T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİNDE ELASTİSİTE MODÜLÜ ve SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Engin Can KAPTAN

DANIŞMAN
Prof. Dr. İlknur BOZBEY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2020

Bu çalışma, 28.07.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. İlknur BOZBEY(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Aykut ŞENOL
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin ..... numaralı projesi ile desteklenmiştir.
Bu tez, ... numaralı..... projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi çalışmasında zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi olan derin karıştırma yöntemi ve bu yöntemde farklı koşullardaki Elastisite modülü ve serbest basınç dayanımı arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışması boyunca desteklerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren sayın danışmanım Prof. Dr. İlknur BOZBEY'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Aynı zamanda tez çalışmam boyunca bana her konuda yardımcı olan, bilgilerini esirgemeyen sayın Arş. Gör. Fatma Tuğçe ÇINAR'a desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunuyorm.

Yoğun geçen bu yüksek lisans tezi süresince her zaman beni destekleyen, yanımda olan ve bugünlere gelmemde maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemeyen babam Cevat KAPTAN'a, annem Hülya KAPTAN'a ve kardeşlerim Burak Han KAPTAN ve Eymen Efe KAPTAN'a şükranlarımı sunuyorum ve ayrıca bu süreç boyunca yanımda olduğu için Damla Nur EMİR'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Temmuz 2020 Engin Can KAPTAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1. DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ (DMM) 3
2.1.1. Tarihsel Gelişim 4
2.1.2. Yapım ve İmalat 4
2.1.3. Uygulama Şekilleri ve Uygulama Alanları 6
2.1.4. Derin Karıştırma Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları 12
2.1.5. Derin Karıştırma Yönteminde Mühendislik Özellikleri 13
2.1.5.1. Mukavemet 13
2.1.5.2. Elastisite Modülü (Young Modülü) 17
2.1.5.3. Poisson Oranı 18
2.1.5.4. Permeabilite (Hidrolik Geçirgenlik) 18
2.1.5.5. Birim Ağırlık 19
2.2. MEVCUT STANDARTLAR VE ŞARTNAMELER 19
2.2.1. İsveç Geoteknik Topluluğu, Kireç ve Kireç-Çimento Kolonları (1997) 19
2.2.2. ABD Federal Karayolu İdaresi Tasarım Kılavuzu, Dolgu ve Temel Desteği İçin Derin Karıştırma (2013) 22
2.2.2.1. Adım 1 – Proje İhtiyaçlarının Saptanması 23
2.2.2.2. Adım 2 – Temsili Yer Altı Koşullarının Saptanması 24
2.2.2.3. Adım 3 – Deneme Derin Karıştırılmış Zemin Özellikleri Değerlerinin Saptanması 24
2.2.2.4. Adım 4 – Deneme Derin Karıştırılmış Geometrinin Saptanması 25
2.2.2.5. Adım 5 – Oturmaların Ölçülmesi 25

2.2.2.6. Adım 6 – Stabilitenin Ölçülmesi 26

2.2.2.7. Adım 7 – Planların ve Şartnamelerin Hazırlanması 26
2.2.3. TS EN 14679, Özel Jeoteknik Uygulamalar, Derin Karıştırma (2006) 26
3. MALZEME VE YÖNTEM 30
3.1. VERİ TABANI 30
4. BULGULAR 36
4.1. ZEMİN TİPİNE GÖRE ELASTİSİTE MODÜLÜ-SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ İLİŞKİSİ 36
4.2. KATKI TİPİNE GÖRE ELASTİSİTE MODÜLÜ-SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ İLİŞKİSİ 48
4.3. ELASTİSİTE MODÜLÜNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ İLİŞKİSİ 56
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 65
KAYNAKLAR 67
EKLER 71
ÖZGEÇMİŞ 95

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Derin karıştırma yöntemi uygulaması (Foraj Zemin Mühendislik, 2009). 5

Şekil 2.2: Derin karıştırma yöntemi arazi uygulaması (Filz, 2013) 5

Şekil 2.3: DSM sistemi (Kılıç, 2013).....6

Şekil 2.4: Grup kolon sistemlerinin uygulama şekilleri (Kitazume ve Terashi, 2012). 7

Şekil 2.5: a) Duvar sistemi uygulama şekli, b) Blok sistemi uygulama şekli, c) Izgara sistemi uygulama şekli (Kitazume ve Terashi, 2012).....8

Şekil 2.6: Derin karıştırma yönteminin uygulama alanları (Porbaha ve diğ., 1998).....9

Şekil 2.7: Derin karıştırma yönteminin yapı temellerindeki uygulamaları (Kitazume ve Terashi, 2012).....10

Şekil 2.8: Derin karıştırma yönteminin kıyı ve deniz yapılarındaki uygulamaları (Kitazume ve Terashi, 2012). 11

Şekil 2.9: DMM zemin iyileştirme sistemi olarak kullanıldığında avantajları ve dezavantajları (Kılıç, 2013). 12

Şekil 2.10: DMM sıvılaşma potansiyelini azaltmak amacıyla kullanıldığında avantajları ve dezavantajları (Kılıç, 2013) 13

Şekil 2.11: Laboratuvarda karıştırılmış ve test edilmiş numuneler için serbest basınç dayanımının toplam su/çimento oranıyla karşılaştırılması (Jacobson ve diğ., 2003 ; Mura ve diğ., 2002 ; Horpibulsuk ve diğ., 2003 ; Lorenzo ve Begado, 2006 ; Hodges ve diğ., 2008). 15

Şekil 4.1: Zemin tipinin kil olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Akçakal ve diğ., 2019 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005).....37

Şekil 4.2: Zemin tipinin kil olduğu durumlarda ortalama E-q_u ilişkisi (Akçakal ve diğ., 2019 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005). 38

Şekil 4.3: Zemin tipinin organik kil olduğu durumda maksimum ve minimum E-q_u aralığı (Massarch, 2005) 39

Şekil 4.4: Zemin tipinin organik kil olduğu durumda kuru karıştırma yöntemi için ortalama E-qu ilişkisi (Massarch, 2005). 40

Şekil 4.5: Zemin tipinin silt olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Yenginar ve diğ., 2017 ; Van Impe ve diğ., 2005) 41

Şekil 4.6: Zemin tipinin silt olduğu durumlarda ortalama E-q_u ilişkisi (Yenginar ve diğ., 2017 ; Van Impe ve diğ., 2005) 42

Şekil 4.7: Zemin tipinin kum olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Nguyen ve diğ., 2014) 43

Şekil 4.8: Zemin tipinin kum olduğu durumlarda ortalama E-q_u ilişkisi (Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Nguyen ve diğ., 2014). 44

Şekil 4.9: Zemin tipinin turba olduğu durumda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005) 45

Şekil 4.10: Zemin tipinin turba olduğu durumda ortalama E-q_u ilişkisi (Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005) 46

Şekil 4.11: Zemin tipine göre ortalama E-q_u ilişkisi (Akçakal ve diğ., 2019 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005 ; Massarch, 2005 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Nguyen ve diğ., 2014 ; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005) 47

Şekil 4.12: Katkı tipinin çimento olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Şengör, 2011 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Okada ve diğ. ; Nguyen ve diğ., 2014). 48

Şekil 4.13: Katkı tipinin çimento olduğu durumlarda ortalama E-q_u ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Şengör, 2011 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Okada ve diğ. ; Nguyen ve diğ., 2014) 49

Şekil 4.14: Katkı tipinin çimento ve uçucu kül olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Egorova ve diğ., 2017 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Şengör, 2011) 51

Şekil 4.15: Katkı tipinin çimento ve uçucu kül olduğu durumlarda ortalama E-q_u ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Şengör, 2011). 52

Şekil 4.16: Katkı tipinin çimento ve kireç olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Puppala ve diğ., 2007 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005 ; Azadegan, 2012) 53

Şekil 4.17: Katkı tipinin çimento ve kireç olduğu durumlarda ortalama E-qu ilişkisi (Puppala ve diğ., 2007 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005 ; Azadegan, 2012). 54

Şekil 4.18: Katkı tipine göre ortalama E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Şengör, 2011 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Okada ve diğ. ; Nguyen ve diğ., 2014 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005) 55

Şekil 4.19: E için arazi deneylerinde maksimum ve minimum E-qu aralığı (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019) 56

Şekil 4.20: E için göre arazi deneylerinde ortalama E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019) 57

Şekil 4.21: E için laboratuvar deneylerinde maksimum ve minimum E-qu aralığı (Egorova ve diğ., 2017 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005 ; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012).....58

Şekil 4.22: E için laboratuvar deneylerinde ortalama E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005 ; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012).....59

Şekil 4.23: E_{50} için arazi deneyinde maksimum ve minimum E_{50}-qu aralığı (Massarsch, 2005).....60

Şekil 4.24: E_{50} için arazi deneyinde ortalama E_{50}-qu ilişkisi (Massarsch, 2005).....61

Şekil 4.25: E_{50} için laboratuvar deneylerinde maksimum ve minimum E_{50}-qu aralığı (Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Nguyen ve diğ., 2014). 62

Şekil 4.26: E_{50} için laboratuvar deneylerinde ortalama E_{50}-qu ilişkisi (Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Nguyen ve diğ., 2014) 63

Şekil 4.27: Elastisite modülüne göre ortalama E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005 ; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Massarsch, 2005 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011). 64

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Derin karıştırılmış zeminin mukavemetini etkileyen faktörler (Terashi, 1997).....14

Tablo 2.2: DMM ile desteklenen dolguların tasarımı için tipik tasarım güvenlik katsayıları (Bruce ve diğ., 2013) 24

Tablo 4.1: Zemin tipine göre E-qu ilişki (Akçakal ve diğ., 2019 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005; Massarch, 2005; Yenginar ve diğ., 2017 ; Van Impe ve diğ., 2005; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Nguyen ve diğ., 2014; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005) 47

Tablo 4.2: Katkı tipine göre E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Şengör, 2011 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Okada ve diğ. ; Nguyen ve diğ., 2014 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005 ; Azadegan, 2012).....55

Tablo 4.3: Elastisite modülüne göre E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005 ; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Massarsch, 2005 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfrtoh, 2005; Van Impe ve diğ., 2005).....63

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$a_{s,\ merkez}$	: dolgunun merkez kısmı altındaki alan yer değiştirme oranı
b	: bağlayıcı malzeme
c	: çimento
c_{uk}	: karakteristik drenajsız kayma mukavemeti
E	: Elastisite modülü
E_{50}	: Sekant Elastisite modülü
f_c	: kür faktörü
f_r	: büyük deformasyonlardaki mukavemet katsayısı
F_c	: derin karıştırılmış bölgenin ucunda derin karıştırılmış zeminin kırılmaya karşı güvenlik katsayısı
F_{cc}	: derin karıştırma kolonlarla izole merkezin göçmeye karşı güvenlik katsayısı
F_e	: derin karıştırılmış perde duvar boyunca zemin çekmesine karşı güvenlik katsayısı
F_s	: derin karıştırılmış bölge boyunca kayma ve genel stabiliteyi içeren, şev stabilitesi göçmesine karşı güvenlik katsayısı
F_o	: derin karıştırılmış perde duvarların devrilme ve taşıma kapasitesi göçmesine karşı güvenlik katsayısı
F_v	: derin karıştırılmış bölge boyunca düşey düzlem üzerinde kaymaya karşı güvenlik katsayısı
M_{comp}	: kompozit modül
M_{zemin}	: iyileştirilmiş zeminin zoraki modülü
N	: bileşke düşey kuvvet
N'	: efektif düşey kuvvet
R^2	: regresyon / determinasyon katsayısı
s_{dm}	: derin karıştırılmış zeminin kayma mukavemeti tasarım değeri
s_{merkez}	: derin karıştırılmış kolonların merkezden merkeze uzaklıkları
t	: kür süresi (gün)
q_{all}	: derin karıştırılmış kesme duvarının topuğundaki izin verilebilir taşıma basıncı

Kısaltmalar	Açıklama
CDIT	: Coast Development Institute of Technology
CPT	: Koni Penetrasyon Testi (Cone Penetration Test)
DMM	: Derin Karıştırma Yöntemi (Deep Mixing Method)
FDHW	: ABD Federal Karayolu İdaresi Tasarım Kılavuzu (Federal Highway Design Manuel)
UCS	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı (Uniaxial Compressive Strength)
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (Unified Soil Classification System)
ML	: Düşük Plastisiteli Kil

ÖZET

DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİNDE ELASTİSİTE MODÜLÜ ve SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Engin Can KAPTAN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. İlknur BOZBEY

Derin karıştırma yöntemi, zayıf zeminlerin özelliklerinin çimentolu bir bağlayıcı ile karıştırılarak mekanik olarak yerinde iyileştirilmesi ve zeminde kolonlar oluşturulması şeklinde tanımlanan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemde bağlayıcı malzeme olarak daha çok çimento ve kireç kullanılmaktadır. Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen zeminlerin özellikleri; tabii zeminin ve bağlayıcıların özelliklerine, katkı miktarına ve kür süresine bağlıdır. Derin karıştırma ile iyileştirme yapılan tasarımlarda kalite kontrol deneylerinde serbest basınç mukavemet değerleri ölçülmekte ve deformasyonların tayini için gereken modül değerlerine korelasyonlar yardımı ile geçilmektedir. Bu çalışma kapsamında öncelikle dünya genelinde kabul görmüş olan standartlar anlatılmış ve bu yönteme dair ülkemizde oluşturulabilecek bir standart için bilgiler toplanmış, tavsiyeler verilmiştir. Çalışma kapsamında daha sonra literatürde mevcut olan çalışmalar incelenmiş ve derin karıştırma ile elde edilen malzemelerin mukavemet-modül değerleri bir veri tabanına işlenmiştir. Bu kapsamda 12 ayrı çalışmadan toplamda 545 adet veri toplanmıştır. Oluşturulan veri tabanı zemin tipi, katkı tipi ve miktarı, kür süresi, serbest basınç mukavemeti, Elasitisite modülü ve karıştırma metodu bilgilerini içermektedir. Veri tabanı kullanılarak yeni korelasyonlar aranmış ve mevcut olanlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen korelasyonların ülkemizde son yıllarda çok yoğun kullanım alanı bulmakta olan derin karıştırma yöntemi için faydalı olacağı düşünülmektedir.

Temmuz 2020, 111 sayfa.

Anahtar kelimeler: derin karıştırma yöntemi, Elastisite modülü, serbest basınç mukavemeti, kür süresi, karıştırma yöntemi.

SUMMARY

INVESTIGATION of the RELATIONSHIP BETWEEN ELASTICITY MODULUS and UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH in DEEP MIXING METHOD

M.Sc. THESIS

Engin Can KAPTAN

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. İlknur BOZBEY

Deep soil mixing method is a soil improvement method which generates columns in the soil and improves the properties of a weak soil in-situ by mixing it mechanically with a cementetious binder. The binder materials that are being used in this method are generally cement and lime. The properties of the treated soil depends on the properties of natural soil and binder, binder quantity and curing time. For such designs where the treatment is carried out by deep soil mixing, quality control experiments generally include only the unconfined compressive strenght values,while the modulus values that are necessary for the determination of deformations are obtained by correlations. In this paper, the existing studies in the literature were analized and the strength-modulus values of the materials that are obtained by deep mixing. Within the scope of this study, firstly, the well known standards were studied in detail and necessary information for a Turkish deep mixing standard was gathered. Then, within this context, 545 data from 12 different studies have been collected and a data base has been created. This data base includes the informations of type of soil, type and quantity of additive, curing time, unconfined compressive strength, elastic modulus and mixing method. By using this data base, new correlations have been searched and compared with the current

ones. It is believed that the obtained correlations will be useful for deep soil mixing method which is recently used more frequently in Turkey.

July 2020, 111 pages.

Keywords: deep mixing method, Elastic modulus, unconfined compressive strength, curing factor, mixing method.

1. GİRİŞ

Günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi derin karıştırma yöntemidir. Bu yöntem ilk olarak Japonya ve İsveç'te kullanılmaya başlanmış ve günümüzün gelişen teknolojisi ve olanakları ile beraber daha sonraları birçok ülkeye yayılmıştır.

Derin karıştırma yöntemi, zayıf özellikteki zeminlerin farklı tür bağlayıcılar ile karıştırılarak mekanik olarak yerinde iyileştirilmesi ve zeminin içerisinde kolonlar oluşturulması şeklinde tanımlanmaktadır. Bu yöntemde bağlayıcı malzeme olarak daha çok çimento ve kireç tercih edilmektedir. Diğer bağlayıcı malzemeler arasında uçucu kül, yüksek fırın cürufu sıralanmaktadır. Bu yöntem tercih edilerek iyileştirilen zeminlerin özellikleri; tabii zeminin ve bağlayıcıların özelliklerine, katkı miktarına ve kür süresine bağlıdır. Bu zemin iyileştirme yöntemindeki asıl amaç toplam ve farklı oturmaların azaltılması, proje gereksinimlerine göre zeminin taşıma kapasitesinin ve sıvılaşma direncinin artırılması, sıvılaşma sonrasında meydana gelebilecek oturmaların sınırlandırılması, şev ve dolguların stabilitesinin sağlanması, mukavemetin arttırılması ve sıkışabilirliğin azaltılmasıdır. Bu yöntem için en uygun zemin koşulları gevşek kumlu ve yumuşak killi, yüksek nem içeriğindeki zeminlerdir. Bu zemin iyileştirme yönteminin uygulama alanları ise dolguların stabilitesi, kazı çukurlarının desteklenmesi, geçirimsizlik perdeleri, deniz yapıları ve sıvılaşmanın önlenmesi olarak sayılabilir.

Derin karıştırma yöntemi, ilgili zemin koşullarına bağlı olarak iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bunlar kuru karıştırma ve ıslak karıştırmadır. Kuru karıştırma yöntemi, zeminlerin suya doygun olduğu durumlarda katkı malzemesinin kuru olarak yani toz şeklinde enjekte edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Islak karıştırma yönteminde ise çimento ve/veya kireç, su ile belirli oranlarda karıştırılarak zemine enjekte edilir.

