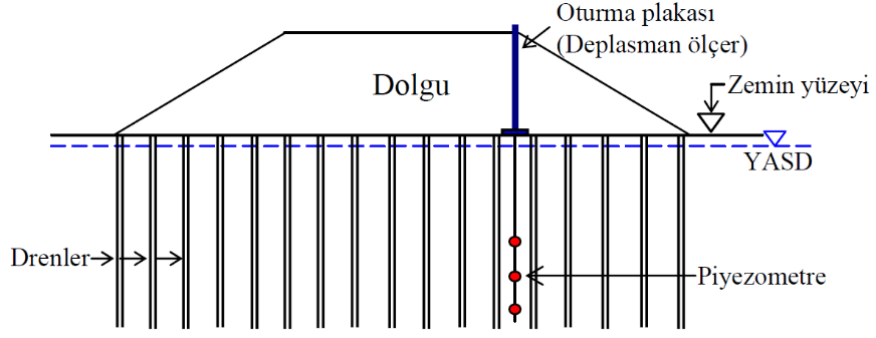
- Çeşitli temeller sistemlerinin altında derin temel olarak,
- Karayolu yapılarında taşıma gücünü artırmak ve deplasmanı azaltmak,
- Çeşitli dolgular altında taşıma gücünü artırmak ve deplasmanı azaltmak,
- Yanal zemin itkisine karşı koymak,
- Kazı çalışmalarında donatı yerleştirilerek düşey eğilmeye karşı koyabilen iksa elemanı olarak,

- Kazı çalışmaları vb. uygulamalarda tabandan ve kenarlardan kazıya gelme ihtimali olan suyu engellemek,
- Kazı çalışmaları öncesinde kazı taban seviyesi altında kil zeminlerde payanda elemanı olarak,
- Şevlerin stabilitesinin sağlanması amacıyla kullanmak,
- Sıvılaşma ve deprem riskine karşı güvenlik sayısının artırmak.

2.3.8 Önyükleme

Sabit ya da hareketli yüklerin zemine aktarılması sonucunda zemin ortamında zamana bağlı oturmalar gerçekleşmektedir. Zamana bağlı gerçekleşen bu oturmalar, eğer yapı yapıldıktan sonra gerçekleşirse yapıya çeşitli zararlar verebilmektedir. Yapıya zarar verebilecek bu oturmalar önceden tahmin edilirse bu sorunu gidermek için ön yüklemeye yöntemi ile zemini ıslah etmek bir çözüm olabilmektedir. Ön yüklemeye yöntemi kabaca tarif edilecek olursa, ıslah edilmek istenen zemin yüzeyine dolgu inşa edilerek zemine düşey bir yük verme işlemidir. Seçilecek bu dolgunun oluşturacağı yük miktarı hesaplamalara bağlı olarak daha sonra yapılacak yapının ağırlığından büyük yada küçük olabilmektedir. Ön yüklemeye yöntemi için inşa edilen dolgu birkaç aydan birkaç yıla kadar bekletilebilir. Ön yüklemeye yöntemiyle hem zeminin taşıma gücü artırılır hem de yük altında yapabileceği oturma miktarı azaltılır (Uzuner, 2016b).

Kohezyonlu zeminlerin düşük geçirimsizlik özelliğinden dolayı konsolidasyon süreci oldukça uzun sürerel devam edebilmektedir. Zemin ortamında, yük altında oluşan ek boşluk suyu basıncının daha hızlı sönmülmesini, dolayısıyla konsolidasyon sürecinin hızlandırılmasını sağlamak için zemin içerisine ön yüklemeye dolgusu yapılmadan önce geçirgenliği daha yüksek olan taş kolonlar, kum kolonlar, düşey prefabrike drenlerin vb. sistemler inşa edilebilir. Şekil 2.24'te ön yüklemeye yönteminin düşey drenler ile beraber kullanımına dair genel bir kesit görülmektedir (Gofar ve Mohamed, 2008).



Şekil 2.24. Önyükleme yönteminin düşey drenler ile birlikte kullanımı (Gofar ve Mohamed, 2008).

2.3.9 Isıtma ve Dondurma Metotları

Isıl (termal) işlemler ile zeminlerin stabilize edilmeli mümkündür. Bu işlemlerin zemin üzerine etkisi bazı durumlarda kalıcı ve yüksek olmasa da taşıma gücünü artırmak, geçirimsizlik oluşturma ve oluşabilecek deformasyonları azaltmak için kullanılabilir. Isıl (termal) yöntemler uygulanırken ya zeminin ısıtılır ya da zeminin (suyunun) dondurulması sağlanır. Fakat ısıl işlemler ile zemin stabilizasyonu genel itibari ile ekonomik değildir ve bu yüzden çok tercih edilmez. Isıl işlemler ile zemin stabilizasyonu ısıtma ve dondurma yöntemleri şeklinde iki kısma ayrılmaktadır (Day, 2004).

Isıtma yönteminde zemin yüksek sıcaklıklara maruz bırakılır. Lösler, doymun olmayan kil ve siltler yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıkları zaman dayanımları artmaktadır. Yüksek sıcaklıkta ısıtılan zeminin içeriğindeki su uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca, kil zeminler yüksek sıcaklıklarda faz değiştirmektedirler. Yüksek sıcaklıklarda pişirilen killerin özellikle değişmekte ve tekrar eski haline gelmemektedir (Uzuner, 2016b). Killere 900 C° sıcaklığa ulaşana kadar ısıtıldığında taktirde klinkere dönüşürken, yaklaşık 400-600 C° sıcaklıklarda ise silikatlaşır. Bu yöntem kullanılarak ıslah edilen zeminlerin mukavemeti artırılırken oluşabilecek deformasyonları azaltılmış olmaktadır. Isıtma yöntemi uygulmasına bir örnek olarak; açılan sondaj kuyusunda benzin vb. bir yakıtın yakılmasıyla zemin yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmasıdır (Litvinov, 1960; Ayan, 2009).

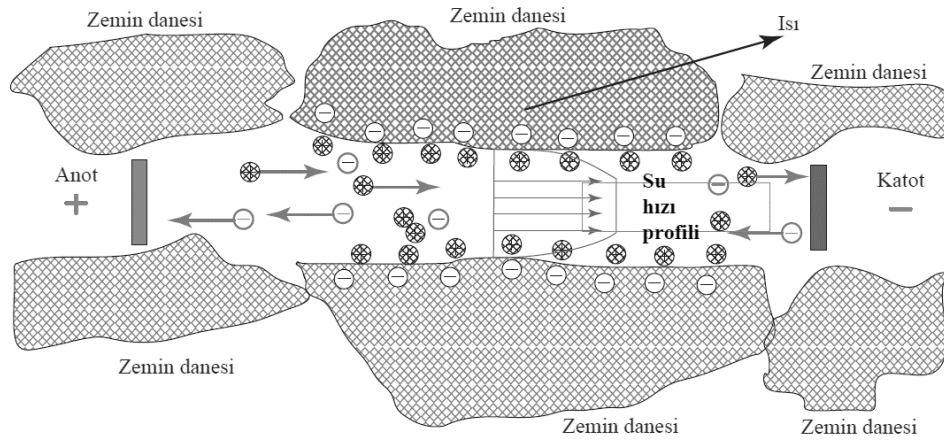
Dondurma yönteminde ise ıslah edilecek zemin içindeki suyun soğutularak dondurulması ile geçici olarak zeminin mukavemetinin artırılmasıdır. Bu yöntem

uygulandıktan sonra mukavemeti yüksek ve daha geçirimsiz bir zemin ortamı oluşturulmuş olur. Dondurma yöntemi içeriğinde su olan çoğu zemin türü için uygundur. Çeşitli kazıların, tünellerin, şevlerin geçici olarak stabilitesini sağlamak için kullanılabilir (Maag, 1938). Zemine dondurma işlemi uygulayabilmek için, zemin içerisine borular yerleştirilir ve bu borulardan zemini dondurmak için çeşitli sıvı ve gazlar geçirilir. Borular içerisinden geçirmek için soğuk hava, soğuk su, sıvı nitrojen, sıvı karbondioksit vb. kullanılabilir.

2.3.10 Elektro-osmoz Yöntemi

Elektro-osmoz yöntemi, ince taneli zeminlere elektrik akımı verilerek zemindeki suyun uzaklaştırılması işlemidir. İnce daneli zeminlerin drenajını hızlandırmak için kullanılmaktadır (Briaud 2013). Elektro-osmoz yönteminde katot ve anot kullanılarak elektriksel alan oluşturulmaktadır. Suya doymun killi bir zemin ortamına doğru akım (DC) elektrik verilirse, katyonlar katota giderken anyonlar ise anota doğru hareket edecektir. Katyonların ve anyonların hareketi devam ederken viskoz sürtünmeden kaynaklanacak ek suları ve kendi hidrasyon sularını taşımaktadırlar.

Elektro-osmoz yöntemi uygulandıında zemin boşluk suyu anottan (+) katot'a (-) doğru hareket etmektedir (Şekil 2.25). Katotta toplanan su çeşitli yöntemler ile uzaklaştırılarak konsolidasyona yardımcı olunabilir. Anottan çeşitli katkıları ilave edilerek zemin ortamının mukavemeti daha da fazla artırılabilir. Su akımı anottan katota doğru ilerlerken, negatif boşluk suyu basıncı oluşabilmektedir. Bu durum efektif gerilmeyi artırarak konsolidasyonu sağlamaktadır (Uzuner, 2016b).



Şekil 2.25. Zeminde elektro-osmoz olayı (Briaud, 2013)

Elektro-osmoz yöntemi uygulanarak su içeriği düşürülür, konsolidasyon süreci hızlandırılır ve böylece taşıma gücü artırılır. Bu yöntemde doğru elektrik akımının zemine uygulanması ile mineral ve iyon değişime sebep olan elektrokimyasal bir sertleşmeden ötürü mukavemette ek bir artış sağlamaktadır. Bu olay, ayrıca plastisitede değerini de azaltabilmektedir (Rittirong ve Shang, 2005).

2.3.11 Puzolanlar ile Stabilizasyon

Zayıf zeminlerde oluşabilecek olası problemlerin (taşıma gücü yetersizliği, büyük oturmalar vb.) çözümünde geleneksel olarak uygulanan çözümler zayıf zemin üzerine daha iyi özelliklere sahip zeminler ile dolgu yapmak, zayıf zemini kazıyıp yerine daha iyi özelliklere sahip zemin yerleştirmek ve daha büyük temel sistemleri inşa etmek şeklinde sıralanabilir (Ingles ve Metcalf, 1973). Fakat bu geleneksel yöntemler maliyetli olduğundan, zemin özelliklerini iyileştirmek için alternatif çözüm arayışlarına girilmiştir (Şenol vd., 2003). Bu alternatif yöntemlerden birisi, zemine değişik katkı maddelerinin eklenmesidir. İnsanlık tarihi boyunca çeşitli inşaat malzemelerine ve zemine çeşitli katkılar eklenerek daha iyi ve ekonomik çözümler üretilmeye çalışılmıştır.

Zemin ortamına eklenebilecek katkı maddelerinden bazıları aşağıda sıralanmıştır (Özaydın, 2005; Tunç, 2002):

- Puzolanlar,
- Kireç,
- Çimento,
- Bitüm,
- Bazı kimyasallar (sodyum hidroksit, sodyum silikat, hidroflorik asit, fosfat, kalsiyum sülfat, fosforik asit vb.),
- Reçine,
- Polimerler,
- Yukarıda sayılanların belirli oranlarda karışımları.

Katkı maddeleri zemin ile ya da kendi içerisinde oluşturduğu kimyasal reaksiyonlar ile zemin ortamının mühendislik özelliklerini iyileştirmektedir. Bu stabilizasyon yöntemi “kimyasal stabilizasyon” olarak da isimlendirilebilir (Tunç,

2002). Katkı maddelerinin eklenmesi ile zemin stabilizasyonu (kimyasal stabilizasyon) etkili ve ekonomik bir yöntemdir (Kukko, 2000).

Katkı maddelerinin eklenmesi ile zemin stabilizasyonu sonucunda aşağıda sıralanan kazanımlar elde edilebilir (Pektaş, 2012):

- Zeminin mukavemeti (taşıma gücü) artırılır,
- Zeminin hacim sabitliği sağlanır,
- Zeminde oluşabilecek deformasyonlar (oturmalar) azaltılır,
- Zeminin durabilitesi artırılır,
- Zeminin geçirimsizlik katsayısı azaltılır,
- Zeminde oluşabilecek şişme ve büzülme davranışı azaltılır,
- Şev stabilitesini artırır.

Katkı maddeleri ile zemin iyileştirilirken çeşitli yöntemler uygulanabilir. Bu yöntemler:

- Bir mikser yardımı ile zemin ve katkı maddesinin karıştırılarak zemine serilmesi,
- Araziye çeşitli karıştırıcılar kullanılarak katkıyı zemine katılması ve karıştırılması,
- Jet grout ve derin karıştırma yöntemi gibi yöntemlerde kullanılan bağlayıcı bulamaç içine eklenerek katkının zemine karıştırılması.

Katkı maddeleriyle zemin stabilizasyonunda, zeminin mühendislik özelliklerinin güvenli ve ekonomik bir şekilde ıslah edilmesi amaçlanmaktadır. Her katkı maddesinin kendisine has özelliği olduğundan katkı maddesinin ve oranının seçiminde oldukça dikkat edilmesi gerekmektedir. Ayrıca zeminin kendine ait özellikleri de kimyasal stabilizasyonu etkileyebilmektedir. Katkı maddesinin ve oranının seçiminde yönlendirici olarak sınırlı çalışmalar vardır. Bunlardan birisi olan U.S. Army Corps. of Eng. (2003), zeminlerin türüne, gradasyonuna ve plastik indeksine göre en uygun katkı maddesini önermektedir.

Katkı maddeleriyle zemin stabilizasyonunda iki temel reaksiyon oluşur. İlki kation alışverişi reaksiyonu ile bu reaksiyonu takip eden yumaklaşma ve agregasyondur. İkincisi ise çimentolaşmadır (Mitchell, 1993). Kation alışverişi reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için inorganik kationlar ihtiva eden kalsiyumlu ve

organik kimyasallar kullanılır. Çimentolaşma reaksiyonun gerçekleşmesi için puzolanlar, portland çimento, kireç, sodyum silikat, sodyum hidroksit, jips, fosforik asit, alüminyum tuzları vb. zemine katılır. Katkı maddeleriyle zemin stabilizasyonunda hem katyon değişimi hem de çimentolaşma reaksiyonlarının birlikte oluşması stabilizasyonun daha etkili olmasını sağlamaktadır (Çalık, 2012).

Katkı maddeleriyle zemin stabilizasyonunda katkı maddeleri kendi başlarına kullanılabilirdiği gibi çeşitli katkı kombinasyonları da (kireç-puzolan, kireç-çimento-puzolan, alkali aktivatör-puzolan vb.) tercih edilebilir. Katkılarının bu şekilde birlikte kullanılmaları ile daha etkin bir zemin ıslahı gerçekleştirilir. Tek başına kullanılmalarından daha çok avantaj sağlamaktadır. Örneğin bazı uçucu küller kendi başlarına zeminin mukavemetini artıramazken kireç ya da çeşitli alkali aktivatörler uçucu kül ile karıştırıldığında zeminin mukavemetini artırabilmektedir.

Puzolan katkıların zemin ortamında kendi başlarına veya çeşitli kombinasyonlar ile kullanımı oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Özellikle katı atık yönetimi kapsamında çeşitli atıkları değerlendirmek için stabilizasyon çalışmalarında bu atıklar kullanılmaktadır. Böylece hem atıklar bertaraf edilmiş hem de ekonomik katkı sağlanmış olur. Puzolanların zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılması giderek artan bir uygulamadır (Nalbantoglu 2004; Kumar ve Sharma, 2004; Goodarzi ve Salimi, 2015). Puzolanlar genel olarak silikat ve alüminat, kireç ve çimento CaO esaslıdır. Bu yüzden puzolanların çoğu kendi başlarına bağlayıcı özelliği göstermezler. Kendi başlarına bağlayıcılık özelliği göstermeyen puzolanlar ikinci bir katkı maddesi ile karıştırılarak kullanılması gerekmektedir. Puzolan malzemeler kendi başlarına ya da kireç veya çimento gibi bir katkı ile birlikte zemine katılarak temel yapılarının altında, enjeksiyon çalışmalarında, yollarda dolgu malzemesi olarak, dayanma duvarlarında arka dolgu olarak, sızdırmazlık sağlamak için atık depo sahalarında vb. pek çok uygulamada kullanılmaktadır (Wasti, 1993).

Puzolanların, SC, SM, SP, SW, GC, GP, GM, GW gibi kaba gradasyonlu zeminlerde daha efektif bir iyileştirme yapabileceği belirtilmiştir. Kireç ile puzolan karışımları için önerilen optimum oran 1/2-1/7 arasındadır. Ayrıca, genel itibari ile, %2.5-%4 kireç ile %10-%15 puzolan zemin ile karıştırılması sonu efektif sonuçlar verebileceği belirtilmiştir (Çalık, 2012).

Zemin iyileştirmesinde katkı olarak değerlendirilebilen uçucu küllerin etkinliğini zeminin ve uçucu külün organik madde miktarı, inceliği, kimyasal bileşimi

ve üniformluğu etkilemektedir. Uçucu kül, mekanik ve kimyasal stabilize yöntemleri için etkin bir katkı maddesidir. Şişme ve taşıma gücü problemi olan zemin ortamlarında bu problemleri gidermede kullanılabilir. Zemin ıslahı uygulamalarında zeminin mukavemetini artırır, dolgularda kullanımında mukavemeti artırdığından inşa edilecek dolgu kalınlığını azaltır. Uçucu külün sınıfına ve özelliğine göre çimento ya da kireç gibi ek katkıları ile karıştırılarak zemin ıslahı yapılmaktadır. Hatırlatmak gerekirse, içeriğinde %10'dan fazla CaO varsa C sınıfı, %10 oranından az ise F sınıfı uçucu kül olarak uçucu küller adlandırılabilir. F sınıfı uçucu küllerin kendi başlarına çimentolaşma özelliği oldukça azdır. Fakat F sınıfı uçucu küle kireç, alkali aktivatör vb. karıştırıldığında bağlayıcı özellik göstermektedir. C sınıfı uçucu küllerin içeriğinde kireç olduğundan ek bir katkı maddesi olmadan kendi başlarına bağlayıcı özelliği göstermektedirler. Bu yüzden zeminlerde uçucu kül ile ıslah çalışmaları yapılırken bu özelliklere dikkat etmek gerekmektedir. Uçucu kül kendi başına veya başka bir katkı ile zemine katıldığında zeminin dane boyutunu büyütür ve zemin daneleri arasındaki bağ kuvvetini artırır (ASTM C 618, 2012; Tumluer, 2006; Çetin, 2011).

Yüksek fırın cürufu çeşitli alanlarda değerlendirilebilirler. Örneğin; zemin iyileştirme (stabilizasyon) malzemesi, yol temel ve alt temel dolgu malzemesi, beton yol agregası, demiryolu balastı, asfalt betonu agregası, kayma direnci yüksek agrega olarak kar ve buz ile mücadele, yapısal dolgularda dolgu malzemesi şeklinde sıralanabilir. Bazı durumlarda yüksek fırın cürufu, kendi başlarına bağlayıcı olmayıp farklı katkıları ile birlikte kullanıldığında bağlayıcılık özelliğine sahip olurlar (Reuter vd., 2004). Metal cürufu sanayi atığı olarak oluşmaktadır ve her yıl çıkan miktar artmaktadır. Yan ürün olarak oluşan metal cürufu, son yıllarda yüzeysel zemin stabilizasyonu uygulamalarında kullanılmaktadır. Böylece hem atık bir malzeme olan cürufun çevreye verebileceği zararların ve bu atıkların depolarda biriktirilmesinin önüne geçilir hem de çeşitli dolgularda kullanılarak zemin ıslahı gerçekleştirilir (Çetin, 2011).

2.3.12 Geosentetikler

Zeminler çekme kuvvetine karşı dayanıklı bir yapıda değildir. Zeminlerin bu problemlerini gidermek için zeminlere çeşitli donatılar yerleştirilebilmektedir. Donatılı zemin sistemleri günümüzde giderek popülerlik kazanan bir uygulamadır. Donatılı zeminler ile alakalı muhtemelen ilk bilimsel çalışma Vidal (1969) tarafından

gerçekleştirilmiş olup, metal şeritler ve çubuklar kullanarak zeminde donatı uygulaması gerçekleştirmiştir. Zeminler içerisinde donatı uygulamaları 1970’li yıllardan itibaren tüm dünyada öğrenilmeye ve üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Farklı tipte istinat yapılarında, çeşitli kontrollü dolgularda vb. geoteknik uygulamalarında zeminde donatı uygulamaları giderek artan bir ilgi görmüş, yapılan uygulamalarda iyi sonuçlar elde edilmiştir. İlk donatılı zemin uygulamalarında metal şeritler ve çubuklar tercih edilirken, 1980’li yıllarda geosentetik ürünler kullanılmaya ve yaygınlaşmaya başlamıştır (Yıldız, 2002).

1970’li yıllarda dünya genelinde tahmini 5-6 geosentetik çeşiti kullanılmaktaydı. Günümüzde ise gelişen teknoloji ile birlikte tahimin 600’den fazla çeşit geosentetik olduğu düşünülmektedir. Dünya çapında, günümüzde kullanıldığı düşünülen geosentetik miktarı 10^9 m² nin üzerindedir. Geosentetik kullanımı bazı durumlarda ekonomik olmasa dahi bu malzemelerin farklı açılardan pek çok faydasının olduğu görülmüştür. Geosentetik uygulamaları genel itibari ile performansı ve güvenlik kriterini artırmaktadır. Ayrıca geleneksel tasarımlara kıyasla maliyeti düşürebilmektedir. Yüzyılın başlarında geosentetik ürünlerin hammaddesi olarak tercih edilen sentetik fiber, ilk olarak polivinilklorür’den (PVC) üretilmiştir. Geosentetikler 1934 yılı itibari ile ticari olarak üretilmişlerdir. 1930’da ABD’de naylon hammaddesi olan sentetik fiber, 1954’de İtalya’da polipropilen fiber, 1960’da örgüsüz dokumalar üretilmeye başlanmıştır. Muhtemelen ilk geosentetik uygulamalarından biri Florida’da sahil erozyonunun önlenmesi için uygulanan dokumalardır ve bu uygulamanın hala bozulmadığı gözlenmiştir (Bayram, 2006).

Günümüzde, geosentetik ürünler inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Geosentetiklerin, hafif olmaları, uzun süreli dayanıma ve dayanıklılığa sahip olmaları, uygulanmalarının kolay olması ve korozif olmama gibi çeşitli olumlu özellikleri vardır. Bu olumlu özellikler, günümüzde geosentetiklerin, çelik, beton ve kereste gibi diğer inşaat mühendisliği malzemeleri kadar yaygın olmasını sağlamıştır. ASTM D 4439 (2011) geosentetikleri, insan üreri yapı, proje ya da sistemin ayrılmaz bir parçası olarak, zemin, kaya ve ya geoteknik mühendisliği ile ilişkili diğer malzemeler ile kullanılan polimer malzemeden oluşturulmuş düzlemsel elemanlar olarak tanımlar. Geosentetik kelimesinde, “geo” öneki, geosentetiklerin temel fonksiyonunun zemin ve kaya gibi geoteknik malzemeler ve

geoteknik mühendisliği ile ilgili olduğunu betimler. “Sentetik” soneki, geosentetik malzemelerin çoğunlukla sentetik ürünlerden üretildiğine işaret etmektedir.

Geosentetik terimi, zeminin özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilen, genellikle düzlemsel olan fabrikasyon malzemeleri ifade eder. Geosentetik ürünler tipik olarak polimerik malzemelerden yapılır, ancak doğal liflerde kullanılabilir. Günümüzde, geosentetik ürünler polivinil klorür (PVC), polipropilen (PP), polyester (PET), polietilen (PE), polistiren (PS), poliamid (PA) vb. gibi çok çeşitli polimerlerden üretilmektedirler. Geosentetikler, fabrikalarda istenen mekanik ve fiziksel özelliklerde üretilirler. Çevresel etkilere dayanıklı ve ekonomik olan geosentetik ürünler istinat duvarları, kara yolları, çeşitli dolgular, barajlar, hava alanları, depolama alanları vb. pekçok farklı mühendislik uygulamasında kullanılabilir (Ghafoori ve Sharbaf, 2016).

Geosentetikler malzeme türü, üretim yöntemi ve amaçlanan uygulamaya göre gruplandırılmıştır. En çok bilinen ve kullanılan geosentetikler; geogrid, geotekstil, geocell, geomembran, geokompozit, geonet ve geofoamdır (Acharya, 2011).

Geosentetiklerin geoteknik mühendisliğinde kullanımının en temel amaçları; zeminlerin mekanik, fiziksel ve hidrolik özelliklerini iyileştirmektir. Geosentetik ürünler çok farklı uygulama alanlarında kullanılmak için, farklı malzeme özelliklerinde üretilmektedirler. Böylece, farklı türdeki geosentetik malzemeler farklı işlevleri yerine getirmektedir. Genel olarak, geosentetik ürünler beş temel işleve sahiptirler. Bu temel işlevler; ayırma, filtreleme, drenaj, tutma (muhafaza, koruma) ve güçlendirme şeklinde sıralanabilir. Bu temel işlevler, aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır (Ghafoori ve Sharbaf, 2016; Gupta, 2009):

- Ayırma işlevi: Birbirine benzemeyen farklı özelliklerdeki malzemeleri birbirinden ayırarak bu malzemelerin karışmasına engel olmasıdır. Yerleştirilen geosentetik ile geosentetiğin ayırdığı iki malzemenin işlevi ve bütünlüğü korunmaktadır. Örneğin; yumuşak zemin ile bu zemin üzerine inşa edilen yol temeli arasına uygun bir geosentetik yerleştirilerek yol temeli yapımında kullanılan malzemenin yumuşak zemine karışması engellenir. Ayırma işlevi için tercih edilen yaygın geosentetiklerden bazıları geotekstil, geomembran ve geokompozittir.
- Drenaj işlevi: Geosentetik düzleminde düzlem içi sıvı akışına izin vermektir. Bazı geosentetik ürünler sıvı geçişine izin verebilecek şekilde

üretirler. Bu geosentetikler tünellerde, isale hatlarında, çeşitli dolgularda, dayanma yapılarında çeşitli drenaj yapıları yerine veya farklı drenaj yapıları ile birlikte kullanılarak suyun zeminden ve yapıdan uzaklaştırılması sağlanır. Drenaj işlevi için tercih edilen en yaygın geosentetik türü geotekstildir.

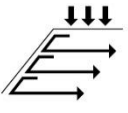
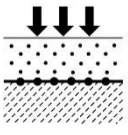
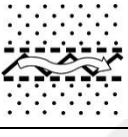
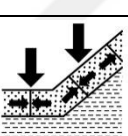
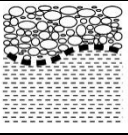
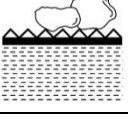
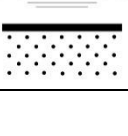
- Filtreleme işlevi: Geosentetik düzleminde çapraz sıvı akışına izin vermektir. Bazı geosentetik ürünler sıvıları geçirecek fakat sıvıların hareketi ile taşınan ince daneli malzemeleri geçirmeyecek şekilde üretirler. Geosentetiklerin filtrasyon işlevi kara yollarında, barajlarda, tünellerde, isale hatlarında vb. birçok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılmaktadır. Örneğin, drenaj için oluşturulmuş geri dolgu malzemeleri içerisine ince taneli malzeme dolmaması için kullanılabilir. Filtrasyon işlevi için tercih edilen en yaygın geosentetik türü geotekstildir.
- Tutma (muhafaza, koruma) işlevi: Geçirimsiz bir sıvı veya gaz bariyeri gibi davranmasıdır. Geosentetikler kullanılarak iki farklı tabakanın birbirinden tamamen izole edilmesi sağlanabilmektedir. Örneğin çeşitli atık depolama sahalarında atıklardan zemine zararlı maddeler geçmesin diye atık deposunun tabanı ve yan yüzeyleri geomembran vb. geosentetik türü ile kaplanabilmektedir. Ayrıca geomembranlar geleneksel bir çözüm haline gelerek çevreden ya da zeminden temel sistemlerine su gelmesini engellemede kullanılmaktadır. Bazı geosentetiklerin yerleştirilmesi esnasında keskin kaya ve çakıllardan, ağaç köklerinden vb. çevresel etkenlerden zarar görebilirler. Örneğin geomembranlara zarar verecek bir ortama önce geotekstil serilerek koruma sağlandıktan sonra geomembran serilmesi daha iyi olacaktır.
- Güçlendirme işlevi: Bir zemin ortamının mukavemetinin artırılmasıdır. Bazı geosentetik ürünler zeminin içine yerleştirilmesiyle, zemin ortamının mukavemetini artırmaktadır. Bu güçlendirme, geosentetiğin çekme mukavemeti, rijitliği, yanal hapsedme özelliği, zemin ile arasındaki etkileşim vb. parametrelerden etkilenmektedir. Geogrid, geocell, geokompozit, geotekstil vb. geosentetik ürünler güçlendirme amacı son yıllarda oldukça geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.

Geosentetikler, genel itibari ile bu işlevlerden birini gerçekleştirmek için tasarlanmış ve üretilmiş olsalar da, belirli bir geosentetik aslında aynı anda birden fazla işlevi gerçekleştirebilir (Ghafoori ve Sharbaf, 2016). Bazı geosentetiklerin genel itibari ile üretildiği malzemeler, yapıları, kullanıldığı alanlar ve temel işlevleri Çizelge 2.11’de gösterilmektedir. İşlevlerine göre kullanılacak geosentetikler ise Çizelge 2.12’de sunulmuştur.

Çizelge 2.11. Geosentetiklerin türleri ve özellikleri (Ghafoori ve Sharbaf, 2016)

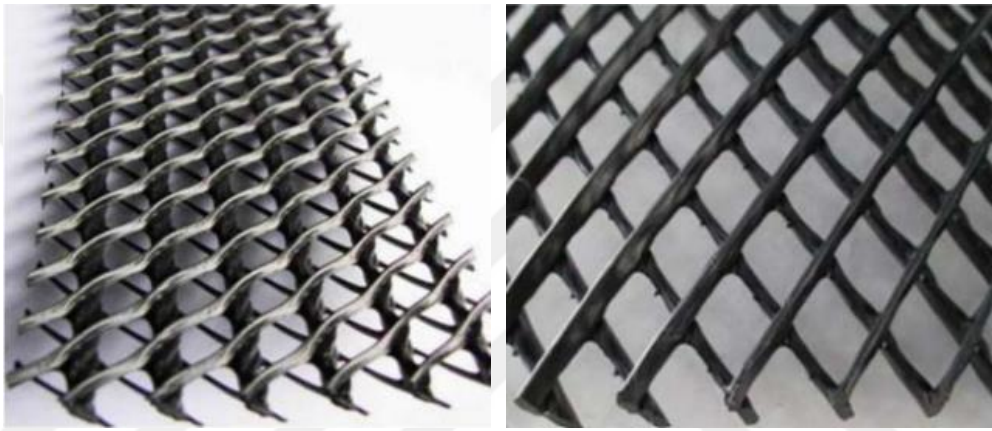
Geosentetik Türü	Üretildiği Polimerik Malzeme	Yapı	Kullanım Alanları	Temel İşlevleri
Geotekstil	Polipropilen (PP), Polyester (PET), Polietilen (PE), Polyamid (PA)	Esnek, geçirgen kumaş	İstinat duvarları, yamaçlar, toprak setler, kaldırımlar, dolgu alanları, barajlar	Ayırma, güçlendirme, filtrasyon, drenaj, koruma
Geogrid	PP, PET, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)	Kesişen elemanlardan oluşan ağ benzeri düzlemsel ürün	Kaplamalar, demiryolu balastları, istinat duvarları, şevler, bentler, köprü, ayakları	Güçlendirme, ayırma
Geonet	Orta yoğunluklu polietilen (MDPE), HDPE	Küçük delikli ağ benzeri düzlemsel ürün	Barajlar, boru hattı ve drenaj yapıları	Drenaj
Geomembran	PE, polivinil klorür (PVC), klorlanmış polietilen (CPE)	Geçirimsiz ince tabakalar	Muhafaza (geçirimsiz) göletleri, rezervuarlar ve kanallar	Sıvı bariyerleri/astar
Geokompozit	Üretildiği geosentetiklere bağlı olarak	Geotekstil ve geogrid/geonet, geomembran ve geogrids kombinasyonları	Dolgular, kaplamalar, şevler, depolama alanları, barajlar	Ayırma, güçlendirme, filtrasyon, drenaj

Çizelge 2.12. İşlevlerine göre geosentetikler (Anonim, 2019l)

İşlev		Kullanılabilecek Geosentetik Türleri	Açıklama
Duvarlar ve dik yamaşların güçlendirilmesi		Geogrid Geotekstil	Zeminin mekanik performansını artırarak çekme dayanımı kazandırmak
Dolgu güçlendirme, zemin ıslahı		Geogrid Geocell Geokompozit Geosentetik	Taşıma gücünü artırma, oturma, tekerlek izi ve oyuk oluşumunu azaltmak
Drenaj		Geonet Geokompozit	Yağmur sularını, yer altı sularını ve diğer sıvıları veya gazları toplamak ve taşımak
Erozyon kontrolü		Geocell Geomat Biomat Bionet	Çeşitli doğa olaylarının neden olduğu zeminin ayrışmasını ve taşınmasını önlemek ve bitki örtüsünün büyümesine izin vermek
Sınırlandırma		Geocell	Zemini içerisinde tutarak yanal hareketleri önlemek
Filtrasyon		Geotekstil Geokompozit	Hidrodinamik kuvvetlere maruz kalan zemini tutarken akışkanların geçişine izin vermek
Ayırma		Geotekstil Geokompozit Geomembran	İki farklı zemin veya farklı granülometreli malzemeler arasındaki karışmayı önlemek
Koruma		Geotekstil Geonet Geokompozit	Yapılara, malzemelere ve diğer geosentetiklere mekanik zararlar gelmesini önlemek
Sıvı yalıtımı		Geomembran Geokompozit	Sıvıların hareketini önlemek veya sınırlamak

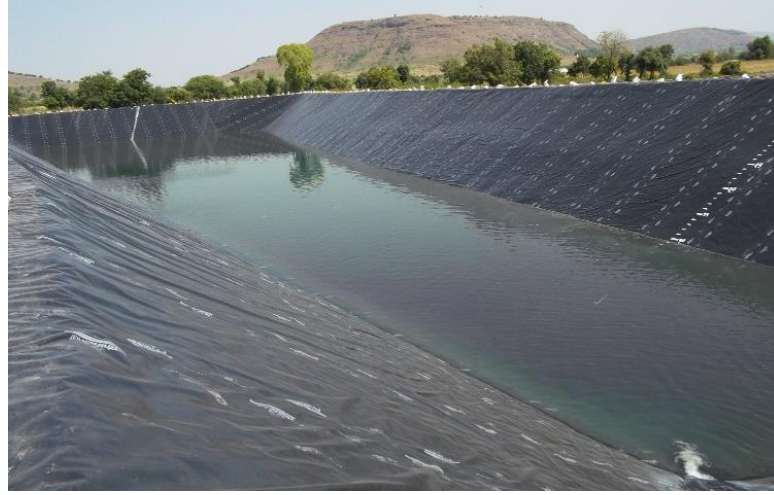
Geonetler, genellikle drenaj işlevini yerine getiren geosentetik üründür. Geonetler özel bir geometrik yapıda üretilir. Bunun nedeni ürün düzlemi içinde sıvıların veya gazların kolay hareketini sağlayan boşluklar oluşturmaktır. Grid malzemelere benzeyen geonetler geogridler ya da diğer geosentetikler ile birlikte kullanılabilirler. Geonetler donatılardırma amacıyla kullanılsalar bile sağlam bir

geosentetik olduğu için bir miktar güçlendirme de sağlayabilmektedir. Fakat onları genellikle drenaj amacıyla kullanmak daha efektif olacaktır. Geonetler, diğeri geosentetiklerin alt ya da üst yüzüne yerleştirildiğinde, zemin danelerinin boşluklara girerek drenajı engellemesini önlemektedir. Bundan dolayı geokompozit hazırlanmasında tercih edilmektedir. Geonetlerin yüksekliğı genellikle 5-7 mm arasında olacak şekilde üretilmektedir. Yükseklik düzlemsel drenajda çok önemli bir etken olduğundan bu kalınlık artırılarak daha iyi bir drenaj elde edilebilir (Koerner, 1999). Şekil 2.26'da üç düzlemlili (solda) ve iki düzlemlili (sağda) geonet görülmektedir (Yarahmadi vd., 2017).



Şekil 2.26. Üç düzlemlili (solda) ve iki düzlemlili (sağda) geonet (Yarahmadi vd., 2017)

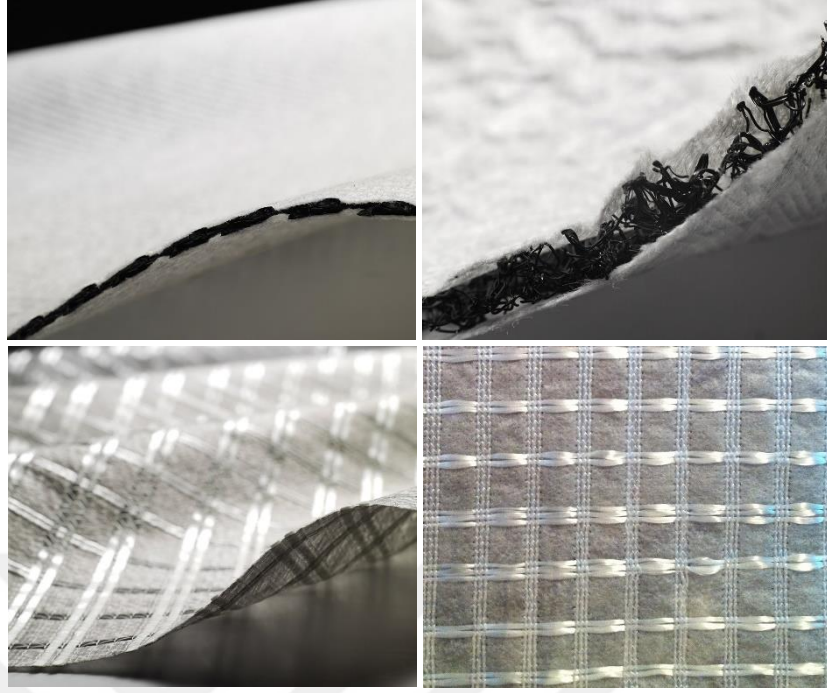
Geomembran, ASTM tarafından, insan yapımı bir yapı, proje ya da sistemde sıvı geçişini kontrol altına almak için herhangi bir geoteknik mühendisliği malzemesiyle kullanılan çok düşük geçirgenliğı olan sentetik membran astar ya da bariyer şeklinde tanımlanmaktadır. Geomembran, bir ya da daha fazla sentetik tabakadan oluşturulmuş geçirgen olmayan bir geosentetik türüdür (ASTM D4833-07, 2007; ASTM D4439-04, 2004). Geomembranların temel işlevi geçirimsizliğı sağlamaktır. Saha uygulamalarında geçirimsizliğı sağlamak istediğimiz düzlemlere geomembran yerleştirilerek istenmeyen maddelerin içeri veya dışarı yönlü hareketi engellenmiş olur. Su depoları, sıvı atıklar, katı atık sahaları, radyoaktif atıklar, yeraltı depolama tankları, su kanalları, tünellerin iç yüzeyi, yapı temellerinin alt yüzeyi vb. için kaplama malzemesi olarak geomembranlar kullanılabilir (Koerner, 1999). Geomembran uygulamasına dair örnek bir görüntü Şekil 2.27'de verilmiştir.



Şekil 2.27. Geomembran uygulaması (Anonim, 2019m)

Geokompozitler, bir veya daha fazla geotekstil türünün kombinasyonu ile üretilmektedir. Kombinasyon için seçilecek geosentetik türleri; geonet, geogrids ve geotekstildir. Geokompozit üretilirken seçilen geosentetik türlerinin özelliği geokompozitin işlevini belirlemektedir. Farklı geosentetik türlerine ihtiyaç doğrultusunda geliştirilen geokompozitler farklı geosentetiklerin değişik işlevlerini kullanarak problemlere en iyi çözümler sunmaktadır. Genellikle geokompozit ürteminde geosentetik çeşitleri kullanılsa da bazen sentetik olmayan malzemeler kullanılarak aynı işlevin daha düşük maliyetle gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır. Geokompozit ürünler çok farklı çeşitlerde üretilebildiğinden çok sayıda kullanım alanı ve işlevi vardır. Genellikle ayırma, güçlendirme, filtrasyon ve drenaj işlevleri için geokompozitler kullanılmaktadır. (Koerner, 1999). Geokompozit malzeme örnekleri Şekil 2.28’de görülmektedir.

Geocell birbirine bağlı bal peteğine benzeyen boşlukları ve özgün üç boyutlu yapısı olan bir geosentetik türüdür. Üretimden sonra katlanabilmeleri (akordeon şeklinde) taşıma açısından kolaylık sağlamaktadır. Geocell ürünler daha çok güçlendirme işlevi için tercih edilmektedir. Geocell’in zemine yerleştirilmesi sırasında derin boşluklarına dolan zemin kütleleri ile zemin ortamını sınırlandırarak bütünlüğü sağlamaktadır. Böylece zemin ortamının taşıma gücü artırılmış ve çeşitli etkiler altında yapabileceği oturma miktarı azaltılmış olmaktadır. Geocell kullanımına dair bir örnek Şekil 2.29’da görüldüğü gibidir.



Şekil 2.28. Geokompozit çeşitleri (Anonim, 2019n)



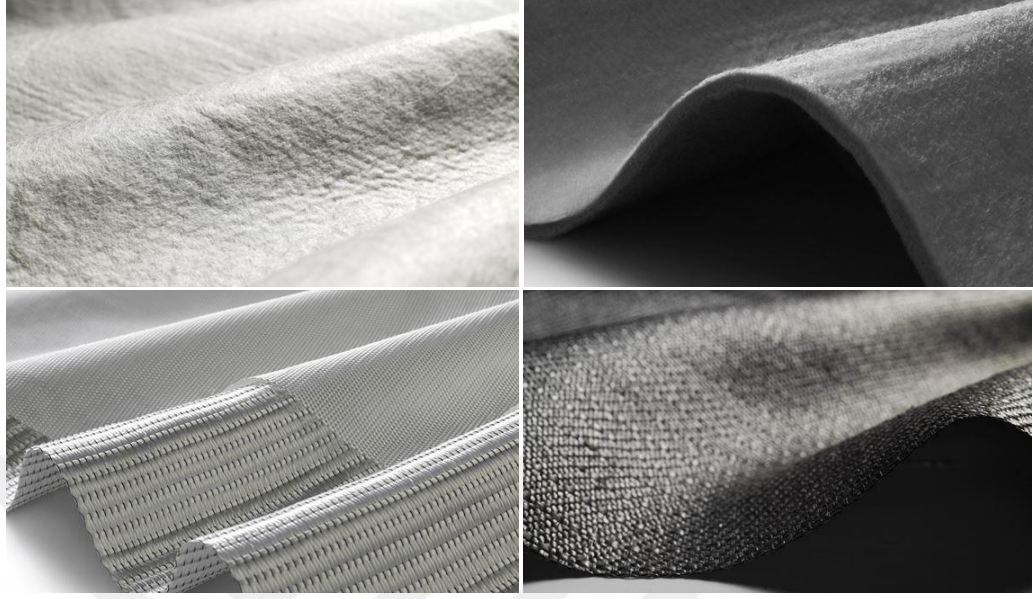
Şekil 2.29. Geocell'in uygulama örneği (Anonim, 2019o)

Geotekstil, yalnızca tekstillerden oluşan geçirgen bir geosentetik üründür (ASTM D4439-04). Geotekstiller üretim tekniğine göre iki tipte üretilebilir. Bu tipler dokunmuş (örgülü) ve dokunmamış (örgüsüz) geotekstildir (Şekil 2.30). Geotekstiller ağır kumaşlara benzemektedir ve tipik olarak gözenekli ve çok esnektir. Geotekstil ürünler güçlendirme, ayırma, drenaj, filtrasyon, yalıtım ve koruma işlevleri için

kullanılabilmektedir. Geotekstillerin en yaygın kullanım alanı yol projeleridir. Kaplamalı ve kaplamasız yollarda ayırma, iyileştirme, güçlendirme ve filtrasyon işlevleri için kullanılmaktadır (Giroud, 1984). Dokunmuş (örgülü) veya dokunmamış (örgüsüz) geotekstil arasındaki fark, dokunmuş (örgülü) geotekstil çözgü ve atkı ipliklerinin birbirine geçmesiyle üretilmektedir. Bu iplikler eğrilmiş, çok filamentli, elyafli ya da yarıklı lifli olabilir. Dokunmamış geotekstillere ise fiberleri/filamanları mekanik olarak veya termal olarak bağlanarak üretilirler. Mekanik bağlama, inşaat mühendisliği uygulamaları için en uygun olan iğneleme tekniği ile yapılmaktadır (Bhatia ve Smith, 1996).

Granüler zeminler ince daneli zeminler üzerine yerleştirilip bir dolgu oluşturulduğunda dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. İnce daneli zeminler, granüler zemin içerisindeki boşluğa girebilir ve/veya granüler zemin, ince daneli zemine doğru hareket edebilir. İlk durum granüler zeminin drenaj kabiliyetini azaltırken, ikincisi granüler zeminin kalınlığı azaltır ve granüler zemin tabakasının bütünlüğü bozar. Bu problemlerin en etkin çözümlerinden birisi geotekstillerin ayırma işlevi için kullanılmasıdır. Geotekstil stabilizasyonunun etkinliğini iki temel faktör belirlemektedir. İlk olarak, granüler zemin geotekstilin üzerinde sıkıştırılırken her bir zemin tabakası geosentetik altında kalan tabii zemin ve geotekstilde izler bırakarak oturur. Bu oturma nedeniyle, granüler zemin daneleri, granüler zemin tabakasını stabilize eden bir pozisyona sabitlenir. İkincisi, tabii zeminin geotekstilden dolayı stabilize edilmesi, zemin göçme modunu yerel kaymadan genel kaymaya değiştirebilir. Bu değişiklik nedeniyle, granüler zemin üzerine daha fazla yük alabilir. Bu fazla yük istenmiyorsa, geotekstil uygulaması ile, granüler zemin tabakası kalınlığı azaltılabilir. Bu durum, başlangıç maliyetlerini düşürmekte ve gereken bakımı azaltmaktadır. Güçlendirme amacıyla geotekstil kullanımında, dokunmuş (örgülü) geotekstil, yüksek çekme mukavemetinden dolayı dokunmamış (örgüsüz) geotekstilden daha uygun olarak kabul edilir. Güçlendirmenin etkinliği, izin verilen oturma miktarına büyük ölçüde bağlıdır. Örneğin, kaplamasız yollarda geotekstil kullanımından daha fazla fayda sağlanır. Çünkü bu yollar büyük miktarlarda deformasyona izin verir. Geotekstil kullanılarak yapılan filtrasyonda geotekstil, zemin danelerini tutar ancak sıvı akışına izin verir. Ayırıcı olan bir geotekstilin mutlaka filtreleme sağlamayacağına dikkat edilmelidir. Filtrasyona ihtiyaç olduğunda,

mühendisler uygun bir geotekstil seçmelidir. Uygun geotekstil seçimi, uygulanan zemin ortamının performansını büyük ölçüde etkileyecektir (Giroud, 1984).

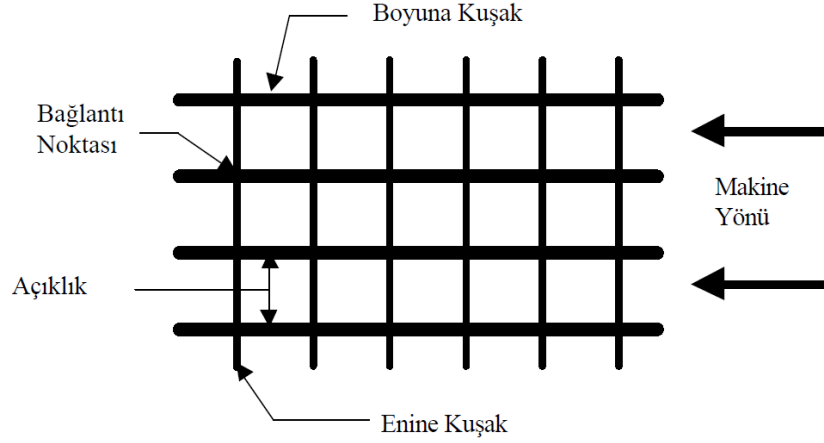


Şekil 2.30. Dokunmuş (altta) ve dokunmamış (üstte) geotekstilller (Anonim, 2019p)

Geogridler, ortogonal veya ortogonal olmayan kuşakların açık delikli ve ızgara benzeri biçimde oluşturulan bir geosentetik türüdür. Geogrid etrafındaki zemini veya diğer malzemeleri içine alacak kadar yeterli büyüklükte deliklere sahip birbirine bağlı paralel kuşak kümelerinden oluşan geosentetik üründür. Bir veya iki yönde Polietilen (PE) veya Polipropilen (PP) plastik levhaların işlenmesi veya Polyester (PET) kuşakların dokunması ve örülmesi geogrid üretmek için kullanılan yöntemlerden bazılarıdır. Geogridler esas olarak güçlendirme (donatı) işlevini yerine getirmek için tasarlanmıştır (Koerner, 1998).

Bir geogridin kuşakları ya uzunlamasına ya da enine olarak tanımlanır. Geogrid mekanik dokuma tezgahında üretildiği yöne paralel olan yön, rulo uzunluğu yönü, makine yönü (MD) veya uzunlamasına yön olarak bilinir. Öte yandan, geogrid düzleminde mekanik dokuma tezgahına ve mekanik yöne dik olan yön, enine yön (TD) veya çapraz makine yönü olarak bilinir. Gerilme modülü ve çekme mukavemeti gibi geogridlerin bazı mekanik özellikleri geogridin test edildiği yöne bağlıdır. Kaplamalarda geogrid kullanılırken genellikle trafik yönünün makine yönünde üretilen kuşaklara paralel olması tavsiye edilmektedir (Kwon vd., 2009). Bir geogridde, uzunlamasına ve enlemesine kuşakların kesişimi bağlantı noktası olarak

bilinir. Bağlantı noktaları dokuma, örme vb. şekillerde oluşturulabilir. Şekil 2.31’de bir geogrid üzerinde geogrid elemanları tanımlanmıştır. Kuşakların ve bağlantı noktalarının konumları değiştirilerek geogridin açıklık tipleri çok farklı şekillerde oluşturulabilmektedir.

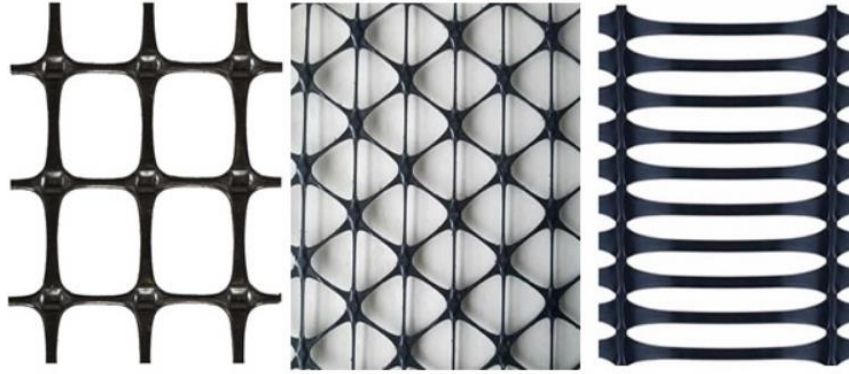


Şekil 2.31. Geogridin bileşenleri (Stadler, 2001)

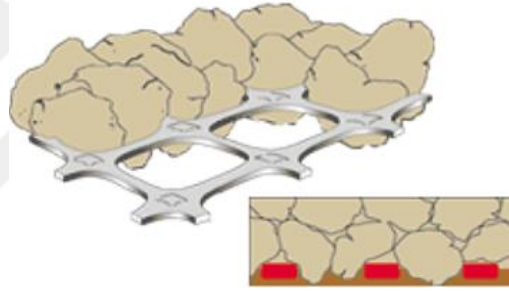
Geogridler, açıklık türüne göre üç ana grupta sınıflandırılabilir. Bunlar; tek eksenli (bir boyutlu), çift eksenli (iki boyutlu) ve üç eksenli (üç boyutlu) şeklindedir. Tek eksenli geogrid tek yönde gerilme dayanımına sahiptir. Genel olarak şevleri, istinat duvarlarını, çeşitli dolguları vb. güçlendirmek için kullanılır. İki eksenli geogridler iki boyutta çekme mukavemetine sahiptirler. Genellikle çeşitli dolgular, kaplamasız yollar, demiryolları vb. güçlendirilmesinde kullanılırlar. Üç eksenli geogridler, üç yönde kuşağa sahip üçgen açıklık geometriye sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde zemin daneleri kuşaklarla daha iyi etkileşime girerler ve tek eksenli ve çift eksenli geogridlerle karşılaştırıldığında her yöne eşit çekme dayanımı sağlarlar. Bunun nedeni, üçgen açıklık geogridinin dikdörtgen açıklığa sahip olanlardan daha kararlı bir ızgara yapısına sahip olmasıdır (Ghafoori ve Sharbaf, 2016). Şekil 2.32’de tek eksenli, çift eksenli ve üç eksenli geogridler görülmektedir.

Geotekstiller ayırma, drenaj ve filtreleme veya güçlendirme için kullanılabilirken, geogridler esas olarak güçlendirme uygulamaları için kullanılır. Geogridler ayrıca sınırlandırma ve kısmi ayırma işlevlerini de sağlayabilir. Sınırlama,

Şekil 2.33'te gösterildiği gibi, zemin taneleri ve geogrid açıklıkları arasındaki kenetlenme mekanizması vasıtasıyla oluşmaktadır.



Şekil 2.32. Çift eksenli, üç eksenli ve tek eksenli geogridler (soldan sağa) (Anonim, 2019q)

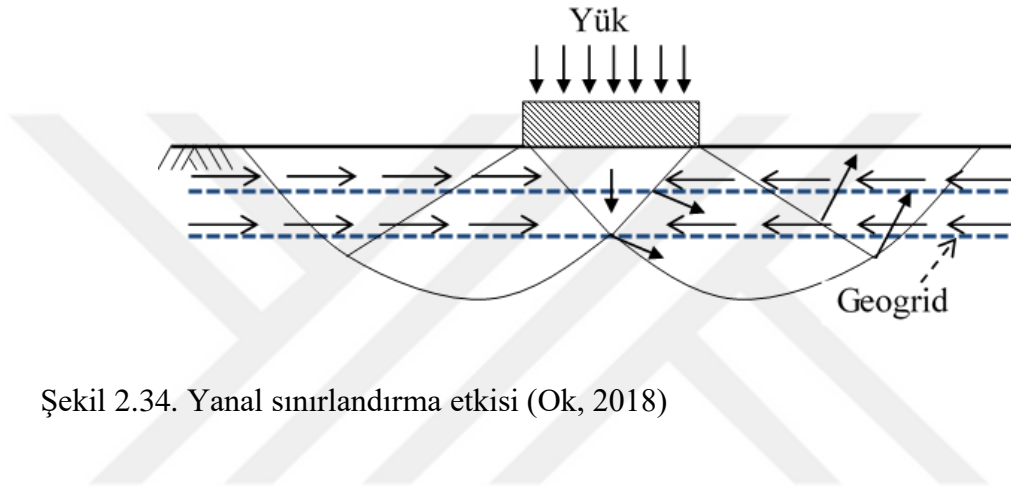


Şekil 2.33. Zemin daneleri ve geogrid arasında kenetlenme mekanizması (Wrigley, 1989)

Kenetlenme mekanizmasının efektif çalışması, zeminin dane dağılımı ile geogridin açıklık şekline ve büyüklüğüne bağlıdır. En iyi kenetlenme mekanizmasını elde etmek için, minimum geogrid açıklığı ile D50 oranının üçten büyük olması gerekmektedir (Jewell vd., 1984). Ayrıca, kenetlenmenin etkinliği geogridin düzlem içi rijitliğine ve geogrid kuşaklarının ve bağlantı noktalarının stabilitesine bağlıdır (Webster, 1993).

Zemin taban katmanındaki yanal kısıtlama, geogrid ile güçlendirilmiş dolgular için temel mekanizmadır. Yanal sınırlandırma mekanizması ve bileşenleri Şekil 2.34'te gösterilmektedir. Şekil 2.34'te gösterildiği gibi, zemin yüzeyine uygulanan dikey yük, zemin tabanındaki malzemelerin yanal yayılma hareketine neden olacaktır. Yük, yüzeye uygulandığı için, tabanda yanal çekme gerilmesi oluşur, Bu da zemin

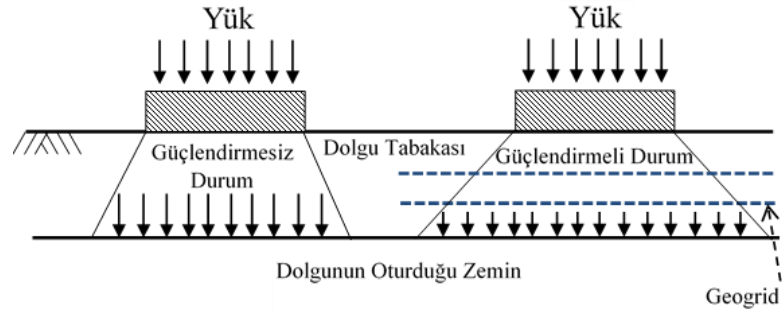
danelerinin yük noktasından uzaklaşmasına neden olur. Zemin içerisine geogrid donatı yerleştirilmesi bu yanal hareketleri kısıtlar. Yanal sınırlama zemindeki geogrid güçlendirmenin birçok bileşenini içerir. Öncelikle, granüler malzemelerin yanal hareketini kısıtlayacaktır. Ayrıca yanal kısıtlama ile taban katmanının rijitliği artırılmış olur. Hatta, geogrid altında kalan zemin tabakasına gelen kayma gerilmelerini azaltır. Yanal sınırlama ile geogrid altındaki zeminde daha iyi bir yük dağılımı oluşmaktadır. (Perkins, 1999; Bender ve Barenberg, 1978; Love vd., 1987; Palmeira ve Milligan, 1989).



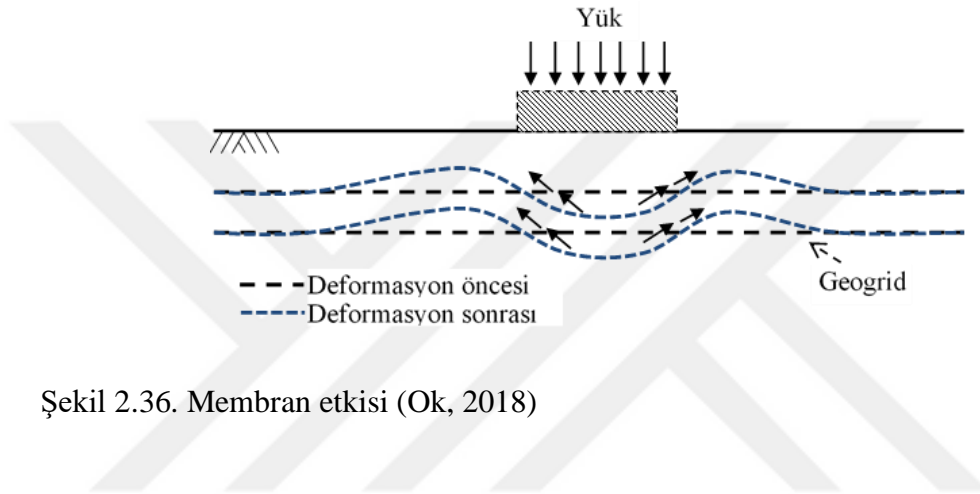
Şekil 2.34. Yanal sınırlandırma etkisi (Ok, 2018)

Bir zemin tabakasının geogridle güçlendirilmesiyle yenilme zarfı, geogrid altında bulunan zayıf zeminden, geogridle güçlendirilmiş nispeten daha mukavemetli granüler zemin tabakasına taşınmaktadır. Bu mekanizma gerilmenin yayılması ve taşıma kapasitesinin artırılması olarak adlandırılabilir. Şekil 2.35'te bu mekanizma görülmektedir. Hatta, granüler zemin içerisine geogrid yerleştirilmesiyle, zayıf zeminin göçme modeli zımbalama kayma kırılmasından genel kayma kırılmasına dönüşebilir (Binquet ve Lee, 1975).

Membranı etkisi, Şekil 2.36'da görüldüğü gibi yük altında düşey yer değiştirmenin etkisi ile gerilen geogridin içbükey bir şekil oluşturması sonucu oluşmaktadır (Giroud ve Noiray, 1981). Membran etkisi kuvveti düşey değildir, ancak düşey bileşeni geogrid altındaki zayıf zemine gelen düşey basıncı azaltmaktadır. Membranı etkisini aktive etmek için bir miktar oturma sağlanmalıdır. Ayrıca, bu mekanizmanın efektifliği için, zayıf zeminin CBR değerinin %3'ten az olmaması gerekmektedir (Barksdale vd., 1989).



Şekil 2.35. Gerilmeyi yayma etkisi (Ok, 2018)



Şekil 2.36. Membran etkisi (Ok, 2018)

2.4 Zeminlerde Göçme Mekanizmaları ve Taşıma Gücü

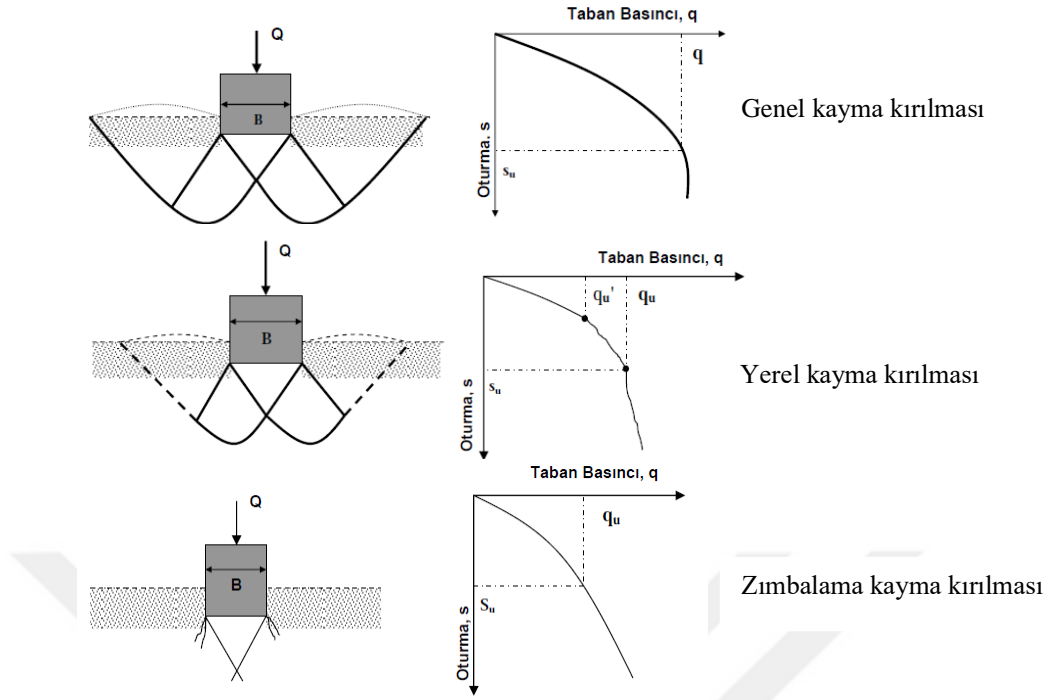
Zeminler çeşitli yapıların altında bulunarak yapıdan gelen çeşitli yükleri taşıdığı gibi çeşitli toprak yapıların ve dolguların oluşturulmasında yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Zeminler yapıdan gelen yükleri genellikle temeller ve çeşitli temel sistemlerinin birleşimi ile oluşan temel sistemleri ile taşımaktadır. Temeller başlıca sığ ve derin temel olmak üzere iki kısımda incelenir. Sığ temeller; tekil, şerit, radye vb. şeklinde sıralanırken, derin temeller kazıklı, ayak, keson vb. şeklinde sıralanmaktadır. Temel ve temel sistemleri statik bir yüke maruz kalması sonucunda temelin göçmesi genellikle temel altında bulunan zeminde kayma yenilmesi şeklinde oluşmaktadır (Uzuner 2016a).

Zeminde üç farklı türde kırılma modeli vardır. Bunlar genel, yerel ve zımbalama kayma kırılmalarıdır. Genel kayma kırılması modelinde oturma-yük eğrisi incelenirse kırılma noktasının belirgin olduğu görülmektedir. Genel kayma kırılmasında kırılma yüzeyi belirgin bir şekilde oluşur ve zemin yüzeyine kadar kırılma yüzeyi

uzanmaktadır. Ayrıca genel kayma kırılmasında zeminin yan yüzeylerinde kabarmalar gözlenir. Yerel kayma kırılması modelinde oturma-yük eğrisi incelenirse kırılma noktasının belirgin olmadığı görülmektedir. Yerel kayma kırılmasında kırılma yüzeyleri de belirgin bir şekilde oluşmamakta ancak zemin yan yüzeylerinde kabarma görülmektedir. Zımbalama kayma kırılması modelinde de oturma-yük eğrisi incelenirse kırılma noktasının belirgin olmadığı görülmektedir. Zımbalama kayma kırılmasında kırılma yüzeyleri de belirgin bir şekilde oluşmamakta ve zemin yan yüzeylerinde kabarma görülmemektedir. Oturma-yük grafiği sonuçlarından ötürü yerel ve zımbalama kayma kırılması modelleri aynı grupta düşünülebilir. Genel kayma kırılması genellikle sıkı ya da sert zemin ortamlarında meydana gelmektedir. Yerel ve zımbalama kayma kırılmaları ise genel itibari ile gevşek ya da yumuşak zemin ortamında meydana gelir. Zemin özelliklerinin kırılma tipleri üzerindeki etkisi için çeşitli ölçütler vardır. Bunlardan birisi D_r (rölatif sıkılık) değerinin 0.30'dan küçük olduğu zeminlerde yerel yada zımbalama kayma kırılmasının, D_r değerinin 0.70'den büyük olduğu zemin ortamlarında ise genel kayma kırılmasının olduğu söylenebilir (Uzuner 2016a). Zeminde kırılma modelleri Şekil 2.37'de gösterilmektedir.

Yerel ve zımbalama kayma kırılmalarının olduğu durumlarda nihai taşıma kapasitesi yük-oturma grafiğinden belirlenmemektedir. Literatürde yerel ve zımbalama kayma kırılmalarının görüldüğü durumlarda nihai taşıma kapasitesini belirlemek için bazı yöntemler önermişlerdir. Das vd. (1994) yük-oturma eğrisinde Δ_s/Δ_q (oturma değişimi/gerilme değişimi) oranının en büyük olduğu ve bu en büyük değerde sabit kaldığı noktanın nihai taşıma kapasitesi olarak kullanılabileceğini önermişlerdir. Yetimoğlu vd. (1994) yük-oturma eğrisinin başlangıç ve bitiş teğetlerinin kesiştirilmesini ve belirlenen bu kesişim noktasının nihai taşıma kapasitesi olarak kullanılabileceğini önermişlerdir.

Zeminin tam göçtüğü anda, temelin ya da temel zemininin birim alanının taşıyabileceği gerilme değeri sınır taşıma gücü, zeminde kırılma oluşmadan ve yapıya zarar verecek düzeyde oturmalar meydana gelmeden temelin ya da temel zemininin güvenli şekilde taşıyabileceği gerilme değeri zemin emniyet gerilmesi (emin, emniyetli, güvenli taşıma gücü) olarak adlandırılır (Uzuner, 2016a). Zemin tabakalarının bir geosentetik ile güçlendirildiği ya da güçlendirilmediği durumlarda zeminin taşıma gücü kavramı ve göçme mekanizması değişime uğramaktadır.

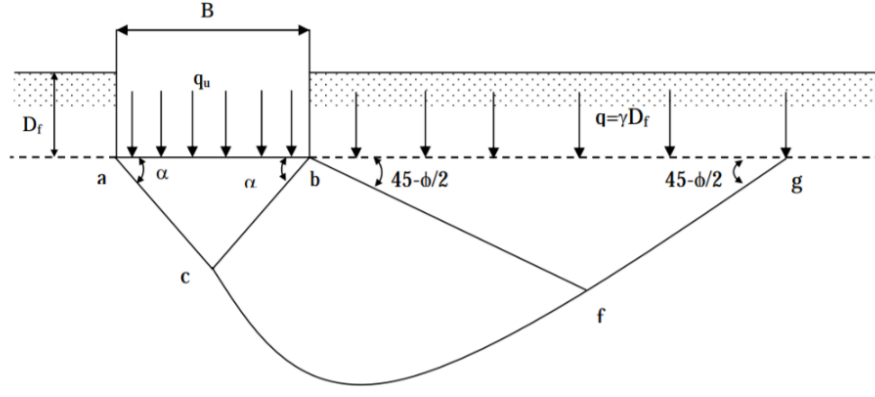


Şekil 2.37. Zeminde kırılma modelleri (Örnek, 2009)

2.4.1 Güçlendirilmemiş Zeminlerde Taşıma Gücü

Zeminin taşıma gücü değerinin tespit edilmesi için bir çok yöntem vardır. Bunlar taşıma gücü teorileri (Terzaghi, Meyerhof, Hansen vb.), arazi deneyleri (Standart penetrasyon, koni penetrasyon, presiyometre, plaka yükleme deneyleri), çeşitli tablo ve abaklar şeklinde sıralanabilir (Uzuner, 2016a).

Taşıma gücü teorilerinden Terzaghi taşıma gücü teorisi en çok bilinen taşıma gücü teorilerinden biridir. Pek çok taşıma gücü teorisi de Terzaghi taşıma gücü teorisinden türetilmiştir. Terzaghi taşıma gücü formülü şerit temel (iki boyutlu) için türetilmiştir. Terzaghi taşıma gücü teorisindeki kırılma yüzeyleri Şekilde 2.38'de gösterilmiştir.



Şekil 2.38. Terzaghi taşıma gücü teorisi (Örnek, 2009)

Terzaghi taşıma gücü formülü türetilirken bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabuller aşağıda sıralanmıştır (Uzuner, 2016a):

- Zemin yarım sonsuz, homojen ve izotropdur,
- Temel tabanı tam sürtünmelidir,
- Temel tabanı altında bulunan zeminde üçgen kaması oluşur (abc üçgeni). Oluşan bu kama, temel ile birlikte hareket eder. “abc” üçgen kaması bölgesindeki cab açısı ve cba açısı birbirine eşit ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerindedir. “abc” üçgen kaması bölgesine aktif bölge denilmektedir,
- “cf” kırılma yüzeyi kısmı logaritmik spiraldir,
- “bcf” geçiş bölgesi olarak adlandırılır,
- “bfg” pasif bölge olup “fg” kısmı düzlemdir (doğrudur),
- “fgb” ve “fbg” açısı “ $45^\circ - \phi/2$ ” değerindedir,
- Temel derinliği (D_f) içerisinde bulunan kırılma yüzeyleri ihmal edilir. Bunun yerine temel taban düzeyinden derinlik basıncı (sürşarj) olarak etkidiği düşünülür,
- Temel yan yüzeyleri ile zemin arasında sürtünme olmadığı kabul edilir,
- Zeminin genel bir zemin (c- ϕ) olduğu düşünülür.

Bu kabuller ışığında, çeşitli denge denklemlerinin çözümünden sonra şerit temeller (iki boyutlu) için Terzaghi Taşıma Gücü Formülü aşağıda görülen Denklem (2.1)’deki halini almıştır.

$$q_u = cN_c + \gamma D_f N_q + 0.5\gamma B N_\gamma \quad (2.1)$$

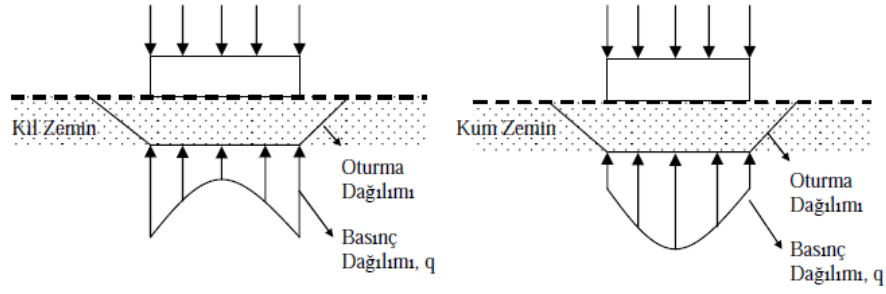
Terzaghi taşıma gücü formülü farklı şekillerdeki temellere uygulanabilmesi için aşağıdaki gibi genelleştirilmiştir ve Denklem (2.2)'de gösterilmiştir.

$$q_u = k_1 c N_c + \gamma D_f N_q + k_2 \gamma B N_\gamma \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'deki genelleştirilmiş Terzaghi Taşıma Gücü Formülü'nde, “c”, zeminin kohezyon; “ γ ”, zeminin birim hacim ağırlığı; “ N_c , N_q , N_γ ”, ϕ 'ye (içsel sürtünme açısına) bağlı taşıma gücü katsayıları; “B”, temel genişliği (kısa kenar ya da çap); “ D_f ”, temelin gömülme derinliği, “ k_1 , k_2 ”, boyutsuz temel şekil katsayıları olarak dikkate alınır. Formül sonucunda “ q_u ” zeminin (temelin) sınır taşıma gücü hesaplanmaktadır (Uzuner 2016a).

Temel vasıtasıyla zeminin üzerine etkiyen çeşitli yükleri güvenli bir şekilde taşıdığını söyleyebilmek için iki koşulun sağlanması gerekmektedir. Bunlar taşıma gücü ve oturma koşullarıdır. Taşıma gücü koşuluna göre, zemin üzerine gelen çeşitli yükler temel zemininde kayma kırılması oluşturmamalı ve temel zemininde göçmeye karşı bir güvenlik olmalıdır. Temel tabanında oluşacak en büyük basınç değerinin zemin emniyet gerilmesi değerinden büyük olmaması gerekmektedir. Bundan dolayı, zemin emniyet gerilmesi değeri hesaplanırken, nihai taşıma kapasitesi değeri belli bir güvenlik sayısına (G_s) bölünmektedir. Oturma koşulu ise, temellerde oluşacak toplam ve farklı oturma değerlerinin izin verilebilir toplam ve farklı oturma değerlerinden büyük olmadığı durumda sağlanmaktadır. Ayrıca, taşıma gücü ve oturma koşullarının sağlandığı temel ya da temel sistemleri en az harcama ile inşa edilmelidir. Bu da ekonomik olma koşulu olarak tanımlanabilir. Bu durum en uygun temel seçimi ile gerçekleştirilebilir (Uzuner 2016b).

Rijit bir temelde, yapıdan gelen çeşitli yüklerden ötürü temel tabanında zemin cinsine bağlı olarak farklı türde oturma ve basınç dağılımı oluşabilmektedir. Farklı türdeki oturma ve basınç dağılımı kil ve kum zeminler için Şekil 2.39'da görülmektedir. Bu zemin ortamlarında temelin yaptığı oturma üniform olsa bile maksimum taban basıncı değeri kum zeminlerde temel ortasında oluşurken kil zeminlerde ise temel kenarında oluşmaktadır (Örnek, 2009).



Şekil 2.39. Rijit bir temelde meydana gelen oturma ve basınç dağılımı (Örnek, 2009)

Bazı durumlarda zeminler farklı tabakalardan oluşmakta veya zeminin derinlik boyunca bazı parametreleri (c , ϕ , γ vb.) farklılık gösterebilmektedir. Bu durumlarda bu zemin ortamları üzerine temel ya da temel sistemleri inşa edilmek istenirse bu zemin ortamlarının nihai taşıma güçleri farklı şekillerde hesaplanmaktadır. Bu tür zemin ortamlarının nihai taşıma gücünü hesaplamak için, temel ya da temel sistemlerinin oturduğu zemin tabakaların tipi ve mühendislik özellikleri dikkate alınarak, aşağıda özetlenen üç genel durum vardır (Das, 2009):

- Tabakaları kil zeminlerin oluşturduğu durum ($\phi = 0$): İki durum vardır. Üst tabakanın alt tabakadan zayıf olduğu durum ($c_1 < c_2$) ve üst tabakanın alt tabakadan sağlam olduğu durum ($c_1 > c_2$) ($c = \text{kohezyon}$)
- Tabakaları $c-\phi$ (karma) zeminlerin oluşturduğu durum: İki durum vardır. Üst tabakanın alt tabakadan zayıf olduğu durum ve üst tabakanın alt tabakadan sağlam olduğu durum.
- Tabakaları güçlü kum ve suya doymuş zayıf kil zeminlerin oluşturduğu durum: İki durum vardır. Alt tabakada suya doymuş zayıf kil zeminin üst tabakada ise güçlü kum zeminin olduğu durum ve üst tabakada suya doymuş zayıf kil zeminin alt tabakada ise güçlü kum zeminin olduğu durum

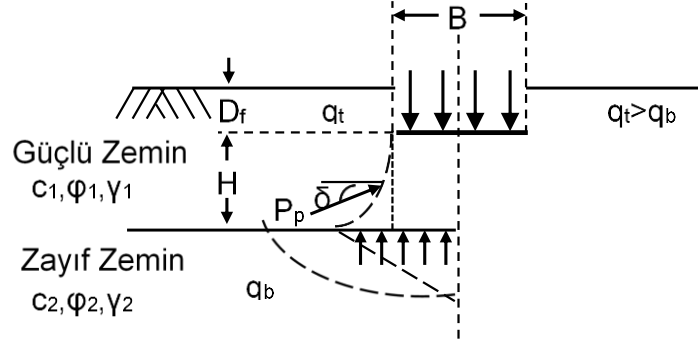
İki ya da daha çok tabakalı zeminlerde göçme yüzeyinin hangi tabakayı etkileyip etkilemediği göçmenin nasıl oluşacağını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Bu durum genellikle üstteki ve alttaki tabakanın hangisinin zayıf ya da sağlam olduğuna veya üst tabakanın kalınlığına ve mukavemetine bağlıdır. Tabakalı zeminler için literatürde çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi özetlenmiştir (Demir, 2011):

- Temelin gömülme derinliği ile bu seviyeden temelin genişliği kadar derinlikte bulunan mevcut zemin tabakalarından en zayıf zemine ait parametreler ile bir taşıma gücü hesabı yapılabilir. Hesaplanan bu taşıma gücü değeri ile zemin emniyet gerilmesi hesaplanır ve tasarımlar bu değere göre yapılır. Sadece en zayıf tabakanın parametreleri ile zemin emniyet gerilmesinin hesaplanmasının nedenlerinden birisi göçmenin büyük bir çoğunluğunun bu zayıf bölgede oluşmasının daha muhtemel olmasıdır. Çeşitli yük etkilerinin bir kısmının, daha sağlam tabakalar tarafından da karşılanacağından bu tarz bir hesaplama ile edilen zemin emniyet gerilmesi ile güvenli tarafta kalınmaktadır.
- Temelin gömülme derinliği ile bu seviyeden temelin genişliği kadar derinlikte bulunan mevcut zemin tabakalarından her birinin tabaka kalınlıklarına göre ağırlıklı ortalaması alınarak zemin parametreleri (c , ϕ , γ , vb.) belirlenir. Bu şekilde hesaplanmış zemin parametrelerine göre nihai taşıma gücü değeri ve zemin emniyet gerilmesi değerleri belirlenir.
- Temel tabanı altında oluşabilecek göçme yüzeyleri tahmini bir şekilde belirlenir. Belirlenen göçme yüzeylerindeki gerilmeler aynı şev stabilitesi analizlerinde olduğu gibi hesaplanır. Nihai taşıma gücü değerinin en düşük çıktığı yenilme yüzeyi kritik göçme yüzeyi olarak dikkate alınır.

Alt tabakada zayıf (kil) zeminin üst tabaka ise güçlü (sıkı kum) zeminin bulunduğu tabakalı durumlar için Meyerhof (1974) taşıma kapasitesi hesabı için bir yöntem önermiştir. Zemin ortamında böyle bir tabakalaşma için genel olarak kayma yenilmesi yüzeyi Şekil 2.40'da görüldüğü şekilde meydana gelebileceğini bildirmiştir.

Üst tabakada bulunan güçlü zeminin yenilme yüzeyi boyunca etkilendiği toplam zemin itki basıncını P_p , bu basıncın yatayla yaptığı ortalama açığı da δ olarak belirtmiştir. Bu durumda nihai taşıma kapasitesinin hesaplanabilmesi için aşağıdaki Denklem (2.3) önermiştir.

$$q_u = c_2 N_{c2} + 2P_p \sin \delta / B + \gamma_1 D_f \quad (2.3)$$



Şekil 2.40. Alt tabakada zayıf (kil) zeminin üst tabaka ise güçlü (sıkı kum) zeminin bulunduğu tabakalı durumlarda yenilme yüzeyi (Ok, 2018)

Denklem (2.3)'te bulunan N_c , kil zemin için taşıma kapasitesi faktörüdür. Bu değer kil zeminin içsel sürtünme açısının sıfır olduğu durumda 5.14 alınır. Bu denklemde bulunan itki kuvvetinin (P_p) hesaplanması için aşağıdaki Denklem (2.4) kullanılabilir.

$$P_p = 0.5\gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) K_p \cos \delta \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'te bulunan " K_p " pasif yanal toprak basıncı katsayısıdır. Ayrıca yukarıdaki denklemde bulunan " δ " açısı temel yakınları ile zayıf zemin yüzeyi arasında oluşur ve sıfır ile " φ " değeri arasındadır. Buradaki " δ " açısı yaklaşık bir şekilde " $2\varphi/3$ " ile hesaplanabilir. Ayrıca düşey yönde zımbalama kesmesi direncinin kullanılması önerilmektedir. Bunun için K_s katsayısı hesaplanmalıdır ve bu hesaplama için aşağıdaki Denklem (2.5) önerilmektedir.

$$K_s \tan \varphi = K_p \tan \delta \quad (2.5)$$

Yukarıdaki öneriler ışığında nihai taşıma kapasitesine ait denklem düzenlenirse aşağıda verilen şerit temeller için nihai taşıma kapasitesi formülü olan Denklem (2.6) kullanılabilir.

$$q_u = c_2 N_{c2} + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) K_s \tan \varphi / B + \gamma_1 D_f \quad (2.6)$$

Dairesel temellerin aynı koşullarda nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesi için de aşağıda düzenlenmiş olan Denklem (2.7) önerilmiştir.

$$q_u = 1.2c_2N_{c2} + 2\gamma_1H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) sK_s \tan \varphi / B + \gamma_1D_f \quad (2.7)$$

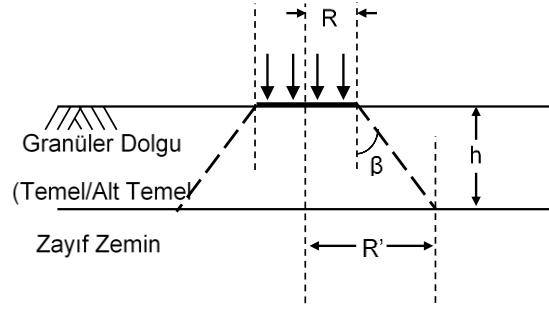
Denklem (2.7)'de bulunan s terimi, silindirik yüzeye etki eden pasif zemin basıncı tarafından belirlenen bir şekil katsayısıdır. Eğer küçük H/B değerleri olursa s değeri 1 alınabilmektedir. Zemin itki basıncının (P_p) yatayla yaptığı ortalama açı (δ), tahmini düşey zımbalama yenilmesi yüzeyini etkileyen toplam zemin itki basıncını etkilemektedir. Eğer zımbalama yenilme yüzeyi tam (gerçek) bir şekilde tahmin edilebilirse “ δ ” değeri içsel sürtünme açısı değerine eşit olacaktır. Fakat tahmini yenilme yüzeyi kullanılarak analiz yapıldığından dolayı δ açısı değeri içsel sürtünme açısı değerinden daha az olmaktadır. Denklemde bulunan zımbalama kesme katsayısı (K_s), zemin tabakalarının nihai taşıma güçlerinin bir fonksiyonudur (q_2/q_1) ve zımbalama kesme parametresi (δ/φ_1) değerine bağlıdır. Zımbalama kesme katsayısı (K_s) hazır eğriler kullanılarak belirlenmektedir.

Tabakaları zeminlerin nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesindeki yaygın olarak kullanılan diğer bir yöntem ise yükü yayma modelidir. Bu yöntem genellikle zayıf zemin üzerine granüler dolgu yerleştirildiği durumlarda nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Yükü yayma modelinde, granüler dolgunun üzerine gelen yükü yaydığı ve alt tabakadaki zayıf zemine bu şekilde ilettiği düşünülmektedir. Bu şekilde, zayıf zemini etkileyen yayılı yük zeminin taşıma kapasitesini geçerek göçmenin oluştuğu varsayılmıştır.

Birçok araştırmacı, yükü yayma modeline benzer yaklaşımlar kullanmışlardır (Love vd., 1987; Giroud ve Han 2004a; Giroud ve Han 2004b; Jewell 1996; Lyons ve Fannin 2006; Demir vd., 2013; Han vd., 2011). Yükü yayma modelinde dolgunun altında bulunan zayıf zeminde üniform bir gerilme oluşmaktadır. Bu üniform gerilme yük dağıtma açısı (β), dolgu kalınlığı (h), temelin yarıçapı (R) ve dolgunun yüzeyine uygulanan basınç (p) gibi parametrelere bağlıdır. Yükü yayma modeline ait terimlerin şekil üzerinde tanımlanması Şekil 2.41’de gösterilmiştir.

Üst tabakada granüler dolgu alt tabakada zayıf zemin bulunduğu durumda, dolgu üzerine dairesel bir temel vasıtasıyla yük etki ediyorsa yükü aktaran dairesel temelin yarıçapı R , uygulanan yük P ve basınç p olarak dikkate alınarak aşağıdaki Denklem (2.8) oluşturulmuştur.

$$P = p\pi R^2 \quad (2.8)$$



Şekil 2.41. Yükü yayma modeli (Ok, 2018)

Alt tabakada bulunan zayıf zemin kil olduğunda, zeminin nihai taşıma kapasitesi (q') en basit hali ile aşağıda görülen Denklem (2.9) ile hesaplanabilir.

$$q' = N_c c_u \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)'da c_u drenajsız kayma mukavemeti ve N_c taşıma gücü katsayısıdır. Zeminin taşıyabileceği yük (P') aşağıda görülen Denklem (2.10) ile hesaplanabilir.

$$P' = N_c c_u \pi R'^2 \quad (2.10)$$

Zeminin taşıyabileceği yük (P') ile uygulanan yük (P) eşitlendiğinde aşağıda belirtilen Denklem (2.11) oluşturulur.

$$p = N_c c_u \left(\frac{R'}{R} \right)^2 \quad (2.11)$$

Denklem (2.11)'deki R' değeri, geometriden faydalanılarak, aşağıdaki Denklem (2.12) ile hesaplanabilmektedir.

$$R' = R + h \tan \beta \quad (2.12)$$

Literatürde yapılan çalışmalarda, denklemde bulunan yük dağıtma açısının (β) granüler dolgu kalınlığından etkilendiği bildirilmiştir. Dolgu kalınlığı artarken yük

dağıtma açısının arttığı ve genelde değerinin 20° ile 40° arasında değişebildiği söylenmiştir (Lyons ve Fannin 2006; Demir vd., 2013).

2.4.2 Geosentetik ile Güçlendirilmiş Zeminlerin Taşıma Gücü ve Temel Göçme Mekanizmaları

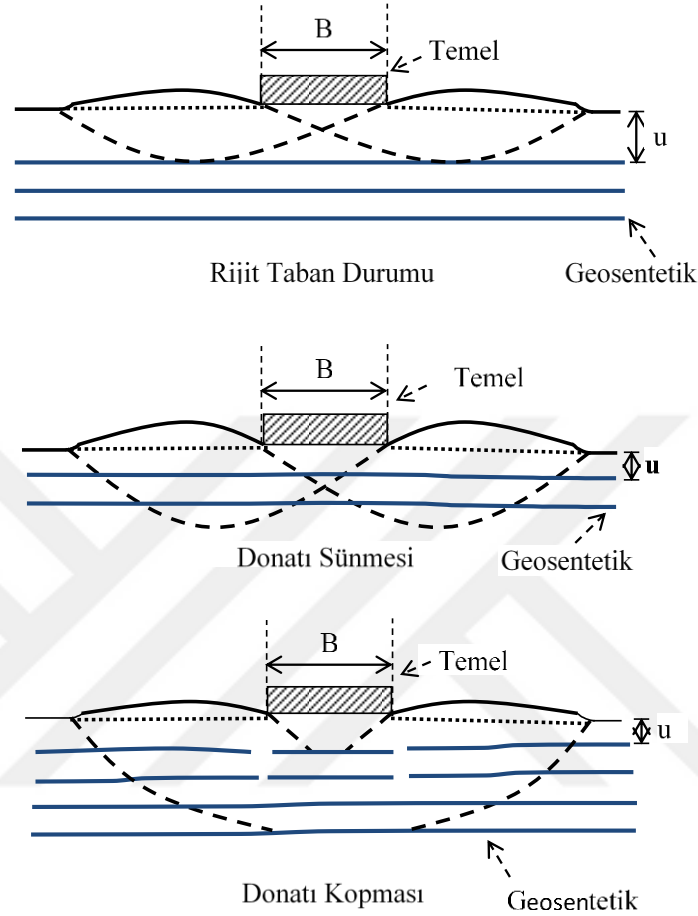
Literatürde geosentetikler ile güçlendirilmiş zeminler ile alakalı çeşitli taşıma gücü ve temel göçme mekanizmaları belirtilmiştir. Binquet ve Lee (1975) yaptıkları çalışmalar ışığında üç farklı tipte göçme mekanizmasının oluşabileceğini belirtmişlerdir. Göçme mekanizmalarının, geosentetiklerin yerleştirilme düzeni ve rijitliklerinden oldukça etkilendiği belirtilmiştir. Şekil 2.42’de bu göçme mekanizmalarına dair tipik çizimler görülmektedir. Göçme mekanizmalar aşağıda özetlenmiştir (Örnek, 2009):

- Rijit taban modeli: Göçme geosentetik donatılı kısmın üzerinde olduğu göçme modelidir. Genellikle ilk donatı derinliğinin $u > 2B/3$ olduğu durumda oluşmaktadır. (u , donatı gömülme derinliği, B temel genişliği)
- Donatı sünmesi modeli: İlk donatı derinliği $u < 2B/3$, donatı sayısı $N < 3$ olduğunda ya da donatı boyunun oldukça kısa olduğu durumda oluşabilmektedir.
- Donatı kopması modeli: İlk donatı derinliği $u < 2B/3$, donatı sayısı $N > 4$ ve donatı boyunun fazla olduğu durumda oluşabilmektedir.

Geosentetikle güçlendirilmiş zemiler (dolgular) için bir diğer göçme mekanizması Wayne vd., (1998) tarafından önerilmiştir. Geosentetik donatının yerleşim düzeni ve zeminin türüne göre değişiklik gösteren dört farklı göçme mekanizması aşağıda özetlenmiştir (Şekil 2.43):

- Donatı üzerinde göçme modeli: İlk donatı derinliği (u) belli bir değerden büyük olduğunda donatılı bölge rijit bir sınır gibi davranabildiği modeldir. Bu göçme modelini engellemek için geosentetik donatı temele yakın konumlandırılmalıdır.
- Donatılar arası göçme modeli: Donatılar arası mesafe (h) belli bir değerden büyük olduğunda meydana gelmektedir. Bu göçme modelini

engellemek için geosentetik donatılar arasındaki mesafe uygun şekilde konumlandırılmalıdır.



Şekil 2.42. Geosentetik ile güçlendirilmiş zeminlerde göçme mekanizmaları (Binquet ve Lee, 1975)

- Donatılandırılmış bölge boyunca göçme modeli: Göçme olayı geosentetikler ile donatılandırılmış bölge boyunca meydana gelmektedir. Geosentetik donatı yeteri kadar uzun değilse ve donatılandırılmamış bölge çok rijit ise zımbalama göçmesi şeklinde bir göçme durumu meydana gelmektedir. Bu göçme modelinde donatılandırılmış bölge rijit bir derin temel gibi davranmakta bu donatılandırılmış bölgenin kalınlığı ise temelin gömülme derinliği gibi düşünülmektedir. Bu koşullarda, donatılandırılmış temel zemininde nihai taşıma kapasitesi, klasik taşıma gücü yöntemleri ile hesaplanabilmektedir.

- Donatılandırılmış bölge içinde göçme modeli: Bu göçme modelinde, göçme olayı donatılandırılmış bölge içinde oluşmaktadır. Donatılandırılmış bölge boyunca zımbalama göçmesi oluşmaktadır. Bu durum genellikle uygun donatı yerleştirilmesi durumunda oluşmaktadır. Bu göçme modeli için, Meyerhof (1974) tarafından önerilen alt tabakada zayıf zemin üst tabakada sert zemin olması durumunda taşıma gücü artışı formülüne, donatı katkısı ilave edilerek aşağıda verilen Denklem (2.13) önerilmiştir.

$$q_{u(R)} = q_b + 2c_t(B + L) \frac{d}{BL} + [\gamma_t H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{d}\right) K_s (B + L)(\tan \varphi_t / (BL))] + 2(B + L) \frac{T}{BL} - \gamma_t d \quad (2.13)$$

Yukarıdaki formülde (2.13); “L”, temel uzunluğu; “B”, temel genişliği; “q_b”, geosentetik donatılandırılmış bölge altında nihai taşıma kapasitesi; “γ_t”, üst tabakaya ait birim hacim ağırlığı; “c_t” üst tabakaya ait kohezyon değeri; “d”, üst tabaka kalınlığı, “D_f”, temelin gömülme derinliği; “T”, donatı çekme kuvveti; “φ_t”, üst tabakanın içsel sürtünme açısı; “K_s”, üst tabakaya ait zımbalama kayma katsayısıdır. “K_s” değeri tabakalı zemin üzerine oturan yüzeysel temelin nihai taşıma kapasitesine bağlı sürtünme açısının bir fonksiyonudur (Örnek, 2009).

Geosentetik donatılı zeminlerdeki göçme mekanizması ile alakalı bir diğer çalışmada, Michalowski (2004) kopma göçmesi ve sünme göçmesi olmak üzere iki farklı göçme mekanizması tanımlamıştır. Süperpozisyon yöntemini uygulayarak, geosentetik ile güçlendirilen zeminler üzerindeki şerit temellerin taşıma kapasitelerini hesaplayabilmek adına oluşabilecek iki farklı göçme durumu için denklem önermiştir.

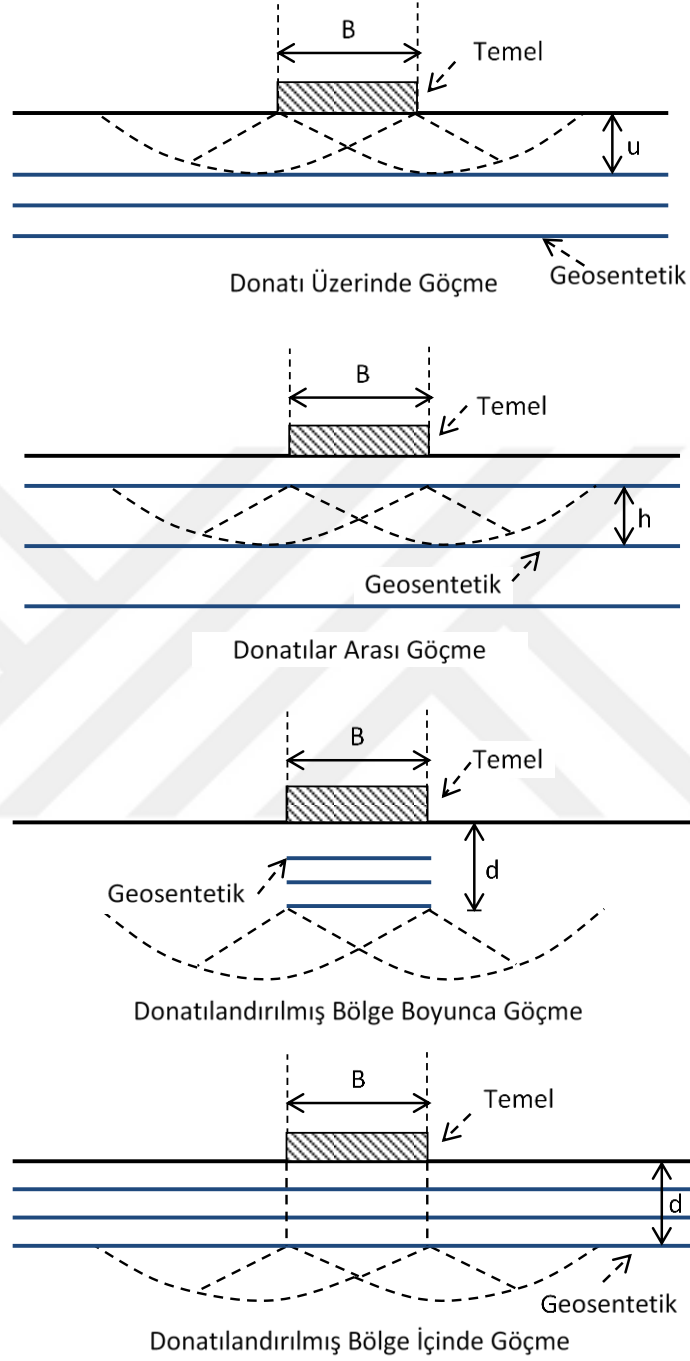
Michalowski (2004) tarafından sünme göçmesi için önerilen denklemler aşağıda Denklem (2.14), (2.15) ve (2.16)’da verilmiştir.

$$p = cN_c + qN_q + 0.5\gamma BN_\gamma + k_t M'_r \quad (2.14)$$

$$k_t = T_t/h \quad (2.15)$$

$$M'_r = (1 + \sin \varphi) e^{\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \tan \varphi} \quad (2.16)$$

Denklem (2.15)'te bulunan " T_t ", donatının çekme dayanımı; " h ", donatılar arası mesafedir.



Şekil 2.43. Geosentetikler ile güçlendirilmiş zeminlerde çeşitli göçme mekanizmaları (Wayne vd., 1998)

Michalowski (2004) kopma göçmesi için, tek bir geosentetik donatı ile güçlendirme için aşağıdaki Denklem (2.17)'yi önermiştir.

$$p = \frac{1}{1 - \mu \frac{u}{B} M_p} \left[c(N_c + f_c M_c) + q(N_q + \mu M_q) + \gamma B \left(0.5 N_\gamma + \mu \frac{d}{B} M_\gamma \right) \right] \quad (2.17)$$

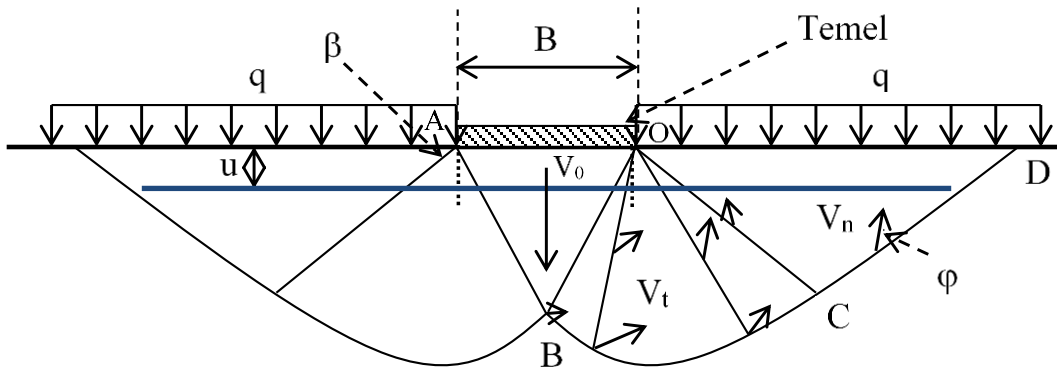
Denklem (2.17)'de, “B”, temel genişliği; “N_c, N_q ve N_γ”, zemin taşıma gücü katsayıları; “μ”, zemin-geosentetik donatı ara yüzey sürtünme katsayısı; “M_p, M_q, M_c ve M_γ”, geosentetik donatı taşıma gücü katsayıları; “u”, ilk geosentetik donatının derinliği; “q”, sürşarj yükü; “c”, kohezyon, “γ”, zemin, n birim hacim ağırlığı; “f_c”, geosentetik donatı-zemin ara yüzey kohezyonunun zemin kohezyonuna oranıdır (Örnek, 2009).

Eğer, birden çok geosentetik donatı kullanılarak güçlendirme gerçekleştirilecekse Michalowski (2004) aşağıdaki Denklem (2.18)'i önermiştir.

$$p = \frac{1}{1 - \mu \frac{u}{B} M_p \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{B}} \left[c(N_c + n f_c M_c) + q(N_q + n \mu M_q) + \gamma B \left(0.5 N_\gamma + \mu M_\gamma \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{B} \right) \right] \quad (2.18)$$

Denklem (2.18)'de, “n”, donatı sayısı; “h”, donatılar arası mesafe; “d_i”, i. tabakanın derinliği (=u-(i+1)) olarak alınmaktadır.

Ayrıca, Michalowski (2004), geosentetik donatıların taşıma gücüne maksimum desteğinin Şekil 2.44'te görüldüğü gibi B ve C noktaları üzerine geosentetik donatı yerleştirildiği durumda oluşabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.44. Geosentetiklerle güçlendirilmiş zeminlerde tipik göçme mekanizması (Demir, 2011)

2.5 Literatür Özeti

Bu başlık altında literatürde bulunan CDW, puzolanlar, geosentetikler ve model yükleme deneyleri konularına dair çalışmalar özetlenmiştir.

Del Rio Merino vd. (2010), CDW'nin geri dönüşümünün ve kullanılmasının optimize edilmesinde halihazırda uygulanan farklı uygulamalar hakkında bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, önerilen çeşitli tedbirleri ve bu atığın işlenmesini geliştirmek için zorlukları ve stratejileri ele almışlardır. Yazarlar, İspanya'dan atık işleme konusunda çeşitli örnekler vermişlerdir. Yazarlar yaptıkları çalışmada, genel olarak İspanya'daki inşaat şirketleri tarafından atık yönetimi uygulamalarının gerçekleştirilmesindeki eksiklikleri vurgulamışlardır. Yazarlar, çevresel etkinliği artırmak için, her yetki alanında bilinçli ve kapsamlı bir CDW yönetim planının uygulanması gerektiğini önermişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada, sürdürülebilir büyümeye katkıda bulunabilecek yeni inşaat yöntemlerinin uygulanması yoluyla çevresel faydaların sağlanabileceği CDW'nin yönetimine yönelik bütünsel bir yaklaşım sunmuşlardır. Atık imha yasalarının ve yönetmeliklerinin titiz bir şekilde kullanılmasının ve uygulanmasının zorunlu tutulması ve CDW'nin neden olabileceği ciddi kirlenici etkiyi azaltmak için atıkların geri dönüşümünün ve yeniden kullanımının teşvik edilmesi gerektiğini söylemişlerdir. İnşaat sektörü paydaşlarının, inşaat atığının önlenmesinin ve azaltılmasının, çevresel etkilerinin yanında olası mali tasarrufu da sağladığının farkında olmaları gerektiğini belirtmişlerdir. Fakat, bu şekilde, sadece CDW üretimindeki bir artıştan kaçınma ile temel hedeflere ulaşmanın mümkün olmadığını, üretilen atık malzemelerin yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesinin de teşvik edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Ayrıca, atık malzemelerin doğru işlenmesiyle ve CDW'de bulunan kaynakların geri kazanılmasının en üst düzeye çıkarılmasıyla inşaat endüstrisinde daha sürdürülebilir bir gelişime katkıda bulunabileceğini belirtmişlerdir.

Sivakumar vd. (2004), bina yıkıntı atığı, beton atığı ve doğal kırmataş (bazalt) üzerinde büyük ölçekli doğrudan kesme cihazında tekrarlı yük testleri gerçekleştirmişlerdir. Doğal kırmataş ile CDW'nin davranışlarını kıyaslamışlardır. İnşaat ve yıkıntı atığı malzemelerinin gerektirdiği performans seviyesinin, kullanıldığı uygulamalara bağlı olduğunu, geri dönüştürülmüş birçok inşaat atığının, çeşitli geoteknik uygulamalarla ilgili olarak yeterli kayma dayanımına sahip olabildiklerini bildirmişlerdir. Bununla birlikte, bu tür malzemelerin olası bir sakıncasının,

tekrarlanan yükleme sırasında oluşabilecek ezilme riski olduğunu düşünmüşlerdir. Çalışmalarında CDW'nin kullanımının olası bir sakıncası olan ezilme davranışını incelemişlerdir. Ezilme miktarını, test edilen malzemenin granülometrik analizini yaparak ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda, her iki yapı atığının da (bina yıkıntı atığı ve beton atığı) dane ezilmesine karşı duyarlı olduğunu göstermişlerdir. Ezilme miktarının hem düşey basınçtan hem de yükleme sayısından etkilendiğini, bunun da pik sürtünme açısından belirgin bir düşüşe yol açtığını vurgulamışlardır.

Leite vd. (2011), CDW kompozisyonunun önemini ve mekanik davranışlarındaki sıkıştırma derecesini incelemişlerdir. İnşaat ve yıkıntı atıklarının geoteknik karakteristikleri, tekrarlı üç eksenli ve kaliforniya taşıma gücü oranı deneyleri ile gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, CDW'nin kompozisyonun ve sıkıştırma düzeyinin, CDW agregasının fiziksel özellikleri üzerinde etkili olduğunu belirlemişlerdir. Sıkıştırma işleminin, CDW danelerinin kısmen parçalanmasına ve kırılmasına, kübik tane yüzdesini artmasına ve dane büyüklüğü dağılımının değişmesine neden olduğu belirtilmiştir. Bu fiziksel değişimin, CDW'nin daha iyi yoğunlaşmasına ve sonuç olarak taşıma kapasitesinde, esnek modülünde ve kalıcı deformasyonunda iyileşmeye katkıda bulunduğu bildirilmiştir. Çalışmalarının sonuçları ışığında CDW malzemesinin düşük hacimli yollar için yol temel ve alttemel katmanlarında kullanılabilmesini belirtmişlerdir.

O'Mahony ve Milligan (1991) CDW'nin yeniden kullanımı için araştırmalar yapmışlardır. İnşaat ve yıkıntı atıklarının yol alt temel tabakalarında kullanımı üzerine yoğunlaşmışlardır. Araştırmalarında, beton atığı ve yıkıntı atığı özellikleri üzerinde durmuşlardır. Beton atığı malzemesinin beton yol kaplamalarının bozulması, parçalanması ve taranması sonucu, yıkıntı atığının ise genel bir yıkım enkazından elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu malzemelerin performansını, laboratuvar testleri gerçekleştirerek, İngiltere'de yaygın olarak alttemel agregası olarak kullanılan kireçtaşı ile karşılaştırmışlardır. Agregalar üzerinde kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR), kompaksiyon, kesme kutusu ve dona duyarlılık testleri gerçekleştirmişlerdir. Beton atığının CBR değerinin kireçtaşına benzer olduğunu, ancak yıkıntı atığının CBR değerinin en düşük çıktığını bulmuşlardır. Bununla birlikte, tüm malzemelerin şartnamede alt limit olarak belirtilen %30 değerinden daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Geri dönüştürülmüş malzemelerin hafif agregalar olarak tanımlanabilmesine rağmen, kayma mukavemetlerinin kireçtaşınıninkine benzer

olduğunu bulmuşlardır. Yıkıntı atığı ve beton atığının orta dayanımlı alt temel agregası, kireçtaşının yüksek dayanımlı alt temel agregası olarak sınıflandırılacağı sonucuna varmışlardır. Yıkıntı atığının dona karşı duyarlılığı konusunda kesin bir sonuç alamadıklarını, beton atığının dona karşı duyarlı olduğunu bulmuşlardır. Bununla birlikte, geri dönüştürülmüş agregaların kendiliğinden çimentolanma özelliği, bu malzemelerin donmaya karşı duyarlılığının zamanla azalacağı anlamına gelebileceğini belirtmişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneylerin çoğunda, geri dönüştürülmüş agregaların kireçtaşı kadar iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle geri dönüştürülmüş agregaların alternatif bir alt temel agregası olarak kullanılabilmesi sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, geri dönüştürülmüş malzemelerin üretimi ve kalitesi hakkında bazı uygun yönergelere ihtiyaç olduğunu bildirmişlerdir.

Bennert vd. (2000) yaptıkları çalışmada iki farklı CDW üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar çalışmaları kapsamında geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA) ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregası (RAP) kullanmışlardır. Bu iki atık malzemeyi New Jersey'deki karayolu temel inşaatlarında sıkça kullanılan doğal agregası ile karşılaştırmışlardır. Hem geri dönüştürülmüş beton agregasını hem de geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregasını, doğal agregası ile çeşitli oranlarda karıştırmışlar ve deneysel yöntemler ile bu karışımların davranışını araştırmışlardır. Deney numuneleri üzerinde elek analizi ve kompaksiyon deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca bu deney numuneleri üzerinde tekrarlı üç eksenli testler yaparak deney numunelerinin esneklik modülü ve kalıcı deformasyon değerlerini belirlemişlerdir. Laboratuvar testleri sonucunda geri dönüştürülmüş beton agregası, geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregası ve doğal agregası ile harmanlanmış malzemelerin hepsinde halihazırda kullanılan doğal agregadan daha yüksek esneklik modülü değerleri elde etmişlerdir. Kalıcı deformasyon sonuçlarına göre geri dönüştürülmüş beton ile karıştırılmış numunelerde, 100000 çevrim yükleme sonunda en düşük kalıcı deformasyon değerleri gözlemlenmiştir. Buna karşılık, geri dönüştürülmüş asfalt kaplama agregası ile karıştırılmış numunelerde, aynı sayıda döngü sonucunda en yüksek miktarda kalıcı deformasyon sonuçları aldıklarını bildirmişlerdir.

Molenaar ve van Niekerk (2002) CDW malzemelerinin dane boyutlarının, bileşimlerinin ve kompaksiyon derecelerinin mekanik davranışı nasıl etkilediğini

araştırmışlardır. Çalışmaları kapsamında elek analizi, kompaksiyon, geleneksel üç eksenli ve tekrarlı üç eksenli deneyleri yapmışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmaların sonucu olarak, kompozisyon ve gradasyon gibi faktörlerin kesin bir şekilde geri dönüştürülmüş malzemelerden yapılan temel tabakalarında mekanik özellikler üzerinde bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, kompaksiyon derecesinin en önemli faktör olduğu sonucuna varmışlardır. Bunun önemli bir pratik sonuç olduğunu, çünkü pratikte kompozisyon ve gradasyon özelliklerinin kontrolünün her zaman mümkün olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca, genellikle bu malzemelerin üretilmesi ve taşınmasından kaynaklı olarak bu faktörlerin belirli bir miktar değişiklik gösterebileceğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte, yüksek sıkıştırma seviyeleri nispeten kolay ve düşük maliyetlerle sağlanabileceğini söylemişlerdir.

Barbudo vd. (2012) geri dönüşümlü beton agreganın (beton ve moloz karışımı) çeşitli özelliklerinin yol dolguları için uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar kapsamında 27 farklı geri dönüştürülmüş ve 4 farklı doğal agrega kullanmışlardır. Geri dönüştürülmüş agregaları 11 farklı tesisten temin etmişlerdir. Yazarlar, geri dönüştürülmüş agregaların farklı bileşenleri ile mekanik davranışları arasındaki ilişkiyi incelemeye odaklanmışlardır. Bu şekilde bu malzemelerin yol uygulamalarındaki olası kullanım durumunu araştırmışlardır. Deney numuneleri üzerinde Los Angeles aşınma, modifiye proktor ve kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) deneyleri yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçları ANOVA standart istatistiksel testleri ve hem basit hem de çoklu doğrusal korelasyon analizleri kullanarak analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda, çözünür sülfat içeriğinin, CDW içerisindeki parçalanmış tuğla ve alçı oranından etkilendiğini vurgulamışlardır. Parçalanmış tuğla da bulunan sülfat içeriğinin diğer tüm agregalara göre daha fazla olduğunu söylemişlerdir. Yaptıkları tüm deneysel çalışmalarda doğal agregaların geri dönüşümlü agregalara göre daha iyi performans gösterdiğini görmüşlerdir. Ayrıca geri dönüştürülmüş beton agregaların diğer farklı geri dönüştürülmüş agregalara göre daha düşük yassılık indeksi ve kırık yüzey özelliğine sahip olduğunu bildirmişlerdir. Geri dönüştürülmüş agregaların deneysel çalışmalar ışığında uygun özellik gösterdiği tespit edilenlerin düşük hacimli yollarda değerlendirilebileceği önerilmiştir.

Cardoso vd. (2016) yaptıkları çalışma ile geri dönüştürülmüş agregaların (RA) farklı tiplerini, en önemli fiziksel özelliklerini, doğal agrega (NA) ile karşılaştırılmasını ve bu özelliklerin sıkıştırıldığı zaman hidrolik ve mekanik

davranışlarını nasıl etkilediğini sunmuşlardır. Geri dönüşümlü agregaların (RA) inşaat sektöründe kullanılmasının, daha sürdürülebilir bir topluma doğru atılan önemli bir adım olduğunu belirtmişlerdir. Son yıllarda, RA'nın geoteknik uygulamalarda dolgu malzemesi ve yol temel tabakaları gibi çeşitli alanlarda kullanıldığı pek çok araştırmanın olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, spesifik olarak, sıkıştırmanın dane büyüklüğü dağılımı ve yoğunluk üzerindeki etkilerini sunmuşlardır. Ayrıca, danelerin ezilmesinin esnek modülü, kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve geçirgenlik üzerindeki etkileri de analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, ek olarak, doğal agrega ile yapılan yol tabakalarının performansını, farklı RA tipleri ile yapılması durumundaki performansı ile karşılaştırıldığı analizler sunmuşlardır. Literatürden topladıkları sonuçlara göre, çoğu RA'nın performansının doğal agreganınki ile karşılaştırılabilir olduğunu ve RA'nın yol temel tabakalarında veya sıkıştırma gerektiren diğer uygulamalarda kullanılabileceğini görmüşlerdir.

Cardoso vd. (2016), ayrıca çalışmalarında CDW'nin depolama alanlarında biriktirilmesinin hala yaygın bir uygulama olduğunu ancak atık maddelerin geri kazanıldığı durumların araştırılmasının son yıllarda popüler olduğunu belirtmişlerdir. Bu araştırmalardan bazılarının; atıkların genel dolgu (zemin ıslahı olarak), temel, alttemel ve beton üretimi için kullanılması şeklinde olduğunu söylemişlerdir. Geoteknik uygulamalar için CDW kullanımının çok yaygın olmadığını ve doğal agregaların daha çok tercih edildiğini belirtmişlerdir. Bunun nedenini aşağıdaki maddelerde sıralandığı şekliye açıklamışlardır:

- Ekonomik açıdan bakıldığında, bazı özel durumlar haricinde, doğal agreganın kullanımı CDW'den daha avantajlıdır, çünkü doğal agrega daha kolay bulunabilmektedir. İnşaat ve yıkıntı atıklarının temini ise geri dönüşüm tesislerinin yetersiz olmasından dolayı daha zordur.
- İnşaat ve yıkıntı atıklarının farklı kaynaklarından elde edilmesinden dolayı CDW'nin bileşiminin mühendislik özelliklerinin değişkenliği doğal agregaya oranla çok daha yüksektir.
- İnşaat ve yıkıntı atığı malzemelerinin sıkıştırılması, özelliklerini değiştirebilir (danelerin kırılması nedeniyle). Bu nedenle belirli bir uygulama için performansını, laboratuarda ve sahada yapılacak deneyler ile araştırmak gerekmektedir.

- Bazı yönetmelikler ve uygulamalar için (örneğin demiryollarında balast ve toprak ve dolgu barajları) tasarım kuralları çok kısıtlayıcıdır ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını uygun görmemektedir.
- Doğal agrega ile CDW'nin karıştırılması önerilebilmekle birlikte, bunların bir araya getirilmeleri zeminin rijitliğini ve mukavemetini olumsuz yönde etkileyebilir.
- Tasarımcılar ve müteahhitler doğal agreganın çeşitli geoteknik uygulamaları için büyük bir tecrübeye sahiplerdir. İnsanlar, doğal kaynakların hâlâ bolca mevcut olduğunu düşünerek gelenekselleşen yaklaşımları tercih etmektedirler. Eurocode 7 (EC7) gibi “Geoteknik Tasarım Yönetmelikleri”, karşılaştırılabilir deneyime dayanan bir tasarım kabul etse de, Geoteknik uygulamalarda CDW'nin kullanımı ile ilgili herhangi bir şartname bulunmamaktadır.

Arulrajah vd. (2014) altı farklı CDW'nin fiziksel ve kayma dayanımı özelliklerinin kapsamlı laboratuvar değerlendirmesi için çeşitli deneyler yapmışlardır. Çalışmalarını gradasyon, Los Angeles aşınma, serbest basınç, kaliforniya taşıma oranı (CBR), doğrudan kesme ve konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deneyleri ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları CDW; geri dönüştürülmüş kırık tuğla (CB), geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA), geri dönüştürülmüş asfalt kaplaması (RAP), kaya atığı (WR), geri dönüştürülmüş orta cam atığı (MRG) ve geri dönüştürülmüş ince cam atığıdır (FRG). Kullandıkları tüm CDW malzemelerinin iyi derecelenmiş malzemeler olarak sınıflandırıldığını ve kompaksiyon eğrilerinin su emme ve yüzey özellikleri ile değiştiğini belirtmişlerdir. RAP, FRG ve MRG malzemelerinin kompaksiyon eğrilerinin düz bir şekle sahip olduğunu fakat, RCA, WR ve CB malzemelerinin ise çan biçimli kompaksiyon eğrileri oluşturduğunu belirtmişlerdir. RCA, CB ve WR malzemelerinin maksimum dilatasyon oranında pik kesme mukavemeti değeri gösterdiği sonrasında artan yatay deformasyonlarda kesme mukavemetinin düştüğünü söylemişlerdir. Fakat, RAP, FRG ve MRG malzemelerinde ise bu davranışın oluşmadığını belirtmişlerdir. Kayma dayanımı özelliklerinin değerlendirilmesine dayanarak, sıkıştırılmış CDW malzemelerinin gerekli asgari efektif sürtünme açlarına sahip oldukları için yol temel ve alttemel uygulamalarında kullanım potansiyeline sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Özellikle RCA, CB ve WR

malzemelerinin yol temel ve alttemel uygulamalarındaki agregalar için gerekli fiziksel ve kayma dayanımı özelliklerini sağladığını belirlemişlerdir.

Arulrajah vd. (2016a) atık malzemeler ile inşaat ve yıkıntı atıklarını (CDW) stabilize ederek bunların yol temel ve alttemel tabaklarında değerlendirilmelerini incelemişlerdir. Asetilen gazı üretiminin yan ürünü olan kalsiyum karbür kalıntısının (CCR) alkali aktivasyonu üzerinde yoğunlaşmışlardır. Geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) ve parçalanmış tuğla (CB) malzemelerinin inşaat ve yıkıntı (CDW) atığı endüstrisi için iki önemli yıkım malzemesi kaynağı olduğunu belirtip bu malzemelerin özelliklerinin son yıllarda çimento ile iyileştirildiğini belirtmişlerdir. Fakat, Portland çimentosu ile ilişkili büyük karbon ayak izi oluşumu nedeniyle, endüstriyel atık yan ürünlerinin alkali aktivasyonunu kullanan geopolimerlerin, endüstriden giderek artan bir ilgi topladığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında ayrıca CDW malzemelerinin CCR katkısı ile geopolimer stabilizasyonunu incelerken, elde ettikleri sonuçları uçucu kül (FA) ve cüruf (S) katkısı ile de karşılaştırılmışlardır. Ek olarak, CCR ile yapılan karışımlara ilave FA ve S katkısı ekleyerek incelemişlerdir. CDW materyallerinin stabilizasyonu için üç katkının (CCR, FA, S) % 0-10 arası miktarları ile karışımlarını yapmışlardır. CB ve RCA agregalarının geopolimer stabilizasyonu için kullandıkları CCR, FA ve S içeriğinin kombinasyonunu ekonomik faktörler nedeniyle % 10 ile sınırlandırmışlardır. CCR ile yaptıkları bileşimlerde alkali aktivasyonu için sodyum silikat çözültisi (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) içeren bir sıvı alkanin aktivatörü kullanmışlardır. Stabilize edilmiş CDW malzemelerinin mukavemeti ve dayanıklılığını inceleyerek, yol temel/alttemel uygulamalarına uygunluğunu araştırmışlardır. Stabilize CB ve RCA agregalarının serbest basınç dayanımı (UCS) ve esneklik modülü (M_R) testlerinin sonuçları ile, yaptıkları karışımların agregaların mukavemet özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir. Deneysel çalışmaları için yaptıkları farklı bileşimler şöyledir;

- CB, CB+%10CCR, CB+%10FA, CB+%10S, CB+%5CCR+%5FA, CB+%5CCR+%5S, CB+%5FA+%5S
- RCA, RCA +%10CCR, RCA +%10FA, RCA +%10S, RCA +%5CCR+%5FA, RCA +%5CCR+%5S, RCA +%5FA+%5S

Arulrajah vd. (2016a) hazırladıkları test numunelerini deneye tabi tutmadan önce, 7 gün kür etmişlerdir. S ile stabilize edilmiş CDW örnekleri, CCR ve FA ile

stabilize edilen örneklere göre, oldukça yüksek bir basınç direnci gösterdiğini söylemişlerdir. % 10 FA ile stabilize edilmiş numunelerde, düşük nem içeriği ve dolayısıyla aktivatör içeriği nedeniyle basınç direncinde ve M_R değerinde stabilize edilmemiş numunelere göre hafif bir düşüş görmüşlerdir. CCR+% 5 S kombinasyonunun, CDW agregalarının CCR tabanlı stabilizasyonu için en iyi kombinasyon olduğunu belirtmişlerdir.

Arulrajah vd. (2016b) yaptıkları çalışmada, uçucu kül (fly ash, FA) malzemesinin geri dönüştürülmüş beton agregalar (RCA) için alternatif bir düşük karbon bağlayıcısı olup olmadığını araştırmışlardır. Portland çimento üretiminin çevresel etkilere ve özellikle inşaat mühendisliği endüstrisinde ciddi oranlarda karbondioksit emisyonuna neden olduğunu söylemişlerdir. Bu yüzden, portland çimentosuna alternatif düşük karbonlu bağlayıcıların son yıllarda araştırıldığını belirtmişlerdir. Uçucu kül (fly ash, FA), gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülkede kömürle elektrik üretiminden elde edilen yan ürünü olduğunu ve geleneksel olarak enerji santrallerinde bir atık madde olarak stoklandığını söylemişlerdir. Yıkım endüstrilerinden üretilen geri dönüştürülmüş beton agregalar (RCA) son yıllarda çimento ile iyileştirilmiş yol malzemesi olarak kabul gördüğünü belirtmişlerdir. FA gibi alternatif bağlayıcıların kullanımının çevresel etkileri önemli ölçüde azalttığını, depolama gibi olumsuzlukları azalttığı için de ekonomik avantaj sağlandığını belirtmişlerdir. Çeşitli FA içeriği ile stabilize edilmiş RCA'nın mukavemet özelliğini, ortam sıcaklığında ve 40 °C'de kür edilmiş numuneler üzerinde serbest basınç (UCS) testleri yaparak değerlendirmişlerdir. Ayrıca, simüle edilmiş trafik yüklemeleri altında FA ile stabilize edilmiş RCA'nın dayanıklılığı belirlemek için (FA ile stabilize edilmiş RCA örneklerinin esnek modülünü (MR) belirlemek için) tekrarlı üç eksenli yükleme testleri gerçekleştirmişlerdir. Farklı FA içeriğine sahip agregalar arasındaki bağların mikro ölçekli oluşumu ve stabilize RCA numunelerinin mukavemetine etkisini de inceleyerek sunmuşlardır. Çalışmalarında, RCA ile RCA'nın ağırlığının %5, %10, %15, %20, %25 oranlarındaki FA ile yaptıkları karışımları deney numunesi olarak kullanmışlardır. Oldukça fazla miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içeren FA kullanmışlardır. Kullandıkları FA'nın, karayolu stabilizasyonu uygulamaları için ideal bir puzolanik malzeme olduğunu belirtmişlerdir. FA'yı, düşük kalsiyum içerikli Tip F uçucu kül olarak sınıflandırmışlardır. Yol stabilizasyon uygulamaları için % 15 FA ile stabilize edilmiş RCA bileşiminin optimum karışım olduğunu belirtmişlerdir. %15'den fazla

FA katkısı yapılırsa reaksiyona girmemiş FA tanelerinin olduğunu ve bu yüzden sadece zemin yapısının ince içeriğinin arttığını bunun da güçlendirmeye bir katkı sağlamadığını belirtmişlerdir.

Lav vd., (2006) F sınıfı uçucu külün yol yapılarında kaplama malzemesi olarak kullanılmasını sağlamak için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. F sınıfı uçucu külün arzu edilen mühendislik özelliklerine sahip olmadığını belirtmişlerdir. Bu sebeple, uçucu külün özelliklerini iyileştirmek için çimento kullanmışlardır. Uçucu külün agrega ile ve agregasız olarak kaplama tabakası olarak kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarını agregasız olarak gerçekleştirerek bu atık malzemelerden yüksek miktarlarda tüketmeyi amaçlamışlardır. Çimentoyu toplam ağırlığın %2, %4, %8 ve %10 olarak belirleyerek kullanmışlardır. Öncelikle Texas üç eksenli deneyler ile uçucu külün kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Daha sonra mekanik deneyler ile çimento ile iyileştirilmiş malzemenin temel özelliklerini belirleyerek kaplama yapısının analizini gerçekleştirmişlerdir. Tekrarlı teker yüklemesi altında, stabilize edilmiş malzemede ilk olarak yorulma çatlağının meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu olayın tekrarlanan çekme gerilmeleri ile oluştuğunu söylemişlerdir. Çimento ile stabilize edilmiş uçucu külün yorulma performansının belirlenmesi ve mekanik-ampirik bir tasarım prosedürünün oluşturulması için kullandıkları tam ölçekli deney verilerini kullanarak gerekli tabaka kalınlıklarını farklı çimento oranları için belirlemişlerdir. Texas üç eksenli deneyi drenajsız bir deneydir ve kaplama tabakalarının deformasyon direncini ölçmek için kullanılır. Test 153 mm çap ve 203 mm yüksekliğe sahip dört silindirik numune seti kullanılarak gerçekleştirilir. Test aparatı, içeride lastik bir zarla donatılmış çelik silindirik bir hücredir. Hava, hücre ile membran arasına yanal basınç uygulamak için kullanılır. Her numune için, farklı bir yanal (sabit) gerilme uygulanmakta ve göçme oluncaya kadar dikey gerilme arttırılmaktadır. Göçme anındaki her yanal gerilme için Mohr daireleri, Texas üç eksenli sınıflandırma numarasını belirlemek için bir sınıflandırma çizelgesinde çizilir. Genel bir test yöntemi olmasa da, stabilize edilmiş malzemeler için uygundur. Texas üç eksenli test sonuçlarına göre, çimento ile stabilize edilmiş uçucu külü bir temel malzemesi olarak kullanmanın uygun olduğu yazarlar tarafından belirtilmiş ve daha sonraki incelemelere geçmişlerdir. Çalışmalarında, hidrasyon ürünlerinin gelişimini, yani stabilize edilmiş uçucu külün mukavemet gelişimini, taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile gerçekleştirmişlerdir. Rezonans frekansı testi

gerçekleştirmişlerdir ki bu test temelde bir numunenin bir titreşim üretici tarafından uyarılmasıdır. Bu testi gerçekleştirmelerinin temel amacı olarak stabilize edilmiş uçucu külün dinamik Poisson oranını elde etmektir. Böylece kaplama yapısının analiz edilmesini ve ultrasonik darbe hızı testinden dinamik modülün hesaplanmasını gerçekleştireceklerdir. Çalışma sonunda çimento miktarının ve tabaka kalınlığının tasarım ömrünü önemli ölçüde etkilediğini söylemişlerdir. Ayrıca belirtmişlerdir ki, agregasız stabilize edilmiş uçucu külün mukavemetinin agreganınkinden daha düşük olduğu için çimento içeriğinin ve tabaka kalınlığının sırasıyla % 8 ve 300 mm'den az olmamalıdır. Çimento içeriği % 8'den az olan karışımların alt temel olarak kullanılabilceğini söylemişlerdir. CIRCLY ve KENLAYER analizlerinden elde ettikleri tasarım ömürleri birbirine benzerdir. Fakat MICHPAVE analizinden elde ettikleri tasarım ömrü ile tutarsızlıklar vardır

Li vd. (2009) çalışmalarında uçucu kül ile stabilize edilmiş malzemelerin mekanik performansını araştırmışlardır. Bunun için 6 farklı deney sahası tanımlamışlardır. Yumuşak kil zeminini, asfaltlı geri dönüştürülmüş yol kaplamasını (RPM) ve yol yüzeyi çakılını (RSG) C sınıfı ve uygun olmayan uçucu küller ile iyileştirmişlerdir. Böylece hem çalışma alanı oluşturmuşlardır hem de temel tabakasını iyileştirmişlerdir. Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR), esneklik modülü ve serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Deneysel çalışmalarını hem laboratuvarda hem de arazi de gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, uçucu kül ile iyileştirmenin rijitliği, mukavemeti ve servis ömrünü artırdığını belirtmişlerdir. 7 günlük kür süresi sonunda, uçucu kül ile iyileştirilmiş numunelerin CBR değerinin 2 ile 10 kat arttığını söylemişlerdir. 14 günlük kür süresi sonunda, stabilize edilmiş malzemelerin esneklik modülü değerleri 20-200 MPa aralığında iken iyileştirilmemiş olanlarınkini ise 10-120 MPa aralığında olduğunu bildirmişlerdir. İyileştirilmemiş tabii zeminin ortalama serbest basınç değerini 121 kPa olarak bulurken iyileştirilmiş malzemeninkini ortalama 311 kPa olarak bulmuştur. Ayrıca laboratuvarda yapılan deneylerden elde ettiği verilerin (CBR, Mr, q_u), arazide yapılan deneylerden elde ettiği verilerden daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu tarz sapmaların diğer araştırmacılar tarafından da ortaya konduğunu, bundan dolayı laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar ile yapılan tasarımlarda bu hususa dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Marradi ve Lancieri (2008) çimento ile iyileştirilmiş geri dönüştürülmüş betonun yol yapılarında temel ve alttemel olarak kullanılma potansiyeli üzerinde çalışmışlardır.

Dane dağılımı deneylerini ve bileşim analizlerini geri dönüştürülmüş betonun farklı karışımları için yaparak bu malzemelerin özelliklerini belirlemişlerdir. Karışımların performanslarını serbest basınç mukavemetini, dolaylı çapsal gerilme mukavemetini, elastik modülünü, indirek gerilme elastisite modülünü ve durabiliteyi hesaplayarak belirlemişlerdir. Ayrıca, karışımların bileşimi, kür süresi, orijinal karışımın beton yaşlandırması, eklenen çimentonun miktarı gibi değişkenleri de incelemişlerdir. Laboratuvar ortamında karıştırmayı sağlamak için, agregaya %2 ve %4 çimento ekleyerek yoğurmalı sıkıştırıcıyı kullanmışlardır. Deney örneklerinin 7 ve 28 günlük kür işlemleri için ise kontrollü iklim odası kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda görmüşlerdir ki, geri dönüştürülmüş betonun yaşlanması ve orijinal özellikleri çimento ile iyileştirilmiş beton parçaları karışımının performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Yazarlar, daha kapsamlı araştırmaların yapılması gerektiğini belirtmekle birlikte yaptıkları çalışmalarla iyileştirilmiş geri dönüştürülmüş agregaların yol temel ve alttemel tabakalarında potansiyel olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada üç farklı CDW malzemesi kullanmışlardır. Bunlar, geri dönüşüm tesisinden üretilen bileşimler ile geri dönüştürülmüş daneler, basınç dayanım testleri için hazırlanan küp numunelerin parçalanarak oluşturulduğu taze beton agregası ve eski bir beton yapının yıkıntısından elde edilen beton agregalarıdır. Geri dönüştürülmüş granüler agrega bileşimini oluşturan maddeleri 8 mm'lik elek üzerinde kalan kısmı gözlemsel olarak inceleyerek belirlemişlerdir. Malzeme oranlarını; çakıl %36.2, parçalanmış beton %32.8, tuğla ve seramik %28.9, asfalt betonu %1.7 organik bileşenler %0.1 diğer malzemeler %0.3 olarak belirlemişlerdir. İtalyan ve Avrupa standartlarında belirtilen gradasyon sınırlarına uygun olarak deney numunelerini hazırlamışlardır. Marradi ve Lancieri (2008) çimento katkısının daha iyi incelenmesi için geri dönüştürülmüş beton parçalarının da bağlayıcılığının incelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Örneğin, çalışmalarında parçalanmış taze beton için %4 çimento katkısının fazla olduğunu belirtmişlerdir. Fakat %4 çimento ile iyileştirilmiş yapım yıkım atığı agregalarının iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Yorulmanın, çimento ile iyileştirilmiş materyallerin kaplama tasarım sürecinde birincil göçme mekanizması olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca çalışmaları göstermiştir ki geri dönüştürülmüş agreganın stabilize edilmiş karışımlarının gösterdiği durabilite, geleneksel agrega karışımlarının gösterdiği durabilite ile benzer seviyelerdedir.

Mohammadinia vd. (2014) çalışmalarında, CDW malzemelerinin dünya çapındaki depolama sahalarında bulunan atıkların önemli bir bölümünü oluşturduğunu belirtmişlerdir. Yüksek kaliteli taş ocağı agregalarının azlığının, yapım yıkım atığı gibi malzemelerin geleneksel yol inşaatı malzemeleri yerine bir alternatif olarak dikkate alınmasına neden olduğunu söylemişlerdir. Özellikle, yapım yıkım atığı gibi malzemelerin sürdürülebilir kullanımının önemli çevresel faydalar sağladığını vurgulamışlardır. Mohammadinia vd. (2014) kapsamlı laboratuvar çalışmaları yaparak çimento ile ıslah edilmiş yapım yıkım atığı malzemelerinin mühendislik özelliklerini belirlemişlerdir. Araştırılan CDW malzemesinin geoteknik özelliklerini de belirleyerek yol temel/alttemel uygulamalarındaki performansını incelemişlerdir. Kür süresinin yapım yıkım atığının mukavemetine etkisini serbest basınç ve tekrarlı üç eksenli yükleme deneyleri yaparak araştırmışlardır. Yapım yıkım atığı olarak tanımladığı malzemeler; geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP), geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) ve parçalanmış tuğladır (CB). RAP malzemesi ağırlığının %2 si kadar çimentoya ihtiyaç duyduğunu, hem 7 hem de 28 günlük kür sürelerinin yerel karayolu şartlarının gereksinimlerini karşıladığını belirtmişlerdir. Ancak çalışmaları göstermiştir ki, RCA ve CB malzemeleri %4 oranında çimentoya ve 28 günlük kür süresine ihtiyaç duymaktadır. RAP malzemesinin tüm durumlarda en yüksek mukavemeti gösterdiğini belirtmişlerdir. Yapım yıkım atığı malzemelerinin esneklik modüllerinin çimento içeriği, kür süresi ve yanal basınç arttıkça arttığı söylemişlerdir. Nem kürünün çimento ile iyileştirilmiş yapım yıkım atığı malzemelerinin mukavemet gelişiminde önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile çimento ile ıslah edilmiş yapım yıkım atığı malzemelerinin yol temel/alttemel uygulamaları için uygun bir inşaat malzemesi olduğunu göstermişlerdir.

Mohammadinia vd. (2016), CDW malzemelerinin kendi başlarına ve çimento ile stabilize edilmiş olarak yol temel/alttemel uygulamaları için kullanımının son yıllarda giderek ilgi çektiği belirtmişlerdir. Kendi başlarına ve çimento ile stabilize edilmiş CDW malzemelerinden olan parçalanmış tuğla (CB), geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA) ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) malzemelerinin yol temel/alttemel uygulamalarında kullanımı için araştırmışlardır. Bununla birlikte, yol temel/alttemelin yüksek karbon ayak izine sahip olan çimento ile iyileştirilmesi yerine, alternatif düşük karbon bağlayıcıların araştırılması gerektiğini vurgulamışlardır. Mohammadinia vd. (2016) geopolimer ile stabilize edilmiş CDW malzemesinin davranışını

araştırmışlardır. Pozzolanik bağlayıcı olarak uçucu kül (FA) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu (S) kullanmışlardır. Ayrıca, alkali aktivatörün pozzolanik bağlayıcı oranının, CDW malzemelerinin geoteknik özelliklerinin artırılması üzerindeki etkisini de analiz etmişlerdir. CDW malzemelerinin geopolimer stabilizasyonu için maksimum, kuru zemin ağırlığının % 4'ünü kullanılmıştır. Kullandıkları bağlayıcılar şöyledir: %4 FA, %2 FA+%2S ve %4 S. Geopolimer ile stabilize edilmiş CDW malzemelerinin geoteknik ve mukavemet özelliklerini, yol temel/alttemel uygulamalarındaki performanslarını saptamak için değerlendirmişlerdir. Araştırmalarında, karışımların elastik modülünü, basınç dayanımlarını ve esneklik modülünü belirlemişlerdir. CDW malzemelerinin elastik modülünün ve basınç dayanımının, geopolimer stabilizasyonu sonucunda arttığını belirtmişlerdir. Geopolimer stabilizasyonunun RCA için en etkili olduğunu söylemişlerdir. En yüksek basınç dayanımını, uçucu kül temelli geopolimer stabilizasyonuna kıyasla cüruf temelli geopolimer stabilizasyonu ile elde etmişlerdir. Alkalin aktivatörü pozzolanik bağlayıcı oranının CDW malzemesinin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine etkisini de incelemişlerdir. İnceledikleri sıvı alkalin aktivatörü, sodyum hidroksit çözeltisi (NaOH) ve sodyum silikat çözeltisi (Na_2SiO_3) karışımıdır. Ayrıca, geopolimerle iyileştirilmiş CDW malzemelerinin performansını, geleneksel çimento ile stabilize edilmiş CDW malzemelerinin performansı ile karşılaştırmışlardır. Ekonomik nedenlerden ötürü alkalin sıvı aktivatörün (L) katı pozzolanik malzemeye (P), yani cüruf ve uçucu küle oranını 0.4 ($L=P=0.4$) ile sınırlandırılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, alkali sıvının pozzolanik bağlayıcıya en uygun oranını araştırmak için 0.3 ve 0.5 oranları da kullanmışlardır. Stabilize edilmiş numuneler üzerinde deneyleri yapmak için, Texas Ulaştırma Departmanının tavsiyesi üzerine, nem kontrollü bir odada 1, 7 ve 28 günlük kür yapmışlardır. 100 x 200 mm boyutlarında serbest basınç ve tekrarlı üç eksenli basınç deneyleri için gerekli silindirik numuneleri statik sıkıştırma ile hazırlamışlardır. Yol temelli uygulaması için, CDW malzemeleri arasında RCA+%4S ve RCA+%2FA+%2S karışımların en iyi performansı gösterdiğini görmüşlerdir. UCS sonuçlarına inceleyerek, 7 günlük bir kür süresinin, her iki karışımın da temel uygulama için uygun olmasını sağladığını belirtmişlerdir. UCS değerindeki artış oranının, kürün 7 ile 28 günü arasında devam ettiğini belirtmişlerdir. UCS değerlerinin, tüm CDW malzemeleri için 0.4'lük bir L/P oranında zirveye ulaştığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, geopolimer ile stabilize edilmiş RCA ve RAP

malzemelerinin, yol temel/alttemel tabakalarının stabilize edilmesi için uygulanabilir ve sürdürülebilir bir seçenek olduğunu ortaya koymuşlardır.

Sahu vd. (2017) çalışmalarında iki farklı potansiyel atık malzemesi olan uçucu kül ve kireç çamuru kullanarak inşaat mühendisliği uygulamalarında uygunluğunu araştırmışlardır. Farklı oranlarda kireç ve alçıtaşı ile stabilize edilmiş uçucu kül ve kireç çamuru malzemeleri üzerinde serbest basınç deneyi, yarmada çekme dayanımı, CBR deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Optimum bileşimi 1:1 oranında uçucu kül ve kireç çamuru içine %12 oranında kireç %1 oranında alçıtaşı katıldığında elde etmişlerdir. Bileşimin içinde ağır metal süzülmesinin olmadığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca seçtikleri bu bileşimin mikro yapısı için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) deneyleri yaparak kimyasal süreç veya reaksiyon olgusunu ve nasıl dayanım kazandığını incelemişlerdir. Geliştirdikleri bu bileşimin gerekli dayanımı sağladığından esnek kaplamalarda temel tabakası olarak kullanılabileceğini önermişlerdir. Yol tabakası malzemesinin mukavemet ve rijitlik karakteristiği için belirsiz konuları ve esnek kaplamalardaki analiz ve tasarım üzerine etkilerini numerik analizler ve Monte Carlo simülasyonu ile incelemişlerdir.

Sas vd. (2016) geri dönüşümlü beton agrega (recycled concrete aggregate, RCA) kullanarak çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Eskimiş beton elemanların değiştirilmesinden dolayı son 10 yıl içinde geri kazanılmış betonun problem oluşturduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarının temel fikrinin yol mühendisliğine geri dönüşüm malzemelerinin tanıtılması olduğunu belirtmişlerdir. Geoteknik çalışmalarında RCA'nın mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlemişlerdir. RCA'nın tekrarlı yükler altındaki istisnai davranışının belirlenmesi için çeşitli yükleme adımlarında tekrarlı üç eksenli deneyler gerçekleştirildiğini belirtip bunun için taşıma gücünün analizi için tek eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Mekanik özellikleri iyileştirmek için kireç ve alçıtaşı ile kimyasal stabilizasyon yapmışlardır. Mekanik stabilizasyon agregaların ezilmesine neden olurken, oluşan ince fraksiyonun stabilize edici bir ortam olabildiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarındaki stabilizasyon sürecinin, ezilmiş betondaki serbest puzolanik bileşiğin varlığını gösterdiğini söylemişlerdir. İyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş malzemenin tekrarlı yüklerden elde ettikleri esneklik modülünün (M_r) belirlenmesini iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş RCA'nın M_r değerleri içinde sunmuşlardır. İyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş RCA'nın M_r değerlerini sırası ile 543.2 MPa ve 816 MPa olarak bulmuşlardır. Çalışmalarında

plastik şekil değiştirmelerin oluşumunu da araştırmışlardır. Kırılgan bir malzeme olan RCA'nın tekrarlı yükler altında ezildiğini belirtmişlerdir. Tekrarlanan tahrikler doğal agregada mevcut olmayan plastik şekil değiştirmenin başka bir mekanizmasının oluşmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. RCA malzemesini yıkılmış bir binadan elde etmişlerdir. Beton agregaları elde ederken mukavemet sınıfı C16/20'den C30/35'e kadar tahmin ettikleri beton duvarları ve döşemeleri kullanmışlardır. Agregaların tane dağılımını Polonya teknik standartlarının üst ve alt limitinin arasında kalacak şekilde belirlemişlerdir. Zemin sınıfını kumlu çakıl olarak belirlemişlerdir. Tane boyutları 31.5 mm'den 0 mm'ye kadar değişen bu zeminin alt temel için kullanılan zeminlere benzer olduğunu belirtmişlerdir. Proktor deneyleri ile optimum su içeriğini (%8.67) ve maksimum yoğunluğu (1.97 gr/cm³) bulduktan sonra tekrarlı CBR (cCBR) deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda:

- Suni bir agregada olan RCA doğal agregadan farklı davranmakta olduğunu bu farkın nedeninin ise düzensiz ve pürüzlü yüzeyinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.
- Tekrarlı yüklerden dolayı oluşan deplasmanın stabilize edilmiş örnekte daha az olduğunu vurgulamışlardır. Stabilize edilmemiş zemin için ise su içeriği azaldıkça deplasmanın arttığını belirtmişlerdir.
- Eurocode 7 EN 13286-7:2004 yönetmeliğini dikkate aldıklarında elde ettikleri mekanik karakterlere göre RCA malzemesi alttemel yapımında kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Sobhan ve Mashnad (2000) yaptıkları laboratuvar çalışması ile geri dönüştürülmüş beton agregada (RCA), C sınıfı uçucu kül ve yüksek yoğunluklu polietilenden oluşmuş plastik şerit atığı içeren çimento ile iyileştirilmiş yol temel tabakalarının performansını araştırmışlardır. Oluşturdukları temel tabakalarını hem statik hem de dinamik yüklere maruz bırakarak davranışını incelemişlerdir. Öncelikle karışım tasarımı belirlemişler daha sonra yarmada çekme deneyi yapmışlar, bundan sonra statik testler ve yorulma deneyleri yapmışlardır. Bir yol yapısındaki stabilize edilmiş tabakalar, dinamik trafik yüklemelerinden dolayı tekrarlanan çekme (eğilme) gerilmelerine maruz kaldığından, deney programlarını esas olarak, yarmada çekme veya eğilme modları altındaki malzeme karakterizasyonunu içerdiğini belirtmişlerdir. Plastik şerit takviyesinin temel amacının çekme çatlaklarının yayılmasını önlediğini

ve böylece malzemenin genel tokluğunu ve yorulma direncini artırdığını söylemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları tüm karışımların çimento içeriği, karışımın toplam kuru ağırlığının %4'ü veya %8'i olup, temel tabakasını oluşturan bileşiğin en az %92'sinin atık veya geri dönüştürülmüş malzemelerden oluştuğunu belirtmişlerdir. %4 çimento, %4 uçucu kül ve % 92 geri dönüştürülmüş agrega (ağırlıkça) içeren bir karışımın yaklaşık 5 MPa'lık bir serbest basınç mukavemetine, yaklaşık 0.75 MPa'lık bir yarmada çekme mukavemetine ve yaklaşık olarak 0.95 MPa eğilme mukavemetine ulaştığını, bu değerlerin ise orta derecede güçlü stabilize edilmiş temel malzemesi için yeterli olduğunu belirtmişlerdir. Ağırlıkça %1.25 geri dönüştürülmüş plastik şeritler (51mm uzunluğunda 6.3mm genişliğinde) ile güçlendirdikleri karışımlar üzerinde yaptıkları eğilme yorulması testleri ile, kompozit temel tabakasının performansının, yol yapımında kullanılan diğer geleneksel olarak stabilize edilmiş malzemeyle benzer veya daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Atık ürünlerinden oluşan yeni kompozit yol temel tabakalarının, otoyol yapımı ve onarımı için alternatif bir malzeme olarak önemli bir umut vadettiğini söylemişlerdir.

Wen vd. (2010) bazı durumlarda, çimento ve uçucu kül gibi katkı maddeleri geri dönüşümlü yol malzemesinin (RPM) mukavemetini arttırmak için kullanılabilir olduğunu söylemişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmanın amacını, yüksek karbonlu uçucu külün RPM'yi stabilize etmek için etkinliğini belirlemek ve iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş RPM'nin performansını, yol temel tabakası malzemesi olarak doğal agrega ile karşılaştırmak şeklinde belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında çeşitli deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyler içinde; kompaksiyon, kaliforniya taşıma oranı (CBR), esneklik modülü ve stabilize edilmiş RPM için serbest basınç deneyi vardır. Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar ile test numunelerinin mühendislik özelliklerini karşılaştırmışlardır. RPM malzemeleri, %10, %14 ve %18 oranlarında uçucu kül numuneleri ile karıştırılarak iyileştirilmiş numuneler hazırlamışlardır. Uçucu kül ile iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş numuneler doğal agrega ile karşılaştırmışlardır. Doğal agrega ile kıyaslayarak, RPM'nin CBR değerinin daha düşük, esneklik modülü değerinin daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir. RPM numunesinde, aynı gerilme döngüsüne tabi tutulmuş doğal agregaya göre daha yüksek kalıcı deformasyon gözlemlenmiştir. Uçucu kül ile stabilize edilmiş RPM'nin, stabilize edilmemiş RPM ve doğal agrega numunelerine göre CBR, M_r ve kalıcı deformasyon bakımından istenen özellikleri daha iyi sağladığını belirtmişlerdir.

Uçucu kül miktarını artırdıkça CBR, M_r ve serbest basınç dayanımı değerlerinin arttığını, ancak kalıcı deformasyonun azaldığını gözlemlemişlerdir.

Consoli vd. (2009), sıkışabilir rezidual bir zemin katmanı üzerindeki yapay olarak çimentolaştırılmış ve sıkıştırılmış bir üst zemin katmanı ile oluşturulan çift tabakalı zeminler üzerinde plaka yükleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çimentolaştırılmış ve sıkıştırılmış zemin tabakasının üç farklı yüksekliği için araştırmalarını yapmışlardır. 0.15 ila 0.60m kalınlığında çimentolaştırılmış tabakaların üzerine 0.30 ila 0.60m çapında dairesel çelik plakalar kullanarak yaptıkları testlerde basınç-oturma davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında ayrıca normalleştirilmiş basınç ve oturma için yorumlar yapmışlardır. Çeşitli H/D (H = iyileştirilmiş tabaka kalınlığı ve D=temelin çapı) oranlarında incelemeler yapmış, H/D=2 değerine kadar, gözlenen nihai göçme modelinin daima üst katmanın zımbalama göçmesi şeklinde oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, üst katmanda oluşan göçme olayının, her zaman katmanın altındaki gerilme çatlakları tarafından başlatıldığını söylemişlerdir. Bununla birlikte, H/D oranına bağlı olarak, çekme çatlaklarının farklı pozisyonlarda başladığını bildirmişlerdir. Tabakalı kohezyonlu-sürtünmeli zeminler için temel taşıma kapasitesinin analitik çözümün yaklaşık 1.0H/D değerine kadar oldukça yeterli olduğu görmüşlerdir. Ayrıca, Vésic'in çözümü ile tek bir plaka yükleme testinin sonuçlarının olduğu bir proje için, basınç-oturma eğrilerinin, çimentolaştırılmış bir üst katmanın farklı kalınlıkları üzerindeki farklı boyutlardaki temeller için tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir.

Consoli vd. (2003) plaka yükleme testleri yaparak homojen rezidual zemin tabakaları ile homojen zemin tabakası üzerine inşa ettikleri kum-çimento ve kum-çimento-fiber tabakalarının yük-deformasyon davranışlarını incelemişlerdir. Bu şekilde hem tek tabakalı homojen doğal zemini hem de kendilerinin inşa ettiği iki tabakadan oluşan tabakalı zeminleri incelemişlerdir. Plaka yükleme deneylerinde 300 mm çapında 25.4 mm kalınlığında model temel kullanmışlardır. Çimentolu üst katmanın kullanılması durumunda, taşıma kapasitesinin arttığını, göçme anındaki oturmanı azaldığını ve zemin davranışının gözle görülür bir şekilde gevrek davranış olarak değiştiğini bildirmişlerdir. Bu deneyde, maksimum yükten sonra, taşıma kapasitesinin homojen rezidual zemin üzerinde gerçekleştirilen plaka yükleme testi için bulunan değere doğru düştüğünü görmüşlerdir. Lifin çimentolu üst tabakaya eklenmesi hemen hemen aynı taşıma kapasitesinin korunduğunu, ancak göçme sonrası

davranışı sünek bir davranış olarak değiştirdiğini belirtmişlerdir. Kum-çimento üst katmanında deney sırasında zımbalama göçme mekanizması oluştuğunu belirterek, gerilme çatlaklarının alt tabakadan üste tabakaya doğru oluştuğunu söylemişlerdir. Kum-çimento-lif ile oluşturdukları üst tabaka durumunda ise tamamen farklı bir mekanizma gözlemlenmiştir. Plakanın (temelin) kenarlarında kalın bir kayma bandının oluşmasıyla meydana gelen göçmenin, gerilmelerin rezidual zemin tabakası üzerinde daha büyük bir alana yayılmasını sağladığını vurgulamışlardır.

Touahamia vd. (2002) geri dönüştürülmüş beton, bina yıkıntısı ve taş ocağı atıklarının yeniden kullanımını araştırmışlardır. Doğal agregayı temin ederken oluşan ekonomik ve çevresel etkinin inşaat sektörünü başka alternatif malzemeler aramaya zorladığını belirtmişlerdir. Bu nedenle alternatif malzemelerden biri olarak belirlenen CDW'nin birçok mühendislik uygulamasına uygun olabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları bina yıkıntısı, beton ve taş ocağı atıkları geogridli ve geogridsiz doğrudan kesme aparatlarında test etmişlerdir. İnşaat alanlarında bulunan atık malzemelerin genellikle kötü koşullara maruz kalabileceklerini (çamur, toz vb.) bu nedenle deneyleri kuru, ıslak ve kil bulamacı bulaşmış koşullarda gerçekleştirdiklerini belirtmişlerdir. Gerçekleştirdikleri araştırmalar ışığında, geri dönüştürülmüş malzemelerin, doğal malzemeye kıyasla önemli ölçüde daha düşük kesme mukavemetine sahip olduğunu söylemişlerdir. Bunun yanı sıra, malzemeler kil bulamacı ile karıştırıldığında kayma mukavemetinde önemli bir azalma olduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak, geogridin varlığının numunelerin kayma direncinde önemli bir artışa neden olduğunu, bununla birlikte bazı durumlarda % 50'ye kadar performans artışı sağladığını bildirmişlerdir.

Vieira ve Pereira (2015a) geosentetiklerin karayolları ve demiryolları yapımında güçlendirme donatısı olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, geosentetikleri kullanmanın temel sorularından birinin dayanıklılıkları olduğunu vurgulamışlardır. Yerleştirme sırasındaki mekanik hareketlerden ve kimyasal ve biyolojik bozulmadan kaynaklanan hasarların, geosentetiklerin fiziksel, mekanik ve hidrolik davranışlarında göz önünde bulundurulması gereken önemli konulardan olduğunu belirtmişlerdir. Bu bozunma işlemlerinin neden olduğu değişimin, bu malzemelerin performansını tehlikeye atabildiğini vurgulamışlardır. Güçlendirme malzemesi olarak kullanılan, iki geosentetiğin (tek eksenli bir HDPE geogridinin ve PET lifleri ile güçlendirilmiş dokunmamış bir PP geotekstilin) kısa süreli çekme

davranışı üzerine geri dönüştürülmüş bir inşaat ve yıkıntı atığı tarafından oluşturulan kimyasal ve çevresel bozulmayı incelemek için bir hasar deneme seti (planda 2m x 3m, derinlik 0.4m) inşa etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, CDW'nin, dolgunun yapımından 6 ay sonra çıkarılan geosentetik örnekler üzerindeki etkilerini sunmuşlar ve açıklamışlardır. Geri dönüştürülmüş CDW'nin bileşen ve sızdırma (leaching) davranışını sunmuşlardır. Çıkarılan ve bozulmamış (alındığı gibi) geosentetikler üzerinde büyük ölçekli çekme testleri gerçekleştirmişler ve çekme davranışlarını karşılaştırmışlardır. Ayrıca, çıkarılan ve bozulmamış numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri de sunulmuştur. 6 aylık maruz kalmadan sonra geri dönüştürülmüş CDW tarafından oluşturulan bozulmanın çok anlamlı olmadığını belirtmişlerdir. HDPE geogridinde geri dönüştürülmüş CDW, çekme dayanımı ve çekme mukavemeti modülünün küçük bir düşüşe neden olduğunu belirlemişlerdir. Geokompozitin ise çekme dayanımı üzerinde bir miktar azalma yaşadığını (ortalama %16), ancak çekme rijitliği ve yük-gerinme eğrilerinin şekli üzerindeki etkilerinin anlamlı olmadığını söylemişlerdir.

Demir vd. (2016) araştırmalarında zayıf bir zemin üzerindeki iki farklı geogrid (üçgen ve kare açıklıklı) ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş granüler dolgu tabakası (yol temel zemini, PMT) üzerinde büyük ölçekli tekrarlı yükleme deneyleri yapmışlardır. Büyük ölçekli tekrarlı yükleme deneylerinde, tekrarlı yüklemenin uygulandığı süre boyunca, temel plakasının altında oluşan kalıcı deplasman değerlerini ve yüzey deformasyonlarını, PMT'nin bir eksenini boyunca yerleştirilen 8 adet lvdit ile ölçmüşlerdir. Ayrıca deney kesitinin farklı noktalarında oluşan basınç değerlerini ise farklı konumlara yerleştirilen basınç ölçerler ile belirlemişlerdir. Kullandıkları büyük ölçekli tekrarlı yükleme deney sisteminin kendileri tarafından geliştirildiğini belirtmişlerdir. Tekrarlı yükleme deneyini ilk olarak geogrid donatı kullanılmadan güçlendirilmemiş granüler dolgu (yol temel zemini, PMT) üzerinde yaparak PMT'nin taşıma kapasitesi ve oturma karakteristiğini incelemişlerdir. İkinci aşamada ise, temel zemini içerisine iki farklı geogrid donatı elemanları yerleştirilerek deneyler yapmışlardır ve donatılar ile ilgili parametrelerin temel taşıma kapasitesine ve oturma davranışına etkilerini araştırmışlardır. Her iki aşamada yapılan deneyler karşılaştırılarak donatı kullanımının ve dolgu kalınlığının etkisini araştırmışlardır. Dolgu kalınlığının etkisini araştırmak için güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş PMT kesitlerini farklı yükseklikte inşa etmişler ve böylece kıyaslamışlardır. Dolgu içerisine

yerleştirilen donatı elemanlarının yerleşim düzeni ile ilgili olarak optimum değerler elde etmişlerdir. Ek olarak 2 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanarak deney sistemine benzer bir sistemi modellemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yaptıkları modellemelerde kaplamalı ve kaplamasız yolların tekrarlı yükler altındaki performansını incelemişlerdir. Ayrıca esneklik modülü deneyleri ile de güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş zemin numunelerinin esneklik modülü ve kalıcı deplasman değerlerini araştırmışlardır. Çalışmaları kapsamında geliştirdikleri büyük ölçekli kesme kutusu deney sistemi ile kullanılan zemin numunelerinin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerini daha gerçekçi bir şekilde belirlediklerini belirtmişlerdir. Çalışmaları sonucunda hem güçlendirmeli hem de güçlendirmesiz kesitler de dolgu kalınlığı arttıkça kalıcı deformasyonların (tekerlek izi) azaldığını belirlemişlerdir. Güçlendirmenin etkisini incelerken; hem üçgen açıklıklı triaxial geogridin hem de kare açıklıklı biaxial geogridin kalıcı deformasyonları (tekerlek izi) önlemede etkili olduklarını belirtmişlerdir. En efektif geogrid yerleştirme derinliğinin “u” derinlik “D” temel çapı olmak üzere $u=0.33D$ olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca üçgen açıklıklı triaxial geogridin, kare açıklıklı biaxial geogride göre daha etkili olduğu görmüşlerdir.

Rahman vd. (2013) günümüzde yol ve kaplama uygulamalarında çok miktarda doğal taş ocağı agregası kullanıldığında belirtmişlerdir. Taş ocağı agregalarına alternatif olarak geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA), tuğla atığı (CB) ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) gibi inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) malzemelerinin son yıllarda özellikle yol temel ve alttemel uygulamalarında kullanılmasının oldukça ilgi çekici bir konu olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte, esnek modülü ve tekrarlı yükler altında geogridlerle güçlendirilmiş CDW malzemelerinin performansı henüz belirlenmemiştir. Yazarlar yaptıkları çalışmada, tekrarlı üç eksenli deney (RLT) ekipmanı kullanarak çift eksenli ve üç eksenli geogridlerle güçlendirilmiş CDW malzemelerinin esneklik modüllerini (M_R) ve kalıcı deformasyon özelliklerini araştırmışlardır. Değişken deviatorik gerilmenin, güçlendirilmemiş ve geogrid ile güçlendirilmiş CDW malzemelerinin esneklik modülü değerleri üzerindeki etkilerini de incelemişlerdir. İki ve üç parametrelili modeller kullanarak esnek modül test sonuçlarının regresyon analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Geogrid ile güçlendirilmiş RCA ve CB'nin M_R özelliklerinin, ilgili güçlendirilmemiş malzemeninkinden daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Güçlendirilmemiş RCA'ya

göre, biaxial geogrid ile güçlendirilmiş RCA'nın M_R değerinin %24 oranında ve triaxial geogridle güçlendirilmiş RCA'nın M_R değerinin ise %34 arttığını bulmuşlardır. Güçlendirilmemiş RCA'ya kıyasla; biaxial geogrid ile güçlendirilmiş RCA numunesinden elde edilen kalıcı deformasyon değerinin %29 ve triaxial geogrid ile güçlendirilmiş RCA'nınki ise % 36 oranında azaldığını gözlemişlerdir. Güçlendirmesiz CB'ye kıyasla, biaxial geogrid ile güçlendirilmiş CB'nin M_R değerinin %16, e triaxial geogrid ile güçlendirilmiş CB'ninki ise % 55 oranında azaldığını belirlemişlerdir. Kalıcı deformasyon değeri bakımından, güçlendirilmemiş CB malzemesine kıyasla, sırasıyla CB+biaxial geogrid ve CB+triaxial geogrid için %29 ve %37 azalma oluştuğunu aktarmışlardır. Geogridler ile güçlendirme yapılmasıyla, CDW malzemelerinin esneklik modülünün ve kalıcı deformasyon özelliklerinin önemli derecede değiştiğini saptamışlardır.

Arulrajah vd. (2013) geogrid ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı (CDW) agregalarının arayüzey kayma dayanımı özelliklerini, modifiye edilmiş büyük ölçekli direkt kesme test aleti (DST, direct shear test) kullanarak araştırmışlardır. Modifiye ve geleneksel kesme kutusu metotlarını kullanarak, çift eksenli ve üç eksenli geogridlerle güçlendirilmiş çeşitli CDW agregaları ile güçlendirilmemiş agregalar arasında karşılaştırmalar yapmışlardır. Kullandıkları modifiye edilmiş kesme kutusu yönteminin, CDW agregaları ile geogridler arasındaki kenetlenmeyi arttırmaya çalıştığını ve böylece geri dönüştürülmüş CDW agregalarının gerçek arayüz kesme dayanımı özelliklerini tespit ettiklerini iddia etmişlerdir. İki yönlü ve üç eksenli geogridleri güçlendirme amacı ile kullanmışlardır. Test ettikleri CDW agregalarının geri dönüştürülmüş beton agrega (RCA), tuğla atığı (CB) ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) olduğunu belirtmişlerdir. Modifiye edilmiş kesme kutusu deneyleri sonucunda, geogrid takviyeli CDW agregalarının arayüzey kayma dayanımı özelliklerinin, geleneksel test yöntemine ve ilgili güçlendirilmemiş malzemelere göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Geogrid ile güçlendirilmiş RCA'nın, CDW malzemeleri arasında yüksek arayüzey pik ve kalıntı kayma dayanımı özelliğine sahip olduğunu görmüşlerdir. RAP'in, CDW agregaları arasında en küçük arayüz kesme dayanımı özelliklerine sahip olduğunu bulmuşlardır. Daha yüksek rijitlikteki üç eksenli geogridin, düşük rijitlikteki çift eksenli geogridinkinden daha yüksek arayüzey kayma mukavemeti özellikleri oluşturduğunu belirtmişlerdir. Modifiye edilmiş kesme kutusu cihazının, geleneksel bir kesme kutusu cihazına göre daha yüksek arayüz

katsayıları gösterdiğini belirlemişlerdir. Geogridle güçlendirilmiş CDW agregalarının inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan tipik inşaat agregaları için pik ve artık kayma dayanımı gereksinimlerini karşıladığını bulmuşlardır.

Demir vd. (2013) yaptıkları çalışmada, büyük ölçekli arazi testleri gerçekleştirerek geogrid ile güçlendirilmiş zeminlerin potansiyel faydalarını araştırmışlardır. Doğal kil zeminini iyileştirmek için, doğal kil zemini üzerine daha rijit granül dolgu tabakası inşat etmişler ve granüler dolgu tabakası üzerindeki temelin davranışını incelemişlerdir. Geogridin etkinliğini araştırmak için de granül dolgu içine tekli-çoklu geogrid donatı yerleştirmişlerdir. Çalışmaları kapsamında toplam 16 adet arzi deneyi yapmışlardır. Arazi deneylerinde; 0.30, 0.45, 0.60 ve 0.90 m olmak üzere 4 farklı dairesel rijit temel kullanmışlardır. Deney programlarının sonuçlarını yatak katsayısı ve taşıma kapasitesi cinsinden sunmuşlardır. Bu değerleri ise her deney için rijit temelin 10, 20 ve 30 mm oturma miktarları için hesaplamışlardır. Çalışmalarının sonuçlarına dayanarak, granül dolgu ve geogrid kullanımının yatak katsayısı ve taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, deneysel çalışmalarını, istatistiksel korelasyonlar da dahil olmak üzere farklı araştırmacılar tarafından önerilen analitik yöntemler ile karşılaştırmışlardır. Granüler dolgu yapımının taşıma gücünü artırdığını ve oturma değerlerini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca, geogrid donatının granüler dolgu ile kil zemini arasına yerleştirildiği durumda bir iyileşme gözlemlenmediğini ancak geogridin granüler dolgu içersine yerleştirildiğinde önemli bir oranda taşıma gücüne katkı sağladığını vurgulamışlardır.

Hemalatha vd. (2014), granül dolgunun ve geogrid ile güçlendirilmiş granül dolgunun, doğal zeminin statik sıvılaşma potansiyeli davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Granül dolgunun farklı kalınlıklarını, geogrid tabaka sayısını ve temelin boyutlarını incelemek için plaka yük testleri gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçlarını, temelin 10, 15 ve 20 mm oturma değeri için taşıma kapasitesi ve yatak katsayısı cinsinden vermişlerdir. Sonuç olarak, granüler dolgunun kullanılmasının taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını ve temelin oturma davranışını etkili bir şekilde azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, granül dolgu geogrid ile güçlendirildiğinde taşıma kapasitesinde ve oturma davranışında önemli oranlarda iyileştirme elde edildiğini söylemişlerdir. Granüler dolgunda geogrid kullanımının, granüler dolgunun göçme bölgesini kesintiye uğrattığını ve temelin

yatak katsayısında önemli artışlar sağladığını vurgulamışlardır. Ayrıca, yatak katsayısının, geogrid tabaka sayısındaki artışla arttığını görmüşlerdir.

Kumar vd. (2007) düşük bir taşıma kapasitesine sahip kum tabakası üstündeki güçlü bir kum tabakasından (güçlendirmeli / güçlendirmesiz) oluşan zemin üzerine oturan şerit temellerin nihai taşıma kapasitesini model yükleme deneyleri yaparak araştırmışlardır. Model deneylerden elde ettikleri sonuçları analiz ederek üç ana probleme çözümler aramışlardır. Bunlardan ilki tabakalı zeminin temel taşıma kapasitesine etkisidir. İkincisi üst tabakanın yatay geogrid donatı ile güçlendirilmesinin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisidir. Sonuncusu ise güçlendirilmiş tabakalı zeminlerin temelin oturması üzerindeki etkisidir. Çalışmalarının sonucunda üst tabakanı iyi derecelendirilmiş bir toprakla değiştirilmesinden sonra, zemin sürtünme direncinin artacağı için faydalı olduğunu görmüşlerdir. Mevcut zayıf zemin ile üstten temel genişliği kadar kalınlıktaki tabakanın daha rijit kum tabakası ile değiştirildiği ve 2-4 tabaka geogrid donatı yerleştirildiği durumda üstteki tabakanın üzerinde bulunan şerit temelin nihai taşıma kapasitesinde 3 ila 4 kat artış olduğunu belirlemişlerdir. Sadece taşıma kapasitesinde değil, aynı zamanda oturma kapasitesinde de bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Plaka yükleme testlerini, kumun farklı yoğunluklarında gerçekleştirdiklerini ve verilerin, güçlendirilmiş tabakalı zeminlere oturan temellerin analitik çözümlerini üretmek için çok faydalı olacağını vurgulamışlardır.