Bu yöntemde, üzerinde enjeksiyon ağızlıkları (nozzle) bulunan, en ucunda kesici bıçakların yer aldığı ve de orta kısmındaki boşluktan çimento-su karışımını ağızlıklara ileten bir delgi takımı kullanılmaktadır. Yukarıdan aşağıya doğru gerçekleştirilen delgi işleminde enjeksiyon zemine aktarılır, delginin yukarıya çekilmesi aşamasında da enjeksiyonun zemine aktarımına devam edilebilir ya da sadece zemin karıştırması yapılabilir. Böylelikle enjeksiyon ve zeminin üniform

bir biçimde, belirli bir çap ve hacimde karışımı sağlanmış olur ve DMM (derin karıştırma yöntemi) kolonları elde edilir.

Bu tez kapsamında farklı ülkelerin mevcut derin karıştırma standartları/şartnameleri incelenmiş ve ülkemiz için bir derin karıştırma şartnamesinin nasıl olabileceği değerlendirilmiştir; sonrasında literatürde mevcut olan çalışmalar incelenmiş ve derin karıştırma ile elde edilen malzemelerin mukavemet-modül değerleri bir veri tabanına işlenmiştir. Bu kapsamda 12 ayrı çalışmadan toplamda 545 adet veri toplanmıştır. Oluşturulan veri tabanı zemin tipi, katkı tipi ve miktarı, kür süresi, serbest basınç mukavemeti, Elasitisite Modülü ve karıştırma metodu bilgilerini içermektedir. Veri tabanı kullanılarak yeni korelasyonlar aranmış ve mevcut olanlarla karşılaştırılmıştır.

Tez beş bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1 Giriş bölümüdür. Bölüm 2'de derin karıştırma yönteminin ne olduğu açıklanmıştır, tarihsel gelişimi hakkında bilgi verilmiştir, yapım ve imalatı anlatılmıştır, uygulama şekilleri ve uygulama alanlarından bahsedilmiştir, mühendislik özellikleri tanıtılmıştır, mevcut standart ve şartnameler hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 3'te oluşturulan veri tabanı kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır, faydalanılan farklı literatür çalışmaları hakkında genel bilgiler verilmiştir ve bu çalışmalardan elde edilen veriler (zemin tipi, katkı tipi, kür süresi, karıştırma yöntemi ve Elastisite modülü) detaylı olarak anlatılmıştır ve ilgili veriler Ekler kısmında tablolar halinde sunulmuştur. Bu veriler grafiklere işlenmiş ve Elastisite modülü ile serbest basınç mukavemetleri arasında farklı korelasyonlar elde edilmiştir. Elde edilen korelasyonlar mevcut olanlarla karşılaştırılmıştır. Bölüm 4'te bu tez kapsamında elde edilmiş olan korelasyon ilişkileri anlatılmıştır. Farklı başlıklar altında, kullanılan veri tabanı ile grafiklere işlenen veriler sonucunda elde edilmiş korelasyon denklemleri zemin tipine, katkı tipine ve Elastisite modülüne göre elde edilmiştir ve literatürdeki değerler ile karşılaştırılmış ve önerilerde bulunulmuştur.

Bölüm 5'te ise elde edilen sonuçlar tartışılmış ve değerlendirilmiştir. Farklı koşullara göre Elastite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi sonuç olarak özetlenmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ (DMM)

Zeminler, üzerlerine inşa edilecek yapıların altındaki taşıyıcı tabakalar olarak nitelendirilmektedirler. Farklı mühendislik özelliklerine sahip zemin tipleri; su muhtevası, drenaj koşulları vb. gibi arazi durumlarına göre değişen geniş bir aralığa sahiptir. Zeminler, proje ihtiyaçlarına göre her zaman istenilen özellikte olmayabilir. Böyle durumlarda bu istenmeyen zemin özelliklerini sınırlamak ve ilgili tasarımı gerçekleştirebilecek şekilde zeminin iyileştirilmesi için ilgili yöntem benimsenmektedir (Demiröz ve Karaduman, 2009).

Zemin iyileştirmesi, üst yapının inşası için ilgili zemin özelliklerinin yeterli olmadığı koşullarda farklı metodlar kullanılarak bu zemin özelliklerinin belirli düzeylerde iyileştirilmesi şeklinde nitelendirilmektedir (Das, 1984). Örneğin, ilgili zeminin kayma mukavemetinin artırılmasıyla yüzeysel temellerin taşıma gücünün artırılabilmesi, oturma miktarlarının azaltılabilmesi, zemin sıvılaşmasının sınırlandırılması, şev stabilitesinin artırılması gibi durumlar zemin iyileştirme yöntemleri ile sağlanabilmektedir (Tuncan, 2007).

Derin karıştırma yöntemi, zayıf özelliklere sahip zeminlerin genellikle çimentolu veya kireçli bağlayıcılar ile zeminde kolonlar oluşturularak yerinde iyileştirilmesidir. Derin karıştırma yönteminde kullanılan bağlayıcılar çimento, kireç, uçucu kül, cüruf vb. malzemelerden oluşabilmektedir (Filz ve diğ., 2012). Derin karıştırma yöntemindeki asıl amaç, mukavemetin artırılması için mekanik araçlarla zemindeki boşluk oranının azaltılması ve bu boşlukların çimento, kireç, bentonit vb. karışımlarla doldurulmasıdır (Mitchell, 1976). Derin karıştırma yöntemi kullanılarak iyileştirme yapılan zeminlerdeki özellikler; bağlayıcı malzemelerin özelliklerine, kullanılan katkı miktarına ve kür süresine bağlı olarak değişmektedir. Bu yöntem için en uygun zemin koşulları yüksek nem içeriğindeki yumuşak killi ve gevşek kumlu zeminlerdir. DMM ayrıca kohezyonu daha az olan zeminlerde de uygulanabilmektedir fakat çok katı ve sert, çakıl zeminlerde uygulanmaya müsait değildir.

Killi ve organik zeminlerde yapılan uygulamalardaki amaç zeminin taşıma kapasitesinin arttırılması, üst yapıdan kaynaklı oturmanın azaltılması, pasif toprak basıncının arttırılıp, aktif toprak basıncının azaltılması şeklindedir. Kumlu zeminlerdeki uygulamalarda ise killi ve

organik zeminlerden farklı olarak sıvılaşmanın önüne geçilmesi amaçlanmaktadır (Erbeyoğlu, 2019).

2.1.1. Tarihsel Gelişim

Derin karıştırma yöntemi 1960'lı yıllardan itibaren dünya genelinde birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır, bu yöntem ülkemizde ise 2006 yılından sonra uygulama alanı bulmuştur (Kaya, 2016).

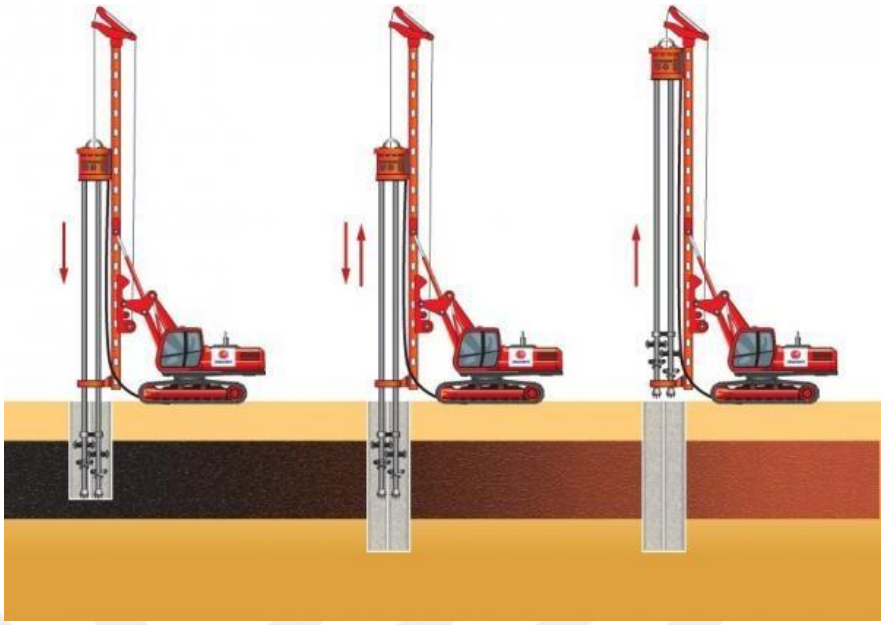
DMM kolonları ilk olarak Japonya'da araştırılmıştır ve Japonya'daki ilk DMM kolon uygulamalarından olan kireç kolonları 1974 yılında geliştirilmiştir. 1975 yılında DMM kolonları ıslak yöntem ile, 1980 yılında ise kuru yöntem ile uygulanmıştır (Kaya, 2016). Kuru derin karıştırma yönteminde, zeminlerin suya doygun olduğu koşullarda bağlayıcı malzeme kuru olarak yani toz şeklinde zemine enjekte edilmektedir. Islak derin karıştırma yönteminde ise su ile belirli oranlarda karıştırılmış olan çimento ve/veya kireç zemin içerisine enjekte edilmektedir. Günümüzde birçok farklı kimyasal malzemenin üretilmesine rağmen derin karıştırma yönteminde yaygın olarak tercih edilen bağlayıcılar kullanım kolaylığı ve maliyetleri sebebi ile kireç ve çimentodur (Kitazume ve Terashi, 2013).

DMM kolonlarının Avrupa'daki ilk uygulamaları İsveç'te gerçekleşmiştir ve 1967 yılında İsveç Kireç Kolonları adlı yayın İsveç Geoteknik Enstitüsü tarafınca yayımlanmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri'nde ise DMM 1980'li yıllarda uygulanmaya başlanmıştır. ABD'de derin karıştırma yöntemi hala gelişmekte olan bir zemin iyileştirme yöntemi olarak düşünülmektedir (Smith, 2005).

2.1.2. Yapım ve İmalat

Derin karıştırma yönteminin yapım ve imalat aşamaları şu şekilde sıralanabilir: İlk olarak delici makine ilgili kolon koordinatlarında konumlanır. Sonrasında karıştırıcı şaftı zemini parçalayarak istenilen derinliğe kadar indirilir. Karıştırıcı şaftı istenilen derinliğe ulaştıktan sonra zemini karıştırarak yukarı çekilir. İstenilen derinliğe inme ve bu derinliğe ulaştıktan sonra geri çekme evrelerinin birinde veya her ikisinde de çimento şerbeti verilerek zemin ile karıştırma sağlanır. Derin karıştırma yöntemine dair uygulama Şekil 2.1'de verilmektedir.



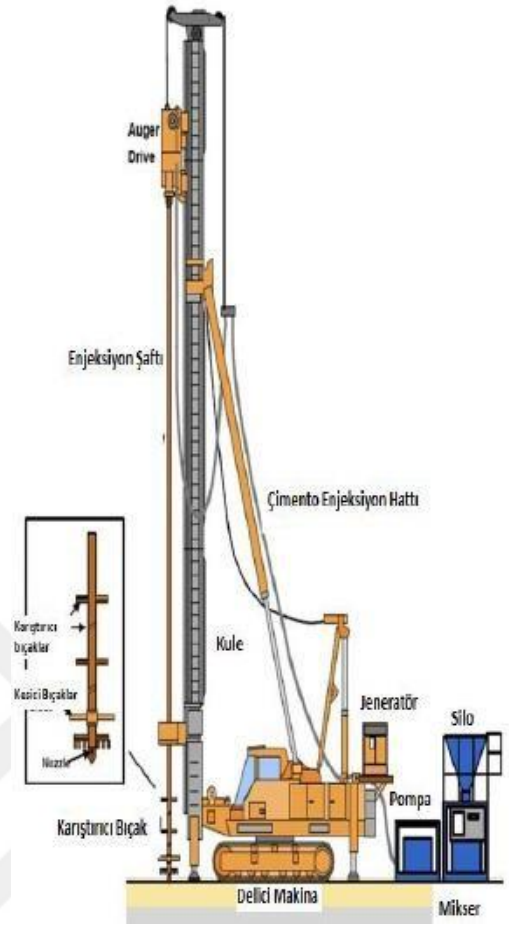
Şekil 2.1: Derin karıştırma yöntemi uygulaması (Foraj Zemin Mühendislik, 2009).

Şekil 2.2'de ise derin karıştırma yönteminin arazideki uygulamasına ait fotoğraf verilmektedir.



Şekil 2.2: Derin karıştırma yöntemi arazi uygulaması (Filz, 2013).

DMM'nin uygulanabilmesi için ihtiyaç duyulan ekipmanlar karıştırıcı şaft, mikser, pompa, çimento ve su tanklarıdır. Karıştırıcı şaft ise şu kısımlardan oluşmaktadır; kesme ve karıştırma bıçakları, enjeksiyon portları ve ağızlıkları (nozzle) (Onur ve diğ., 2016). Derin karıştırma yöntemine ait sistem genel olarak Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3: DSM sistemi (Kılıç, 2013).

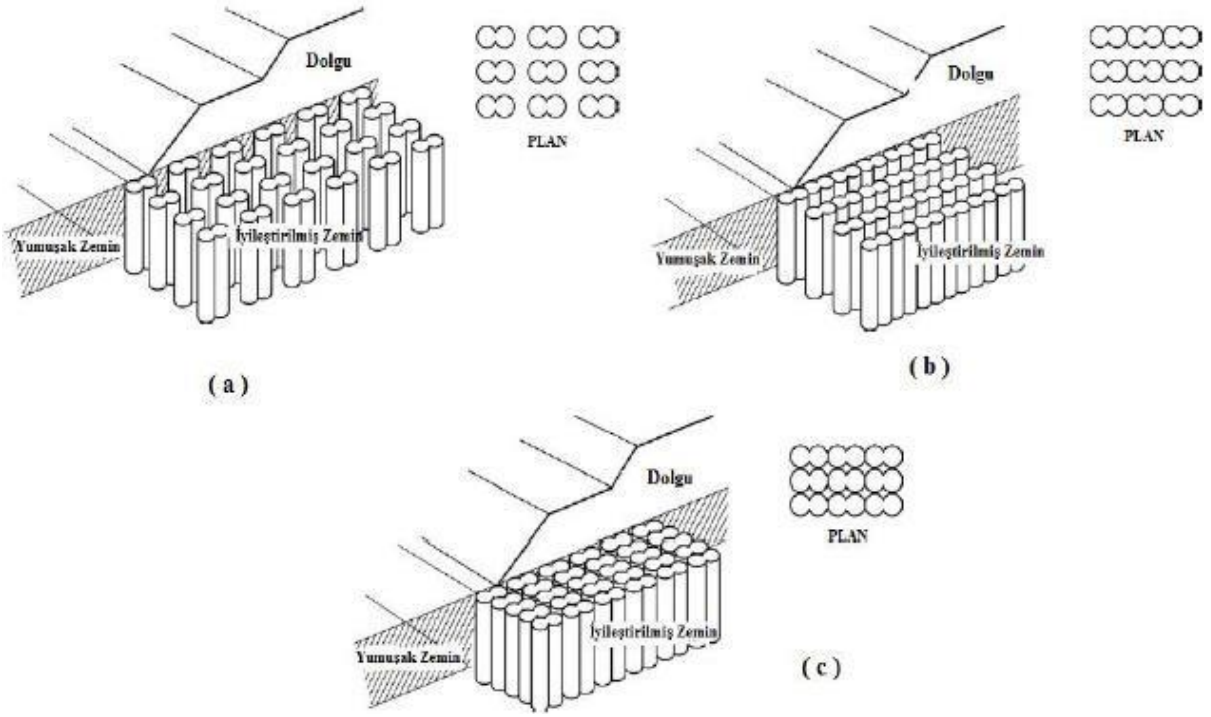
DMM uygulamasının ilk aşamalarında kuru yöntem için Japonya'da bağlayıcı malzeme olarak kireç tercih edilmiştir, ilerleyen uygulamalarda ise çimento da kullanılmaya başlanmıştır. Kuru derin karıştırma yönteminde yüksek hızda hareket eden bir karıştırma aracı yumuşak zemin içerisinde ilgili kolon derinliğine kadar indirilerek bir çukur oluşturulmuş olur. Zemin içerisinde oluşturulan bu çukura sönmüş kireç, çimento veya kireç-çimento karışımı basınçlı hava ile enjekte edilir ve karıştırma aracı yavaşça geri çekilir. Islak derin karıştırma yönteminde ise maksimum 50 metre derinliğe kadar olacak şekilde çimento veya kireç-çimento karışımı sulu harç halinde zemin ile karıştırılır. Bağlayıcı malzeme, kesme bıçakları üzerindeki deliklerden zemine enjekte edilmektedir (Kaya, 2016).

2.1.3. Uygulama Şekilleri ve Uygulama Alanları

Derin karıştırma yöntemi zeminlerin iyileştirilmesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Zemin üzerinde inşa edilecek yapının boyutuna, proje gereksinimlerine ve de uygulama geometrisine bağlı olarak kullanılacak tekniğin uygulanma şekli değişebilmektedir. Bu sebeple

bu yöntemin uygulama şekilleri tekil elemanlar, duvar/paneller, kafesler, ızgara sistemler ya da bloklar şeklinde sıralanabilir.

Tekil veya grup kolonlar olarak tasarlanan DMM'lerde amaç oturmaları azaltmak ve zeminin taşıma kapasitesini arttırmaktır. Bu tip derin karıştırma sistemleri karayolu veya demiryolu dolgularında ve de üst yapıdan gelecek olan yükün az olduğu durumlarda kullanılmaktadır. "grup kolon sistemleri"ne ait uygulama şekilleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir.

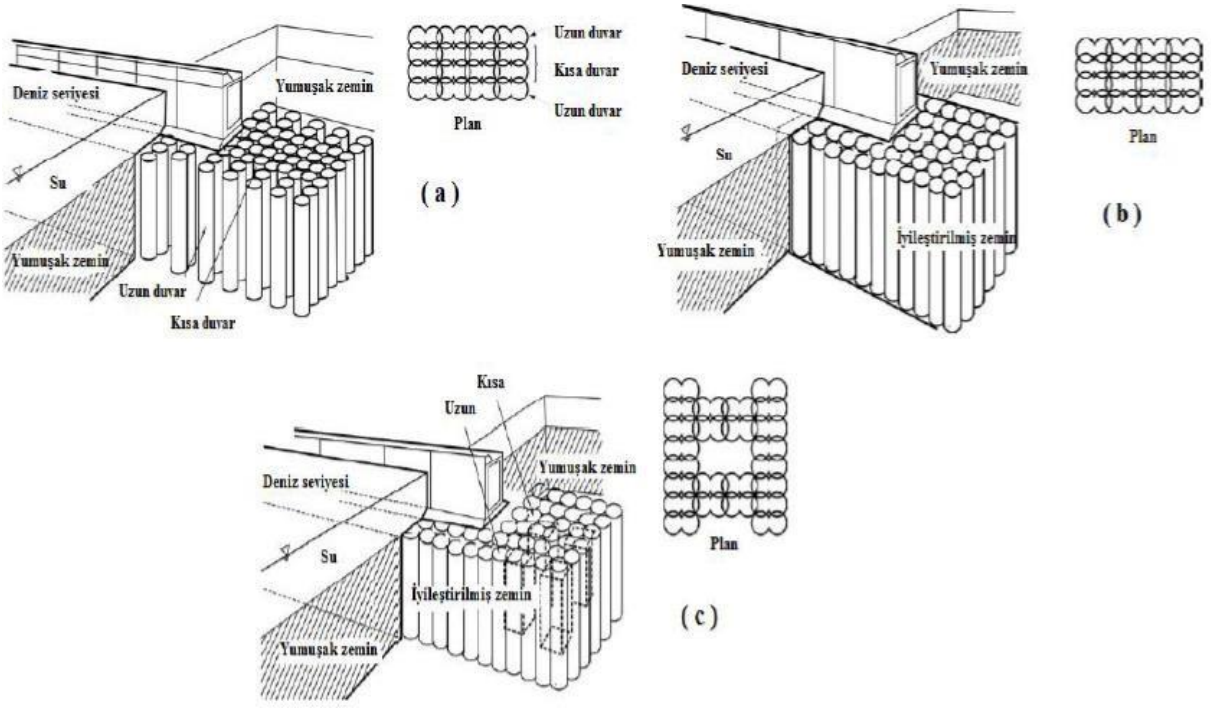


Şekil 2.4: Grup kolon sistemlerinin uygulama şekilleri (Kitazume ve Terashi, 2012).

Derin karıştırma yönteminde "duvar sistemi" örtüşen kolonların beraber oluşturdukları sistem şeklinde tanımlanmaktadır. Duvar sisteminde üst yapıdan gelen yükleri sağlam zemine aktarmak için uzun duvarlar ve bu uzun duvarların stabilitesini sağlamak için onları dik kesen kısa duvarlar yer almaktadır.

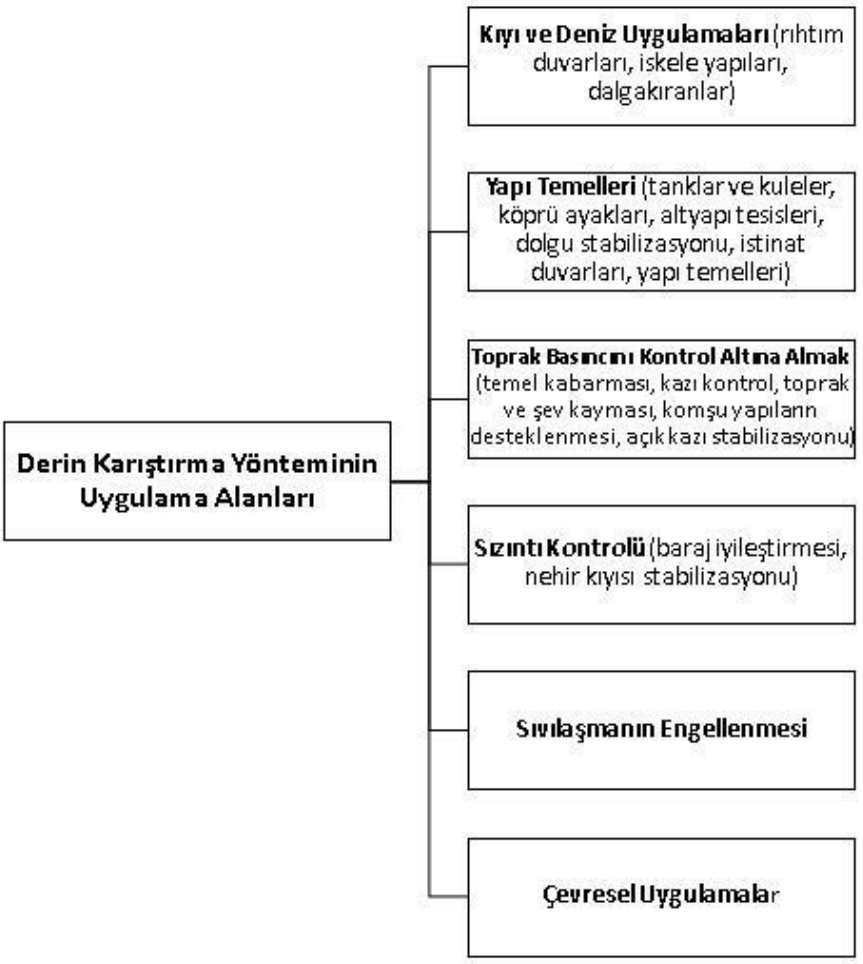
DMM'nin her iki yönde de birbirleriyle örtüşen kolonların beraber oluşturdukları sisteme ise "blok sistemi" adı verilmektedir. Bu sistem, diğer uygulama sistemlerine göre daha maliyetlidir ve uygulama süresi daha uzundur fakat diğer sistemlerle karşılaştırıldığında daha stabil bir iyileştirme sağlamaktadır. Blok sistemi dalgakıranlar ve liman yapıları gibi yapılarda tercih edilmektedir.

Derin karıştırma yönteminin duvar ve blok sistemlerinin beraber kullanılması sonucu oluşan uygulama şekli ise "ızgara sistemi"dir. Bu sistem bir deprem esnasında kumlu zeminlerdeki sıvılaşmayı önlemek amacıyla kullanılmaktadır (Kaya, 2016). Derin karıştırma yönteminin duvar sistemler, blok sistemler ve ızgara sistemlerle oluşturulmuş uygulama şekilleri Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



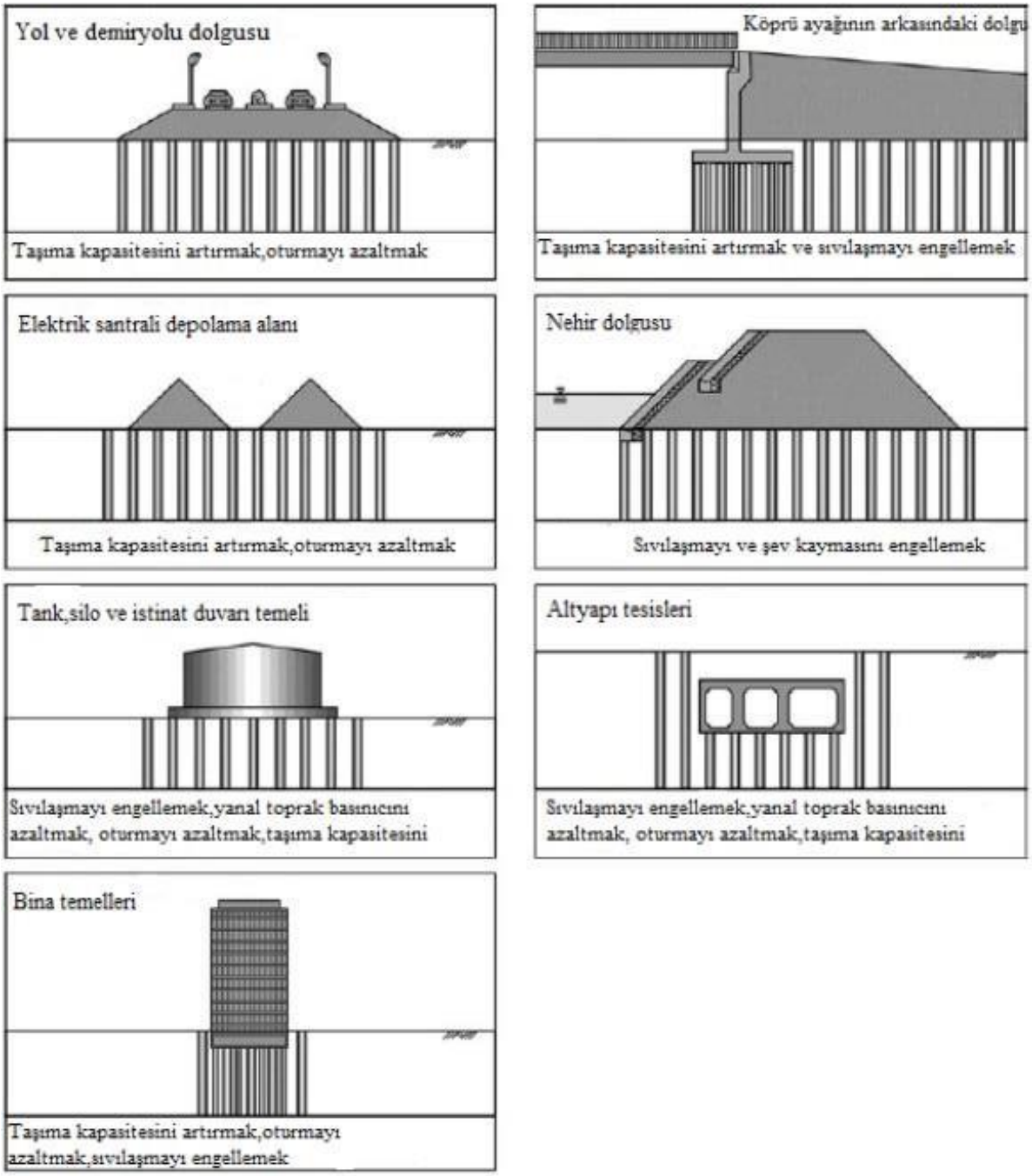
Şekil 2.5: a) Duvar sistemi uygulama şekli, b) Blok sistemi uygulama şekli, c) Izgara sistemi uygulama şekli (Kitazume ve Terashi, 2012).

Derin karıştırma yönteminin uygulama alanları altı ana başlığa ayrılmaktadır. Bu uygulama alanları Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Porbaha ve diğ., 1998).

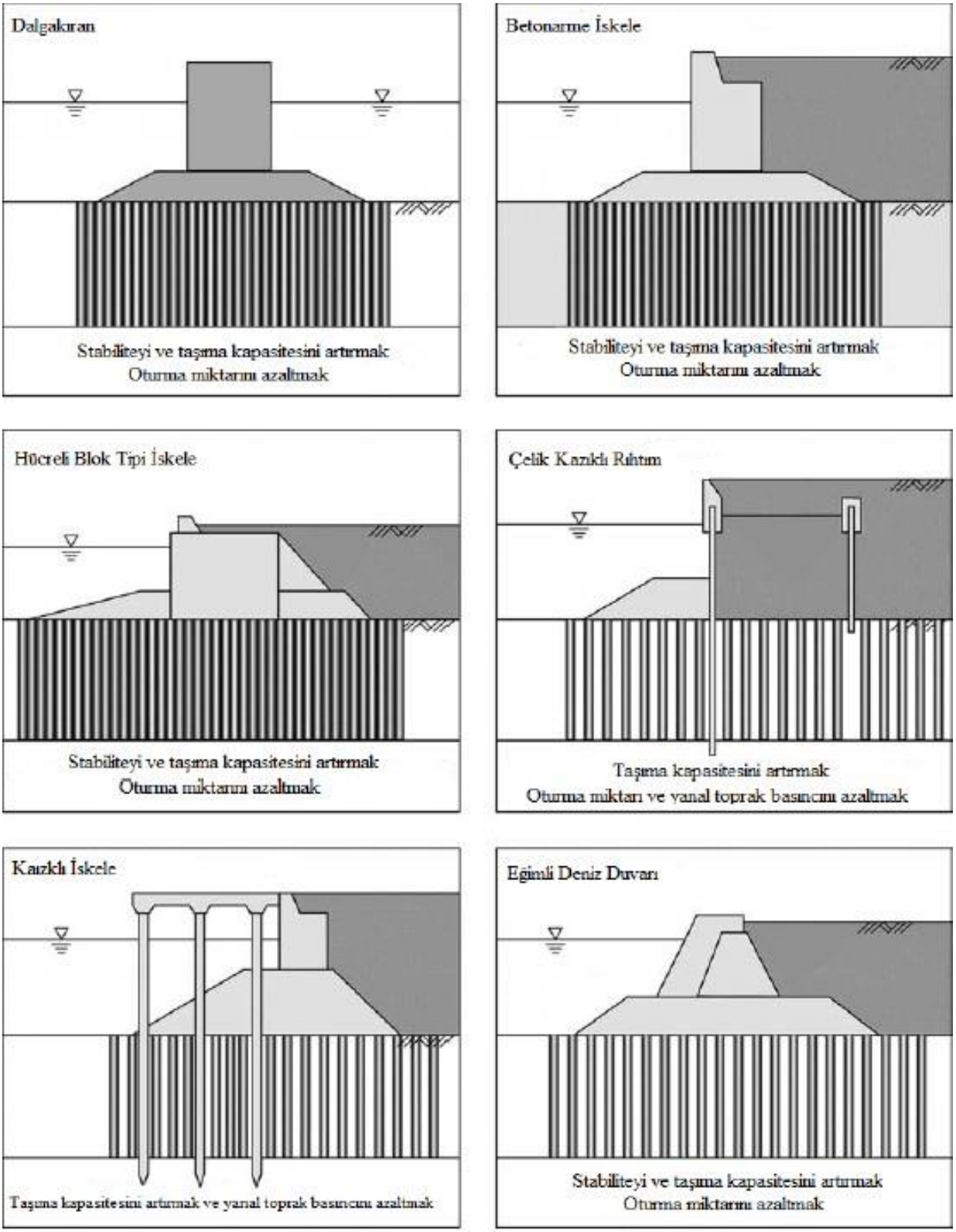


Şekil 2.6: Derin karıştırma yönteminin uygulama alanları (Porbaha ve diğ., 1998).

Bu uygulama alanlarından derin karıştırma yönteminin yapı temellerindeki uygulamaları Şekil 2.7'de ve kıyı ve deniz yapılarındaki uygulamaları ise Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



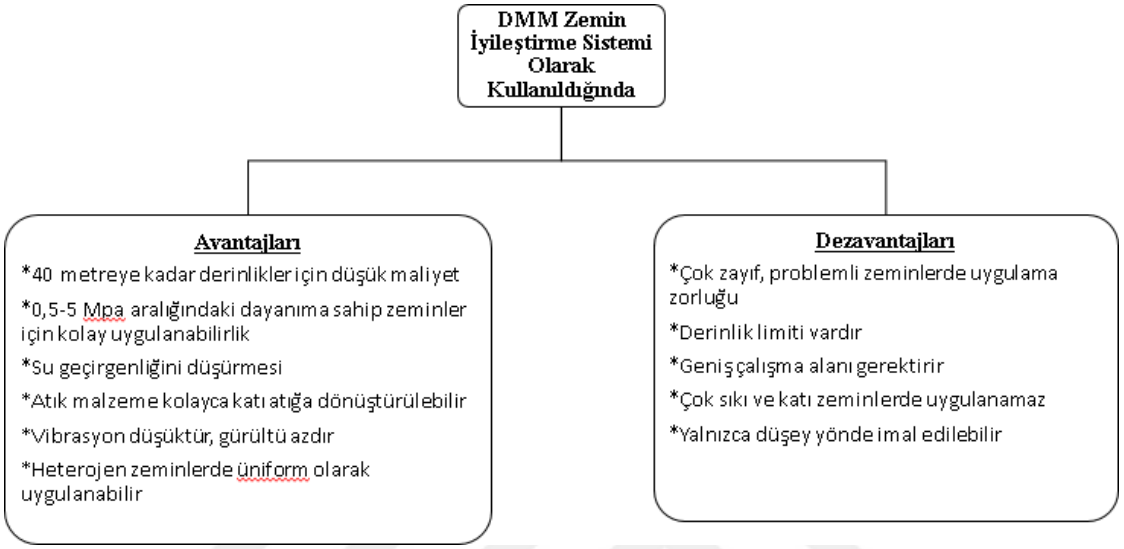
Şekil 2.7: Derin karıştırma yönteminin yapı temellerindeki uygulamaları (Kitazume ve Terashi, 2012).



Şekil 2.8: Derin karıştırma yönteminin kıyı ve deniz yapılarındaki uygulamaları (Kitazume ve Terashi, 2012).

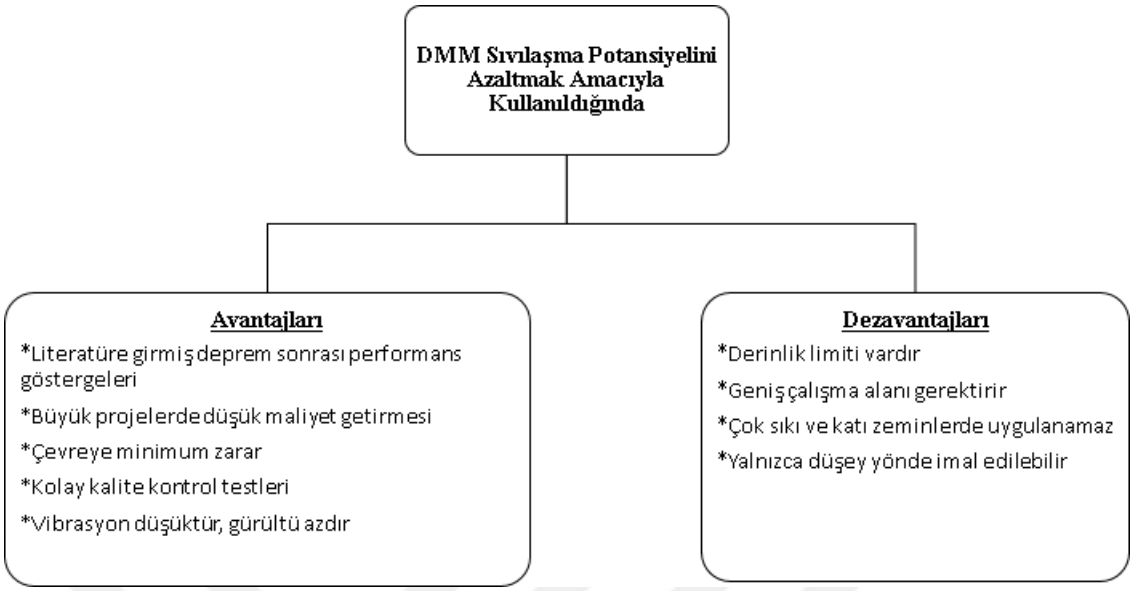
2.1.4. Derin Karıştırma Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

DMM zemin iyileştirme sistemi olarak kullanıldığında jet grout vb. yöntemlere göre avantajları ve dezavantajları Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9: DMM zemin iyileştirme sistemi olarak kullanıldığında avantajları ve dezavantajları (Kılıç, 2013).