Phanikumar vd. (2009) yaptıkları çalışmada, geogrid ile güçlendirilmiş kum tabakası üzerinde model deneyler (laboratuvar ortamında plaka yükleme deneyi) gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarında üç farklı kum zemini (ince, orta ve kaba daneli) kullanılmışlardır. Güçlendirme tabakası olarak olarak 120 mm çapında dairesel geogrid kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma kapsamında yük-oturma davranışlarını incelemişlerdir. Kum tabakasını oluştururken rölatif yoğunluğun %50'si kadar bir değerde sıkıştırma yapmışlardır. Yüzeysel temel olarak 60 mm'lik bir çapa sahip bir plaka kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, yatay geogrid güçlendirmenin yük oturma davranışını iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Tek geogrid ile güçlendirilmiş ince, orta ve kaba daneli kumda 0.5 mm'lik bir deformasyon değerinde uygulanan yükün, sırasıyla, 83N, 44N ve 87N olduğunu belirlerken, donatısız durumlarda sırası ile 63N, 38N ve 47N olduğunu belirlemişlerdir. Yük-oturma davranışının, geogrid tabaka sayısındaki artışla ve aralarındaki boşluklardaki azalmayla daha da iyileştiğini tespit

etmişlerdir. En yüksek yük değerlerini ise 3 tabaka geogrid ile güçlendirme durumunda elde etmişlerdir. Geogrid ile güçlendirilmiş durumda belirli bir oturma için oluşan yükün güçlendirilmemiş durumda aynı oturma için oluşan yüke oranını yük iyileştirme oranı olarak tanımlarlarken, yük iyileştirme oranının tüm kumlar için geogrids sayısı ile arttığını, ancak, iri daneli kum durumunda bu değerler daha iyi yüksek belirtmişlerdir.

2.6 Önceki Çalışmaların Değerlendirilmesi

Yapılan literatür çalışması ışığında çeşitli dolguların yapımında tercih edilen katı atıkların genelde, sadece beton parçaları içeren geri dönüştürülmüş beton agrega (recycled concrete aggregate, RCA), geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP), geri dönüştürülmüş tuğla (CB) ve pek çok katı atık ihtiva eden inşaat ve yıkıntı atığı (CDW) olduğu gözlemlenmiştir. Bu atıkların ve bu atıkların haricindeki diğer katı atıkların dolgu yapımında kullanılmasının gittikçe popülerleştiği görülmüştür. Bunun en temel nedenleri doğal kaynakların gittikçe azalması, sürdürülebilirliğin sağlanması, çevre kirliliğinin azaltılması, mali tasarruf vb. şeklinde sıralanabilir.

Literatürdeki bazı çalışmalarda çeşitli katı atık agregaları birbirleri ile ya da doğal agrega ile karıştırılarak mühendislik uygulamalarında kullanılmıştır. Literatürde bulunan bir kısım çalışmada ise geri dönüştürülmüş beton agreganın yanı sıra cam, tuğla, agrega, ahşap, mermer, alçı gibi çok çeşitli malzemeler ihtiva eden CDW'nin, oluştuğu kaynağından doğrudan alınarak kullanılmıştır. CDW agregalarının oluşum süreci, oluştuğu kaynaktan temin edildikten sonra içerdiği çeşitli zararlı malzemelerin (plastik, metal vb.) ayıklanması ve daha sonra çeşitli konkasörlerde istenen gradasyonlarda kırılması şeklindedir. Genellikle oluşum süreci böyle olmakta fakat özel uygulamalar için farklı geri dönüşüm sistemleri kurulabilmektedir. Genellikle CDW kullanılmadan önce ihtiva ettiği beton parçası, doğal agrega, tuğla parçası, bitüm, cam vb. malzemelerin ağırlıkça oranlarının belirlendiği görülmüştür.

CDW'nin tekrar kullanılması ile alakalı literatür incelendiğinde, çoğu çalışmanın geleneksel laboratuvar deneyleri kullanılarak bu atıkların çeşitli fiziksel ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ve belirlenen özelliklerin çeşitli dolgu yapımları için yeterli olup olmadığı üzerine olduğu görülmüştür. Yapılan geleneksel laboratuvar çalışmaları arasında elek analizi, modifiye proktor, yassılık indeksi, Los Angeles aşınma, su emme, dane yoğunluğu, CBR, serbest basınç, esneklik modülü,

statik ve tekrarlı üç eksenli, büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri bulunmaktadır. Yapılan çalışmaların sonucunda genel itibari ile CDW'nin doğal agregalar yerine bir alternatif olabileceği görüşü ağırlık basmıştır.

Çeşitli dolguların yapımında kullanılan çeşitli katı atık agregaların bazı durumlarda gerekli mühendislik özellikleri sağlamadığı görülmüştür. Bu gibi durumlarda zemin stabilizasyonu kavramı devreye girmektedir. İstenen özelliklere sahip olmayan zeminlerin ıslah edildiği gibi, arzu edilen özellikleri göstermeyen çeşitli katı atık agregaların da mühendislik özellikleri iyileştirilebilmektedir. CDW gibi geri dönüştürülmüş malzemelerin mühendislik özelliklerinin puzolan katkıları ile iyileştirilmesinin son yıllarda ilgi çeken bir konu olduğu görülmüştür. Özellikle, puzolan katkıların alkali aktivatör ile birlikte kullanımı (geopolimer üretimi) oldukça popüler olmaya başlamıştır. Bu tür bir iyileştirmenin zeminler için özellikle de CDW için araştırılmasının literatürde çok kısıtlı olduğu belirlenmiştir.

Detaylı literatür analizinde, CDW agregalarının genellikle yol dolgularında kullanılması üzerine yoğunlaştığı fakat bu konu hakkında yeterli çalışmanın olmadığı görülmüştür. Ayrıca, ülkemizde CDW olduğu yerde tesviye, geri dolgu, temel dolgusu vb. amaçlar için kullanımının yaygın olduğu düşünülmektedir. CDW'nin çeşitli alanlarda dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için dolgunun farklı durumlardaki davranışının detaylı bir şekilde araştırılması gerektiği düşünülmektedir. İçerisinde pek çok farklı malzemeyi ihtiva eden CDW, statik yüklemeye maruz kaldığında doğal malzemelere göre daha fazla ezilme ve deformasyon oluşabileceği düşünülmektedir. Bu durumda CDW'nin özelliklerinin iyileştirilmesi elzemdir.

Literatürdeki pek çok çalışmada granüler dolgu içerisinde geogrid kullanımının taşıma kapasitesini artırdığı oturma davranışını azalttığı görülmüştür. CDW agregalarının performansını artırmak için de geogrid kullanılabileceği düşünülmektedir. Literatürde geogridler ile güçlendirilmiş inşaat yıkıntı atıkları ile alakalı araştırmaların genelde büyük ölçekli kesme kutusu ve tekrarlı üç eksenli deneyleri ile sınırlı olduğu görülmüştür. Geogrid ile güçlendirilmiş CDW ile inşa edilen bir dolgunun statik yükler altındaki performansının değerlendirilmesine dair çok kısıtlı bir çalışma olduğu görülmüştür. Ayrıca hem geogrid hem de geopolimer ile güçlendirilmiş CDW ile oluşturulan bir dolgunun davranışına dair bir çalışmaya ise rastlanmamıştır.

Bu tez çalışmasının, aşağıda sıralanan maddelerde belirtilen sebeplerden ötürü literatüre önemli derecede katkı sağlayacağı, CDW'nin tekrar kullanılmasına teşvik edeceği düşünülmektedir:

- CDW'nin geleneksel laboratuvar deneyleri ile mühendislik özellikleri belirlenmiştir.
- CDW'nin puzolan katkıları ile güçlendirilmesi durumunda kompaksiyon ve dayanım özelliklerinin nasıl etkilendiği araştırılmıştır.
- CDW'nin alkali aktivatör ve puzolan katkıları ile (geopolimer üretimi) güçlendirilmesi durumunda dayanım özelliğinin nasıl etkilendiği araştırılmıştır.
- Puzolan katkıların optimum oranı bulunmuştur.
- Zayıf zemin üzerine, CDW ile oluşturulmuş dolguların model deneyler ile yük-deformasyon davranışları araştırılmıştır.
- Zayıf zemin üzerine, CDW ile oluşturulmuş dolgularda geogrid kullanımının yük-deformasyon davranışına etkisi belirlenmiştir.
- En yüksek mukavemet değerini oluşturan katkı ile iyileştirilmiş CDW ile oluşturulmuş dolguların (zayıf zemin üzerine) model deneyler ile yük-deformasyon davranışları incelenmiştir.
- En yüksek mukavemet değerini oluşturan katkı ile iyileştirilmiş CDW ile oluşturulmuş dolguların (zayıf zemin üzerine) geogridle güçlendirilmesi durumunun model deneyler ile yük-deformasyon davranışları araştırılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında CDW'nin dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca, CDW'ye puzolan eklenmesinin ve CDW ile oluşturulmuş dolguda geogrid kullanılmasının, CDW'nin kompaksiyon ve dayanım özelliklerini nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Öncelikle, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan materyaller ve bu materyallerin özellikleri açıklanmıştır. CDW, kohezyonlu (ince daneli) zemin, puzolanlar, alkali aktivatör çözeltisi (AAÇ), geosentetikler ve deneysel çalışmalarda kullanılan deney ekipmanları ile alakalı çeşitli özellikler anlatılmıştır.

Daha sonra ise tez çalışması kapsamında yapılan modifiye proktor, serbest basınç, CBR ve model yükleme deneylerinin nasıl gerçekleştirildiği anlatılmıştır. Son olarak deneysel çalışmaların programları belirtilerek hangi deneylerin gerçekleştirildiği özetlenmiştir.

3.1 Materyal

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, zemin malzemesi olarak; CDW ve kohezyonlu (ince daneli) zemin, puzolan katkı olarak; uçucu kül ve yüksek fırın cürufu, alkali aktivatör olarak; sodyum hidroksit (NaOH), geosentetik olarak; geotekstil ve geogrid kullanılmıştır. Bu malzemelerin özellikleri aşağıdaki başlıklarda tanıtılmıştır.

3.1.1 İnşaat ve Yıkıntı Atığı

Tez çalışması için kullanılan CDW, Osmaniye ilinin Düziçi ilçesinde bulunan çok katlı "İl Özel İdaresi" binasının yıkıntısından temin edilmiştir. Bu bina bodrum ve zemin kat hariç 7 katlı betonarme bir binadır. Binanın yıkılmadan önceki görüntüsü Şekil 3.1'de görülmektedir. Bu binanın deprem performansı incelenmiş ve yıkılmasına karar verilmiştir. Bu binanın deprem performansını incelemek için zemin kat dahil her kattan üçer adet olmak üzere toplam 24 adet karot numnesi alınmış bu numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Numunelerden elde edilen basınç mukavemetleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Karot numunelerinin sonuçlarına göre "İl

Özel İdaresi” binasının ortalama basınç mukavemeti değeri 14.5 MPa olarak hesaplanmıştır (Ok ve Demir, 2018).



Şekil 3.1. Osmaniye ili Düziçi ilçesinde bulunan İl Özel İdaresi Binası'nın yıkılmadan önceki hali (Ok ve Demir, 2018)

Çizelge 3.1. Alınan karot numunelerinin basınç mukavemeti değerleri (Ok ve Demir, 2018)

Numunenin Alındığı Kat	Numunenin Alındığı Yapı Elemanı	Alınan Numunenin Ortalama Basınç Mukavemeti (MPa)	Numunenin Alındığı Kat	Numunenin Alındığı Yapı Elemanı	Alınan Numunenin Ortalama Basınç Mukavemeti (MPa)
Zemin kat	C-1 Kolon	15.4	4. Kat	B-6 Kolon	11.5
Zemin kat	B-1 Kolon	15.0	4. Kat	C-7 Kolon	10.7
Zemin kat	A-1 Kolon	11.0	4. Kat	F-1 Kolon	21.8
1. Kat	B-6 Kolon	16.6	5. Kat	E-4 Kolon	7.4
1. Kat	B-7 Kolon	12,8	5. Kat	B-7 Kolon	12.9
1. Kat	C-2 Kolon	16.0	5. Kat	BC-1 Kolon	14.0
2. Kat	AC-2 Kolon	15.8	6. Kat	B-6 Kolon	11.1
2. Kat	C-2 Kolon	13.0	6. Kat	E-2 Kolon	11.0
2. Kat	BC-3 Kolon	24.0	6. Kat	C-3 Kolon	12.5
3. Kat	B-6 Kolon	17.2	7. Kat	A-8 Kolon	10.2
3. Kat	BE-5 Kolon	20.9	7. Kat	F-8 Kolon	16.2
3. Kat	D-2 Kolon	15.3	7. Kat	E-4 Kolon	14.5
<ul style="list-style-type: none"> Alınan Tüm Numunelerin Ortalama Basınç Mukavemeti: 14.5 MPa 					

Deprem performansı yetersiz bulunan il özel idaresi binasının yıkım işlemi kontrollü olarak iş makineleri ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2’de binanın yıkım işlemi görülmektedir. Binanın yıkılması işlemi sonucu oluşan molozlarda bulunan çeşitli donatı ve metal parçaları binayı yıkan firma tarafından ayıklanmıştır. İçeriğindeki çeşitli donatı ve metal parçalarının büyük bir kısmının ayıklandığı molozlar, kamyonlar vasıtasıyla taşınarak uygun bir sahaya nakledilmiştir.



Şekil 3.2. İl özel idaresi binasının yıkılması işlemi (Ok ve Demir, 2018)

Yere serilmiş moloz malzemeleri arasından gözle görülüp seçilebilen yabancı maddeler (donatı, elektrik kablosu, metal vb.) ayıklanarak içeriğinde istenmeyen madde kalmaması sağlanmıştır. Molozlar yabancı maddelerden tamamen ayıklandıktan sonra kamyonlar vasıtası ile kırılma işlemi için taş ocağına taşınmıştır. Molozlar taş ocağında bulunan konkasör ile kırılmadan önce mıknaş sistemi ile içinde unutulmuş donatı ve metal parçalarının varlığı kontrol edilmiştir. Konkasörde kırılma işlemi sonrası 0-20 mm aralığında dane çapına sahip CDW agregası oluşturulmuştur. Şekil 3.3’te konkasöre malzeme yüklenmesi ve kırılması işlemleri görülmektedir. Konkasörde kırılma işlemi sonrası 0-20 mm aralığında yaklaşık 5 tondan fazla CDW agregası elde edilmiştir. Bu malzemeler öncelikle Osmaniye

Korkut Ata Üniversitesi'ne getirilmiş daha sonra burada torbalanarak kamyonlar vasıtası ile İnönü Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na getirilmiştir. 0-20 mm aralığındaki CDW Şekil 3.4'te görüldüğü gibidir.

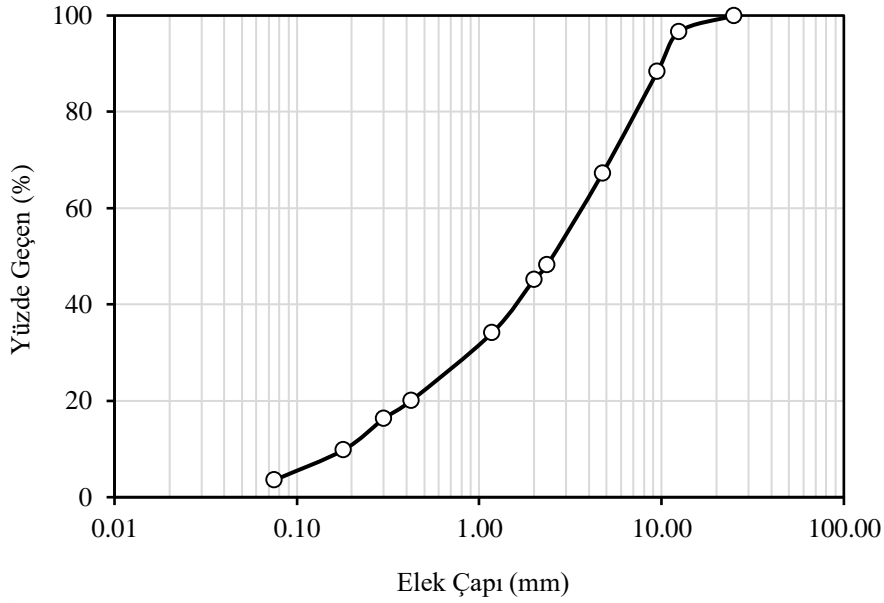


Şekil 3.3. Molozların konkasöre yüklenmesi ve kırılması işlemi (Ok ve Demir, 2018)



Şekil 3.4. Konkasörde kırılma işlemi sonucu oluşan 0-20 mm aralığında dane çapına sahip CDW

Konkasörde kırılma işlemi sonucunda oluşan CDW malzemesi için elek analizi deneyi yapılmıştır. Elek analizi deneyi ASTM C136-06 standartına göre gerçekleştirilmiştir. Elek analizi deneyi sonucunda elde edilen granülometri eğrisi Şekil 3.5'te verilmiştir. Elek analizi sonucuna göre CDW için UCSC'ye (birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi) (ASTM D2487-11) ve TS 1500/2000'e göre zemin sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. CDW'nin zemin sınıflandırılması UCSC'ye göre SW (iyi derecelendirilmiş çakıllı kum), TS 1500/2000'e göre GW (düzgün dane dağılımlı çakıl ve az kum) olarak belirlenmiştir.



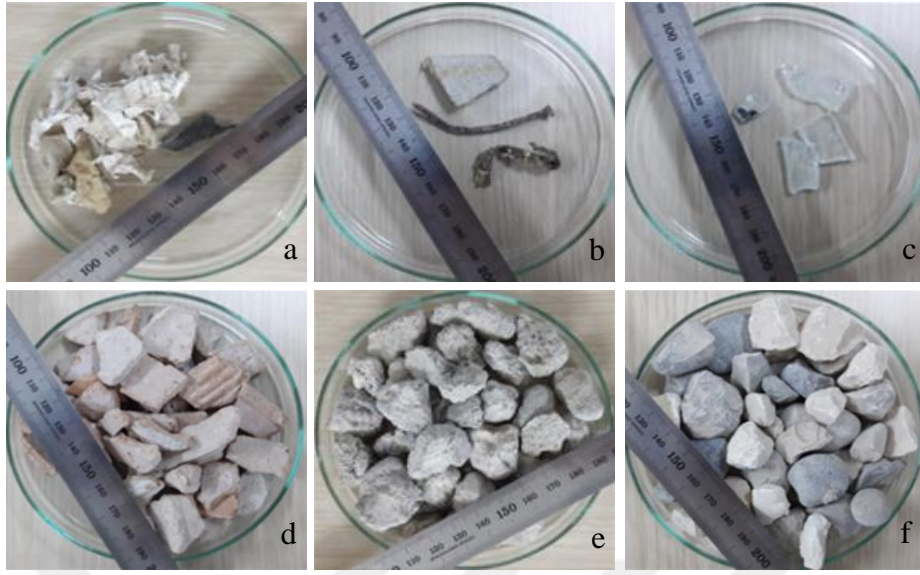
Şekil 3.5. CDW'nin granülometri eğrisi

Literatürde belirtildiği gibi CDW malzemeleri heterojen olarak çok çeşitli malzemeleri içermektedir. CDW içerisinde bulunan çeşitli maddelerin kütlece yüzde oranlarının tespiti için BS EN 933-11 standardına göre analiz gerçekleştirilmiştir. CDW içerisinde bulunan farklı malzemelerin kütlece oranları Çizelge 3.2'de görüldüğü gibidir. Ayrıca, CDW içerisinde bulunan yabancı malzemeler Şekil 3.6'da görülmektedir.

CDW malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için piknometre, modifiye proktor, kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR), su emme, yassılık indeksi ve Los Angeles aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, modifiye proktor deneyinden sonra, bu deneyde kullanılan numune üzerinde elek analizi yapılarak malzemenin gradasyon değişimi (ezilme davranışı) incelenmiştir.

Çizelge 3.2. CDW içerisinde bulunan malzemelerin oranları

Malzeme Türü	Birim	Değer
Beton, beton ürünleri, harç (R_c)	(%)	36.21
Agrega, bağlayıcısız agregası, hidrolik bağlı agregası (R_u)	(%)	52.11
Tuğla, kalsiyum silikatlı duvar üniteleri (R_b)	(%)	11.14
Cam (R_g)	(%)	0.09
Diğer malzemeler (metaller, yüzmeyen ahşap plastik kauçuk, alçı) (X)	(%)	0.45
Yüzen parçacıklar (FL)	(cm^3/kg)	0.06

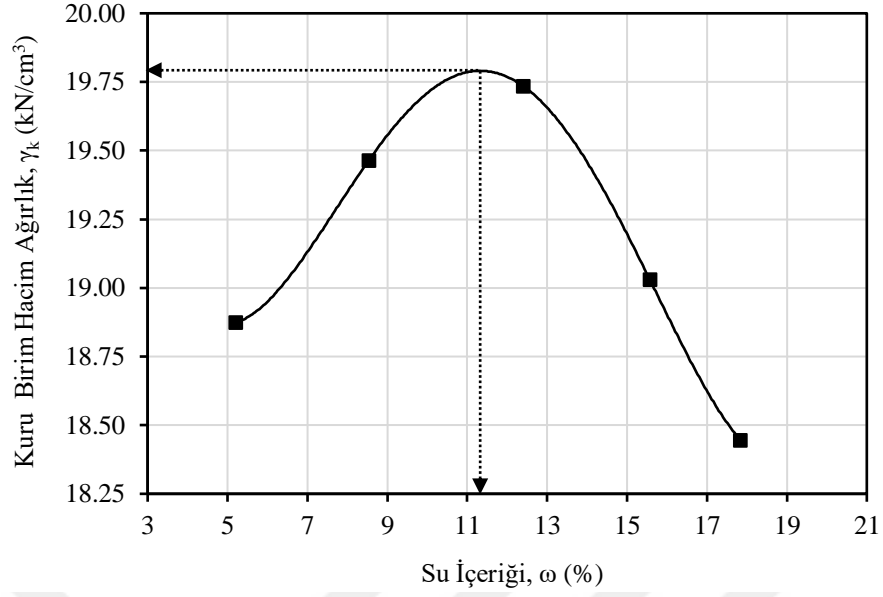


Şekil 3.6. CDW içinde bulunan malzemeler: a) yüzen x malzemesi, b) batan x malzemesi, c) cam, d) tuğla, e) beton, f) agrega (Ok ve Demir, 2018)

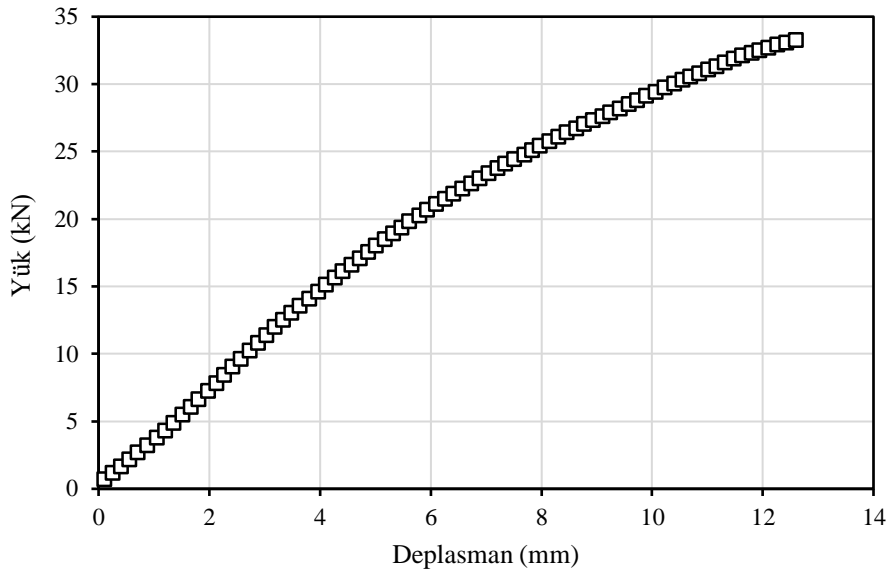
Piknometre deneyi ASTM C 127-12 ve ASTM C128-12 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Bu deney ile CDW'nin dane birim hacim ağırlığı (γ_s) belirlenmiştir. Hem kaba (4 nolu elek üstü) hem de ince (4 nolu elek altı) daneler için gerçekleştirilen piknometre deneyi sonrasında kaba danelerde dane birim hacim ağırlığı 26.03 kN/m^3 olarak bulunurken ince danelerde ise 26.21 kN/m^3 değeri elde edilmiştir.

Modifiye proktor deneyi ASTM D1557-12 dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu deney ile CDW'nin optimum su içeriği (ω_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen modifiye proktor deneyi sonucunda CDW'nin optimum su içeriği (ω_{opt}) %11.25, maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) 19.79 kN/m^3 olarak belirlenmiştir. CDW üzerinde yapılan modifiye proktor deneyi sonrası elde edilen kompaksiyon eğrisi Şekil 3.7'de verilmiştir.

CDW'nin optimum su içeriğinde ($\omega_{opt}=\%11.25$) Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney ASTM D1883-14'te belirtildiği gibi yapılmıştır. CDW'nin CBR deneyinde oluşan yük-deformasyon eğrisi Şekil 3.8'de görüldüğü gibidir. Optimum su içeriğindeki CDW'nin, 2.5 ve 5 mm'lik oturmaya karşılık hesaplanan düzeltilmiş CBR değerleri sırasıyla %70.10 ve %90.59 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.7. CDW'ye ait kompaksiyon eğrisi



Şekil 3.8. CDW'nin CBR deneyi sonucu oluşan yük-deformasyon eğrisi

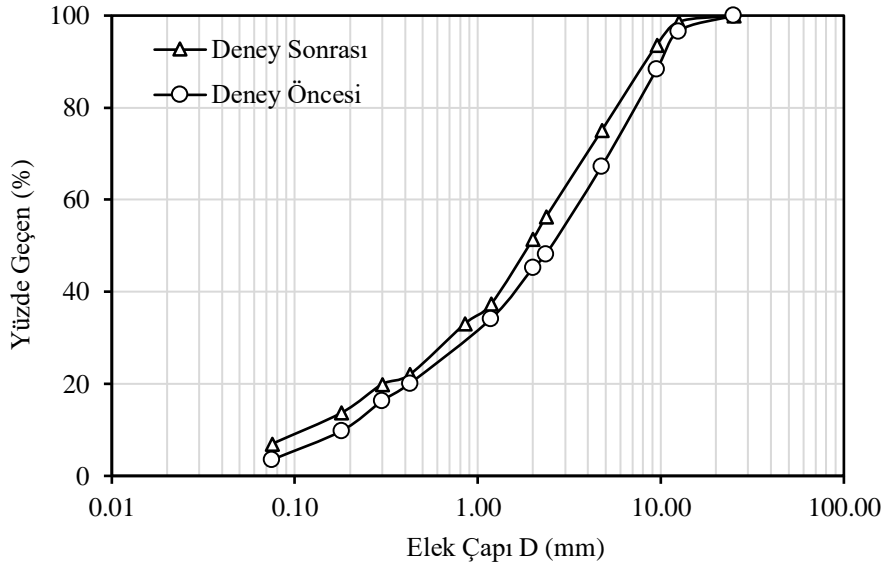
Su emme deneyi ASTM C 127-12 ve ASTM C128-12 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Bu deney yöntemi ile CDW'nin su emme potansiyeli incelenmiştir. Hem kaba (4 nolu elek üstü) hem de ince (4 nolu elek altı) daneler için gerçekleştirilen su emme deneyi sonrasında kaba danelerde su emme oranı %3.94 olarak bulunurken ince danelerde ise %6.91 değeri elde edilmiştir. CDW içerisinde bulunan özellikle

çimento ve alçı bazlı maddelerin, su emme yüzdesini yükselttiği tahmin edilmektedir. Bu durumun, ayrıca modifiye proktor deneyinden elde edilen optimum su içeriğinin (ω_{opt}) yüksek olmasına da neden olduğu düşünülmektedir.

CDW agregalarının tane şeklinin incelenmesi için TS EN 933-3 standartına göre yassılık indeksi deneyi yapılmıştır. CDW agregalarının uygun dane büyüklüğü fraksiyonlarına ayrılarak gerçekleştirilen yassılık indeksi deney sonucuna göre yassılık indeksi %11.14 olarak hesaplanmıştır. CDW içerisinde bulunan tuğla (R_b) ve camın (R_g), beton (R_c) ve agregaya (R_u) göre daha yassı dane yapısına sahip olduğu gözlemlenmiştir (Ok ve Demir, 2018).

CDW'nin aşınmaya karşı gösterdikleri direncin tespit edilmesi için Los Angeles aşınma deneyi ASTM C 131-06 standartına uygun şekilde yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda, CDW'nin Los Angeles aşınma kaybı %32.38 olarak hesaplanmıştır. Bu deney sonucunda oluşan ezilmeler gözlemlendiğinde beton (R_c), tuğla (R_b) ve cam'ın (R_g) agrega'ya (R_u) göre daha fazla aşındığı tespit edilmiştir (Ok ve Demir, 2018).

Modifiye proktor deneyi sonrasında, bu deneyde kullanılan numune üzerinde elek analizi yapılarak modifiye proktor deneyinden önce yapılan elek analizi değeri ile kıyaslanmış ve malzemenin gradasyon değişimi (ezilme davranışı) incelenmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. CDW'nin modifiye proktor deneyi öncesi ve sonrası gradasyon değişimi

Şekil 3.9’da görüldüğü gibi çok önemli bir gradasyon değişimi gözlemlenmemiştir.

CDW malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deneyler sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 3.3’te özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. CDW malzemesinin özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Üniformluk katsayısı (C_u)	-	20.00
Eğrilik katsayısı (C_c)	-	1.12
Yassılık indeksi	%	11.14
Los Angeles aşınma (LA)	%	32.38
Dane birim hacim ağırlığı (γ_s)	kN/m ³	26.21 ⁱ -26.03 ^k
Su emme	%	6.91 ⁱ -3.94 ^k
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax})	kN/m ³	19.79
Optimum su içeriği (ω_{opt})	%	11.25
Kaliforniya taşıma oranı (CBR)	%	90.59
Zemin sınıfı (ASTM D2487-11)	-	SW
Zemin sınıfı (TS 1500/2000)	-	GW

ⁱ İnce dane (4 nolu elek altı), ^k Kaba dane (4 nolu elek üzeri)

3.1.2 Kohezyonlu (İnce Daneli) Zemin

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen model yükleme deneylerinde, CDW kullanılarak inşa edilen dolgu zayıf bir zemin üzerine inşa edilmiştir. Böylece bu dolgunun en kötü durumdaki davranışı incelenmiştir. Zayıf zemini oluşturmak için kohezyonlu (ince daneli) zemin kullanılmıştır.

Kohezyonlu zemin olarak Malatya ili Hanımınçiftliği Mahallesi civarında bulunan bir tuğla fabrikası tarafından da kullanılan zemin tercih edilmiştir. Birbirine yapışıp kuruyarak büyük dane boyutlarında bulunan zemin parçaları laboratuvara getirilerek etüvde kurutulmuştur. Daha sonra çeneli kırıcı yardımı ile zeminin maksimum dane boyutu 2 mm olacak şekilde parçalanmıştır. Temin edilen numune ve numunenin çeneli kırıcı ile kırılması işlemi Şekil 3.10’da sunulmuştur. Çeneli kırıcıdan sonra oluşan kohezyonlu zemin örneği ise Şekil 3.11’de görüldüğü gibidir.

Temin edilen zeminin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için bir dizi geleneksel laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler; yıkamalı elek analizi, hidrometre (ıslak analiz), piknometre, kıvam limitleri, standart kompaksiyon, CBR, serbest basınç, el tipi vane ve el tipi penetrometre deneyleridir.



Şekil 3.10. Temin edilen kohezyonlu zemin numunesi ve çeneli kırıcı

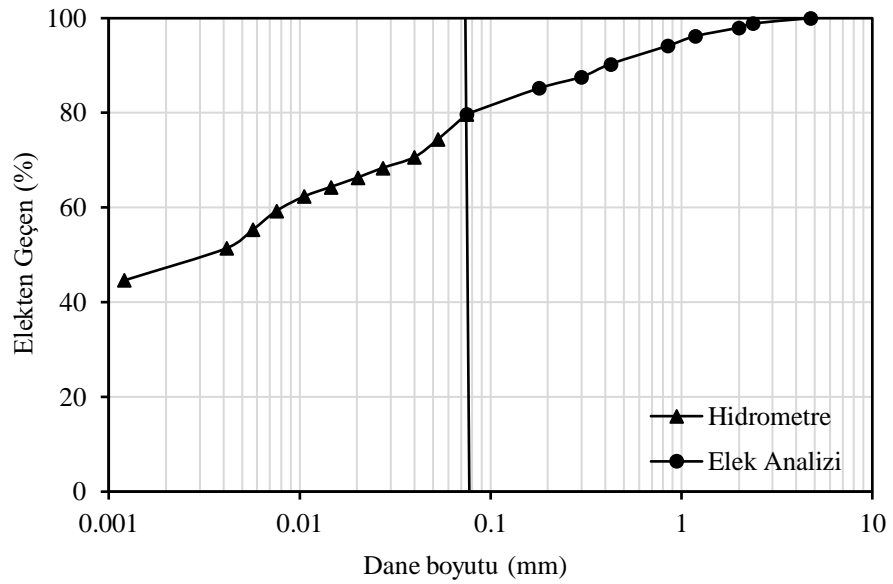


Şekil 3.11. Kohezyonlu zeminin çeneli kırıcı ile kırıldıktan sonraki hali

Zeminin dane dağılımını belirlemek için yıkamalı elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler, sırasıyla ASTM C117 ve ASTM D7928 standartları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Elek analizi ve hidrometre deneylerinin gerçekleştirilmesine dair görüntüler Şekil 3.12’de verilmiştir. Her iki deney sonucu elde edilen granülometri eğrileri birleştirilerek Şekil 3.13’te sunulmuştur. Şekil 3.13’te görüldüğü gibi çalışma kapsamında tercih edilen bu zeminin net bir şekilde ince taneli (kohezyonlu) olduğu belirlenmiştir.



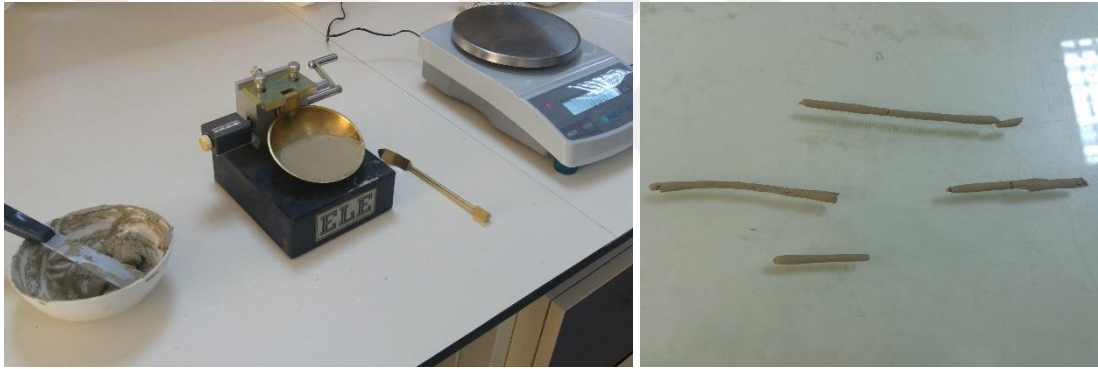
Şekil 3.12. Kohezyonlu zemin üzerinde yıkamalı elek analizi (a, b) ve hidrometre (c) deneyleri



Şekil 3.13. Kohezyonlu zeminin granülometri eğrisi

Kohezyonlu zeminin dane birim hacim ağırlığını bulmak için tatbik edilen piknometre deneyinde ASTM D 854-10 standardı temel alınmıştır. Bu deney sonucunda kil zeminin dane birim hacim ağırlığı (γ_s) 26.12 kN/m³ olarak hesaplanmıştır.

Kohezyonlu zeminin kıvam limitlerini belirlemek için yapılan likit limit (LL) ve plastik limit (PL) deneyleri ASTM D4318-17 standardına uygun bir şekilde yapılmıştır (Şekil 3.14). Bu deneylerin sonucunda kohezyonlu zeminin likit limit değeri %58.08, plastik limit değeri %36.32 ve plastisite indeksi (PI) ise %21.76 çıkmıştır. Gradasyon dağılımı ve kıvam limitleri incelendiğinde, ASTM D2487-11 standartına göre kohezyonlu zeminin cinsi MH (yüksek plastisiteli silt) olarak belirlenmiştir. TS 1500/2000 standartına göre de zemin sınıfı MH (yüksek plastisiteli silt) olarak tespit edilmiştir.

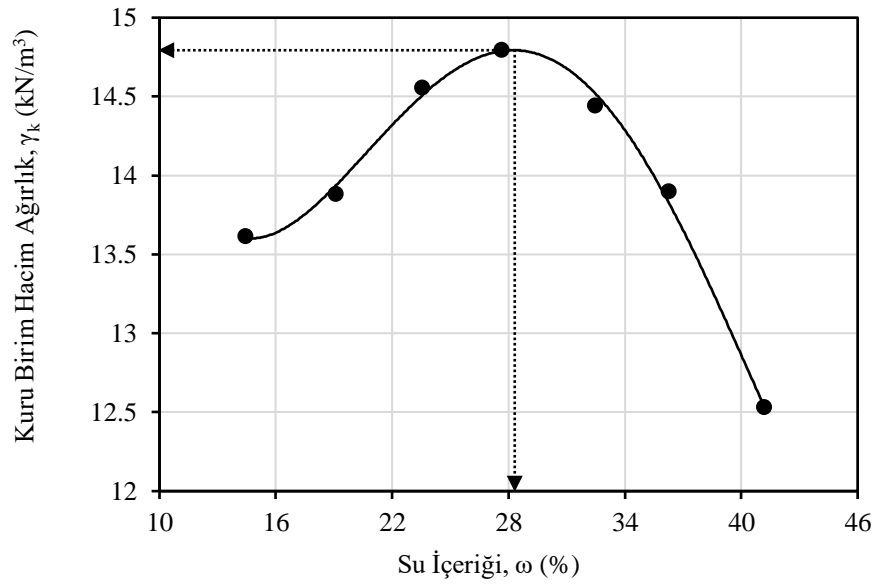


Şekil 3.14. Kohezyonlu zemin üzerinde gerçekleştirilen kıvam limitleri deneyleri

Zeminin optimum su içeriğini (ω_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını (γ_{kmaks}) hesaplamak için gerçekleştirilen standart kompaksiyon deneyi ASTM D 698–12 standardı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.15). Deney sonucunda zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) 14.80 kN/m³, optimum su içeriği (ω_{opt}) ise %28.25 olarak hesaplanmıştır. Zeminin standart kompaksiyon deneyi sonucu oluşan kompaksiyon eğrisi Şekil 3.16’da görüldüğü gibidir.



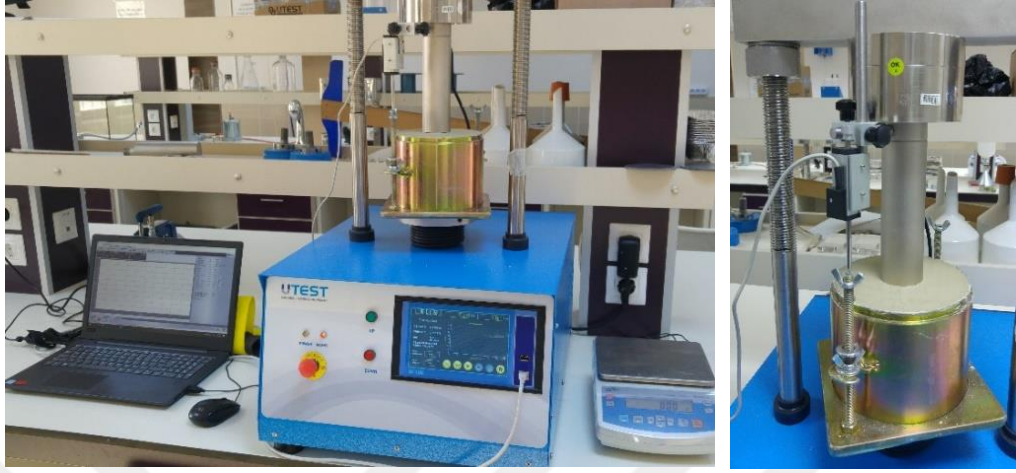
Şekil 3.15. Kohezyonlu zemin üzerinde gerçekleştirilen standart proktor deneyi



Şekil 3.16. Kohezyonlu zeminin standart proktor deneyi sonucu oluşan kompaksiyon eğrisi

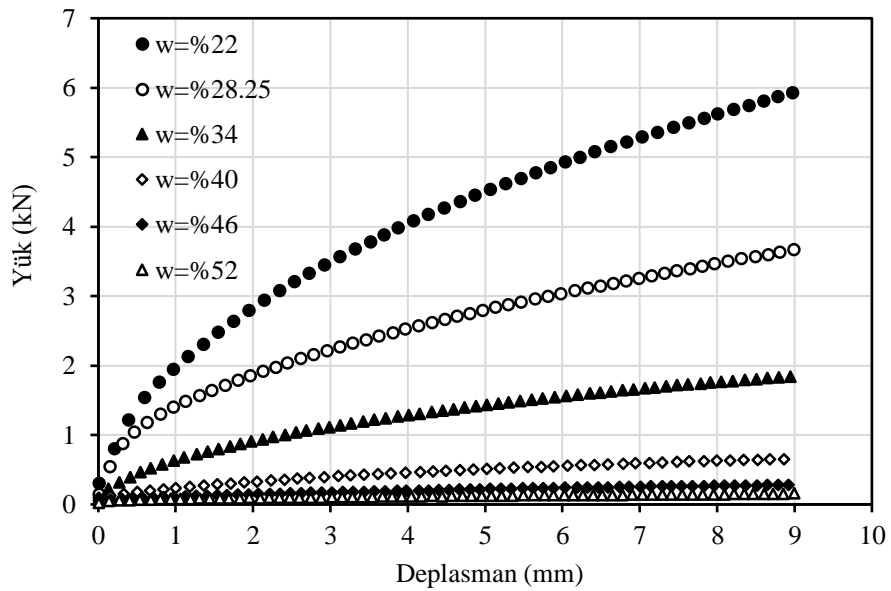
Tez çalışması kapsamında, CDW ile inşa edilecek dolgunun, zayıf bir zemin üzerine yapılması düşünüldüğünden, kohezyonlu zeminin hangi su içeriğinde nasıl bir davranışa sahip olduğu, zeminin farklı su içeriklerinde CBR deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Zeminin taşıma gücünün belirlenmesinde CBR deneyi kullanılabilir. Bu yüzden farklı su içeriklerine sahip (ω =%22, %28.25, %34,

%40, %46 ve %52) kohezyonlu zemin üzerinde CBR deneyleri (ASTM D1883-14) gerçekleştirilmiştir. CBR deneyleri Şekil 3.17’de görüldüğü gibi yapılmıştır.

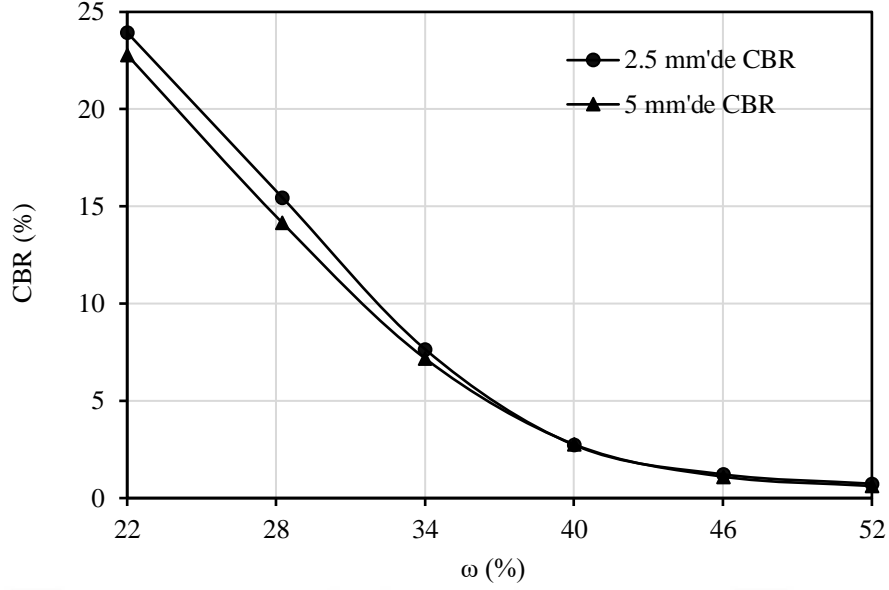


Şekil 3.17. Kohezyonlu zeminde CBR deneyinin gerçekleştirilmesi

CBR deneyleri sonucunda, kohezyonlu zeminin su içeriğine bağlı olarak değişen yük-deformasyon davranışları Şekil 3.18’de gösterildiği gibidir. Ayrıca deneyler sonucunda hesaplanan CBR değerlerinin su içeriği ile değişimi ise Şekil 3.19’da sunulmuştur.



Şekil 3.18. CBR deneyinde oluşan kohezyonlu zeminin farklı su içeriklerindeki yük-deformasyon davranışı



Şekil 3.19. Kohezyonlu zeminin su içeriği ile CBR değeri ilişkisi

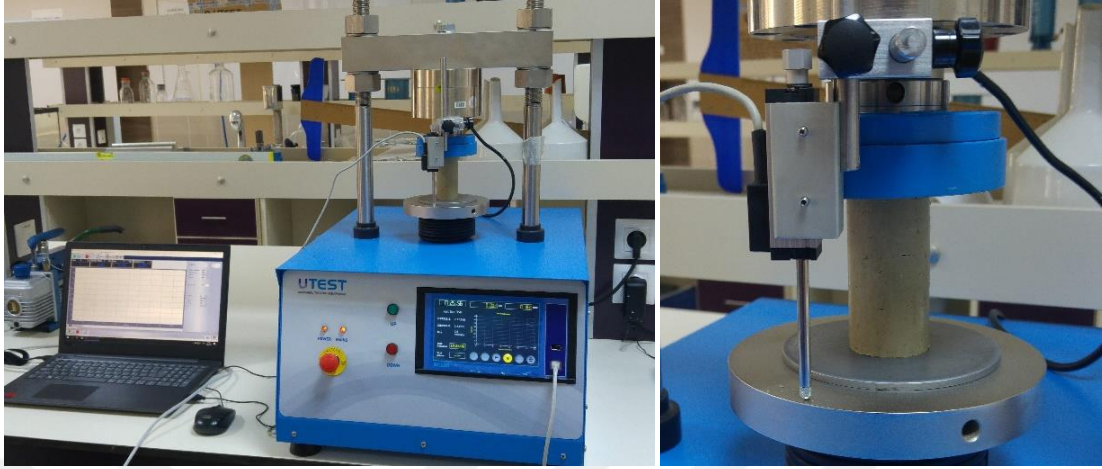
Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da görüldüğü gibi su içeriği arttığında hem yük hem de CBR değerleri oldukça düşmektedir. Deneyler sonucunda kohezyonlu zeminin %22, %28.25, %34, %40, %46 ve %52 su içerikleri için sırası ile düzeltilmiş CBR değerleri %23.94, %15.46, %7.66, %2.77, %1.22 ve %0.74 olarak hesaplanmıştır.

Kohezyonlu zeminin hangi su içeriğinde nasıl bir drenajsız kayma mukavemetine sahip olduğunu belirlemek için serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç deneyleri ASTM D2166-06 standartına göre yapılmıştır. CBR deneylerinde olduğu gibi, serbest basınç deneyleri de kohezyonlu zeminin farklı su içerikleri için (ω =%22, %28.25, %34, %40, %46 ve %52) tatbik edilmiştir. Serbest basınç deneylerine ait görüntüler Şekil 3.20'de sunulmuştur.

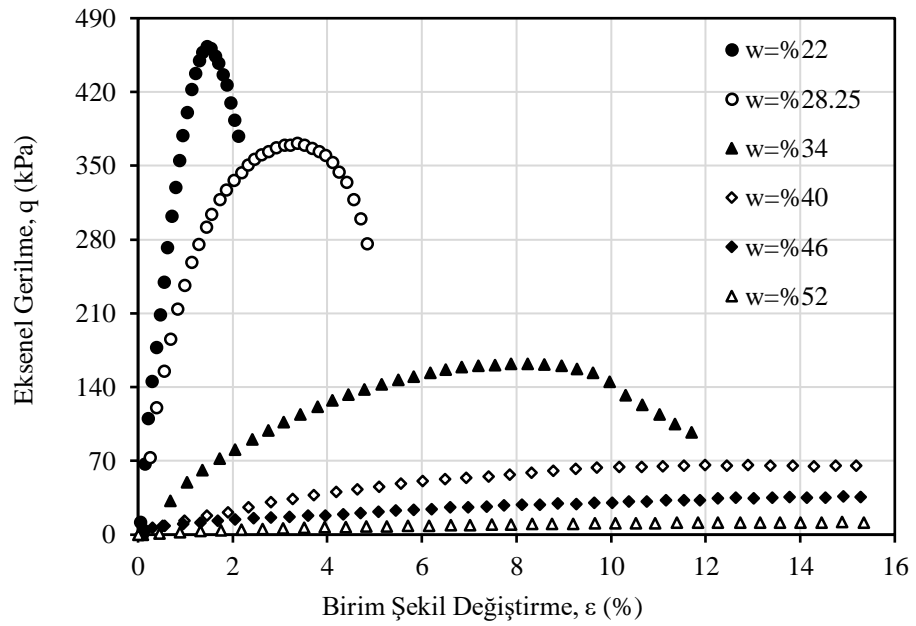
Serbest basınç deneyleri sonucunda, kohezyonlu zeminin su içeriğine bağlı olarak değişen aksenal gerilme ($q=P/A_0$) ile birim şekil değiştirme ($\epsilon=\Delta H/H_0$) davranışları Şekil 3.21'de gösterildiği gibidir. Ayrıca deneyler sonucunda hesaplanan drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değerlerinin su içeriği (ω) ile değişimi ise Şekil 3.22'de sunulmuştur.

Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de görüldüğü gibi su içeriği azaldıkça hem aksenal gerilme hem de drenajsız kayma mukavemeti değerleri oldukça artmaktadır. Deneyler sonucunda kohezyonlu zeminin %22, %28.25, %34, %40, %46 ve %52 su içerikleri

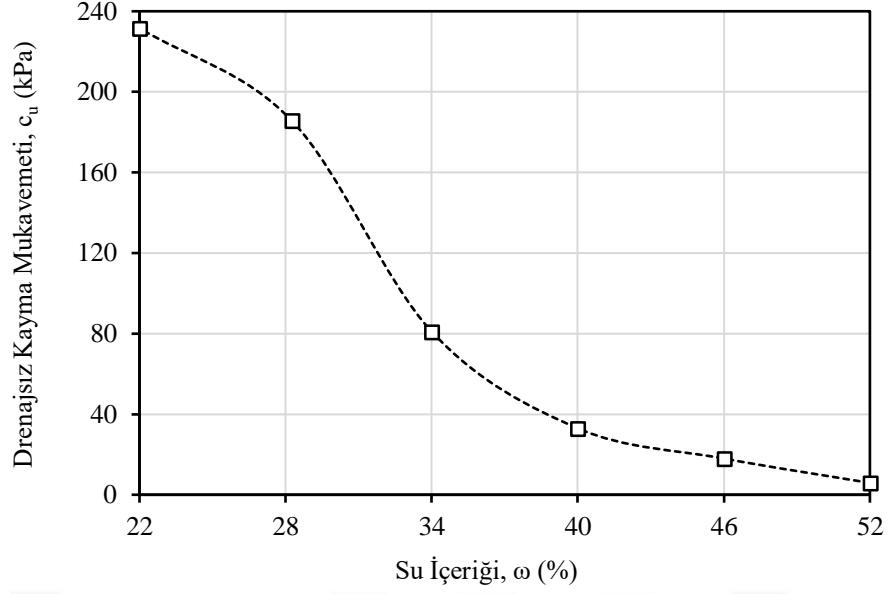
için sırası ile drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değerleri 231.61 kPa, 185.76 kPa, 80.99 kPa, 33 kPa, 17.99 kPa ve 5.87 kPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.20. Kohezyonlu zeminde serbest basınç deneyi

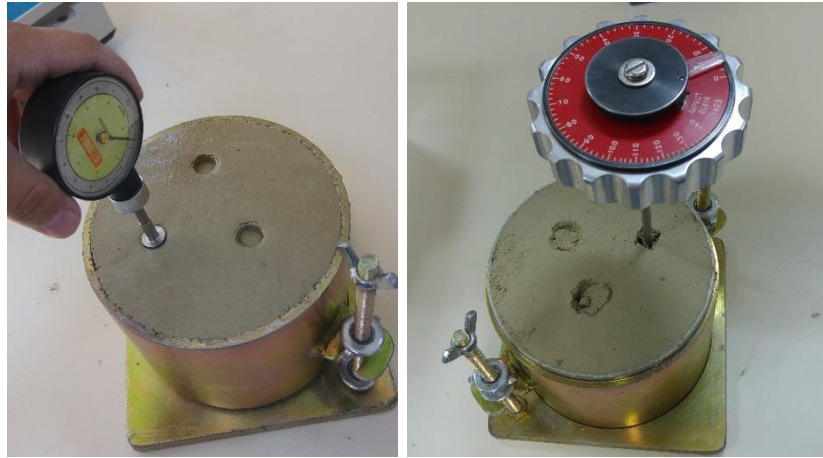


Şekil 3.21. Kohezyonlu zeminin farklı su içeriklerinde serbest basınç deneyleri sonucu oluşan aksenal gerilme-birim şekil değiştirme davranışı



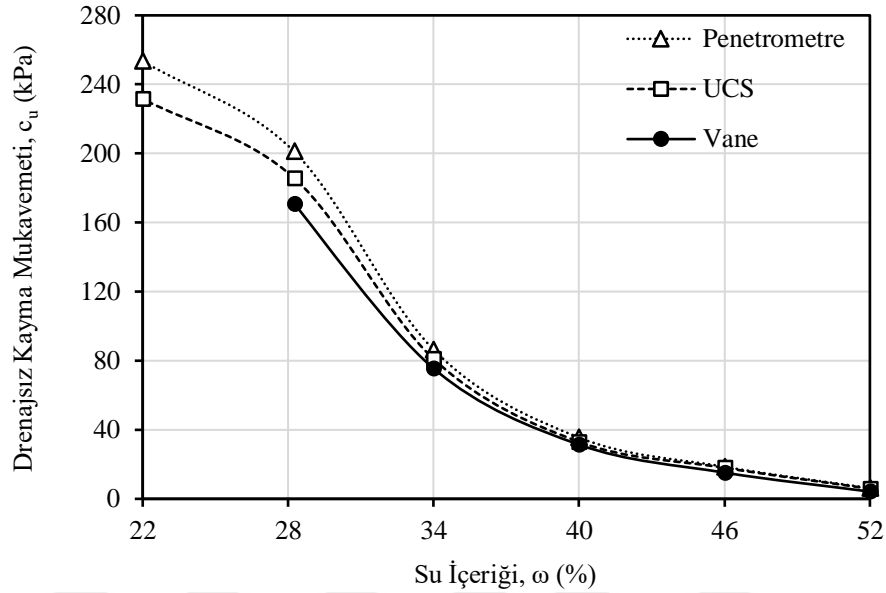
Şekil 3.22. Kohezyonlu zeminin su içeriği-drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi

Ayrıca, kohezyonlu zeminin drenajsız kayma mukavemeti değerini (c_u) farklı su içerikleri için ($\omega = \%22, \%28.25, \%34, \%40, \%46$ ve $\%52$) belirlemek amacıyla el tipi vane ve el tipi penetrometre aletleri de kullanılmıştır. Bu deney aletleri model yükleme deneylerinde kohezyonlu zemin ile oluşturulacak zayıf zeminin hem istenen mukavemette hem de homojen olup olmadığını kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır. CBR deney moldu içerisine yerleştirilen zemin numunesi üzerinde el tipi vane ve el tipi penetrometre aletleri ile kohezyonlu zeminin drenajsız kayma mukavemeti belirlenmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. El tipi vane ve el tipi penetrometre aletleri ile kohezyonlu zeminin drenajsız kayma mukavemetinin belirlenmesi

Böylece el tipi vane ve el tipi penetrometre aletlerinden elde edilen değerlerin doğruluğu kontrol edilmiştir. Serbest basınç (UCS), el tipi vane ve el tipi penetrometre deneyleri sonucu farklı su içerikleri için elde edilen drenajsız kayma mukavemeti değerleri (c_u) Şekil 3.24'te görüldüğü gibidir.



Şekil 3.24. Serbest basınç (UCS), el tipi vane ve el tipi penetrometre deneyleri sonucu elde edilen farklı su içeriklerindeki drenajsız kayma mukavemeti değerleri

Kohezyonlu zeminler üzerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen özellikler Çizelge 3.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.4. Kohezyonlu zeminin özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Likit limit (LL)	%	58.08
Plastik limit (PL)	%	36.32
Plastisite indeksi (PI)	%	21.76
Dane birim hacim ağırlığı (γ_s)	kN/m ³	26.12
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks})	kN/m ³	14.80
Optimum su içeriği (ω_{opt})	%	28.25
CBR (%28.25 su içeriğinde)	%	15.46
Drenajsız kayma mukavemeti (c_u) (%28.25 su içeriğinde)	kPa	185.76
CBR (%46 su içeriğinde)	%	1.22
Drenajsız kayma mukavemeti (c_u) (%46 su içeriğinde)	kPa	17.99
Zemin sınıfı (ASTM D2487-11)		MH
Zemin sınıfı (TS 1500/2000)	-	MH

3.1.3 Puzolanlar

Tez çalışması kapsamında CDW'nin mukavemetini artırmak (CDW'yi stabilize etmek) için uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. UK, Ekton İnşaat Mühendislik Lojistik San. ve Tic. A.Ş. firmasından, YFC ise Karçimsa Çimento San. ve Tic. A.Ş. (Karabük) firmasından tedarik edilmiştir.

Çalışmada kullanılan UK, İSKEN termik santralının yan ürünü olarak oluşmaktadır. UK'nın özellikleri, ASTM C 618 tarafından belirtilen özelliklere uygun olduğu ve F sınıfı UK özelliklerini taşıdığı görülmüştür. UK'nın birim hacim ağırlığı 24.55 kN/m^3 'tür. Deneysel çalışmalarda kullanılan UK danelerinin tamamı 200 Nolu elekten geçmektedir. Ayrıca, çalışmada kullanılan UK'nın, ASTM C618'e göre F sınıfı uçucu küllerin dayanım aktivite indeksinin en az %75 olması gerekliliğini sağladığı belirlenmiştir (Kına, 2019).

Çalışma kapsamında tercih edilen YFC, öğütülmüş halde olup tüm daneleri 200 nolu elekten geçmektedir. YFC'nin özgül yüzeyi $3996 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve birim hacim ağırlığı 28.66 kN/m^3 'tür.

Şekil 3.25'te deneysel çalışmalarda kullanılan UK ve YFC görülmektedir.

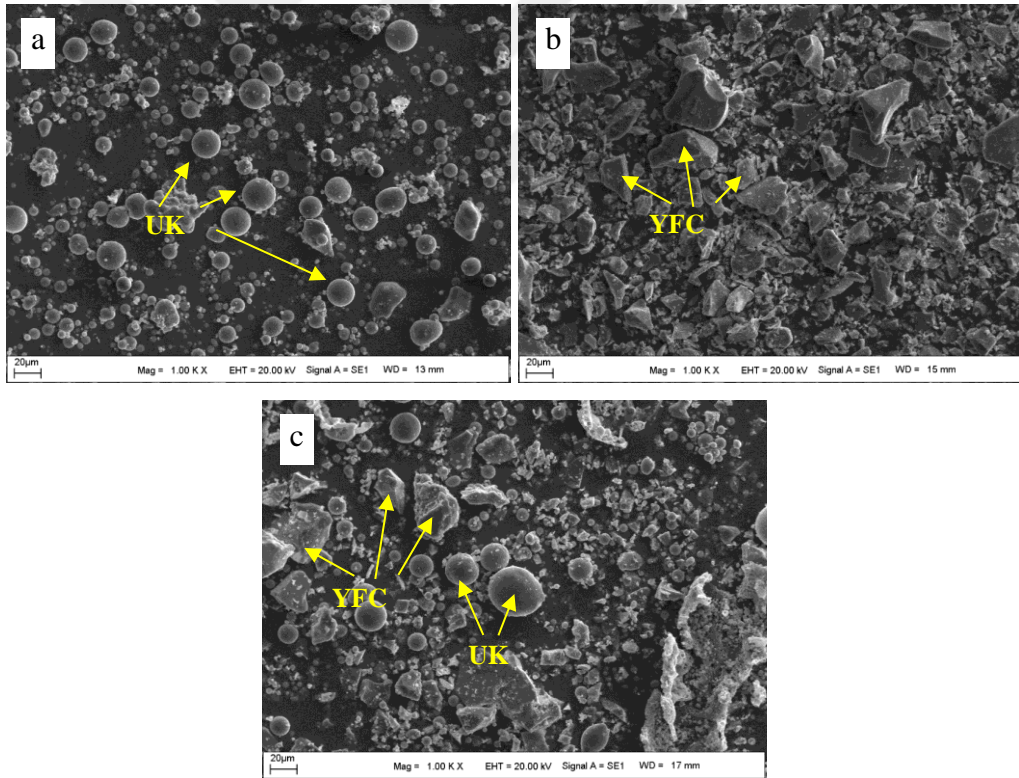


Şekil 3.25. Deneysel çalışmalarda kullanılan UK (solda) ve YFC (sağda)

UK ve YFC için belirlenmiş özellikler Çizelge 3.5'te özetlenmiştir. UK ve YFC içyapısına (mikroyapı) ait yorumlar yapabilmek için SEM (scanning electron microscope, taramalı elektron mikroskobu), analizleri gerçekleştirilmiştir. UK, YFC ve UK ile YFC'nin kütlece yarı yarıya karışımı (UY) için gerçekleştirilen SEM analizi sonucu oluşan görüntüler Şekil 3.26'da görüldüğü gibidir.

Çizelge 3.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu külün (Kına, 2019) ve yüksek fırın cürufunun özellikleri (Özcan, 2018)

Bileşen	Birim	Uçucu Külü ait Değer	Yüksek Fırın Cürufuna ait Değer
SiO ₂	%	63.09	32.47
Al ₂ O ₃	%	3.74	9.94
Fe ₂ O ₃	%	6.11	1.25
CaO	%	6.75	32.45
SrO	%	0.2	-
MgO	%	10.53	9.31
SO ₃	%	0.63	0.82
K ₂ O	%	5.63	0.85
P ₂ O ₅	%	1.43	-
TiO ₂	%	1.62	1.16
S ⁻²	%	-	0.33
Na ₂ O	%	-	0.31
Mn ₂ O ₃	%	-	3.51
Cl ⁻	%	-	0.015
Kızdırma kaybı	%	2.6	-



Şekil 3.26. Tez çalışması kapsamında kullanılan puzolanların SEM görüntüleri; a) UK, b) YFC, c) UY

Şekil 3.26'daki SEM görüntüleri incelendiğinde, kullanılan UK parçacıklarının düzgün yüzeyli küresel parçacıklardan, YFC'nin ise düzensiz ve açısallardan

oluşturduğunu göstermiştir. Gözlemler, literatürdeki çalışmalar ile uyumluluk göstermiştir (Phoo-ngernkham vd., 2015; Memon vd., 2013).

3.1.4 Alkali Aktivatör Çözeltisi (AAÇ)

Bu çalışmada puzolan ile güçlendirilen CDW'nin daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilmesi için sodyum hidroksit (NaOH), alkali aktivatör çözeltisi (AAÇ) olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, katı haldeki NaOH ve su kullanılarak 8M çözelti hazırlanmıştır (Arulrajah vd. 2016a). Diğer bir deyişle 1 litre suya 320 gr katı halde NaOH eklenerek çözelti oluşturulmuştur. Bu çözelti puzolan ile CDW karışımına eklenmiştir. Şekil 3.27'de NaOH çözeltisinin hazırlanışı görülmektedir. Ayrıca, NaOH'ın özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.27. AAÇ'nin hazırlanması

Çizelge 3.6. NaOH'ın özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Molekül formülü	-	NaOH
Molekül kütlesi	(g/mol)	40.00
Renk	-	Beyaz
pH	-	13-14
Bağıl yoğunluk	kN/m ³	21.20

3.1.5 Geosentetikler

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen model deneylerde zayıf zemin üzerine CDW kullanılarak inşa edilen dolgunun geosentetikler ile güçlendirilmesi

durumundaki performansı araştırılmıştır. Bu kapsamda geotekstil ve geogrid olmak üzere iki farklı geosentetik malzeme kullanılmıştır.

Geotekstil, zayıf zemin ile dolgu tabakası arasına yerleştirilerek ayırma işlevi için kullanılmıştır. Rulo halinde gelen geotekstil model deneylerde kullanılan tankın iç çapı kadar dairesel bir biçimde kesilerek rulodan alınmıştır. Bu şekilde elde edilen 60 cm çapındaki geotekstil deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan geotekstil Şekil 3.28’de, özellikleri ise Çizelge 3.7’de sunulmuştur.



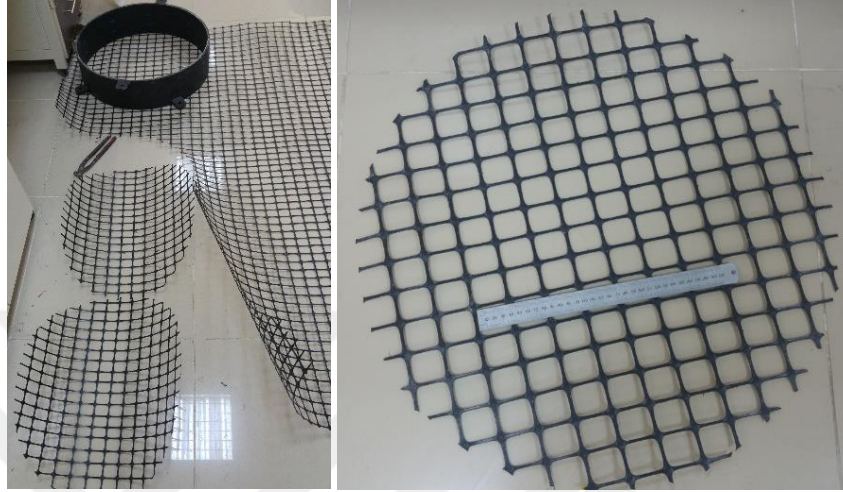
Şekil 3.28. Deneysel çalışmalarda kullanılan geotekstil

Çizelge 3.7. Geotekstilin özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Hammadde	-	Polipropilen
Tip	-	Örgüsüz
Birim ağırlık	g/cm ²	250
Kalınlık	mm	1.5
Gözenek açıklığı	mm	0.12
Çekme dayanımı (İD/İDD)	kN/m	13/15
Kopmadaki uzaması	%	50
Statik delinme dayanımı	N	2500
Dinamik delinme dayanımı	mm	20
Sıvı geçirgenliği	m/s	0.06
UV dayanımı	%	70
İD: İmalat Doğrultusu, İDD: İmalat Doğrultusuna Dik		

Geogrid ise CDW ile oluşturulan dolgu tabakasının içerisine yerleştirilerek güçlendirme amaçlı kullanılmıştır. Rulo halinde gelen geogrid model deneylerde

kullanılan tankın iç çapı kadar dairesel bir biçimde kesilerek rulodan alınmıştır. Bu şekilde elde edilen 60 cm çapındaki geogrid deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan geogrid Şekil 3.29’da, özellikleri ise Çizelge 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.29. Deneysel çalışmalarda kullanılan geogrid

Çizelge 3.8. Geogridin özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Hammadde	-	UV dayanımlı polipropilen
Tip	-	Çift eksenli extrude
Açıklık şekli	-	Kare
Açıklık boyutu	mm	40x40
Kalınlık	mm	1.4
Çekme dayanımı	kN/m	15/15
Karbon siyahı muhtevası	%	2-3
pH direnci	-	2-13
İD: İmalat Doğrultusu, İDD: İmalat Doğrultusuna Dik		

3.1.6 Kullanılan Deney Düzenekleri ve Ekipmanlar

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında bulunan mevcut deney düzenekleri ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında modifiye proktor, serbest basınç, CBR ve model yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, test numunelerinin iç yapısına (mikroyapı) ait yorumlar yapabilmek için SEM analizleri de gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri İnönü Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren “Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi”

tarafından gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerde kullanılan deney düzenekleri ve ekipmanlar bu başlık altında izah edilmiştir.

3.1.6.1 Modifiye Proktor Deneyi

Modifiye proktor deneyleri gerçekleştirilerek farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) puzolan ile güçlendirilmiş CDW'nin optimum sıvı içeriği (ω_{opt} , $\omega_{optAAÇ}$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca, alkali aktivatörün varlığının $\omega_{optAAÇ}$ ve γ_{kmaks} değerlerine etkisi de modifiye proktor deneyleri ile araştırılmıştır. Modifiye proktor deneyleri gerçekleştirilirken ASTM D1557-12 standartı dikkate alınmıştır.

Modifiye proktor deneyleri sırasında kullanılan bazı temel malzemeler Şekil 3.30'da gösterilmiş ve aşağıda sıralanmıştır:

- Numuneleri içerisinde sıkıştırmak için 152.5 mm iç çapında 116.6 mm etkili yüksekliğinde rijit metalden yapılmış silindirik mold (kalıp) ve molda uygun olan yüksekliği artırmak için kullanılan yaka,
- Temas çapı 50.76 mm, düşme yüksekliği 457.8 mm ve kütlesi 4532 g olan sıkıştırma amacı ile kullanılan tokmak,
- Normal ve hassas terazi, çeşitli spatulalar, çelik cetvel, çeşitli numune kapları, çeşitli tepsiler, çeşitli kürekler, numune çıkarıcı kriko, hilti (çok sert numuneleri çıkartmak için) ve su içeriğinin belirlenmesi için gerekli aletler.



Şekil 3.30. Modifiye proktor deneyinde kullanılan temel aletler

3.1.6.2 Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi ile farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) puzolan ile güçlendirilmiş CDW'nin optimum sıvı içeriğindeki (ω_{opt} , $\omega_{optAAÇ}$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki (γ_{kmaks}) serbest basınç mukavemetleri tespit edilmiştir. Farklı oranlarda katılan puzolanın ve alkali aktivatörün varlığının serbest basınç mukavemetine etkisi bu deneyler ile incelenmiştir. Numuneler hazırlanırken CDW'nin maksimum dane boyutu 20 mm olduğu için 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir moldlar kullanılmıştır. Deneyler için Arulrajah vd. (2016) ve Arulrajah vd. (2016b) tarafından önerilen ASTM D1633-17 ve ASTM D5102-09 standartları dikkate alınmıştır.

Serbest basınç deneyleri yapmak için numuneler hazırlanırken kullanılan bazı temel malzemeler Şekil 3.31'de gösterilmiş ve aşağıda sıralanmıştır:

- Numuneleri içinde sıkıştırmak için 100 mm iç çapında 200 mm etkili yüksekliğinde rijit metalden yapılmış silindirik mold (kalıp) ve molda uygun olan yüksekliği artırmak için kullanılan yaka,
- Mold içinde numuneleri sıkıştırmak için temas çapı 50.75 mm, düşme yüksekliği 458.1 mm ve kütlesi 4530 g olan tokmak,
- Normal ve hassas terazi, çeşitli spatulalar, çelik cetvel, çeşitli numune kapları, çeşitli tepsiler, çeşitli kürekler ve su içeriğinin belirlenmesi için gerekli aletler.



Şekil 3.31. Serbest basınç deneyinde kullanılan bazı temel aletler

Deneyleri gerçekleştirmek için düşük ve yüksek yük kapasiteli iki farklı yükleme sistemi kullanılmıştır. Her iki yükleme sistemi de belirlenen hızlarda (deplasman kontrollü) yük uygulamaktadır. İlk sistemin yük kapasitesi 50 kN olup, yük değerlerinin 50 kN değerini geçtiği durumlarda 600 kN kapasiteli sistem kullanılmıştır. Her iki sistemde de bir adet deplasman ölçer (LVDT) ile deplasman değerleri okunmuştur. 50 kN kapasiteli serbest basınç sistemi Şekil 3.32’de, 600 kN kapasiteli serbest basınç sistemi ise Şekil 3.33’te görülmektedir.



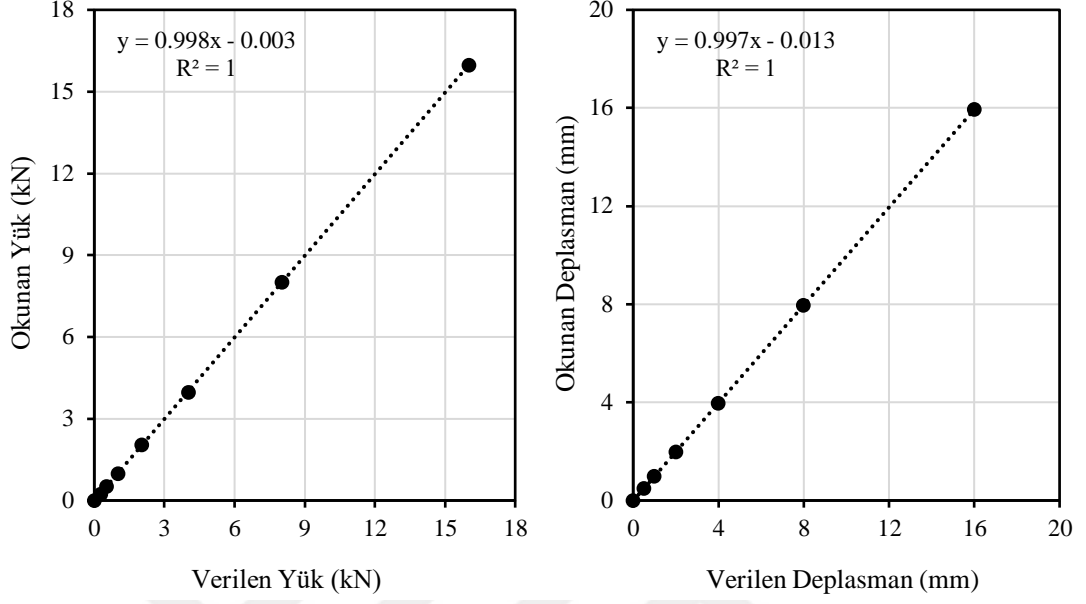
Şekil 3.32. Düşük yük kapasiteli serbest basınç sistemi



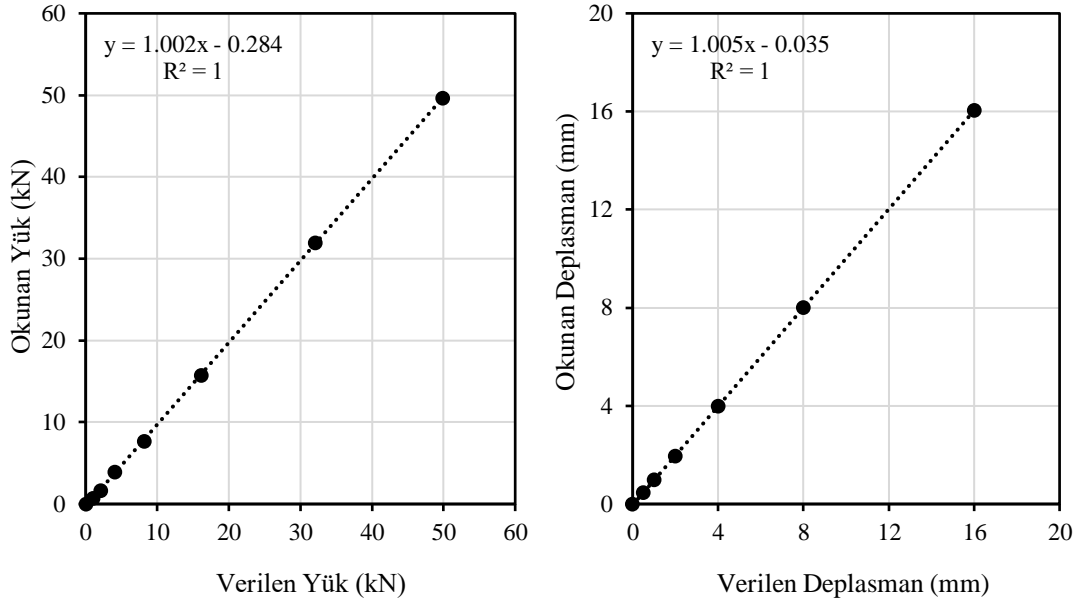
Şekil 3.33. Büyük yük kapasiteli serbest basınç sistemi

Her iki deney sisteminde bulunan yük hücrelerinin (load cell) ve deplasman ölçerlerin (LVDT) kalibrasyonları üretici firma tarafından yapılmış olup deneysel çalışmalardan önce kalibrasyonları kontrol edilmiştir. Düşük ve büyük yük kapasiteli

sistemlerin yük hücresine ve deplasman ölçere (LVDT) ait kalibrasyon eğrileri sırası ile Şekil 3.34'te ve Şekil 3.35'te sunulmuştur.



Şekil 3.34. Düşük yük kapasiteli serbest basınç sisteminin yük hücresi (solda) ve deplasman ölçer (mm) sensörlerinin kalibrasyon eğrileri



Şekil 3.35. Büyük yük kapasiteli serbest basınç sisteminin yük hücresi (solda) ve deplasman ölçer (mm) sensörlerinin kalibrasyon eğrileri

3.1.6.3 Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi

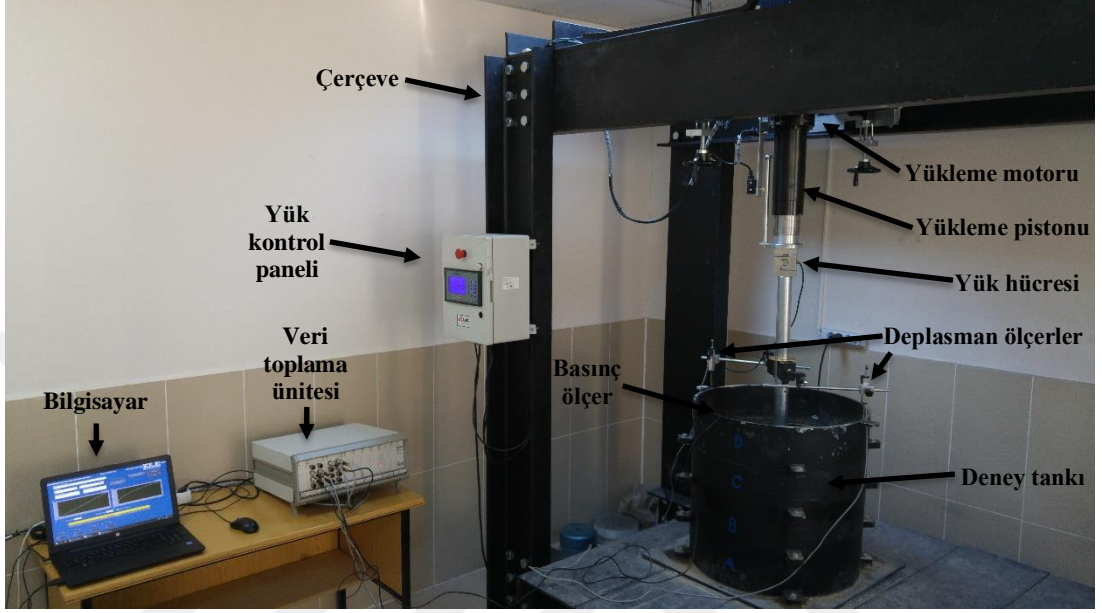
CBR deneyi ile farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) puzolan ile güçlendirilmiş CDW'nin optimum sıvı içeriğindeki (ω_{opt} , $\omega_{optAAÇ}$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki (γ_{kmaks}) yük-deformasyon davranışları ve CBR değerleri tespit edilmiştir. Farklı oranlarda katılan puzolanın ve alkali aktivatörün olup olmaması durumlarının yük-deformasyon davranışına ve CBR değerlerine etkisi yine CBR deneyleri ile araştırılmıştır. CBR deneyleri gerçekleştirilirken ASTM D1883-14 standartı dikkate alınmıştır. CBR deneyleri için numune hazırlanırken modifiye proktor deneyinde (Başlık 3.1.6.1) belirtilen aletler kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler CBR deneyine tabi tutulurken de serbest basınç deneyinde (Başlık 3.1.6.2) kullanılan yükleme sistemleri kullanılmıştır.

3.1.6.4 Model Yükleme Deneyi

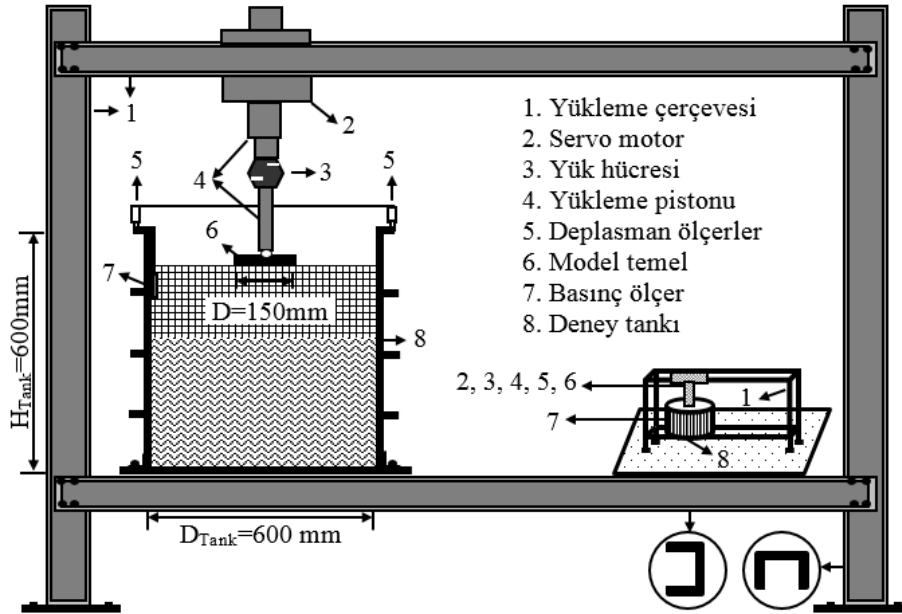
Model yükleme deneyleri ile zayıf zemin üzerinde bulunan hem güçlendirilmemiş hem de puzolan katkı ve geogrid ile güçlendirilmiş CDW ile oluşturulan dolguların yüzeyine yerleştirilmiş dairesel bir temelin yük deformasyon davranışı incelenmiştir. Model yükleme deneyleri, eksenel simetri koşulları hakim olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Model yükleme deney düzeneği aşağıda belirtilen kısımlardan oluşmaktadır:

- Rijit çelik NPU profillerden oluşturulmuş çerçeve,
- Yükleme çerçevesine üst kısmında bulunan yükleme motoru (servo motor),
- İçerisinde zemin ortamının oluşturulduğu rijit deney tankı,
- Deney sırasında yük datalarını ölçen yük hücresi (load cell),
- Deney sırasında deplasman değerlerini ölçen deplasman ölçerler (LVDT),
- Deney sırasında oluşan basıncı ölçen basınç ölçer (basınç transduseri),
- Tüm sensörlerden gelen dataları toplayan veri toplama ünitesi (data logger),
- Veri toplama ünitesindeki verilerin görüntülediği ve kaydedildiği bilgisayar.