DMM sıvılaşma potansiyelini azaltmak amacıyla kullanıldığında kompaksiyon vb. yöntemlere göre avantajları ve dezavantajları Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10: DMM sıvılaşma potansiyelini azaltmak amacıyla kullanıldığında avantajları ve dezavantajları (Kılıç, 2013).

2.1.5. Derin Karıştırma Yönteminde Mühendislik Özellikleri

Derin karıştırılmış zeminlerinde dikkat edilmesi gerekli olan mühendislik özellikleri mukavemet, Elastisite modülü, Poisson oranı, permeabilite ve birim ağırlık olarak sıralanmaktadır. Stabilite analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için, mukavemet ve birim ağırlık özelliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Oturma analizleri için ise, Elastisite modülü ve birim ağırlık özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Derin karıştırma yöntemi hidrolik bariyerler oluşturmak için kullanıldığı zaman permeabilite değerlerinin kullanılması ile sızıntı suyu analizleri yapılabilmektedir. Komplike projelerde stabilite ve oturma analizleri için nümerik yöntemler ve güvenilirlik analizleri kullanılmaktadır. Nümerik analizler mukavemet, Elastisite modülü, Poisson oranı ve birim ağırlık değerlerini gerektirmektedir. Güvenilirlik analizlerinde ise mühendislik özellik değerleri bilinmelidir (Bruce ve diğ., 2013).

2.1.5.1. Mukavemet

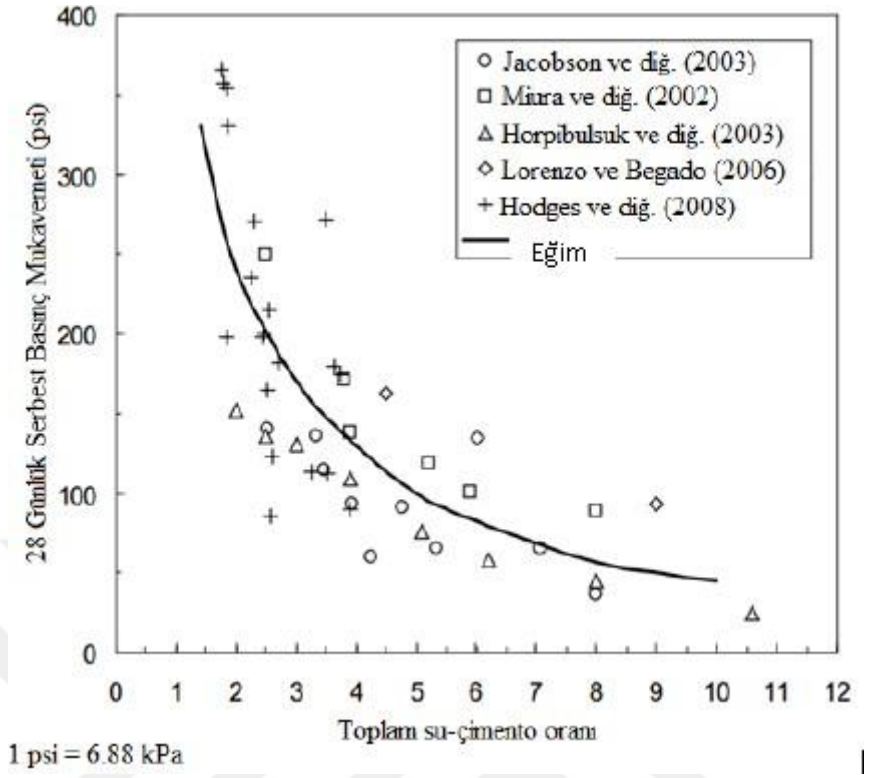
Zeminin mukavemetinin bilinmesi derin karıştırma yönteminde stabilite analizleri için gereklidir. İyileştirilmiş zeminin mukavemeti; bağlayıcının ve zeminin karakteristik özelliklerine, karıştırma durumuna, kür süresine ve yüklemeye bağlıdır. İyileştirilmiş zeminin dayanımını etkileyen faktörler Tablo 2.1'de listelemektedir (Terashi, 1997). Bu faktörler, saha ve proje karakteristiklerine, proje şartnamelerine ve DMM müteahhitlerinin kontrolüne

bağlıdır. Bu faktörlerin çoğu mühendisin kontrolünün dışında olmasına rağmen, derin karıştırılmış zeminin mukavemetinde bu faktörlerin etkilerini temel olarak anlaması önemlidir (Bruce ve diğ., 2013).

Tablo 2.1: Derin karıştırılmış zeminin mukavemetini etkileyen faktörler (Terashi, 1997).

Kategori	Faktörler
Bağlayıcının özellikleri	• Bağlayıcı türü • Kalite • Su ve katkı malzemelerinin karışımı
Zemin koşulları ve özellikleri (özellikle killer için önemlidir)	• Zeminin fiziksel, kimyasal, mineralojik özellikleri • Organik içerik • Boşluk suyunun pH'ı • Su muhtevası
Karıştırma koşulları	• Bağlayıcı miktarı • Karıştırma verimi • Karıştırma/yeniden karıştırma süresi
Kür koşulları	• Sıcaklık • Kür süresi • Nem • Islanma ve kuruma, donma ve çözülme, vb.
Yükleme koşulları	• Yükleme oranı • Yanal çevresel basınç • Gerilme izi (örneğin; sıkışma, çekme ve basit kesme)

Toplam su / bağlayıcı oranı (w_T : b) değerininin serbest basınç mukavemetine olan etkisi hem kuru hem de ıslak karıştırma yöntemlerini kapsayacak şekilde Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Bu grafikteki değerler, inorganik zeminlerin çimento ile iyileştirilerek laboratuvar numuneleri ile elde edilmiştir. Verilerde belirli bir dağılım olmasına rağmen genel yaklaşım, karışımın toplam su/çimento (w_T:c) oranının artması ile 28 günlük serbest basınç mukavemetinin azalmasıdır. Bu, betonun su/çimento (w:c) oranının artmasıyla mukavemetin azalması durumuna benzerdir fakat derin karıştırma için tipik toplam su/çimento oranı (w_T:c) , çimento için tipik su/çimento oranından (w:c) çok daha fazladır (Bruce ve diğ., 2013).



Şekil 2.11: Laboratuvarda karıştırılmış ve test edilmiş numuneler için serbest basınç dayanımının toplam su/çimento oranıyla karşılaştırılması (Jacobson ve diğ., 2003 ; Mura ve diğ., 2002 ; Horpibulsuk ve diğ., 2003 ; Lorenzo ve Begado, 2006 ; Hodges ve diğ., 2008).

Kür süresinin etkisi, karışımın mukavemetini artırmada önemlidir. Araştırmacılar tarafından incelenen verilere dayanarak, denklem (2.1)'deki eşitlik bazı yüksek organik zeminler hariç çimentolu ve çimento cüruflu iyileştirmeler için zamanla artan bir mukavemet değeri sağlamaktadır.

$$f_c = 0.187ln(t)+0.375 \quad (2.1)$$

Burada t kür süresini gün bazında temsil ederken, f_c ise t zamanındaki serbest basınç mukavemetinin 28 günlük serbest basınç mukavemetine oranıdır, kür faktörü olarak adlandırılır ve ($q_{u(t)}/q_{u(28)}$) şeklinde ifade edilir.

Taban zemininin tipine, bağlayıcının tipine ve miktarına bağlı olarak düşük su/bağlayıcı (w:b) değerlerinde uygulanması durumunda kumlu zeminler ıslak karıştırma yöntemi yüksek mukavemet değerleri kazanır. Laboratuvarda karıştırılarak hazırlanmış zemin numunelerinin serbest basınç mukavametleri kuru karıştırma yöntemi için 2 ila 400 psi (0.01 ila 2.8 MPa) ve ıslak karıştırma yöntemi için 20 ila 4000 psi (0.1 ila 28 MPa) arasında olduğu rapor edilmiştir (Japanese Geotechnical Society, 2000 ; Jacobson ve diğ., 2003; Baker, 2000).

Laboratuvarda karıştırılmış malzemenin mukavemeti aynı karışım oranındaki arazide karıştırılmış malzemenin mukavemetinden daha büyük olabilir. Arazideki kür süresi ve etkileri; laboratuvarda hazırlanmış ve kürlenmiş numunelerle karşılaştırılınca arazidekilerin mukavemeti daha düşük olabilmektedir (Bruce ve diğ., 2013). Arazide karıştırılmış olan zeminin mukavemetinin, laboratuvarda karıştırılan zeminin mukavemetinin yüzde 20 ila 50'si olabileceği EuroSoilStab (2002) tarafından belirtilmiştir. CDIT'ye (Coastal Development Institute of Technology, 2002) göre arazide karıştırılmış malzemenin mukavemeti, laboratuvarda karıştırılmış olan numune mukavemetinin yüzde 20 ila 100'ü olabilmektedir. Asıl yüzde değeri karıştırma ekipmanının tipine ve işleyişine, zemin tipine, arazi kür koşullarına ve laboratuvar numunelerini hazırlamak için kullanılan prosedürlere bağlıdır. Amerika Birleşik Devletler'deki yaygın bir beklenti, arazide karıştırılmış olan malzemenin mukavemetinin laboratuvarda karıştırılmış olanınkinin en az yüzde 50'sine ulaşabilmesidir. Bu yüzden arazide ve laboratuvarda karıştırılmış malzemelerin mukavemetleri arasındaki ilişkiyi tahmin ederken mühendisler benzer zemin koşullarındaki benzer projelere ait daha önceki deneyimleri dikkate almalıdır (Bruce ve diğ., 2013).

Derin karıştırılmış zeminlerin mukavemeti yüksek değişkenliğe sahip olabilir. Amerika Birleşik Devletler'de yapılan bir çalışmada 10 derin karıştırma projesinden ve 14 veri setinden alınan 7873 serbest basınç mukavemeti deneyleri üzerinden istatiksel analiz yapılmış ve değişim katsayısının ortalama olarak 0.56 olduğu ve 0.34-0.79 aralığında değiştiği bulunmuştur. Uluslararası projelerden toplanan veriler de benzer sonuçları göstermişlerdir. Bir karşılaştırma yapıldığında, doğal olarak oluşan kil depozitlerinin drenajsız kesme mukavemetlerinin değişim katsayısı değerlerinin 0.13 ila 0.40 aralığında olduğu sonucuna varılmıştır. Bu değerler göstermektedir derin karıştırılmış zeminin mukavemetinin değişkenliğinin doğal killerin mukavemetinden iki kat daha yüksek olduğunu göstermektedir. Derin karıştırılmış zeminin nispeten yüksek değişkenliği, uygun tasarım mukavemetlerinin seçimi aşamasında önemli bir etkendir (Bruce ve diğ., 2013).

Bir mukavemet değeri aralığı elde etmek için aşağıdaki adımları önerilmektedir (Bruce ve diğ., 2013):

Adım 1: İyileştirilecek her bir tabaka için temsili su muhtevası ve organik içerik değerlerinin saptanması.

Adım 2: Bağlayıcı faktörlerinin gerçekçi aralığının tahmin edilmesi.

Adım 3: Her tabaka için elde edilebilecek serbest basınç mukavemeti aralığını tahmin etmek için toplam su-çimento oranına karşı serbest basınç mukavemeti grafiğinin kullanılması.

Adım 4: İyileştirilecek her bir tabakadaki zemin numunelerine Adım 2'de elde edilen bağlayıcı miktarı aralığının uygulanması ile bir laboratuvar testinin yürütülmesi.

Adım 5: Adım 3 ve 4'ten elde edilen serbest basınç mukavemeti aralıklarının karşılaştırılması. Adım 4'teki değerlerin bazı projeler için daha güvenilir olacağı düşünülmektedir çünkü araziye özel zeminleri içermektedirler fakat sonuçları korelasyonlarla Adım 3'ten elde edilen değerler ile karşılaştırmak mantıklıdır. Kuru karıştırma için serbest basınç mukavemeti değerleri, bağlayıcı tipi ve bağlayıcı faktörünün bir fonksiyonu olarak elde edilir. Islak karıştırma için serbest basınç mukavemeti değerleri ayrıca su-çimento bulamacındaki karışıma eklenen su miktarına da bağlıdır. Bu yüzden bulamacın su-bağlayıcı oranı ve hacim oranı, ıslak karıştırma için uygulanan laboratuvar testleri için kaydedilir.

Adım 6: Aynı karışım oranlarındaki arazide karıştırılmış ve kürlenmiş malzeme mukavemetinin, laboratuvarda karıştırılmış ve kürlenmiş malzeme mukavemetine oranının tahmin edilmesi. Bu oranın ortalama değeri 0.5'tir fakat iyileştirilecek zemine ve uygulanacak karıştırma işlemine göre farklılık gösterebilir. Mühendisin, bu oranın uygun değerlerine ilişkin DMM tecrübesine sahip mühendislere ve uygulamacılara danışması önerilmektedir.

2.1.5.2. Elastisite Modülü (Young Modülü)

İyileştirilmiş zeminin Young modül değerleri derin karıştırılmış bölgelerde oluşacak olan oturmaları ve gerilme paylaşımlarını hesaplamak için kullanılır. E_{50} değerinin, DMM uygulanan zeminlerin serbest basınç mukavemetleriyle (q_u) ilişkili olduğu bilinmektedir. Kuru karıştırma yönteminde, E_{50}'nin q_u 'ya oranının 50 ila 250 aralığında olduğu belirtilmektedir (Baker, 2000; Broms, 2003; Jaconson ve diğ., 2005). Islak karıştırma yönteminde ise bu aralığın 75 ila 1000 arasında olduğu verilmektedir (Our ve diğ., 1996). Islak DMM kolonlarından alınan ve 2672 adet serbest basınç mukavemeti testlerinin yapıldığı bir çalışmada (Navin ve Filz, 2006), E_{50}'nin q_u'ya oranının yaklaşık olarak 300 olduğu gösterilmiştir.

Literatürde kuru karıştırma için E_{50}, q_u 'nun 150 katı ve ıslak karıştırma için E_{50}, q_u'nun 300 katı olarak verilmektedir (Federal Highway Administration Design Manual, 2013).

Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa (2005), organik zeminlerde iki farklı numune boyutlarında yapmış oldukları laboratuvar çalışmaları sonucunda Elastisite modülünün numune boyutu ile birlikte farklılık gösterdiğini gözlemlemişlerdir. 50mm x 100mm numuneler için serbest basınç mukavemeti (q_u) fonksiyonu olarak Elastisite modülünün lineer artışı fark edilebilir bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu boyutlardaki numuneler üzerinde yapılan deneyler ile E (kPa) = $74q_u$ (kPa) sonucuna varılmıştır. 100mm x 100mm numuneler için ise E-q_u arasındaki ilişkinin sadece serbest basınç mukavemetinin (q_u) 1000 kPa civarındaki değerleri için lineer olduğu sonucuna ve E (kPa) = $42q_u$ (kPa) eşitliğine ulaşılmıştır. 1000 kPa'ın üzerindeki q_u değerleri için Elastisite modülü sabittir ve bunun sonucu olarak q_u'nun artması ile E ilişkisizdir.

2.1.5.3. Poisson Oranı

Poisson oranı, nümerik analizlerin kullanımında gereklidir. CDIT (2002) ve Terashi (2003)'ye göre derin karıştırılmış zeminlerin Poisson oranı, serbest basınç mukavemeti ne olursa olsun 0.25 ila 0.50 arasındadır. Kuru çimento ile stabilize edilen turbalar için Hebib ve Farrell (2003), Poisson oranını yüzde birden az gerilmeler için 0.1 olarak belirlemişlerdir. McGuinn ve O'Rourke (2003), kendi nümerik analizlerinde Poisson oranını 0.25 olarak kullanmışlardır. Porbaha ve diğ. (2005), ıslak derin karıştırma yöntemi kullanılarak elde edilen malzemenin küçük gerilme değerleri için Poisson oranını 0.3 ila 0.4 arasında belirlemişlerdir.

2.1.5.4. Permeabilite (Hidrolik Geçirgenlik)

Kuru karıştırma için EuroSoilStab (2002), kuru kireç ve çimento ile iyileştirilen killi zeminin permeabiltesinin, stabile edilmemiş zeminin permeabiltesinin 200 ila 600 katı olarak varsayılabileceğini belirtmektedir. Baker (2000) 'ın uyguladığı arazi testleri kuru karıştırılmış kolonların permeabilitesinin, iyileştirilmemiş killi zeminin permabilitesinin 10 ila 100 katı olduğunu göstermiştir.

Kumlu zeminlerde uygulanan ıslak derin karıştırma yöntemi için, $4.72*10^{-4}$'ten $4.72*10^{-5}$ ft/güne kadar düşük (10^{-5} 'den 10^{-6}'ya) permeabilite değerleri elde edilebilir. Bağlayıcı faktörününün artması ve bentonit eklenmesi, ıslak yöntem ile oluşturulan karışımlar için

permeabiliteyi azaltırIslak yöntem ile oluşturulan derin karıştırılmış kolonların, düşey dren olarak çalışabilecekleri düşünülmemektedir (Broms, 1999).

2.1.5.5. Birim Ağırlık

Kuru karıştırma yöntemi için yüksek su muhtevası ile stabilize edilmiş organik zeminlerin birim ağırlığının, iyileştirilmemiş zeminin birim ağırlığından daha büyük olduğu ve çimento ve kireç içeriğinin artırılması ile birim ağırlığın daha da arttığı Broms (2003) tarafından rapor etmiştir. Ancak Broms (2003) inorganik zeminlerin birim ağırlığının kuru karıştırma yöntemi ile yapılan stabilizasyon sonucu sıklıkla azaldığını da belirtmiştir. CDIT (2002), kuru derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen zeminler için iyileştirilen zeminin toplam birim ağırlığının iyileştirilmemiş zemine göre yüzde 3 ila 15 oranında arttığını rapor etmektedir.

2.2. MEVCUT STANDARTLAR VE ŞARTNAMELER

2.2.1. İsveç Geoteknik Topluluğu, Kireç ve Kireç-Çimento Kolonları (1997)

Bu alt başlık içerisinde derin karıştırma yönteminin Japonya'dan sonra ilk olarak uygulanmaya başladığı ve geliştiği ülke olan İsveç'te 1997 yılında İsveç Geoteknik Topluluğu tarafından Kireç ve Kireç-Çimento Kolonları; Proje Planlama, İnşaat ve Denetleme İçin Rehber adındaki dokümanda konuya dair izlenmesi gereken yollar, tavsiyeler ve tasarımın nasıl yapılması gerektiği hakkındaki konular yer almaktadır.

Bu bilgiler doğrultusunda ülkemize dair hazırlanabilecek olan bir DMM rehber kitabı/şartnamesi için tavsiyeler bir araya getirilmiştir.

İsveç Geoteknik Topluluğu ilk olarak kısaca arazi uygulamalarına dair örneklerden bahsetmektedir. Yumuşak ya da organik killerdeki kara yolu ve demir yolu inşaları spesifik problemler içermektedir. Bunların en önemlisi düşey ve yatay deformasyonlardır. Kireç ve kireç-çimento kolonları kullanılarak zeminin mukavemet ve deformasyon özellikleri iyileştirilebilmektedir. Ayrıca DMM kolonlarının bir dren olarak da davranabildiği ve böylelikle oturma sürecinin hızlandığı belirtilmektedir.

Kireç ve kireç-çimento kolonlara dair bu dokümanda yer alan diğer bir konu ise kolonların güçlendirilmesine dair gereksinimlerdir. Servis ömrü, nihai limit durumdaki gereksinimler ve işletilebilirlik limit durumlarındaki gereksinimler hakkında bilgiler yer almaktadır.

Daha sonra tasarım varsayımları hakkında kapsamlı bilgi verilmektedir. İlk olarak geoteknik sınıflandırmadan bahsedilmiş ardından geoteknik araştırma konusu detaylandırılmıştır. DMM uygulaması için yükler dikkate alınmıştır. Arazi ve laboratuvar incelemelerinde şu bilgiler dikkate alınmalıdır (İsveç Geoteknik Topluluğu, 1997):

- Zemin profili ve yer altı suyu koşulları.
- Kaba çakıl ya da iri kaya parçaları, yapışık katmanlar ya da uygulamada zorluğa sebep olabilecek, özel metot ya da gereçler gerektirebilecek alt tabakalarda yatan kayaların varlığı.
- Şişen zemin (montmorilonit) varlığı.
- Kireç ya da kireç-çimento karıştırıldıktan sonraki zeminin özellikleri.
- Zemin içerisindeki organik zemin ve sülfür varlığı.
- Yüzey tabakasının bileşimi, sıkılık ve sertliği; herhangi bir ağaç kökü, dolgu vb. varlığı.
- Kolon yerleşimine engellerin varlığı (gömülü borular, kablolar ve havai hatlar gibi).

Önemli konu başlıklarından birisi olan malzeme özelliklerinde ise; zeminin mukavemeti ve deformasyon özelliklerinden, kireç ve kireç-çimentolu kolonların birim ağırlığından, kireç ve kireç-çimento ile güçlendirilen zeminin özelliklerinden bahsedilmektedir. Bu dokümanda karakteristik sıkışma modülü değerinin kireç kolonlarında 50-100c_{uk} (c_{uk}:karakteristik drenajsız kayma mukavemeti) aralığında olduğu belirtilmektedir. Organik zeminler için bu değerin 50c_{uk} ve siltli killi zeminler için ise yaklaşık olarak 100c_{uk} değerinde olduğu belirtilmektedir.

Tasarım değerleri konusunda da zeminin birim ağırlığı, mukavemeti ve deformasyon özellikleri yer almaktadır. Daha sonraki bölümlerde karışım denemeleri, kür sıcaklığı, kayma mukavemeti ve Elastisite modülünü içeren laboratuvar deneyleri hakkında bilgiler bulunmaktadır.

Tasarım aşamasında ise öncellikle nihai limit durumdaki tasarımdan bahsedilmektedir. Dolgular için güçlendirmede, dolgu altındaki yumuşak killerde kolon güçlendirmesinde trafik yükü de dahil 150-170 kPa yükün genel olarak kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir. Dolgulardaki güçlendirmeler için aşağıdaki hesaplamalar her zaman yapılmalıdır (İsveç Geoteknik Topluluğu, 1997):

- Planlanan dolgu için güvenlik sayısı (kolon güçlendirmesi olmadan).

- Maksimum izin verilebilir yük artışları/seviye farklılıkları ve şev eğimi kontrolleri ile yük uygulaması esnasındaki güvenlik sayısı
- Geçici sürşarj, geçici depolama arazilerine ilişkin sınırlamalar, inşaat trafiği vb. inşaat aşamaları esnasında kolon güçlendirilmiş dolgular için güvenlik sayısı
- Trafik yükü ile beraber tamamlanmış dolgu için servis ömrü boyunca güvenlik sayısı

Daha sonraki bölümde kolon uygulamalarından (tekil kolonda kare ve üçgen dağılımı, ızgara ve blok dağılımı) bahsedilmiştir.

Tasarım aşamasında nihai limit durumlardaki tasarımda radye temeller için güçlendirme hakkında bilgi verildikten sonra kazılar ve hafriyatlar için güçlendirme hakkında bilgiler yer almaktadır. Bu dokümana göre, bu gibi durumlarda kolonlar her zaman plaka, ızgara ya da blok düzeninde imal edilmelidirler. Tasarım aşamasında şunlar dikkate alınmalıdır (İsveç Geoteknik Topluluğu, 1997):

- Yer altı su seviyesini alçaltma durumu
- Drenajlı ve drenajsız durumlar için analiz.
- Kolon güçlendirmesinin yakınında ya da içerisinde oluşabilecek kayma yüzeyi göçmelerine sebep olabilecek su basıncı varlığı

Tasarım aşamasında işletilebilirlik limit durumundaki tasarımdan bahsedilirken öncelikle hesaplama modeli dikkate alınmıştır. İyileştirilmiş zeminin oturmasını etkileyebilecek faktörler şu şekilde sıralanmaktadır (İsveç Geoteknik Topluluğu, 1997):

- Kolonların sıkışma modülünün stabilize olmayan kilinkine oranı.
- Kolon alanının stabilize yüzeyine oranı.
- Kilin konsolidasyon özellikleri.
- Kolonların akma yükü.
- Kolon imalatına ilişkin yük uygulamaları süresi.
- Stabilize olmayan zemindeki ve kolonlardaki permeabilite değerleri.

Daha sonraki bölümlerde yük dağılımı, oturma hesabı ve oturma oranı hakkında bilgi verilmektedir. Ardından stabilizörler hakkında bilgi verilmiştir. Bunların birleşimi ve farklı

zeminlerdeki stabilizör seçimi anlatılmıştır. Burada turba, tortul organik zemin, tortul organik zemin içeren kil, sülfat içeren kil, siltli kil, silt ve sülfat içeren silt anlatılmıştır.

Proje planlaması için tavsiyeler kısmında ise şartnameler, karışım miktarları vb. yer almaktadır.

İnşaat aşamasına gelindiğinde ise kullanılacak ekipman, kolonların imalatı, dizilim ve çevresel etkiler ile ilgili bilgiler bulunmaktadır.

Denetleme yapılırken ise her kolon için şunlar belirtilmelidir (İsveç Geoteknik Topluluğu, 1997):

- İnşaat tarihi.
- Çizimlere göre kolon tayini.
- Makine, karıştırma aracı vb.
- Kolon imalatı sırası.
- Stabilizörlerin karışım miktarlarının ölçülmesi. Her bağlayıcı ayrı olarak ölçülmelidir ve belirtilmiş toleranslar ve nominal miktarlar okunabilir olmalıdır.
- Karıştırma aracının tipi, ileri birim devrim, besleme basıncı, dönme hızı vb. kolon özelliklerini etkileyebilecek diğer faktörler.

İsveç Geoteknik Topluluğu'nun yayınladığı bu dokümanda kontrol aşamalarına geçmeden önce kolonların belirli gereksinimleri sağlamadığı durumlarda uygulanacak adımlar yer almaktadır. İlave kontrolde ise oturmaların gözetimi, hareketler ve boşluk basınçlarındaki kontroller, kolonların sürekliliği ve mukavemetlerinin kontrolü hakkında bilgi verilmektedir.

2.2.2. ABD Federal Karayolu İdaresi Tasarım Kılavuzu, Dolgu ve Temel Desteği İçin Derin Karıştırma (2013)

Bu bölümde, faydalanılabilecek mevcut standart ve şartnamelerin bir diğeri olan dolguları ve ulaştırma uygulamalarındaki yapıları desteklemekte kullanılan Federal Highway Administration Design Manual'e göre dolgu ve temel destekleri için derin karıştırma yöntemine dair mevcut standart yer almaktadır. Ulaştırma dolgularındaki destekler için adım adım analizler ve tasarım prosedürlerinin bazılarından özetle bahsedilmektedir.

Dolguların desteklenmesinde derin karıştırma yöntemi, izin verilebilir tasarım metodolojisinin kullanımıyla hazırlanmıştır. Tasarım aşamasında takip edilecek adımlar şunlardır (Bruce ve diğ., 2013):

1. Proje ihtiyaçlarının saptanması.
2. Temsili yer altı koşullarının saptanması.
3. Deneme derin karıştırılmış zemin özellikleri değerlerinin saptanması.
4. Genel yerleşim ve tanımları, merkezi yer değiştirme oranını, kesme duvar bölgesinin yer değiştirme oranını içeren deneme derin karıştırılmış geometrinin saptanması.
5. Oturmaların ölçülmesi.
6. Şev stabilitesini de içeren stabilitenin, bileşik devirme ve taşıma kapasitesinin, dış topukta derin karıştırılmış kesme duvarların ezilmesinin, derin karıştırılmış kesme duvarlarındaki düşey kesitlerdeki kesmenin saptanması.
7. Planların ve şartnamelerin hazırlanması.

2.2.2.1. Adım 1 – Proje İhtiyaçlarının Saptanması

Aşağıdaki bilgiler proje ihtiyaçları için gereklidir (Bruce ve diğ., 2013):

- Dolgu geometrisi (yerleşim, yükseklik, tepe genişliği ve yan şevler).
- Trafik sürşarj yüklemesi.
- Performans kriterleri (güvenlik katsayısı ve izin verilebilir oturma).

Tablo 2.2'de DMM kolonlarında desteklenmiş ulaştırma dolguları için güvenlik faktörlerinin tipik tasarım değerleri verilmektedir. Tekrarlayan analizler ile, hesaplanan güvenlik faktörü değerinin tasarım değerine eşit veya bu değerden büyük olması için kesme kuvveti ve derin karıştırılmış malzemenin geometrisi uygun seçilmelidir (Federal Highway Administration Design Manual, 2013).

Tablo 2.2: DMM ile desteklenen dolguların tasarımı için tipik tasarım güvenlik katsayıları (Bruce ve diğ., 2013).

Sembol	Tanım	Minimum Tasarım Değerleri
F_{cc}	Derin karıştırma kolonlarla izole merkezin göçmeye karşı güvenlik katsayısı	1.3
F_s	Derin karıştırılmış bölge boyunca kayma ve genel stabiliteyi içeren, şev stabilitesi göçmesine karşı güvenlik katsayısı	1.5
F_o	Derin karıştırılmış perde duvarların devrilme ve taşıma kapasitesi göçmesine karşı güvenlik katsayısı	1.3
F_c	Derin karıştırılmış bölgenin ucunda derin karıştırılmış zeminin kırılmaya karşı güvenlik katsayısı	1.3
F_v	Derin karıştırılmış bölge boyunca düşey düzlem üzerinde kaymaya karşı güvenlik katsayısı	1.3
F_e	Derin karıştırılmış perde duvar boyunca zemin çekmesine karşı güvenlik katsayısı	1.3

2.2.2.2. Adım 2 – Temsili Yer Altı Koşullarının Saptanması

Bir mühendis statigrafi (katman bilgisi), yer altı suyu koşulları ve temel malzemesi özelliklerinin değerlerini içeren geoteknik analizler ve tasarımlarda kullanmak üzere zemin malzemesi özelliklerini saptamalıdır. Adım 5'te tanımlanan oturma hesapları için sıkışma indisi, yeniden sıkışma indisi ve ön konsolidasyon basıncı değerleri derin karıştırılmış bölgenin altında kalan zemin için gereklidir. Adım 6'da tanımlanmış şev stabilitesi analizleri için ise inşa sonu koşulları tipik olarak kritiktir, bu yüzden drenajsız kayma mukavemeti parametreleri doygun killer için gereklidir ve drenajlı mukavemet parametreleri ise geçirgen kumlar ve çakıllar için kullanılmaktadır (Bruce ve diğ., 2013).

2.2.2.3. Adım 3 – Deneme Derin Karıştırılmış Zemin Özellikleri Değerlerinin Saptanması

Derin karıştırılmış zeminin kayma mukavemeti tasarım değeri (s_{dm}), kür faktörü (f_c) ve büyük birim deformasyonlardaki mukavemet katsayısı (f_r) arasındaki farklar dikkate alınarak spesifik serbest basınç mukavemeti,$q_{dm,\ spec}$ ile elde edilir. Bu denklem (2.2)'de verilmiştir (Bruce ve diğ., 2013):

$$s_{dm} = \frac{1}{2} f_r f_c q_{dm,spec} \tag{2.2}$$

$q_{dm,\ spec}$ aralığının tipik değerleri yumuşak zemin durumları için 75 ila 150 psi (52 ila 103 kPa)'dır. f_r değerleri tipik olarak 0.65 ila 0.9 aralığındadır ve 0.8'e eşit f_r değeri ulaştırma dolgularının uygulamaları için önerilmektedir. f_c ise n dolgu yüksekliğinin yüzde 75'inin uygulanmasına kadar geçen süre kullanılarak belirlenir ve $f_c = 0.187ln(t)+0.375$ formülü ile hesaplanır. f_c değeri 28 günden 365 güne 1.00'den 1.48'e kadar değişmektedir.

Derin karıştırma yönteminin Elastisite modülü, E_{dm} , ıslak karıştırma yöntemi için denklem (2.3) ve kuru karıştırma yöntemi için ise denklem (2.4) kullanılarak hesaplanır (Bruce ve diğ., 2013):

$$E_{dm} = 300q_{dm,spec} \tag{2.3}$$

$$E_{dm} = 150q_{dm,\ spec} \tag{2.4}$$

2.2.2.4. Adım 4 – Deneme Derin Karıştırılmış Geometrinin Saptanması

Bir dolgunun merkez kısmının altındaki alan yer değiştirme oranı, $a_{s,merkez}$, kolon alanının bu kolonu çevreleyen zemin alanına oranı olarak nitelendirilmektedir ve denklem (2.5) ile hesaplanmaktadır. Denklem içerisindeki s_{merkez} , kolonların merkezden merkeze uzaklıklarını temsil etmektedir. Dolguların derin karıştırma destekleri için tipik $a_{s,merkez}$ değerleri yaklaşık 0.2 ila 0.4 arasındadır (Bruce ve diğ., 2013).

$$a_{s,merkez} = \frac{\square\square^2}{4(\square_{\square\square\square\square\square})^2} \tag{2.5}$$

2.2.2.5. Adım 5 – Oturmaların Ölçülmesi

Bu adımda dolgunun inşa sonrası oturması, derin karıştırılmış bölgenin sıkışmasının toplamı ve alt katmandaki zemin sıkışması olarak hesaplanır. Derin karıştırılmış bölgenin sıkışması, derin karıştırılmış bölgedeki ve dolgunun merkez kısmının altındaki derin karıştırılmış bölge içerisindeki komşu iyileştirilmemiş zemindeki eş gerilmelere bağlı olarak hesaplanır. Bu yaklaşım, derin karıştırılmış zeminin ve komşu zeminin bir kompozit modülünün kullanımına eşdeğerdir. Kompozit modül, M_{comp} , denklem (2.6) kullanılarak elde edilebilir:

$$M_{comp} = a_{s,merkez}E_{dm} + (1-a_{s,merkez})M_{zemin} \tag{2.6}$$

Burada M_{zemin} , iyileştirilmemiş zeminin oödometre modülüdür. M_{zemin} , iyileştirilmemiş zeminde ilgili basınç aralığında bir oödometre testinden elde edilen sıkıştırılabilirliğin, m_v , tersidir (Federal Highway Administration Design Manual, 2013).

2.2.2.6. Adım 6 – Stabilitenin Ölçülmesi

Örnek bir stabilite analizi şunları içermektedir: Şev stabilitesi analizi, devrilme ve taşıma kapasitesi analizi, duvarların dış topuklarında kesme duvarlarının basınç analizi, kesme duvarlarında düşey düzlemlerde kesme analizi ve kesme duvarları arasındaki yumuşak zeminin analizi.