Ayrıca model yükleme deneylerinde zeminin deney tankına yerleştirilebilmesi için çeşitli sıkıştırma ekipmanları kullanılmıştır. Model yükleme deney sisteminin genel görüntüsü ve şematik çizimi sırası ile Şekil 3.36 ve Şekil 3.37’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.36. Model yükleme deney sistemi genel görünümü



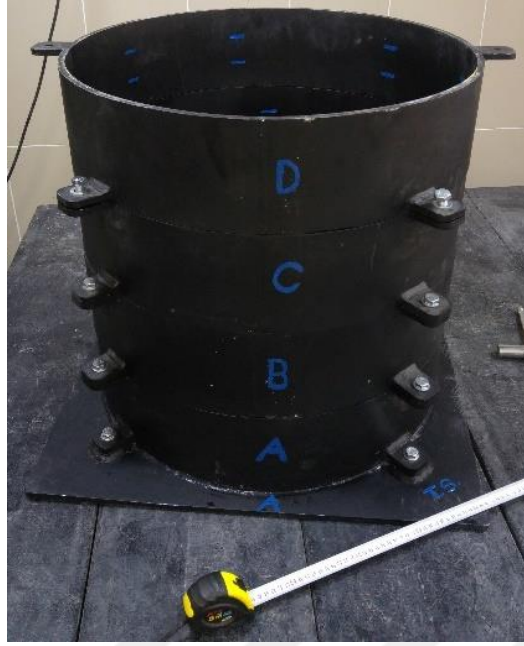
Şekil 3.37. Model yükleme deney düzeneğinin şematik çizimi

Yükleme çerçevesi 20 ton yüklemeye yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Yüklemeye çerçevesi rijit çelik NPU profillerin bulonlarla bağlanması ile imal edilmiştir. Yüklemeye motoru çelik çerçevenin üst kısmına monte edilmiştir. Yüklemeye motoru servo motor olup hızı kontrol (deplasman kontrollü) edilebilmektedir. Yüklemeye hızı yük kontrol panelinden 0-10 mm/dk aralığında istenen hız değerine ayarlanabilmektedir. Yüklemeye motoru ve yük kontrol paneli Şekil 3.38’de sunulmuştur.



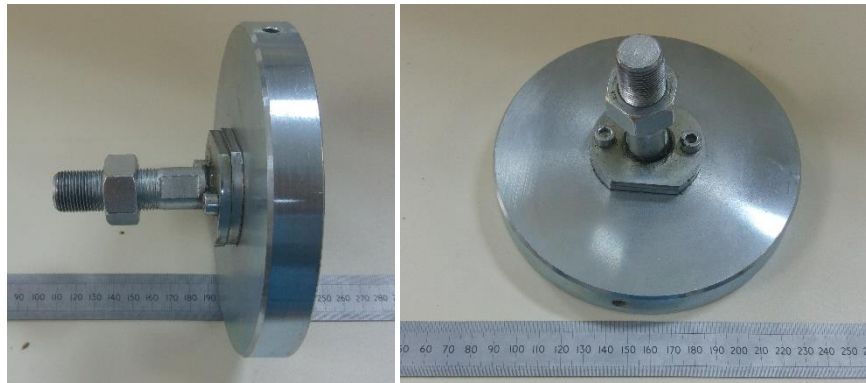
Şekil 3.38. Yüklemeye motoru (solda) ve yük kontrol paneli (sağda)

Rijit deney tankı, içerisinde zemin ortamı oluşturmak için kullanılmıştır. Rijit deney tankı rijit çelik malzemeden 600 mm çapında 600 mm yüksekliğinde imal edilmiştir. Rijit deney tankı 5 parça şeklinde imal edilmiş olup bulonlar ile birbirine monte edilmiştir. Rijit deney tankının parçaları, her biri 150 mm yüksekliğinde 600 mm çapında 4 adet silindir tank ile bu 4 adet silindir tankın altında bulunan alt plakadır. Rijit deney tankı parçalı şekilde imal edilerek zemin ortamı hazırlanırken ve tankın içi boşaltılırken kolaylık sağlanmıştır. Rijit deney tankının her bir elemanın et kalınlığı yaklaşık 10 mm’dir. Model yüklemeye deneylerinde, zemin tabakalarının deney tankına kontrollü bir şekilde yerleştirilebilmesi için deney tankının iç yüzeyi yüksekliği boyunca 50 mm aralıklarla işaretlenmiştir. Rijit deney tankı Şekil 3.39’da görüldüğü gibidir.



Şekil 3.39. Model yükleme deneyinde kullanılan rijit deney tankı

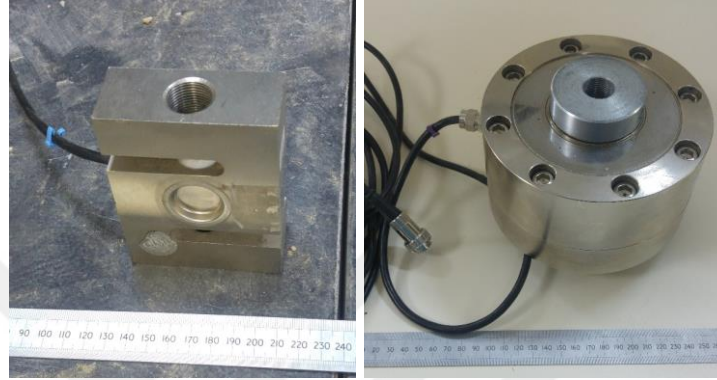
Model yükleme deneyleri kapsamında dolgu üzerinde dairesel temel kullanılarak yük-deformasyon davranışı araştırılmıştır. Model temelin çapı 150 mm, et kalınlığı ise 25 mm'dir. Yükleme esnasında yükün temel plakasına üniform olarak etkimesi ve temelin oturduğu yüzeyde düzgün bir şekilde ilerleyebilmesi için yük, temel oynar başlıklı olarak imal edilmiştir. Model temel Şekil 3.40'da görülmektedir.



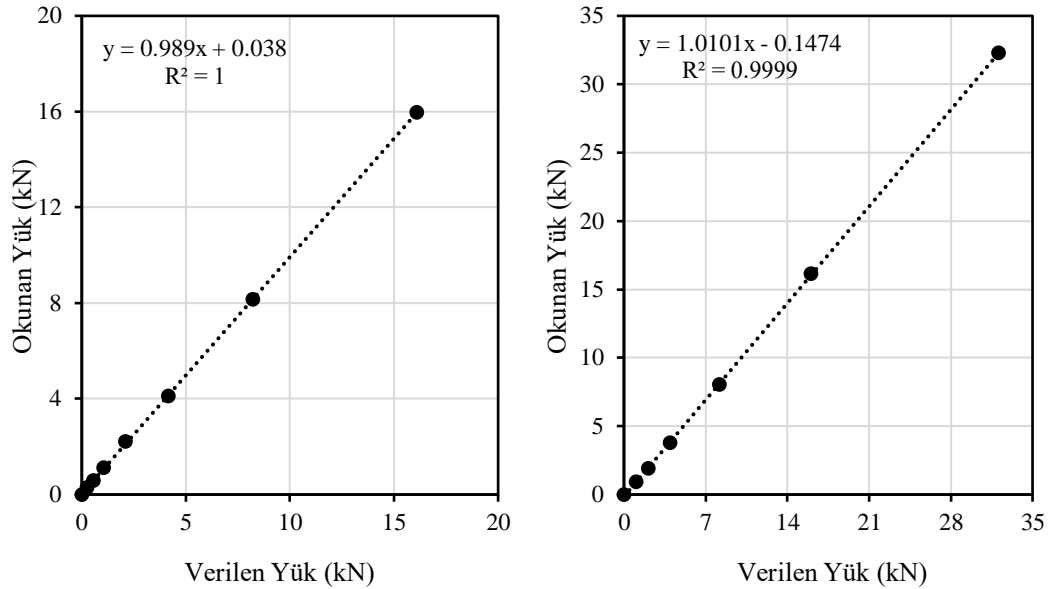
Şekil 3.40. Model yükleme deneyinde kullanılan model temel

Model yükleme deneylerinde, deneyler esnasında uygulanan yük değerlerini ölçebilmek için 50 kN ve 100 kN kapasiteli iki farklı yük hücresi kullanılmıştır. Deney süresince maksimum yük değerinin 50 kN'dan düşük olduğu deneylerde 50 kN

kapasiteli, büyük olduğu deneylerde 100 kN kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Deney esnasında yük değerleri yük hücresinden data logger cihazına oradan da bilgisayara aktarılarak deney sonuçlarına erişilmiştir. Yük hücrelerinin kalibrasyonu model yükleme sisteminin üreticisi tarafından yapılmış olup deneylerden önce kontrol edilmiştir. Yük hücrelerinin görüntüleri Şekil 3.41’de, yük hücrelerinin kalibrasyon eğrileri Şekil 3.42’de sunulmuştur.



Şekil 3.41. Model yükleme deneylerinde kullanılan düşük (solda) ve büyük (sağda) yük kapasiteli yük hücreleri



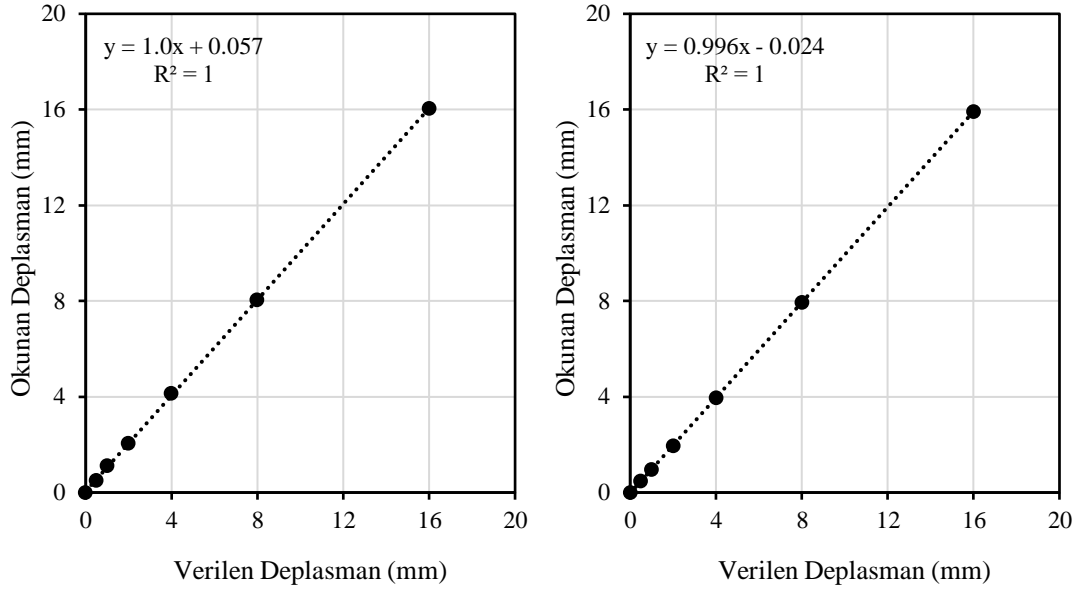
Şekil 3.42. Model yükleme deneylerinde kullanılan düşük (solda) ve büyük (sağda) yük kapasiteli yük hücrelerinin kalibrasyon eğrileri

Model yükleme deneylerinde, model temel plakasına uygulanan yükten dolayı model temel aşağı yönlü hareket edecektir. Model temelde deneyler sırasında oluşacak

deplasmanların ölçülebilmesi için 50mm kapasiteli iki adet deplasman ölçer (LVDT) kullanılmıştır. Deplasman ölçerler yüklem pistonuna mıknatıslı ayaklarla sabitlenerek pistonu bağlı temel deplasmanı ölçülmüştür. İki adet deplasman ölçer simetrik olarak yerleştirilerek ortalaması alınmıştır. Deplasman ölçere ait görüntü Şekil 3.43'te verilmiştir. Deplasman ölçerlerin kalibrasyonları model yüklem sisteminin üreticisi tarafından yapılmış olup deneylerden önce kontrol edilmiştir. Deplasman ölçerlerin kalibrasyon eğrileri Şekil 3.44'te gösterilmiştir.



Şekil 3.43. Model yüklem deneyinde kullanılan deplasman ölçer (LVDT)



Şekil 3.44. Model yüklem deneyinde kullanılan deplasman ölçerlerin kalibrasyon eğrileri

Model yükleme deneylerinde tankın iç yan yüzeyine yerleştirilen basınç oler yardımı ile deney tankının çapının sınır etkisi oluşturup oluşturmama durumu incelenmiştir. Bu yüzden 0.05-10 MPa aralığında okuma yapabilen basınç oler kullanılmıştır. Şekil 3.45'te basınç oler görülmektedir.



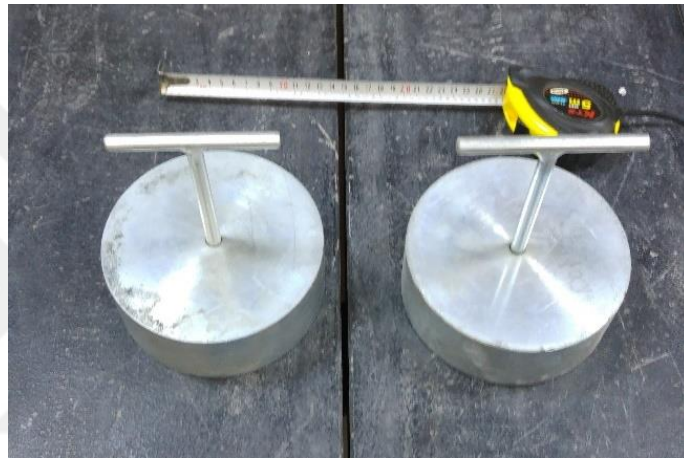
Şekil 3.45. Model yükleme deneylerinde kullanılan basınç oler

Model yükleme deneylerinde sensörlerden (yk hücresi, deplasman olerler ve basınç oler) gelen datalar veri toplama ünitesine (data logger) gelmiş, buraya gelen datalar ise bir yazılım ile bilgisayar ortamında sayısal değerlere dönüştürülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Model yükleme deneylerinde kullanılan veri toplama nitesi ve bilgisayar yazılımı Şekil 3.46'da grldğu gibidir.

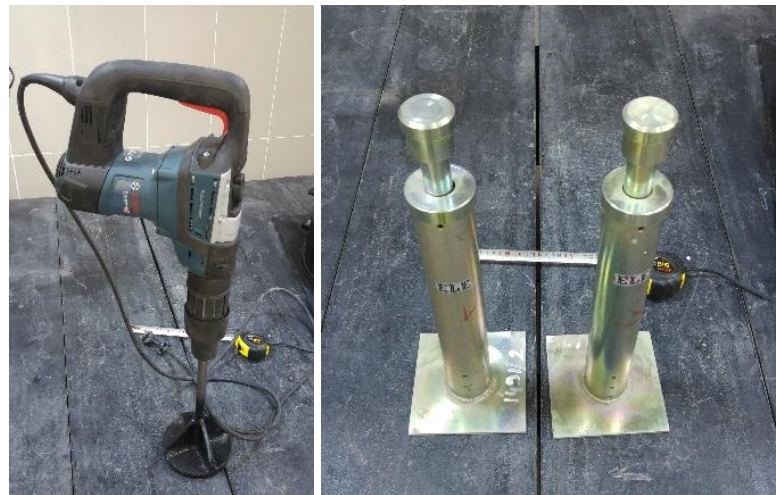


Şekil 3.46. Model yükleme deneylerinde kullanılan bilgisayar yazılımı ve veri toplama nitesi

Model yükleme deneylerinde rijit deney tankının içinde zemin ortamı oluşturmak için daha önceden belirlenen su içeriklerinde zemin numunesi hazırlanmış ve tabakalar halinde sıkıştırılmıştır. Model yükleme deneylerinde zayıf zemin ortamı oluşturmak için CBR deneylerinde kullanılan boşluk diski (tokmak) kullanılmıştır. Ayrıca, güçlendirilmemiş ve glendirilmif CDW ile dolgu oluşturmak için önce sıkıştırma tokmağı ile yüzey düzeltilmiş daha sonra titreşimli tokmak ile istenen sıklıkta sıkıştırılmıştır. Zayıf zeminler için kullanılan sıkıştırma ekipmanı (boşluk diski) Şekil 3.47’de, dolgu oluşturmak için kullanılan sıkıştırma ekipmanları (sıkıştırma tokmağı ve titreşimli tokmak) ise Şekil 3.48’de verilmiştir.



Şekil 3.47. Zayıf zeminleri sıkıştırmak için kullanılan sıkıştırma ekipmanı



Şekil 3.48. Dolgu oluşturmak için kullanılan sıkıştırma ekipmanları

3.2 Yöntem

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen modifiye proktor, serbest basınç, CBR ve model yükleme deneylerinin nasıl gerçekleştirildiği bu başlık altında anlatılmıştır. Ayrıca SEM analizlerinin nasıl gerçekleştirildiğinden de bahsedilmiştir.

3.2.1 Modifiye Proktor Deneylerinin Gerçekleştirilmesi

CDW içerisine farklı oranlarda katılan puzolanın ve alkali aktivatörün varlığının ω_{opt} , $\omega_{optAAÇ}$ ve γ_{kmaks} değerlerine etkisi modifiye proktor deneyleri ile araştırılmıştır. Modifiye proktor deneyleri gerçekleştirilirken ASTM D1557-12 standardı dikkate alınmıştır.

Deneylerde kullanılacak CDW numuneleri öncelikle etüvde kurutulmuştur (Şekil 3.49). Daha sonra her bir deney için 6000 gr CDW numunesi alınmıştır.



Şekil 3.49. Zemin numunelerinin deneylerden önce etüvde kurutulması

Puzolan eklenen numunelerde kütlece belirli oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) puzolan katkı eklenmiştir. Puzolan katkı olarak uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül ile yüksek fırın cürufunun kütlece yarı yarıya oranında karışımı (UY) eklenmiştir. Puzolan eklenen numuneler öncelikle kuru hali ile karıştırılarak eklenen sudan ya da alkali aktivatör çözeltisinden (AAÇ) dolayı topaklanma oluşması engellenmeye çalışılmıştır. Bu işlemden sonra kütlece yaklaşık olarak %5 oranında başlangıç deneyi için su ya da AAÇ eklenmiştir. Başlangıç su

içeriğinden sonra yaklaşık olarak %2-3 oranında su ya da AAÇ oranı artırılarak her bir modifiye proktor deneyi için toplam 5 adet sıkıştırma testi yapılmıştır. Su veya AAÇ ile karıştırılmış numuneler sıkıştırma işleminden önce hem iyice karıştırılmış (Şekil 3.50) hem de karıştırma işleminden sonra bir süre bekletilerek serbest haldeki suyun emiliminin tam ve homojen olarak gerçekleşmesi sağlanmaya çalışılmıştır (Arulrajah vd., 2015; Arulrajah vd., 2016a, Arulrajah vd., 2016b).



Şekil 3.50. Modifiye proktor deneyi için hazırlanan numunelerin karıştırılması

Deneylere başlamadan önce kullanılacak modifiye proktor moldunun yakasız olarak kütlesi ölçülmüştür. Ayrıca moldun etkili yüksekliği ve iç çapı kumpas ile belirlenerek moldun iç hacmi hesaplanmıştır (Şekil 3.51).



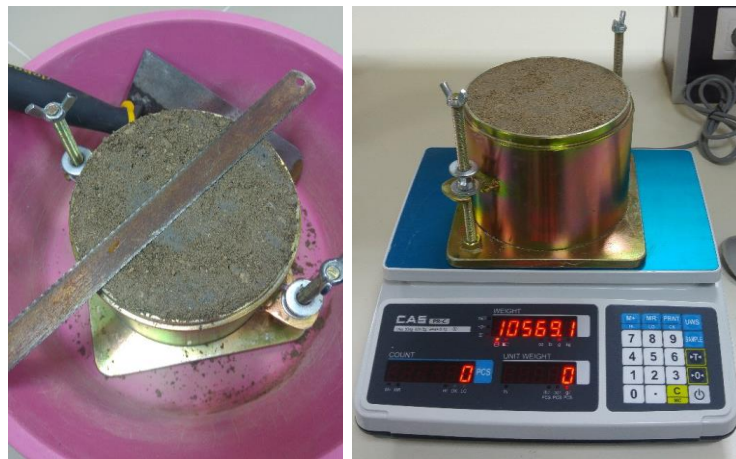
Şekil 3.51. Modifiye proktor moldunun boyutlarının belirlenmesi

Hazırlanıp bekletilen numuneler, modifiye proktor molduna (kalıbına) 5'er tabaka halinde yerleştirilerek her bir tabaka 4532 g kütlesindeki tokmağın 457.8 mm yüksekliğinden 56 kez düşürülmesiyle sıkıştırılmıştır (Şekil 3.52).



Şekil 3.52. Zemin numunesinin modifiye proktor molduna yerleştirilmesi ve sıkıştırılması

Sıkıştırma işlemi yapılmadan önce moldun yakası takılmıştır. Tüm tabakalara malzeme yerleştirilerek sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra moldun yakası çıkarılmış, kalıbın üst yüzeyinden fazla malzeme traşlanarak atılmış ve moldun üst yüzeyi düzeltilmiştir (Şekil 3.53). Daha sonra mold ile birlikte moldun içerisinde sıkıştırılmış numunenin kütlesi belirlenmiştir (Şekil 3.53).



Şekil 3.53. Modifiye proktor moldunun üst yüzeyinin düzeltilmesi ve kütleinin ölçülmesi

Kütlenin belirlenmesinden sonra moldun içerisindeki numune hidrolik numune çıkarıcı kullanılarak çıkarılmıştır. Çıkarılan numunenin altından, ortasından ve üstünden yaklaşık olarak 500 gr numune alınarak zeminin su içeriğini tespiti etmek için numaralandırılmış kaplara konulmuştur. Daha sonra bu kaplar etüve yerleştirilerek yaklaşık 110°C sıcaklıkta ($\pm 5^\circ\text{C}$) kurutulmuştur. Bu işlem adımları farklı su içerikleri için tekrarlanarak her bir deney için toplam 5 test gerçekleştirilmiştir.

AAÇ ile yapılan modifiye proktor deneylerinde su içeriği değerini belirlemenin maksimum birim hacim ağırlığının (γ_{kmax}) oluşmasını sağlayan optimum AAÇ oranının tespiti hakkında direkt olarak bir bilgi sağlamamıştır. Bu yüzden, bu deneylerde, etüv kurusu olarak alınan numune, su içeriği kaybı oluşmadan soğutulmuş, daha sonra hassas bir şekilde katılan AAÇ oranları not edilerek modifiye proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her deneyden sonra tüm numunenin su içeriği tespit edilmiş ve su ile sodyum hidroksit arasında oran-orantı kurularak katılan AAÇ oranları hesaplanmıştır. Hesaplanan ve katılan AAÇ oranları karşılaştırılarak AAÇ oranı doğru bir şekilde tespit edilmiştir.

Deney sonucunda, kompaksiyon eğrisini çizebilmek ve bu eğriden yararlanarak optimum sıvı içeriği (ω_{opt} , $\omega_{\text{optAAÇ}}$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) değerleri tespit etmek için her bir deney için öncelikle yaş birim hacim ağırlığı (γ_n) hesaplamak gerekmektedir. Bu amaçla aşağıdaki Denklem (3.1) kullanılmıştır.

$$\gamma_n = \frac{M_2 - M_1}{V_{\text{mold}}} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de, “ M_2 ”, mold ile birlikte numunenin kütlesi; “ M_1 ”, moldun kütlesi; “ V_{mold} ”, moldun hacmidir.

Deneyden sonra belirlenen su içeriği (ω) ile γ_n değerleri kullanılarak aşağıdaki Denklem (3.2) yardımı ile her bir deney numunesine ait kuru birim hacim ağırlık (γ_k) değerleri hesaplanmıştır.

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1 + \omega} \quad (3.2)$$

Modifiye proktor deneyleri sonucunda belirlenen γ_k (y ekseninde) ve ω (x ekseninde) değerleri ışığında kompaksiyon eğrisi çizilmiştir. Kompaksiyon eğrisinin tepe noktası x ve y eksenleri ile kesiştirilmiş, böylece optimum sıvı içeriği (ω_{opt} , $\omega_{optAAÇ}$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) değerleri tespit edilmiştir. Optimum sıvı içeriğinde test numuneleri hazırlanarak, kontrol amaçlı bir kez daha modifiye proktor deneyi gerçekleştirilmiş ve bulunan değerler doğrulanmıştır.

3.2.2 Serbest Basınç Deneylerinin Gerçekleştirilmesi

Serbest basınç deneyleri gerçekleştirilerek, farklı oranlarda katılan puzolanın ve AAÇ olup olmaması durumlarının serbest basınç mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Serbest basınç deneyi numuneleri optimum sıvı içeriğinde (ω_{opt} , $\omega_{optAAÇ}$) hazırlanmış olup deneye tabi tutulan her test örneği maksimum kuru birim hacim ağırlığındadır (γ_{kmaks}). Serbest basınç deneyleri için kullanılan ω_{opt} , $\omega_{optAAÇ}$ ve γ_{kmaks} değerleri modifiye proktor deneylerinden elde edilen değerlerdir. Deneyler için Arulrajah vd. (2016) ve Arulrajah vd. (2016b) tarafından önerilen ASTM D1633–17 ve ASTM D5102-09 standartları dikkate alınmıştır.

Puzolan eklenen numunelerde kütlece belirli oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) puzolan katkı eklenmiştir. Puzolan katkı olarak uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül ile yüksek fırın cürufunun kütlece yarı yarıya oranında hazırlanan karışımı (UY) eklenmiştir. Puzolan eklenen numuneler öncelikle kuru hali ile karıştırılarak eklenecek sudan ya da AAÇ'den dolayı topaklanma oluşması engellenmeye çalışılmıştır. Test numuneleri modifiye proktor sıklığında hazırlanmıştır. Diğer bir deyişle, serbest basınç test numunelerinin γ_{kmaks} değeri modifiye proktor deneylerinden hesaplanan değerdir. Bunun için γ_{kmaks} değeri ile serbest basınç moldunun hacmi çarpılarak mold içinde olması gereken kuru zemin kütlesi hesaplanmıştır. Şekil 3.54'te CDW'nin ve puzolan katkının tartılma işlemi görülmektedir.

Kütle hesabında çıkan değer yaklaşık 100 gram artırılarak deney esnasında oluşan kayıpların önlenmesi ve moldun üst yüzeyinin daha düzgün hale getirilmesi sağlanmıştır. Bu işlemten sonra numune içerisine modifiye proktor deneyleri ile bulunan ω_{opt} veya $\omega_{optAAÇ}$ değerinde su ya da AAÇ eklenmiştir. Su veya AAÇ katılan numuneler sıkıştırma işleminden önce hem iyice karıştırılmış hem de sıkıştırma işleminden sonra bir süre bekletilerek serbest haldeki suyun emiliminin tam ve

homojen olarak gerçekleşmesi sağlanmaya çalışılmıştır (Arulrajah vd., 2015; Arulrajah vd., 2016a, Arulrajah vd., 2016b). Şekil 3.55'te karıştırılmış ve deneye hazır hale getirilmiş numune görülmektedir.



Şekil 3.54. CDW'nin ve puzolan katkının kütlelerinin belirlenmesi



Şekil 3.55. Serbest basınç deneyi için hazırlanmış numune

Bekletilen numuneler serbest basınç moldunun içerisine modifiye proktor tokmağı kullanılarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırmadan önce serbest basınç moldunun iç çapı ve etkili yüksekliği kumpas ile ölçülmüştür (Şekil 3.56). Daha sonra moldun kütlesi belirlenmiştir. Mold içerisinden numunenin kolayca çıkarılabilmesi için moldun içerisi yağlanmıştır (Şekil 3.57). Moldun yakası da takıldıktan sonra, serbest basınç moldu zemin yerleştirme ve sıkıştırma işlemine hazır hale gelmiştir.

Sıkıştırma işleminde, moldun içerisinde bulunması gereken yaş numune (Denklem 3.2 kullanılarak) hesaplanmış, hesaplanan numune 8 eşit parçaya bölünerek

her bir parça mold içine ayrı ayrı yerleştirilerek sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sırasında numune kayıplarından etkilenmemek ve üst yüzeyin düzgünlüğünü daha iyi sağlayabilmek için her bir tabaka için hesaplanan yağ zemin miktarından yaklaşık 10 gr kadar fazla zemin molda konulmuştur. Bir sonraki tabaka sıkıştırılmadan önce, bir önceki sıkıştırılmış tabakanın yüzeyi çizilerek tabakalar arası kenetlenme sağlanmıştır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra moldun yakası çıkarılarak moldun üst yüzeyi traşlanarak düzeltilmiştir. Daha sonra mold içerisinden test numunesi çıkartılmıştır. Çıkartılan numunenin kütlesi hem deneyden önce hem de sonra belirlenerek ve deney sonunda numuneden yaklaşık 500 g kadar numune alınıp etüvde kurutularak, test numunelerinin γ_{kmaks} ile ω_{opt} ve $\omega_{optAAÇ}$ değerleri kontrol edilmiştir. Zeminin mold içerisinde sıkıştırılması ile deney sonunda moldun yakasının çıkartılarak üst yüzeyinin düzeltilmesine dair görüntüler Şekil 3.58’de görüldüğü gibidir. Mold içerisinden çıkartılmış serbest basınç test numunesine dair görüntü ise Şekil 3.59’da sunulmuştur.



Şekil 3.56. Serbest basınç moldunun boyutlarının belirlenmesi



Şekil 3.57. Serbest basınç moldunun yağlanması



Şekil 3.58. Zeminin mold içerisinde sıkıştırılması (soldaki) ve moldun deney sonunda yakası çıkartılarak üst yüzeyinin düzeltilmesi (sağdaki)



Şekil 3.59. Mold içerisinde çıkartılmış serbest basınç test numunesi

Mold içerisinde çıkarılan numuneler 3 kat su geçirmez poşet ile kaplanmıştır. Her bir kat arası nemlendirilmiştir. Numuneler nemli bir ortamda ve oda sıcaklığında (20 ± 2 °C), 7 ve 28 gün boyunca kür edilmiştir. Her bir deney numunesinden 3'er tane hazırlanıp deneye tabi tutularak deneysel hatalar önlenmeye çalışılmıştır. Kür işlemi tamamlanan numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur.

Hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirmek için düşük ve yüksek yük kapasiteli iki farklı yükleme sistemi kullanılmıştır. Her iki yükleme sistemi de belirlenen hızlarda (deplasman kontrollü) yük uygulamaktadır. Tüm deneylerde yükleme hızı 1 mm/dk'dır. İlk sistemin yük kapasitesi 50 kN olup, yük değerlerinin 50 kN değerini geçtiği durumlarda 600 kN kapasiteli sistem kullanılmıştır. Her iki sistemde de bir adet deplasman ölçer (LVDT) ile deplasman

değerleri okunmuştur. Düşük kapasiteli yükleme sisteminde yapılan bir serbest basınç deneyinin ilk ve son anlarının görüntüsü Şekil 3.60’da gösterilmiştir. Büyük kapasiteli yükleme sisteminde yapılan bir serbest basınç deneyinin ilk ve son anları ise Şekil 3.61’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.60. Düşük kapasiteli yükleme sisteminde yapılan bir serbest basınç deneyinin ilk ve son anı



Şekil 3.61. Büyük kapasiteli yükleme sisteminde yapılan bir serbest basınç deneyinin ilk ve son anı

Deneylerden sonra elde edilen veriler ile aksenal gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir. Gerilme (q) ve birim şekil değiştirme (ϵ) değerlerini hesaplamak için aşağıdaki Denklem (3.3), (3.4) ve (3.5) kullanılmıştır. Serbest basınç mukavemeti (q_{uUCS}) olarak ise genellikle maksimum aksenal gerilme (q) değeri seçilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} * 100 \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'te, “ ε ”, birim şekil değıştirme; “ ΔL ”, deney sırasında test numunesinde oluşan boy değışimi; “ L ”, test numunesinin başlangıç yüksekliğidir.

$$A_f = \frac{A_o}{1 - \frac{\varepsilon}{100}} \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'te, “ A_f ”, test numunesinin düzeltilmiş enkesit alanı; “ A_o ”, test numunesinin deney başlangıcındaki enkesit alanıdır.

$$q = \frac{P}{A_f} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki Denklem (3.5)'te, “ q ”, test numunesine etkiyen aksnel gerilme; “ P ”, test numunesine etkiyen aksnel yükür.

3.2.3 Kaliforniya Taşıma Oranı Deneylerinin Gerçekleştirilmesi

Farklı oranlarda katılan puzolanın ve alkali aktivatörün varlığının yük-deformasyon davranışına ve CBR değerlerine etkisi CBR deneyleri ile araştırılmıştır. CBR deneyi numuneleri optimum sıvı içeriğinde (ω_{opt} , ω_{optAAC}) hazırlanmış olup deneye tabi tutulan her test örneği maksimum kuru birim hacim ağırlığındadır (γ_{kmaks}). CBR deneyleri için kullanılan ω_{opt} , ω_{optAAC} ve γ_{kmaks} değerleri modifiye proktor deneylerinden elde edilen değerlerdir. CBR deneyleri gerçekleştirilirken ASTM D1883-14 standardı dikkate alınmıştır.

CBR deneyleri için test numuneleri hazırlanırken, etüv kurusu CDW soğutularak kullanılmıştır. Puzolan eklenen numunelerde kütlece belirli oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) puzolan katkı eklenmiştir. Puzolan katkı olarak uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül ile yüksek fırın cürufunun kütlece yarı yarıya oranında hazırlanan karışımı (UY) eklenmiştir. Puzolan eklenen numuneler öncelikle kuru hali ile karıştırılarak eklenecek sudan ya da AAC'den dolayı topaklanma oluşması engellenmeye çalışılmıştır.

CBR test numuneleri modifiye proktor sıklığında hazırlanmıştır. Diğer bir deyişle CBR test numunelerinin γ_{kmax} değeri modifiye proktor deneylerinden hesaplanan değerdir. Bunun için γ_{kmax} değeri ile CBR deneyinde kullanılan moldun hacmi çarpılarak mold içinde olması gereken kuru zemin kütlesi hesaplanmıştır. Kuru kütle hesabında çıkan değer yaklaşık 100 gram artırılarak deney esnasında oluşan kayıpların önlenmesi ve moldun üst yüzeyinin daha düzgün hale getirilmesi sağlanmıştır. Bu işlemden sonra numune içerisine modifiye proktor deneyleri ile bulunan ω_{opt} veya $\omega_{optAAÇ}$ oranında su ya da AAÇ eklenmiştir. Su veya AAÇ katılan numuneler sıkıştırma işleminden önce hem iyice karıştırılmış hem de karıştırma işleminden sonra bir süre bekletilerek serbest haldeki suyun emiliminin tam ve homojen olarak gerçekleşmesi sağlanmaya çalışılmıştır (Arulrajah vd., 2015; Arulrajah vd., 2016a, Arulrajah vd., 2016b).

Hazırlanan yaş karışımlar bir süre bekletildikten sonra CBR moldunun içine tabakalar halinde yerleştirilip sıkıştırılmıştır. CBR test numuneleri için yerleştirme ve sıkıştırma işlemi modifiye proktor deneyinde (Başlık 3.2.1) anlatıldığı şekilde gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işleminde, moldun içerisinde bulunması gereken yaş numune (Denklem 3.2 kullanılarak) hesaplanmış, hesaplanan numune 5 eşit parçaya bölünerek her bir parça mold içine ayrı ayrı yerleştirilerek sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sırasında numune kayıpları olacağından ve üst yüzeyin düzgünlüğünün daha iyi sağlanabilmesi için hesaplanan her bir tabaka için hesaplanan yaş zemin miktarından yaklaşık 10 gr kadar fazla zemin molda atılmıştır. Bir sonraki tabaka sıkıştırılmadan önce, bir önceki sıkıştırılmış tabakanın yüzeyi çizilerek tabakalar arası kenetlenme sağlanmıştır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra moldun yakası çıkarılarak moldun üst yüzeyi traşlanarak düzeltilmiştir. Daha sonra mold ve içerisindeki numunenin hem deneyden önce hem de sonra birlikte tartılmasıyla ve deney sonunda numuneden yaklaşık 500 g kadar numune alınıp etüvde kurutulmasıyla, CBR test numunelerinin γ_{kmax} ile ω_{opt} ve $\omega_{optAAÇ}$ değerleri kontrol edilmiştir.

Mold ve içerisindeki test numunesi ile birlikte 3 kat su geçirmez poşet ile kaplanmıştır. Her bir kat arası nemlendirilmiştir. Numuneler nemli bir ortamda ve oda sıcaklığında (20 ± 2 °C), 7 ve 28 gün boyunca kür edilmiştir. Her bir deney numunesinden 2'şer tane hazırlanıp deneye tabi tutularak deneysel hatalar önlenmeye çalışılmıştır.

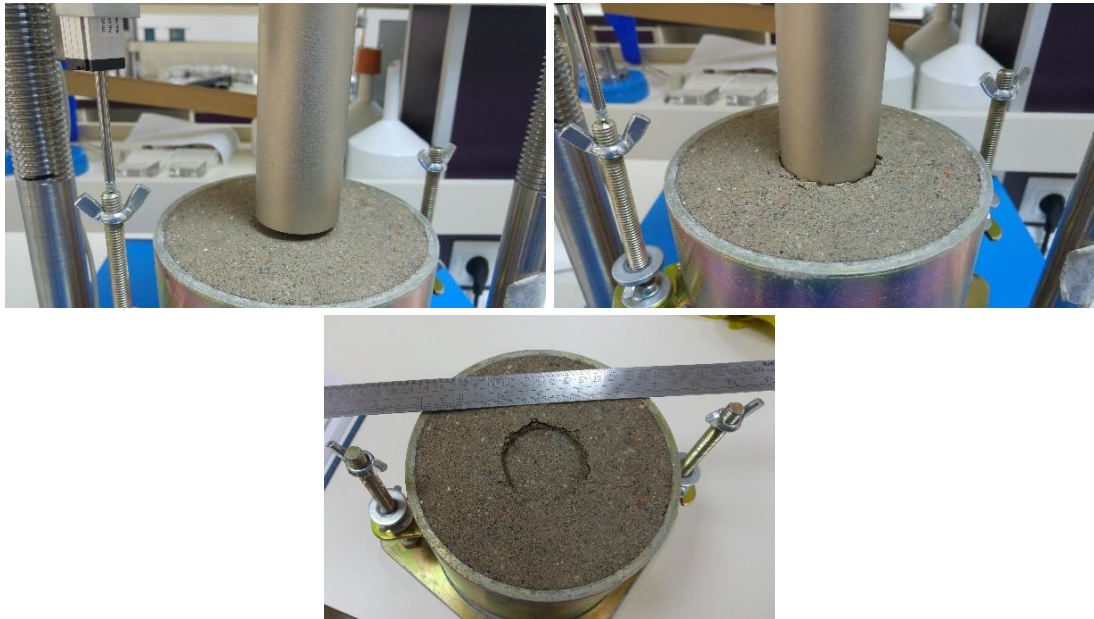
Hazırlanan test numuneleri CBR deneyine tabi tutulurken serbest basınç deneyinde (Başlık 3.2.2) kullanılan yükleme sistemleri kullanılmıştır. Her iki yükleme sistemi de belirlenen hızlarda (deplasman kontrollü) yük uygulamaktadır. Tüm deneylerde yükleme hızı 1.27 mm/dk'dır.

CBR deneyleri sonucunda elde edilen veriler ile yük-deformasyon grafikleri çizilmiştir. Ayrıca her deney için, 2.54 ve 5.08 mm'ye karşılık gelen CBR değerleri hesaplanmıştır. CBR değerlerini hesaplamak için aşağıdaki Denklem (3.6) kullanılmıştır.

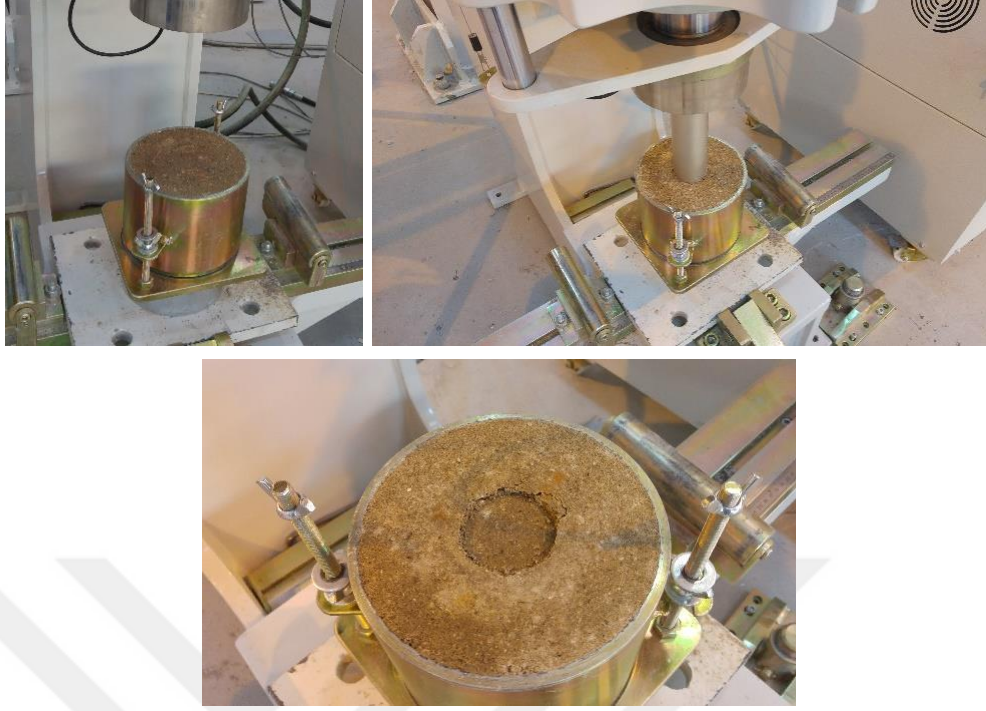
$$CBR = \frac{q_{CBR}}{q_{standart}} * 100 \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'da, "q_{CBR}", CBR deneyi sonucu oluşan yük-deformasyon eğrisinden 2.54 ve 5.08 mm'ye karşılık gelen düzeltilmiş gerilme değeri, "q_{standart}", ise 2.54 ve 5.08 mm'ye karşılık gelen standart gerilme değerleridir. Standart gerilme değerleri 2.54 ve 5.08 mm için sırasıyla 6.9 MPa ve 10.3 MPa'dır.

Düşük kapasiteli ve büyük kapasiteli yükleme sisteminde yapılan bir CBR deneyinin deneyden önce, deney anı ve deney sonu görüntüleri sırasıyla Şekil 3.62 ve Şekil 3.63'te görüldüğü gibidir.



Şekil 3.62. Düşük kapasiteli yükleme sisteminde yapılan bir CBR deneyi



Şekil 3.63. Büyük kapasiteli yükleme sisteminde yapılan bir CBR deneyi

3.2.4 SEM Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

SEM (Scanning Electron Microscope, Taramalı Elektron Mikroskobu) analizinde, yüksek enerjili elektronlar çok küçük bir alana (yüze) odaklanarak bu alanı taramaktadır. Elektron ışınının, alanı taramaya başlamasıyla, bu alandan yansıyan elektronlar anot vasıtası ile toplanmaktadır. Anottaki akım yüksek değerlere çekilir ve taranan elektron ışınları değiştirilir. Bu şekilde, taranan alanın, oldukça büyütülmüş görüntüsü oluşur. SEM analizinin ayırma gücü yaklaşık 10 nm değerindedir. Genellikle, test numuneleri önce vakumlanmakta, daha sonra numunelerden daha iyi görüntüler alabilmek amacıyla numune yüzeyi altın paladyum (Au-Pd) tozları ile kaplanmaktadır. Bu tez çalışması için gerçekleştirilen SEM analizlerinde LEO-EVO 40 adlı test cihazı kullanılmıştır

Serbest basınç ve CBR deneylerine tabi tutulmuş test numunelerinin içyapısına (mikroyapı) ait yorumlar yapabilmek için SEM analizleri yapılmıştır. SEM analizleri İnönü Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren “Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi” tarafından gerçekleştirilmiştir SEM analizi ile serbest basınç ve CBR deneyleri ile belirlenen en yüksek dayanım değerlerinin görüldüğü puzolan katkı

oranlarındaki (%5UK, %15UK-AAÇ, %20YFC, %20YFC-AAÇ, %15UY, %20UY-AAÇ) test numuneleri ile CDW ve CDW-AAÇ test numunelerinin içyapısına ait gözlemler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca UK, YFC ve UY numuneleri de toz halinde SEM analizine tabi tutulmuştur.

3.2.5 Model Yükleme Deneylerinin Gerçekleştirilmesi

Model yükleme deneylerinde, deneyin gerçekleştirilmesi için yapılan işlemler aşağıda sıralanmıştır.

- Araziden getirilen kohezyonlu zemin ile CDW malzemeleri etüvde kurutulmuştur.
- Etüvden çıkarılan kohezyonlu zemin yaklaşık 20 kg'lık kısımlara ayrılmıştır. Düşük CBR değeri elde edebilmek için, su içeriği %46 olacak şekilde su katılmıştır. Bir karıştırıcı yardımıyla su ile kohezyonlu zemin iyice karıştırılmıştır. Su ile kohezyonlu zemin karışımı, bir gün boyunca oda sıcaklığında ve nemli bir ortamda bekletilmiştir. Daha sonra su içeriğini kontrol etmek için numuneler alınmıştır. Kohezyonlu zeminde istenen su içeriği sağlanana kadar su ya da kuru haldeki kohezyonlu zemin örneği karışıma katılarak işlemler tekrarlanmıştır.
- Etüvden çıkarılan CDW 20'şer kg'lık kısımlara ayrılmıştır. Modifiye proktor deneyi ile bulunan optimum su içeriğine getirmek için etüv kurusu malzeme su ile karıştırılmıştır. Bir gün boyunca oda sıcaklığında ve nemli bir ortamda karışım bekletilmiştir. Karışımından su içeriği örnekleri alınarak optimum su içeriğinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir.
- Puzolan ile güçlendirilmiş deneylerde bekletmenin numunenin sertleşmesine neden olacağından, puzolan ve CDW etüv kurusu hali ile deneyden yaklaşık 2 saat önce hazırlanmıştır. Etüv kurusu CDW'ye, etüv kurusu puzolan kuru halde eklenip karıştırılarak topaklanma olayı engellenmeye çalışılmıştır. Daha sonra bu kuru karışıma AAÇ eklenerek iyice karıştırılmış ve yaklaşık 2 saat bekletilmiştir. Bekleyen numuneden su içeriği örnekleri alınarak deneyin uygun koşullarda gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilmiştir. Şekil 3.64'te etüv kurusu

numunelerin kütlelerinin belirlenmesi, Şekil 3.65'te numunelerin kuru halde karıştırılarak AAÇ eklenmesi, Şekil 3.66'da kuru haldeki numuneler ile AAÇ'nin karıştırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.64. Etüv kuru numunelerin kütlelerinin belirlenmesi



Şekil 3.65. Etüv kuru numunelerin karıştırılması ve AAÇ eklenmesi



Şekil 3.66. Etüv kuru numunelerin AAÇ ile karıştırılması

- Hazırlanan tüm zemin örnekleri rijit deney tankına yerleştirilmeden önce tankın içerisi yağlanmıştır (Şekil 3.67). Hazırlanan kohezyonlu zemin kasaya 5 cm'lik tabakalar halinde yerleştirilmiştir. Kasaya yerleştirilen kohezyonlu zeminin hedeflenen su içeriği (ω) %46, doğal birim hacim ağırlığı (γ_n) 17.45 kN/m³, drenajsız kayma mukavemeti (c_u) 17.99 kPa ve CBR değeri %1.22'dir. Bu değerlerin sağlanıp sağlanılmadığı kontrol edilerek grafiğe dökülmüş ve Başlık 4.4'de sunulmuştur.



Şekil 3.67. Rijit deney tankının yağlanması

- Kohezyonlu zemin ile rijit deney tankı içerisinde tabakalar oluşturulurken her tabaka için kütle kontrolü, su içeriği kontrolü ve mukavemet kontrolü yapılmıştır. Bunun için, önce yağ kohezyonlu zemin tartılarak her tabaka için gerekli zemin miktarı ayarlanmıştır (kütle kontrolü). Daha sonra her tabaka için ayrılan zeminin farklı noktalarından deneyden önce su içeriği örnekleri (su içeriği kontrolü) alınmıştır (Şekil 3.68).
- Bu işlemlerden sonra bir tabaka için hesaplanan kütlede zemin kasaya yerleştirilmiş ve tokmakla (boşluk silindiri) sıkıştırılmıştır (Şekil 3.69). Sıkıştırılan tabakanın kalınlığı kontrol edilerek hedeflenen birim hacim ağırlık sağlanmaya çalışılmıştır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra tabakanın üst yüzeyinde çeşitli noktalarda vane ve penetrometre deneyleri (mukavemet kontrolü) gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.70).



Şekil 3.68. Rijit deney tankı için gerekli yaş kohezyonlu zemin kütleinin ayarlanması (solda) ve su içeriği kontrolü (sağda)



Şekil 3.69. Kohezyonlu zemin tabakalarının sıkıştırılması



Şekil 3.70. Kohezyonlu zemin tabakasının sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra vane (solda) ve penetrometre (sağda) deneylerinin gerçekleştirilmesi

- Sıkıştırılan tabakanın üzerine gelecek bir diğer tabakanın daha iyi kenetlenmesi için son tabakanın yüzeyi çizilmiştir (Şekil 3.71). En son tabakanın yüzeyi düzeltilmiş ve yüzeyin düzgünlüğü su terazisi kullanılarak kontrol edilmiştir (Şekil 3.72). Belirtilen bu işlemler tekrar edilerek kohezyonlu zemin kontrollü bir şekilde tabakalar halinde istenilen yüksekliğe kadar rijit deney tankına yerleştirilmiştir. Böylece zayıf zemin ortamının oluşturulma işlemi tamamlanmıştır. Zayıf zemin tabakasının toplam yüksekliği 350 mm'dir.



Şekil 3.71. Tabakanın bir sonraki tabaka ile kenetlenmesi için çizilmesi



Şekil 3.72. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra kohezyonlu zemin yüzeyinin düzgünlüğünün kontrol edilmesi

- Kohezyonlu zemin ile oluşturulan zayıf zemin tabakası üzerinde herhangi bir dolgu tabakası olmadan model yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Zayıf zemin tabakası üzerinde gerçekleştirilen model yükleme deneylerinde 150 mm, 100 mm ve 50 mm çapında olmak üzere üç farklı dairesel temel kullanılmıştır. Model temeller rijit deney tankının tam ortasına konumlandırılmıştır. Yükleme hızı tüm model deneylerde 1 mm/dk'dır.
- Kohezyonlu zemin kullanılarak oluşturulan zayıf zemin ortamı üzerine, optimum su içeriğinde hazırlanan CDW ya da puzolan katkılı CDW malzemeleri kullanılarak dolgu tabakası oluşturulmuştur. Bu malzemeler rijit deney tankına 5 cm'lik tabakalar halinde maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri sağlanacak şekilde sıkıştırılmıştır. Tabakalar oluşturulurken her tabaka için kütle ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Bunun için, CDW ve puzolan katkı tartılarak her tabaka için gerekli kuru malzeme miktarı tespit edilmiştir (kütle kontrolü). Güçlendirmesiz CDW dolguları oluşturulurken sadece CDW, puzolan ile güçlendirmeli dolgular oluşturulurken puzolan ve CDW birlikte kullanılmıştır. Puzolan ile güçlendirmeli deneylerde CDW içerisine, kütlece belirlenen oranda puzolan katkı eklenmiştir. Puzolan katkı ve miktarı olarak serbest basınç ve CBR deneyleri sonucu en iyi performansın görüldüğü katkı ve oranı seçilmiştir. Daha sonra kuru malzeme karışımı (CDW ya da puzolan katkılı CDW) içerisine optimum su içeriği miktarı kadar su ya da AAÇ eklenmiştir. Su ya da AAÇ eklenen kuru malzeme karıştırıldıktan sonra, her tabaka için karışımın farklı noktalarından su içeriği örnekleri (su içeriği kontrolü) alınmıştır. Daha sonra tek bir tabaka için kütlesi belirlenen dolgu malzemesi kasaya yerleştirilerek sıkıştırma tokmağı ve titreşimli tokmak kullanılarak sıkıştırılmıştır (Şekil 3.73). Her bir tabakanın sıkıştırma işleminden sonra sıkışmış dolgu tabakasının kalınlığı kontrol edilerek istenen birim hacim ağırlığı değerinin oluşması sağlanmıştır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra deney tabakası hazırlandıktan sonra, dolgu yüzeyinin düzgün olup olmadığı su terazisi yardımıyla kontrol edilmiştir. Bu işlemler tekrar edilerek tabaka tabaka istenilen kalınlıkta dolgu ortamı oluşturulmuştur.



Şekil 3.73. Dolgu tabakalarının sıkıştırılması işlemleri

- Hem dolgu ile zayıf zeminin birbirine karışmasını engellemek hem de geotekstil varlığının taşıma kapasitesine etkisini incelemek için, zayıf zemin üzerine dolgu inşa edilirken zayıf zemin ile dolgu arasında ayırma amacıyla geotekstil yerleştirilmiştir (Şekil 3.74).



Şekil 3.74. Geotekstil yerleştirilmesi ve üzerine dolgu malzemesinin dökülmesi

- Ayrıca, dolgu içerisinde geogrid kullanımının taşıma kapasitesine etkisini incelemek için zayıf zemin üzerinde inşa edilen dolgunun içerisine geogrid yerleştirilmiştir (Şekil 3.75). Geogrid yerleştirilmiş dolgular oluşturulurken, geogridin yerleştirileceği tabakaya kadar donatısız deneylerdeki gibi dolgu malzemesi yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Geogridin yerleştirileceği tabaka oluşturulurken geogridin tabaka içerisindeki konumuna kadar malzeme yerleştirilip

sıkıştırılmadan yüzeyi düzenlenmiş, sonra geogrid yerleştirilmiş, daha sonra geogridin üzerinde olması gereken malzeme yerleştirilmiş ve tabaka bu işlemlerden sonra sıkıştırılmıştır. Böylece geogridin kenetlenme etkinliği arttırılmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.75. Geogridin yerleştirilmesi ve üzerine dolgu malzemesinin dökülmesi

- Deneysel kesit hazırlandıktan sonra, rijit deney tankı 3 kat su geçirmez poşet ile kaplanmıştır. Her bir kat arası nemlendirilmiştir. 7 günlük kuru süresinden sonra model yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kuru süresi tamamlandıktan sonra rijit deney tankının tam ortasına 150 mm çapında rijit dairesel model temel yerleştirilmiş ve model yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı tüm model deneylerde 1 mm/dk'dır.
- Ayrıca, dolgular üzerinde model yükleme deneyi yapılırken basınç ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.76). Rijit model tankın kenarlarının sınır etkisi oluşturup oluşturmadığı böylece kontrol edilmiştir. Deneyler sırasında basınç ölçer yardımı ile ölçülen gerilme değerleri çok düşük olduğundan (ölçülen maksimum değer yükleme sırasında oluşan gerilme değerinin yaklaşık %0.6'sı kadar) sınır etkisi oluşmadığı sonucuna varılmıştır.

Model yükleme deneyleri sonunda ölçüm sensörleri vasıtasıyla önce veri toplama ünitesine ardından bilgisayara aktarılan deplasman, yük ve basınç değerleri bilgisayar ortamında kayıt edilmiştir. Veriler kaydedildikten sonra rijit deney tankının içerisinde bulunan dolgu tabakası ve kohezyonlu zemin hilti yardımı ile çıkartılarak

deney tankı bir sonraki deney için hazırlanmıştır. Kasadan çıkartılan zeminlerden su içeriği örnekleri alınarak su içeriği kontrolü yapılmıştır. Çıkartılan dolgu malzemeleri atılmış ve yeni deneyler için dolgu malzemesi tekrar hazırlanmıştır. Çıkartılan kohezyonlu zeminin ise su içeriği ve mukavemet değerleri kontrol edilerek tekrar karıştırılarak kullanılmıştır. Tüm bu işlemler bütün deneylerde tekrar edilmiştir.



Şekil 3.76. Basınç ölçerin dolgu içerisine yerleştirilmesi

Dolgu olmadan sadece zayıf zemin ortamı üzerinde yapılan model yükleme deneyinden sonra oluşan görüntü Şekil 3.77’de, dolgu üzerinde yapılan model yükleme deneyinden sonra oluşan görüntü ise Şekil 3.78’de verilmiştir.



Şekil 3.77. Zayıf zemin ortamı üzerinde yapılan model yükleme deneyinden sonra oluşan görüntü



Şekil 3.78. Dolgu üzerinde yapılan model yükleme deneyinden sonra oluşan görüntü

3.2.6 Deneysel Çalışmaların Programları

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen modifiye proktor, serbest basınç ve CBR deneylerine ait deneysel çalışma programı benzerdir. Tek fark serbest basınç ve CBR deneylerinde 7 ve 28 günlük kür sürelerinin olmasıdır.

Modifiye proktor deneylerine ait çalışma programı Çizelge 3.9'da görülürken serbest basınç ve CBR deneylerine ait çalışma programı ise Çizelge 3.10'da sunulmuştur. Deneyler Seri A, B, C, D, E, F, G, H olmak üzere 8 farklı seriye ayrılmıştır. Seri A deneyinde CDW, Seri B deneyinde AAÇ katkılı CDW, Seri C deneylerinde uçucu kül (UK) katkılı CDW, Seri D deneylerinde yüksek fırın cürufu (YFC) katkılı CDW, Seri E deneylerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun kütlece yarı yarıya oranda karışımı (UY) eklenmiş CDW, Seri F deneylerinde AAÇ eklenmiş UK katkılı CDW, Seri G deneylerinde AAÇ eklenmiş YFC katkılı CDW, Seri H deneylerinde AAÇ eklenmiş UY katkılı CDW üzerinde modifiye proktor, serbest basınç ve CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç deneylerinde her bir deney 3'er tane ve CBR deneylerinde ise her bir deney 2'şer tane gerçekleştirilerek deneysel hataların önüne geçilmeye çalışılmıştır. Ayrıca serbest basınç ve CBR deneylerinde her bir deneyin hem 7 günlük hem de 28 günlük kür süreleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç deneylerinde toplamda 228 tane deney, CBR deneylerinde ise toplamda 152 tane deney gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.9. Modifiye proktor deneylerine ait deneysel çalışma programı

Seri No	Deney No	Puzolan Tipi	Puzolan Oranı	AAÇ Varlığı
Seri A	1	-	-	-
Seri B	2	-	-	VAR
SERİ C	3	UK	%5	-
	4		%10	
	5		%15	
	6		%20	
	7		%25	
	8		%30	
SERİ D	9	YFC	%5	-
	10		%10	
	11		%15	
	12		%20	
	13		%25	
	14		%30	
SERİ E	15	UY	%5	-
	16		%10	
	17		%15	
	18		%20	
	19		%25	
	20		%30	
SERİ F	21	UK	%5	VAR
	22		%10	
	23		%15	
	24		%20	
	25		%25	
	26		%30	
SERİ G	27	YFC	%5	VAR
	28		%10	
	29		%15	
	30		%20	
	31		%25	
	32		%30	
SERİ H	33	UY	%5	VAR
	34		%10	
	35		%15	
	36		%20	
	37		%25	
	38		%30	

Çizelge 3.10. Serbest basınç ve CBR deneylerine ait deneysel çalışma programı

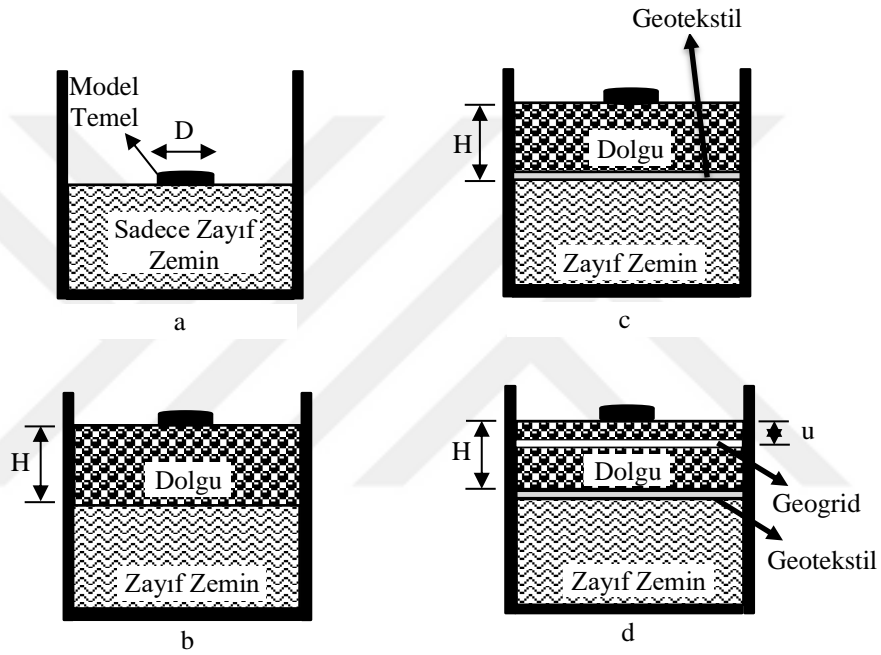
Seri No	Deney No	Puzolan Tipi	Puzolan Oranı	AAÇ Varlığı	Kür Süresi
Seri A	1	-	-	-	7 ve 28 gün
Seri B	2	-	-	VAR	
SERİ C	3	UK	%5	-	
	4		%10		
	5		%15		
	6		%20		
	7		%25		
	8		%30		
SERİ D	9	YFC	%5	-	
	10		%10		
	11		%15		
	12		%20		
	13		%25		
	14		%30		
SERİ E	15	UY	%5	-	
	16		%10		
	17		%15		
	18		%20		
	19		%25		
	20		%30		
SERİ F	21	UK	%5	VAR	
	22		%10		
	23		%15		
	24		%20		
	25		%25		
	26		%30		
SERİ G	27	YFC	%5	VAR	
	28		%10		
	29		%15		
	30		%20		
	31		%25		
	32		%30		
SERİ H	33	UY	%5	VAR	
	34		%10		
	35		%15		
	36		%20		
	37		%25		
	38		%30		

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen model yükleme deneylerine ait deneysel çalışma programı Çizelge 3.11’de gösterilmiştir. Deneyler Seri I, II, III, IV, V ve VI olmak üzere 6 farklı seriye ayrılmıştır. Seri I deneylerinde sadece zayıf zeminin, Seri II deneylerinde ise zayıf zemin üzerinde farklı yüksekliklerde inşa edilen CDW dolgularının yük-deformasyon davranışı incelenmiştir. Seri III deneylerinde zayıf zemin ile farklı yüksekliklerde inşa edilen CDW dolguları arasına ayırma amacıyla geotekstil yerleştirilerek geotekstilin yük-deformasyon davranışına etkisi araştırılmıştır. Seri IV, V ve VI deneylerinde de geotekstil ayırma amacıyla deneylerde kullanılmıştır. Seri IV deneylerinde zayıf zemin üzerinde farklı yüksekliklerde AAÇ eklenmiş puzolan katkılı CDW dolgularının yük-deformasyon davranışı incelenmiştir. Seri V deneylerinde zayıf zemin üzerinde farklı yüksekliklerde CDW dolguları geogrid ile güçlendirilerek geogridin yük-deformasyon davranışına etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Seri VI deneylerinde zayıf zemin üzerinde farklı yüksekliklerde AAÇ eklenmiş puzolan katkılı CDW dolguları geogrid ile güçlendirilerek geogridin yük-deformasyon davranışına etkisi araştırılmıştır.

Çizelge 3.11. Model yükleme deneylerine ait deneysel çalışma programı

Seri No	Deney No	Dolgu Varlığı	Puzolan Varlığı	AAÇ Varlığı	Geotekstilin Varlığı	Geogridin Varlığı	Temel Çapı (D) (mm)	Tabaka Yüksekliği (H) (mm)
Seri I	1	-	-	-	-	-	50	-
	2						100	-
	3						150	-
Seri II	4	CDW	-	-	-	-	150	50
	5						150	100
	6						150	150
Seri III	7	CDW	-	-	VAR	-	150	50
	8						150	100
	9						150	150
Seri IV	10	CDW	VAR	VAR	VAR	-	150	50
	11						150	100
	12						150	150
Seri V	13	CDW	-	-	VAR	VAR	150	50
	14						150	100
	15						150	150
Seri VI	16	CDW	VAR	VAR	VAR	VAR	150	50
	17						150	100
	18						150	150

Model yükleme deneyleri kapsamında toplam 18 adet deney gerçekleştirilmiştir. Tüm deney serilerinde zayıf zeminin yüksekliği 350 mm'dir. Tüm model deneyler oda sıcaklığında ve hazırlanan test kesitinde nem kaybı olmayacak şekilde 7 günlük kür süresi sonunda yapılmıştır. Model yükleme deneyleri kapsamında araştırılan parametrelerin kesit görüntüleri Şekil 3.79'da verilmiştir. Şekil 3.79'da "a" kesiti Seri I, "b" kesiti Seri II, "c" kesiti Seri III ve Seri IV, "d" kesiti ise Seri V ve Seri VI deneylerine ait görüntüleridir. Kesit görüntülerinde "D", temel çapını, "H", dolgu yüksekliğini, "u", geogridin yerleştirilme derinliğini temsil etmektedir.



Şekil 3.79. Model yükleme deneylerinde deney serilerine ait kesit görüntüleri

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Puzolan katkıların, alkali aktivatör çözeltilisinin ve geogridin CDW üzerine etkisinin araştırıldığı bu tez çalışması kapsamında 4 ana deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler modifiye proktor, serbest basınç, CBR ve model yükleme deneyleridir. Ayrıca test numunelerinin içyapısına (mikroyapı) ait yorumlar yapabilmek için SEM analizleri yapılmıştır. Puzolan katkı olarak UK, YFC ve UY kullanılmıştır. Bu puzolan katkıları, modifiye proktor, serbest basınç ve CBR deneylerinde, CDW içerisine, CDW'nin kütlece %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında katılmıştır. Öncelikle su katılarak deneyler yapılmış daha sonra AAC eklenerek AAC'nin varlığının etkisi araştırılmıştır. Model yükleme deneylerinde ise zayıf zemin üzerindeki güçlendirilmemiş CDW dolgularının ve en efektif oranda puzolan katkı eklenmiş CDW dolgularının yük deformasyon davranışı incelenmiştir. Model yükleme deneylerinde ayrıca bu dolgular içerisine geogrid yerleştirmenin taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir. Bu başlık altında, gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait bulgular sunularak deneysel çalışmalardan elde edilen bulguların değerlendirilmesi yapılmıştır.

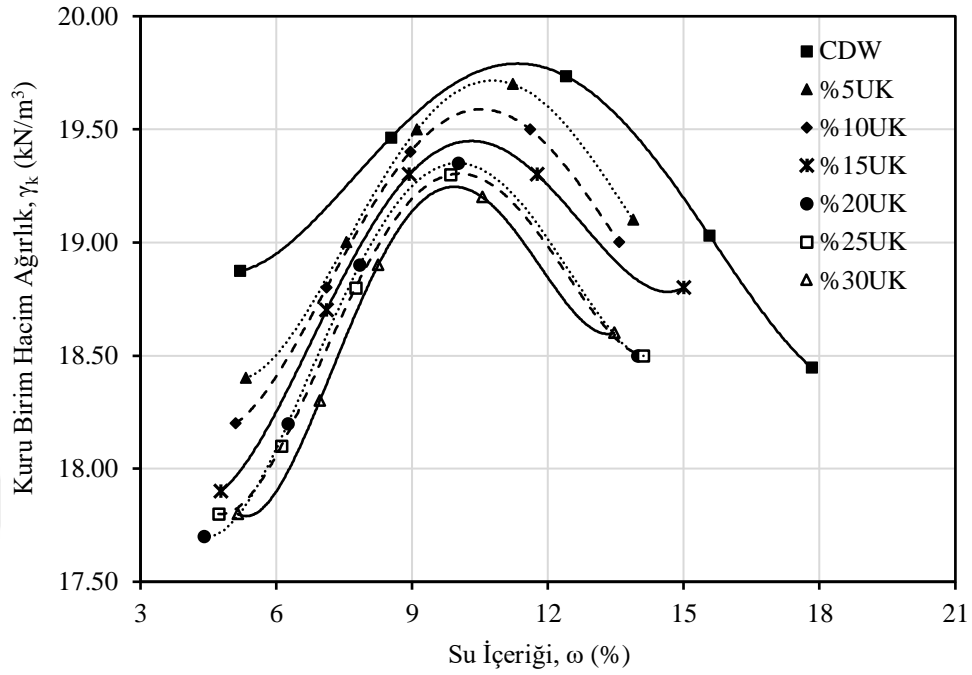
4.1 Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulguların Değerlendirilmesi

Modifiye proktor deneyleri ile farklı oranlardaki puzolan katkıların ve AAC'nin varlığının optimum sıvı içeriğine (ω_{opt} ve ω_{optAAC}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığına (γ_{kmaks}) etkisi değerlendirilmiştir.

4.1.1 UK Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UK katılmış CDW numunelerinin su ile yapılan deneylerine ait su içeriği (ω)-kuru birim hacim ağırlık (γ_k) eğrileri (kompaksiyon eğrileri) Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Şekil 4.1'de Seri A ve Seri C deneyleri birlikte sunularak değerlendirilmiştir. Kompaksiyon eğrilerinin tepe noktalarından tespit edilen optimum su içerikleri (ω_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmaks}) Çizelge 4.1'de görüldüğü gibidir. Su ile yapılan UK katkılı modifiye proktor deney sonuçları incelendiğinde, uçucu kül oranı arttıkça genel itibari ile hem ω_{opt} hem de γ_{kmaks} değerinin azaldığı görülmektedir. Uçucu külün su emme potansiyeli CDW'ye göre daha düşük olduğundan ω_{opt} değerini azalttığı

düşünülmektedir. Ayrıca uçucu külün göreceli olarak daha ince taneli ve hafif olmasının γ_{kmaks} değerini azalttığı tahmin edilmektedir.



Şekil 4.1. UK katkılı CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri

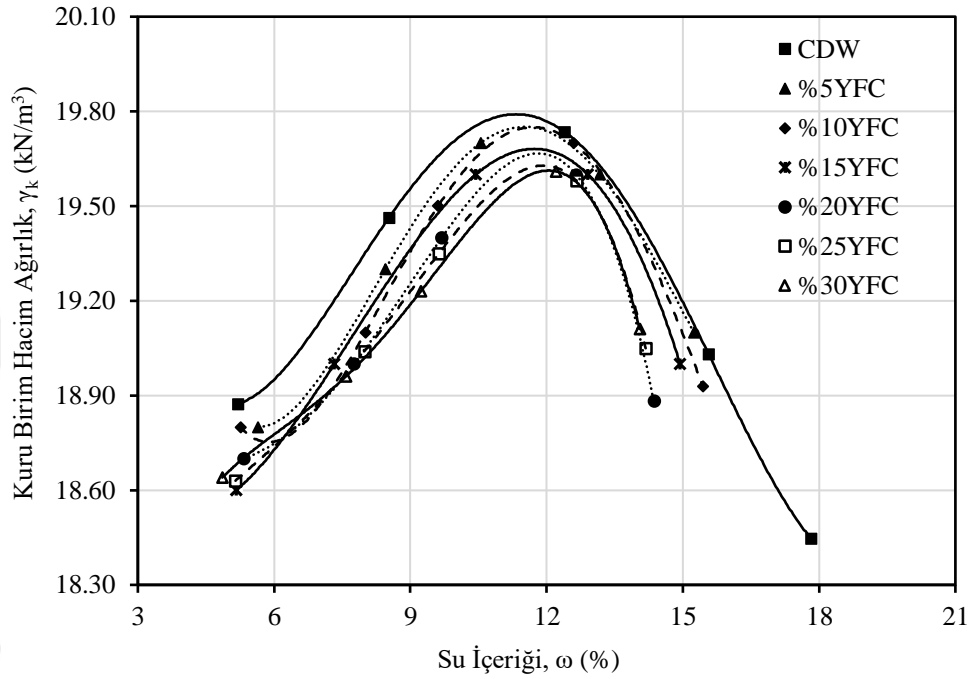
Çizelge 4.1. UK katkılı CDW numunelerinin ω_{opt} ve γ_{kmaks} değerleri

Test Numunesi	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık γ_{kmaks} (kN/m ³)	Optimum Su İçeriği ω_{opt} (%)
CDW	19.79	11.25
%5UK	19.71	10.75
%10UK	19.59	10.50
%15UK	19.45	10.26
%20UK	19.35	10.00
%25UK	19.31	10.00
%30UK	19.24	9.90

4.1.2 YFC Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) YFC katılmış CDW numunelerinin su ile yapılan deneylerine ait su içeriği (ω)-kuru birim hacim ağırlık (γ_k) eğrileri (kompaksiyon eğrileri) Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Şekil 4.2’de Seri A ve Seri D deneyleri birlikte sunulmaktadır. Kompaksiyon eğrilerinin tepe noktalarından tespit edilen optimum su içerikleri (ω_{opt}) ve maksimum kuru birim

hacim ağırlıkları (γ_{kmax}) Çizelge 4.2’de görüldüğü gibidir. Su ile yapılan YFC katkılı modifiye proktor deney sonuçları incelendiğinde, YFC oranı arttıkça ω_{opt} değerinin arttığı, γ_{kmax} değerinin ise azaldığı görülmüştür. YFC özellikle yüksek miktarda CaO içerdiğinden ω_{opt} değerini artırdığı tahmin edilmektedir. Ayrıca YFC’nin göreceli olarak daha ince taneli ve hafif olmasının γ_{kmax} değerini azalttığı tahmin edilmektedir.



Şekil 4.2. YFC katkılı CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri

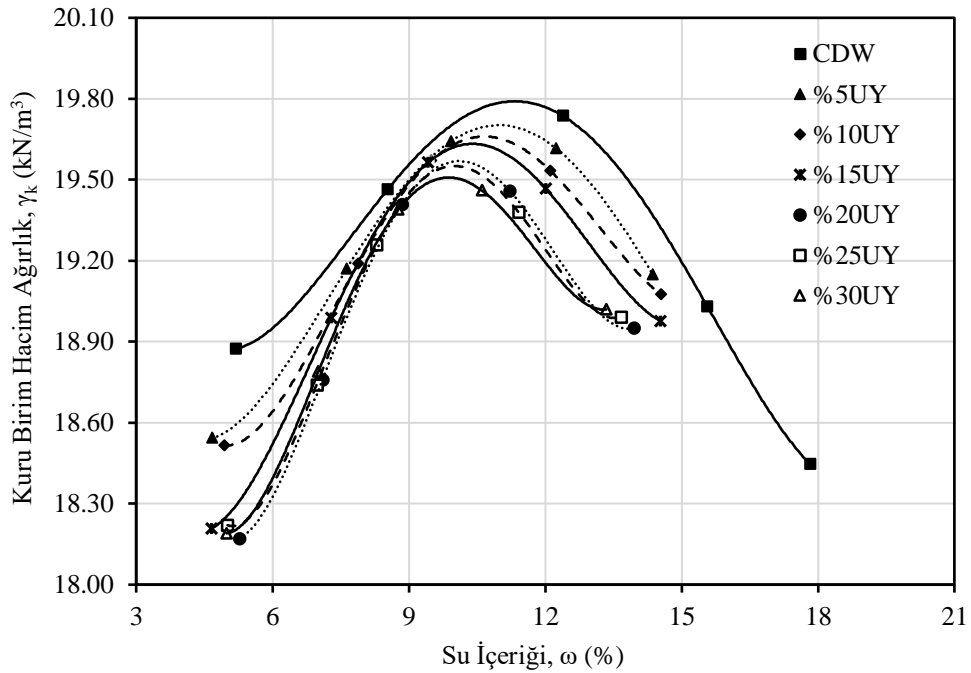
Çizelge 4.2. YFC katkılı CDW numunelerinin ω_{opt} ve γ_{kmax} değerleri

Test Numunesi	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık γ_{kmax} (kN/m ³)	Optimum Su İçeriği ω_{opt} (%)
CDW	19.79	11.25
%5YFC	19.75	11.50
%10YFC	19.75	11.70
%15YFC	19.68	11.75
%20YFC	19.67	11.85
%25YFC	19.63	11.95
%30YFC	19.62	12.05

4.1.3 UY Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UY katılmış CDW numunelerinin su ile yapılan deneylerine ait su içeriği (ω)-kuru birim hacim ağırlık

(γ_k) eğrileri (kompaksiyon eğrileri) Şekil 4.3'te sunulmuştur. Şekil 4.3'te Seri A ve Seri E deneyleri birlikte sunularak değerlendirilmiştir. Kompaksiyon eğrilerinin tepe noktalarından tespit edilen optimum su içerikleri (ω_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmaks}) Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Su ile yapılan UY katkılı modifiye proktor deney sonuçları incelendiğinde, UY oranı arttıkça genel itibari ile hem ω_{opt} hem de γ_{kmaks} değerinin azaldığı tespit edilmiştir. UY'nin, su emme potansiyelini azalttığından ve göreceli olarak daha ince taneli ve hafif olmasından hem ω_{opt} hem de γ_{kmaks} değerlerini azalttığı tahmin edilmektedir.