Şev stabilitesi analizleri kritik göçme yüzeyini ve güvenlik sayısını belirlemede uygulanır. Hesaplanan F_s değeri Tablo 2.2'deki tasarım değerleri ile karşılaştırılmalıdır. Eğer F_s değeri çok küçük ise ve kritik göçme yüzeyi derin karıştırılmış kesme duvarının altından geçiyorsa, derin karıştırılmış kesme duvarı bölgesinin geometrisi F_s değerini arttırmak için değiştirilmelidir. Bu genellikle derin karıştırılmış kesme duvarı bölgesinin derinliğini veya genişliğini artırarak elde edilir. Eğer F_s değeri çok küçük ise ve kritik göçme yüzeyi derin karıştırılmış kesme duvarının içinden geçiyorsa; derin karıştırılmış zeminin dayanımında, alan yer değiştirme oranında, ve/veya derin karıştırılmış kesme duvarı bölgesinin genişliğinde artırmalar yapılabilir. Eğer F_s değeri çok küçük ise ve kritik göçme yüzeyi derin karıştırılmış kesme duvarının üstünden geçiyorsa, o zaman dolgu şevi düzleştirilebilir, daha güçlü bir dolgu malzemesi kullanılabilir ve/veya dolgu geosentetikler ile güçlendirilebilir.

Dış topukta derin karıştırılmış kesme duvarlarının basınç analizinde ise F_c tasarım faktörü Tablo 2.2'ye bağlı olarak seçilmelidir. (Federal Highway Administration Design Manual, 2013).

2.2.2.7. Adım 7 – Planların ve Şartnamelerin Hazırlanması

Adımlar 1-6'daki final tasarım sonuçlarına göre proje planları ve şartnameleri oluşturulur.

2.2.3. TS EN 14679, Özel Jeoteknik Uygulamalar, Derin Karıştırma (2006)

Mevcut standartlar ve şartnameler konu başlığı altında incelenen bir diğer doküman ise Avrupa Standardı'ndan (EuroSoilStab, 2002) faydalanılmış olan TS EN 14679'dur. Bu dokümana göre derin karıştırma projelerinin uygulaması birkaç aşamada geoteknik tasarımı içermektedir. Tasarımın amacı güvenliği, işletilebilirliği, ekonomiyi ve devamlılığı göz önüne alarak ve

beklenen servis ömrünü de hesaba katarak inşa edilecek işlere olanak sağlayan teknik belgeleri hazırlamaktır. Tasarımdan sorumlu tarafların ayrıca inşa aşamasına da dahil olması tavsiye edilmektedir.

Tasarım aşamasında yükleme durumları, iklimsel etkiler, hidrolik durumlar ve kabul edilebilir oturma sınırları, kabarma, derin karıştırma işleri tarafından etkilenebilecek yapılarda distorsiyon/bozulma hesaba katılmalıdır. Tasarım; ses, titreşim, hava ve su kirliliği ve komşu yapılardaki etki gibi inşaattaki çevresel sınırlamaları belirlemeli ve dikkate almalıdır.

Sahanın hazırlanması aşamasına gelindiğinde hazırlıklar, tasarım şartnameleri ve belirli çevresel saha koşullarının uygunluğunda yürütülmelidir. Bu hazırlıklar; tesis ve makinelere uygun ulaşımı, kazı, temizlik ve çalışma platformunun tesviyesini, ekipman için yeterli zemin taşıma kapasitesinin sağlanmasını ve kalite kontrolünü içermelidir.

Uygulama aşamasına gelindiğinde ise TS EN 14679'da kuru ve ıslak karıştırma yöntemleri için belirli aşamaların takip edilmesi gerektiği hakkında bilgiler verilmiştir.

Kuru karıştırmanın yönteminin uygulama süreci, tasarımda verilen şu aşamalar ile takip edilmelidir (TS_EN_14679, 2006):

- Karıştırma aleti doğru bir şekilde konumlandırılır,
- Karıştırma şaftı belirlenmiş uygulama derinliğine nüfuz eder,
- Belirlenmiş derinliğe ulaşıldıktan sonra şaft geri çekilir, aynı zamanda bağlayıcı malzeme granüler ya da toz formunda zemine enjekte edilir ve yatay düzlemde dönen karıştırma aleti zemini ve bağlayıcıyı karıştırır.

Kuru karıştırma yönteminde bağlayıcı malzeme ayrıca penetrasyon aşamasında da enjekte edilebilir ve zeminle karıştırılabilir. Ekipman ve karıştırma aletleri; uygulama prosedürü, iyileştirilecek zeminin derinliği ve tasarımdaki belirlenmiş toleranslara uygun olmayabilir. Penatrasyon aşamasında bağlayıcı enjekte edilip zeminle karıştırıldığında, enjeksiyon çıktısı karıştırma aletinde ya da altında konumlanmalıdır. Dönen birimlerin dönme hızı, penetrasyon oranı, ve karıştırma aletinin geri çekimi yeterli homojen iyileştirilmiş zeminin elde edilmesi için ayarlanmış olmalıdır. Karıştırma şaftının mevcut penetrasyon ya da geri çekim oranları genellikle 10 mm/rev ila 50 mm/rev arasındadır ve Bıçak Dönme Sayısı (BNR) genellikle 200 ila 500 arasındadır. Bir kuru karıştırma kolonunun imalatındaki karışım işinin miktarı, bağlayıcı

tipi ve miktarına, zemin tipine bağlıdır. Bağlayıcı olarak sadece çimento kullanımı, sadece kirecin kullanımından daha yüksek bir karıştırma enerjisi gerektirmektedir. Kuru karıştırmada hava basıncı karıştırma işlemi süresince olabildiğince düşük tutulmalıdır. Ancak hava basıncı çok düşükse bağlayıcı, kolonun tüm ara kesit alanına yayılmayabilir. Bağlayıcı ve hava basıncı miktarı, kolonların imalatı boyunca gözlemlenmelidir. Üniform iyileştirilmiş zemin elde etmek için karıştırma enerjisi gözlemlenmelidir.

Islak karıştırma uygulamasında tasarımda verilen şu aşamalar dikkate alınmalıdır (TS_EN_14679, 2006):

- Karıştırma aleti doğru bir şekilde konumlandırılır.
- Karıştırma şaftı enjeksiyon ile zeminin belirlenmiş uygulama derinliğine nüfuz eder.
- Belirlenmiş derinliğe ulaşıldıktan sonra, şaft geri çekilir ve bazı durumlarda karışım aynı zamanda enjekte edilir ve karıştırılır.

Islak karıştırma yönteminde ekipman ve karıştırma aletleri; uygulama prosedürü, iyileştirilecek zeminin derinliği ve tasarımdaki belirlenmiş toleranslara uygun olmalıdır. Nozzle'ları karıştırma aletinin altında olan makineler için sulu harç geri çekim aşaması boyunca eklenmez. Ağırlıklı olarak granüler zeminler için bir kesintisiz hareketli auger yeterli olduğu halde, kohezyonlu zeminler daha komplike karıştırma araçları gerektirmektedir. Şaftı döndüren dönme araçları tam karışım için zemin tabanını karıştırmada yeterli güce sahip olması gerekir. Dönen birimlerin açısal hızı, penetrasyon oranı ve karıştırma aletinin geri çekimi yeterli homojen iyileştirilmiş zeminin elde edilmesi için ayarlanmış olmalıdır. Karıştırma bıçaklarının mevcut açısal hızı genellikle 25 ila 50 rev./dk'dır ve Bıçak Dönme Sayısı genellikle 350'den fazladır. Karıştırma sırasınca sulu harç, iyileştirilecek zemine kesintisiz akış içerisinde pompalama ile ulaştırılmalıdır. Geri çekme işlemi sırasında sulu harç iyileştirilen kolonun belirli bir kısmına yeniden dağıtmak için, delmedeki zemin katmanının bir kısmının tekrar akışkanlaştırılması için ya da tutma veya bekleme periotlarında dönen birimlerin harekette tutulması için kullanılabilir. Sulu harcın yoğunluğu, her bir karıştırma tesisinde her çalışma vardiyasında en az iki kez olmak üzere uygun araçlar ile test edilmelidir.

Bu dokümanda uygulama aşamalarından sonra denetim, test ve gözetim başlığı altında doğrulama, kontrol ve kabul için belirli prosedürler hakkında bilgiler yer almaktadır. Denetim aşamasında inşaatın tasarımla ve diğer sözleşme belgeleriyle uygunluğunu kontrolünü

sağlamak için işin uygulamasından, ilgili teknikte tecrübeli kalifiye personel sorumlu olması gerektiği gibi konulara dikkat çekilirken, test aşamasında test metotlarının kapsamı uygulamaya ve fonksiyonel gereksinimlere bağlı olduğu söylenmiştir. İyileştirilen zeminin performans testlerinin uygun metotlarına dair rehber (örn. Serbest basınç deneyleri, üç eksenli deneyler, odömetre deneyleri, kolon penetrasyon testleri, ters kolon penetrasyon testleri, CPTU testleri, presiyometre deneyleri, sismik deneyler) sunulmuştur. Son olarak gözetim aşamasında ise takip eden inşa parametrelerinin ve bilgilerin, uygulama esnasında sürekli olarak ya da her bir 0,5 m derinlik aralığında gözlemlenmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Bu yüksek lisans tezinin bu ana başlığında derin karıştırma yönteminin uygulanmasında uyulması gereken kurallar, farklı şartnameler ve/veya el kitaplarında bu yönteme başlamadan önce, uygulama esnasında ve sonrasında izlenmesi tavsiye edilen yollar, gerekli ölçümler vb. hakkındaki bilgiler birkaç farklı kaynaktan toplanmıştır ve henüz ülkemizde mevcut olmayan ve ileride hazırlanabilme potansiyeli olan bir DMM Türk şartnamesinin temellerini oluşturacak adımları ve kuralları içerebilecek tavsiyeler yer almaktadır.

Böylelikle derin karıştırma yöntemi öncesi gereksinimler, varsayımlar, testler ve yöntem esnasında uygulanacak tasarım koşulları, proje planlaması, denetleme, kalite kontrol vb. konulara dair genel bilgiler toparlanmış olacaktır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Derin karıştırma yönteminde bağlayıcı malzeme olarak daha çok çimento ve kireç kullanılmaktadır. Bunların yanında uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. malzemeler de bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilir.

Derin karıştırma ile iyileştirilen zeminlerin özellikleri; tabii zeminin ve bağlayıcıların özelliklerine, katkı miktarına ve kür süresine bağlıdır. Derin karıştırma ile iyileştirme yapılan tasarımlarda kalite kontrol deneylerinde serbest basınç mukavemet değerleri ölçülmekte ve deformasyonların tayini için gereken modül değerlerine korelasyonlar yardımı ile geçilmektedir. Bu yüksek lisans tezi kapsamında literatürde mevcut olan çalışmalar incelenmiş ve derin karıştırma ile elde edilen malzemelerin mukavemet-modül değerleri bir veri tabanına işlenmiştir. Bu kapsamda 12 ayrı çalışmadan toplamda 545 adet veri toplanmıştır. Oluşturulan veri tabanı; zemin tipi, katkı tipi ve miktarı, kür süresi, serbest basınç mukavemeti, Elasitisite modülü ve karıştırma metodu bilgilerini içermektedir. Bu veri tabanı kullanılarak yeni korelasyonlar aranmış ve mevcut korelasyonlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen korelasyonların ülkemizde son yıllarda çok yoğun kullanım alanı bulmakta olan derin karıştırma yöntemi için faydalı olacağı düşünülmektedir.

3.1. VERİ TABANI

Zemin tipi, katkı tipi ve miktarı, kür süresi, serbest basınç mukavemeti, Elastisite modülü ve karıştırma yöntemi gibi bilgileri içeren farklı çalışmalardan toplanan verilere ait bilgiler takip eden paragraflarda ve bu tezin ekler bölümünde sırası ile verilmiştir:

- Egorova ve diğ. (2017) çimento ile iyileştirilmiş derin karıştırma verisi sağlamaktadırlar. Bu çalışma kapsamındaki mühendislik uygulamasından seçilmiş örnekler, kontrol prosedürlerine dair tavsiyeler için temel oluşturmaktadırlar.

  Egorova ve diğ. (2017) çalışmalarında iki bağımsız analiz grubu oluşturmuşlardır. İlkinde yazarlar tarafından üstlenilen laboratuvar araştırmasından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İkinci kısımda ise özel bir şirket tarafından yürütülen arazi deneylerine dair sonuçlar yer almaktadır. Zemin-çimento numuneleri, ıslak derin karıştırma yönteminin uygulandığı bir şantiye alanından alınmıştır. Zemin-çimento ve zemin-çimento-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyi sonuçları

kullanılmıştır. Hem gerilme hem de deformasyon değerlerinin elde edilmesi ile birlikte lineer aralık için elastisite modülüne ulaşılmıştır. Laboratuvar deneylerine ilişkin ilk numune grubunda küp numuneler 7 ve 28 gün sonrasında test edilmiştir. İkinci grupta ise tüm numuneler 14 günlük kür süresi sonunda teste tabi tutulmuştur. İlgili çalışamaya ait gerekli tüm veriler *EK-1*'de sunulmuştur.

- Yenginar ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada enjeksiyon karışımına katılan uçucu kül ile süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, zeminin ilk su muhtevası değeri %15-27, uçucu kül miktarı %0-40, çimento miktarı %3-11, su/bağlayıcı oranı %0.5-1.25 ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin miktarı %0.5-2 arasında değişken olarak seçilmiştir.

  Her bir tasarım için çapı 5 cm ve boyu 10 cm olan tüpler içerisinde 7 ve 28 günlük kür sürelerinde serbest basınç deney numuneleri hazırlanmıştır. Deneyler sonucunda her bir tasarım için zeminin serbest basınç mukavemeti ve Elastisite modülü değerleri bulunmuştur. İstatiksel analizler sonucunda ise 7 gün kür süresi için %7 çimento, %10 uçucu kül ve %1.5 süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve %0.75 su/bağlayıcı oranında oluşturulan enjeksiyon malzemesi ile DMM kolonu performansının dayanım yönünden en uygun değeri elde ettiği gözlemlenmiştir. 28 gün kür süresi için ise optimum parametreler %7 çimento, %25 uçucu kül, %1.5 süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve %1 su/bağlayıcı olarak elde edilmiştir.

  Çalışmanın yapıldığı zeminde %27 oranında ince kum bulunurken, kalan kısmı ince danelidir. Zeminin likit limit değeri 23, plastik limit değeri 11 olup USCS'ye (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi) göre düşük plastisiteli silt (ML) sınıfındadır. Kullanılan uçucu külün tane dağılımı %16 kum ve %84 silt şeklindedir. İlgili çalışamaya ait gerekli tüm veriler *EK-2*'de sunulmuştur.

- Akçakal ve diğ. (2019) çalışmalarında Türkmenistan'ın Hazar Denizi kıyısında konumlanmış Türkmenbaşı Uluslararası Liman Projesi yapısının altında tasarlanan ve uygulanan derin karıştırılmış kolonları analiz etmişlerdir. Zemin profili genel olarak katılığının derinlikle beraber arttığı bir kil tabakasından oluşmaktadır. Çok yumuşak bir kil tabakası deniz yatağından 6 ve 10 metre arasındaki derinlikte bulunmaktadır. Kara tarafı için zemin profili kalınlığı 8.5 metre olan ve altında kil katmanlarının devam ettiği

bir dolgu tabakası olarak belirlenmiştir. Arazinin açık deniz kısmında genel olarak siltli kil katmanları ile karşılaşılmıştır. Maksimum derinliklerinin 15 metre olduğu toplamda 130.000 metre DMM kolonları imal edilmiştir. Derin karıştırılmış kolonların çapı ise 800 mm olarak tasarlanmıştır. Katkı tipi olarak çimento kullanılmıştır. İlgili çalışamaya ait gerekli tüm veriler *EK-3*'te sunulmuştur.

- Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa (2005) yapmış oldukları çalışmada, bir turba-çimento karışımı üzerinde deneyler yaparak serbest basınç mukavemeti ve tanjant modülü değerlerini elde etmişlerdir.

  Bağlayıcı olarak kullanılan çimento Portland çimentosudur. 100 ve 500 kg/m^3 aralığındaki 9 farklı çimento miktarı ile su muhtevası %210, %500 ve %1000 olan turba farklı harç oranları ile karıştırılmıştır. Bu çalışmada sadece serbest basınç mukavemeti testleri yürütülmüştür. İlgili çalışamaya ait gerekli tüm veriler *EK-4*'te sunulmuştur.

- Puppala ve diğ. (2007), DMM kolonlarının inşası için laboratuvar çalışmalarında kullanılan malzemeler, bağlayıcı ve su oranları ile çalışmışlardır. %25 oranında kireç ve %75 oranında çimento bileşiminden oluşan bağlayıcıyı tavsiye etmişlerdir. 200 kg/m^3 dozaj kullanılmıştır ve w/c oranı 1 olarak seçilmiştir. Uygulamanın yapıldığı zemin tipi kildir. İlgili çalışamaya ait gerekli tüm veriler *EK-5*'te sunulmuştur.

- Şengör (2011), araştırmasında iyileştirilmiş zeminlerde tek eksenli basınç deneyleri yaparak yumuşak killi zeminler için (Eymir gölü kili ve kaolen) etkili karışım oranları ve karışım tiplerini araştırmıştır. Katkı tipi olarak çimento, mermer tozu ve uçucu kül kullanılmıştır. 7, 28, 90 ve 365 günlük kür süreleri sonunda tek eksenli basınç dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca iyileştirilmiş zeminlerin elastisite modülü (E_{50}) / serbest basınç dayanımı (UCS) oranları da araştırılmıştır. Yumuşak killi zeminde derin karıştırılmış kolonlar ile iyileştirme yapıldıktan sonra büyük ölçekteki konsolidasyon deneyleri yürütülmüştür ve bu deneylerin sonuçlarına göre iyileştirilmiş yumuşak killi zeminin sıkışma özelliklerinin kolon parametrelerine, etkili alan oranı ve bağlayıcı miktarına bağlı olduğu öğrenilmiştir. Çimento miktarının en etkili parametre olduğu sonucuna varılmıştır. İlgili çalışmaya ait gerekli tüm veriler *EK-6*'da sunulmuştur.