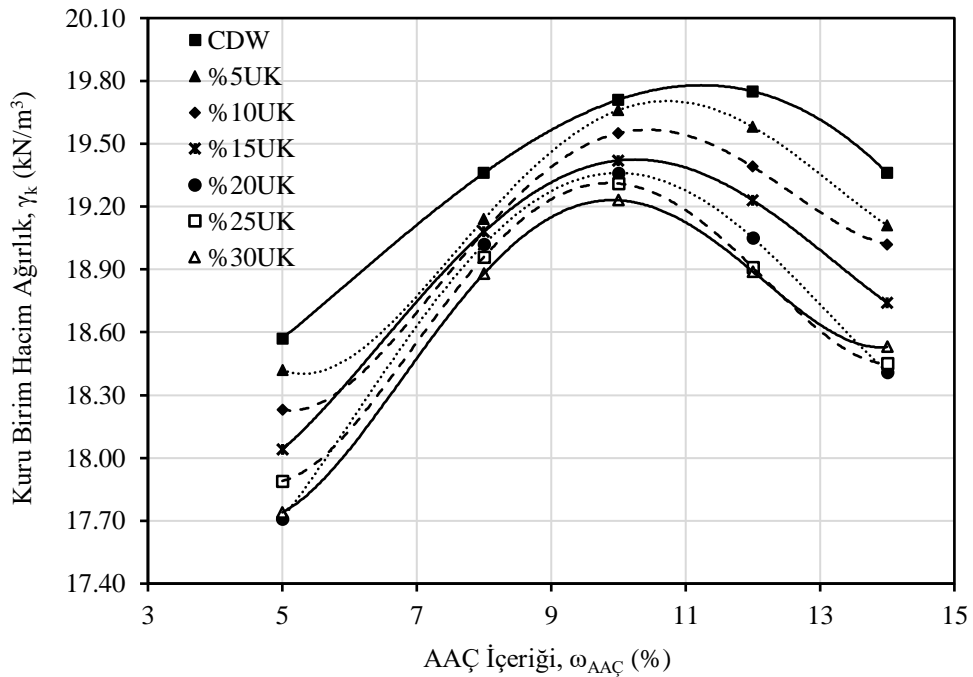
Şekil 4.3. UY katkılı CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri

Çizelge 4.3. UY katkılı CDW numunelerinin ω_{opt} ve γ_{kmaks} değerleri

Test Numunesi	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık γ_{kmaks} (kN/m ³)	Optimum Su İçeriği ω_{opt} (%)
CDW	19.79	11.25
%5UY	19.70	10.97
%10UY	19.65	10.63
%15UY	19.64	10.38
%20UY	19.56	10.13
%25UY	19.55	10.00
%30UY	19.51	9.88

4.1.4 AAÇ Eklenmiş UK Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular

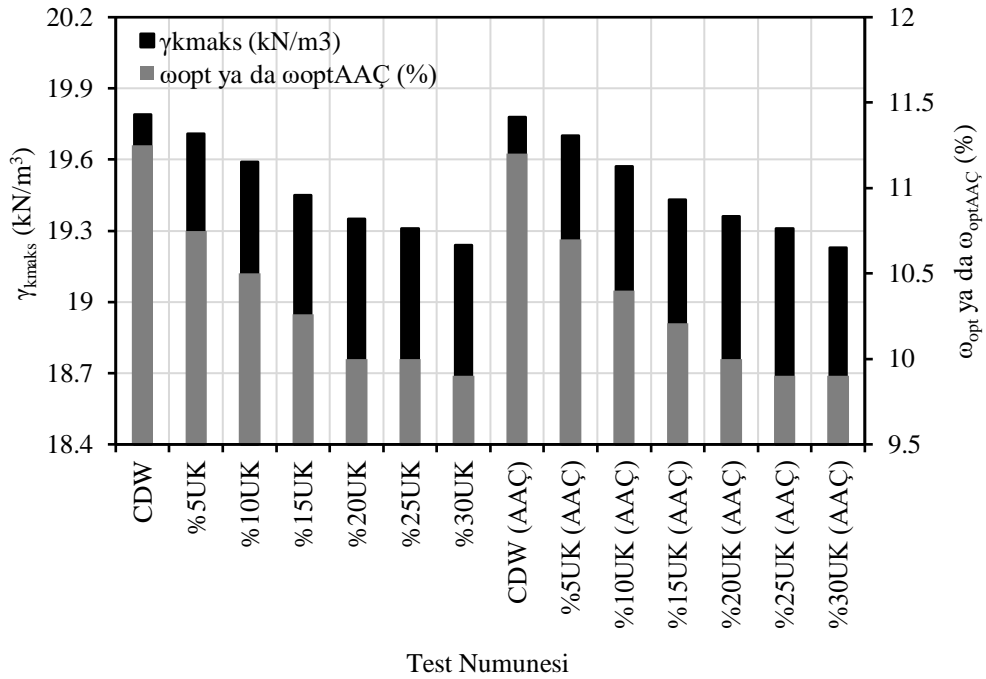
Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UK katılmış CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan deneylerine ait AAÇ içeriği ($\omega_{AAÇ}$)-kuru birim hacim ağırlık (γ_k) eğrileri (kompaksiyon eğrileri) Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4'te Seri B ve Seri F deneyleri birlikte sunulularak değerlendirilmiştir. Kompaksiyon eğrilerinin tepe noktalarından tespit edilen optimum AAÇ içeriği ($\omega_{optAAÇ}$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmaks}) Çizelge 4.4'te görüldüğü gibidir. AAÇ ile yapılan uçucu kül katkıli modifiye proktor deney sonuçları incelendiğinde, AAÇ eklenmiş uçucu kül oranı arttıkça, genel itibari ile hem $\omega_{optAAÇ}$ hem de γ_{kmaks} değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca UK için hem su ile hem de AAÇ ile yapılan modifiye proktor deneyleri incelendiğinde (Şekil 4.5), her iki deneyde bulunan optimum sıvı oranı (ω_{opt} ve $\omega_{optAAÇ}$) ve γ_{kmaks} değerlerinin birbirine yakın çıktığı görülmüştür. AAÇ ile yapılan deneylerde nispeten daha az su kullanılmasına rağmen benzer sonuçların elde edilmesi, AAÇ'nin daneler arasındaki sürtünmeyi (kaygan yapısından dolayı) azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.4. AAÇ eklenmiş UK katkıli CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri

Çizelge 4.4. AAÇ eklenmiş UK katkılı CDW numunelerinin $\omega_{optAAÇ}$ ve γ_{kmaks} değerleri

Test Numunesi	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık γ_{kmaks} (kN/m ³)	Optimum AAÇ Oranı $\omega_{optAAÇ}$ (%)
CDW	19.78	11.20
%5UK	19.70	10.70
%10UK	19.57	10.40
%15UK	19.43	10.21
%20UK	19.36	10.00
%25UK	19.31	9.90
%30UK	19.23	9.90

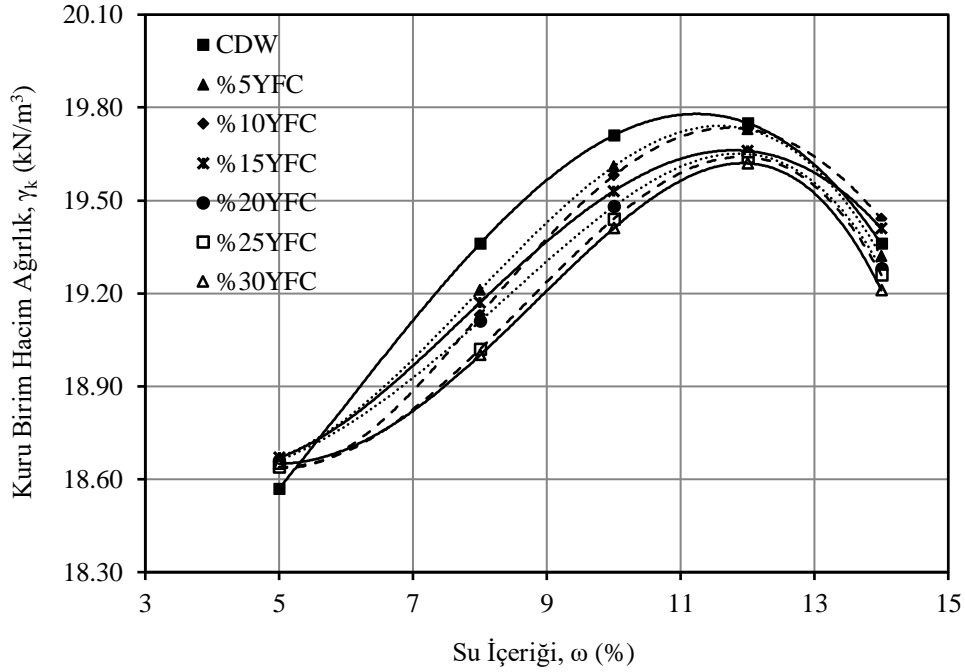


Şekil 4.5. UK için hem su ile hem de AAÇ ile yapılan modifiye proktor deney sonuçları

4.1.5 AAÇ Eklenmiş YFC Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) YFC katılmış CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan deneylerine ait AAÇ içeriği ($\omega_{AAÇ}$)-kuru birim hacim ağırlık (γ_k) eğrileri (kompaksiyon eğrileri) Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekil 4.6'da Seri B ve Seri G deneyleri birlikte sunularak değerlendirilmiştir. Kompaksiyon eğrilerinin tepe noktalarından tespit edilen optimum AAÇ içeriği ($\omega_{optAAÇ}$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmaks}) Çizelge 4.5'te görüldüğü gibidir. AAÇ ile yapılan YFC katkıli modifiye proktor deney sonuçları incelendiğinde, AAÇ eklenmiş YFC oranı arttıkça genel itibari ile $\omega_{optAAÇ}$ oranının arttığı γ_{kmaks} değerinin ise azaldığı

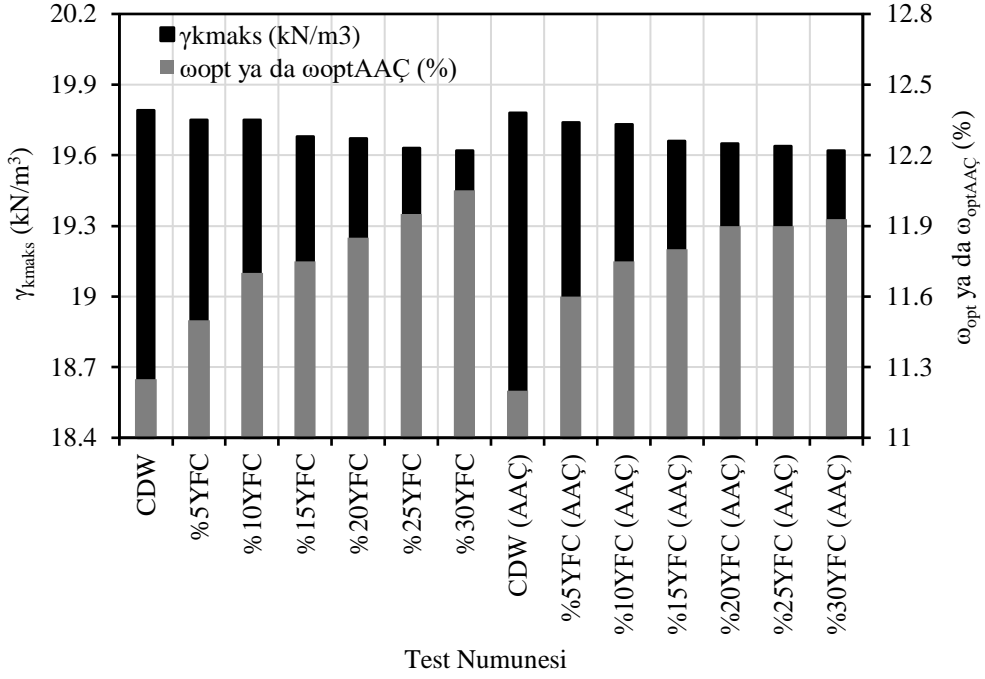
görülmüştür. Ayrıca YFC için hem su ile hem de AAÇ ile yapılan modifiye proktor deneyleri incelendiğinde (Şekil 4.7), her iki deneyde bulunan optimum sıvı oranı (ω_{opt} ve $\omega_{optAAÇ}$) ve γ_{kmax} değerlerinin birbirine yakın çıktığı görülmüştür. AAÇ ile yapılan deneylerde nispeten daha az su kullanılmasına rağmen benzer sonuçların elde edilmesi, AAÇ'nin daneler arasındaki sürtünmeyi (kaygan yapısından dolayı) azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.6. AAÇ eklenmiş YFC katkılı CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri

Çizelge 4.5. AAÇ eklenmiş YFC katkılı CDW numunelerinin $\omega_{optAAÇ}$ ve γ_{kmax} değerleri

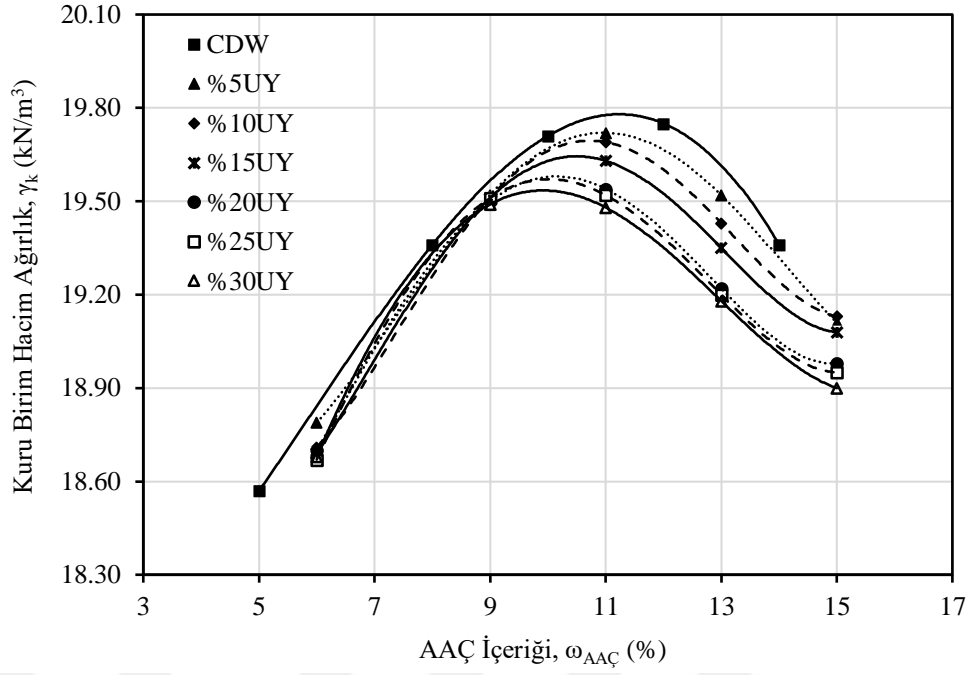
Test Numunesi	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık γ_{kmax} -(kN/m ³)	Optimum AAÇ İçeriği $\omega_{optAAÇ}$ (%)
CDW	19.78	11.20
%5YFC	19.74	11.60
%10YFC	19.73	11.75
%15YFC	19.66	11.80
%20YFC	19.65	11.90
%25YFC	19.64	11.90
%30YFC	19.62	11.93



Şekil 4.7. YFC için hem su ile hem de AAÇ ile yapılan modifiye proktor deney sonuçları

4.1.6 AAÇ Eklenmiş UY Katkılı Modifiye Proktor Deneylerine ait Bulgular

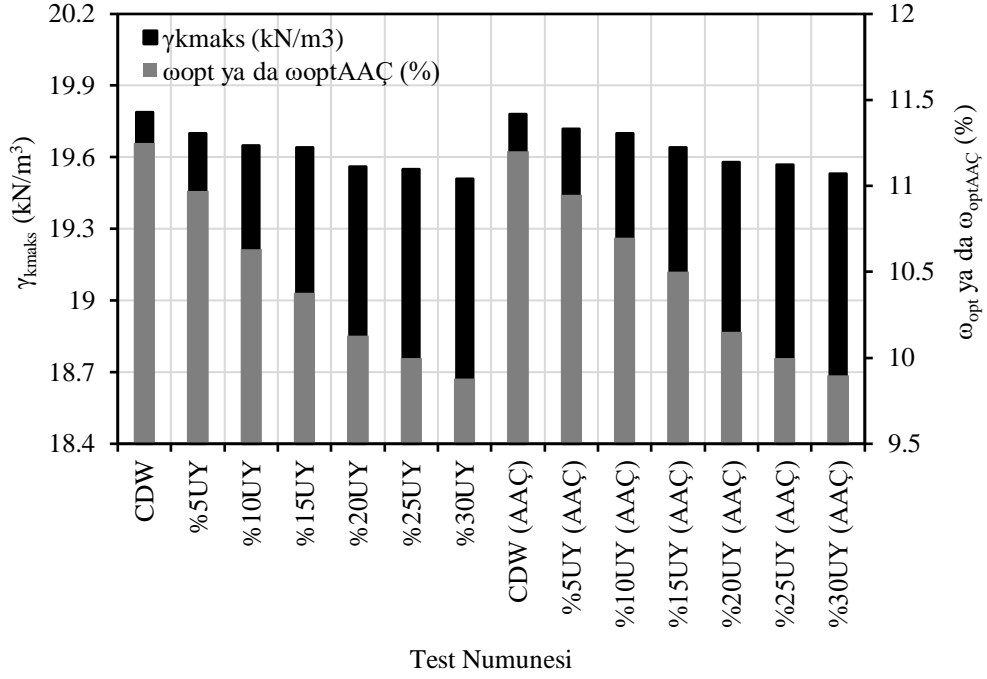
Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UY katılmış CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan deneylerine ait AAÇ içeriği ($\omega_{AAÇ}$)-kuru birim hacim ağırlık (γ_k) eğrileri (kompaksiyon eğrileri) Şekil 4.8’de görüldüğü gibidir. Şekil 4.8’de Seri B ve Seri H deneyleri birlikte gösterilmiştir. Kompaksiyon eğrilerinin tepe noktalarından tespit edilen optimum AAÇ içeriği ($\omega_{optAAÇ}$) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmaks}) Çizelge 4.6’da verilmiştir. AAÇ ile yapılan UY katkı modifiye proktor deney sonuçları incelendiğinde, AAÇ eklenmiş UY oranı arttıkça, genel itibari ile hem $\omega_{optAAÇ}$ oranının hem de γ_{kmaks} değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca UY için hem su ile hem de AAÇ ile yapılan modifiye proktor deneyleri incelendiğinde (Şekil 4.9), her iki deneyde bulunan optimum sıvı oranı (ω_{opt} ve $\omega_{optAAÇ}$) ve γ_{kmaks} değerlerinin birbirine yakın çıktığı görülmüştür. AAÇ ile yapılan deneylerde nispeten daha az su kullanılmasına rağmen benzer sonuçların elde edilmesi, AAÇ’nin daneler arasındaki sürtünmeyi (kaygan yapısından dolayı) azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.8. AAC eklenmiş UY katkılı CDW numunelerinin kompaksiyon eğrileri

Çizelge 4.6. AAC eklenmiş UY katkılı CDW numunelerinin ω_{optAAC} ve γ_{kmaks} değerleri

Test Numunesi	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık γ_{kmaks} (kN/m ³)	Optimum AAC İçeriği ω_{optAAC} (%)
CDW	19.78	11.20
%5UY	19.72	10.95
%10UY	19.70	10.70
%15UY	19.64	10.50
%20UY	19.58	10.15
%25UY	19.57	10.00
%30UY	19.53	9.90



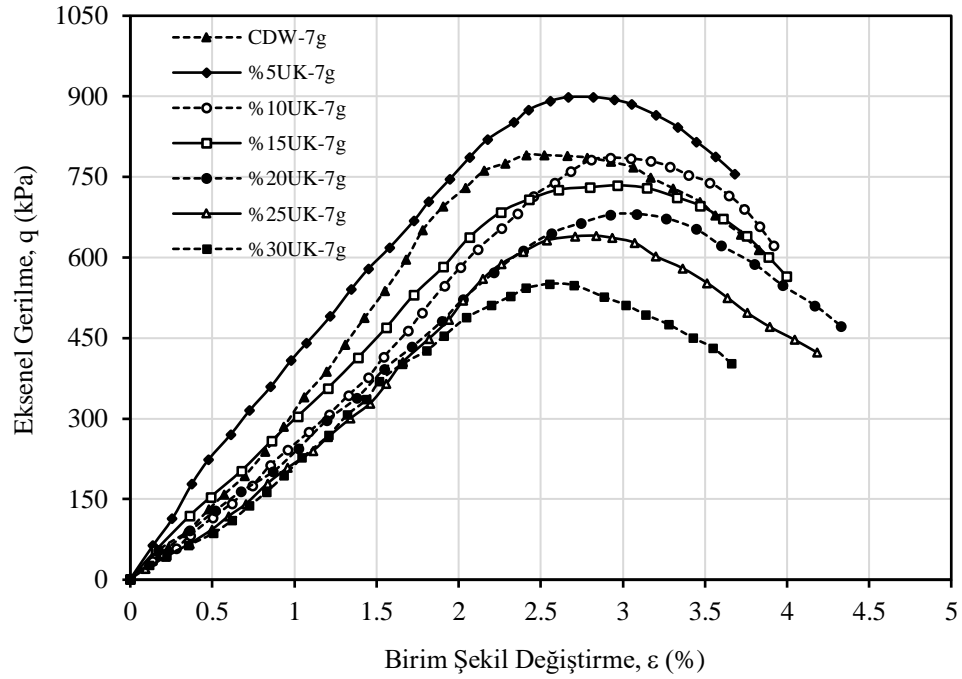
Şekil 4.9. UY için hem su ile hem de AAÇ ile yapılan modifiye proktor deney sonuçları

4.2 Serbest Basınç Deneylerine ait Bulguların Değerlendirilmesi

Serbest basınç deneyleri ile farklı oranlardaki puzolan katkıların ve AAÇ'nin varlığının serbest basınç mukavemetine etkisi incelenmiştir.

4.2.1 UK Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UK katılmış ve 7 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan serbest basınç deneylerine ait ortalama aksenal gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.10'da sunulmuştur. Şekil 4.10'da Seri A ve Seri C deneyleri birlikte sunularak değerlendirilmiştir. Serbest basınç deneylerinden elde edilen ortalama maksimum aksenal gerilme (q) değerleri serbest basınç mukavemeti (q_{uUCS}) olarak dikkate alınmıştır. Deneyler sonucu elde edilen serbest basınç mukavemeti (q_{uUCS}) değerleri Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. Su ile yapılan ve 7 gün kür edilmiş UK katkılı serbest basınç deney sonuçlarına bakıldığında, %5 oranında uçucu kül katkısının en yüksek serbest basınç mukavemeti değerini oluşturduğu görülmüştür. %5 katkı oranından sonra UK oranı arttıkça katkısız CDW test numunesine kıyasla serbest basınç mukavemeti değeri azalmıştır.



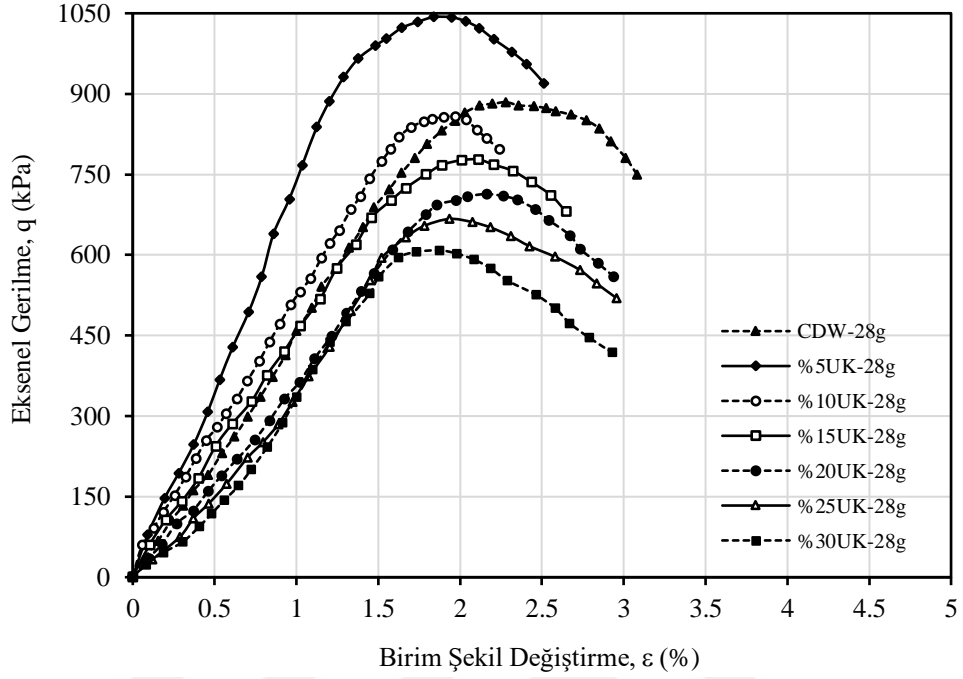
Şekil 4.10. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri

Çizelge 4.7. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q_{uUCS} (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değişirme ϵ_{cr} (%)
CDW-7g	791.18	2.41
%5UK-7g	898.72	2.82
%10UK-7g	785.79	2.92
%15UK-7g	734.24	2.97
%20UK-7g	681.13	3.08
%25UK-7g	640.50	2.84
%30UK-7g	550.96	2.56

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UK katılmış ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan serbest basınç deneylerine ait ortalama aksel gerilme (q)-birim şekil değişirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.11’de görüldüğü gibidir. Şekil 4.11’de Seri A ve Seri C deneyleri birlikte sunulmaktadır. Deneyler sonucu elde edilen serbest basınç mukavemeti (q_{uUCS}) değerleri Çizelge 4.8’de verilmiştir. Su ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş UK katkılı serbest basınç deney sonuçlarına bakıldığında, %5 oranında uçucu kül katkısının en yüksek serbest basınç mukavemeti değerini oluşturduğu tespit edilmiştir. %5 katkı

oranından sonra UK oranı arttıkça katkısız CDW test numunesine göre serbest basınç mukavemeti değeri azalmıştır.



Şekil 4.11. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri

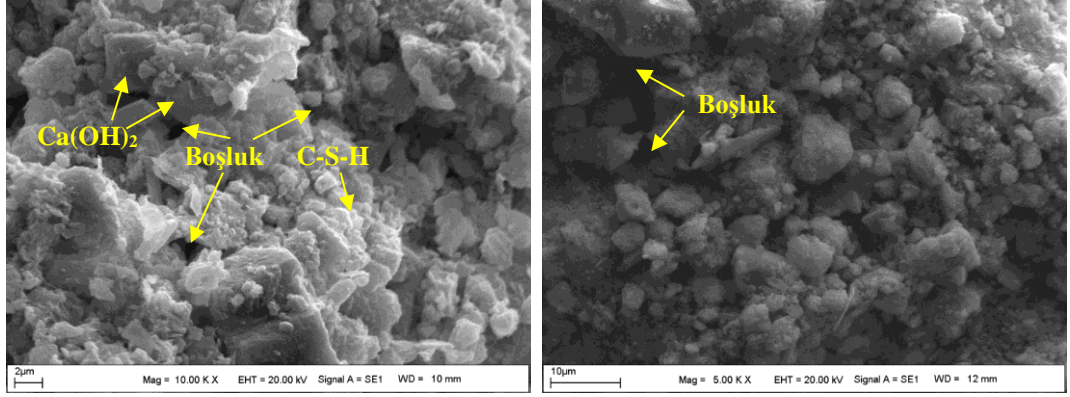
Çizelge 4.8. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q_{uUCS} (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değişirme ϵ_{cr} (%)
CDW-28g	884.46	2.28
%5UK-28g	1042.93	1.84
%10UK-28g	858.59	1.97
%15UK-28g	777.68	2.11
%20UK-28g	713.37	2.16
%25UK-28g	667.11	1.93
%30UK-28g	608.66	1.87

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8 incelendiğinde, kür süresinin serbest basınç mukavemeti (q_{uUCS}) değerini artırdığı ancak serbest basınç mukavemetinin olduğu andaki birim şekil değişirme (ϵ_{cr}) değerini azalttığı görülmüştür.

CDW içerisine eklenen UK katkısı su ile kullanıldığında dayanım değerlerinin çok az arttığı görülmüştür. Bunu daha detaylı yorumlayabilmek için CDW-28g ve

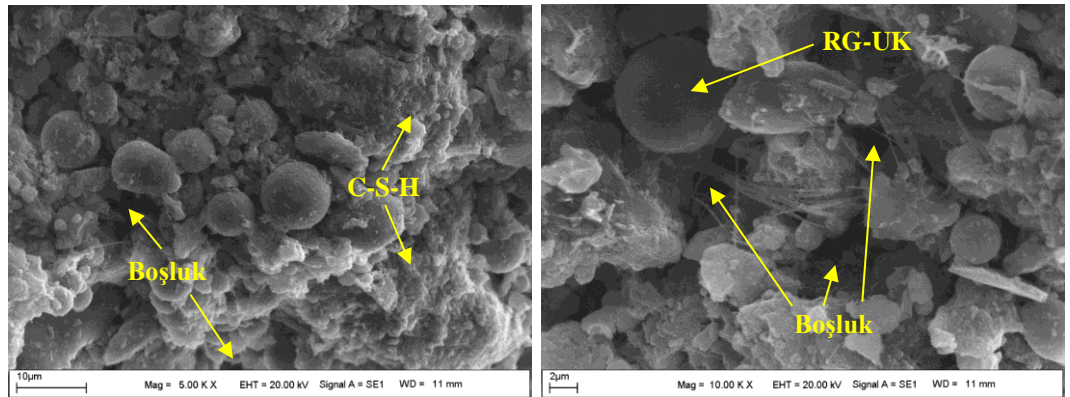
%5UK-28g test numuneleri üzerinde SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. CDW-28g numunesine ait SEM görüntüleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. CDW-28g test numunesine ait SEM görüntüleri

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi, mikro yapıda CSH ve Ca(OH)₂ fazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durumun CDW içinde reaksiyona girmemiş çimento parçacıklarının reaksiyona girmesi şeklinde yorumlanmıştır. Bunun de CDW test numunesinin 28 günde bir miktar dayanım kazanmasına yol açtığı düşünülmektedir. SEM görüntülerine göre, çok sayıda mikro boşluğun varlığı saptandığından CDW test numunesinin dayanım değeri çok fazla artmadığı düşünülmüştür.

%5UK-28g test numunesine ait mikro yapı gözlemleri Şekil 4.13’te görüldüğü gibidir. Şekil 4.13’te görüldüğü gibi çok sayıda reaksiyona girmemiş UK (RG-UK) parçacığının varlığı gözlemlenmektedir. Bu durumun test numunesi içinde ince malzemeyi artırdığı ve bu sebeple dayanım değerlerinin artmadığı düşünülmektedir.

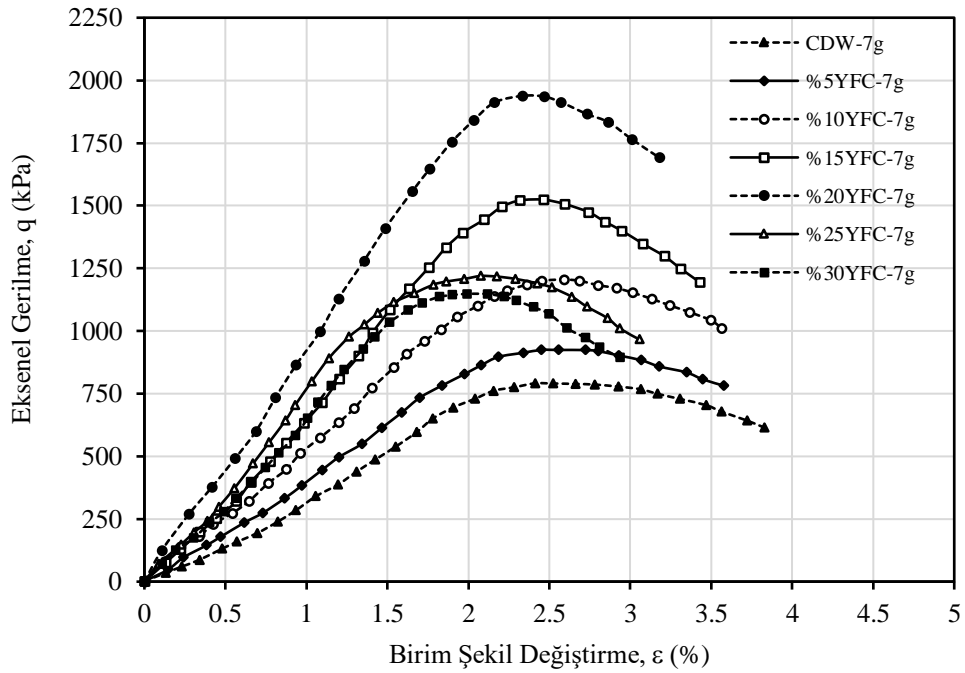


Şekil 4.13. %5UK-28g test numunesine ait SEM görüntüleri

4.2.2 YFC Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) YFC katılmış ve 7 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan serbest basınç deneylerine ait ortalama aksenal gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Şekil 4.14'te Seri A ve Seri D deneyleri birlikte sunulmaktadır. Serbest basınç deneyleri sonucu elde edilen serbest basınç mukavemeti (q_{uUCS}) değerleri Çizelge 4.9'da sunulmuştur. Su ile yapılan ve 7 gün kür edilmiş YFC katkılı serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde, YFC katkısının tüm oranları için katkısız CDW test numunesine göre serbest basınç mukavemeti değerinin arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, %20 oranında YFC katkısının en yüksek serbest basınç mukavemeti değerini oluşturduğu görülmüştür.

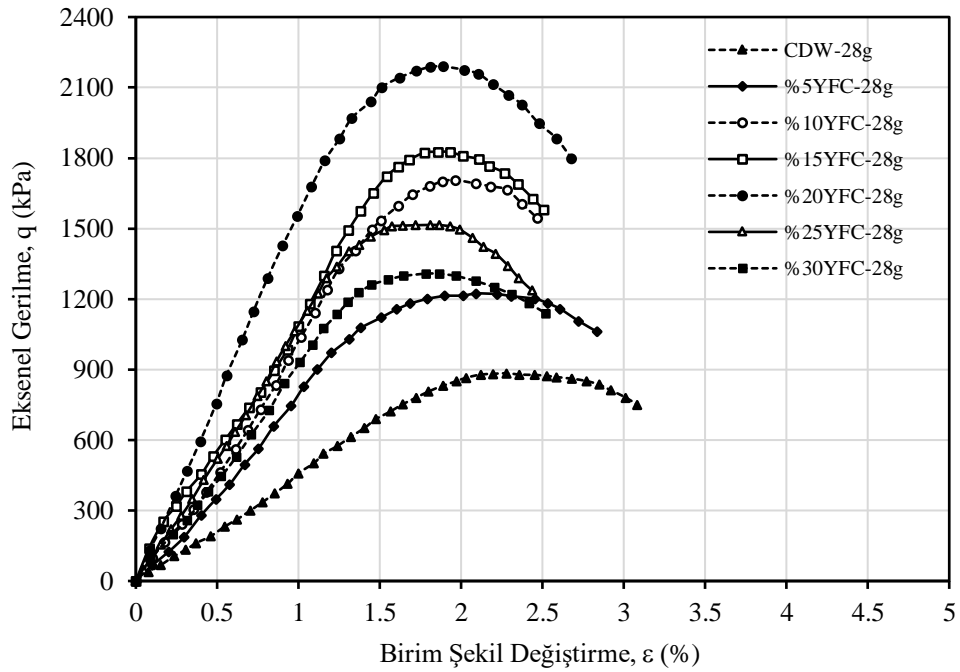
Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) YFC katılmış ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan serbest basınç deneylerine ait ortalama aksenal gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.15'te sunulmuştur. Şekil 4.15'te Seri A ve Seri D deneyleri birlikte verilmiştir. Serbest basınç deneyleri sonucu elde edilen serbest basınç mukavemeti (q_{uUCS}) değerleri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.14. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q - ϵ eğrileri

Çizelge 4.9. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q_{uUCS} (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değişirme ϵ_{cr} (%)
CDW-7g	791.18	2.41
%5YFC-7g	924.35	2.45
%10YFC-7g	1205.33	2.59
%15YFC-7g	1523.81	2.46
%20YFC-7g	1938.21	2.34
%25YFC-7g	1219.38	2.08
%30YFC-7g	1148.24	1.99



Şekil 4.15. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q - ϵ eğrileri

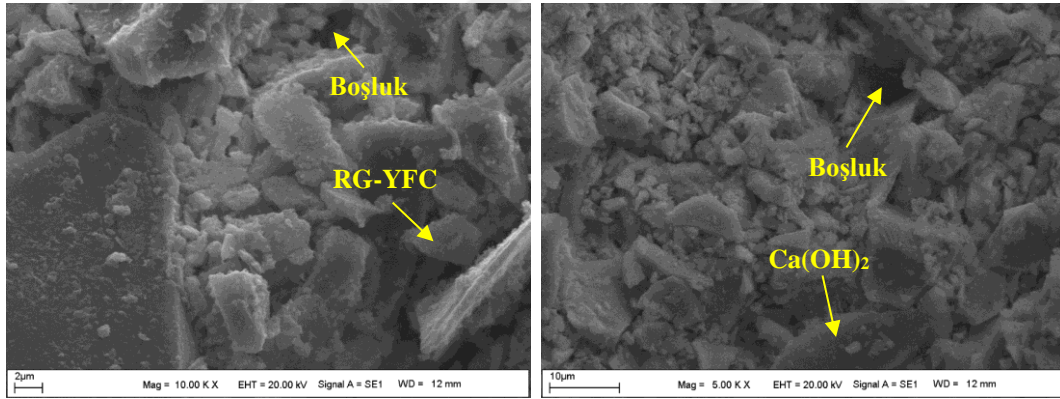
Su ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş YFC katkılı serbest basınç deney sonuçlarına göre, YFC katkısının tüm oranları için katkısız CDW test numunesine göre serbest basınç mukavemeti değerinin arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte en yüksek serbest basınç mukavemeti değeri %20 oranında YFC katkısı eklendiğinde elde edilmiştir.

Çizelge 4.10. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q_{uUCS} (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değişirme ϵ_{cr} (%)
CDW-28g	884.46	2.28
%5YFC-28g	1223.65	2.09
%10YFC-28g	1706.87	1.96
%15YFC-28g	1825.86	1.93
%20YFC-28g	2189.79	1.89
%25YFC-28g	1515.23	1.81
%30YFC-28g	1307.96	1.78

Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 incelendiğinde, kür süresinin serbest basınç mukavemeti (q_{uUCS}) değerini artırdığı ancak serbest basınç mukavemetinin olduğu andaki birim şekil değişirme (ϵ_{cr}) değerini genel itibari ile azalttığı görülmüştür.

CDW içerisine eklenen YFC katkısı su ile kullanıldığında dayanım değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu durumu daha detaylı yorumlayabilmek için %20YFC-28g test numunesi üzerinde SEM analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.16).



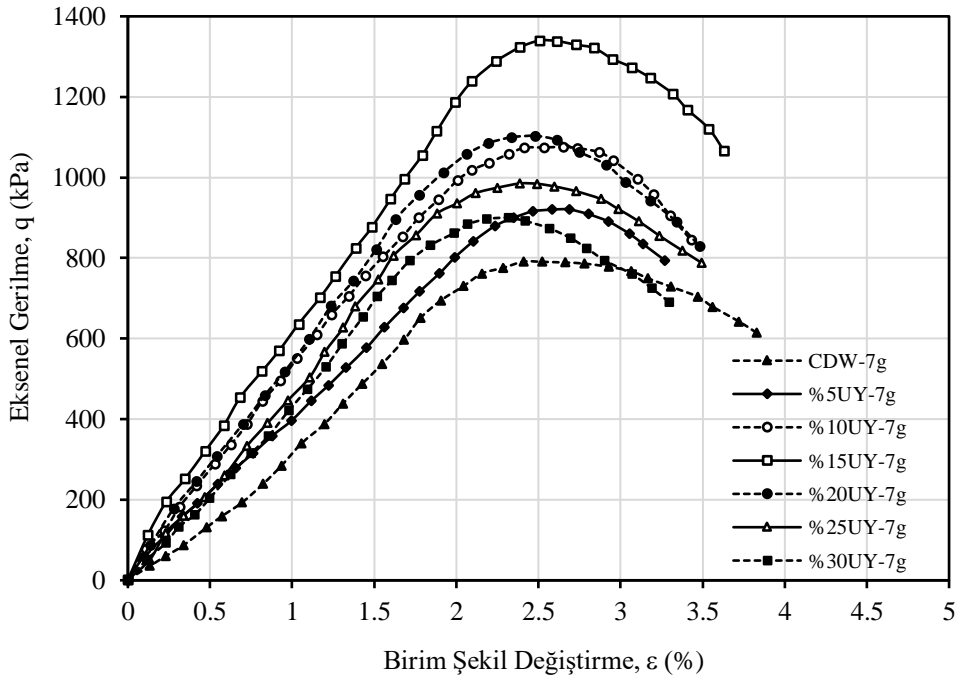
Şekil 4.16. %20YFC-28g test numunesine ait SEM görüntüleri

Şekil 4.16'da görüldüğü gibi, %20YFC-28g numunesinin mikro yapı gözlemleri matriste yoğun bir jel oluşumunu göstermiştir. Aynı zamanda, mikro yapıda az sayıda reaksiyona girmemiş YFC (RG-YFC) parçacığı ve $Ca(OH)_2$ varlığı tespit edilmiştir. Bu yüzden, %20 oranına kadar YFC eklenmesinin dayanım değerini arttığı, bu orandan sonra reaksiyona girmeyen YFC parçacığının artmasıyla dayanımın azaldığı

düşünülmektedir. Reaksiyona girmeyen YFC miktarının artmasının, ince malzeme miktarını da artırdığından dayanım değerlerinin düştüğü tahmin edilmektedir.

4.2.3 UY Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UY katılmış ve 7 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan serbest basınç deneylerine ait ortalama aksenal gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Şekil 4.17’de Seri A ve Seri E deneyleri birlikte gösterilmiştir. Serbest basınç deneyleri sonucu elde edilen q_{uUCS} değerleri Çizelge 4.11’de verilmiştir.



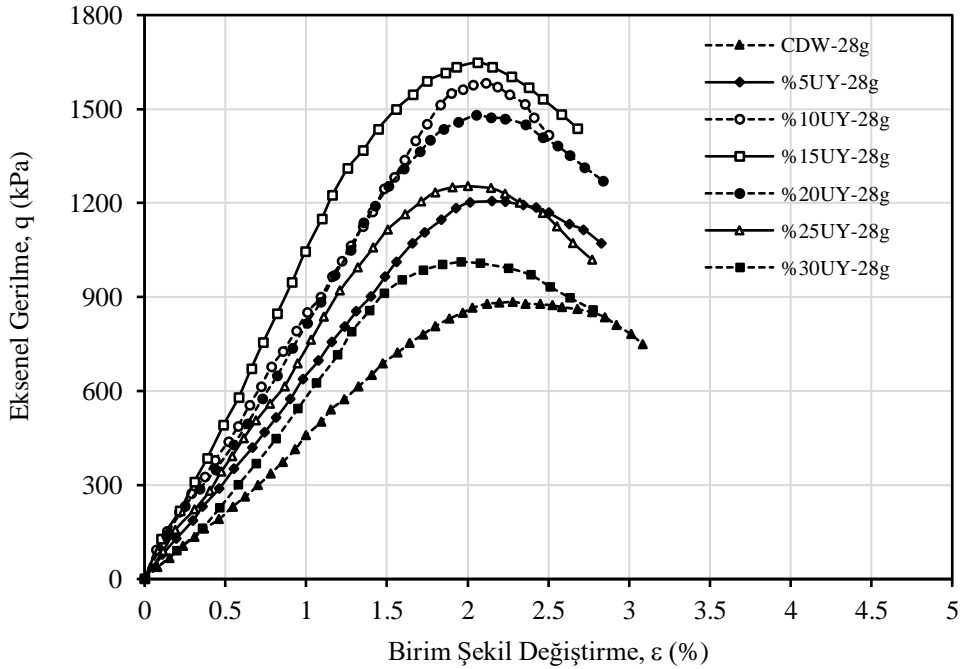
Şekil 4.17. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q - ϵ eğrileri

Şekil 4.17’de ve Çizelge 4.11’de görüldüğü gibi, 7 gün kür edilmiş UY katkılı serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde, UY katkısının tüm oranları için katkısız CDW test numunesine kıyasla serbest basınç mukavemeti değerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca, %15 oranında UY katkısının en yüksek serbest basınç mukavemeti değerini oluşturduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.11. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q_{uUCS} (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değişirme ϵ_{cr} (%)
CDW-7g	791.18	2.41
%5UY-7g	920.58	2.69
%10UY-7g	1075.92	2.65
%15UY-7g	1339.78	2.51
%20UY-7g	1103.12	2.48
%25UY-7g	985.13	2.39
%30UY-7g	899.98	2.32

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UY katılmış ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan serbest basınç deneylerine ait ortalama aksenal gerilme (q)-birim şekil değişirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.18’de verilmiştir. Şekil 4.18’de Seri A ve Seri D deneyleri birlikte sunulmaktadır. Serbest basınç deneyleri sonucu elde edilen q_{uUCS} değerleri Çizelge 4.12’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.18. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q - ϵ eğrileri

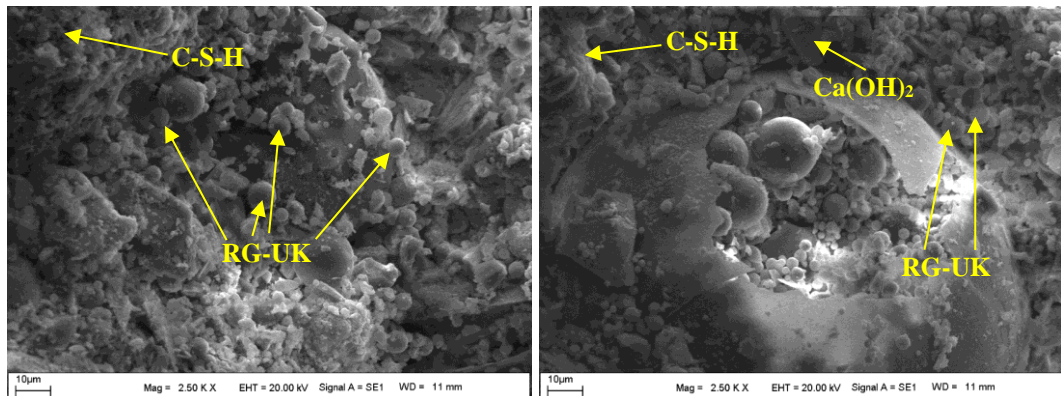
Çizelge 4.12. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q_{uUCS} (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değişirme ϵ_{cr} (%)
CDW-28g	884.46	2.28
%5UY-28g	1205.29	2.15
%10UY-28g	1583.21	2.11
%15UY-28g	1648.69	2.06
%20UY-28g	1479.92	2.05
%25UY-28g	1253.63	2.00
%30UY-28g	1011.56	1.96

Su ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş UY katkılı serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.18 ve Çizelge 4.12), UY katkısının tüm oranları için katkısız CDW test numunesine göre serbest basınç mukavemeti değerinin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte en yüksek serbest basınç mukavemeti değerinin %15 oranında UY katkısı eklendiğinde elde edilmiştir.

Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12 incelendiğinde, kür süresinin serbest basınç mukavemeti (q_{uUCS}) değerini artırdığı ancak serbest basınç mukavemetinin oluştuğu andaki birim şekil değişirme (ϵ_{cr}) değerini azalttığı görülmüştür.

CDW içerisine eklenen UY katkısı su ile kullanıldığında dayanım değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu durumu daha detaylı yorumlayabilmek için %15UY-28g test numunesi üzerinde SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucu oluşan görüntü Şekil 4.19'da sunulmuştur.

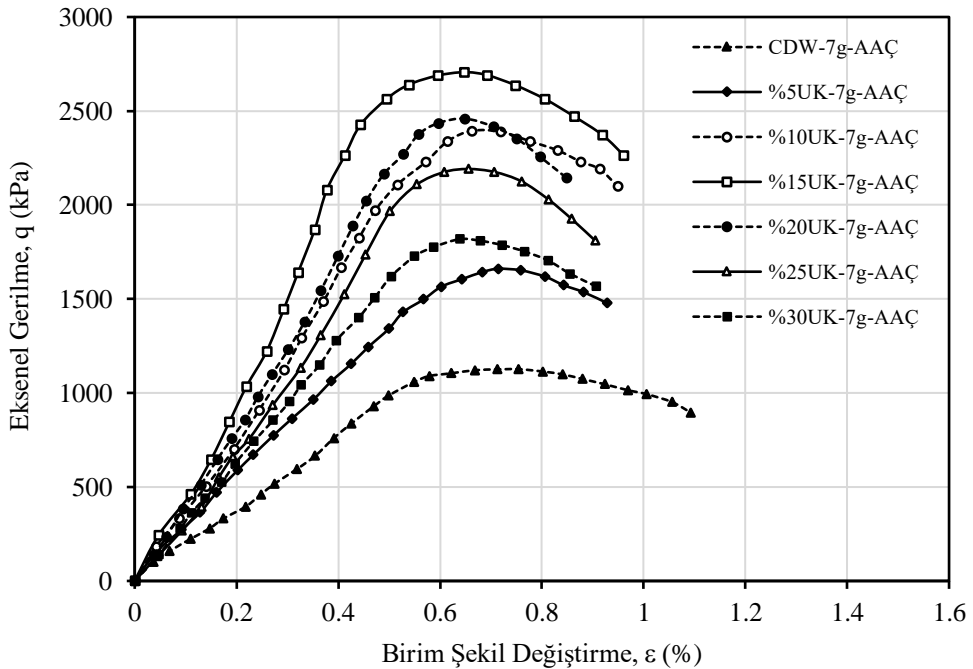


Şekil 4.19. %15UY-28g test numunesine ait SEM görüntüleri

%15UY-28g numunesinin SEM gözlemleri ile %5UK-28g numunesine benzer şekilde, reaksiyona girmemiş puzolan tanelerinin olduğu belirlenmiştir. Bu durumun, dayanım değerlerini %15 katkı oranına kadar artırıp sonra azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. %15 katkı oranından sonra reaksiyona girmemiş parçacık sayısının artarak ince malzeme miktarını artırdığı, bunun da dayanım değerlerini düşürdüğü tahmin edilmektedir. Ayrıca, her iki gözlemede de matriste belirgin bir kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jeli gözlenmiştir. %15UY-28g numunesinin, %5UK-28g numunesine göre daha yoğun ve boşluksuz bir mikro yapıya sahip olması, dayanım testlerinden elde edilen sonuçları doğrular niteliktedir.

4.2.4 AAÇ Eklenmiş UK Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UK katılmış ve 7 gün kür edilmiş CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan serbest basınç deneylerine ait ortalama aksenal gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Şekil 4.20’de Seri B ve Seri F deneyleri birlikte sunulmaktadır değerlendirilmiştir. Serbest basınç deneyleri sonucu elde edilen q_{uUCS} değerleri Çizelge 4.13’te sunulmuştur.



Şekil 4.20. 7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q - ϵ eğrileri

Çizelge 4.13. 7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri

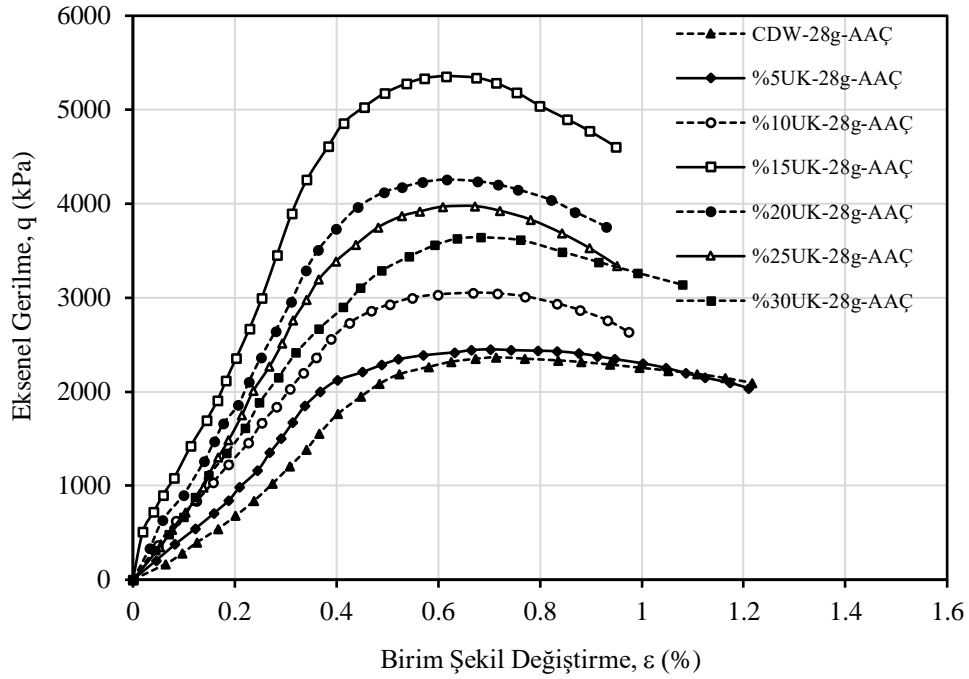
Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q_{uUCS} (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değiştirme ϵ_{cr} (%)
CDW-7g-AAÇ	1126.71	0.75
%5UK-7g-AAÇ	1660.56	0.71
%10UK-7g-AAÇ	2394.18	0.66
%15UK-7g-AAÇ	2706.49	0.65
%20UK-7g-AAÇ	2459.39	0.65
%25UK-7g-AAÇ	2191.28	0.66
%30UK-7g-AAÇ	1818.41	0.64

AAÇ ile yapılan ve 7 gün kür edilmiş UK katkılı serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.20 ve Çizelge 4.13), UK katkısının tüm oranları için, AAÇ ile yapılan CDW test numunesine göre serbest basınç mukavemeti değerinin arttığı belirlenmiştir. Ek olarak, %15 oranında UK katkısının en yüksek serbest basınç mukavemeti değerini oluşturduğu görülmüştür

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UK katılmış ve 28 gün kür edilmiş CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan serbest basınç deneylerine ait ortalama aksenal gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.21’de sunulmuştur. Şekil 4.21’de Seri B ve Seri F deneyleri birlikte gösterilmiştir. Serbest basınç deneyleri sonucu elde edilen q_{uUCS} değerleri ise Çizelge 4.14’te verilmiştir.

AAÇ ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş UK katkılı serbest basınç deney sonuçlarına göre (Şekil 4.21 ve Çizelge 4.14), UK katkısının tüm oranları için, AAÇ ile yapılan CDW test numunesine göre serbest basınç mukavemeti değerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, %15 oranında UK katkısının en yüksek serbest basınç mukavemeti değerini oluşturduğu görülmüştür.

Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’te görüldüğü gibi, kür süresinin serbest basınç mukavemeti (q_{uUCS}) değerini artırdığı ancak serbest basınç mukavemetinin oluştuğu andaki birim şekil değiştirme (ϵ_{cr}) değerini genel itibari ile azalttığı görülmüştür.



Şekil 4.21. 28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkıli CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri

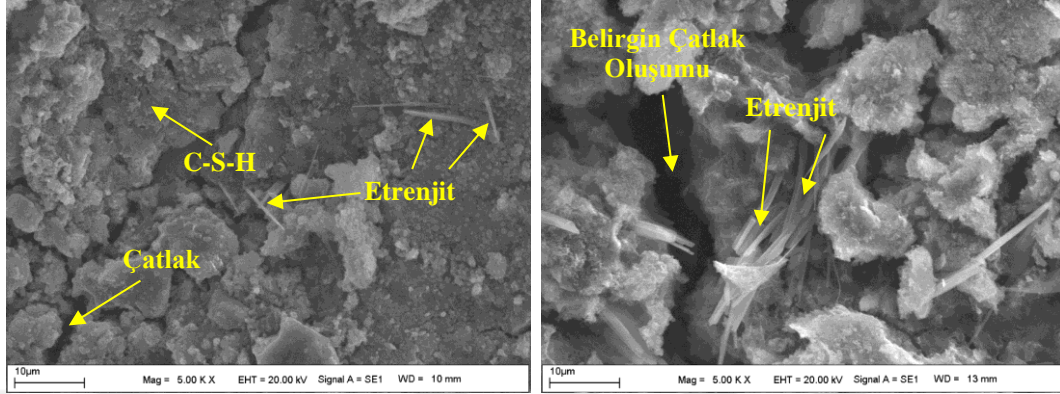
Çizelge 4.14. 28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkıli CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_uUCS değerleri

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q _u UCS (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değişirme ε _{cr} (%)
CDW-28g-AAÇ	2367.06	0.71
%5UK-28g-AAÇ	2451.96	0.70
%10UK-28g-AAÇ	3054.61	0.67
%15UK-28g-AAÇ	5358.53	0.62
%20UK-28g-AAÇ	4258.50	0.62
%25UK-28g-AAÇ	3975.38	0.67
%30UK-28g-AAÇ	3642.56	0.68

CDW içerisine eklenen UY katkısı AAÇ ile kullanıldığında dayanım değerlerinin oldukça iyi arttığı görülmüştür. Bu durumu daha detaylı yorumlayabilmek için CDW-28g-AAÇ ve %15UK-28g-AAÇ test numuneleri üzerinde SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

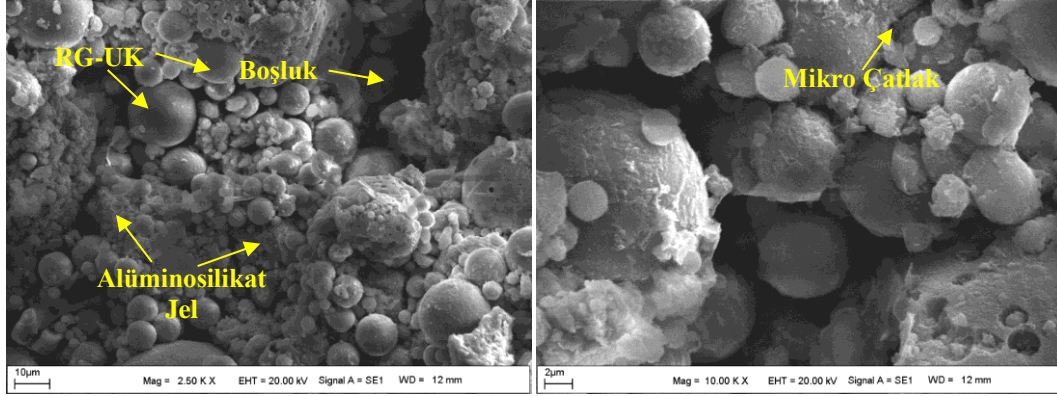
CDW-28g-AAÇ test numunesinin SEM analizi sonucu oluşan görüntüleri Şekil 4.22'de sunulmuştur. Şekil 4.22'de görüldüğü gibi CDW-28g-AAÇ numunesinin mikro yapısının, CDW numunesine göre daha kompakt bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca etrenjit kristallerinin oluştuğu gözlenmiştir. CDW içerisine

sadece AAÇ eklenmesinin dahi, dayanım değerini artırdığı serbest basınç deneylerinde gözlemlenmiştir. SEM analizleri, serbest basınç deneyinden elde edilen bu sonucu destekler niteliktedir.



Şekil 4.22. CDW-28g-AAÇ test numunesine ait SEM görüntüleri

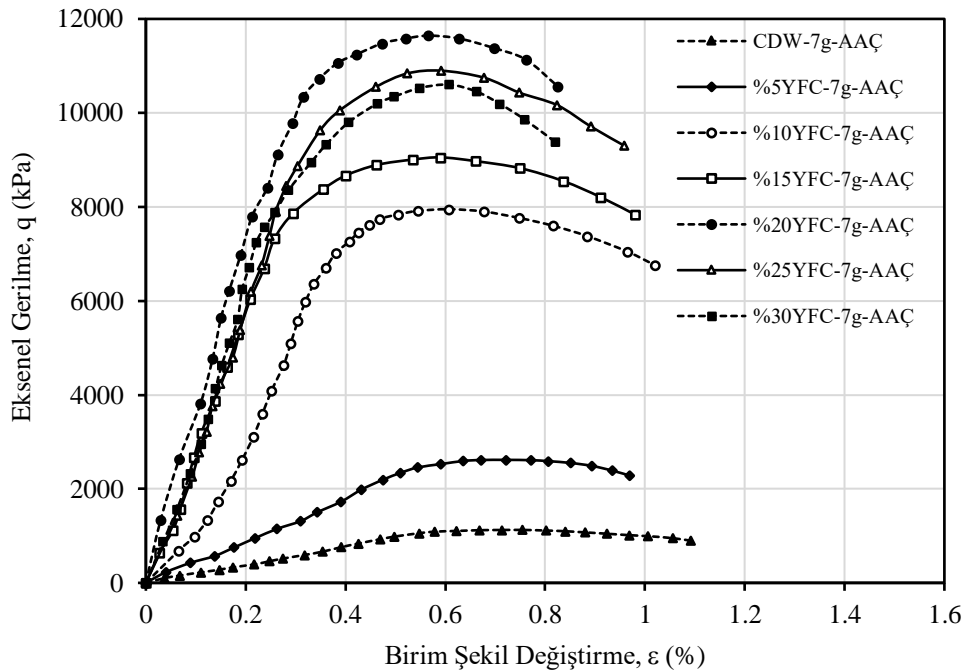
%15UK-28g-AAÇ test numunesinin SEM analizi sonucu oluşan görüntüleri Şekil 4.23'te verilmiştir. %15UK-28g-AAÇ numunesinin SEM görüntüleri, belirgin bir alüminosilikat jel oluşumunu ve çok sayıda reaksiyona girmemiş UK tanelerinin varlığını göstermiştir. Bu durum, UK tanelerinin geopolimerizasyon reaksiyonunun laboratuvar koşullarında daha yavaş gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. F sınıfı uçucu külün AAÇ ile girdiği geopolimerizasyon reaksiyonu sonucunda yüksek dayanım elde etmek ve reaksiyona katılan UK parçacıklarının artması için daha yüksek kür sıcaklıklarına ihtiyaç duyduğuna işaret etmiştir. Benzer şekilde, Görhan ve Kürklü (2014) tarafından yapılan çalışmada F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonların özelliklerine kür sıcaklığının etkisi araştırılmış olup, kür sıcaklığının laboratuvar koşullarından yüksek bir sıcaklık değerinde uygulanmasının yüksek dayanım değerlerine yol açtığı saptanmıştır. Ayrıca, Arulrajah vd. (2016b) yaptıkları çalışmada F sınıfı uçucu kül kullanılarak CDW stabilizasyonunu AAÇ kullanılarak yapmışlardır. Elde edilen deneysel bulgular, uçucu külün geopolimerizasyon reaksiyonunun laboratuvar koşullarından daha yüksek sıcaklıklarda daha iyi gerçekleştiğini göstermiştir. Reaksiyona girmemiş UK parçacıklarından dolayı, dayanım değeri %15 UK oranına kadar artmış, %15 UK oranından sonra azalmıştır.



Şekil 4.23. %15UK-28g-AAÇ test numunesine ait SEM görüntüleri

4.2.5 AAÇ Eklenmiş YFC Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) YFC katılmış ve 7 gün kür edilmiş CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan serbest basınç deneylerine ait ortalama aksenal gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.24'te sunulmuştur. Şekil 4.24'te Seri B ve Seri G deneyleri birlikte gösterilmiştir. Serbest basınç deneyleri sonucu elde edilen q_{uUCS} değerleri Çizelge 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.24. 7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q - ϵ eğrileri

Çizelge 4.15. 7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri

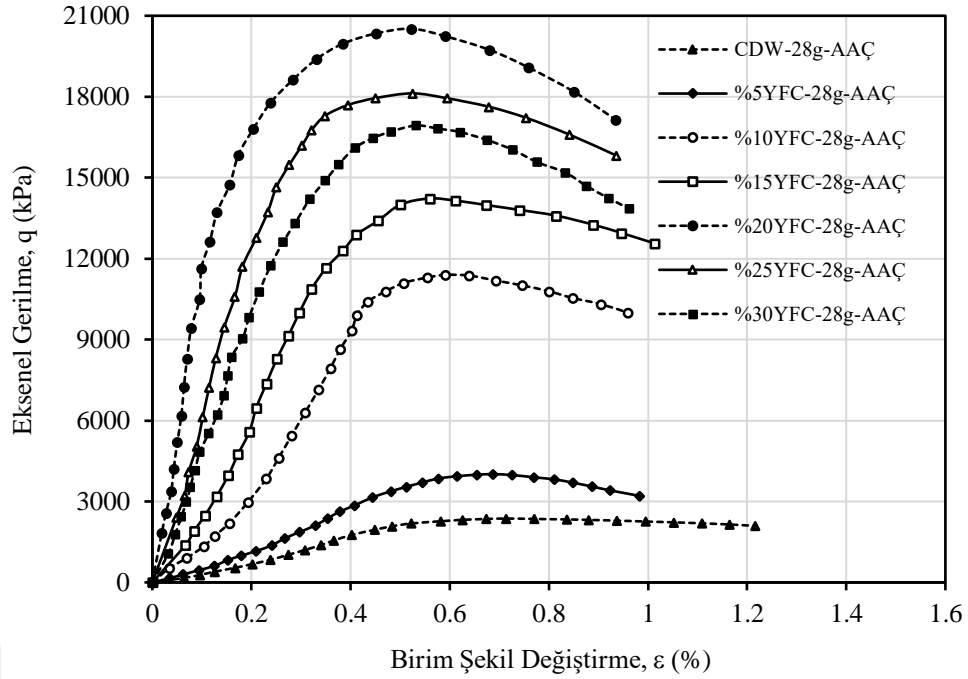
Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q_{uUCS} (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değişirme ϵ_{cr} (%)
CDW-7g-AAÇ	1126.71	0.75
%5YFC-7g-AAÇ	2617.65	0.72
%10YFC-7g-AAÇ	7950.85	0.61
%15YFC-7g-AAÇ	9054.22	0.59
%20YFC-7g-AAÇ	11643.64	0.57
%25YFC-7g-AAÇ	10898.70	0.59
%30YFC-7g-AAÇ	10601.69	0.61

AAÇ ile yapılan ve 7 gün kür edilmiş YFC katkılı serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.24 ve Çizelge 4.15), YFC katkısının tüm oranları için, AAÇ ile yapılan CDW test numunesine göre serbest basınç mukavemeti değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bu deneylerde, YFC'nin %20 oranında katılması durumunda serbest basınç mukavemetinin maksimum değerini aldığı görülmüştür.

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) YFC katılmış ve 28 gün kür edilmiş CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan serbest basınç deneylerine ait ortalama aksenal gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.25'te görüldüğü gibidir. Şekil 4.25'te Seri B ve Seri G deneyleri bir arada verilmiştir. Serbest basınç deneyleri sonucu elde edilen q_{uUCS} değerleri ise Çizelge 4.16'da gösterilmiştir.

AAÇ ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş YFC katkılı serbest basınç deney sonuçlarına göre (Şekil 4.25 ve Çizelge 4.16), YFC katkısının tüm oranları için, AAÇ ile yapılan CDW numunesine kıyasla serbest basınç mukavemeti değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, en yüksek serbest basınç mukavemeti değeri YFC'nin %20 oranında eklenmesi ile elde edilmiştir.

Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16 incelendiğinde, kür süresinin q_{uUCS} değerini artırdığı fakat ϵ_{cr} değerini azalttığı gözlemlenmiştir.



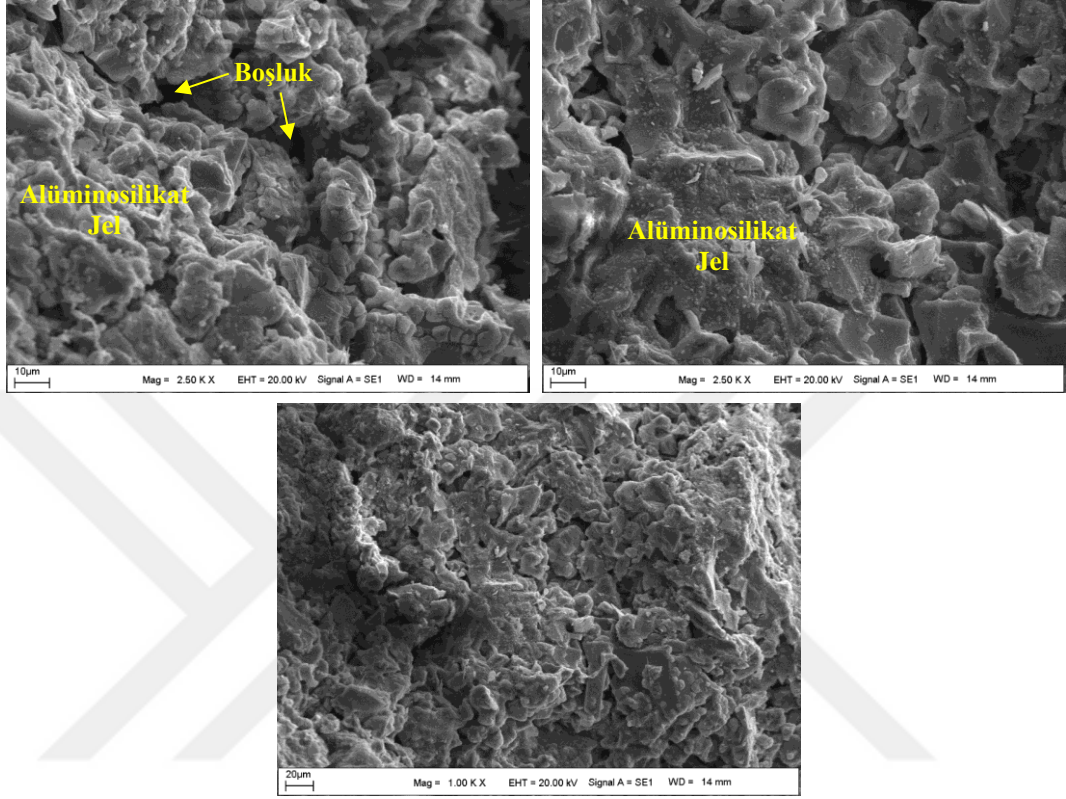
Şekil 4.25. 28 gün kür edilmiş ve AAC eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri

Çizelge 4.16. 28 gün kür edilmiş ve AAC eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q_{uUCS} (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değişirme ϵ_{cr} (%)
CDW-28g-AAÇ	2367.06	0.71
%5YFC-28g-AAÇ	4010.03	0.69
%10YFC-28g-AAÇ	11396.74	0.59
%15YFC-28g-AAÇ	14228.79	0.56
%20YFC-28g-AAÇ	20520.05	0.52
%25YFC-28g-AAÇ	18123.94	0.52
%30YFC-28g-AAÇ	16934.74	0.53

CDW içerisine eklenen YFC katkısı AAC ile kullanıldığında dayanım değerlerinin oldukça arttığı görülmüştür. Bu durumu daha detaylı yorumlayabilmek için %20YFC-28g-AAÇ test numunesi üzerinde SEM analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.26). %20YFC-28g-AAÇ numunesinin SEM gözlemleri, oldukça kompakt ve boşluksuz bir mikro yapı oluştuğunu göstermiştir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan tüm puzolanlar arasında en yüksek dayanım değerlerine sahip olan %20YFC-28g-AAÇ numunelerinin mikro yapısında oluşan yoğun alüminosilikat jellerinin gözlenmesi, dayanım-mikro yapı ilişkisini kanıtlar niteliktedir. Ancak, çok

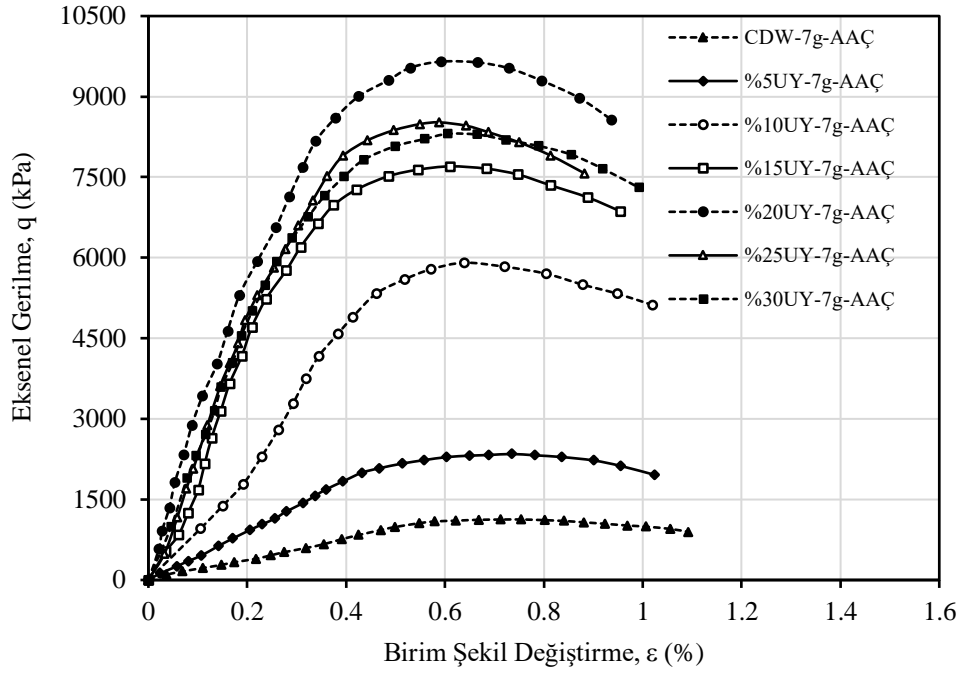
az miktarda da olsa gözlemlenen reaksiyona girmemiş YFC parçacıkları yüzünden, dayanım değeri %20 YFC oranına kadar artarak %20 YFC oranından sonra azalma eğilimi göstermiştir.



Şekil 4.26. %20YFC-28g-AAÇ test numunesine ait SEM görüntüleri

4.2.6 AAÇ Eklenmiş UY Katkılı Serbest Basınç Deneylerine ait Bulgular

UY katkı ve 7 gün kür edilmiş CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan serbest basınç deneyleri için oluşturulan ortalama aksenal gerilme (q)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Şekil 4.27’de hem Seri B hem de Seri H deneyleri görülmektedir. Ayrıca, serbest basınç deneyleri sonucu elde edilen q_{uUCS} değerleri Çizelge 4.17’de gösterilmiştir. AAÇ ile yapılan ve 7 gün kür edilmiş UY katkı serbest basınç deney sonuçlarına göre, AAÇ ile yapılan CDW numunesine göre UY katkısının tüm oranları için serbest basınç mukavemeti değerinin arttığı görülmüştür. Bu deneylerde, en yüksek serbest basınç mukavemeti değeri UY katkısının %20 oranında eklenmesi ile elde edilmiştir.

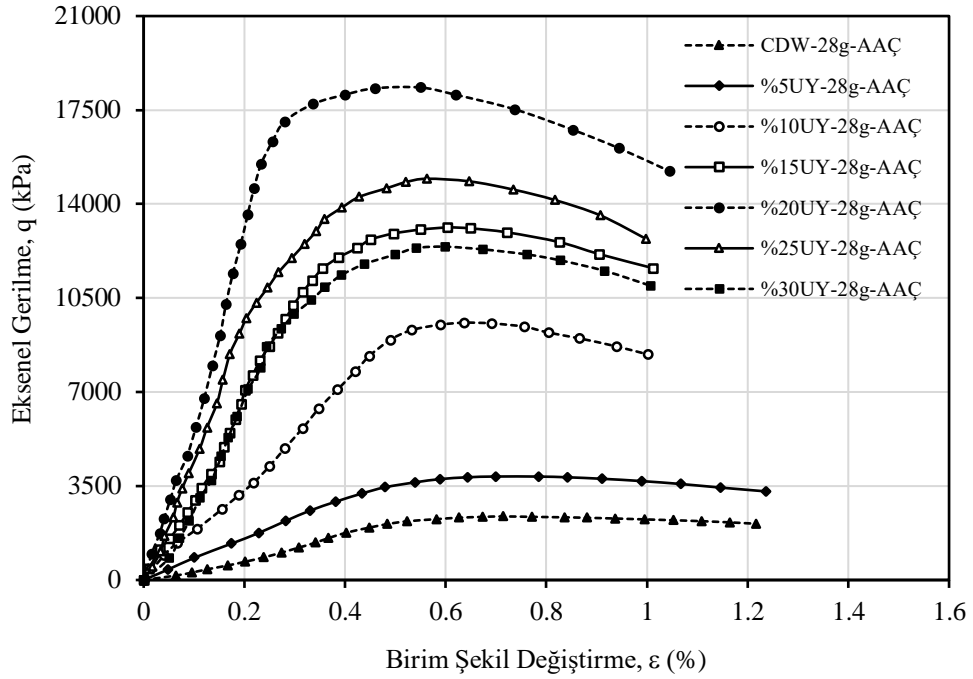


Şekil 4.27. 7 gün kür edilmiş ve AAC eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri

Çizelge 4.17. 7 gün kür edilmiş ve AAC eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q_{uUCS} (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değişirme ϵ_{cr} (%)
CDW-7g-AAÇ	1126.71	0.75
%5UY-7g-AAÇ	2345.74	0.74
%10UY-7g-AAÇ	5906.82	0.64
%15UY-7g-AAÇ	7701.09	0.61
%20UY-7g-AAÇ	9652.05	0.59
%25UY-7g-AAÇ	8520.27	0.59
%30UY-7g-AAÇ	8306.22	0.61

Farklı oranlarda UY eklenmiş ve 28 gün kür edilmiş CDW numunelerinin AAC ile yapılan serbest basınç deneylerine ait ortalama eksenel gerilme (q)-birim şekil değişirme (ϵ) eğrileri Şekil 4.28’de verilmiştir. Şekil 4.28’de Seri B ve Seri G deneyleri beraber sunulmuştur. Serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri ise Çizelge 4.18’de görülmektedir.



Şekil 4.28. 28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q-ε eğrileri

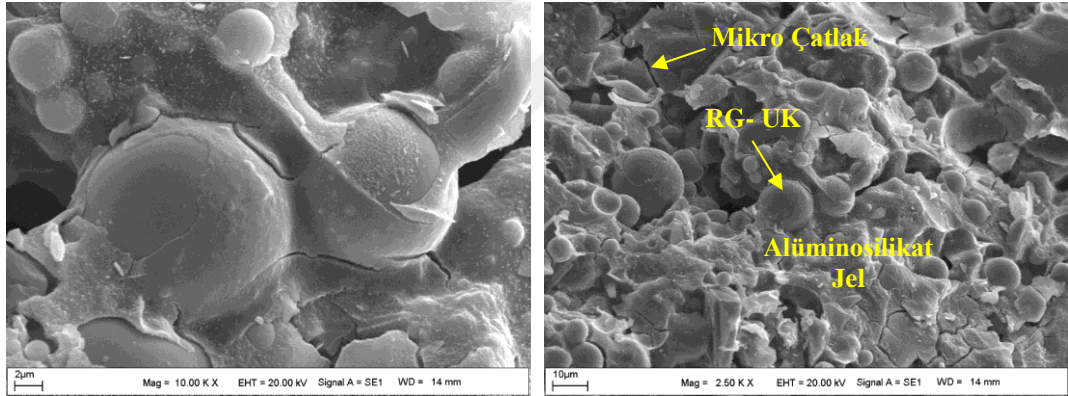
Çizelge 4.18. 28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin serbest basınç deneylerinden elde edilen q_{uUCS} değerleri

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q_{uUCS} (kPa)	Serbest Basınç Mukavemeti Değerindeki Birim Şekil Değişirme ϵ_{cr} (%)
CDW-28g-AAÇ	2367.06	0.71
%5UY-28g-AAÇ	3853.43	0.70
%10UY-28g-AAÇ	9580.40	0.64
%15UY-28g-AAÇ	13125.41	0.60
%20UY-28g-AAÇ	18339.08	0.55
%25UY-28g-AAÇ	14941.71	0.56
%30UY-28g-AAÇ	12410.53	0.60

AAÇ ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş UY katkılı serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde, UY katkısının tüm oranları için, AAÇ ile yapılan CDW numunesine kıyasla serbest basınç mukavemeti değerinin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, en yüksek serbest basınç mukavemeti değerinin %20 oranında UY eklenmesi ile elde edildiği belirlenmiştir. Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18 incelendiğinde, kür süresinin q_{uUCS} değerini artırdığı fakat ϵ_{cr} değerini azalttığı gözlemlenmiştir.

CDW içerisine eklenen UY katkısı AAÇ ile kullanıldığında dayanım değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu durumu daha detaylı yorumlayabilmek için

%20UY-28g-AAÇ test numunesi üzerinde SEM analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.29). %20UY-28g-AAÇ numunesinin SEM görüntülerine göre, %15UK-28g-AAÇ'ye nazaran daha yoğun bir alüminosilikat jel oluştuğu belirlenmiştir. Ancak, Şekil 4.29'daki SEM görüntülerine göre, reaksiyona girmemiş UK parçacıklarından dolayı %20UY-28g-AAÇ test numunesinin dayanım değerlerinin %20YFC-28g-AAÇ test numunesinden daha düşük çıktığı tahmin edilmektedir. Bu durumun laboratuvar koşullarında YFC'nin sahip olduğu yüksek CaO içeriğinden dolayı geopolimerizasyon hızının UK'ya göre oldukça yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Benzer şekilde, Hardjito (2005) tarafından yapılan çalışmada yüksek CaO içeriğine sahip olan ham maddenin polimerizasyon reaksiyonunu hızlandırarak daha yüksek dayanım ve hızlı priz süresine yol açtığı vurgulanmıştır. SEM görüntülerine göre, UK ve YFC ham maddelerinin, AAÇ ile reaksiyonu sonucunda oluşan jel yapısının, CDW numunesinde bulunan boşlukları doldurmak amacıyla kullanılan bir dolgu malzemesi gibi görev üstlendiği düşünülmüştür (Ekinci vd., 2019).



Şekil 4.29. %20UY-28g-AAÇ test numunesine ait SEM görüntüleri

4.2.7 Serbest Basınç Deneylerinin Kendi İçerisinde Kıyaslanması

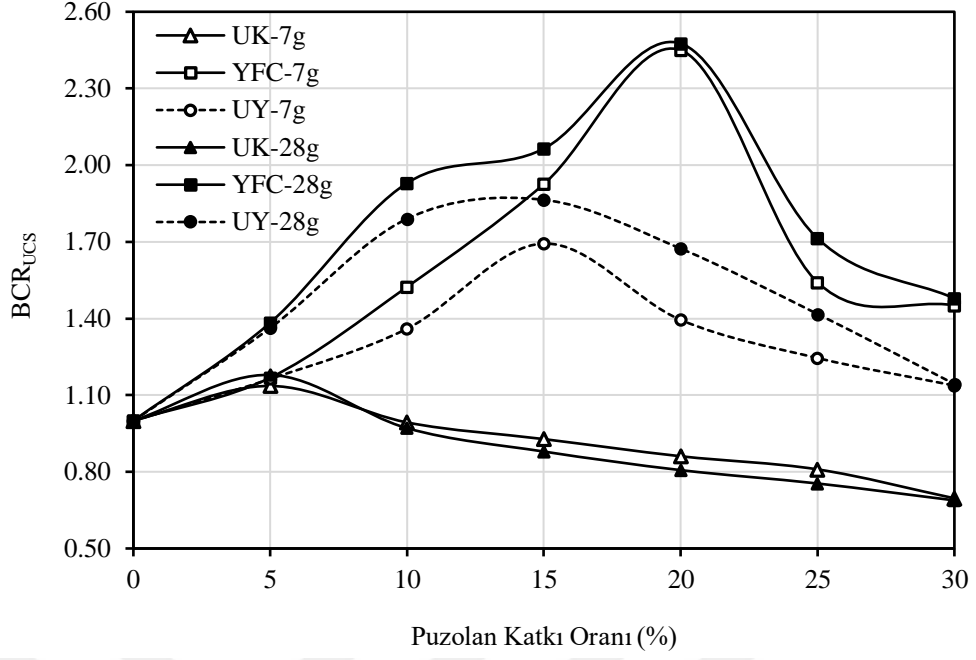
CDW içerisinde puzolan ve AAÇ katılmasının serbest basınç mukavemeti üzerinde meydana getirdiği iyileşmelerin derecelerini belirlemek amacıyla Binquet ve Lee (1975) tarafından önerilen taşıma kapasitesi oranı (BCR) tanımlanmıştır. Yapılan tüm serbest basınç deneylerinden elde edilen serbest basınç mukavemeti yorumlanırken bu eşitlik kullanılmıştır. Bunun için aşağıda belirtilen Denklem (4.1) tanımlanmıştır.

$$BCR_{UCS} = \frac{q_{uUCS}}{q_{uUCS0}} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de, “ q_{uUCS} ”, deneylerden elde edilen serbest basınç mukavemeti; “ q_{uUCS0} ”, su ile hazırlanan CDW test numunesinin serbest basınç mukavemeti değeridir. Su ile hazırlanan CDW test numunesinin BCR_{UCS} değeri 1 olarak hesaplanmıştır. BCR_{UCS} değerinin 1'den küçük olduğu durumlarda güçlendirme sağlanmamış, 1'den büyük olduğu durumlarda ise güçlendirme sağlanmıştır yorumu yapılabilmektedir. Hesaplanan BCR_{UCS} değeri 1 değerinden ne kadar büyükse serbest basınç mukavemetine katkısı o kadar iyi demektir.

Şekil 4.30'da 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda gerçekleştirilen Seri C, Seri D ve Seri E (su kullanılarak farklı oranlarda puzolan katkıları ile yapılan deneyler) serbest basınç deneyleri sonucu hesaplanan BCR_{UCS} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişim eğrileri gösterilmiştir. Ayrıca, hesaplanan BCR_{UCS} değerleri Çizelge 4.19'da sunulmuştur. Şekil 4.30 ve Çizelge 4.19'da açıkça görüldüğü gibi aşağıdaki yorumlar yapılmıştır:

- Tüm deneylerde genel itibari ile kür süresi güçlendirme oranını artırmıştır.
- En efektif katkının YFC en verimsiz katkının ise UK olduğu görülmüştür.
- UY katkısının güçlendirme oranının UK'ya göre YFC'ninkine daha yakın olduğu belirlenmiştir.
- UK katkısının %5 oranı için güçlendirme sağlanırken %5'ten sonra eklenen UK oranları için güçlendirme sağlanmamıştır. Ayrıca %5'ten sonra UK oranı arttıkça güçlendirme oranı giderek azalmıştır.
- YFC'nin tüm katkı oranları için güçlendirme sağlanmıştır. En iyi güçlendirme %20 oranında YFC katkısı eklendiği durumda sağlanmıştır. Eklenen YFC katkısı %20 oranından itibaren hem arttıkça hem de azaldıkça güçlendirme oranının giderek azaldığı görülmüştür.
- UY'nin tüm katkı oranları için güçlendirme sağlanmıştır. En iyi güçlendirme %15 oranında UY katkısı eklendiği durumda sağlanmıştır. Eklenen UY katkısı %15 oranından itibaren hem arttıkça hem de azaldıkça güçlendirme oranının giderek azaldığı belirlenmiştir.

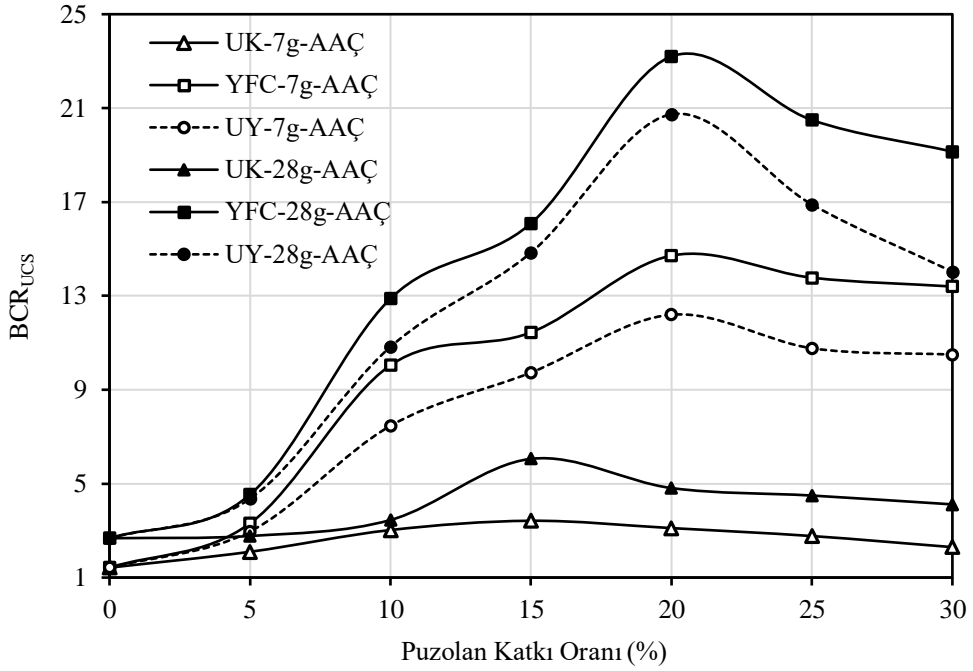


Şekil 4.30. Seri C, Seri D ve Seri E serbest basınç deneyleri için BCR_{UCS} değerlerinin farklı pozolan katkı oranları ile değişimi

Çizelge 4.19. Seri C, Seri D ve Seri E serbest basınç deneyleri için BCR_{UCS} değerleri

Test Numunesi	BCR_{UCS}	Test Numunesi	BCR_{UCS}
CDW-7g	1.00	CDW-28g	1.00
%5UK-7g	1.14	%5UK-28g	1.18
%10UK-7g	0.99	%10UK-28g	0.97
%15UK-7g	0.93	%15UK-28g	0.88
%20UK-7g	0.86	%20UK-28g	0.81
%25UK-7g	0.81	%25UK-28g	0.75
%30UK-7g	0.70	%30UK-28g	0.69
%5YFC-7g	1.17	%5YFC-28g	1.38
%10YFC-7g	1.52	%10YFC-28g	1.93
%15YFC-7g	1.93	%15YFC-28g	2.06
%20YFC-7g	2.45	%20YFC-28g	2.48
%25YFC-7g	1.54	%25YFC-28g	1.71
%30YFC-7g	1.45	%30YFC-28g	1.48
%5UY-7g	1.16	%5UY-28g	1.36
%10UY-7g	1.36	%10UY-28g	1.79
%15UY-7g	1.69	%15UY-28g	1.86
%20UY-7g	1.39	%20UY-28g	1.67
%25UY-7g	1.25	%25UY-28g	1.42
%30UY-7g	1.14	%30UY-28g	1.14

Şekil 4.31’de 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda gerçekleştirilen Seri F, Seri G ve Seri H (AAÇ kullanılarak farklı oranlarda puzolan katkıları ile yapılan deneyler) serbest basınç deneyleri sonucu hesaplanan BCR_{UCS} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişim eğrileri sunulmuştur. Ayrıca, hesaplanan BCR_{UCS} değerleri ise Çizelge 4.20’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.31. Seri F, Seri G ve Seri H serbest basınç deneyleri için BCR_{UCS} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişimi

Şekil 4.31 ve Çizelge 4.20’de açıkça görüldüğü gibi aşağıdaki yorumlar yapılmıştır:

- Tüm deneylerde genel itibarı ile kür süresi güçlendirme oranını artırmıştır.
- En efektif katkının YFC en verimsiz katkının ise UK olduğu görülmüştür.
- UY katkısının güçlendirme oranının UK’ya göre YFC’ninkine daha yakın olduğu belirlenmiştir.
- UK’nın tüm katkı oranları için güçlendirme sağlanmıştır. En iyi güçlendirme %15 oranında UK katkısı eklendiği durumda elde

edilmiştir. Eklenen UK katkısı %15 oranından itibaren hem arttıkça hem de azaldıkça güçlendirme oranının giderek azaldığı görülmüştür.

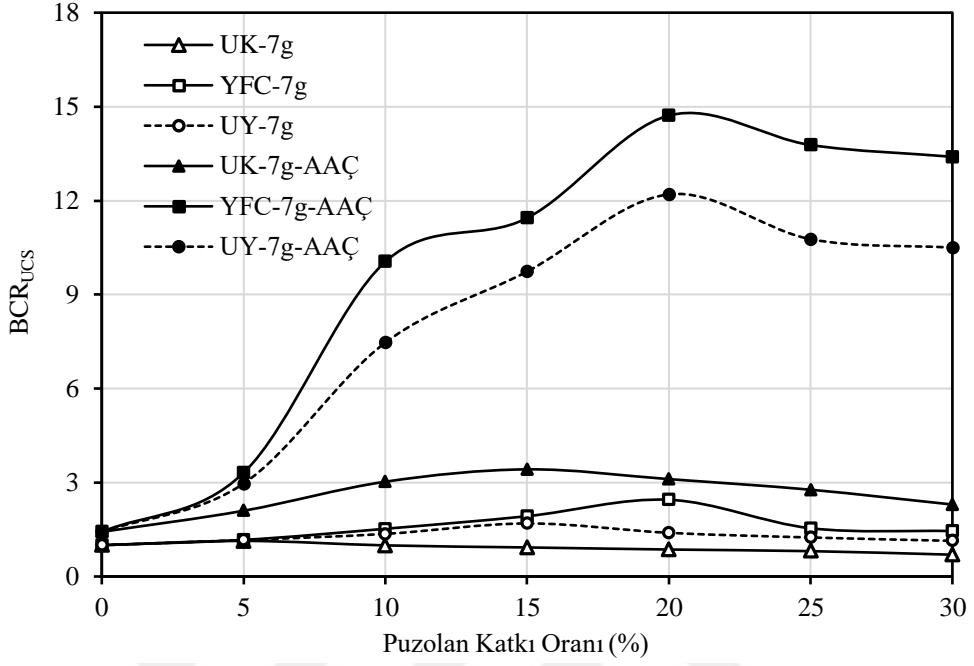
- YFC'nin tüm katkı oranları için güçlendirme sağlanmıştır. En iyi güçlendirme %20 oranında YFC katkısı eklendiği durumda sağlanmıştır. Eklenen YFC katkısı %20 oranından itibaren hem arttıkça hem de azaldıkça güçlendirme oranının giderek azaldığı görülmüştür.
- UY'nin tüm katkı oranları için güçlendirme sağlanmıştır. En iyi güçlendirme %20 oranında UY katkısı eklendiği durumda sağlanmıştır. Eklenen UY katkısı %20 oranından itibaren hem arttıkça hem de azaldıkça güçlendirme oranının giderek azaldığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.20. Seri F, Seri G ve Seri H serbest basınç deneyleri için BCR_{UCS} değerleri

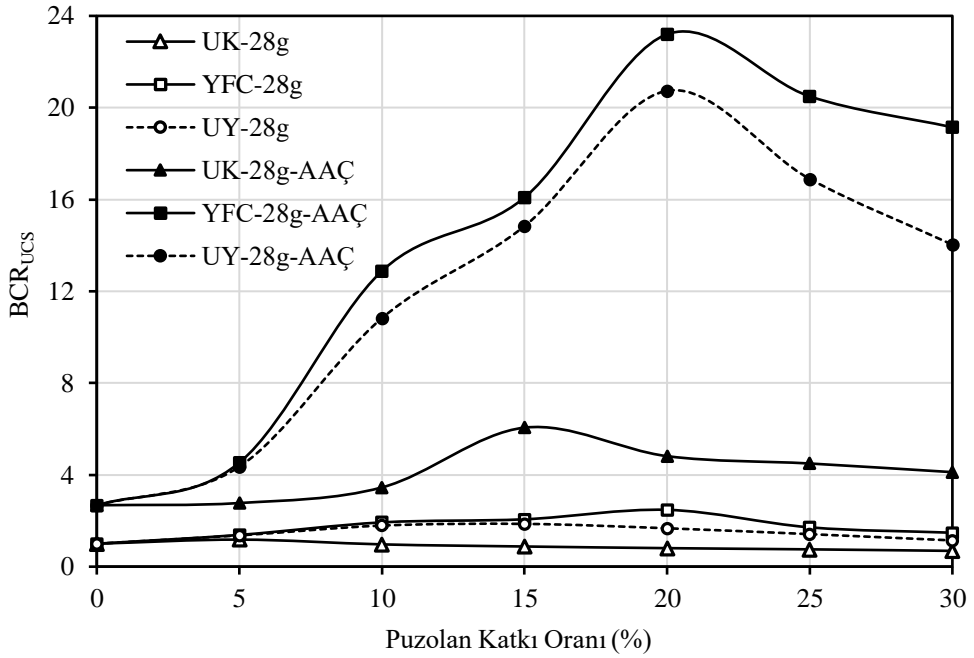
Test Numunesi	BCR_{UCS}	Test Numunesi	BCR_{UCS}
CDW-7g-AAÇ	1.42	CDW-28g-AAÇ	2.68
%5UK-7g-AAÇ	2.10	%5UK-28g-AAÇ	2.77
%10UK-7g-AAÇ	3.03	%10UK-28g-AAÇ	3.45
%15UK-7g-AAÇ	3.42	%15UK-28g-AAÇ	6.06
%20UK-7g-AAÇ	3.11	%20UK-28g-AAÇ	4.81
%25UK-7g-AAÇ	2.77	%25UK-28g-AAÇ	4.49
%30UK-7g-AAÇ	2.30	%30UK-28g-AAÇ	4.12
%5YFC-7g-AAÇ	3.31	%5YFC-28g-AAÇ	4.53
%10YFC-7g-AAÇ	10.05	%10YFC-28g-AAÇ	12.89
%15YFC-7g-AAÇ	11.44	%15YFC-28g-AAÇ	16.09
%20YFC-7g-AAÇ	14.72	%20YFC-28g-AAÇ	23.20
%25YFC-7g-AAÇ	13.78	%25YFC-28g-AAÇ	20.49
%30YFC-7g-AAÇ	13.40	%30YFC-28g-AAÇ	19.15
%5UY-7g-AAÇ	2.96	%5UY-28g-AAÇ	4.36
%10UY-7g-AAÇ	7.47	%10UY-28g-AAÇ	10.83
%15UY-7g-AAÇ	9.73	%15UY-28g-AAÇ	14.84
%20UY-7g-AAÇ	12.20	%20UY-28g-AAÇ	20.73
%25UY-7g-AAÇ	10.77	%25UY-28g-AAÇ	16.89
%30UY-7g-AAÇ	10.50	%30UY-28g-AAÇ	14.03

Şekil 4.32'de 7 günlük Şekil 4.33'te 28 günlük kür süresi sonunda gerçekleştirilen Seri C, Seri D ve Seri E (su kullanılarak farklı oranlarda puzolan katkıları ile yapılan deneyler) ile Seri F, Seri G ve Seri H (AAÇ kullanılarak farklı oranlarda puzolan katkıları ile yapılan deneyler) serbest basınç deneyleri sonucu hesaplanan BCR_{UCS} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişim eğrileri sunulmuştur. Böylece AAÇ katkısının serbest basınç mukavemeti üzerine etkisi daha

net şekilde görülmüştür. Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te görüldüğü üzere AAÇ katkısı her test numunesinde önemli derecede güçlendirme sağlamıştır.



Şekil 4.32. 7 gün kür sonunda yapılan tüm serbest basınç deneyleri için BCR_{UCS} değerlerinin farklı pozolan katkı oranları ile değişimi



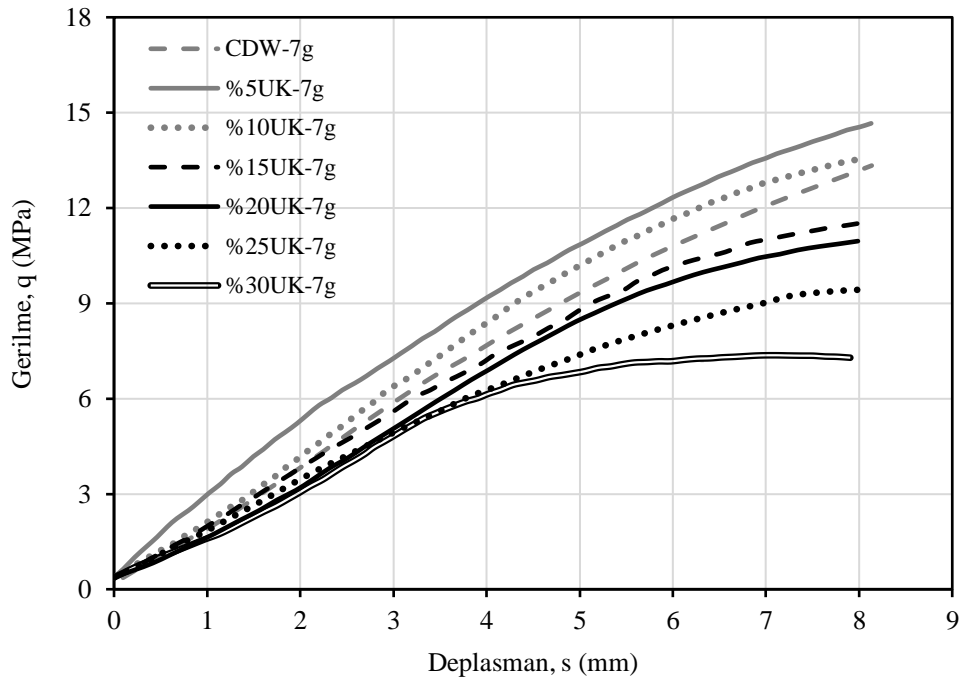
Şekil 4.33. 28 gün kür sonunda yapılan tüm serbest basınç deneyleri için BCR_{UCS} değerlerinin farklı pozolan katkı oranları ile değişimi

4.3 CBR Deneylerine ait Bulguların Değerlendirilmesi

CBR deneyleri ile farklı oranlardaki puzolan katkıların ve AAÇ'nin varlığının yük-deformasyon davranışına ve belirli oturma oranları için hesaplanan CBR değerlerine etkisi araştırılmıştır.

4.3.1 UK Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UK eklenmiş ve 7 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.34'te gösterilmiştir. Şekil 4.34'te Seri A ve Seri C deney sonuçlarına ait eğriler birlikte verilmiştir. CBR deneylerinden 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ortalama CBR değerleri Çizelge 4.21'de sunulmuştur.



Şekil 4.34. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

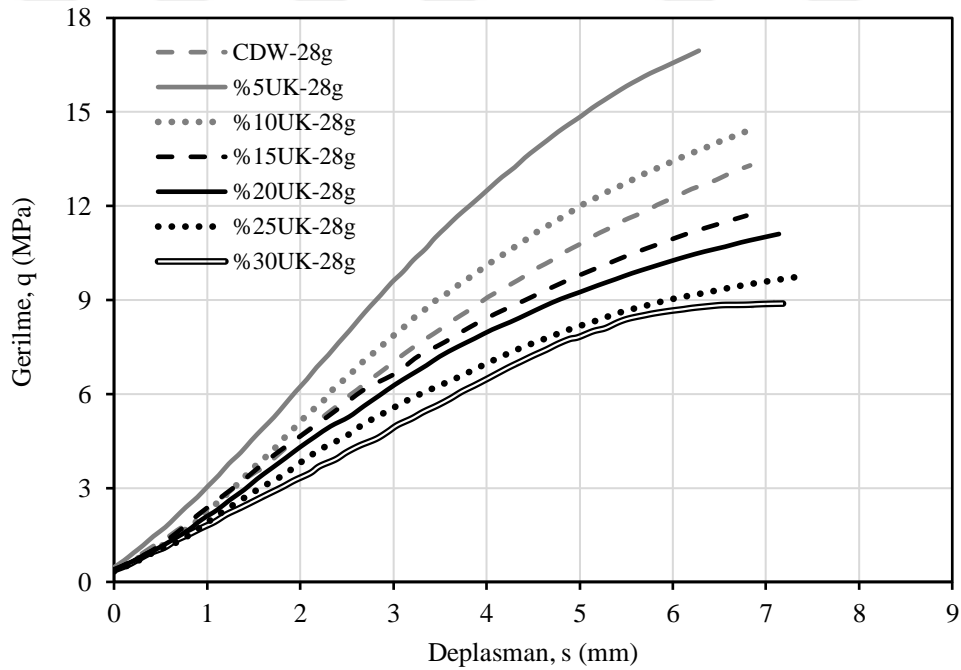
Su ile yapılan ve 7 gün kür edilmiş UK katkı CBR deney sonuçları incelendiğinde, %5 oranında uçucu kül katkısının en yüksek CBR değerini oluşturduğu belirlenmiştir. %5 katkı oranından sonra UK oranı arttıkça CBR değeri azalma göstermiştir. %10 katkı oranından sonra CBR değerlerinin katkısız CDW'ye

kıyasla daha az olduğu görülmüştür. Çizelge 4.21 incelendiğinde CBR değerlerinin 5 mm’de oluştuğu görülmüştür.

Çizelge 4.21. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-7g	70.10	90.59
%5UK-7g	92.02	105.36
%10UK-7g	76.16	98.95
%15UK-7g	68.15	85.43
%20UK-7g	59.71	82.35
%25UK-7g	60.94	71.67
%30UK-7g	56.88	66.36

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UK eklenmiş ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.35’te sunulmuştur. Şekil 4.35’te Seri A ve Seri C deney sonuçlarına ait eğriler birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.35. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

CBR deneylerinden 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ortalama CBR değerleri Çizelge 4.22’de sunulmuştur. Su ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş UK katkılı CBR deney sonuçları incelendiğinde, %5 oranında uçucu kül katkısının en yüksek CBR değerini oluşturduğu tespit edilmiştir. %5 katkı oranından sonra UK oranı arttıkça CBR değeri azalmıştır. %10 katkı oranından sonra CBR değerlerinin katkısız CDW’ye göre daha az olduğu görülmüştür. Çizelge 4.22’de açıkça görüldüğü gibi CBR değerleri 5 mm’de oluşmaktadır.

Çizelge 4.22. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UK eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

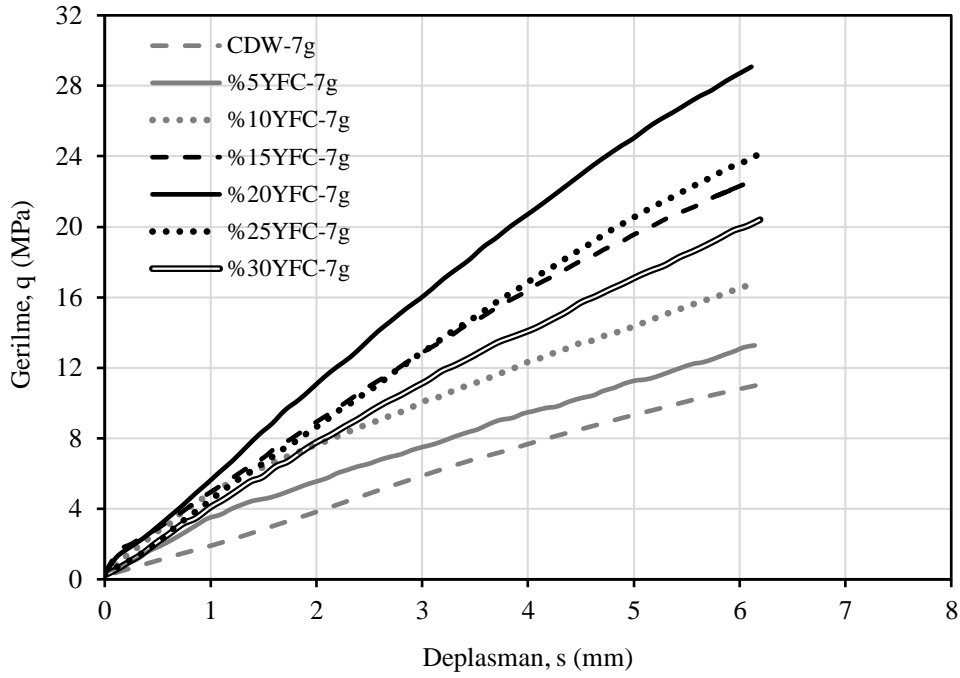
Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-28g	85.36	104.67
%5UK-28g	114.89	144.06
%10UK-28g	94.79	116.44
%15UK-28g	83.06	95.08
%20UK-28g	75.85	89.82
%25UK-28g	67.69	79.34
%30UK-28g	60.06	76.05

Su ve UK katkılı CDW için yapılan CBR deneylerinde CBR değerlerinin çok az arttığı görülmüştür. CDW-28g ve %5UK-28g test numuneleri üzerinde yapılan SEM analizlerine bakıldığında (Şekil 4.12 ve Şekil 4.13) serbest basınç deneylerinde yapılan yorumlara benzer yorumlar yapılabilir. CDW içinde reaksiyona girmemiş çimento parçacıklarının reaksiyona girmesinin, CDW test numunesinde, 28 gün sonunda, bir miktar CBR değeri artmasına yol açtığı düşünülmektedir. Ayrıca, %5UK-28g test numunesine ait mikro yapı gözlemlerinde çok sayıda reaksiyona girmemiş UK (RG-UK) parçacığının varlığı görüldüğünden ve test numunesi içinde ince malzeme miktarı arttığından CBR değerlerinin artmadığı düşünülmektedir.

4.3.2 YFC Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) YFC eklenmiş ve 7 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.36’da görüldüğü gibidir. Şekil 4.36’da Seri A ve Seri D deney sonuçlarına ait eğriler birlikte verilmiştir. CBR deneylerinden 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ortalama CBR değerleri Çizelge 4.23’te gösterilmiştir. Su ile yapılan ve 7 gün kür edilmiş YFC katkılı

CBR deney sonuçlarına göre, tüm YFC oranlarının CBR değerini artırdığı, %20 oranında YFC'nin ise en yüksek CBR değerini oluşturduğu görülmüştür. Katkisız CDW'den %20 katkı oranına kadar katkı oranı arttıkça CBR değerinin arttığı, %20 katkı oranından sonra katkı oranı arttıkça CBR değerinin azaldığı görülmüştür. CBR değerlerinin 5 mm'de olduğu Çizelge 4.23'te açıkça görülmektedir.



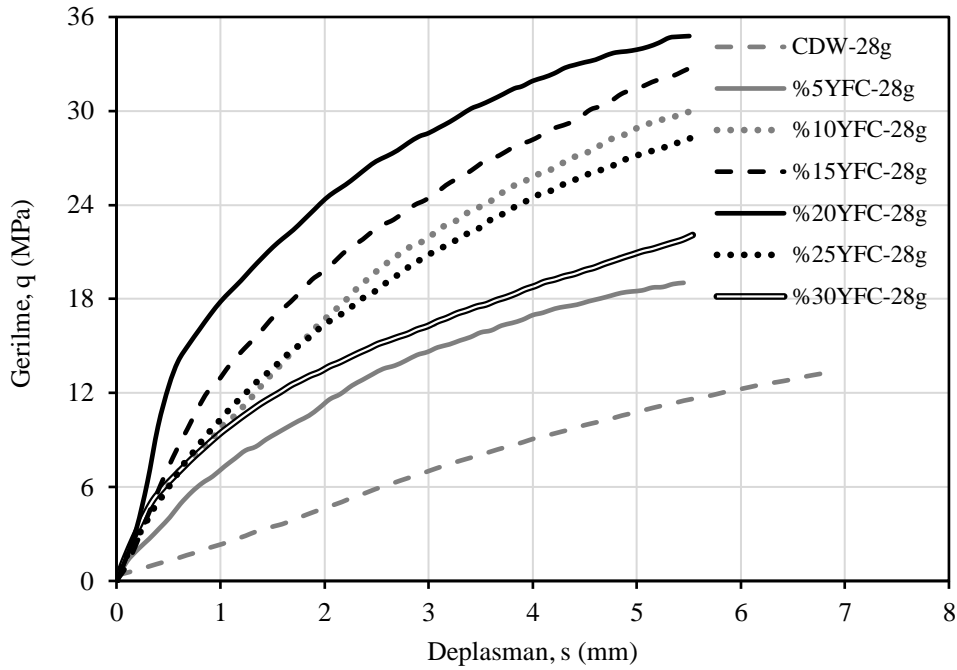
Şekil 4.36. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

Çizelge 4.23. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-7g	70.10	90.59
%5YFC-7g	95.02	109.28
%10YFC-7g	127.97	139.55
%15YFC-7g	158.83	189.90
%20YFC-7g	197.20	242.99
%25YFC-7g	155.33	199.46
%30YFC-7g	137.60	166.00

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) YFC eklenmiş ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.37'de sunulmuştur. Şekil

4.37’de Seri A ve Seri D deney sonuçlarına ait eğriler bir arada gösterilmiştir. CBR deneyleri sonunda 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ortalama CBR değerleri Çizelge 4.24’te verilmiştir. Su ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş YFC katkılı CBR deney sonuçlarına göre, tüm YFC katkı oranlarının CBR değerini artırdığı, %20 oranında YFC katkısının ise en yüksek CBR değerini oluşturduğu tespit edilmiştir. Katkisız CDW’den %20 katkı oranına kadar katkı oranı arttıkça CBR değerinin arttığı, %20 katkı oranından sonra katkı oranı arttıkça CBR değerinin azaldığı belirlenmiştir. CBR değerlerinin 2.5 mm’de olduğu Çizelge 4.24’te açıkça görülmektedir.



Şekil 4.37. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

Çizelge 4.24. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda YFC eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

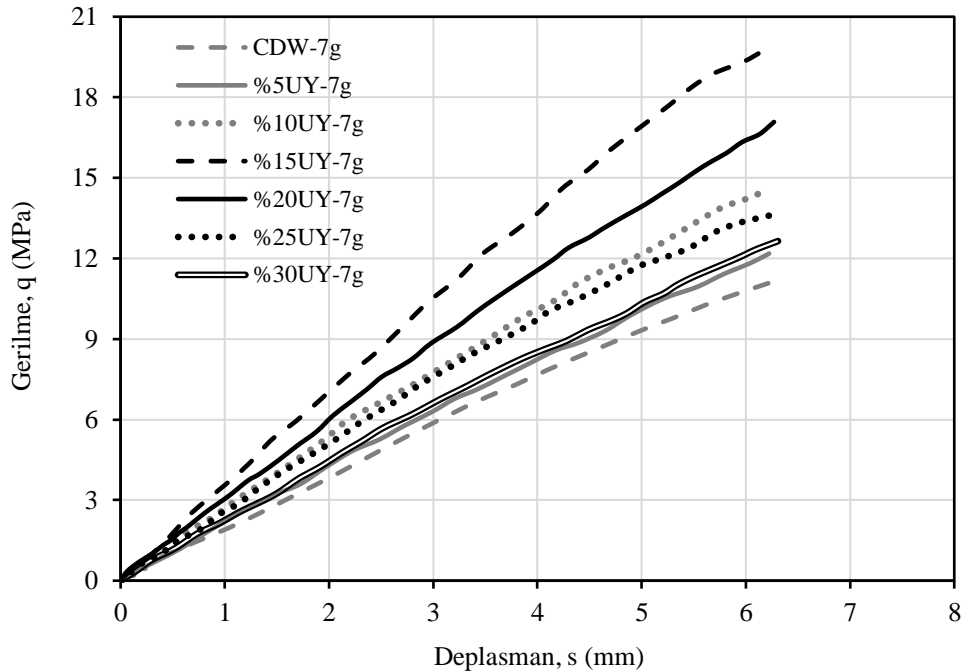
Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-28g	85.36	104.67
%5YFC-28g	193.15	179.97
%10YFC-28g	286.60	280.57
%15YFC-28g	325.99	305.29
%20YFC-28g	388.46	329.29
%25YFC-28g	269.20	263.64
%30YFC-28g	218.66	203.22

Test numuneleri 28 gün boyunca YFC katkısı nedeniyle sertleştiğinden CBR deneylerinde daha rijit bir davranış gözlemlenmiş (özellikle başlangıç kısmında), bu durumun CBR değerlerini 2.5 mm’de oluşturduğu kanısına varılmıştır.

YFC ve su eklenen CDW numunelerinde CBR değerlerinin arttığı görülmüştür. %20YFC-28g test numunesi üzerinde yapılan SEM analizinde (Şekil 4.16) matriste yoğun bir jel oluşumu gözlemlenmiştir. Bu durum, CBR değerlerinin neden arttığını açıklamaktadır. Bununla birlikte, mikro yapıda az sayıda reaksiyona girmemiş YFC (RG-YFC) parçacığı gözlemlendiğinden, %20 oranına kadar YFC eklenmesinin CBR değerini artırdığı, bu orandan sonra reaksiyona girmeyen YFC parçacığının artmasıyla CBR değerinin azaldığı tahmin edilmektedir.

4.3.3 UY Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UY eklenmiş ve 7 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.38’de gösterilmiştir. Şekil 4.38’de Seri A ve Seri E deney sonuçlarına ait eğriler birlikte gösterilerek yorumlanmıştır.



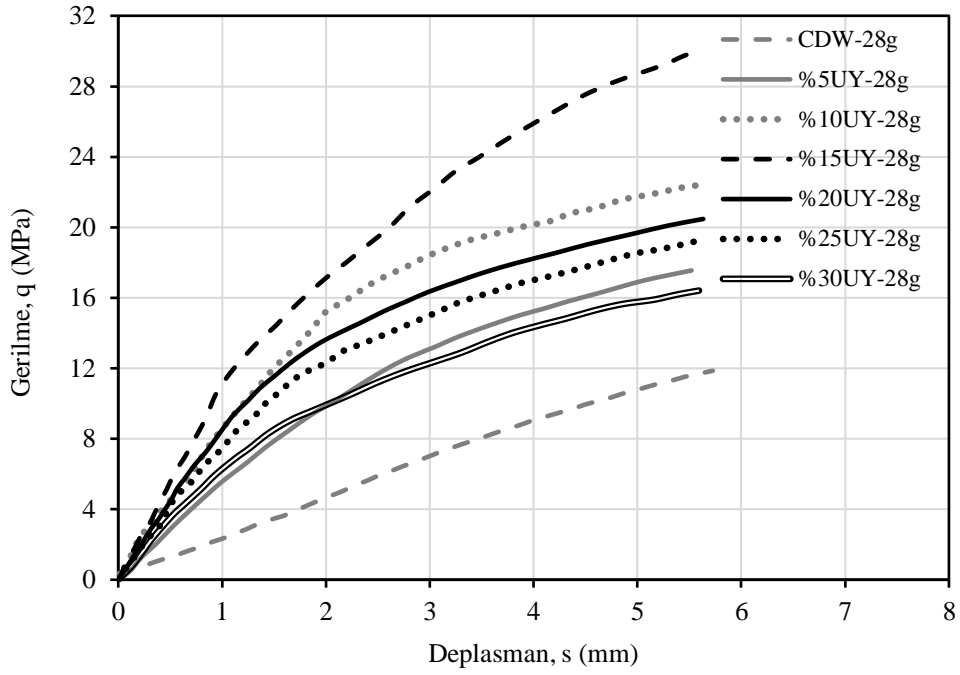
Şekil 4.38. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

CBR deneyleri sonucunda 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ortalama CBR değerleri ise Çizelge 4.25'te sunulmuştur. Su ile yapılan ve 7 gün kür edilmiş UY katkılı CBR deney sonuçlarına göre, tüm UY katkı oranlarının CBR değerini artırdığı, %15 oranında UY katkısının ise en yüksek CBR değerini oluşturduğu belirlenmiştir. Katkisız CDW'den %15 katkı oranına kadar katkı oranı arttıkça CBR değerinin arttığı, %15 katkı oranından sonra katkı oranı arttıkça CBR değerinin azaldığı görülmüştür. CBR değerlerinin 5 mm'de olduğu Çizelge 4.25'te açıkça görülmektedir.

Çizelge 4.25. 7 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-7g	70.10	90.59
%5UY-7g	76.73	92.68
%10UY-7g	96.58	118.19
%15UY-7g	125.79	164.34
%20UY-7g	109.72	135.30
%25UY-7g	92.15	113.98
%30UY-7g	81.82	100.10

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UY eklenmiş ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin su ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.39'da verilmiştir. Şekil 4.39'da Seri A ve Seri E deney sonuçlarına ait eğriler birlikte sunulmaktadır. CBR deneyleri sonucunda 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ortalama CBR değerleri ise Çizelge 4.26'da gösterilmiştir. Su ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş UY katkılı CBR deney sonuçları incelendiğinde, bütün UY katkı oranları için CBR değerinin arttığı, %15 oranında UY katkısının ise en yüksek CBR değerini oluşturduğu tespit edilmiştir. Katkisız CDW'den %15 katkı oranına kadar katkı oranı arttıkça CBR değerinin arttığı, %15 katkı oranından sonra ise katkı oranı arttıkça CBR değerinin azaldığı belirlenmiştir. Çizelge 4.26'da açıkça görüldüğü gibi CBR değerlerinin 2.5 mm'de olduğu görülmüştür. Test numuneleri 28 gün boyunca UY katkısı nedeniyle sertleştiğinden CBR deneylerinde daha rijit bir davranış gözlemlenmiş, bu durumun CBR değerlerini 2.5 mm'de oluşturduğu kanısına varılmıştır.



Şekil 4.39. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY eklenmiş CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

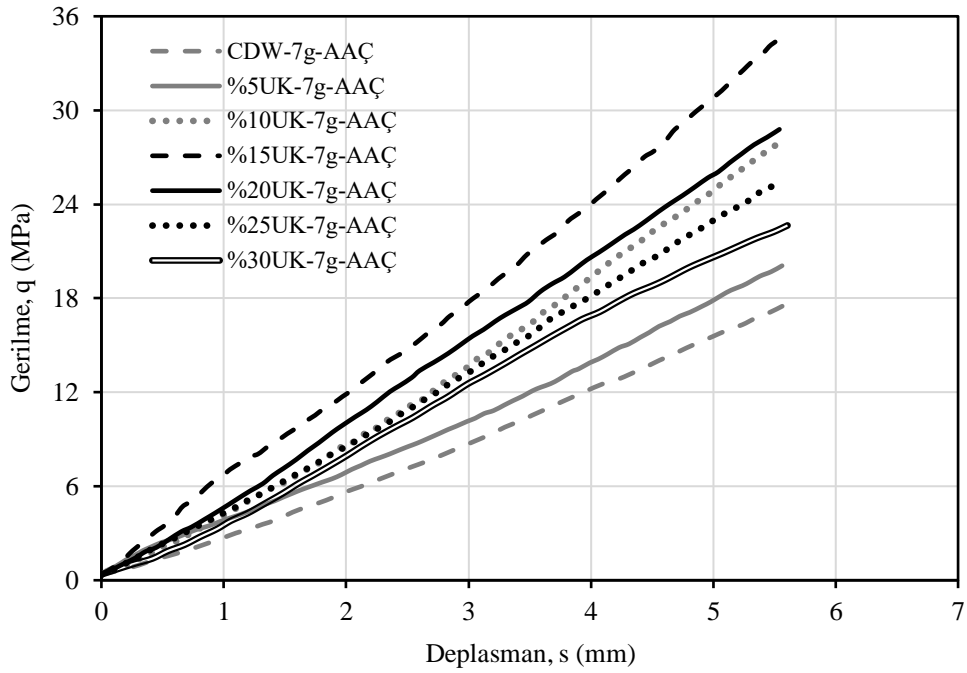
Çizelge 4.26. 28 gün kür edilmiş farklı oranlarda UY eklenmiş CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-28g	85.36	104.67
%5UY-28g	169.06	163.88
%10UY-28g	246.17	210.97
%15UY-28g	282.01	278.66
%20UY-28g	218.31	191.15
%25UY-28g	199.38	179.94
%30UY-28g	162.44	153.02

CDW içerisine eklenen UY katkısı su ile kullanıldığında CBR değerlerinin arttığı görülmüştür. %15UY-28g test numunesi üzerinde yapılan SEM analizlerine bakıldığında (Şekil 4.19) bu durumu desteklemektedir. %15UY-28g numunesinin SEM gözlemlerinde reaksiyona girmemiş puzolan tanelerinin olduğu belirlenmiştir. Bu durumun, CBR değerlerini %15 katkı oranına kadar artırıp sonra azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. %15UY-28g numunesinin, %5UK-28g numunesine göre daha yoğun ve boşluksuz bir mikro yapıya sahip olması, CBR deneylerinden elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.

4.3.4 AAÇ Eklenmiş UK Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UK eklenmiş ve 7 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.40'da görüldüğü gibidir. Şekil 4.40'da Seri B ve Seri F deney sonuçlarına ait eğriler birlikte sunulmuştur. CBR deneyleri sonucunda 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ortalama CBR değerleri ise Çizelge 4.27'de gösterilmiştir. AAÇ ile yapılan ve 7 gün kür edilmiş UK katkılı CBR deney sonuçlarına göre, tüm UK katkı oranlarının CBR değerini artırdığı, %15 oranında UK katkısının ise en yüksek CBR değerini oluşturduğu görülmüştür. Katkisız CDW'den %15 katkı oranına kadar UK katkı oranı arttıkça CBR değerinin arttığı, %15 katkı oranından sonra UK katkı oranı arttıkça CBR değerinin azaldığı belirlenmiştir. CBR değerlerinin 5 mm'de olduğu Çizelge 4.27'de açıkça görülmektedir.

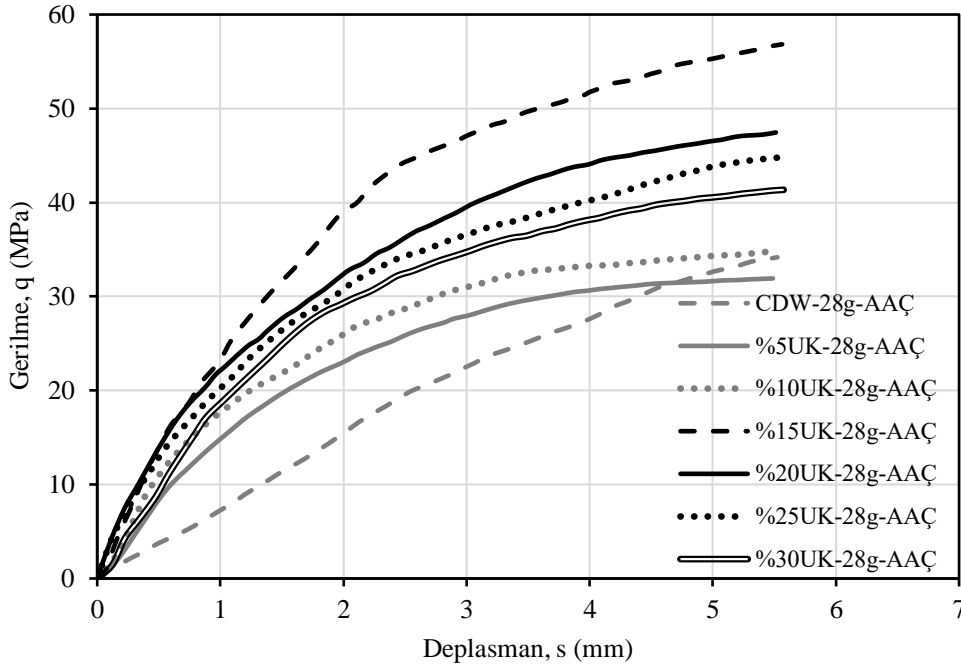


Şekil 4.40. 7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

Çizelge 4.27. 7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-7g-AAÇ	103.39	151.22
%5UK-7g-AAÇ	123.39	173.50
%10UK-7g-AAÇ	159.78	241.64
%15UK-7g-AAÇ	213.63	299.20
%20UK-7g-AAÇ	184.79	251.34
%25UK-7g-AAÇ	157.23	222.98
%30UK-7g-AAÇ	147.90	200.30

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UK eklenmiş ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.41’de görülmüştür. Şekil 4.41’de Seri B ve Seri F deney sonuçlarına ait eğriler birlikte verilmiştir. CBR deneyleri sonucunda 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ortalama CBR değerleri ise Çizelge 4.28’de sunulmuştur.



Şekil 4.41. 28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

AAÇ ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş UK katkılı CBR deney sonuçlarına göre, tüm UK katkı oranları CBR değerini artırmıştır. Bununla birlikte, en yüksek CBR

değeri % 15 oranında UK katkısı eklendiğinde elde edilmiştir. Katkısız CDW'den %15 katkı oranına kadar UK katkı oranı arttıkça CBR değerinin arttığı, %15 katkı oranından sonra UK katkı oranı arttıkça CBR değerinin azaldığı görülmüştür. CBR değerlerinin 2.5 mm'de olduğu Çizelge 4.28'de açıkça görülmektedir. Test numuneleri 28 gün boyunca UK katkısı ve AAÇ eklenmesi nedeniyle sertleştiğinden CBR deneylerinde daha rijit bir davranış gözlemlenmiş, bu durumun CBR değerlerini 2.5 mm'de oluşturduğu kanısına varılmıştır.

Çizelge 4.28. 28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UK katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

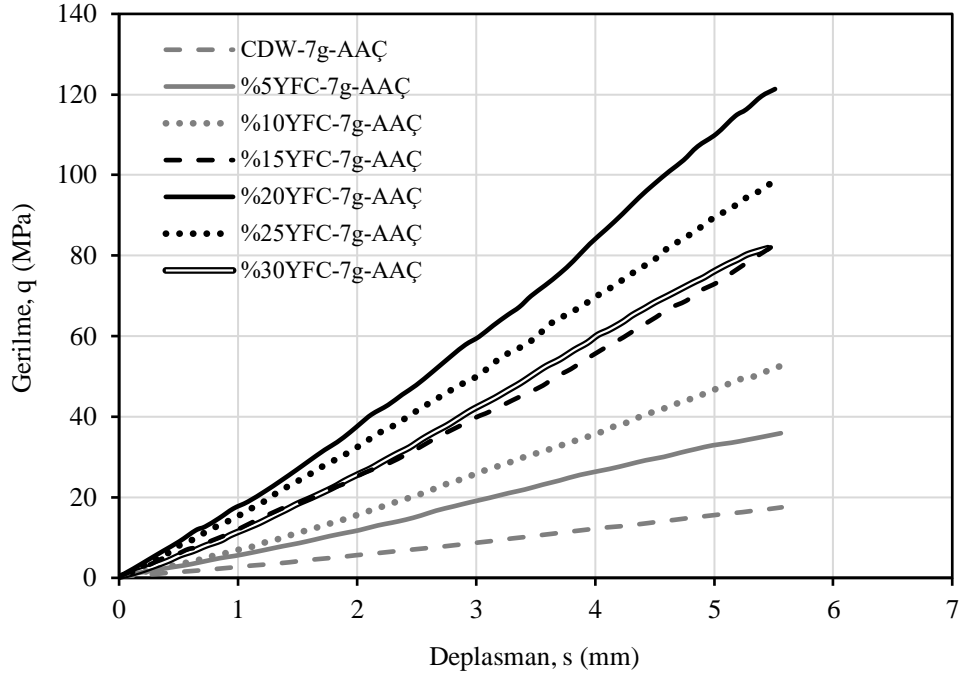
Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-28g-AAÇ	283.45	316.76
%5UK-28g-AAÇ	374.81	307.08
%10UK-28g-AAÇ	415.91	333.16
%15UK-28g-AAÇ	641.90	536.88
%20UK-28g-AAÇ	525.16	451.95
%25UK-28g-AAÇ	497.19	425.57
%30UK-28g-AAÇ	470.54	393.70

%15UK-28g-AAÇ test numunesinin SEM analizi sonucu oluşan görüntülerine göre (Şekil 4.23), belirgin bir alüminosilikat jel oluşumu ve çok sayıda reaksiyona girmemiş UK tanelerinin varlığın gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, UK ve AAÇ kullanımının CBR değerini artırmasını desteklemektedir. Ancak, reaksiyona girmemiş UK parçacıklarından dolayı, CBR değerinin %15 UK oranına kadar arttığı, %15 UK oranından sonra azaldığı düşünülmektedir.

4.3.5 AAÇ Eklenmiş YFC Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) YFC eklenmiş ve 7 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.42'de verilmiştir. Şekil 4.42'de Seri B ve Seri G deney sonuçlarına ait eğriler bir arada gösterilmiştir. CBR deneyleri sonucunda 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ortalama CBR değerleri ise Çizelge 4.29'da sunulmuştur. AAÇ ile yapılan ve 7 gün kür edilmiş YFC katkılı CBR deney sonuçlarına göre, tüm YFC katkı oranları CBR değerini artırmıştır. En yüksek CBR değeri ise %20 oranında YFC katkısı eklendiği durumda elde edilmiştir. Katkısız CDW'den %20 katkı oranına kadar YFC katkı oranı arttıkça CBR değerinin

arttığı, %20 katkı oranından sonra YFC katkı oranı arttıkça CBR değerinin azaldığı görülmüştür. Çizelge 4.29’da açıkça görüldüğü gibi CBR değerleri 5 mm’de oluşmaktadır.



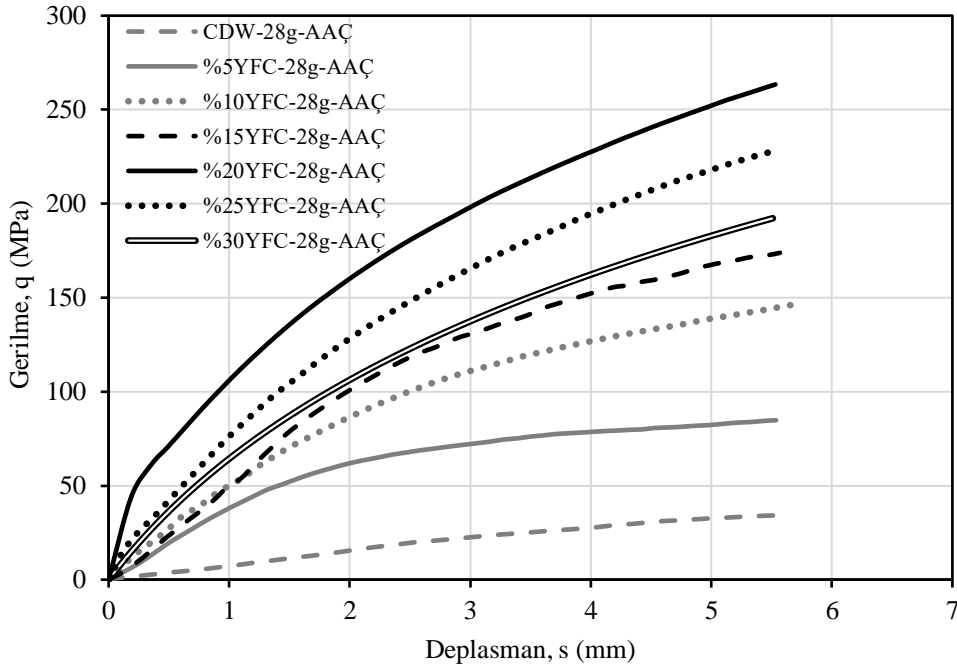
Şekil 4.42. 7 gün kür edilmiş ve AAC eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

Çizelge 4.29. 7 gün kür edilmiş ve AAC eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-7g-AAC	103.39	151.22
%5YFC-7g-AAC	219.98	319.98
%10YFC-7g-AAC	296.84	453.62
%15YFC-7g-AAC	463.73	708.25
%20YFC-7g-AAC	694.53	1066.87
%25YFC-7g-AAC	600.66	868.89
%30YFC-7g-AAC	486.12	738.92

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) YFC eklenmiş ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin AAC ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.43’te gösterilmiştir. Şekil 4.43’te Seri B ve Seri G deney sonuçlarına ait eğriler birlikte sunulmuştur. CBR

deneyleri sonucunda 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ortalama CBR değerleri ise Çizelge 4.30’da verilmiştir.



Şekil 4.43. 28 gün kür edilmiş ve AAC eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

Çizelge 4.30. 28 gün kür edilmiş ve AAC eklenmiş farklı oranlarda YFC katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-28g-AAC	283.45	316.76
%5YFC-28g-AAC	984.71	799.27
%10YFC-28g-AAC	1452.11	1348.06
%15YFC-28g-AAC	1714.57	1625.79
%20YFC-28g-AAC	2617.31	2448.18
%25YFC-28g-AAC	2145.31	2116.92
%30YFC-28g-AAC	1780.34	1775.85

AAC ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş YFC katkılı CBR deney sonuçlarına göre, tüm YFC katkı oranları CBR değerini artırmıştır. En yüksek CBR değerinin %20 oranında YFC katkılı test numunesinde olduğu görülmüştür. Katkısız CDW’den %20 katkı oranına kadar YFC katkı oranı arttıkça CBR değerinin arttığı, %20 katkı oranından sonra YFC katkı oranı arttıkça CBR değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Çizelge 4.30’da açıkça görüldüğü gibi CBR değerleri 2.5 mm’de oluşmaktadır. Test

numuneleri 28 gün boyunca YFC katkısı ve AAÇ eklenmesi nedeniyle sertleştiğinden CBR deneylerinde daha rijit bir davranış gözlemlenmiş, bu durumun CBR değerlerini 2.5 mm’de oluşturduğu düşünülmüştür.

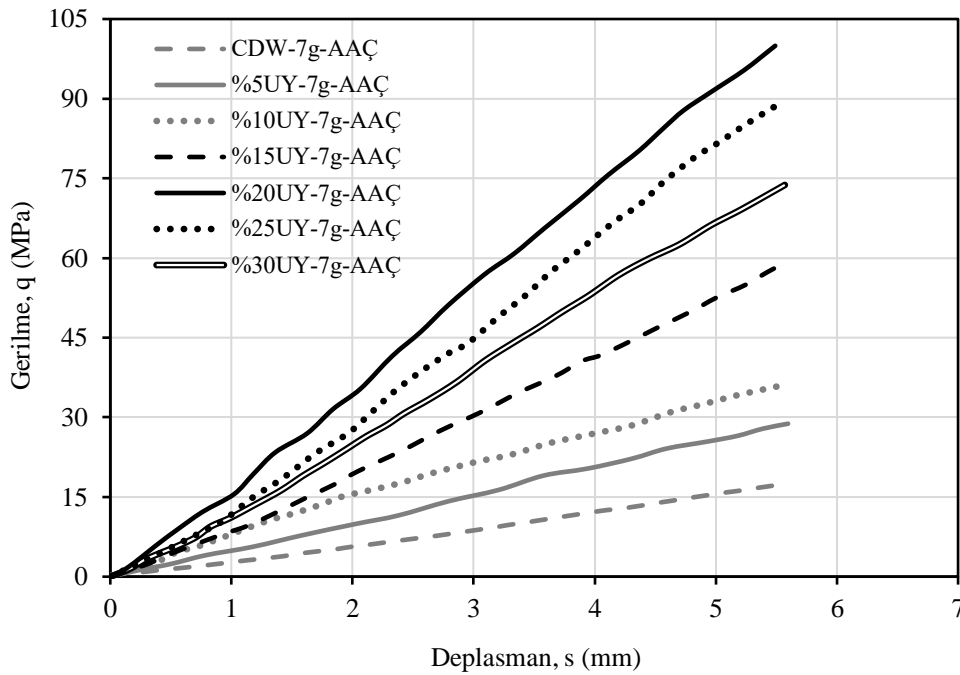
CDW içerisine eklenen YFC katkısı AAÇ ile kullanıldığında CBR değerlerinin oldukça arttığı görülmüştür. %20YFC-28g-AAÇ test numunesi üzerinde yapılan SEM analizlerine bakıldığında (Şekil 4.26) oldukça kompakt ve boşluksuz bir mikro yapı olduğu gözlemlenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan tüm puzolanlar arasında en yüksek CBR değerlerine sahip olan %20YFC-28g-AAÇ numunelerinin mikro yapısında oluşan yoğun alüminosilikat jellerinin gözlenmesi, CBR-mikro yapı ilişkisini kanıtlar niteliktedir. Ancak, çok az miktarda da olsa gözlemlenen reaksiyona girmemiş YFC parçacıkları yüzünden, CBR değeri %20 YFC oranına kadar artarak %20 YFC oranından sonra azalma eğilimi göstermiştir.

4.3.6 AAÇ Eklenmiş UY Katkılı CBR Deneylerine ait Bulgular

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UY eklenmiş ve 7 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.44’te verilmiştir. Şekil 4.44’te Seri B ve Seri H deney sonuçlarına ait eğriler bir arada sunulmuştur. CBR deneyleri sonucunda 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için hesaplanmış ortalama CBR değerleri ise Çizelge 4.31’de gösterilmiştir. AAÇ ile yapılan ve 7 gün kür edilmiş UY katkılı CBR deney sonuçlarına göre, tüm UY katkı oranları CBR değerini artırmıştır. En yüksek CBR değeri ise %20 oranında UY katkısı eklendiği durumda oluşmuştur. Katkisiz CDW’den %20 katkı oranına kadar UY katkı oranı arttıkça CBR değerinin arttığı, %20 katkı oranından sonra UY katkı oranı arttıkça CBR değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CBR değerlerinin 5 mm’de olduğu Çizelge 4.31’de açıkça görülmektedir.

Farklı oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UY eklenmiş ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuş CDW numunelerinin AAÇ ile yapılan CBR deneylerine ait ortalama gerilme (q)-deplasman (s) eğrileri Şekil 4.45’te sunulmuştur. Şekil 4.45’te Seri B ve Seri H deney sonuçlarına ait eğriler bir arada gösterilerek yorumlanmıştır. CBR deneyleri gerçekleştirildikten sonra 2.5 ve 5 mm deplasman değerleri için ortalama CBR değerleri hesaplanarak Çizelge 4.32’de verilmiştir.

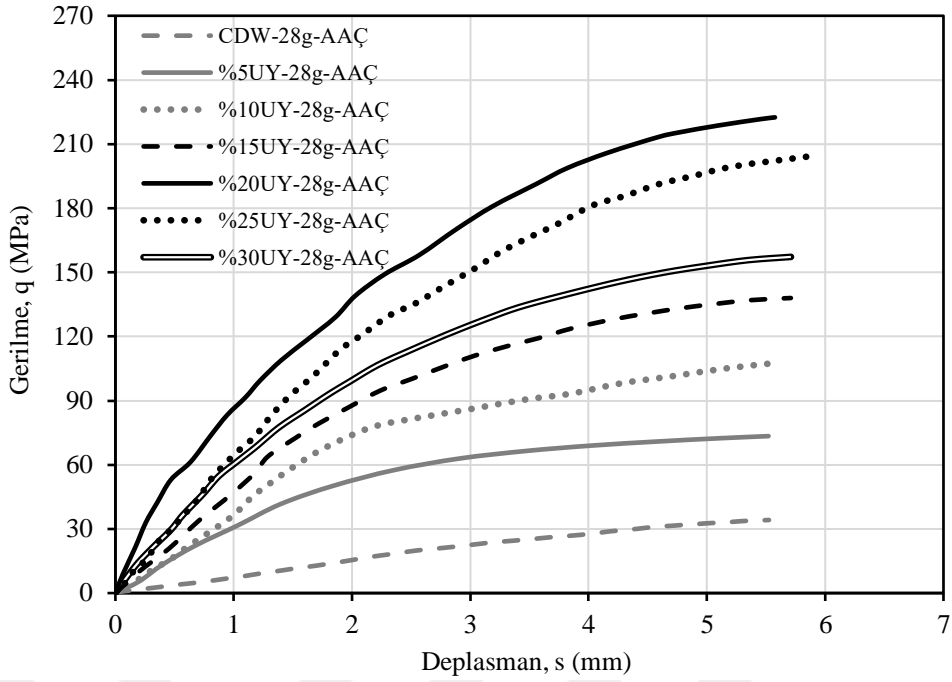
AAÇ ile yapılan ve 28 gün kür edilmiş UY katkılı CBR deney sonuçları incelendiğinde, tüm UY katkı oranlarının CBR değerini artırdığı gözlemlenmiştir. En yüksek CBR değeri ise %20 katkı oranında UY katkısı eklendiği durumda elde edilmiştir. Katkisız CDW'den %20 katkı oranına kadar UY katkı oranı arttıkça CBR değerinin arttığı, %20 katkı oranından sonra UY katkı oranı arttıkça CBR değerinin azaldığı görülmüştür. CBR değerlerinin 2.5 mm'de olduğu Çizelge 4.32'de açıkça görülmektedir. Test numuneleri 28 gün boyunca UY katkısı ve AAÇ eklenmesi nedeniyle sertleştiğinden CBR deneylerinde daha rijit bir davranış gözlemlenmiş, bu durumun CBR değerlerini 2.5 mm'de oluşturduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.44. 7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

Çizelge 4.31. 7 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-7g-AAÇ	103.39	151.22
%5UY-7g-AAÇ	178.46	249.91
%10UY-7g-AAÇ	266.34	321.32
%15UY-7g-AAÇ	359.70	509.53
%20UY-7g-AAÇ	650.09	891.84
%25UY-7g-AAÇ	544.13	790.43
%30UY-7g-AAÇ	459.35	647.30



Şekil 4.45. 28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numunelerinin CBR deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman eğrileri

Çizelge 4.32. 28 gün kür edilmiş ve AAÇ eklenmiş farklı oranlarda UY katkılı CDW numuneleri için hesaplanan CBR değerleri

Test Numunesi	2.5 mm için Hesaplanan CBR Değeri	5 mm için Hesaplanan CBR Değeri
CDW-28g-AAÇ	283.45	316.76
%5UY-28g-AAÇ	854.12	699.91
%10UY-28g-AAÇ	1178.44	1007.53
%15UY-28g-AAÇ	1450.16	1308.28
%20UY-28g-AAÇ	2260.47	2114.03
%25UY-28g-AAÇ	1949.94	1908.39
%30UY-28g-AAÇ	1648.39	1486.56

UY katkısı AAÇ ile birlikte CDW içerisine eklendiğinde CBR değerlerinin önemli derece arttığı görülmüştür. %20UY-28g-AAÇ test numunesi üzerinde gerçekleştirilen SEM analizleri incelendiğinde (Şekil 4.29), %20UY-28g-AAÇ test numunesinde %15UK-28g-AAÇ test numunesine nazaran daha yoğun bir alüminosilikat jel oluştuğu belirlenmiştir. Bu durumun, CBR değerlerinin önemli derecede artmasına neden olduğu düşünülmüştür. Ancak, reaksiyona girmemiş UK parçacıklarından dolayı %20UY-28g-AAÇ test numunesinin CBR değerlerinin %20YFC-28g-AAÇ test numunesinden daha düşük çıktığı tahmin edilmektedir. Bu durumun laboratuvar koşullarında, YFC'nin sahip olduğu yüksek CaO içeriğinden

dolayı, geopolimerizasyon hızının UK'ya göre oldukça yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

4.3.7 CBR Deneylerinin Kendi İçerisinde Kıyaslanması

CDW içerisinde puzolan ve AAC eklenmesinin CBR değerleri üzerinde gerçekleştirdiği iyileşmelerin derecelerini yorumlamak amacıyla Binquet ve Lee (1975) tarafından önerilen taşıma kapasitesi oranı (BCR) tanımlanmıştır. Yapılan tüm CBR deneylerinden elde edilen CBR değerleri yorumlanırken bu eşitlik kullanılmıştır. Bunun için aşağıda belirtilen Denklem (4.2) tanımlanmıştır.

$$BCR_{CBR} = \frac{CBR_u}{CBR_o} \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de, "CBR_u", BCR_{CBR} değerinin hesaplanmak istendiği deneyin CBR değeri; "CBR_o", su ile hazırlanan CDW test numunesinin CBR değeridir.

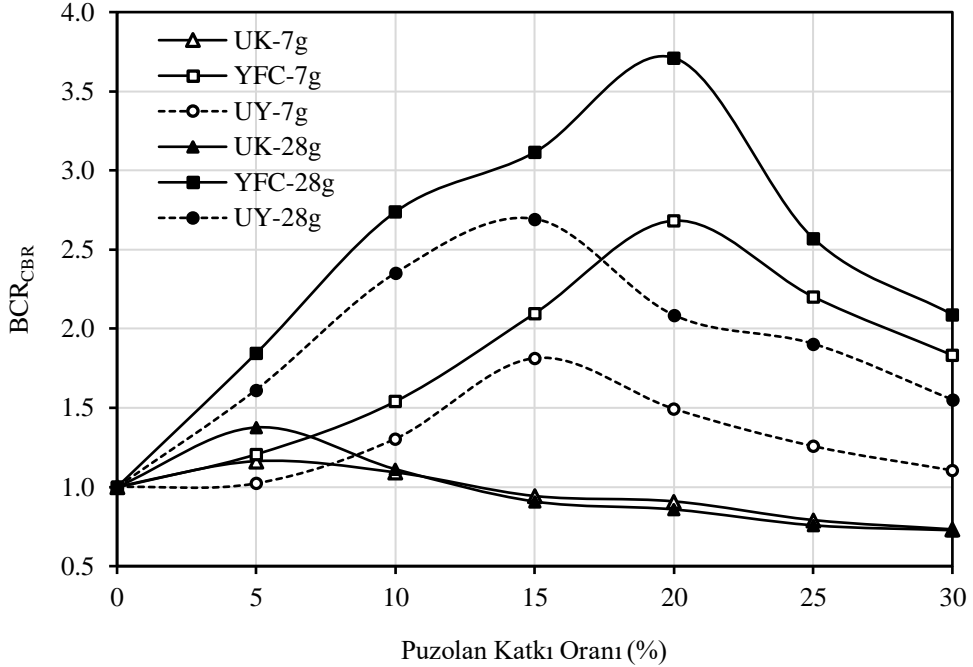
Su ile hazırlanan CDW test numunesinin BCR_{CBR} değeri 1 olarak hesaplanmıştır. Eğer, BCR_{CBR} değeri 1'den küçük ise güçlendirme sağlanmamış, 1'den büyük ise güçlendirme sağlanmıştır. Hesaplanan BCR_{CBR} değeri 1 değerinden ne kadar büyükse CBR değerine katkısı o kadar iyi demektir.

Şekil 4.46'da 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda gerçekleştirilen Seri C, Seri D ve Seri E (su kullanılarak farklı oranlarda puzolan katkıları ile yapılan deneyler) CBR deneyleri sonucu hesaplanan BCR_{CBR} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişim eğrileri sunulmuştur. Bununla birlikte, hesaplanan BCR_{CBR} değerleri Çizelge 4.33'te gösterilmiştir.

Şekil 4.46 ve Çizelge 4.33'te açıkça görüldüğü gibi aşağıdaki yorumlar yapılmıştır:

- Tüm CBR deneylerinde genel itibari ile kür süresi güçlendirme oranını artırmıştır.
- En efektif katkının YFC en verimsiz katkının ise UK olduğu belirlenmiştir.
- UY katkısının güçlendirme oranının UK'ya göre YFC'ninkine daha yakın olduğu görülmüştür.

- UK için en iyi performans %5 oranında katkı eklendiği durumda elde edilmiştir. UK katkısının %5 ve %10 oranı için güçlendirme sağlanırken %10'dan sonra eklenen UK oranları için güçlendirme sağlanmamıştır. Ayrıca %5'ten sonra UK oranı arttıkça güçlendirme oranı giderek azalmıştır.
- YFC'nin tüm katkı oranları için güçlendirme sağlanmıştır. En iyi güçlendirme %20 oranında YFC katkısı eklendiği durumda görülmüştür. Eklenen YFC katkısının %20 oranından itibaren artırılması veya azaltılması durumlarında güçlendirme oranının giderek azaldığı belirlenmiştir.
- UY'nin tüm katkı oranları güçlendirme gerçekleştirmiştir. En iyi güçlendirmenin %15 oranında UY katkısı eklendiği durumda elde edildiği görülmüştür. Eklenen UY katkısının %15 oranından itibaren artırılması veya azaltılması güçlendirme oranının giderek azalmasına neden olmuştur.



Şekil 4.46. Seri C, Seri D ve Seri E CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerlerinin farklı pozolan katkı oranları ile değişimi

Çizelge 4.33. Seri C, Seri D ve Seri E CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerleri

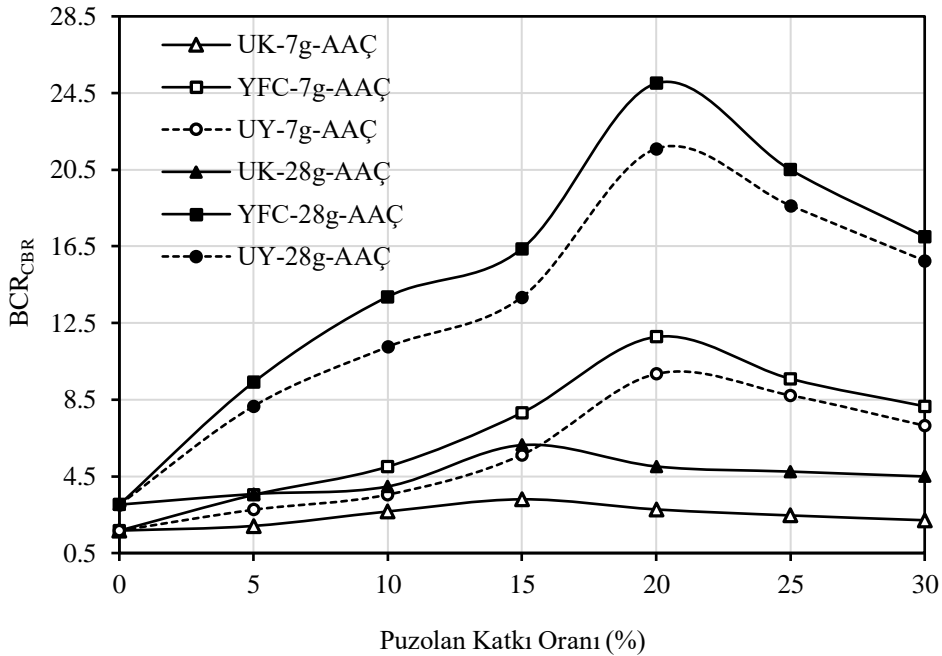
Test Numunesi	BCR_{CBR}	Test Numunesi	BCR_{CBR}
CDW-7g	1.00	CDW-28g	1.00
%5UK-7g	1.16	%5UK-28g	1.38
%10UK-7g	1.09	%10UK-28g	1.11
%15UK-7g	0.94	%15UK-28g	0.91
%20UK-7g	0.91	%20UK-28g	0.86
%25UK-7g	0.79	%25UK-28g	0.76
%30UK-7g	0.73	%30UK-28g	0.73
%5YFC-7g	1.21	%5YFC-28g	1.85
%10YFC-7g	1.54	%10YFC-28g	2.74
%15YFC-7g	2.10	%15YFC-28g	3.11
%20YFC-7g	2.68	%20YFC-28g	3.71
%25YFC-7g	2.20	%25YFC-28g	2.57
%30YFC-7g	1.83	%30YFC-28g	2.09
%5UY-7g	1.02	%5UY-28g	1.62
%10UY-7g	1.30	%10UY-28g	2.35
%15UY-7g	1.81	%15UY-28g	2.69
%20UY-7g	1.49	%20UY-28g	2.09
%25UY-7g	1.26	%25UY-28g	1.90
%30UY-7g	1.11	%30UY-28g	1.55

Şekil 4.47’de 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda gerçekleştirilen Seri F, Seri G ve Seri H (AAÇ kullanılarak farklı oranlarda puzolan katkıları ile yapılan deneyler) CBR deneyleri sonucu hesaplanan BCR_{CBR} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişim eğrileri verilmiştir. Buna ek olarak, hesaplanan BCR_{CBR} değerleri ise Çizelge 4.34’te sunulmuştur.

Şekil 4.47 ve Çizelge 4.34’te sunulan veriler incelendiğinde aşağıda sıralanan çıkarımlar gerçekleştirilmiştir:

- Tüm CBR deneylerinde genel itibari ile kür süresi güçlendirme oranını artırmıştır.
- Üç katkının birbirlerine kıyasla, en efektif katkının YFC en verimsiz katkının ise UK olduğu görülmüştür.

- UY katkısının BCR_{CBR} değerleri UK'ya kıyasla YFC'ninkine daha yakın olduğu görülmüştür.
- UK'nın tüm katkı oranları için güçlendirme sağlanmıştır. En iyi güçlendirmenin ise %15 oranında UK katkısı eklendiği durumda elde edildiği görülmüştür. Eklenen UK katkısının %15 oranından itibaren artırılması veya azaltılması durumunda güçlendirme oranının giderek azaldığı belirlenmiştir.
- YFC'nin tüm katkı oranları için güçlendirme sağlanmıştır. En iyi güçlendirme performansı %20 oranında YFC katkısı eklendiği durumda elde edilmiştir. Eklenen YFC katkısı %20 oranından itibaren hem arttıkça hem de azaldıkça güçlendirme oranının giderek azaldığı görülmüştür.
- UY'nin tüm katkı oranlarında güçlendirme elde edilmiştir. En iyi güçlendirme performansının ise %20 oranında UY katkısı eklendiği durumda sağlandığı görülmüştür. Eklenen UY katkısının %20 oranından itibaren artırılması veya azaltılması güçlendirme oranının giderek azalmasına neden olmuştur.

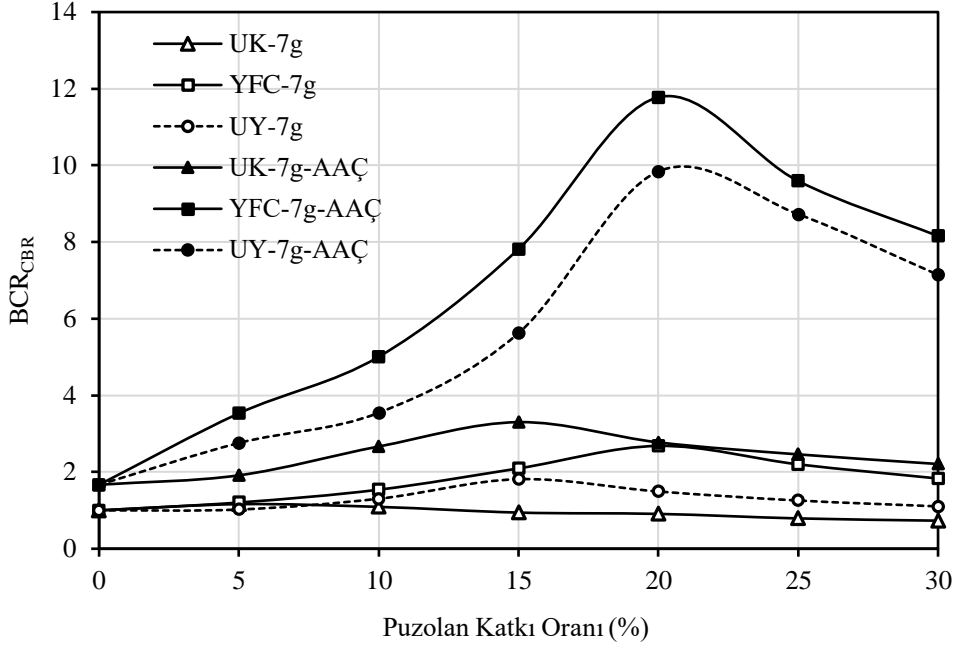


Şekil 4.47. Seri F, Seri G ve Seri H CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerlerinin farklı pozolan katkı oranları ile değişimi

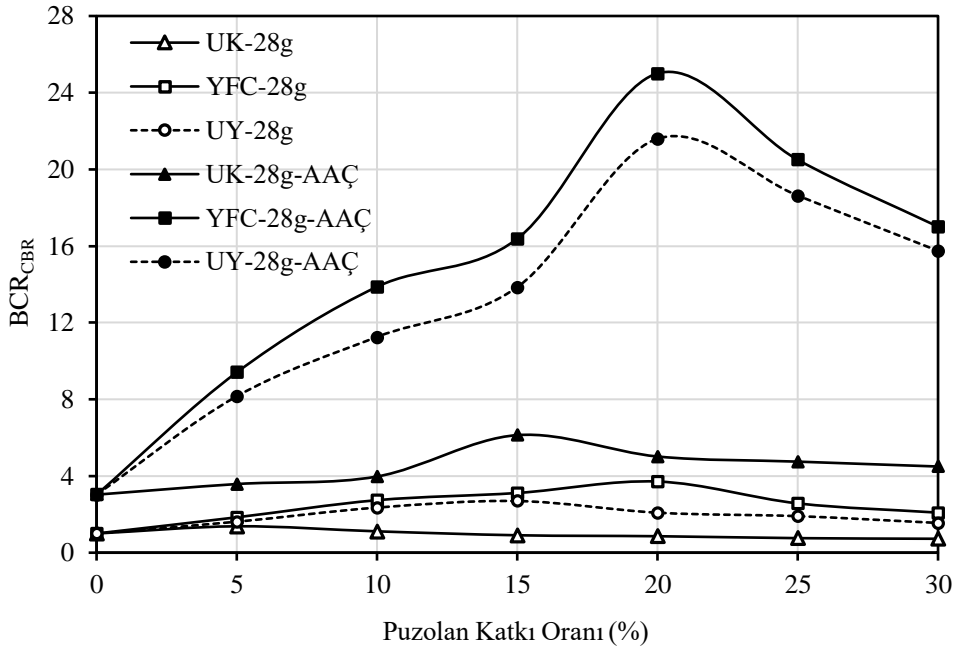
Çizelge 4.34. Seri C, Seri D ve Seri E CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerleri

Test Numunesi	BCR_{CBR}	Test Numunesi	BCR_{CBR}
CDW-7g-AAÇ	1.67	CDW-28g-AAÇ	3.03
%5UK-7g-AAÇ	1.92	%5UK-28g-AAÇ	3.58
%10UK-7g-AAÇ	2.67	%10UK-28g-AAÇ	3.97
%15UK-7g-AAÇ	3.30	%15UK-28g-AAÇ	6.13
%20UK-7g-AAÇ	2.77	%20UK-28g-AAÇ	5.02
%25UK-7g-AAÇ	2.46	%25UK-28g-AAÇ	4.75
%30UK-7g-AAÇ	2.21	%30UK-28g-AAÇ	4.50
%5YFC-7g-AAÇ	3.53	%5YFC-28g-AAÇ	9.41
%10YFC-7g-AAÇ	5.01	%10YFC-28g-AAÇ	13.87
%15YFC-7g-AAÇ	7.82	%15YFC-28g-AAÇ	16.38
%20YFC-7g-AAÇ	11.78	%20YFC-28g-AAÇ	25.00
%25YFC-7g-AAÇ	9.59	%25YFC-28g-AAÇ	20.49
%30YFC-7g-AAÇ	8.16	%30YFC-28g-AAÇ	17.01
%5UY-7g-AAÇ	2.76	%5UY-28g-AAÇ	8.16
%10UY-7g-AAÇ	3.55	%10UY-28g-AAÇ	11.26
%15UY-7g-AAÇ	5.62	%15UY-28g-AAÇ	13.85
%20UY-7g-AAÇ	9.85	%20UY-28g-AAÇ	21.60
%25UY-7g-AAÇ	8.73	%25UY-28g-AAÇ	18.63
%30UY-7g-AAÇ	7.15	%30UY-28g-AAÇ	15.75

Şekil 4.48'de 7 günlük Şekil 4.49'da 28 günlük kür süresi sonunda gerçekleştirilen Seri C, Seri D ve Seri E (su kullanılarak farklı oranlarda puzolan katkıları ile yapılan deneyler) ile Seri F, Seri G ve Seri H (AAÇ kullanılarak farklı oranlarda puzolan katkıları ile yapılan deneyler) CBR deneyleri sonucu hesaplanan BCR_{CBR} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişim eğrileri gösterilmiştir. Böylece AAÇ katkısının CBR değerleri üzerine etkisi daha net şekilde yorumlanabilmektedir. Şekil 4.48 ve Şekil 4.49'da açıkça görüldüğü gibi AAÇ katkısı her test numunesinde önemli derecede güçlendirme sağlamıştır.



Şekil 4.48. 7 gün kür sonunda yapılan tüm CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişimi



Şekil 4.49. 28 gün kür sonunda yapılan tüm CBR deneyleri için BCR_{CBR} değerlerinin farklı puzolan katkı oranları ile değişimi

4.4 Model Yükleme Deneylerine ait Bulguların Değerlendirilmesi

Tez çalışma kapsamında temin edilen CDW'nin geri dönüştürülmesi ile oluşturulan granüler malzemenin, güçlendirilmemiş ve geogrid ve/veya puzolan katkı ile güçlendirilmiş dolgularda kullanılabilirliğini araştırmak için gerçekleştirilen model (plaka) yükleme deneylerine ait sonuçlar bu başlık altında sunulmaktadır. CDW kullanılarak inşa edilecek dolgunun performansının daha net anlaşılabilmesi için güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş dolgu en elverişsiz tabii zemin koşullarının hakim olduğu düşük taşıma gücüne sahip zemin üzerine yerleştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Beş seri model yükleme deneyi yapılmıştır. İlk seride (Seri I) dolgunun yerleştirileceği zayıf zemin üzerine direk (dolgu inşa edilmeden) yükleme yapılarak zayıf zeminin davranışı incelenmiştir. Daha sonraki seride (Seri II) zayıf zemin üzerine, CDW ile oluşturulan farklı kalınlıklarda dolgu inşa edilerek deneyler yapılmıştır. Seri III, Seri IV, Seri V ve Seri VI deneylerinde ise sırası ile geotekstilin, puzolan-AAÇ'nin, geogridin, geogrid-puzolan-AAÇ'nin etkisi araştırılmıştır.

Deneyler sonucunda, kPa cinsinden ifade edilen basınç gerilmesi (q) değerine karşılık, oluşan deplasmanın model temel çapına bölünmesi ile boyutsuzlaştırılarak yüzde cinsinden ifade edilen deplasman oranı (s/D) eğrileri biçiminde sunulmuştur. Sunulan eğrilerde yatay ekseninde basınç gerilmesi (q), dikey ekseninde deplasman oranı (s/D) bulunmaktadır.

Model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen yük-oturma eğrilerinden göçme yükünün belirlenememesi durumlarında, nihai taşıma gücünün tespit edilebilmesi için, literatürde, bazı yöntemler önerilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen yük-oturma eğrilerinden belirgin bir göçme yükünün elde edilemediği durumlarda, diğer yöntemlere göre hesap etme yönünden daha pratik ve daha objektif sonuç veren 0.1B yöntemi tercih edilmiştir (Örnek, 2009). 0.1B yönteminde (B =temel genişliği), sınırlandırılmış bir oturma değerine karşılık gelen yük değeri, nihai taşıma kapasitesi değeri olarak dikkate alınmaktadır (Briaud ve Jeanjean, 1994). Bu yöntem model yükleme deneylerinde kullanılırken, 0.10D ($s/D=10\%$) oturma değerine karşılık gelen gerilme değeri, nihai taşıma gücü değeri (q_u) olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca, gerçekleştirilen model yükleme deneylerinde 0.05D ($s/D=5\%$) ve 0.15D ($s/D=15\%$) oturma değerlerine karşılık gelen taşıma gücü değerleri de belirlenerek deney sonuçlarının yorumlanmasında kullanılmıştır.

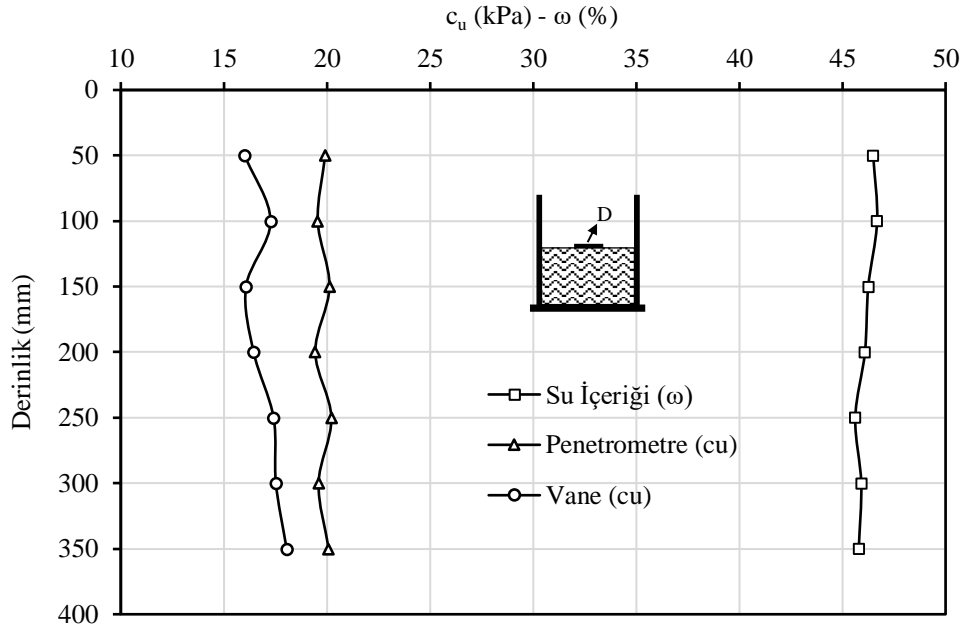
4.4.1 Zayıf Zemin Durumuna ait Bulgular (Seri I)

Model yükleme deneylerinde, güçlendirilmiş veya güçlendirilmemiş granüler dolgu, kohezyonlu zemin tabakası (zayıf zemin koşullarına sahip CBR'ı %3'ün altında) üzerine yerleştirilmiştir. Seri I model yükleme deneyleri ile zayıf zemin tabakasının taşıma gücü belirlenmiştir. Böylece, zayıf zemin tabakası üzerine inşa edilmiş güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş dolgunun taşıma gücü ile kıyaslanarak, dolgu yapımının güçlendirme derecesi belirlenmiştir. Kohezyonlu zeminlerde nihai taşıma gücünü temel boyutları etkilememektedir (Uzuner, 2016a). Bu sebeple, Seri I deneylerinde farklı çaplarda model temeller kullanılarak, rijit deney tankının deney sonuçlarını etkileyip etkilemediği incelenmiştir.

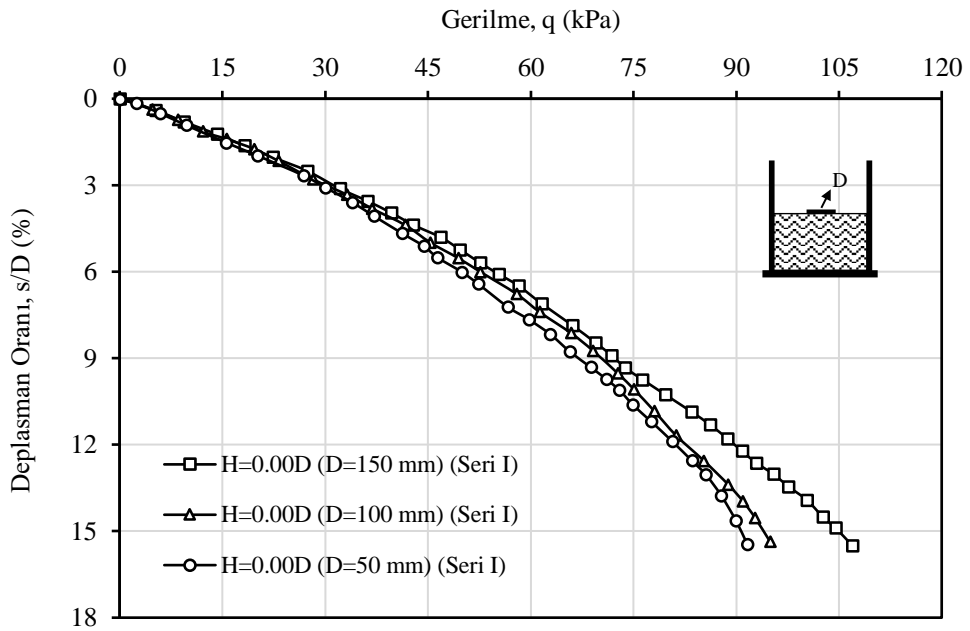
Model yükleme deneylerinde, oluşturulan zemin tabakalarının yoğunluğunun homojen ve istenen değerlerde olması için kohezyonlu zemin, 5 cm'lik tabakalar halinde, kütle değerleri hesaplanarak rijit deney tankında belirli bir hacime yerleştirilmiştir. Bununla birlikte, her tabaka için mukavemet (vane ve penetrometre) ve su içeriği kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Tüm model yükleme deneylerinde zayıf zemin tabakasının yüksekliği 350 mm'dir. Seri I model deneyleri için yüzeyden itibaren derinlik boyunca, her tabaka için, penetrometre ve vane deneyleriyle belirlenen mukavemet değerleri (c_u) ve ölçülen su içeriği oranları (ω) Şekil 4.50'de verilmiştir. Oluşturulan zayıf zemin tabakalarının su içeriğinin (ω) %46, drenajsız kayma mukavemetinin (c_u) 17.99 kPa, doğal birim hacim ağırlığının (γ_n) 17.45 kN/m³ ve CBR değerinin %1.22 olması hedeflenmiştir.

Seri I model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen gerilme (q)-deplasman oranı (s/D) eğrileri Şekil 4.51'de sunulmuştur. Ayrıca temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri için belirlenen taşıma gücü değerleri (q_u) Çizelge 4.35'te gösterilmiştir. Şekil 4.51'de ve Çizelge 4.35'te "H" dolgu kalınlığını ve "D" temel çapını göstermektedir. "H" ve "D" kullanılarak zayıf zemin H=0.00D olarak gösterilmiştir. Bu gösterim, dolgu yapılan diğer seri deneyleri ile kıyaslamada kolaylık sağlamıştır.