- Löfroth (2005), çalışmasında İsveç'teki iki farklı araziye ait 10 yıllık kireç-çimento kolonları üzerinde çalışmıştır. Yazar çalışmasında özellikle kireç ve çimento ile iyileştirilen zeminin uzun süredeki dayanım artışı ve iyileştirilmiş zeminin çevre zemin üzerindeki etkisine dikkat etmiştir. Kesme mukavemeti karşılaştırmaları, imalattan kısa bir süre sonra kesme mukavemetinde bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Kildeki kalsiyum içeriğinin belirlenmesi kalsiyumun kolonlardan, kolona en yakın iyileştirilmemiş kile yavaş bir şekilde göç ettiği görülmüştür.

  İki arazi belirlenmiştir. Bunların ilkinde zemin yüksek hassaslıkta yumuşak kil içermektedir. Kilin doğal su muhtevası %60-100'dür, likit limiti %60'tır ve drenajsız kesme kuvveti 12-15 kPa'dır. İyileştirilmemiş kilin CaO içeriği kuru malzemenin %1-3,5'idir ve pH değeri ise 8,2 ila 9,3 arasında değişmektedir.

  Kireç-çimento kolonları 1991 Kasım-Aralık tarihlerinde imal edilmiştir ve İsveç'teki yaygın yöntem olan kuru zemin karıştırma yöntemi uygulanmıştır. Tasarımda belirlenen bağlayıcı içeriği %50 kireç ve %50 çimentodur. Dozaj ise 81,5 kg/m^3 olarakseçilmiştir. Geri çekme oranı ise 25 mm/rot'dur. Kireç-çimento kolonlarının çapları 500 mm'dir.

  İkinci arazide ise kireç-çimento kolonları 1994 ilkbaharında kuru derin karıştırma kullanılarak imal edilmiştir. Tasarımda belirlenen bağlayıcı içeriği %50 kireç ve %50 çimentodur. Katkı dozajı 99 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Geri çekme oranı ise 15 mm/rot'dur. Kireç-çimento kolonlarının çapları 600 mm ve uzunlukları 8 metredir. İlgili çalışamaya ait gerekli tüm veriler *EK-7*'de sunulmuştur.

- Massarsch (2005), İsveç'te çok yumuşak ve sıkışabilir bir zemin üzerinde 7 metre yüksekliğe ulaşan ve bir demir yolu hattının geçtiği bir dolgu üzerinde çalışmıştır. Bu sebeple, İskandinav ülkelerinde bu tür problemler için kullanımı yaygın olan kuru karıştırma yöntemi ile kireç-çimento kolonlarının imalatı tercih edilmiştir.

  Test alanı 10 metre derinliğe varan yumuşak organik kil içermektedir. 1 metre kalınlığındaki kabuk bölgesini takip eden 2 metre organik kil, 2 metre sülfür kili ve 4 metre siltli kil bulunmaktadır. Yer altı su seviyesi zemin yüzeyinin 1 metreden daha az altında konumlanmaktadır.

Kireç/çimento katkılarının karıştırma oranları %50/%50'dir. İki farklı karıştırma dozajı kullanılmıştır, bunlar 99 kg/m^3 ve 156 kg/m^3'tür. Laboratuvar testleri 1995 Eylül ve Ekim aylarında, test kolonlarının imalatından yaklaşık 4 ay sonra yürütülmüştür. İlgili çalışamaya ait gerekli tüm veriler *EK-8*'de sunulmuştur.

- Van Impe ve diğ. (2005), bir yer altı su deposunun (8 metre yükseklikte) bulunduğu ince daneli granüler malzemeden oluşan bir zeminde çalışmışlardır. Zeminin doğal su muhtevası (temel seviyesi) %115, plastisite indeksi %77 ve organik içeriği yaklaşık %6'dır.

  Yazarlar, farklı zaman aralıklarında birçok serbest basınç testleri yürütmüşlerdir (7, 14, 28, 56, 84, 120, 240 ve 550 gün). Bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu kullanılmıştır. İlgili çalışamaya ait gerekli tüm veriler *EK-9*'da sunulmuştur.

- Okada ve diğ., çalışmalarında sıvılaşabilir ponza taşı kumu olan bir zemin tabakası için derin karıştırılmış kolonlar üzerinde incelemeler yapmışlardır. Sıvılaşmayı önlemeye yönelik olarak çimento zemin kolonları inşa edilmiştir. Arazi zemin koşullarındaki ponza taşı kumu, 1-4 MPa dirence sahip CPT değerleri ile 11 metre derinliğe kadar çok gevşek ya da gevşek durumdadır. Yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda kolon örneklerinin serbest basınç mukavemetinin, ponza taşı kumu depozitolarında tasarım mukavemetinden nispeten daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Katkı tipi olarak çimento kullanılmıştır. İlgili çalışamaya ait gerekli tüm veriler *EK-10*'da sunulmuştur.

- Azadegan (2012), yapmış olduğu çalışmada kireç/çimento kolonlarının mekanik karakteristiklerine değinmiştir. Problemli zeminlerde hangi tip kireç/çimento kolonlarının daha uyumlu olduğunu araştırmıştır. Portland çimentosu, yapısal mukavemetin büyük kısmını karşılaması için asıl katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Kullanılan kireç tipi, ince daneli olup karıştırma ve stabilizasyon süreci için ve de kolonların sert asidik durumlara karşı daha dirençli olması için uygundur. Silindirik numunelerde serbest basınç mukavemeti testleri uygulanmıştır ve böylelikle her tasarım karışımı için basınç mukavemeti ve elastisite modülü elde edilmiştir. İlgili çalışamaya ait gerekli tüm veriler *EK-11*'de sunulmuştur.

- Nguyen ve diğ. (2014), hafif yük kamyonlarının (≤ 2.5 ton) geçeceği bir kırsal yol inşasında kullanılacak zeminin kuru çimento ile karışımındaki laboratuvar deneyleri üzerine araştırmalar yapmışlardır. 200'den fazla zemin-çimento karışım numuneleri, farklı su muhtevası ve farklı kür sürelerindeki çeşitli çimento içerikleri ile yapılmıştır. %10 ya da daha fazla çimento içeriğindeki yerel ince daneli kumun serbest basınç mukavemetini ve yerindeki zeminin sekant modülünü 21 günlük kür süresi için en az 15 ila 50 kat artırdığı görülmüştür. %10 ila %12.5 çimento içeriği ile karıştırılmış 0.5 metre bir kum tabakası, hafif yük kamyonlarının güvenli taşınımı için uygun bir yol inşasına izin vermektedir. İlgili çalışamaya ait gerekli tüm veriler *EK-12*'de sunulmuştur.

4. BULGULAR

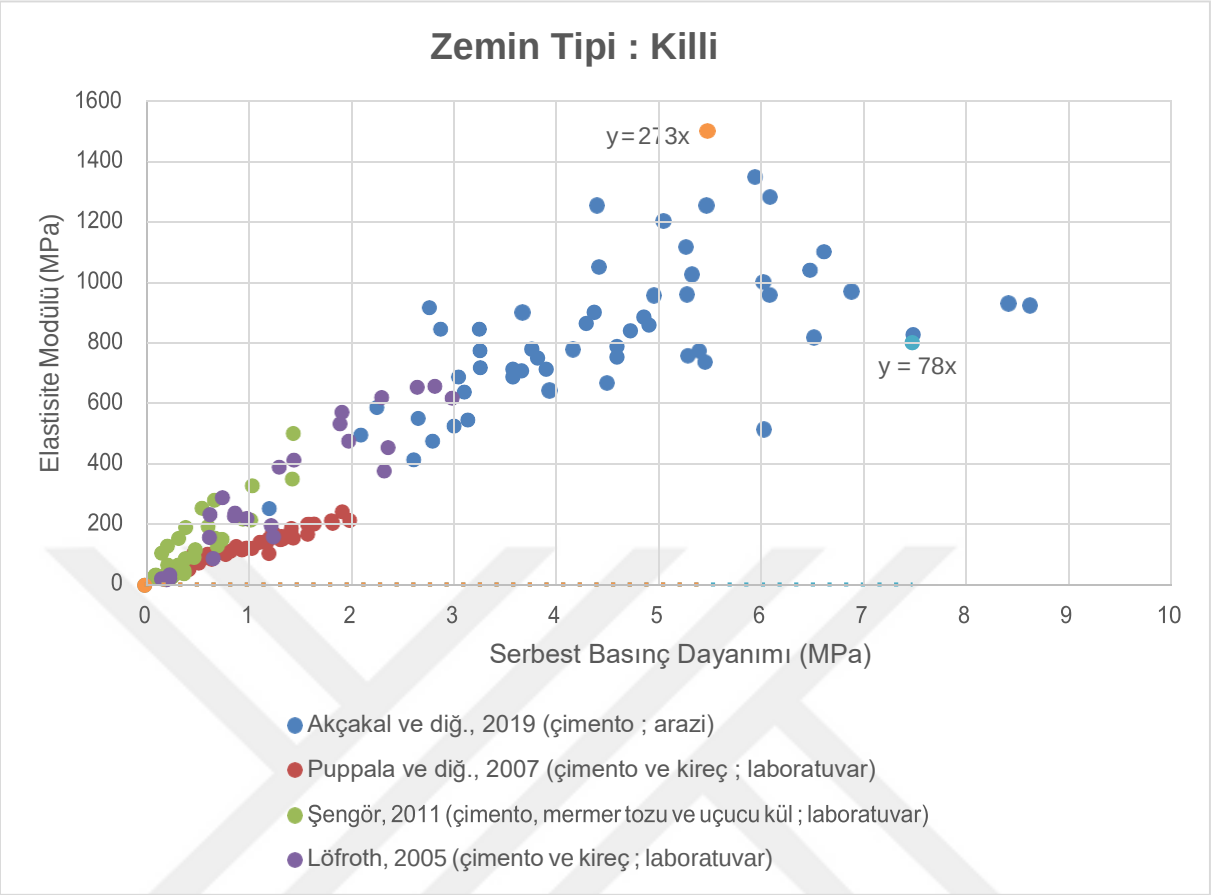
Çalışma kapsamında elde edilen bulgular şu sınıflara göre yapılmıştır:

- Zemin tipi,
- Katkı tipi,
- Elastisite modülü.

4.1. ZEMİN TİPİNE GÖRE ELASTİSİTE MODÜLÜ-SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ İLİŞKİSİ

Zemin tipinin kil olduğu durumlar için, yapılan deney tipi laboratuvar ya da arazi olarak belirtilerek, Akçakal ve diğ. (2019), Puppala ve diğ. (2007), Şengör (2011) ve Löfroth (2005) çalışmalarından elde edilen serbest basınç mukavemeti ve Elastisite modülüne ait veriler MPa cinsinden ortak bir grafiğe işlenmiştir. Daha sonra bu grafik üzerinde daha doğru ve spesifik bir aralık elde edilebilmesi için bu veri grubunun büyük çoğunluğunu içerisine alan minimum ve maksimum eğim çizgileri oluşturulmuş ve bu eğim çizgilerinin denklemleri elde edilmiştir.

Zemin tipinin kil olduğu ilgili çalışmalara dair elde edilen grafik Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Zemin tipinin kil olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Akçakal ve diğ., 2019 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005).

Yukarıdaki grafiğe bakıldığında laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin genellikle daha düşük değerlerde ve eğim çizgilerinin birbirine yakın olduğu kısımlarda toplandığı görülürken, Akçakal ve diğ. (2019)'nin arazi deneyinden elde edilen verilerin daha büyük değerlerde ve dağınık şekilde yer aldığı görülmektedir. Zemin tipinin ve deney tipinin aynı olmasına rağmen Puppala ve diğ. (2007) 'nin kullanmış oldukları katkı tipi çimento ve kireç olduğu için bu çalışmanın verilerinin çoğunluğunun minimum eğri üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Fakat Şengör (2011), çalışmasında katkı malzemesi olarak çimento, mermer tozu ve uçucu kül kullandığı için bu çalışmaya dair veriler daha dağınık ve maksimum eğim çizgisine yakın bulunmuştur. Katkı tiplerine göre dağılım ayrıca bu tezin takip eden grafiklerinde tartışılmıştır.

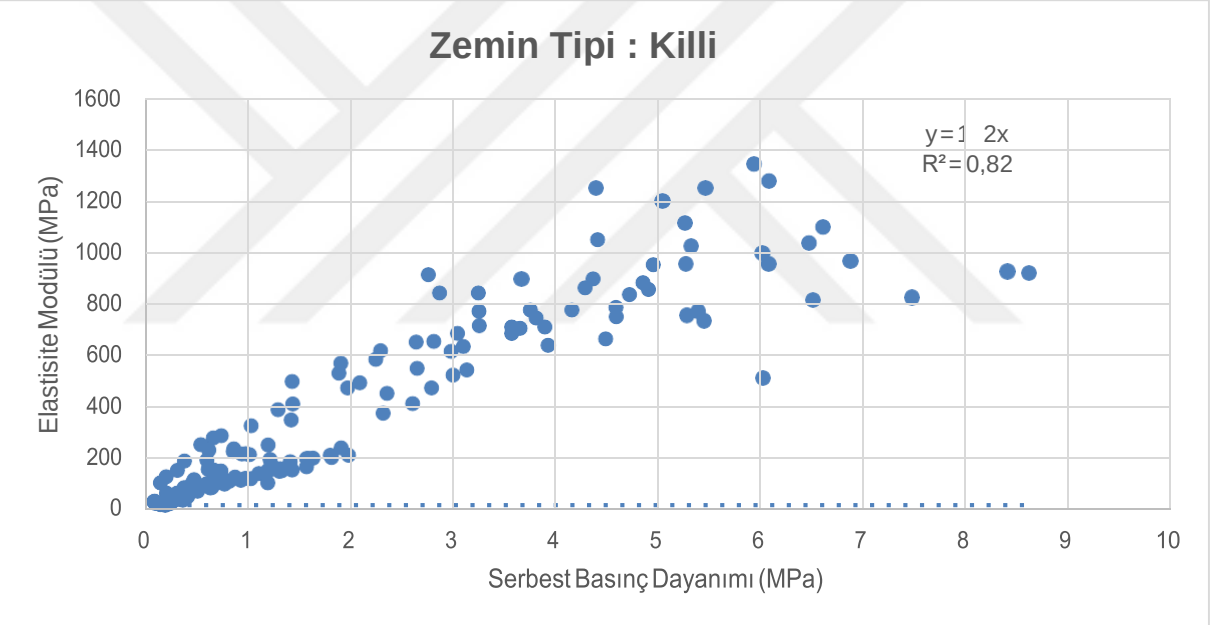
Şekil 4.1'e göre zemin tipinin kil olduğu durumlarda elde edilen aralık için minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.1)'de, maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.2)'de verilmiştir.

$$E = 78q_u \tag{4.1}$$

$$E = 273q_u \quad (4.2)$$

Sonuç olarak zemin tipinin ‘’killi zemin’’ olduğu laboratuvar deneylerinde katkı maddesi olarak çimento ve kireç kullanıldığında Şekil 4.1’e göre E-q_u ilişkisinin denklem (4.1)’e daha yakın olduğu ve Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin 78 katı civarında olacağı sonucuna varılmıştır. Aynı koşullarda killi zeminlerde katkı maddesi olarak çimento veya mermer tozu ve uçucu kül kullanıldığında E-q_u ilişkisinin denklem (4.2)’ye yakın olduğu ve Elastisite modülünün, serbest basınç dayanımının 273 katı olacağı sonucuna varılmıştır.

Şekil 4.2’de ise zemin tipinin kil olduğu çalışmalarda ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E-q_u ilişkisi denklem (4.3)’te verilmiştir.



Şekil 4.2: Zemin tipinin kil olduğu durumlarda ortalama E-q_u ilişkisi (Akçakal ve diğ., 2019 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005).

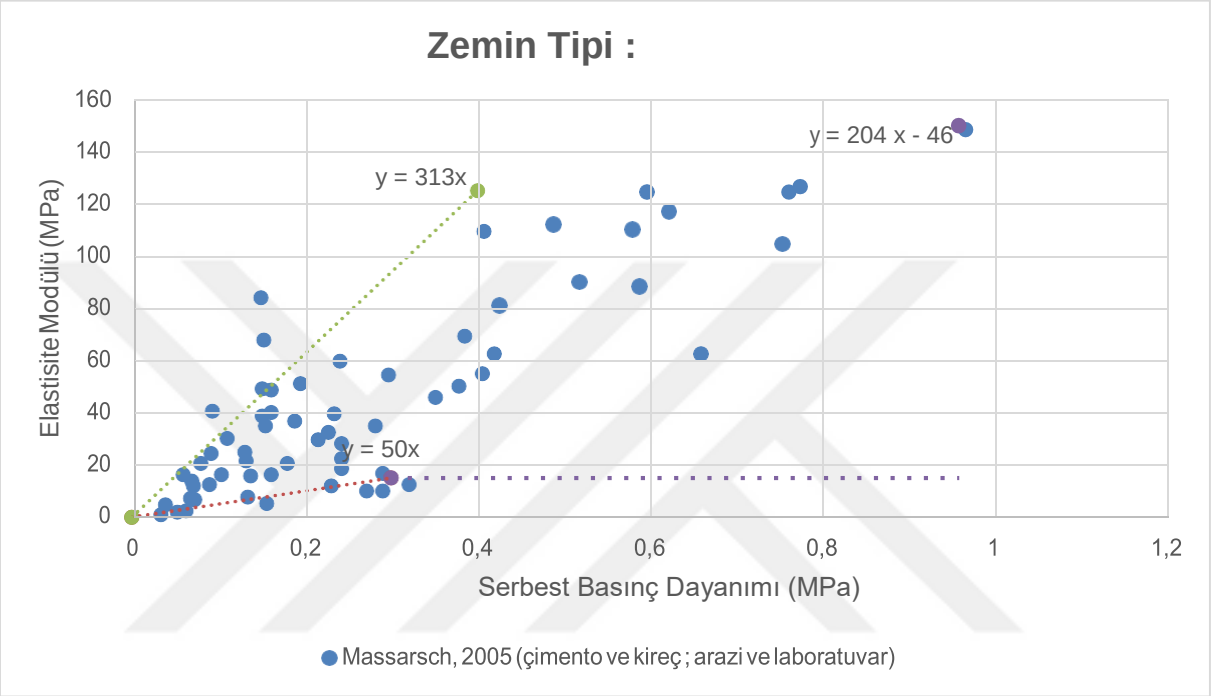
$$E = 172q_u \quad ; \quad (R^2 = 0{,}82) \quad (4.3)$$

Böylelikle killi zeminlerde ortalama olarak Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin yaklaşık olarak ortalama 172 katı olduğu söylenebilir.