Şekil 4.51 ve Çizelge 4.35 incelendiğinde üç farklı çapta model temel (150, 100 ve 50 mm) için yapılan model yükleme deneylerinden elde edilen taşıma gücü değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durum, tank ve temel çapının deney sonuçlarının doğruluğu için yeterli olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.50. Seri I deneyleri için mukavemet ve su içeriği kontrolü



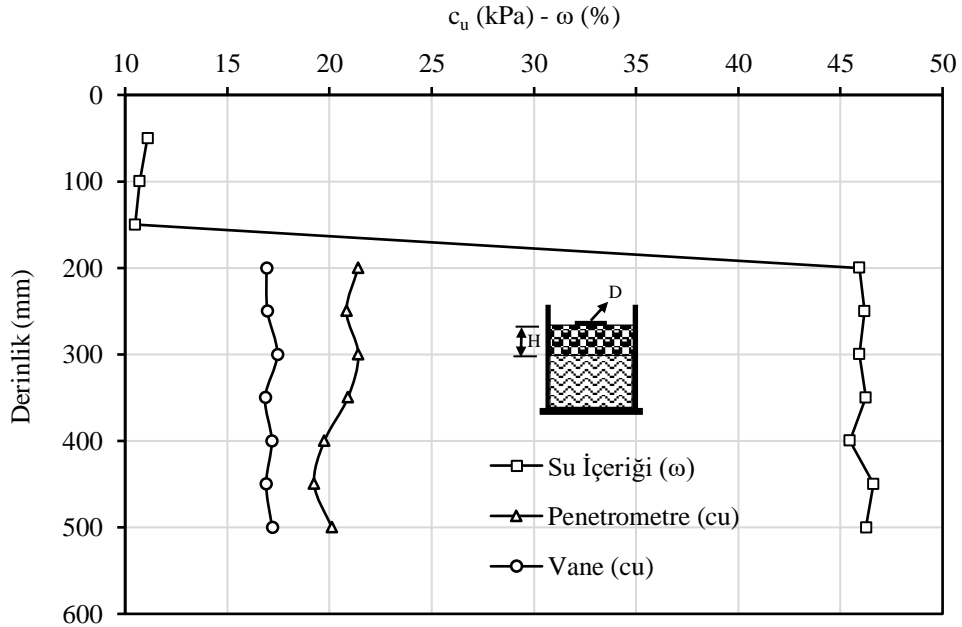
Şekil 4.51. Zayıf zemin durumu için (Seri I) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri

Çizelge 4.35. Zayıf zemin durumu için (Seri I) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri

Test Numunesi	s/D=%5 için q _u Değeri (kPa)	s/D=%10 için q _u Değeri (kPa)	s/D=%15 için q _u Değeri (kPa)
H=0.00D (D=150 mm) (Seri I)	48.14	77.97	104.94
H=0.00D (D=100 mm) (Seri I)	45.43	74.73	93.98
H=0.00D (D=50 mm) (Seri I)	43.58	72.40	90.70

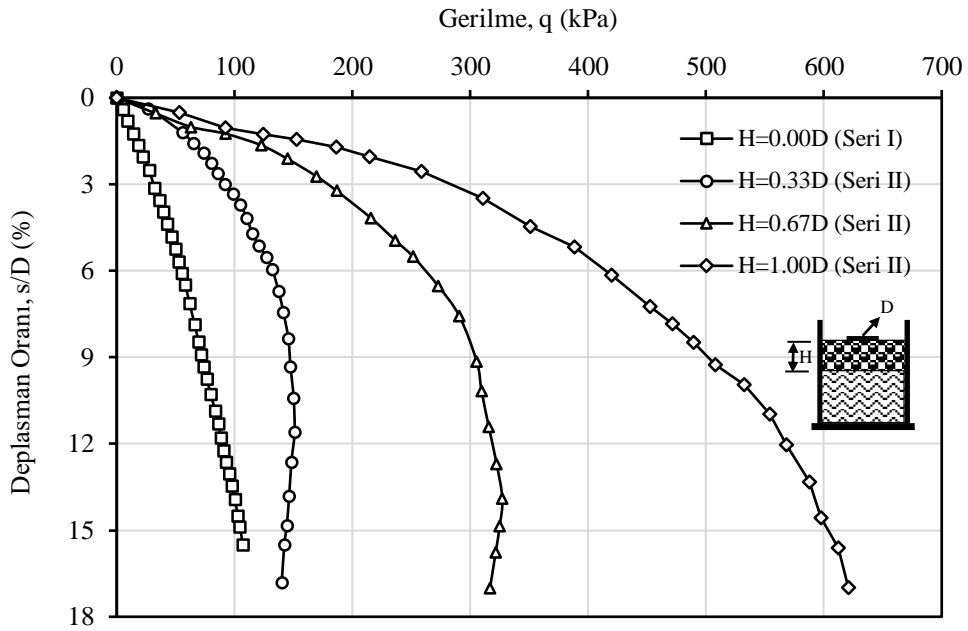
4.4.2 Güçlendirilmemiş Dolgu Durumuna ait Bulgular (Seri II)

Zayıf zemin üzerine H/D=0.33, 0.67 ve 1.00 (H, dolgu kalınlığı; D, 150 mm model temel çapı) olmak üzere üç farklı kalınlıkta CDW ile oluşturulmuş dolgu inşa edilerek model yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Seri II deneylerinde zayıf zemin üzerine farklı kalınlıklarda dolgu yapımının etkisi incelenmiştir. Tüm Seri II deneylerinde, zayıf zemin, Seri I deneylerinde olduğu gibi yerleştirilmiş ve her tabakada mukavemet (vane ve penetrometre) ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Zayıf zemin üzerindeki dolgu tabakası da 5 cm'lik tabakalar halinde kütle kontrollü yerleştirilmiş ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemet değerleri ile hem zayıf zeminin hem de dolgu tabakalarının su içeriği oranları Şekil 4.52'de sunulmuştur.



Şekil 4.52. Seri II deneyleri için mukavemet ve su içeriği kontrolü

Seri II deneyleri sonucu elde edilen gerilme (q)-deplasman oranı (s/D) eğrileri Şekil 4.53'te görüldüğü gibidir. Seri II için yapılan tüm deneylerde 150 mm çapında model temel kullanılmıştır. Seri II deneylerinde dolgu durumunun etkisini göstermek için, Şekil 4.53'te 150 mm model temel kullanılarak zayıf zemin durumu için yapılmış model yükleme deney sonucu da sunulmuştur. Ayrıca temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri için belirlenen taşıma gücü değerleri (q_u) Çizelge 4.36'da gösterilmiştir.



Şekil 4.53. Güçlendirilmemiş dolgu durumu için (Seri II) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri

Çizelge 4.36. Güçlendirilmemiş dolgu durumu için (Seri II) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri

Test Numunesi	s/D=%5 için q_u Değeri (kPa)	s/D=%10 için q_u Değeri (kPa)	s/D=%15 için q_u Değeri (kPa)
H=0.00D (Seri I)	48.14	77.97	104.94
H=0.33D (Seri II)	119.07	149.07	143.72
H=0.67D (Seri II)	237.75	308.87	324.38
H=1.00D (Seri II)	378.92	533.54	603.61

Şekil 4.53 ve Çizelge 4.36'da görüldüğü gibi tüm dolgu kalınlıkları için taşıma gücü değeri artmıştır. Diğer bir deyişle, zayıf zemin üzerine CDW ile dolgu inşa edilmesinin zeminin taşıma gücünü artırdığı tespit edilmiştir. Bunun en temel

nedeninin, zayıf zemin üzerine daha rijit ve sağlam olan CDW yerleştirilmesidir. Bununla birlikte, dolgu tabakasının kalınlığı arttıkça taşıma gücü değerinin de arttığı görülmüştür. Dolgu kalınlığı arttıkça kırılma yüzeyinin CDW içinde daha çok kalmasının bu duruma neden olduğu düşünülmektedir.

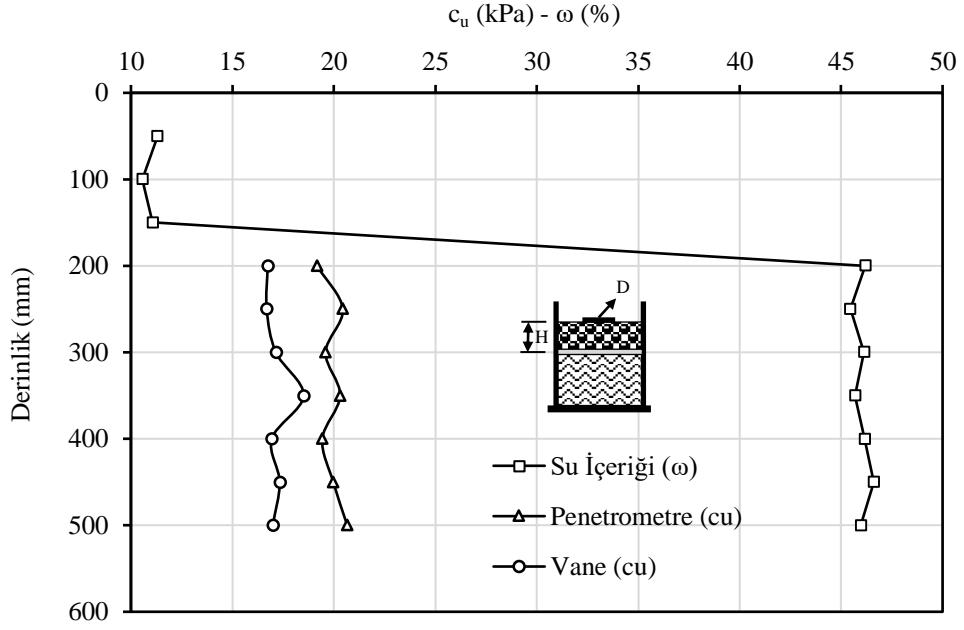
4.4.3 Geotekstil Ayırıcı Kullanılmış Dolgu Durumuna ait Bulgular (Seri III)

Seri III deneylerinde dolgu ile zayıf zemin arayüzüne ayırma işlevi için geotekstil yerleştirilmesinin taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir. Seri III deneylerinde de $H/D=0.33, 0.67$ ve 1.00 olmak üzere üç farklı kalınlıkta CDW ile oluşturulmuş dolgu üzerinde model yükleme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca Seri III deneylerinde geotekstil ayırıcı kullanılmış dolgularda, dolgu kalınlığının etkisi de incelenmiştir.

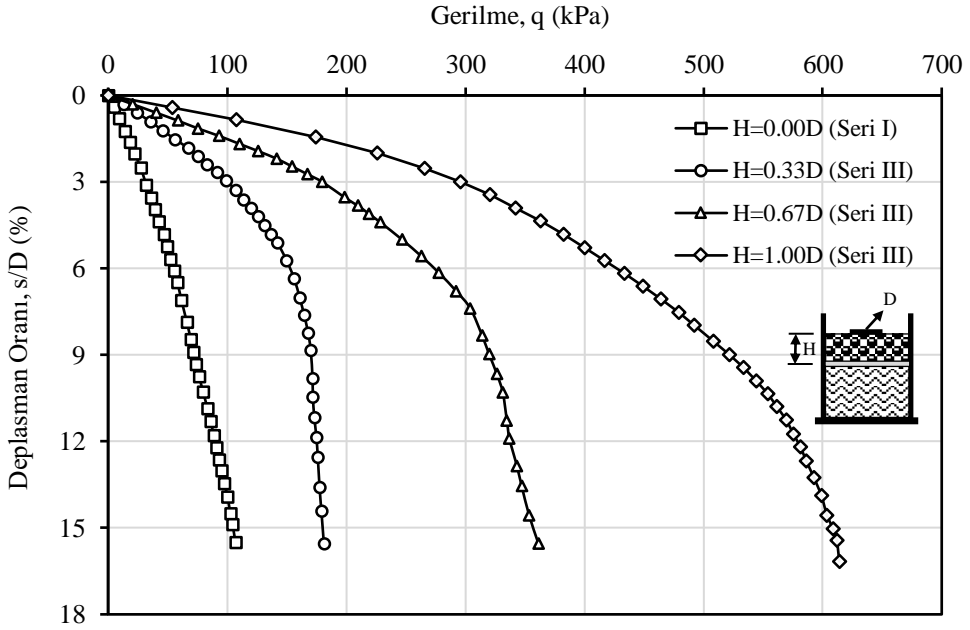
Bütün Seri III deneylerinde, zayıf zemin, Seri I deneylerinde olduğu gibi yerleştirilmiş ve her tabakada mukavemet (vane ve penetrometre) ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Zayıf zemin ile dolgu arasına geotekstil yerleştirilmiş ve daha sonra zayıf zemin üzerindeki dolgu tabakası da 5 cm'lik tabakalar halinde kütle kontrollü yerleştirilmiş ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemet değerleri ile hem zayıf zeminin hem de dolgu tabakalarının su içeriği oranları Şekil 4.54'te gösterilmiştir.

Seri III deneyleri sonucu elde edilen gerilme (q)-deplasman oranı (s/D) eğrileri ise Şekil 4.55'te sunulmuştur. Seri III için yapılan tüm deneylerde 150 mm çapında model temel kullanılmıştır. Seri III deneylerinde dolgu durumunun etkisini vurgulamak için, Şekil 4.55'te 150 mm model temel kullanılarak zayıf zemin durumu için yapılmış model yükleme deney sonucu da verilmiştir. Bununla birlikte temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri için hesaplanan taşıma gücü değerleri (q_u) Çizelge 4.37'de gösterilmiştir.

Şekil 4.55 ve Çizelge 4.37'de görüldüğü gibi tüm dolgu kalınlıkları için taşıma gücü değeri artmıştır. Bununla birlikte, dolgu tabakasının kalınlığı arttıkça taşıma gücü değerinin de arttığı görülmüştür.



Şekil 4.54. Seri III deneyleri için mukavemet ve su içeriği kontrolü



Şekil 4.55. Geotekstil ayırıcı kullanılmış dolgu durumu için (Seri III) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri

Çizelge 4.37. Geotekstil ayırıcı kullanılmış dolgu durumu için (Seri III) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri

Test Numunesi	s/D=%5 için q _u Değeri (kPa)	s/D=%10 için q _u Değeri (kPa)	s/D=%15 için q _u Değeri (kPa)
H=0.00D (Seri I)	48.14	77.97	104.94
H=0.33D (Seri III)	140.30	171.75	180.21
H=0.67D (Seri III)	246.80	329.11	357.01
H=1.00D (Seri III)	389.60	546.57	608.48

Çizelge 4.36 ve Çizelge 4.37 incelendiğinde, CDW dolgusu ile zayıf zemin arayüzünde geotekstil kullanılması taşıma gücü açısından dikkat değer bir katkı sağlamadığı görülmüştür. Geotekstil ile zemin arasında sürtünme kuvveti oluşmamasının (geotekstil ile zeminin kenetlenmemesi) ve geotekstilin çekme dayanımının çok yüksek olmamasının bu duruma neden olduğu tahmin edilmektedir. Geotekstil, esasında ayırma işlevi için tercih edildiğinden, geotekstilin ayırma işlevini yapıp yapmadığı tez çalışması için daha önemlidir. Ancak, sonraki tüm deney serilerinde geotekstil kullanıldığından, geotekstilin taşıma gücüne etki edip etmediğinin de araştırılmasının tez çalışması için gerekli olduğu düşünülmüştür. Deney sonrası zayıf zeminin üst yüzeyi incelendiğinde, CDW malzemesinin zayıf zemin içine geçmediği görülmüş, bu sebeple de geotekstilin ayırma işlevini yerine getirdiği kanısına varılmıştır.

4.4.4 YFC-AAÇ Katkılı Dolgu Durumuna ait Bulgular (Seri IV)

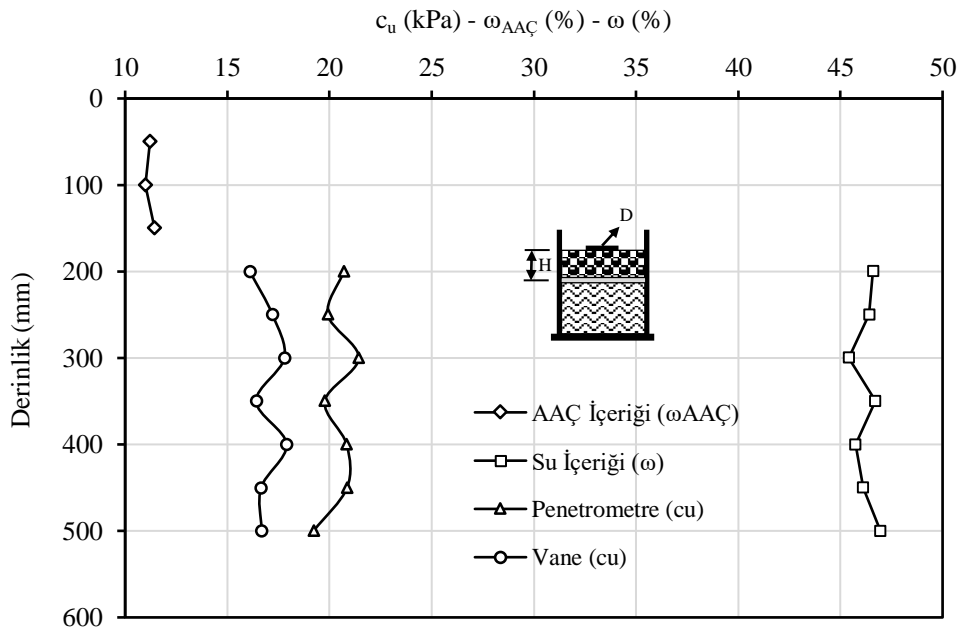
Seri IV model yükleme deneylerinde zayıf zemin üzerine inşa edilmiş YFC-AAÇ katkılı dolgunun taşıma gücüne etkisi araştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen serbest basınç ve CBR deneyleri sonuçlarına göre en iyi performansın (güçlendirmenin) görüldüğü AAÇ katkılı %20 oranında YFC eklenmiş CDW numunesi dolgu hazırlanması için kullanılmıştır. Seri IV deneylerinde dolgu ile zayıf zemin arayüzüne ayırma işlevi için geotekstil yerleştirilmiştir. Seri IV deneylerinde de H/D=0.33, 0.67 ve 1.00 olmak üzere üç farklı kalınlıkta YFC-AAÇ katkılı CDW dolgusu üzerinde model yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney serisinde dolgu kalınlığının etkisi de incelenmiştir.

Bütün Seri IV deneylerinde, zayıf zemin, Seri I deneylerinde olduğu gibi yerleştirilmiş ve her tabakada mukavemet (vane ve penetrometre) ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Zayıf zemin ile dolgu arasına geotekstil yerleştirilmiş ve daha

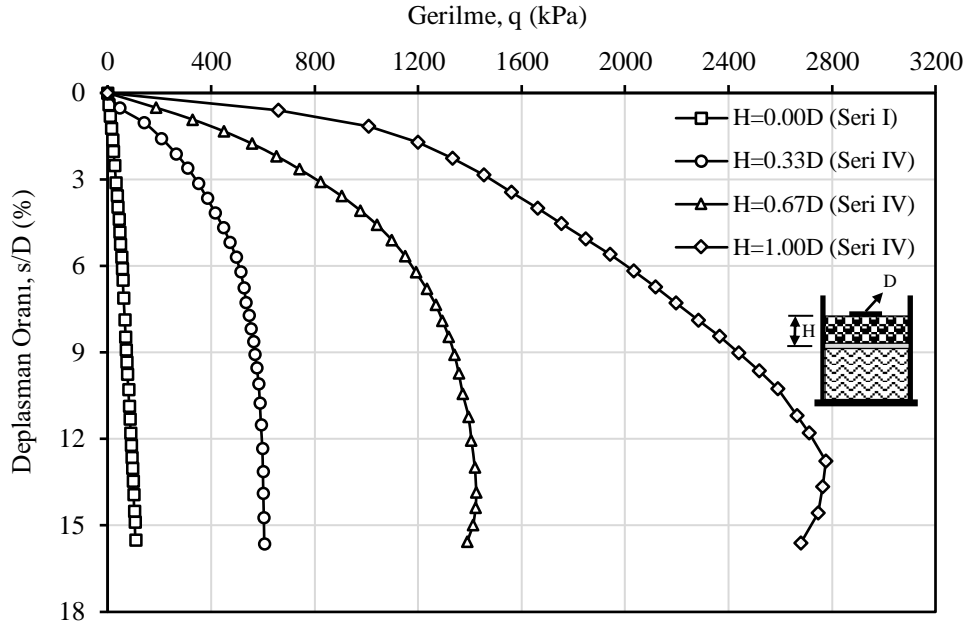
sonra zayıf zemin üzerindeki dolgu tabakası da 5 cm'lik tabakalar halinde kütle kontrollü yerleştirilmiş ve AAC içeriği kontrolü yapılmıştır. Derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemet değerleri ile zayıf zeminin su içeriği ve dolgu tabakalarının AAC içeriği oranları Şekil 4.56'da verilmiştir.

Seri IV deneyleri sonucu elde edilen gerilme (q)-deplasman oranı (s/D) eğrileri ise Şekil 4.57'de gösterilmiştir. Seri IV için yapılan tüm deneylerde 150 mm çapında model temel kullanılmıştır. Seri IV deneylerinde dolgu durumunun etkisini göstermek için, Şekil 4.57'de 150 mm model temel kullanılarak zayıf zemin durumu için yapılmış model yükleme deney sonucu da sunulmuştur. Bunların birlikte temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri için elde edilen taşıma gücü değerleri (q_u) Çizelge 4.38'de sunulmuştur.

Şekil 4.57 ve Çizelge 4.38'de görüldüğü gibi tüm dolgu kalınlıkları için taşıma gücü değeri artmıştır. Bununla birlikte, dolgu tabakasının kalınlığı arttıkça taşıma gücü değerinin de arttığı görülmüştür. Çizelge 3.37 ve Çizelge 4.38 incelendiğinde, YFC-AAC ile güçlendirmenin, CDW dolgusunun taşıma kapasitesini oldukça artırdığı görülmüştür. Bu durumun, YFC-AAC eklenmesinin CDW'yi rijitleştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.56. Seri IV deneyleri için mukavemet, su içeriği ve AAC içeriği kontrolü



Şekil 4.57. YFC-AAÇ katkılı dolgu durumu için (Seri IV) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri

Çizelge 4.38. YFC-AAÇ katkılı dolgu durumu için (Seri IV) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri

Test Numunesi	s/D=%5 için q _u Değeri (kPa)	s/D=%10 için q _u Değeri (kPa)	s/D=%15 için q _u Değeri (kPa)
H=0.00D (Seri I)	48.14	77.97	104.94
H=0.33D (Seri IV)	463.88	582.40	604.19
H=0.67D (Seri IV)	1087.67	1363.26	1411.46
H=1.00D (Seri IV)	1837.92	2560.21	2718.96

4.4.5 Geogridle Güçlendirilmiş Dolgu Durumuna ait Bulgular (Seri V)

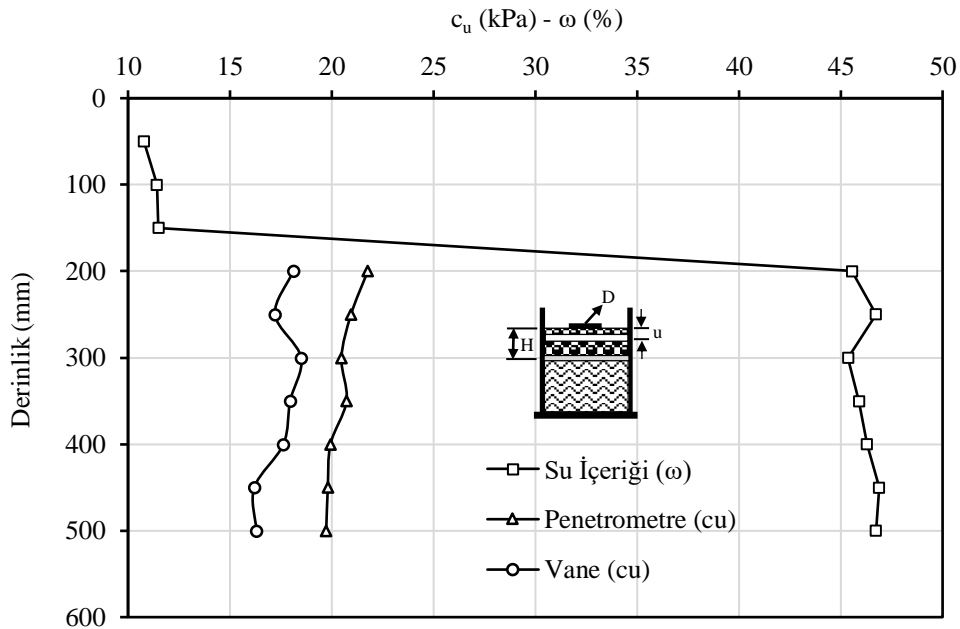
Seri V model yükleme deneylerinde dolgu içerisine geogrid yerleştirilmesi durumunun dolgunun taşıma gücüne etkisi araştırılmıştır. Geogridin dolgu içerisindeki konumu (yerleştirme derinliğine) olarak literatürde önerilen ve en iyi performansın görüldüğü $u=0.17D$ (u , yüzeyden itibaren geogridin yerleştirilme derinliği) derinliği tercih edilmiştir (Ok, 2018; Örnek, 2009)

Seri V deneylerinde dolgu ile zayıf zemin arayüzüne ayırma işlevi için geotekstil yerleştirilmiştir. Seri V deneylerinde de $H/D=0.33$, 0.67 ve 1.00 olmak üzere üç farklı kalınlıkta geogrid ile güçlendirilmiş CDW dolgusu üzerinde model yükleme deneyleri yapılmıştır. Bu deney serisinde dolgu kalınlığının etkisi de araştırılmıştır. Bütün Seri

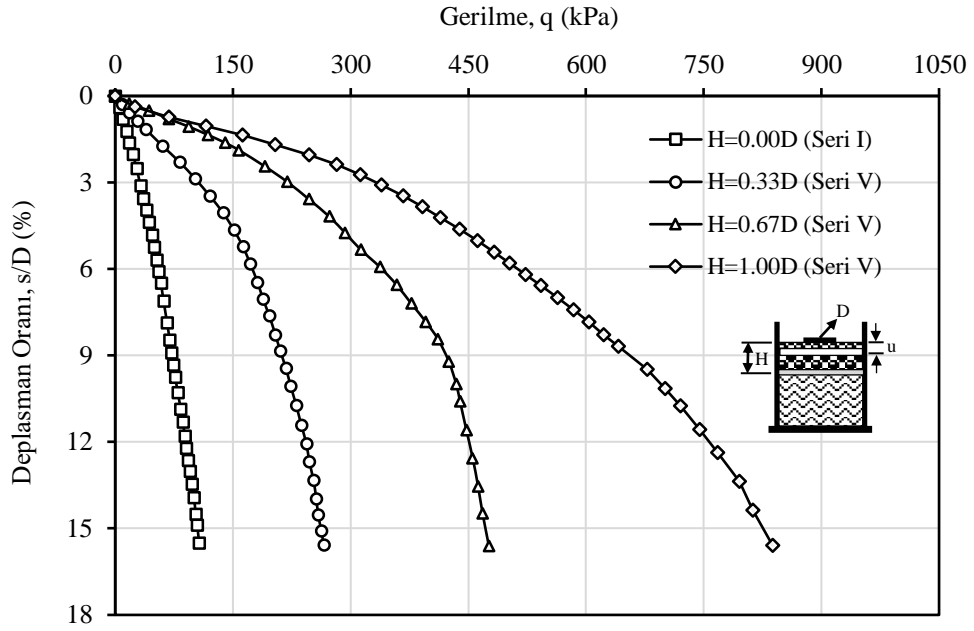
V deneylerinde, zayıf zemin, Seri I deneylerinde olduğu gibi yerleştirilmiş ve her tabakada mukavemet (vane ve penetrometre) ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Zayıf zemin ile dolgu arasına geotekstil yerleştirilmiş ve daha sonra zayıf zemin üzerindeki dolgu tabakası da 5 cm'lik tabakalar halinde kütle kontrollü yerleştirilmiş ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemet değerleri ile hem zayıf zeminin hem de dolgu tabakalarının su içeriği oranları Şekil 4.58'de verilmiştir.

Seri V deneyleri sonucu elde edilen gerilme (q)-deplasman oranı (s/D) eğrileri ise Şekil 4.59'da gösterilmiştir. Seri V için yapılan tüm deneylerde 150 mm çapında model temel kullanılmıştır. Seri V deneylerinde dolgu durumunun etkisini göstermek için, Şekil 4.59'da 150 mm çapında model temel kullanılarak zayıf zemin durumu için yapılmış model yükleme deney sonucu da sunulmuştur. Bunların birlikte temel çapının %5, %10 ve %15'ine karşılık gelen oturma değerleri için elde edilen taşıma gücü değerleri (q_u) Çizelge 4.39'da gösterilmiştir.

Şekil 4.59 ve Çizelge 4.39'da görüldüğü gibi tüm dolgu kalınlıkları için taşıma gücü değeri artmıştır. Bununla birlikte, dolgu tabakasının kalınlığı arttıkça taşıma gücü değerinin de arttığı görülmüştür.



Şekil 4.58. Seri V deneyleri için mukavemet ve su içeriği kontrolü



Şekil 4.59. Geogrid ile güçlendirilmiş dolgu durumu için (Seri V) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri

Çizelge 4.39. Geogrid ile güçlendirilmiş dolgu durumu için (Seri V) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri

Test Numunesi	s/D=%5 için q _u Değeri (kPa)	s/D=%10 için q _u Değeri (kPa)	s/D=%15 için q _u Değeri (kPa)
H=0.00D (Seri I)	48.14	77.97	104.94
H=0.33D (Seri V)	158.29	223.05	262.10
H=0.67D (Seri V)	301.59	434.67	471.94
H=1.00D (Seri V)	460.40	696.02	825.69

Çizelge 4.37 ve Çizelge 4.39 incelendiğinde, geogridle güçlendirmenin, CDW dolgusunun taşıma gücünü artırdığı görülmüştür. Bu artışı, geogrid ile CDW arasında oluşan sürtünme kuvvetinin (kenetlenme) ve geogridin çekme dayanımının yüksek olmasının sağladığı düşünülmüştür.

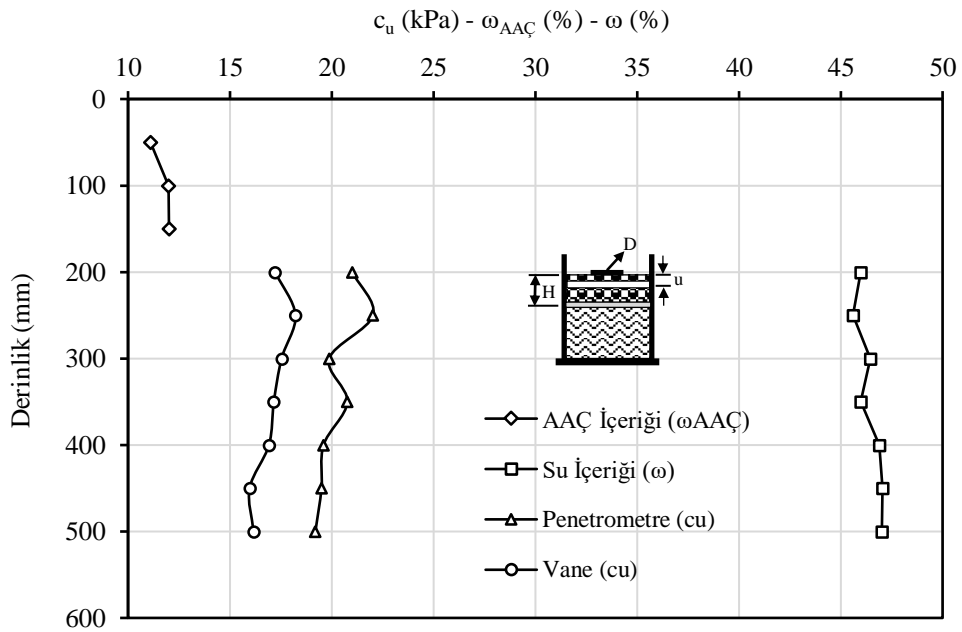
4.4.6 YFC-AAÇ Katkılı Geogridle Güçlendirilmiş Dolgu Durumuna ait Bulgular (Seri VI)

Seri VI model yükleme deneylerinde zayıf zemin üzerine inşa edilmiş YFC-AAÇ katkıli geogrid ile güçlendirilmiş dolgunun taşıma gücü araştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen serbest basınç ve CBR deneyleri sonuçlarına göre en iyi performansın (güçlendirmenin) görüldüğü AAÇ katkıli %20 oranında YFC

eklenmiş CDW numunesi dolgu hazırlanması için kullanılmıştır. Geogridin dolgu içerisindeki konumu (yerleştirme derinliği) olarak literatürde önerilen ve en iyi performansın görüldüğü $u=0.17D$ (u , yüzeyden itibaren geogridin yerleştirilme derinliği) derinliği tercih edilmiştir (Ok, 2018; Örnek, 2009)

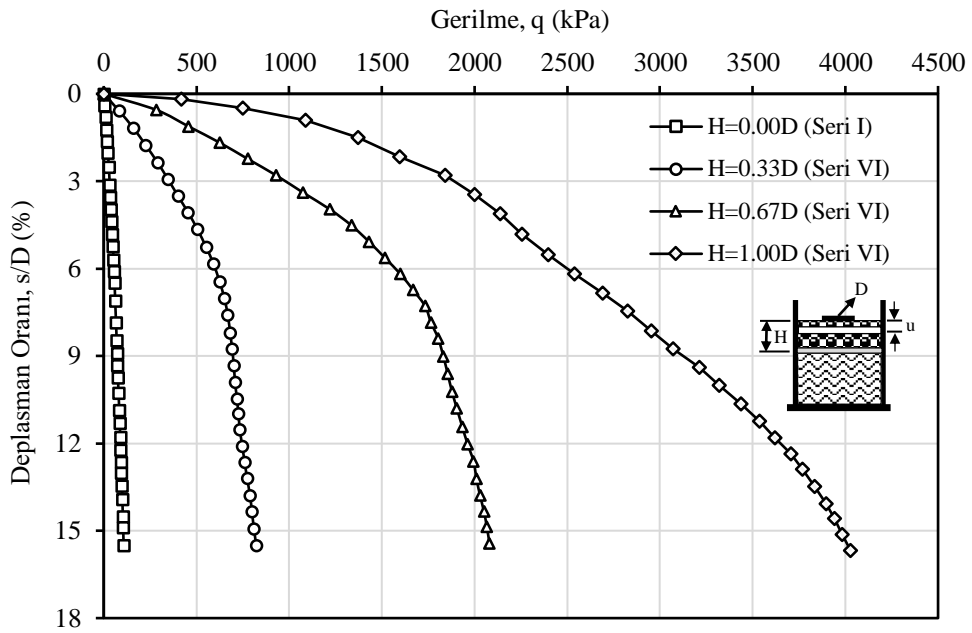
Seri VI deneylerinde dolgu ile zayıf zemin arayüzüne ayırma işlevi için geotekstil yerleştirilmiştir. Seri VI deneylerinde de $H/D=0.33, 0.67$ ve 1.00 olmak üzere üç farklı kalınlıkta YFC-AAÇ katkılı geogridle güçlendirilmiş CDW dolgusu üzerinde model yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney serisinde dolgu kalınlığının etkisi de incelenmiştir.

Bütün Seri VI deneylerinde, zayıf zemin, Seri I deneylerinde olduğu gibi yerleştirilmiş ve her tabakada mukavemet (vane ve penetrometre) ve su içeriği kontrolü yapılmıştır. Zayıf zemin ile dolgu arasına geotekstil yerleştirilmiş ve daha sonra zayıf zemin üzerindeki dolgu tabakası da 5 cm'lik tabakalar halinde kütle kontrollü yerleştirilmiş ve AAÇ içeriği kontrolü yapılmıştır. Derinlik boyunca, her tabaka için elde edilen zayıf zeminin mukavemet değerleri ile zayıf zemin tabakalarının su içeriği ve dolgu tabakalarının AAÇ içeriği oranları Şekil 4.60'da verilmiştir.



Şekil 4.60. Seri VI deneyleri için mukavemet, su içeriği ve AAÇ içeriği kontrolü

Seri VI deneyleri sonucu elde edilen gerilme (q)-deplasman oranı (s/D) eğrileri ise Şekil 4.61’de verilmiştir. Seri VI için yapılan tüm deneylerde 150 mm çapında model temel kullanılmıştır. Seri VI deneylerinde dolgu durumunun etkisini göstermek için, Şekil 4.61’de 150 mm model temel kullanılarak zayıf zemin durumu için yapılmış model yükleme deney sonucu da sunulmuştur. Ayrıca, temel çapının %5, %10 ve %15’ine karşılık gelen oturma değerleri için elde edilen taşıma gücü değerleri (q_u) Çizelge 4.40’da gösterilmiştir.



Şekil 4.61. YFC-AAÇ katkılı geogrid ile güçlendirilmiş dolgu durumu için (Seri VI) model yükleme deneylerinden elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrileri

Çizelge 4.40. YFC-AAÇ katkılı geogrid ile güçlendirilmiş dolgu durumu için (Seri VI) model yükleme deneyleri sonucu belirlenen taşıma gücü değerleri

Test Numunesi	s/D=%5 için q_u Değeri (kPa)	s/D=%10 için q_u Değeri (kPa)	s/D=%15 için q_u Değeri (kPa)
H=0.00D (Seri I)	48.14	77.97	104.94
H=0.33D (Seri VI)	532.06	709.73	811.41
H=0.67D (Seri VI)	1417.55	1869.85	2069.62
H=1.00D (Seri VI)	2292.79	3318.03	3973.49

Şekil 4.61 ve Çizelge 4.40’da görüldüğü gibi tüm dolgu kalınlıkları için taşıma gücü değeri artmıştır. Bununla birlikte, dolgu tabakasının kalınlığı arttıkça taşıma gücü değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Çizelge 4.38 ve Çizelge 4.40 incelendiğinde,

Geogrid ve YFC-AAÇ kombinasyonu ile güçlendirmenin CDW'nin taşıma gücünü oldukça önemli bir derecede artırdığı görülmüştür. Hem YFC-AAÇ ile güçlendirmenin rijitleştirme etkisinin hem de geogridin çekme kuvvetlerini almasının bu kadar yüksek taşıma gücü artışını sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca, YFC-AAÇ ile güçlendirmeden dolayı önemli derecede rijitleşen CDW dolgusu içinde geogridin etkin olarak çalıştığı Seri VI deneyleri ile gösterilmiştir.

4.4.7 Model Yükleme Deneylerinin Kendi İçerisinde Kıyaslanması

Model yükleme deneyleri sonucunda, zayıf zemin üzerine inşa edilmiş güçlendirilmemiş veya güçlendirilmiş dolgunun taşıma gücüne yaptığı katkının derecesini yorumlamak amacıyla Binquet ve Lee (1975) tarafından önerilen taşıma kapasitesi oranı (BCR) tanımlanmıştır. Yapılan tüm model yükleme deneylerinden elde edilen taşıma gücü değerleri yorumlanırken bu eşitlik kullanılmıştır. Bunun için aşağıda belirtilen Denklem (4.3) tanımlanmıştır.

$$BCR_{MYD} = \frac{q_{ur}}{q_{uo}} \quad (4.3)$$

Denklem (4.3)'te, “ q_{ur} ”, BCR_{MYD} değerinin hesaplanmak istendiği model yükleme deneyinden elde edilen q_u değeri; “ q_{uo} ”, zayıf zeminin model yükleme deneyinden elde edilen q_u değeridir.

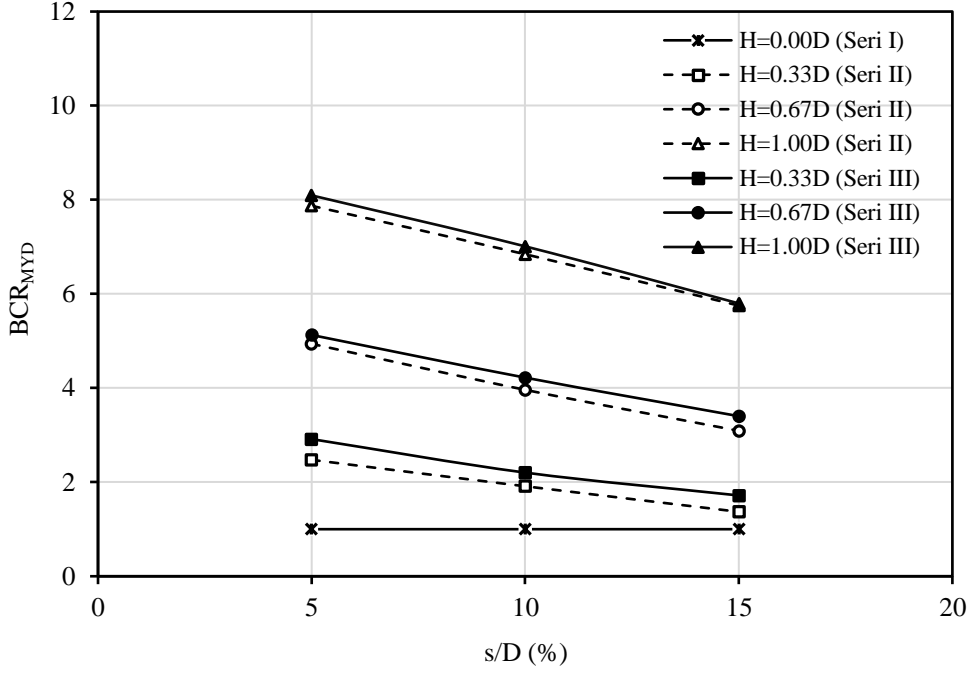
Zayıf zeminin BCR_{MYD} değeri 1 olarak hesaplanmıştır. Eğer, BCR_{MYD} değeri 1'den küçük ise güçlendirme sağlanmamış, 1'den büyük ise güçlendirme sağlanmıştır. Hesaplanan BCR_{MYD} değeri 1 değerinden ne kadar büyükse güçlendirme miktarı o kadar iyi demektir.

Şekil 4.62'de Seri II ve Seri III deneylerinin farklı H/D oranları için hesaplanmış BCR_{MYD} değerlerine karşılık s/D oranları görülmektedir. Ayrıca Seri II ve Seri III için hesaplanmış BCR_{MYD} değerleri sırası ile Çizelge 4.41 ve Çizelge 4.42'de sunulmuştur. Şekil 4.62'de görüldüğü gibi hem Seri II hem de Seri III deneylerindeki tüm dolgu durumlarının zayıf zeminin taşıma gücünü artırdığı görülmüştür. Bu taşıma gücü artışını sağlayan en önemli etkenin, uygulanan gerilmenin zayıf zemin tabakasından daha sağlam bir tabaka tarafından taşınmasıdır.

Bununla birlikte, Şekil 4.62'de her iki deney serisi incelendiğinde, geotekstil taşıma gücüne katkısının ihmal edilebilecek kadar az olduğu görülmüştür. Hem

geotekstil ile zemin arasında bir kenetlenme olmamasının hem de geotekstilin çekme kapasitesinin düşük olmasının bu duruma neden olduğu düşünülmüştür. Yine de en yüksek katkı $H=0.33D$ durumunda gerçekleşmiştir.

Ek olarak, oturma oranı arttıkça tüm Seri II ve Seri III deneylerinde BCR_{MYD} değerinin azaldığı, dolgu kalınlığı arttıkça BCR_{MYD} değerinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.62. Seri II ve Seri III deneyleri için BCR_{MYD} -s/D ilişkisi

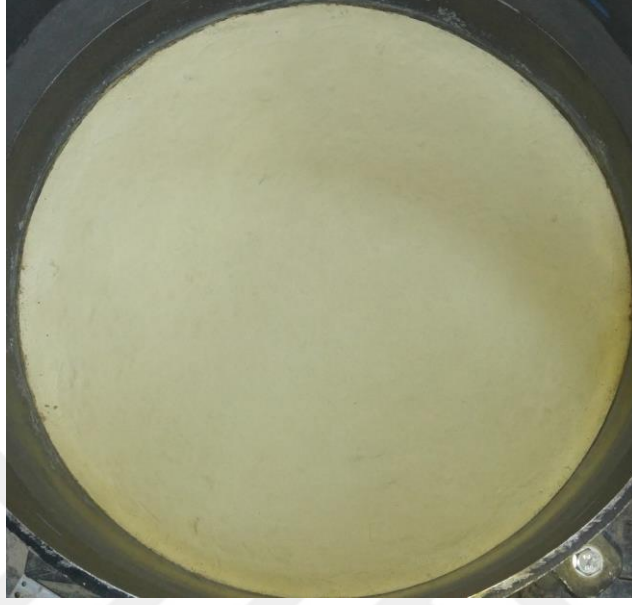
Çizelge 4.41. Seri II deneyleri için hesaplanan BCR_{MYD} değerleri

Test Numunesi	s/D=%5 için BCR	s/D=%10 için BCR	s/D=%15 için BCR
H=0.00D (Seri I)	1.00	1.00	1.00
H=0.33D (Seri II)	2.47	1.91	1.37
H=0.67D (Seri II)	4.94	3.96	3.09
H=1.00D (Seri II)	7.87	6.84	5.75

Çizelge 4.42. Seri III deneyleri için hesaplanan BCR_{MYD} değerleri

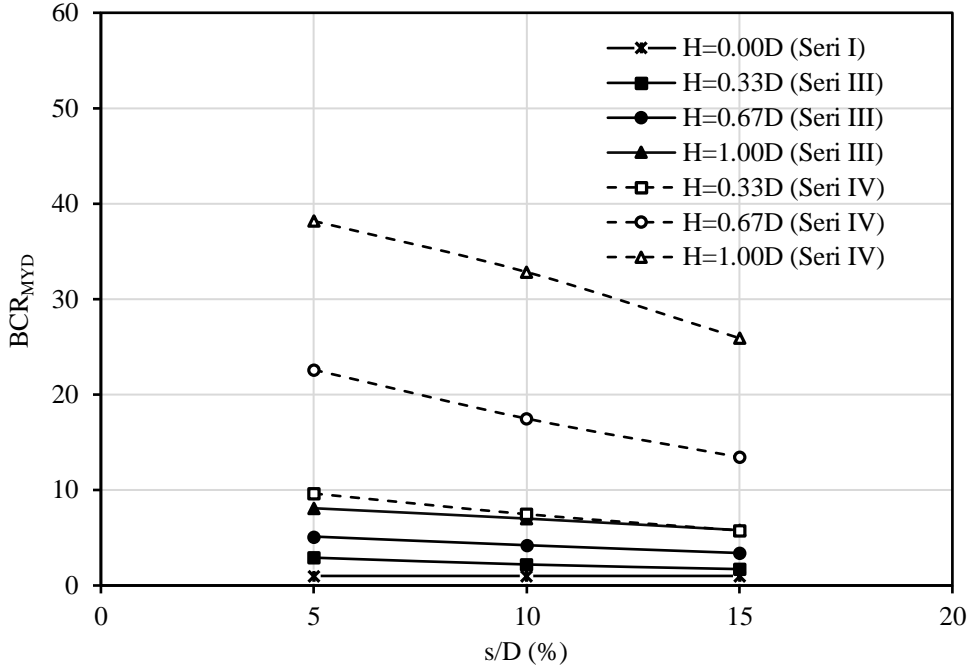
Test Numunesi	s/D=%5 için BCR	s/D=%10 için BCR	s/D=%15 için BCR
H=0.00D (Seri I)	1.00	1.00	1.00
H=0.33D (Seri III)	2.91	2.20	1.72
H=0.67D (Seri III)	5.13	4.22	3.40
H=1.00D (Seri III)	8.09	7.01	5.80

Ancak geotekstilin temel işlevi olan ayırma işlevini yerine getirdiği Şekil 4.63'te görülmektedir. Geotekstilin kullanıldığı deney serilerinde, Şekil 4.63'te görüldüğü gibi, granüler malzemeler zayıf zemin ortamına geçmemiştir.



Şekil 4.63. Geotekstilin deneyden sonra çıkartılmasıyla kil zemin yüzeyinde oluşan görüntü

Şekil 4.64'te Seri III ve Seri IV deneylerinin farklı H/D oranları için hesaplanmış BCR_{MYD} değerlerine karşılık s/D oranları sunulmuştur. Ayrıca Seri IV için hesaplanmış BCR_{MYD} değerleri Çizelge 4.43'te verilmiştir. Şekil 4.64'te açıkça görüldüğü gibi Seri IV deneylerindeki tüm dolgu durumları zayıf zeminin taşıma gücünü artırmıştır. Ayrıca, Şekil 4.64'te her iki deney serisi incelendiğinde, YFC-AAÇ katkısının taşıma gücünü önemli oranda artırdığı belirlenmiştir. YFC-AAÇ ile CDW dolgusunun önemli derecede rijitleştirilmesi bu sonucun oluşmasını sağlamıştır. Dahası, oturma oranı arttıkça tüm Seri IV deneylerinde BCR_{MYD} değerinin azaldığı, dolgu kalınlığı arttıkça BCR_{MYD} değerinin arttığı görülmüştür.

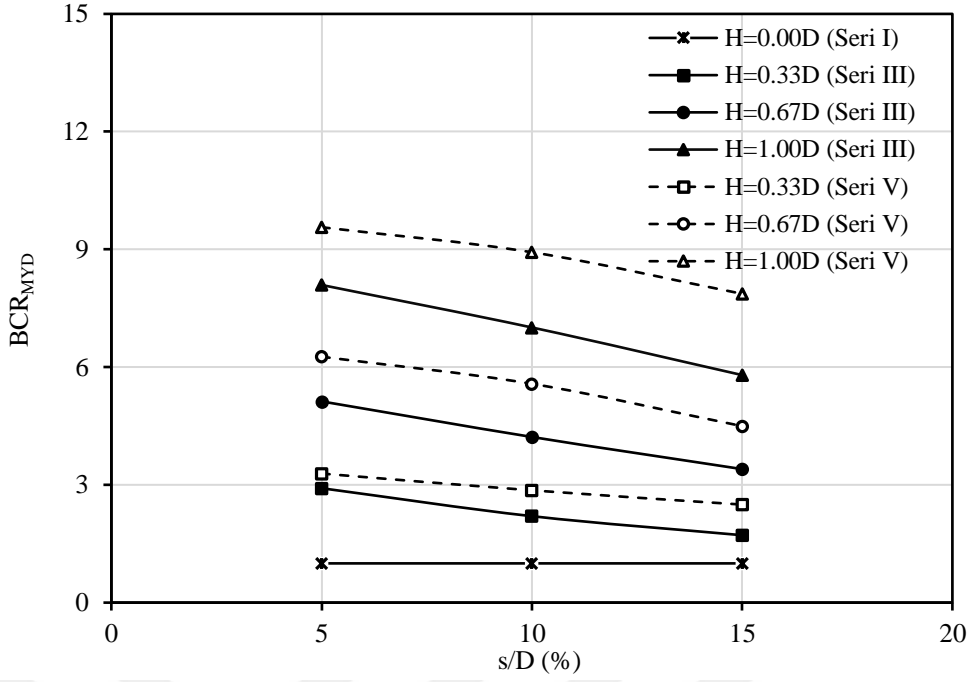


Şekil 4.64. Seri III ve Seri IV deneyleri için BCR_{MYD} -s/D ilişkisi

Çizelge 4.43. Seri IV deneyleri için hesaplanan BCR_{MYD} değerleri

Test Numunesi	s/D=%5 için BCR	s/D=%10 için BCR	s/D=%15 için BCR
H=0.00D (Seri I)	1.00	1.00	1.00
H=0.33D (Seri IV)	9.64	7.47	5.76
H=0.67D (Seri IV)	22.59	17.48	13.45
H=1.00D (Seri IV)	38.18	32.84	25.91

Şekil 4.65'te Seri III ve Seri V deneylerinin farklı H/D oranları için hesaplanmış BCR_{MYD} değerlerine karşılık s/D oranları verilmiştir. Ayrıca Seri V için hesaplanmış BCR_{MYD} değerleri Çizelge 4.44'te gösterilmiştir. Şekil 4.65'te açıkça görüldüğü gibi Seri V deneylerindeki tüm dolgu durumları zayıf zeminin taşıma gücünü artırmıştır. Bununla birlikte, Şekil 4.65'te her iki deney serisi incelendiğinde, geogrid ile güçlendirmenin taşıma gücünü artırdığı görülmüştür. Bu durum geogridin taşıma gücüne katkısını göstermekte, CDW içinde geogridin etkin bir şekilde çalıştığını ispatlamaktadır. Ek olarak, oturma oranı arttıkça tüm Seri V deneylerinde BCR_{MYD} değerinin azaldığı, dolgu kalınlığı arttıkça BCR_{MYD} değerinin arttığı belirlenmiştir.



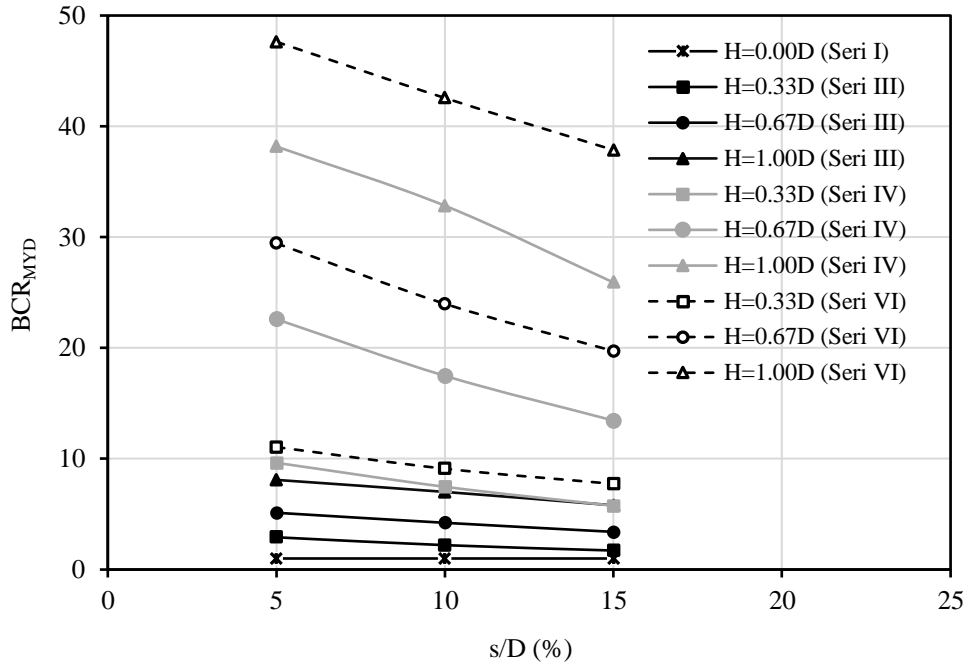
Şekil 4.65. Seri III ve Seri V deneyleri için BCR_{MYD} -s/D ilişkisi

Çizelge 4.44. Seri V deneyleri için hesaplanan BCR_{MYD} değerleri

Test Numunesi	s/D=%5 için BCR	s/D=%10 için BCR	s/D=%15 için BCR
H=0.00D (Seri I)	1.00	1.00	1.00
H=0.33D (Seri V)	3.29	2.86	2.50
H=0.67D (Seri V)	6.27	5.57	4.50
H=1.00D (Seri V)	9.56	8.93	7.87

Şekil 4.66’da Seri III, Seri IV ve Seri VI deneylerinin farklı H/D oranları için hesaplanmış BCR_{MYD} değerlerine karşılık s/D oranları sunulmuştur. Bununla birlikte, Seri VI için hesaplanmış BCR_{MYD} değerleri Çizelge 4.45’te görüldüğü gibidir. Şekil 4.66’da açıkça görüldüğü gibi Seri VI deneylerindeki tüm dolgu durumlarının zayıf zeminin taşıma gücünü artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, Şekil 4.66’da her iki deney serisi incelendiğinde, YFC-AAÇ ile güçlendirilmiş CDW dolgusunun taşıma gücü değerlerinin, güçlendirilmemiş dolguya göre büyük ölçüde yüksek çıktığı görülmüştür. CDW dolgusu içine YFC-AAÇ eklendiğinde gerçekleşen geopolimer reaksiyonları, CDW dolgusunu önemli ölçüde rijitleştirdiğinden, CDW dolgusunun taşıma gücünü önemli derecede artırdığı düşünülmektedir. Hatta geogrid yerleştirilmesinin YFC-AAÇ eklenmiş dolgusunun taşıma gücünü artırdığı

gözlemlenmiştir. Bu durum YFC-AAÇ ile rijitleştirilmiş CDW dolgusu içinde geogridin efektif bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Buna ek olarak, oturma oranı arttıkça tüm Seri VI deneylerinde BCR_{MYD} değerinin azaldığı, dolgu kalınlığı arttıkça BCR_{MYD} değerinin arttığı belirlenmiştir.

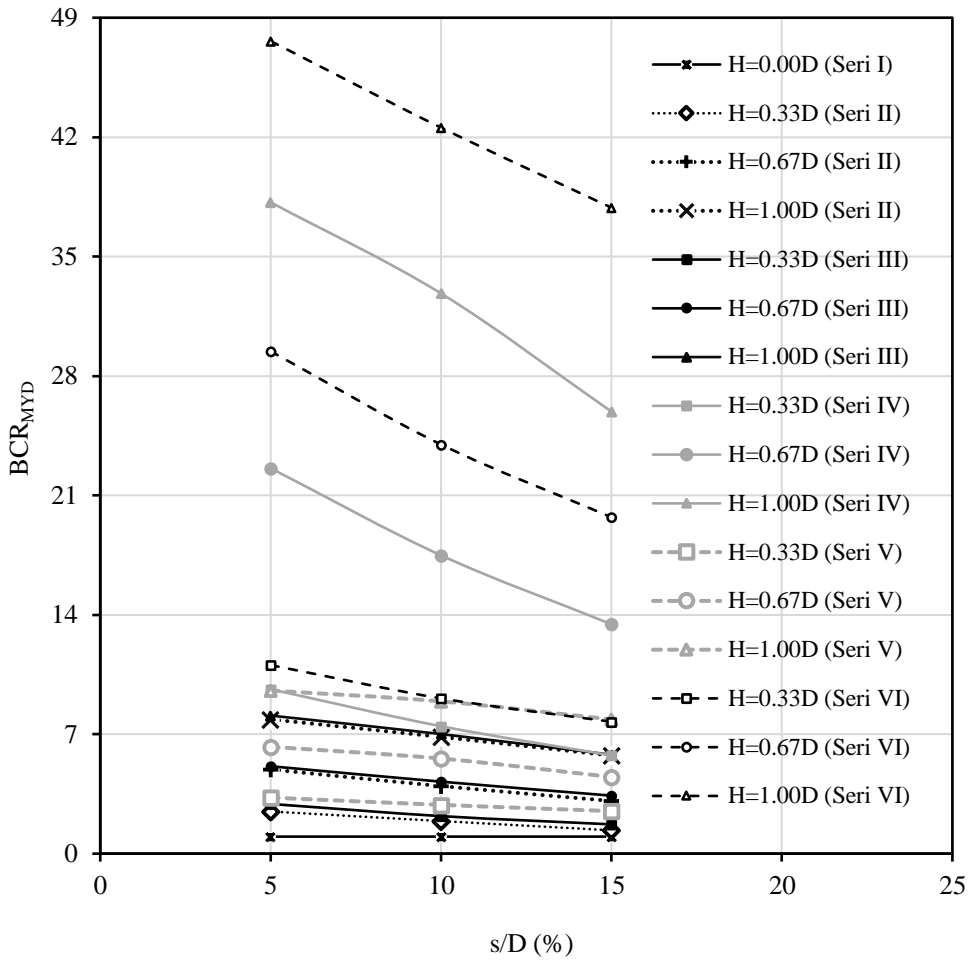


Şekil 4.66. Seri III, Seri IV ve Seri VI deneyleri için BCR_{MYD} -s/D ilişkisi

Çizelge 4.45. Seri VI deneyleri için hesaplanan BCR_{MYD} değerleri

Test Numunesi	s/D=%5 için BCR	s/D=%10 için BCR	s/D=%15 için BCR
H=0.00D (Seri I)	1.00	1.00	1.00
H=0.33D (Seri VI)	11.05	9.10	7.73
H=0.67D (Seri VI)	29.45	23.98	19.72
H=1.00D (Seri VI)	47.63	42.56	37.86

Şekil 4.67’de tüm deney serileri için farklı H/D oranları için hesaplanmış BCR_{MYD} değerlerine karşılık s/D oranları gösterilmiştir. Şekil 4.67’de görüldüğü gibi en yüksek taşıma gücü değerleri Seri VI deneylerinde oluşmuştur. En düşük taşıma gücü değerleri ise Seri I değerlerinde oluşmuştur. Düşük taşıma gücünden yüksek taşıma gücüne doğru deney serileri; Seri I, Seri II, Seri III, Seri V, Seri IV ve Seri VI şeklinde sıralanmıştır.



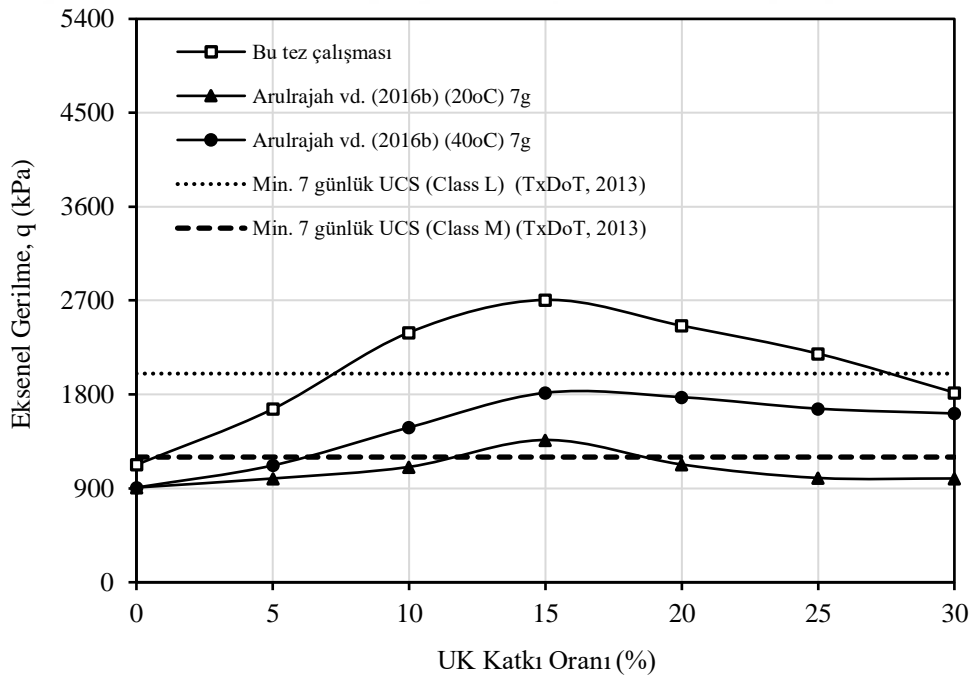
Şekil 4.67. Tüm deney serileri için BCR_{MYD} -s/D ilişkisi

4.5 Serbest Basınç Deneylerinin Farklı Çalışmalar ile Kıyaslanması

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri sonucunda belirlenen serbest basınç mukavemeti değerleri Arulrajah vd. (2016a) ve Arulrajah vd. (2016b) tarafından yapılan çalışmalarda bulunan değerler ile kıyaslanmıştır. Ayrıca tez çalışması kapsamından bulunan serbest basınç mukavemeti değerleri TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) tarafından belirlenen minimum 7 günlük serbest basınç dayanımları (UCS) ile kıyaslanmıştır.

Arulrajah vd. (2016b) AAÇ ile farklı oranlarda UK ekledikleri CDW numunelerini 20 ve 40 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta 7 gün kür etmişlerdir. Daha sonra bu numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu tez

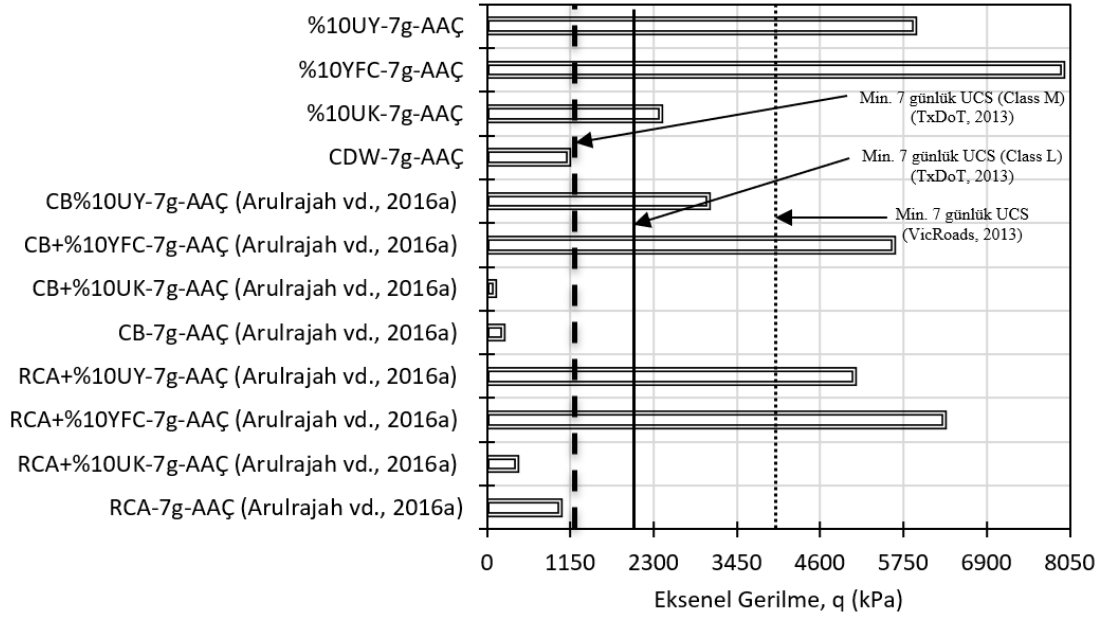
çalışması kapsamında AAÇ ile farklı oranlarda UK eklenerek hazırlanmış ve 7 gün kür edilmiş CDW numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucu bulunmuş serbest basınç mukavemeti değerleri, Arulrajah vd. (2016b) tarafından bulunan ve TxDOT (2013) tarafından önerilen serbest basınç mukavemeti değerleri (UCS) ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama Şekil 4.68’de görüldüğü gibidir. Şekil 4.68’de görüldüğü üzere, deney sonuçları elde edilen davranışın birbirine yakın olduğu ve bulunan optimum UK katkı oranının aynı olduğu (%15) belirlenmiştir. Ayrıca, bu tez çalışmasında AAÇ eklenmiş ve 7 gün kür edilmiş tüm UK katkı oranlarının TxDOT (2013) tarafından “Class M” için, %10, %15, %20 ve %25 UK katkı oranlarının ise “Class L” için önerilen değerden fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 4.68. AAÇ eklenmiş UK katkılı 7 gün kür edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin Arulrajah vd. (2016b) ve TxDOT (2013) ile kıyaslanması

Arulrajah vd. (2016a) AAÇ ile %10 oranında UK, YFC ve UY ekledikleri CDW (RCA ve CB) numunelerini 7 gün kür etmişler, daha sonra bu numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu tez çalışması kapsamında AAÇ ile %10 oranında UK, YFC ve UY eklenerek hazırlanmış ve 7 gün kür edilmiş CDW numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucu bulunmuş serbest basınç mukavemeti değerleri, Arulrajah vd. (2016a) tarafından bulunan ve TxDOT (2013) ile

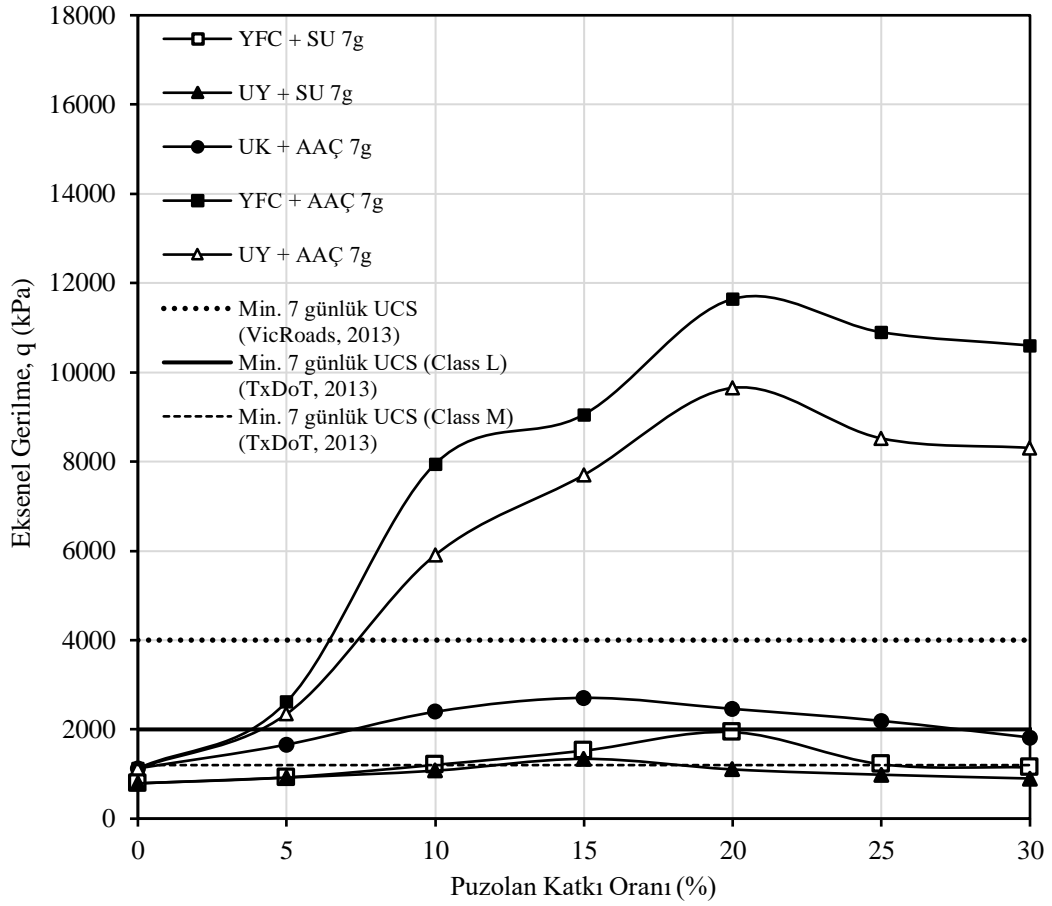
VicRoads (2013) tarafından önerilen serbest basınç mukavemeti değerleriyle (UCS) kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama Şekil 4.69'da sunulmuştur.



Şekil 4.69. AAÇ eklenmiş %10 puzolan katkılı 7 gün kür edilmiş numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin Arulrajah vd. (2016a), TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) ile kıyaslanması

Şekil 4.69 incelendiğinde, her iki çalışmada da YFC ile en yüksek UK ile en düşük serbest basınç mukavemeti değeri elde edilmiştir.

Ayrıca 7 günlük kür süresine tabi tutulmuş test numunelerinin serbest basınç mukavemetlerinin TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) tarafından önerilen değerler ile kıyaslanması Şekil 4.70'de gösterilmiştir. Şekil 4.70'de "UK+SU 7g" numunelerin sonuçları TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) tarafından önerilen değerlerden düşük olduğu için gösterilmemiştir.



Şekil 4.70. 7 günlük kür süresine tabi tutulmuş test numunelerinin serbest basınç mukavemetlerinin TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) tarafından önerilen değerlerle kıyaslanması

Bunlar birlikte Çizelge 4.46’da TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) tarafından önerilen serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha büyük olan değerler sunulmuştur.

Şekil 4.70 ve Çizelge 4.46’da görüldüğü gibi bu tez çalışması kapsamında hazırlanan pek çok numunenin TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) tarafından önerilen değerlerden büyük olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.46. TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) tarafından önerilen serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha büyük değerlere sahip test numuneleri

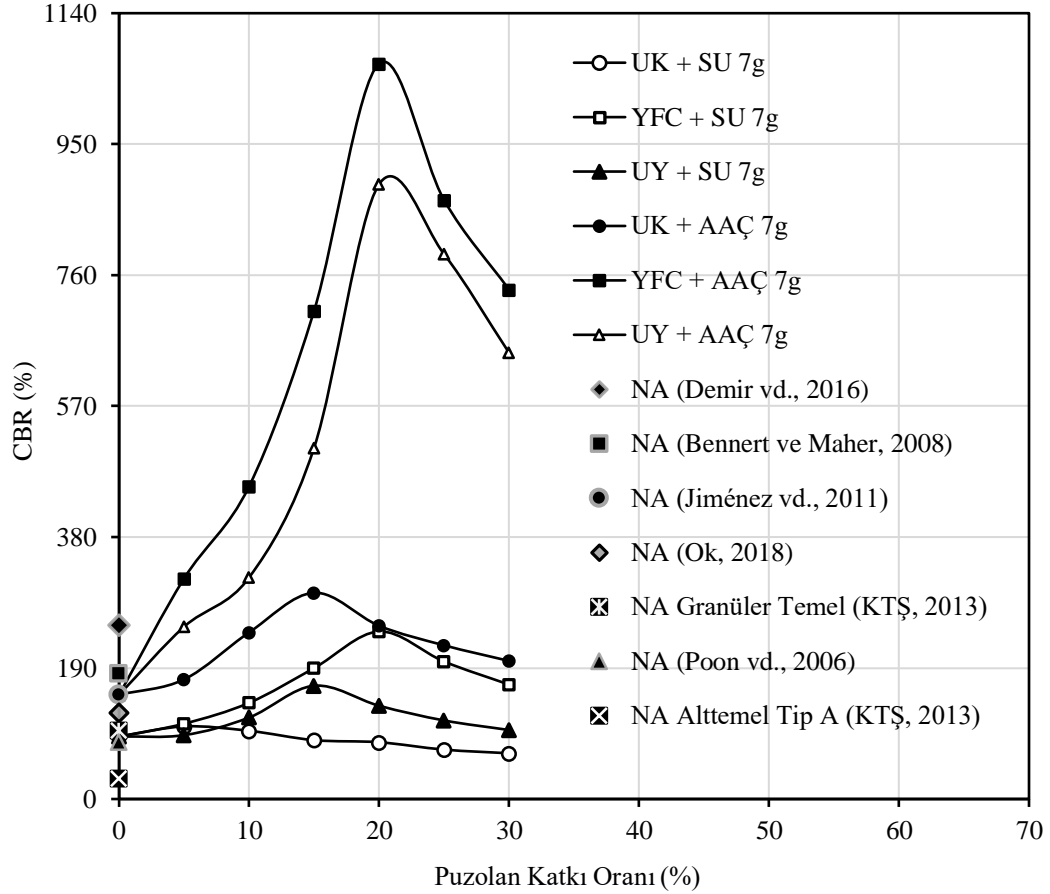
Min. 7 günlük UCS (Class M) (TxDoT, 2013)		Min. 7 günlük UCS (Class L) (TxDoT, 2013)		Min. 7 günlük UCS (VicRoads, 2013)	
Numune	q _u UCS (kPa)	Numune	q _u UCS (kPa)	Numune	q _u UCS (kPa)
%10YFC-7g	1205.33	%25UK-7g-AAÇ	2191.28	%10UY-7g-AAÇ	5906.82
%25YFC-7g	1219.38	%5UY-7g-AAÇ	2345.74	%15UY-7g-AAÇ	7701.09
%15UY-7g	1339.78	%10UK-7g-AAÇ	2394.18	%10YFC-7g-AAÇ	7950.85
%15YFC-7g	1523.81	%20UK-7g-AAÇ	2459.39	%30UY-7g-AAÇ	8306.22
%5UK-7g-AAÇ	1660.56	%5YFC-7g-AAÇ	2617.65	%25UY-7g-AAÇ	8520.27
%30UK-7g-AAÇ	1818.41	%15UK-7g-AAÇ	2706.49	%15YFC-7g-AAÇ	9054.22
%20YFC-7g	1938.21	%10UY-7g-AAÇ	5906.82	%20UY-7g-AAÇ	9652.05
%25UK-7g-AAÇ	2191.28	%15UY-7g-AAÇ	7701.09	%30YFC-7g-AAÇ	10601.69
%5UY-7g-AAÇ	2345.74	%10YFC-7g-AAÇ	7950.85	%25YFC-7g-AAÇ	10898.70
%10UK-7g-AAÇ	2394.18	%30UY-7g-AAÇ	8306.22	%20YFC-7g-AAÇ	11643.64
%20UK-7g-AAÇ	2459.39	%25UY-7g-AAÇ	8520.27		
%5YFC-7g-AAÇ	2617.65	%15YFC-7g-AAÇ	9054.22		
%15UK-7g-AAÇ	2706.49	%20UY-7g-AAÇ	9652.05		
%10UY-7g-AAÇ	5906.82	%30YFC-7g-AAÇ	10601.69		
%15UY-7g-AAÇ	7701.09	%25YFC-7g-AAÇ	10898.70		
%10YFC-7g-AAÇ	7950.85	%20YFC-7g-AAÇ	11643.64		
%30UY-7g-AAÇ	8306.22				
%25UY-7g-AAÇ	8520.27				
%15YFC-7g-AAÇ	9054.22				
%20UY-7g-AAÇ	9652.05				
%30YFC-7g-AAÇ	10601.69				
%25YFC-7g-AAÇ	10898.70				
%20YFC-7g-AAÇ	11643.64				

4.6 CBR Deneylerinin Farklı Çalışmalar ile Kıyaslanması

Tez çalışması kapsamında 7 gün kür edilmiş farklı test numuneleri için hesaplanan CBR değerleri ile literatürde doğal (NA) ve CDW numuneleri için hesaplanmış CBR değerleri karşılaştırılmış ve Şekil 4.71’de sunulmuştur.

Şekil 4.71’de görüldüğü gibi tez çalışması kapsamında deneylere tabi tutulan pek çok test numunesinin CBR değerlerinin, literatürdeki doğal agrega (NA) ve CDW numuneleri için hesaplanmış değerlerden yüksek çıktığı belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, bu tez çalışması kapsamında kullanılan CDW numunesinin bazı doğal

agregalardan daha yüksek CBR değerine ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, bu tez çalışması kullanılan CDW agregalarının, KTŞ (2013) dikkate alındığında, CBR değeri yönünden uygun olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.71. 7 gün kür edilmiş farklı test numunelerinin CBR değerleri ile literatürdeki doğal (NA) ve CDW numunelerinin CBR değerlerinin karşılaştırılması

Tez çalışması kapsamında 7 gün kür edilmiş farklı test numuneleri için hesaplanan CBR değerleri ile literatürdeki doğal (NA) ve CDW numuneleri için hesaplanmış değerlerin daha iyi kıyaslanabilmesi için, numuneler CBR değerlerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanmış ve Çizelge 4.47’de sunulmuştur. Çizelge 4.47’de literatürdeki değerlerin hücreleri koyuya boyanmış ve italik yazılmıştır. Çizelge 4.47’de görüldüğü gibi tez kapsamında kullanılan güçlendirilmemiş CDW numunesi dahil çoğu test numunesinin literatürdeki değerlerden daha iyi çıktığı görülmüştür.

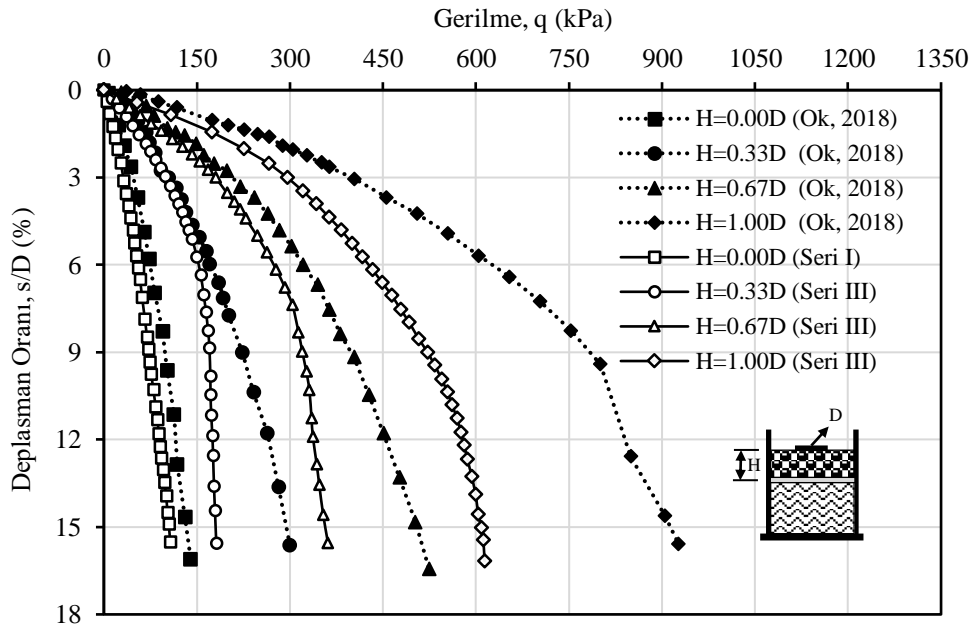
Çizelge 4.47. 7 gün kür edilmiş farklı test numunelerinin CBR değerleri ile literatürdeki değerlerin küçükten büyüğe doğru sıralanması

Numune	CBR (%)	Numune	CBR (%)
<i>NA Dolgu (KTŞ, 2013)</i>	8.00	%10YFC-7g	139.55
<i>NA Alttemel Tip A (KTŞ, 2013)</i>	30.00	CDW-7g-AAÇ	151.22
<i>CDW-2 (Poon ve Chan 2006)</i>	43.00	<i>NA (Jiménez vd., 2011)</i>	152.00
<i>NA Alttemel Tip B (KTŞ, 2013)</i>	50.00	%15UY-7g	164.34
<i>CDW-1 (Poon ve Chan, 2006)</i>	62.00	%30YFC-7g	166.00
<i>CDW (Poon vd., 2006)</i>	66.00	<i>CDW (Bennert ve Maher, 2008)</i>	169.00
%30UK-7g	66.36	%5UK-7g-AAÇ	173.50
%25UK-7g	71.67	<i>NA (Bennert ve Maher, 2008)</i>	182.00
%20UK-7g	82.35	%15YFC-7g	189.90
<i>CDW-2 (Melbouci, 2009)</i>	83.00	%25YFC-7g	199.46
<i>NA (Poon vd., 2006)</i>	83.00	%30UK-7g-AAÇ	200.30
%15UK-7g	85.43	%25UK-7g-AAÇ	222.98
CDW-7g	90.59	%10UK-7g-AAÇ	241.64
%5UY-7g	92.68	%20YFC-7g	242.99
<i>CDW-2 (Jiménez vd., 2011)</i>	94.00	%5UY-7g-AAÇ	249.91
%10UK-7g	98.95	%20UK-7g-AAÇ	251.34
<i>CDW (Ok, 2018)</i>	99.98	<i>NA (Demir vd., 2016)</i>	252.00
<i>NA Granüler Temel (KTŞ, 2013)</i>	100.00	%15UK-7g-AAÇ	299.20
%30UY-7g	100.10	%5YFC-7g-AAÇ	319.98
%5UK-7g	105.36	%10UY-7g-AAÇ	321.32
%5YFC-7g	109.28	%10YFC-7g-AAÇ	453.62
%25UY-7g	113.98	%15UY-7g-AAÇ	509.53
<i>CDW-3 (Melbouci, 2009)</i>	117.00	%30UY-7g-AAÇ	647.30
%10UY-7g	118.19	%15YFC-7g-AAÇ	708.25
<i>NA Plentmiks Temel (KTŞ, 2013)</i>	120.00	%30YFC-7g-AAÇ	738.92
<i>NA (Ok, 2018)</i>	125.16	%25UY-7g-AAÇ	790.43
<i>CDW-1 (Melbouci, 2009)</i>	128.00	%25YFC-7g-AAÇ	868.89
%20UY-7g	135.30	%20UY-7g-AAÇ	891.84
<i>CDW-1 (Jiménez vd., 2011)</i>	138.00	%20YFC-7g-AAÇ	1066.87

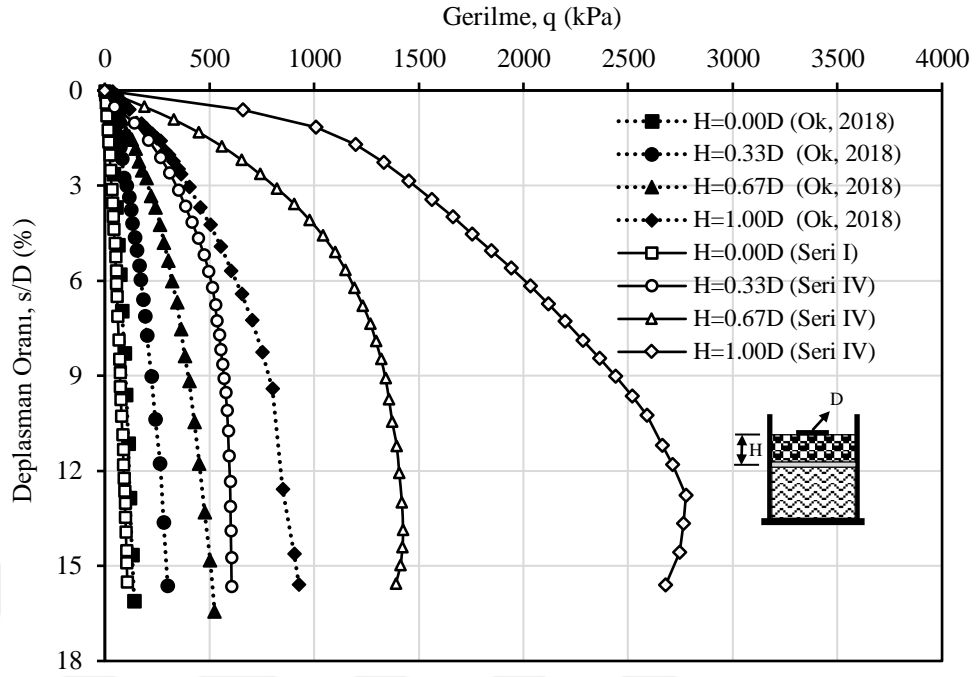
4.7 Model Yükleme Deneylerinin Farklı Çalışmalar ile Kıyaslanması

Tez çalışması kapsamında yapılan model yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlar, Ok (2018) tarafından yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmak için seçilen deneylerinde hem zayıf zeminin hem de zayıf zemin üzerine inşa edilmiş dolgunun taşıma kapasitesini belirlemiştir. Ayrıca karşılaştırma için seçilen dolgu durumu deneylerinde, üç farklı yükseklikte dolgu durumunu ($H=0.33D$, $H=0.67D$, $H=1.00D$) araştırmıştır. Ok (2018) tarafından kullanılan zayıf zeminin CBR değeri %1, drenajsız kayma mukavemeti değeri (c_u) ise 25 kPa'dır. Karşılaştırma için seçilen dolgu durumu, doğal granüler malzemenin CBR değeri %125.16, UCSC'ye ve TS 1500/2000'e göre zemin sınıfı GW'dir. Ok (2018) tarafından kullanılan rijit deney tankının ve model temelin boyutları bu tez çalışmasınıninki ile aynıdır.

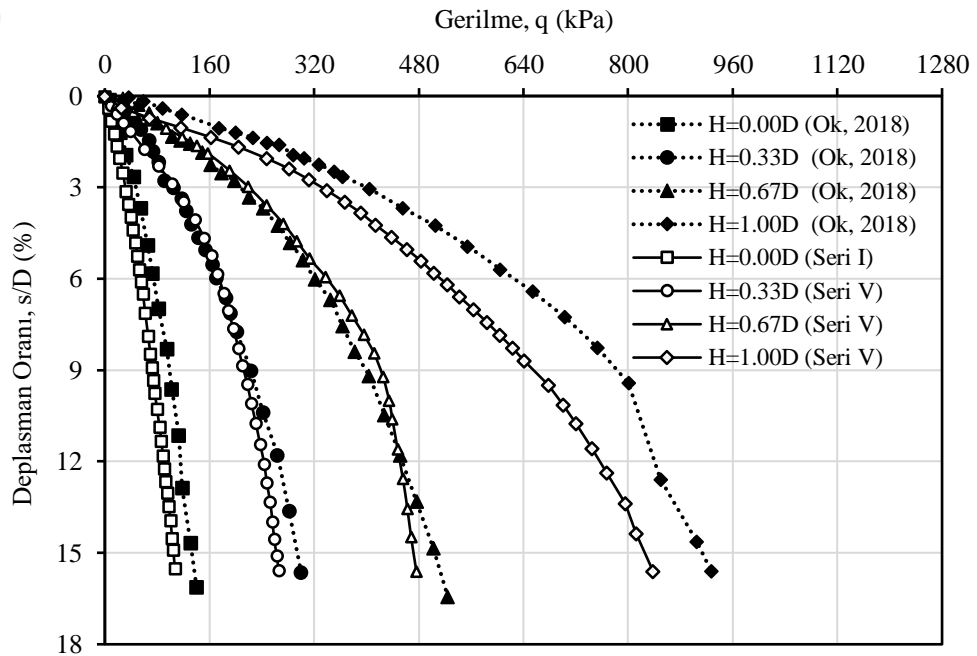
Tez çalışma kapsamında yapılan Seri III, Seri IV, Seri V ve Seri VI model yükleme deneylerinin Ok (2018) tarafından yapılan çalışmalar ile kıyaslanması sırası ile Şekil 4.72, Şekil 4.73, Şekil 4.74 ve Şekil 4.75'te gösterilmiştir.



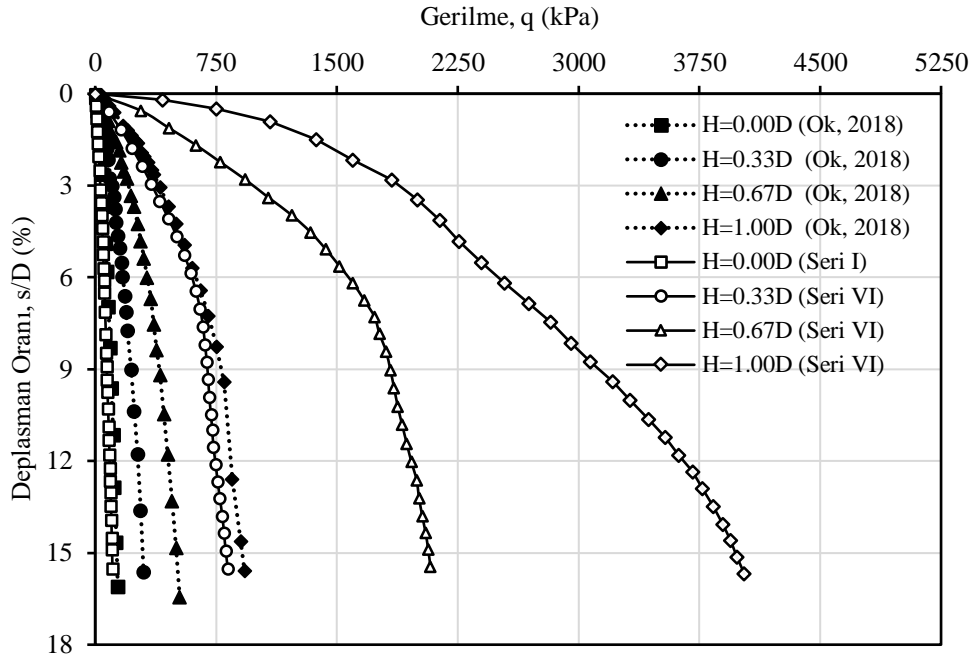
Şekil 4.72. Seri III model yükleme deneylerinin Ok (2018) tarafından yapılan çalışmalar ile kıyaslanması



Şekil 4.73. Seri IV model yükleme deneylerinin Ok (2018) tarafından yapılan çalışmalar ile kıyaslanması



Şekil 4.74. Seri V model yükleme deneylerinin Ok (2018) tarafından yapılan çalışmalar ile kıyaslanması



Şekil 4.75. Seri VI model yüklemeye deneylerinin Ok (2018) tarafından yapılan çalışmaları ile karşılaştırılması

Şekil 4.72, Şekil 4.73, Şekil 4.74 ve Şekil 4.75'te görüldüğü gibi, bu tez çalışmasına ait zayıf zemin durumunun bir miktar daha düşük taşıma gücüne sahip olsada, genel itibari ile zayıf zemin durumu için yapılan deneylerin birbirine oldukça benzer davranışlar gösterdiği, elde edilen sonuçların da birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Bu durumun dolgu durumlarının karşılaştırılabileceğini göstermiştir. Şekil 4.72'de görüldüğü gibi güçlendirilmemiş CDW dolgusunun (Seri III) taşıma gücünün doğal dolguya göre daha düşük değerler verdiği belirlenmiştir. Şekil 4.73'te açıkça görüldüğü gibi, YFC-AAÇ katkılı CDW dolgusunun taşıma gücünün doğal dolguya göre oldukça yüksek çıktığı görülmüştür. Bu değerlendirmeye göre, YFC-AAÇ katkılı CDW dolgusu taşıma gücü açısından doğal agrega yerine tercih edilebileceği düşünülmüştür. Hatta, yapılan bu karşılaştırmaya göre, YFC-AAÇ katkılı CDW ile doğal agregaya göre daha az kalınlıkta dolgu yapılmasının, benzer taşıma gücü değerleri sağlayacağı anlaşılmıştır.

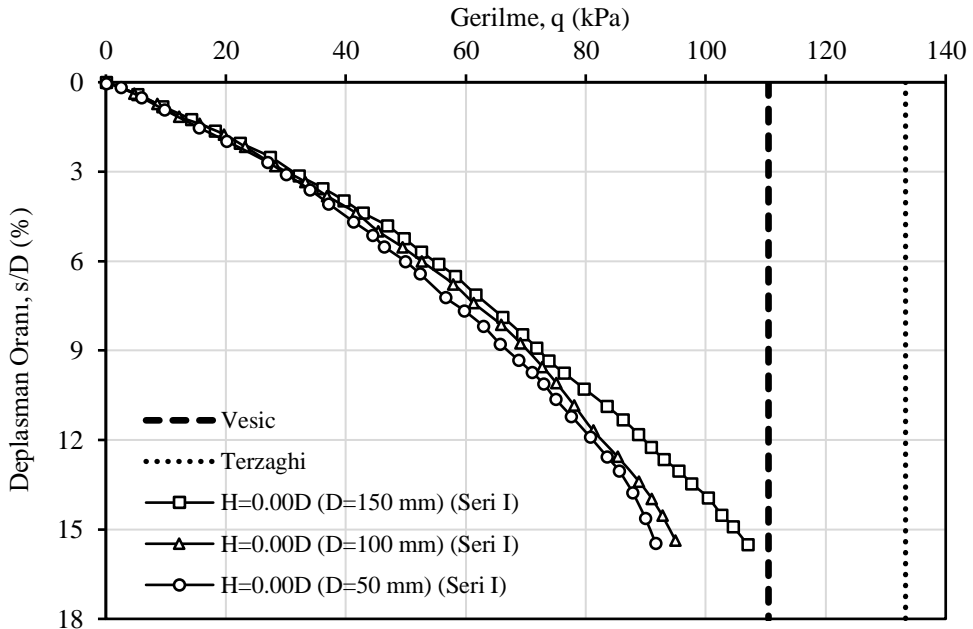
Şekil 4.74 incelendiğinde geogridle güçlendirilmiş CDW'nin doğal agreganın taşıma gücüne oldukça yaklaştığı görülmüştür. Bu durum, geogridle güçlendirilmiş CDW'nin doğal agrega yerine tercih edilebileceği anlamına gelmektedir. Geogrid ile güçlendirilmiş CDW dolgusu doğal dolguya göre bir miktar kalın yapıldığında benzer

taşıma gücü değerlerinde olacağı tahmin edilmektedir. Şekil 4.75'te görüldüğü üzere, YFC-AAÇ katkılı geogridle güçlendirilmiş CDW'nin ise beklendiği üzere doğal agreganın taşıma gücünden çok yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Bu gözleme göre, kalın doğal dolgu yapmak yerine daha ince YFC-AAÇ katkılı geogridle güçlendirilmiş CDW dolgusu yapmanın benzer taşıma gücü değerlerini sağlayabileceği düşünülmüştür.

4.8 Model Yükleme Deneyleri için Analitik Çözümler

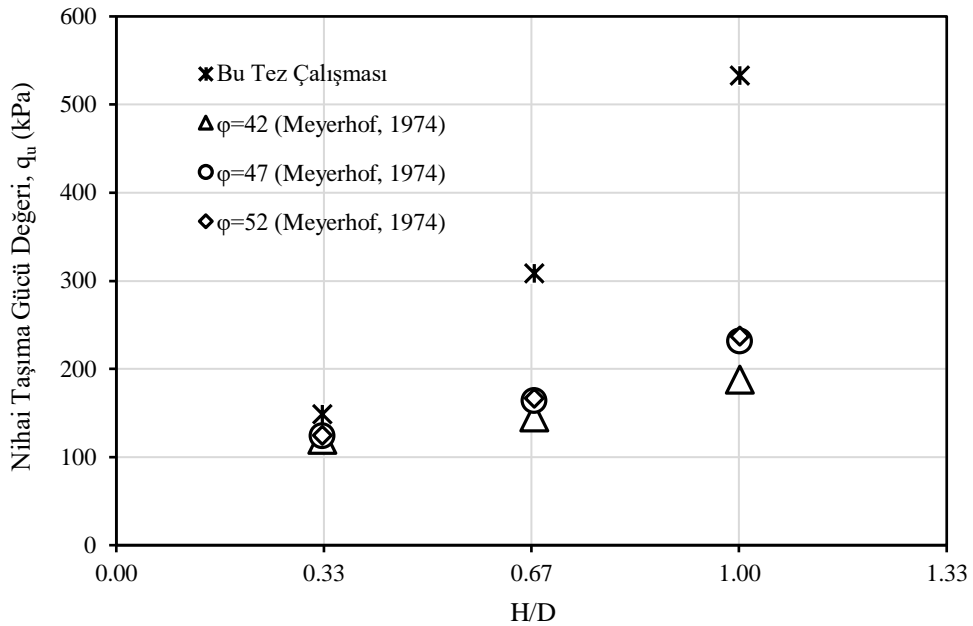
Terzaghi ve Vesic taşıma gücü hesap yöntemleri kullanılarak, model yükleme deneylerinde zayıf zeminin taşıma gücünün bulunduğu deneyler için (Seri I) taşıma gücü hesabı yapılmıştır (Coduto, 2005; Uzuner 2016b). Hesap edilen taşıma gücü değerlerinin deneyler sonrasında elde edilen gerilme-deplasman oranı eğrisi üzerindeki gösterim Şekil 4.76'da gösterilmiştir.

Şekil 4.76'da görüldüğü gibi, zayıf zemin için Terzaghi ve Vesic taşıma gücü hesap yöntemleri kullanılarak bulunan taşıma gücü değerlerinin, deneylerde bulunan değerlerden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Vesic taşıma gücü hesap yönteminin deneysel çalışma sonucuna daha yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4.76. Zayıf zemin için hesaplanan teorik çözümler ile deney sonuçlarının karşılaştırması

Bu tez çalışması kapsamında, tabakalı zemin durumu için üç farklı çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bunlardan birisi Meyerhof (1974) tarafından önerilen hesap metodudur (Denklem 2.7). Bu metot, altta zayıf zemin üstte ince güçlü zeminin olduğu tabakalı zemin durumu için önerilmiştir. Meyerhof (1974) tarafından önerilen taşıma gücü hesabı kullanılarak, zayıf zemin üzerine inşa edilmiş farklı kalınlıklardaki ($H/D=0.33, 0.67$ ve 1.00) CDW dolguları için nihai taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır. Literatürde, CDW agregaları için içsel sürtünme açısının 42° ile 65° arasında değiştiği belirtilmiştir (Ok, 2018). Bu öneri dikkate alınarak hesaplamalarda CDW'nin içsel sürtünme açısı $42^\circ, 47^\circ$ ve 52° olarak kullanılmıştır. Böylece üç farklı durum için değerlendirme yapılmıştır. Meyerhof (1974) tarafından önerilen yöntemle hesaplanan ve deneyler sonucunda elde edilen ($s/D=\%10$ için) nihai taşıma gücü değerlerinin dolgu kalınlığına bağlı olarak değişimi Şekil 4.77'de gösterilmiştir.



Şekil 4.77. CDW dolgusu için teorik çözümler ile deney sonuçlarının karşılaştırması

Şekil 4.77'de görüldüğü gibi, Meyerhof (1974) tarafından önerilen yöntemle hesaplanan taşıma gücü değerleri, kalınlığı az olan dolgu durumunda ($H/D=0.33$) deneysel sonuca daha yakın olmuştur. Bununla birlikte, dolgu kalınlığı arttıkça, deneysel sonuçlar ile bulunan taşıma gücü değerlerinin teorik sonuçlardan uzaklaştığı görülmüştür. Bunun en büyük nedeninin, dolgu kalınlığı arttıkça gerilme etkisinin dolgu içerisinde daha çok kalmasından ve hesap yönteminin bu durumu çok fazla

dikkate alınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hanna ve Meyerhof (1980) ve Ok (2018) tarafından yapılan çalışmalarda da benzer davranışların elde edildiği belirtilmiştir.

Tabakalı zemin çözüm yöntemlerinden bir diğeri, yükü yayma modelidir. Bu yöntem, zayıf zemin üzerine inşa edilmiş granüler dolgu durumunun nihai taşıma kapasitesinin hesaplanmasında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, zayıf zemin üzerine inşa edilen granüler dolgunun yükü yaymaya çalıştığı, böylece kırılma yüzeylerinin dolgu içerisinde daha çok tutulduğu varsayılmaktadır. (Love vd., 1987; Jewell 1996; Giroud ve Han 2004a; Giroud ve Han 2004b; Ok, 2008).

Yükü yayma modeli için önerilen Denklem (4.4) aşağıda verilmiştir (Love vd., 1987; Lyons ve Fannin, 2006; Han vd., 2011).

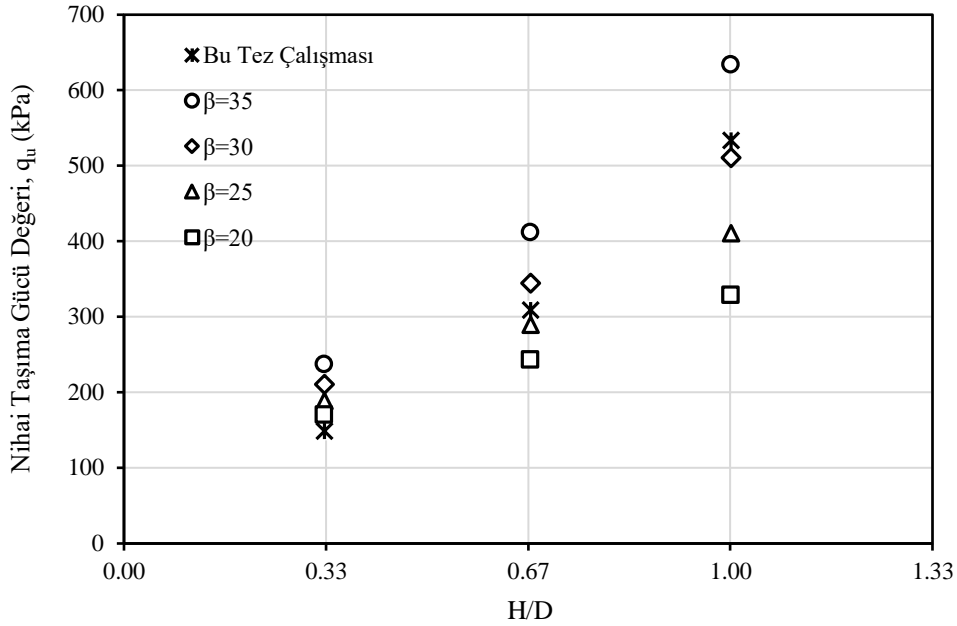
$$q_u = N_c c_u \left(\frac{R + H \tan \beta}{R} \right)^2 \quad (4.4)$$

Denklem (4.4)'te; "H", dolgu kalınlığını; "R", dairesel yükleme alanının yarıçapını; "N_c", kil zemin için taşıma kapasitesi faktörü ile şekil faktörünün (K₁) çarpılmış halini, "c_u", kil zeminin drenajsız kayma mukavemetini ve β yük dağıtma açısını ifade etmektedir.

Yukarıdaki Denklem (4.4) kullanılarak, dört farklı yük dağıtma açısına (β=20°, 25°, 30° ve 35°) göre hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri ile CDW dolguları üzerinde model yükleme deneyleri yapılarak bulunan nihai taşıma gücü değerleri (s/D=%10 için), farklı kalınlıklardaki (H/D=0.33, 0.67 ve 1.00) dolgu durumları için Şekil 4.78'de karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.78 incelendiğinde, dolgu kalınlığı arttıkça, yük dağıtma açısı (β) artışının hesap edilen sonuçlar ile deneysel sonuçları birbirine yaklaştırdığı görülmüştür. Literatürde yapılan bazı çalışmalarda, granüler dolgu kalınlığının artması ile yük dağıtma açısının da arttığı belirtilmiştir. Genellikle yük dağıtma açısının, 20° ile 40° arasında olabileceği belirtilmiştir (Lyons ve Fannin, 2006; Demir vd., 2013). Yükü yayma modeli kullanılarak hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri incelendiğinde, dolgu kalınlığı artışının deneysel sonuçlar ile teorik sonuçları birbirinden uzaklaştırdığı görülmüştür. Bu durum, dolgu kalınlığı arttıkça yük dağıtma açısının artışından kaynaklandığı düşünülmüştür. H/D=0.33, 0.67 ve 1.00 dolgu kalınlıkları

için sırası ile $\beta=20^\circ$, 25° ve 30° yük dağıtma açılarında, deneysel sonuçlar ile teorik sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.

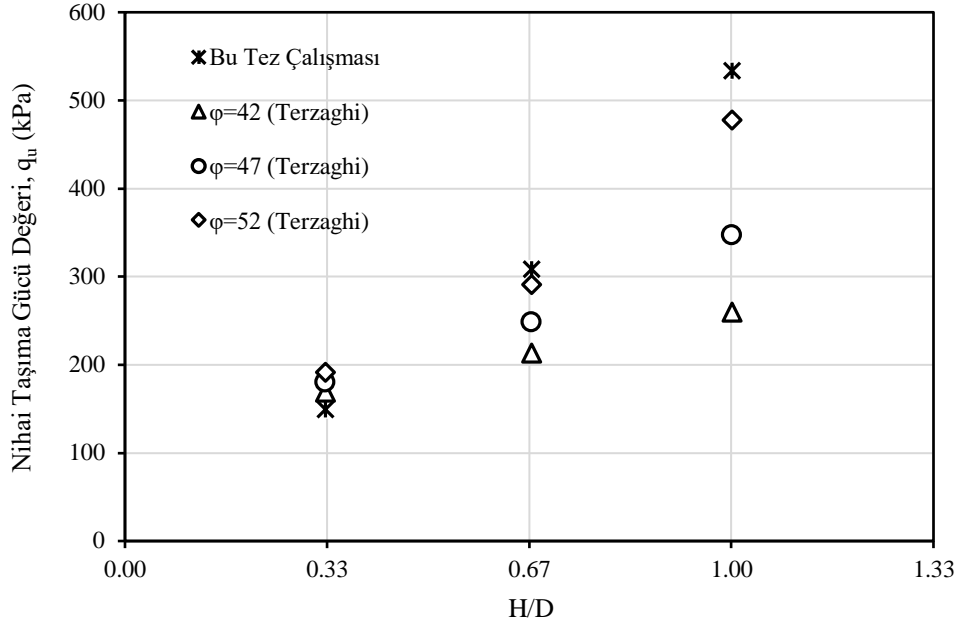


Şekil 4.78. Yüğü yayma modeli ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerlerinin model yükleme deney sonuçları ile karşılaştırılması

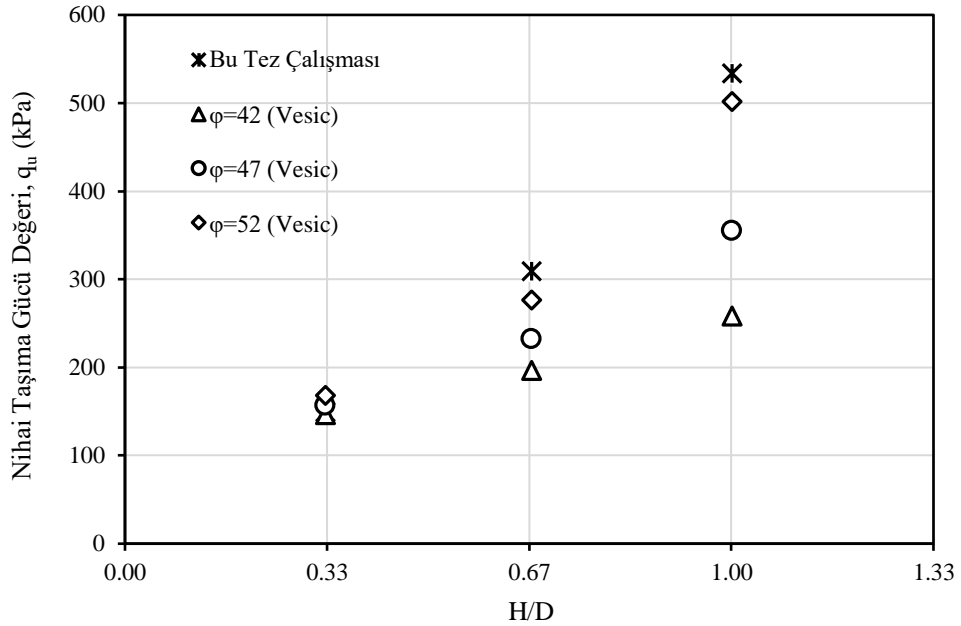
Bu çalışma kapsamında, tabakalı zeminler için nihai taşıma gücünün bulunduğu teorik yöntemlerden sonuncusu ağırlık faktörü yöntemidir. Ağırlık faktörü yönteminde, öncelikle, temel tabanı ile temel tabanından aşağı belirli bir derinlik arasında kalan bölgede bulunan her bir zemin tabakasının göreceli kalınlıklarına bağlı olarak c , ϕ ve γ değerlerinin, ağırlık ortalama değerleri bulunur. Daha sonra temel altında bir seri göçme yüzeyi tahmin edilerek, en düşük nihai taşıma gücünü veren yüzey olan kritik yenilme yüzeyi belirlenir. Belirlenen bu değerler ışığında nihai taşıma gücü belirlenir (Coduto, 2005).

Ağırlık faktörü yönteminin Terzaghi ve Vesic kullanılarak hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri ile CDW dolguları üzerinde model yükleme deneyleri yapılarak bulunan değerler ($s/D=10\%$ için), farklı kalınlıklardaki ($H/D=0.33$, 0.67 ve 1.00) dolgu durumları için, sırası ile Şekil 4.79 ve Şekil 4.80’de sunulmuştur. Teorik hesaplamalar $\phi=42^\circ$, 47° ve 52° değerleri için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.79 ve Şekil 4.80 incelendiğinde, ϕ değeri arttıkça nihai taşıma gücünün arttığı görülmüştür. Ayrıca,

$\phi=52^\circ$ değeri için hesaplanan teorik nihai taşıma gücü değerlerinin deneysel çalışma sonuçlarına yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4.79. Ağırlık faktörü yönteminin Terzaghi ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerlerinin model yükleme deney sonuçları ile karşılaştırılması



Şekil 4.80. Ağırlık faktörü yönteminin Vesic ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerlerinin model yükleme deney sonuçları ile karşılaştırılması

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında CDW ile oluşturulmuş dolguların deneysel çalışmalar ile performansı incelenerek bu performansın iyileştirilmesi üzerinde durulmuştur. Deneysel çalışmalar kapsamında modifiye proktor, serbest basınç, CBR ve model yükleme deneyleri yapılmıştır. Test numunelerinin mikro yapısını incelemek için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. CDW'nin performansını iyileştirmek için CDW içerisine çeşitli oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) UK, YFC ve UY eklenmiştir. Ayrıca AAÇ eklenerek AAÇ'nin etkisi de araştırılmıştır. Bununla birlikte model yükleme deneylerinde CDW'nin performansını iyileştirmek için geogrid kullanılmıştır. Bununla birlikte, deneysel çalışmalar literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmış ve model yükleme deneyleri için teorik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında ulaşılan sonuçlar, aşağıdaki başlıklar altında, maddeler halinde özetlenmiştir.

5.1 Modifiye Proktor Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar

- Su ile yapılan UK ve UY katkılı deneylerde hem UK hem de UY oranı arttıkça genel itibari ile hem ω_{opt} hem de γ_{kmaks} değeri azalmıştır. UK'nın su emme potansiyeli CDW'ye göre daha düşük olduğundan optimum sıvı içeriği değerini azalttığı düşünülmektedir.
- Su ile yapılan YFC katkılı deneylerde ise, YFC oranı arttıkça genel itibari ile ω_{opt} değerinin arttığı, γ_{kmaks} değerinin ise azaldığı belirlenmiştir. YFC özellikle yüksek miktarda CaO içerdiğinden optimum sıvı içeriği değerini artırdığı tahmin edilmektedir.
- Ayrıca puzolanların göreceli olarak daha ince taneli ve hafif olmasının γ_{kmaks} değerini azalttığı tahmin edilmektedir.
- AAÇ kullanılarak yapılan puzolan katkılı deneylerden elde edilen $\omega_{optAAÇ}$ ile γ_{kmaks} değerlerinin su kullanılarak yapılan puzolan katkılı deneylerden elde edilen ω_{opt} ile γ_{kmaks} değerlerine yakın olduğu görülmüştür. AAÇ eklenmiş deneylerde nispeten daha az su olmasına rağmen AAÇ'nin kaygan yapısının bu durumu oluşturduğu düşünülmüştür.

5.2 Serbest Basınç Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar

- CDW-28g numunesine ait SEM görüntülerinde, mikro yapıda CSH ve Ca(OH)_2 fazlarının oluştuğunu görülmüştür. Reaksiyona girmemiş az da olsa çimento parçacığının reaksiyona girdiği tahmin edilmektedir. Bu durumun, sadece su eklenmesine rağmen bir miktar dayanım kazanmasının nedeni olarak görülmüştür.
- Su ile yapılan UK katkılı deneylerde hem 7 hem de 28 günlük kür için %5 UK katkısının en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. %5 UK katkılı numunenin BCR_{UCS} değerleri 7 ve 28 günlük kürlerde sırasıyla 1.14 ve 1.18 olarak hesaplanmıştır. %5UK-28g numunesine ait mikro yapı gözlemleri, çok sayıda reaksiyona girmemiş UK parçacığının varlığını göstermiştir. Bu durumun, UK ve su ile hazırlanan CDW test numunelerinin düşük dayanım değerleri vermesine neden olduğu kanısına varılmıştır.
- Su ile yapılan YFC katkılı deneylerde hem 7 hem de 28 günlük kür için %20 oranında YFC katkılı test numunesinin en yüksek mukavemete sahip olduğu belirlenmiştir. %20 YFC katkılı numunenin BCR_{UCS} değerleri 7 ve 28 günlük kürlerde sırasıyla 2.45 ve 2.48 olarak hesaplanmıştır. %20YFC-28g numunesinin mikro yapı gözlemleri matriste yoğun bir jel oluşumunu göstermiştir. Aynı zamanda, mikro yapıda az sayıda reaksiyona girmemiş YFC parçacığı ve Ca(OH)_2 varlığı tespit edilmiştir. Bu gözlemler, su ile yapılan serbest basınç deneylerinde YFC'nin en yüksek dayanım sonuçlarını vermesini desteklemektedir.
- Su ile yapılan UY katkılı deneylerde hem 7 hem de 28 günlük kür için %15 oranında UY katkısının en yüksek mukavemeti oluşturduğu görülmüştür. %15 UY katkılı numunenin BCR_{UCS} değerleri 7 ve 28 günlük kürlerde sırasıyla 1.69 ve 1.86 olarak belirlenmiştir. %15UY-28g numunesinin SEM gözlemleri ile reaksiyona girmemiş puzolan tanelerinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, matriste belirgin bir kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jeli gözlenmiştir. %15UY-28g numunesinin, %5UK-28g numunesine göre daha yoğun ve boşluksuz bir mikro yapıya sahip olması, dayanım testlerinden elde edilen sonuçları doğrular niteliktedir.

- CDW-28g-AAÇ numunesinin mikro yapısının, CDW numunesine göre daha kompakt bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca etrenjit kristallerinin oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum, AAÇ'nin tepkimeye girdiğini düşündürmüştür. Böylece, CDW içerisine sadece AAÇ eklenmesinin, dayanım kazandırdığı düşünülmüştür.
- AAÇ ile yapılan UK katkılı deneylerde hem 7 hem de 28 günlük kür için %15 oranında UK katkısının en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. %15 UK katkılı numunenin BCR_{UCS} değerleri 7 ve 28 günlük kürlerde sırasıyla 3.42 ve 6.06 olarak hesaplanmıştır. %15UK-28g-AAÇ numunesinin SEM görüntüleri, belirgin bir alüminosilikat jel oluşumunu ve çok sayıda reaksiyona girmemiş UK tanelerinin varlığını göstermiştir. UK tanelerinin geopolimerizasyon reaksiyonunun laboratuvar koşullarında daha yavaş gerçekleşmesinin bu durumu oluşturduğu düşünülmüştür.
- AAÇ ile yapılan YFC katkılı deneylerde hem 7 hem de 28 günlük kür için %20 oranında YFC katkılı test numunesinin en yüksek dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. %20 YFC katkılı numunenin BCR_{UCS} değerleri 7 ve 28 günlük kürlerde sırasıyla 14.72 ve 23.20 olarak hesaplanmıştır. En yüksek dayanım değerlerine sahip olan %20YFC-28g-AAÇ numunelerinin mikro yapısında oluşan yoğun alüminosilikat jellerinin gözlenmesi, dayanım-mikro yapı ilişkisini kanıtlar niteliktedir.
- AAÇ ile yapılan UY katkılı deneylerde hem 7 hem de 28 günlük kür için %20 oranında UY katkısının en yüksek mukavemeti oluşturduğu görülmüştür. %15 UY katkılı numunenin BCR_{UCS} değerleri 7 ve 28 günlük kürlerde sırasıyla 12.20 ve 20.73 olarak belirlenmiştir. %20UY-28g-AAÇ numunesinin SEM görüntülerine göre, %15UK-28g-AAÇ'ye nazaran daha yoğun bir alüminosilikat jel oluştuğu belirlenmiştir. Bu durumun laboratuvar koşullarında YFC'nin sahip olduğu yüksek CaO içeriğinden dolayı geopolimerizasyon hızının UK'ya göre oldukça yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.
- SEM görüntüleri incelendiğinde, UK ve YFC ham maddelerinin AAÇ ile reaksiyonu sonucunda oluşan jel yapısının, CDW numunesinde bulunan

boşlukları dolduran bir dolgu malzemesi gibi görev üstlendiği belirlenmiştir.

- Tüm deney serileri incelendiğinde, en efektif katkının YFC en verimsiz katkının ise UK olduğu görülmüştür. UY katkısının güçlendirme oranının YFC'ninkine daha yakın olduğu belirlenmiştir. Bu durum, CaO içeriği yüksek olan YFC'nin, UY'nin laboratuvar şartlarındaki geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırması şeklinde yorumlanmıştır.
- Kür süresinin q_{uUCS} değerini artırdığı ve ϵ_{cr} değerini azalttığı görülmüştür. Bu durumun, test numunelerinin rijitleşmesinden dolayı olduğu düşünülmüştür.
- AAÇ'nin her test numunesinde önemli derecede güçlendirme sağladığı gözlemlenmiştir. AAÇ eklenmesi durumunun eklenmediği duruma göre serbest basınç mukavemeti değerini 7 ve 28 günlük kür sonunda sırasıyla; %15UK için 3.69 ve 6.89, %20 YFC için 6.01 ve 9.37, %20 UY için 8.75 ve 12.39 katına çıkardığı belirlenmiştir. Bu değerler ışığında AAÇ eklenmesi ile serbest basınç mukavemeti en çok artan katkının UY olduğu görülmüştür. Ayrıca, AAÇ katkısının, AAÇ eklenmemiş duruma göre ϵ_{cr} değerini azalttığı görülmüştür.
- En yüksek dayanım değerinin olduğu puzolan katkı oranından daha fazla puzolan eklendiğinde, puzolanların reaksiyona girmeden kaldığı düşünülmüştür. Reaksiyona girmeyen puzolanın, zemin ortamında ince daneli malzeme içeriğini artırdığından, dayanımın düşmesine neden olduğu düşünülmüştür.
- Tez çalışması kapsamında yapılan serbest basınç deneylerine göre pek çok test numunesinin serbest basınç mukavemetinin, TxDOT (2013) ve VicRoads (2013) tarafından önerilen minimum 7 günlük serbest basınç mukavemetinden daha yüksek çıktığı görülmüştür (Bknz. Çizelge 4.46).

5.3 CBR Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar

- En yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerini sağlayan puzolan katkı oranlarının, en yüksek CBR değerlerini de oluşturduğu belirlenmiştir.

- %5 UK katkılı numunenin BCR_{CBR} değerleri 7 ve 28 günlük kür sonunda 1.16 ve 1.38 olarak hesaplanmıştır.
- %20 YFC katkılı numunenin BCR_{CBR} değerleri 7 günlük kürde 2.68, 28 günlük kürde 3.71 olarak hesaplanmıştır.
- %15 UY katkılı numunenin BCR_{CBR} değerleri 7 günlük kürde 1.81, 28 günlük kürde 2.69 olarak belirlenmiştir.
- AAÇ ile yapılan %15 UK katkılı numunenin BCR_{CBR} değerleri 7 günlük kürde 3.30, 28 günlük kürde 6.13 olarak hesaplanmıştır.
- AAÇ ile yapılan %20 YFC katkılı numunenin BCR_{CBR} değerleri 7 günlük kürde 11.78, 28 günlük kürde 25.00 olarak hesaplanmıştır.
- AAÇ ile yapılan %20 UY katkılı numunenin BCR_{CBR} değerleri 7 günlük kürde 9.85, 28 günlük kürde 21.60 olarak belirlenmiştir.
- Tüm deney serileri incelendiğinde, serbest basınç deneylerinde olduğu gibi, en efektif katkının YFC en verimsiz katkının ise UK olduğu görülmüştür.
- Kür süresinin CBR değerini artırdığı görülmüştür.
- AAÇ eklenmesi durumunun eklenmediği duruma göre CBR değerini 7 ve 28 günlük kür sonunda sırasıyla; %15UK için 3.50 ve 6.75, %20 YFC için 4.39 ve 6.74, %20 UY için 6.59 ve 10.35 katına çıkarmıştır. Bu değerler ışığında AAÇ eklenmesi ile CBR değerinin en çok arttığı katkının UY olduğu görülmüştür.
- Tez çalışması kapsamında yapılan CBR deneyleri ile literatürde doğal agrega (NA) ve CDW numuneleri için hesaplanmış CBR değerleri karşılaştırıldığında, çoğu test numunesinin literatürdeki değerlerden daha iyi çıktığı görülmüştür (Bknz. Çizelge 4.47).
- Serbest basınç deneylerinde, SEM analizleri sonucu mikro yapı ile ilgili yapılan yorumların CBR deneyleri için de geçerli olduğu düşünülmüştür.

5.4 Model Yükleme Deneylerinde Ulaşılan Sonuçlar

- Tüm dolgu durumlarının zayıf zeminin taşıma gücünü artırdığı görülmüştür. Ayrıca, tüm dolgu durumları için dolgu kalınlığı arttıkça taşıma gücü değerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durumun, dolgu kalınlığı

arttıkça, etki eden gerilmelerin daha çok bu dolgu içerisinde kalmasından oluştuğu tahmin edilmiştir.

- Dolgu-zayıf zemin arayüzünde ayırıcı olarak kullanılan geotekstilin taşıma gücüne katkısının ihmal edilebilecek kadar az olduğu görülmüştür. Ancak, geotekstilin ayırıcı işlevini yerine getirdiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple çok zayıf zemin üzerine granüler malzemedan dolgu inşasında geosentetik kullanımının dolgunun bütünlüğünü korumada katkı sağlayacağı düşünülmüştür.
- YFC-AAÇ katkısının taşıma gücünü önemli oranda artırdığı belirlenmiştir. $s/D=10$ 'da $H=0.33D$, $0.67D$, $1.00D$ dolgu kalınlıkları için nihai taşıma gücünü sırasıyla 3.39, 4.14 ve 4.68 kat artırmıştır (Seri III-Seri IV kıyaslaması). Bunun nedeni olarak YFC-AAÇ eklenmesinin dolguyu rijitleştirmesi olarak öngörülmüştür. Ayrıca serbest basınç ve CBR denelerinde, YFC-AAÇ katkısının daha fazla güçlendirme sağladığı, ancak model yükleme deneylerinde bu oranın azaldığı görülmüştür. Bu durum, etkiyen gerilmelerin zayıf zemin tabakasına ulaşmasından dolayı bu oranı azalttığı şeklinde yorumlanmıştır.
- Geogrid ile güçlendirmenin taşıma gücünü artırdığı görülmüştür. Su ile hazırlanan dolgularda geogrid $s/D=10$ 'da $H=0.33D$, $0.67D$, $1.00D$ dolgu kalınlıkları için nihai taşıma gücünü sırasıyla 1.30, 1.32 ve 1.27 kat artırmıştır (Seri III-Seri V kıyaslaması). YFC-AAÇ ile hazırlanan dolgularda geogrid $s/D=10$ 'da $H=0.33D$, $0.67D$, $1.00D$ dolgu kalınlıkları için sırasıyla 1.22, 1.37 ve 1.30 kat artırmıştır (Seri IV-Seri VI kıyaslaması). Geogridin gelen gerilmeleri karşılayarak taşıma gücüne katkı sağladığı düşünülmüştür.
- Tüm deney serilerinde, oturma oranı arttıkça BCR_{MYD} değerinin azaldığı, dolgu kalınlığı arttıkça BCR_{MYD} değerinin arttığı belirlenmiştir. Oturma oranı arttıkça gerilmenin zayıf zemine daha çok etkimesi ve dolgu kalınlığı arttıkça gerilmenin zayıf zemine daha az etkimesi bu durumların oluşmasına neden olduğu düşünülmüştür.
- CDW dolgusunun (Seri III) taşıma gücünün doğal dolguya göre daha düşük değerler verdiği belirlenmiştir. Ancak, $s/D=10$ 'da, CDW'nin $H=0.67D$ durumunun doğal agreganın $H=0.33D$ durumuna göre 1.12 kat,

CDW'nin $H=1.00D$ durumunun ise doğal agreganın $H=0.67D$ durumuna göre 1.31 kat fazla olduğu görülmüştür. CDW'nin atık bir malzeme olduğu geri dönüştürülmesinin doğaya katkı sağlayacağı düşünülürse, doğal dolgu durumundan 1.5-2 kat fazla kalınlıkta CDW dolgusu yapımının taşıma gücü açısından yeterli olabileceği bu tez çalışması için belirlenmiştir.

- YFC-AAÇ katkılı CDW dolgusunun taşıma gücünün ise doğal dolguya göre oldukça yüksek çıktığı görülmüştür. $s/D=10\%$ 'da, $H=0.33D$, $0.67D$ ve $1.00D$ durumları için YFC-AAÇ katkılı CDW dolgusu için doğal dolgudan sırasıyla 1.98, 3.27 ve 3.25 kat yüksek taşıma gücü değerleri elde edilmiştir. Bu durumun benzer kalınlıklarda doğal dolgu yapmak yerine YFC-AAÇ katkılı CDW dolgusu yapmanın daha yüksek taşıma gücü değerleri sağlayacağı şeklinde yorumlanmıştır. Hatta YFC-AAÇ katkılı CDW dolgu kalınlığının, doğal dolguya göre 1.5-2 kat daha az kalınlıkta yapılmasının dahi taşıma gücü açısından daha iyi değerleri sağlayacağı görülmüştür. $s/D=10\%$ 'da, YFC-AAÇ katkılı CDW'nin $H=0.33D$ durumunun doğal agreganın $H=0.67D$ durumuna göre 1.40 kat, YFC-AAÇ katkılı CDW'nin $H=0.67D$ durumunun ise doğal agreganın $H=1.00D$ durumuna göre 1.73 kat fazla taşıma gücü değerine sahip olduğu görülmüştür.
- Geogridle güçlendirmenin (Seri V deneyleri), CDW'nin taşıma gücü değerlerini doğal agreganın taşıma gücü değerlerine yaklaştırdığı görülmüştür. $s/D=10\%$ 'da, $H=0.33D$, $0.67D$ ve $1.00D$ durumları için geogridle güçlendirilmiş CDW dolgusunda doğal dolgudan sırasıyla 0.76, 1.67 ve 0.88 kat yüksek taşıma gücü değerleri elde edilmiştir. Bu değerlere göre geogridle güçlendirilmiş CDW dolgusu oluşturulmasının yapılacak projenin kısıtlamaları dikkate alınarak uygulanabilir olabileceği düşünülmüştür.
- YFC-AAÇ katkılı geogridle güçlendirilmiş CDW'nin beklendiği üzere doğal agreganın taşıma gücünden çok yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. $s/D=10\%$ 'da, $H=0.33D$, $0.67D$ ve $1.00D$ durumları için geogridle güçlendirilmiş YFC-AAÇ katkılı CDW dolgusunda doğal dolgudan sırasıyla 2.42, 7.96 ve 4.21 kat yüksek taşıma gücü değerleri

elde edilmiştir. Bu durumun benzer kalınlıklarda doğal dolgu yapmak yerine geogridle güçlendirilmiş YFC-AAÇ katkılı CDW dolgusu yapmanın daha yüksek taşıma gücü değerleri sağlayacağı şeklinde yorumlanmıştır. Hatta geogridle güçlendirilmiş YFC-AAÇ katkılı CDW dolgu kalınlığının, doğal dolguya göre 1.5-2 kat daha az kalınlıkta yapılmasının dahi taşıma gücü açısından daha iyi değerleri sağlayacağı görülmüştür. $s/D=10$ 'da, geogridle güçlendirilmiş YFC-AAÇ katkılı CDW'nin $H=0.33D$ durumunun doğal agreganın $H=0.67D$ durumuna göre 1.70 kat, YFC-AAÇ katkılı CDW'nin $H=0.67D$ durumunun ise doğal agreganın $H=1.00D$ durumuna göre 2.37 kat fazla olduğu görülmüştür.

- Tez kapsamında gerçekleştirilen model yükleme deneylerine göre, katı atık olarak sınıflandırılabilen CDW, UK ve YFC malzemelerinin değerlendirilebileceği görülmüştür. CDW'nin, alternatif bir dolgu malzemesi olabileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca puzolan ya da geogrid ile CDW dolgusunun güçlendirilmesinin, CDW'nin performansını iyileştirdiği, daha yüksek mukavemet değerleri istenen dolgu oluşturulmasında kullanılabileceği belirlenmiştir. Bu atık malzemeleri katı atık depolarında biriktirmek yerine dolgu yapımında kullanılmasının hem çevreye hem de ekonomiye katkı sağlayabileceği öngörülmüştür. Özellikle ülkemizde son yıllarda giderek artan kentsel dönüşüm projelerinden elde edilen yüksek miktarlarda CDW malzemelerinin bu şekilde değerlendirilmesinin ülkemiz için oldukça iyi bir katkı sağlayabileceği düşünülmüştür.

5.5 Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ışığında, gelecekte yapılabilecek çalışmalar için aşağıda sıralanan öneriler özetlenmiştir.

- Serbest basınç ve CBR deneyleri ile farklı tür ve konsantrasyonlarda AAÇ ve değişik tiplerde puzolan kullanımıyla CDW stabilizasyonları incelenebilir.
- Tez çalışmasından elde edilen bulgular, CDW dolgularının çeşitli güçlendirmeler ile doğal agrega dolgularına nazaran daha iyi performans

sergilediğini göstermiştir. Ancak ileriki çalışmalarda daha farklı dolgu kalınlığı, farklı geosentetikler, geosentetiğin birden fazla tabakada kullanılması gibi çeşitli parametrelerin daha detaylı araştırılması gerektiği düşünülmektedir.

- Ölçek etkisini ortadan kaldırmak için, tam ölçekli arazi deneyleri kapsamında statik ve tekrarlı yüklemeler yapılarak konuya çok büyük ölçüde çözümler ve öneriler getirilebileceği düşünülmektedir.
- Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş CDW dolgular üzerinde uzun süreli stabilite (long term stability) analizleri gerçekleştirilerek bu dolguların uzun süreler sonundaki davranışlarının araştırılmasının gerekliliği öngörülmüştür.
- CDW malzemelerinin üzerinde yapılacak çeşitli testler ile bu atıklardan inşa edilecek dolguların insan sağlığına ve çevreye etkilerinin araştırılması gerekmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Aatheesan, T., Arulrajah, A., Bo, M.W., Vuong, B., Wilson, J. (2010). Crushed brick blends with crushed rock for pavement systems. *Proceedings of the ICE - waste and resource management*. **163** (1), 29-35.
- Acharya, B. (2011). Experimental Study on Geocell-Reinforced Flexible Pavements with Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases under Cyclic Loading. MSc. Thesis, Tribhuvan University, Institute of Engineering, Nepal, 123s.
- Ağar, E. (2007). Seyitömer termik santral uçucu küllerinin yapı sektöründe kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Akman M.S. (1990). Yapı Malzemeleri. T.C. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, Sayı 1408.
- Ambily, A. P. ve Gandhi, S. R. (2007). Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, **133**(4), 405-415.
- Anderson, K. W., Uhlmeier, J. S., Russell, M. (2009). Use of Recycled Concrete Aggregate in PCCPs: Literature Search. (June), 35: Washington Department of transportation, Office of Research & Library Services.
- Anonim. (2019a). https://kuzeyormanlari.org/wp-content/uploads/2019/08/Istanbul_ta%C5%9Foca%C4%9F%C4%B1_3.jpg (Erişim Tarihi:10.11. 2019).
- Anonim. (2019b).<https://madencilikhaberleri.files.wordpress.com/2014/08/maden.jpg> (Erişim Tarihi:10.11. 2019).
- Anonim. (2019c). https://kuzeyormanlari.org/wp-content/uploads/2019/05/samsun-kocadag-sozcu-3_16_9_1557830288-800x450.jpg (Erişim Tarihi:10.11. 2019).
- Anonim. (2019d). <https://i2.cnnturk.com/i/cnnturk/75/0x0/5a97e26aae78491cfc936c1c> (Erişim Tarihi:10.11. 2019).
- Anonim. (2019e). <http://www.uepg.eu/statistics/graphs> (Erişim Tarihi:10.11. 2019).
- Anonim. (2019f). https://www.hamm.eu/media/produkte/overview/hamm-ag-roller-range_1280x560.jpg (Erişim Tarihi:10.11. 2019).
- Anonim. (2019g). http://geosistem.net/dinamik_kompaksiyon.html# (Erişim Tarihi:16.11. 2019).

- Anonim. (2019h). <http://www.istinatduvari.com/images/istinat/drenaj1.png> (Erişim Tarihi:19.11. 2019).
- Anonim. (2019i). <http://www.p3planningengineer.com/productivity/soil%20improvement/cement%20deep%20mixing/work%20procedures.jpg> (Erişim Tarihi:19.11. 2019).
- Anonim. (2019j). <https://www.ffgb.be/en/techniques/pile-foundations/soil-improvement/stone-columns> (Erişim Tarihi: 19.11. 2019).
- Anonim. (2019k). <https://www.insaatofis.com/wp-content/uploads/2018/09/Jet-Grouting.png> (Erişim Tarihi: 19.11. 2019).
- Anonim. (2019l). <https://www.tenax.net/en/geosynthetics/technical-competence-center/functions-of-geosynthetics/> (Erişim Tarihi: 19.11. 2019).
- Anonim. (2019m). http://www.ekinyalitim.com/depo/sayfaresim/RhinoMat_Pond_Edit-1Aug2015-2.jpg (Erişim Tarihi: 19.11. 2019).
- Anonim. (2019n). <http://ymngrup.com/urunler/geokompozit/> (Erişim Tarihi: 19.11. 2019).
- Anonim. (2019o). <https://www.advancelandscape.co.nz/ic/862973306/Geocell-installation.jpg> (Erişim Tarihi: 19.11. 2019).
- Anonim. (2019p). <https://www.tencategeo.eu/en/products/nonwoven-geotextiles> (Erişim Tarihi: 19.11. 2019).
- Anonim. (2019q). <https://happho.com/geogrids-manufacturing-process-applications-advantages/> (Erişim Tarihi: 19.11. 2019).
- Arslan, H., Coşgun, N., Salgin, B. (2012). Construction and demolition waste management in Turkey. Waste Management-An Integrated Vision, Edited by Luis Fernando Marmolejo Rebellon, 313-332.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Aatheesan, T., Bo, M. W. (2011). Geotechnical properties of recycled crushed brick in pavement applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**(10), 1444-1452.
- Arulrajah A., Disfani M. M., Horpibulsuk S., Suksiripattanapong C., Prongmanee N. (2014). Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials*. **58**, 245–257.

- Arulrajah, A., Disfani, M. M., Haghghi, H., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S. (2015). Modulus of rupture evaluation of cement stabilized recycled glass/recycled concrete aggregate blends. *Construction and Building Materials*, **84**, 146-155.
- Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S., Samingthong, W. (2016b). Influence of class F fly ash and curing temperature on strength development of fly ash-recycled concrete aggregate blends. *Construction and Building Materials*, **127**, 743-750.
- Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., & Samingthong, W. (2016a). Stabilization of recycled demolition aggregates by geopolymers comprising calcium carbide residue, fly ash and slag precursors. *Construction and Building Materials*, **114**, 864-873.
- Arulrajah, A., Rahman, M. A., Piratheepan, J., Bo, M. W., Imteaz, M. A. (2013). Evaluation of interface shear strength properties of geogrid-reinforced construction and demolition materials using a modified large-scale direct shear testing apparatus. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**(5), 974-982.
- Aruntaş, H. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1).
- ASTM C 311, (2005) Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, American Society for Testing and Materials
- ASTM C 618, (2015). Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for uses as a mineral admixture in portland cement concrete, American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM C117-13, (2013). Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C127-12, (2012). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C128-12, (2012). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.

- ASTM C131-06, (2006). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C136-06, (2006). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D1557-12, (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D1883-14, (2014). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166-06, (2006). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2487-11, (2011) Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4439-11, (2011) Standard Terminology for Geosynthetics, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D698-12, (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D7928-17, (2017). Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D854-10, (2010). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, C. (2012). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. C618-12a.
- Ayan, E. (2009). Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aytekin, M. (2002). Zeminlerin değirmen artığı malzeme ile stabilizasyonu. Anadolu Üniversitesi Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği, 9.
- Aytekin, M. (2004). Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara, 624s.

- Balun, B. (2019). Alkalilerle aktive edilmiş bitlis yöresi pomzası içeren hibrit bağlayıcıların üretilebilirliğinin incelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 150 s., Elazığ.
- Barbudo, A., Agrela, F., Ayuso, J., Jiménez, J.R., Poon, C.S. (2012). Statistical Analysis of Recycled Aggregates Derived from Different Sources for Sub-Base Applications. *Constr. Build. Mater.* **28**:129–138.
- Bauer Maschinen GmbH. (2012). Ground Improvement by Depth Vibrator. PI 80, Schrobenhausen, Germany.
- Bayram, A. (2006). Hava alanları pist dolguların geosentetik malzemeler kullanılarak güçlendirilmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bell, F.G. (1993). Engineering Treatment of Soils. London: E&FN SPON.
- Bender, D. A. ve Barenberg, E. J. (1978). Design and behavior of soil-fabric-aggregate systems. 671.
- Bennert, T., Papp, W., Maher, A., Gucunski, N. (2000). Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1714**, 33–39.
- Bennert, T.A. ve Maher, A. (2008). The use of recycled concrete aggregate in a dense graded aggregate base course. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. New Jersey Department of Transportation, New Jersey, USA, p. 65.
- Bernal, S.A. (2015). Effect of the activator dose on the compressive strength and accelerated carbonation resistance of alkali silicate-activated slag/metakaolin blended materials, *Construction and Building Materials*. **98**, 217-226.
- Bhatia, S. ve Smith, J. (1996). Geotextile characterization and pore-size distribution: Part I. A review of manufacturing processes. *Geosynthetics International*, **3**(1), 85-105.
- Binquet, J. ve Lee, K. L. (1975). Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs. *Journal of the geotechnical Engineering Division*, **101**(12), 1257-1276.
- Birand, A.A. (2001). Kazıklı temeller, Teknik Yayınevi, Ankara, s.433.

- Black, J. A., Sivakumar, V., Madhav, M. R., Hamill, G. A. (2007). Reinforced stone columns in weak deposits: laboratory model study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(9), 1154-1161.
- Braja, M. D. (1999). Principles of Foundation Engineering 4th Edition, PWS Publishing, USA.
- Briaud, J.L., Jeanjean, P. (1994). Load settlement curve method for spread footings on sand, vertical and horizontal deformations of foundations and embankments, *ASCE*. **2**, 1774-1804.
- Brown, R.E. (1977). Vibroflotation compaction of cohesionless soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*. **103**, 1437-1451.
- Bruce, D. A. (2000). An introduction to the deep soil mixing methods as used in geotechnical applications. Publication No. FHWA-RD-99-138, p 135.
- BS EN 933-11. (2009). Tests for Geometrical Properties of Aggregates Part 11: Classification Test for the Constituents of Coarse Recycled Aggregate (933-11). London, U.K.
- Bulut, Ü. (2007). Perlitin puzolanik aktivitesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 71 s., İstanbul.
- Cardoso, R., Silva, R. V., de Brito, J., Dhir, R. (2016). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste management*, **49**, 131-145.
- Cedergren, H. R. (1989). Seepage, Drainage, and Flow Nets (3.Baskı). Florida: John Wiley and Sons Inc., 232-255.
- Consoli, N. C., Rosa, F. D., Fonini, A. (2009). Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, **135**(12), 1846-1856.
- Coduto, D. P. (2005). Temel tasarımı: ilkeler ve uygulamalar. (Türkçe Çeviri; Çeviren: Mollamahmutoğlu, M., Kayabalı, K.). Gazi Kitabevi.
- Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Prietto, P. D. M. (2003). Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, **129**(1), 96-101.
- Coşgun, N., Güler, T., Doğan, B. (2009). Yapısal atıkların önlenmesinde/azaltılmasında tasarımcının rolü. Mimarlık dergisi, Mimarlar Odası Yayınları, **348**, 75-78.

- Çalık, Ü. (2012). Perlitin puzolanik katkı olarak kireç ile birlikte zemin stabilizasyonunda kullanımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.159, Trabzon
- Çetin, A. Y. (2011). Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile yüzeysel zemin stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çetin, H. (2019). Zemin Islah Yöntemleri, Ders Notu, <https://docplayer.biz.tr/47697721-Zemin-islah-yontemleri-prof-dr-hasancetin.html>, 16.09.2019. (Erişim Tarihi: 18.11. 2019).
- Çınar, H. (2014). Zemin iyileştirilmesinde jet grout yöntemi ve uygulamaya yönelik proje çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 20-125
- Das, B.M., Shin, E.C. Omar, M.T. (1994). The bearing capacity of surface strip foundations on geogrid reinforced sand and clay—a comparative study. *Geotechnical and Geological Engineering*, **12**(1):1-14.
- Day, R. W. (2004) Geoteknik Deprem Mühendisliği El Kitabı, Çevirenler; M. Mollamahmutoglu ve K. Kayabali Gazi Kitabevi ISBN 0-07-137782-4 Ankara.
- Dayı M. (2006). Doğal ve yapay puzolanların kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 77s.
- DeJong-Hughes, J., Moncrief, J. F., Voorhees, W. B., Swan, J. B. (2001). Soil compaction: causes, effects and control. St. Paul, MN: University of Minnesota Extension Service.
- Del Río Merino, M., Izquierdo Gracia, P., Weis Azevedo, I. S. (2010). Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered. *Waste management & research*, **28**(2), 118-129.
- Demir, A. (2011). Yumuşak Kil Zemin Üzerinde Güçlendirilmiş Stabilize Dolguya Oturan Yüzeysel Temellerin Analizi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 443s.
- Demir, A., Laman, M., Yıldız, A., Ornek, M. (2013). Large scale field tests on geogrid-reinforced granular fill underlain by clay soil. *Geotextiles and Geomembranes*, **38**:1-15.

- Demir, A., Laman, M., Yildiz, A., Ornek, M. (2013). Large scale field tests on geogrid-reinforced granular fill underlain by clay soil. *Geotextiles and Geomembranes*. **38**, 1-15.
- Demir, A., Ok, B., Sarici, T., Dost, Y., Hacak, B., Epsileli, S. E., Bagriacik, B. (2016). Geosentetiklerle güçlendirilmiş esnek yol kaplamalarının tekrarlı yükler altındaki performansının değerlendirilmesi. Türkiye Cumhuriyeti Karayolları Genel Müdürlüğü. Proje no: KGM-ARGE 2012-3.
- Demiröz A. ve Karaduman M. (2009) Zemin iyileştirme metotları, *Selçuk Üniversitesi Teknik Online Dergi*, **8** (3), 176-192
- Dickson, S. (2015). Alkali-silica reaction mitigation using high volume class C flyash, UK, 3-4.
- Directive, E. C. (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union L, 312(3).
- Durgunoğlu, H.T. (2004). Yüksek modüllü kolonların temel mühendisliğinde kullanımı. *Türkiye Mühendislik Haberleri*. **431**, 39-52.
- Edil, T., B., Benson, C., H., Bin-Shafique, M., S., Kim, W., Tanyu, B., F., Senol, A. (2002). Field evaluation of construction alternatives for roadway over soft subgrade, Record No. 1786, Transportation Research Board, Washington, 36-48.
- Ekinci, E., Türkmen, İ., Kantarci, F., Karakoç, M. B. (2019). The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios. *Construction and Building Materials*. **201**, 257-267.
- Elias, V., Christopher, B., Berg, R. (2001). Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design & construction guidelines. Construction, (132042). doi: FHWA-NHI-10-024 & FHWA-NHI-10-025
- ERA (Ethiopian Road Authority) (2016) Road Maintenance, Part G, 94s
- Erdoğan, T. (1995). Öğürülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve kullanımı, Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu bildiriler kitabı, *TMMOB İnşaat mühendisleri odası*, Ankara. **1**, 1-14.

- Erdoğan, T.Y. (2004), Sorular ve yanıtlarıyla beton malzemeleri. *Türkiye Hazır Beton Birliği*, İstanbul, 975-92122-1-8.
- Erdoğan, Y.T. (2003). Beton, ODTÜ Gelistirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- Esin, T. ve Cosgun, N. (2007). A study conducted to reduce construction waste generation in Turkey, *Building and Environment*, **42**, 4, 1667-1674.
- European Commission DG ENV (2011) Plastic waste in the environment-Final Report. At <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/plastics.pdf>. (Erişim Tarihi: 19.11.2019).
- European Commission. Directorate-General for Employment. (2001). Promoting a European Framework for Corporate Social Responsibility: Green Paper. Office for Official Publications of the European Communities.
- Euroslag ve Eurofer, (2012). Position Paper on the Status of Ferrous Slag, Complying with the Waste Framework Directive (Articles 5/6) and the REACH Regulation.
- FHWA (Federal Highway Administration Agency) (2004). Transportation applications of recycled concrete aggregate. FHWA State of the Practice National Review. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Ghafoori, N. ve Sharbaf, M. (2016). Use of geogrid for strengthening and reducing the roadway structural sections (No. Report No. 327-12-803). Nevada. Dept. of Transportation.
- Giroud, J. P. (1984). Geotextiles and geomembranes definitions, properties and design. Selected Papers, Revisions and Comments.
- Giroud, J.P. ve Han, J. (2004a). Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. I. development of design method, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **130**(8):775-786.
- Giroud, J.P. ve Han, J. (2004b). Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. II. Calibration and applications, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130** (8):787-797.
- Glukhovskiy, V., Rostovskaya, G. S., Rumyna, G.V. (1980). High Strength slag-alkali cement, 7th International Congress on the Chemistry of Cements, Paris, France, 164-168.

- Gofar, N. ve Mohamed, R. (2008). Ground improvement by preloading and vertical drain. *Ground improvement & stabilization*, **53**.
- Goodarzi, A. R. ve Salimi, M. (2015). Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag. *Applied Clay Science*. **108**, 61-69.
- Görhan, G. ve Kürklü, G. (2014). The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites part b: engineering*, **58**, 371-377.
- Gupta, R. (2009). A Study of geosynthetic reinforced flexible pavement system. PhD Thesis, The University of Texas at Austin, USA, 281s.
- Gündeşli, U. (2008). Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Han, J., P.E., Sanat, K. P., Xiaoming, Y., Chandra, M., Dov, L., Robert, L., Parsons, P.E. (2011). Performance of geocell-reinforced rap bases over weak subgrade under full-scale moving wheel loads, *Journal of Materials in Civil Engineering*. **23**(11), 1525-1534.
- Hanna, A.M., Meyerhof, G.G. (1980). Design charts for ultimate bearing capacity of foundations on sand overlying soft clay. *Canadian Geotechnical Journal*, **17**(2), 300-303.
- Hardjito, D. (2005). Studies of fly ash-based geopolymer concrete, Doctoral dissertation, Curtin University.
- Hemalatha, A., Mahendran, N., Ganesh Prabhu, G. (2014). Prediction of effects of geogrid reinforced granular fill on the behaviour of static liquefaction. *Advances in Materials Science and Engineering*. **2014**.
- Huang, W.L., Lin, D.H., Chang, N.B., Lin, K.S. (2002). Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. *Resources Conservation&Recycling*. **37**, 23-37.
- Hunt, R. E. (1986). Geotechnical Engineering Techniques and Practices, McGraw Hill, USA.
- Hunt, R. E. (1994). Geotechnical Engineering Investigation Manual, McGraw Hill, USA.

- Ingles, O., G. ve Metcalf, J., B. (1973). Soil Stabilization, John Wiley & Sons, New York.
- Jewell, R.A. (1996). Soil reinforcement with geotextiles, Special Publication 123. Construction Industry Research and Information Association, London, England 332s.
- Jewell, R.A., Paine, N., Wood, R.I. (1984). Design methods for steep reinforced embankments. Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering, London, Paper No .3 .1
- Jiménez, J.R., Agrela, F., Ayuso, J., Lopez, M. (2011). A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base. *Materiales De Construccion*. 61 (302), 289–302.
- Kara, H.B. (2012), Temel zemin iyileştirme yöntemleri- drenaj ders notu, Kayseri, Erciyes Üniversitesi, 47-77 s.
- Karaca F.M. (2012). İstanbul, Tuzla-Aydınlı İnşaat ve yıkıntı atıkları geri kazanım tesisi işletimi, 2. Atık Yönetimi Sempozyumu 24-26 Nisan, ANTALYA.
- Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ), (2013). Yol alt yapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üstyapı ve çeşitli işler. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara,
- Karol, R. H. (2003). Chemical Grouting and Soil Stabilization (3. Baskı). Revised and Expanded, Rutgers University, New Jersey.
- Kavas, T. (2003). Atık mermer ve alüminyum hidroksit kullanarak refrakter çimento üretimi. Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi 126s, Eskişehir
- Kına, C. (2019). Yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen karma lifli beton geliştirilmesi, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 185s.
- Koca, C. (1996). Yüksek performanslı beton üretiminde mikrosilis, curuf, klinker karışımı çimento kullanımı. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.381-394.
- Koçu, N. (1997). Konya çevresindeki volkanik tüflerin yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi ve özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Krivenko, P. (1997). Alkaline cements: terminology classification, aspects of durability, in: H. Justnes (Ed.), Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Sweden, Amarkai and Congrex Göteborg, Gothenburg, Sweden, p.6.
- Kukko, H. (2000). Stabilization of clay with inorganic products. *Journal of Materials in Civil Engineering*. **12** (4), 307-309.
- Kumar, A., Ohri, M. L., Bansal, R. K. (2007). Bearing capacity tests of strip footings on reinforced layered soil. *Geotechnical and Geological Engineering*. **25**(2), 139-150.
- Kwon, J., Tutumluer, E., Al-Qadi, I. L. (2009). Validated mechanistic model for geogrid base reinforced flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering*, **135**(12), 915-926.
- Lav, A. H., Lav, M. A., Goktepe, A. B. (2006). Analysis and design of a stabilized fly ash as pavement base material. *Fuel*. **85**(16), 2359-2370.
- Lea, F.M. (1991). The chemistry of cement and concrete, Butter & Taner Ltd, London
- Leite, da Conceição, F., dos Santos Motta, R., Vasconcelos, K. L., Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*. **25**, 6, 2972-2979.
- Li, L., Edil, T. B., Benson, C. H. (2009). Mechanical performance of pavement geomaterials stabilized with fly ash in field applications. Jackson State University, Jackson Mississippi.
- Litvinov, I. M. (1960). Stabilization of settling and weak clayey soils by thermal treatment. Highway research board special report, 60.
- Love, J.P., Burd, H.J., Milligan, G.W.E., Housby, G.T. (1987). Analytical and model studies of reinforcement of a layer of granular fill on a soft clay subgrade. *Canadian Geotechnical Journal*. **24**(4):611–622.
- Lunardi, P. (1977). Ground Improvement by means of jet-grouting. ground improvement, ISSMFE Thomas Telford, 1, 2, 65-86.
- Lyons, C.K., Fannin, J. (2006). A comparison of two design methods for unpaved roads reinforced with geogrids. *Canadian Geotechnical Journal*. **43**:1389-1394.
- Maag, E. (1938). Ueber die Verfestigung und Dichtung des Baugrundes (Injektionen). *Course on soil mech.*, Zurich Tech. School.

- Mahboob, S. (2014). Development of low carbon and low energy geopolymer-based cement free construction materials. Department of Civil engineering, Brunel University, Thesis.
- Malhotra, V.M. (1997). Mineral Admixtures. Concrete Construction Engineering Handbook, Nawy Edward G. CRC Pres, New York, pp.27-36.
- Marradi, A. ve Lancieri, F. (2008). Performance of cement stabilized recycled crushed concrete. In ICTI-First International Conference on Transport Infrastructure (Vol. 1, pp. 1-10).
- Massarch, K.R. (1991). Deep soil compaction using vibratory probes in M.I. Esrig and R.C. Bachus, eds., Deep Foundation Improvement: Design, Costruction, and Testing, ASTM STP 1089, ASTM, Philadelphia, 297-319.
- Massazza, F. (1989) Puzolanlar. Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları Semineri, 11-12 Mayıs, Ankara
- Massazza, F. (1974). Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements, Principal Paper, Proc. 6th Int. Cong. On the Chemistry of Cements, Moscow.
- Massazza, F. (1988). Pozzolana and pozzolanic cements, Lea's Chemistry of Cement and Concrete 4 th. ed., John Wiley and Sons Inc, 471- 617, New York.
- Mazlum, F. (1989). Pirinç kabağı puzolanik özellikleri ve külün çimneto harcının dayanıklılığına etkisi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Mehta, P.K. (1986). Concrete- Structure. Properties and Materials, Prentice-Hall Inc.
- Mehta, P.K. (1987). Natural Pozzolans, Chapter 1, Supplementary Cementing Materials for Concrete, CANMET, in: V.M. Malhotra.
- Melbouci, B. (2009). Compaction and shearing behaviour study of recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.* **23** (8), 2723–2730.
- Memon, A. H., Radin, S. S., Zain, M. F. M., Trottier, J. F. (2002). Effects of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater. *Cement and Concrete Research*, **32**(3), 373-377.
- Memon, S. A., Lo, T. Y., Barbhuiya, S. A., Xu, W. (2013). Development of form-stable composite phase change material by incorporation of dodecyl alcohol into ground granulated blast furnace slag. *Energy and buildings*, **62**, 360-367.
- Meyerhof, G. G. (1974). Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay. *Canadian Geotechnical Journal*, **11**(2), 223-229.

- MısıR, G. (2008). Granüler stabilize dolgu ile iyileştirilen yumuşak kil zeminlere oturan temellerin analizi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 124s.
- Michalowski, R.L. (2004). Limit loads on reinforced foundation soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*. **130**(4):381-390.
- Mielenz, R.C., Grene, K.T., Schieltz, N.C. (1951). Natural pozzolans for concrete, *Economic Geology*, **46**, 311-328.
- Mihalis, I. K., Papadopoulos, B. P., Anagnostopoulos, A. G. (2003). The contribution of stone columns to the improvement of the stability conditions of embankments on soft clays. In Proceedings of the XIIIth European Conference on soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Prague (pp. 827-832).
- Mitchell, J., K. (1993). Fundamentals of Soil Behaviour 2nd Edition, John Wiley&Sons Inc., New York, 437 s.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M. M., Bo, M. W., Darmawan, S. (2014). Laboratory evaluation of the use of cement-treated construction and demolition materials in pavement base and subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **27**(6), 04014186.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M. M., Win Bo, M., Darmawan, S. (2016). Stabilization of demolition materials for pavement base/subbase applications using fly ash and slag geopolymers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **28**(7), 04016033.
- Molenaar, A., van Niekerk, A. (2002). Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials. *Transp. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board*, **1787**, 73–82.
- Mustafa Al Bakri, A.M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Khairul Nizar, I., Mastura, W.I.W. (2011). Mechanism and chemical reaction of fly ash geopolymer cement-a review. *Asian Journal of Scientific Research*. **1**, 247-253.
- Nalbantoğlu, Z. (2004). Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, **18**(6), 377-381.
- Nazanin Yarahmadi, Ivan Gratchev, Dong-Sheng Jeng. (2017). The effect of structural configuration on hydraulic capacity of geonet drains used in landfills. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **22** (15), 31-40.

- Newman, J. ve Choo, B.S. (2003). *Advanced Concrete Technology Processes*, Butterworth-Heinemann, An Imprint of Elsevier, UK, 5-9.
- Oikonomou, N.D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement&Concrete Composites*, **27**, 315-318.
- Ok, B. (2018). Geosentetiklerle Güçlendirilmiş İnşaat ve Yıkıntı Atığı Dolguların Statik ve Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Ok, B., Demir, A. (2018). Yapım yıkım atıklarının yol temellerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **7**(1):224-236.
- O'Mahony, M. M. Ve Milligan, G. W. E. (1991). Use of recycled materials in subbase layers, *Transportation Research Record*, **1310**, 73-80.
- Onur, M. İ. Tuncan, A., Kılıç, H. O., Tuncan, M., (2016). Yeni bir derin zemin karıştırma sistemi tasarımı ve arazi uygulamaları. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **9**(3), 194-205.
- Öksüz, K. (2006). Afşin-Elbistan termik santrali uçucu külünün zemin stabilizasyonunda kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana
- Ölmez, E. ve Yıldız, Ş. (2008). İnşaat ve yıkıntı atıklarının yönetimi ve planlanan İstanbul modeli. Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu, Aralık, 2-6.
- Önalp, A. (1983). İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi (Cilt 2). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayın No: 3. 1225s.
- Örnek, M. (2009). Yumuşak kil zeminlerin geogridle güçlendirilmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 318s.
- Özaydın, K. (2005). Zemin Mekaniği. Birsen Yayınevi. İstanbul. 261s.
- Özcan, A. (2018). Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların asit, tuz ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 119s.
- Özdemir, A. ve Özdemir, M. (2006). Zayıf zeminlerin iyileştirilmesi ve son yıllarda yaygın olarak uygulanan bazı zemin iyileştirme yöntemleri, *Sondaj Dünyası*, **3**, 34-38.

- Öztürk, M. (2005). İnşaat/yıkıntı atıkları yönetimi, *Çevre ve Orman Bakanlığı*, Ankara, 2005.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, **22** (7), 1315–1322.
- Palmeira, E. M. ve Milligan, G. W. (1989). Large scale direct shear tests on reinforced soil. *Soils and foundations*, **29**(1), 18-30.
- Pappu A, Saxena M, Asolekar SR. (2007). Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. *Building and Environment*. **42**, 6, 2311-2320.
- Pektaş, C. (2012). Muhtelif katkı maddeleri ve/veya donatı kullanımı ile yapılan zemin iyileştirme (stabilizasyon) yöntemlerinin teorik ve deneysel olarak ayrıntılı bir irdeleme ve değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Perkins, S. (1999). Geosynthetic reinforcement of flexible pavements: laboratory based pavement test sections. Report No. FHWA/MT-99-001/8138, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D.C., USA.
- Phani Kumar, B. R. Ve Sharma, R. S. (2004). Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(7), 764-767.
- Phanikumar, B. R., Prasad, R., Singh, A. (2009). Compressive load response of geogrid-reinforced fine, medium and coarse sands. *Geotextiles and Geomembranes*. **27**(3), 183-186.
- Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S., Chindaprasirt, P. (2015). Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer. *Construction and Building Materials*, **91**, 1-8.
- Poon, C.S. ve Chan, D. (2006). Feasible Use of Recycled Concrete Aggregates and Crushedclay Brick As Unbound Road Sub-Base. *Constr. Build. Mater.* **20**, 578–585.

- Poon, C.-S., Qiao, X.C., Chan, D. (2006). The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. *Waste Manage.* **26**, 1166–1172.
- Portas, S. (2004). Case study: mechanical reliability of sub-grade layer built with demolition waste materials. Societa Italiana Infrastruttura Viarie”, 2nd International Congress on New Technologies and Modelling Tools for Roads, Florence, Italy.
- Radonjanin, V., Malesev, M., Marinkovic, S., Al-Malty, A.E.S. (2013). Green recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, **47**:1503-1511.
- Rahman, M. A., Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M. W., Imteaz, M. A. (2013). Resilient modulus and permanent deformation responses of geogrid-reinforced construction and demolition materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*. **26**(3), 512-519.
- Rathje, E., Rauch, A., Trejo, D., Folliard, K., Viyanant, C., Esfellar, M., Jain, A., Ogalla, M. (2006). Evaluation of crushed concrete and recycled asphalt pavement as backfill for mechanically stabilized earth walls. CTR Technical Report 0-4177-3.
- Regourd, M. (1980). Structure and behaviour of slag portland cement hydrates, Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cements, I, 11-26, Paris.
- Reuter M., Xiao Y., Boin U. (2004) Recycling and environmental issues of metalurgical slags and salt fluxes. VII. International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, 349-356.
- Rittirong, A., Shang, J. (2005). Electro-osmotic stabilization. B. Indraratna, J. Chu, (Eds.), Ground improvement case histories 967-996. Oxford: Elsevier.
- Rodriquez, A., R., Castillo, H. ve Sowers, G., F. (1973). Soil Mechanics in Highway Engineering, Trans Tech Publications, Germany.
- Rudolf, D. (1984). Türkiye’deki Doğal Puzolanların Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımı Üzerine İncelemeler. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Safiuddin, M., Jumaat, M. Z., Salam, M. A., Islam, M. S., Hashim, R. (2010). Utilization of solid wastes in construction materials. *International Journal of the Physical Sciences*. **5**, 13, 1952-1963.

- Sağlamer, A. (1985). Zemin ıslah metotları, Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekanığı Semineri, DSİ Genel Müdürlüğü, Adana.
- Sahu, V., Srivastava, A., Misra, A. K., Sharma, A. K. (2017). Stabilization of fly ash and lime sludge composites: assessment of its performance as base course material. *Archives of civil and mechanical engineering*, **17**(3), 475-485.
- Sarıcı, T. (2014). Geosentetik ile güçlendirilmiş taş kolonların taşıma kapasitesinin analizi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 134s.
- Sas, W., Głuchowski, A., Szymański, A. (2016). Behavior of recycled concrete aggregate improved with lime addition during cyclic loading. *Int. J. of Geomate*, **10**(1), 1662-1669.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., Bolio, H. (2011). Sustainable cement production-present and future. *Cement and Concrete Research*. **41**, 642–650.
- Shi, C., Roy, D., Krivenko, P. (2003). Alkali-activated cements and concretes. CRC Press.
- Sivakumar, V., McKinley, J. D., Ferguson, D. (2004). Reuse of construction waste: performance under repeated loading. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 157, 2, 91-96.
- Sobhan, K., Mashnad, M. (2000). Fatigue durability of stabilized recycled aggregate base course containing fly ash and waste-plastic strip reinforcement. Final Rep. Submitted to the Recycled Materials Resource Centre, Univ. of New Hampshire.
- Soleimanbeigi, A. ve Edil, T. (2015). Compressibility of Recycled Materials for Use As Highway Embankment Fill. ASCE, 1–14. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001285.
- Sondermann, W. ve Wehr, W. (2004). Deep vibro technique. (eds: M.P. Moseley and K. Kirsch), Jet grouting, New York: Spon Press, 57-92.
- Soutsos, M., Boyle, A.P., Vinai, R., Hadjierakleous, A., Barnett, S.J. (2016). Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers. *Construct. Build. Mater.*, **110**: 355-368.
- Spellman, L. U. (1982). Granulated blast furnace slag as a mineral admixture. *Concrete International*, **4**(7), 66-71.
- Stadler, A. T. (2001). Geogrid Reinforcement of Piedmont Residual Soil. Charlotte: North Carolina Department of Transportation.

- Swamy, R. N. ve Swamy, R. N. (1986). Cement replacement materials (Vol. 3). Sheffield: Surrey University Press.
- Şenol, A., Edil, T. B., Acosta, H. B., Bin-Shaque, M. S., Benson, C. H. (2003). Soil stabilization using various fly ashes. Proceeding of the 13th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 1, p: 235-240, Prag.
- Şimşek, O. (2007). Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 17-19.
- Tam, V.W.Y. ve Tam, C.M. (2008). Re-use of construction and demolition waste in housing developments. *Nova science publications*, New York, 1-2.
- Texas Depertmant of Transportation (TxDOT) (2013). Test procedure for soilcement testing. Tex-120-E, Austin, TX.
- The Cement Sustainability Initiative (2009). Recycling Concrete, World Business Council for Sustainable Development, 42s.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K. (1998). Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu. TÇMB Yayınları, Ankara, 98.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K. (2009). Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi Raporu. TÇMB Yayını, Ankara, 48.
- Touahamia, M., Sivakumar, V., McKelvey, D. (2002). Shear strength of reinforced-recycled material. *Construction and Building Materials*. **16** (6), 331-339.
- TS 1500/2000 (2000). İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Ankara, Türkiye.
- TS 25 (2008). Doğal puzolan (tras) - Çimento ve betonda kullanılan - tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 197-1 (2002). Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 91.100.10.
- TS EN 933-3 (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 3: Tane şekli tayini yassılık endeksi. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara, Türkiye.
- TS EN, 197-1 (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü.
- Tumluer, G. (2006). Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 173.

- Tunç, A. (2001). Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım. 325.
- Tunç, A. (2002). Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 912 s.
- Turriziani, R. (1964). Aspects of Chemistry of Pozzolanas, The Chemistry of Cements, Taylor, H. F. W. (Edit.), Academic Press, London, 27-83.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., (2003). Türkiyede Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, Ankara, 16-27
- U.S. Army Corps. of Eng. (2003). Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities, Research No. 20314-1000, Department of the Army, Washington.
- Uzuner, B. A. (2016a). Temel zemin mekaniği. Derya Kitabevi, 10. Basım, Trabzon, 740s.
- Uzuner, B., A. (2016b). Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, 6. Basım, Trabzon, 409s.
- VicRoads. (2013). Section 815: Cementitious treated crushed rock for pavement subbase. Kew, VIC, Australia.
- Vidal, H. (1969). The Principle of Reinforced Earth. High Res Rec. (282),1-16.
- Vieira C. S. ve Pereira P.M. (2015a). Damage induced by recycled construction and demolition wastes on the short-term tensile behaviour of two geosynthetics. *Transportation Geotechnics*. **4**, 64-75.
- Vieira C. S. ve Pereira P.M. (2015b). Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, **103**, 192–204.
- Wasti, Y. (1993). Uçucu küllerin geoteknik uygulamalarda kullanımı. Endüstri Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Kasım, Ankara, Bildiriler Kitabı: 37-44.
- Wayne, M.H., Han, J., Akins, K. (1998). The Design of Geosynthetic Reinforced Foundations. Proceedings of ASCE's 1998 Annual Convention and Exposition, ASCE Geotechnical Special Publication, 76:1-18.
- Webster, S. (1993). Geogrid reinforced base course for flexible pavements for light aircraft, test section construction, behavior under traffic, laboratory test, Design criteria. Technical Report GL-93-6, Waterways Experiment Station, U.S Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, USA.

- Wen, H., Warner, J., Edil, T., Wang, G. (2010). Laboratory comparison of crushed aggregate and recycled pavement material with and without high carbon fly ash. *Geotechnical and Geological Engineering*, **28**(4), 405-411.
- Winterkorn, H., F. ve Fang, H., Y. (1975). *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Publication, London, 176 s.
- Wrigley, N. E. (1989). The Durability and Aging of Geogrids. Proc. GRI-2, Durability and Aging of Geosynthetics, Published by Elsevier Appl. Sci., London and New York, pp. 110-134.
- Yazıcı, H. (2004). Termik santral atığı yapay alçı-uçucu kül-taban külü esaslı yapı malzemesi geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yeğinobalı, A. (2003). Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı. TÇMB/AR-GE, Ankara, 975-8136-14-3.
- Yeğit, M. (2017). Farklı çapta, derinlikte ve sayıdaki kazıkların grup davranışı. Yüksek Lisans Tezi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 122s.
- Yetimoğlu, T. (1994). Geogrid donatılı kum zemine oturan temellerin taşıma kapasitesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yıldırım, S. (2002). Zeminlerin İncelenmesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 466 s.
- Yıldız, A. (2002). Donatılı zeminler üzerine oturan yüzeysel temellerin analizi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Yılmaz, K. (1998). Yapı Malzemesi ve Beton Teknolojisi, İ.T.Ü Sakarya Müh. Fak. Matbaası, Sayı 67/3, Sakarya
- Yrjanson, W.A. (1989). Recycling of portland cement concrete pavements, synthesis of highway research practice No:154. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research board, National Research Council, Washington

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Talha SARICI

Doğum Yeri : Malatya

Doğum Tarihi : 08.07.1988

Lisans : Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

İnşaat Mühendisliği Bölümü (2010)

Yüksek Lisans : İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat
Mühendisliği Anabilim Dalı (2014)