Terashi ve diğ. (1997), tarafından yapılan bir çalışmada iki farklı kil zemin tipine göre laboratuvarda kireç ile stabilize edilmiş numunelerinde E_{50} değerleri (75-200)q_u ve (200-1000)q_u aralıklarında olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada bulunan killi zemin tipi için ortalama

E değeri $172q_u$ ise Terashi ve diğ. (1997)'nin değerleri ile karşılaştırılınca uygun aralıkta kalabileceği sonucuna varılmıştır.

Zemin tipinin organik kil olduğu durum Massarch (2005)'ın çalışmasında sunulmuştur. Bu grafik Şekil 4.3'te verilmektedir.



Şekil 4.3: Zemin tipinin organik kil olduğu durumda maksimum ve minimum E-q_u aralığı (Massarch, 2005).

Massarch (2005), çalışmasında organik killi zeminde katkı maddesi olarak çimento ve kireç karışımını %50-%50 oranında kullanmıştır. Yazar, arazi ve laboratuvar deneyleri sonucunda sekant modülünün, serbest basınç mukavemeti ile ilişkisini incelemiştir. Şekil 4.3'teki veriler hem laboratuvar hem de arazi verilerine aittir. Grafik üzerindeki verilerin hangilerinin laboratuvar hangilerinin arazi verisi olduğu belirtilmemiştir fakat bunun için EK-8'den yararlanılabilir.

Birkaç verinin eğim çizgileri dışarısında kalması göz ardı edilerek daha doğru bir aralık elde edilebilmesi amacıyla oluşturan maksimum ve minimum aralık değerlerinden okunan organik kil zemin durumunda minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.4)'te ve maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.5)'te verilmiştir. Tüm birimler MPa'dır.

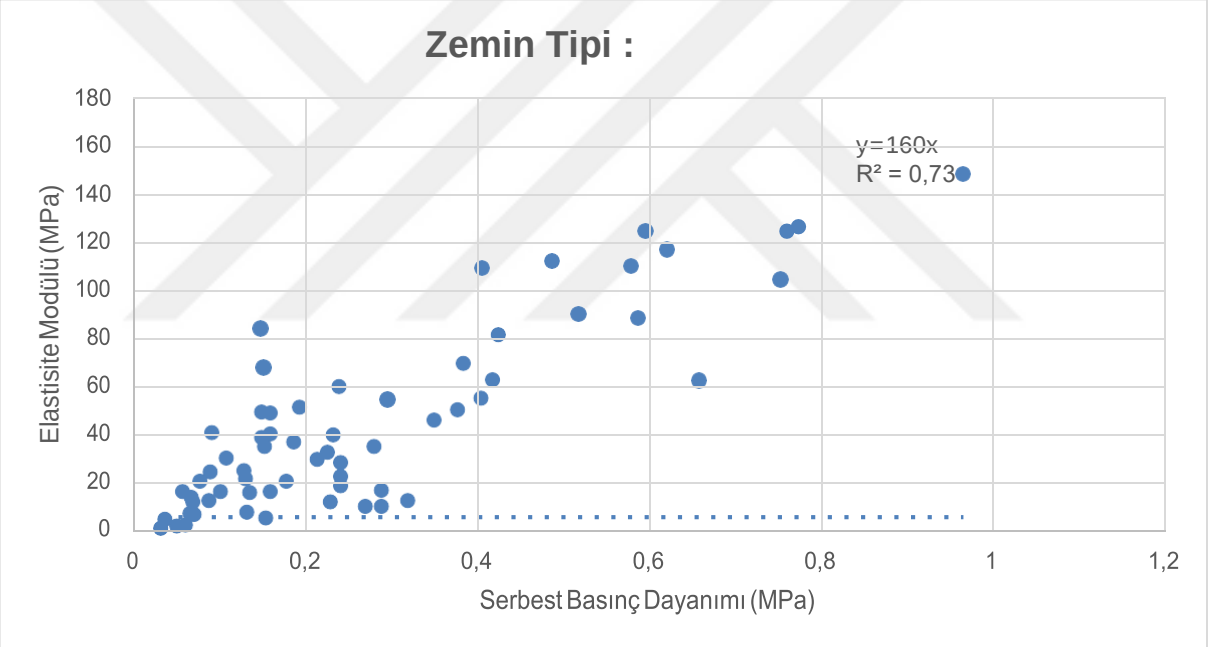
$q_u < 0,3\ MPa$ için $E_{50} = 50q_u$

$q_u > 0,3\ MPa$ için $E_{50} = 204q_u - 46$ (4.4)

$E_{50} = 313q_u$ (4.5)

Sonuç olarak zemin tipinin organik kil olduğu arazi ve laboratuvar deneylerinde katkı maddesi olarak çimento ve kireç kullanıldığında sekant modülünün, serbest basınç mukavemetinin alt limitinin $q_u < 0,3$ MPa için $E_{50} = 50q_u$ ve $q_u > 0,3$ MPa için $E_{50} = 204q_u - 46$ olduğu, üst değerinin ise qu değerinin 313 katı aralığında değiştiği söylenebilir.

Şekil 4.4'te ise zemin tipinin organik kil olduğu bahsi geçen çalışmada ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E-q_u ilişkisi denklem (4.6)'da verilmiştir.

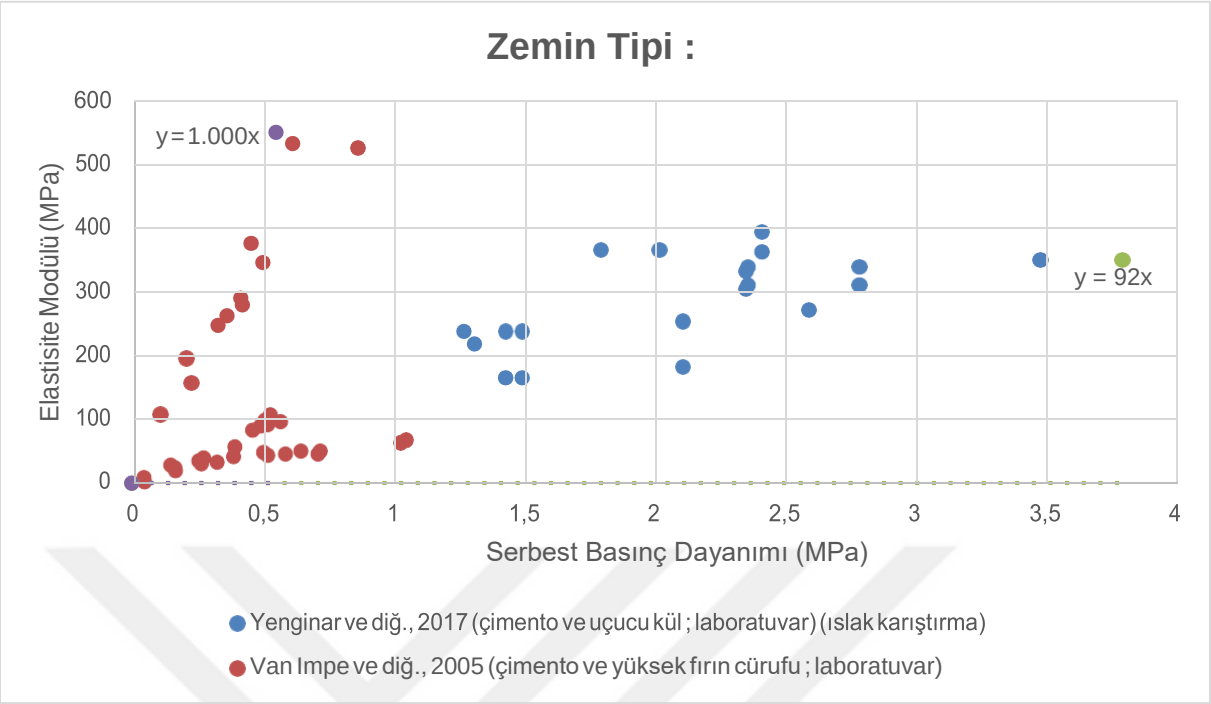


Şekil 4.4: Zemin tipinin organik kil olduğu durumda kuru karıştırma yöntemi için ortalama E-qu ilişkisi (Massarch, 2005).

$E_{50} = 160q_u$; ($R^2 = 0,73$) (4.6)

Şekil 4.4'e göre organik killi zeminlerde kuru karıştırma yönteminde sekant modülünün, serbest basınç mukavemetinin ortalama 160 katı olduğu sonucuna varılmıştır.

Zemin tipinin silt olduğu durumlara ait olan Yenginar ve diğ. (2017) ve Van Impe ve diğ. (2005)'in çalışmalarından elde edilen veriler ile oluşturulan grafik Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5: Zemin tipinin silt olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Yenginar ve diğ., 2017 ; Van Impe ve diğ., 2005).

Şekil 4.5'e bakıldığında Van Impe ve diğ. (2005)'nin çalışmasına ait değerlerin grafiğin sol tarafında bir kısmının minimum eğim çizgisi bir kısmının ise maksimum eğim çizgisi üzerinde toplandığı görülmektedir. Bunun sebebi yazarların çalışmalarında siltli zeminde katkı tipi olarak Portland çimento ve yüksek fırın cürufu kullanmaları olabilir. İki çalışmanın verileri de laboratuvar koşullarından elde edilmiştir. Ayrıca Van Impe ve diğ. (2005)'nin verilerinin hem maksimum hem de minimum eğrilere yakın olmasının sebebi birçok farklı kür süresinde yapmış oldukları deneyler olabilir. Yazarlar 7-14-28-49-98-120 ve 173 günlük kür sürelerinde numunelerini test etmişlerdir.

Yenginar ve diğ. (2017)'nin çalışmasından elde edilen laboratuvar verilerine bakıldığında ise grafikte biraz daha dağınık ve minimum eğim çizgisine yakın şekilde yayıldığı gözlemlenmektedir. Yazarlar çalışmalarında siltli zeminlerde katkı maddesi olarak çimento ve uçucu kül kullanmış ve 7 ve 28 günlük kür süresine sahip numuneleri test etmişlerdir.

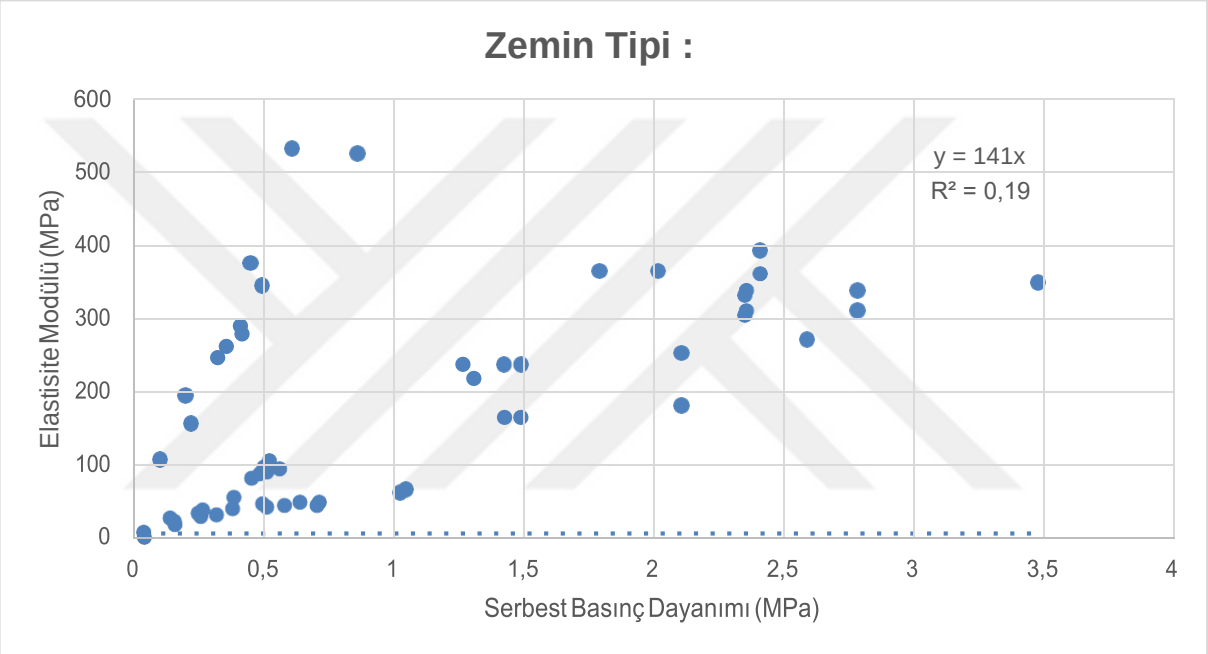
Siltli zemin durumunda minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.7)'de ve maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.8)'de verilmiştir.

$$E = 92q_u \tag{4.7}$$

$$E = 1000q_u \tag{4.8}$$

Sonuç olarak zemin tipinin silt olduğu laboratuvar deneylerinde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin 92 ila 1000 katı aralığında değiştiği söylenebilir. Veri sayısının az olması nedeniyle bu aralığın çok geniş olduğu görülmektedir.

Şekil 4.6'da ise zemin tipinin silt olduğu durumlarda ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E-q_u ilişkisi denklem (4.9)'da verilmiştir.

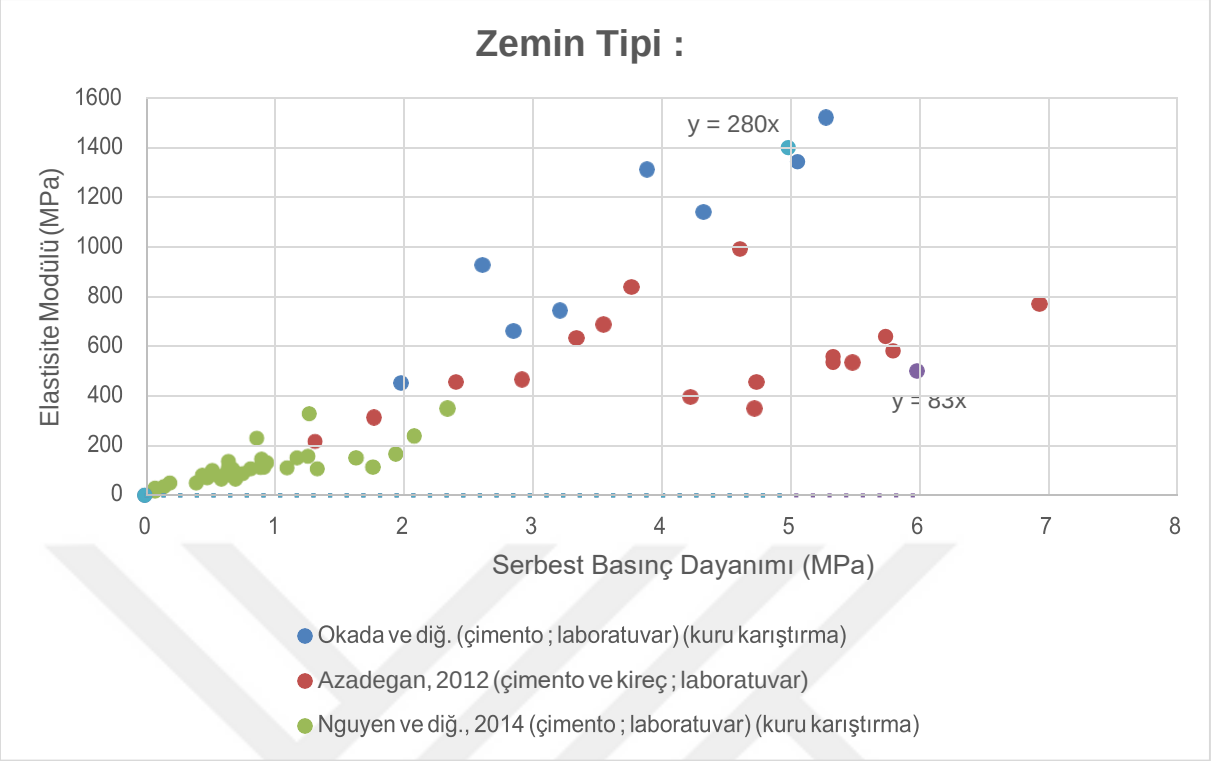


Şekil 4.6: Zemin tipinin silt olduğu durumlarda ortalama E-q_u ilişkisi (Yenginar ve diğ., 2017 ; Van Impe ve diğ., 2005).

$$E = 141q_u \quad ; \quad (R^2 = 0{,}19) \tag{4.9}$$

Şekil 4.6'ya göre siltli zeminlerde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin ortalama 141 katı olduğu sonucuna varılmıştır. R^2 değeri bakmından bu bağlantı çok güvenilir görülmemektedir.

Zemin tipinin kum olduğu durumlarda Okada ve diğ., Azadegan (2012) ve Nguyen ve diğ. (2014) çalışmalarından elde edilen laboratuvar verilerine ait grafik Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7: Zemin tipinin kum olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Nguyen ve diğ., 2014).

Şekil 4.7'ye bakıldığında Okada ve diğ.'nin ve de Azadegan (2012)'nin laboratuvar verilerinin daha dağınık ve büyük değerlerde olduğu fakat Nguyen ve diğ. (2014)'nin verilerinin ise maksimum ve minimum eğim çizgilerinin birleştiği bölgeye yakın küçük değerlerde olduğu görülmektedir. Okada ve diğ., ve de Azadegan (2012) çalışmalarında kuru derin karıştırma yöntemi ile yapılan deney sonuçlarına yer vermişlerdir. Ayrıca Okada ve diğ. ve Nguyen ve diğ. (2014) çalışmalarında kumlu zeminlerde katkı maddesi olarak çimento kullanırken Azadegan (2012) çalışmasında aynı tip zemin üzerinde katkı maddesi olarak çimento ve kireç kullanmıştır.

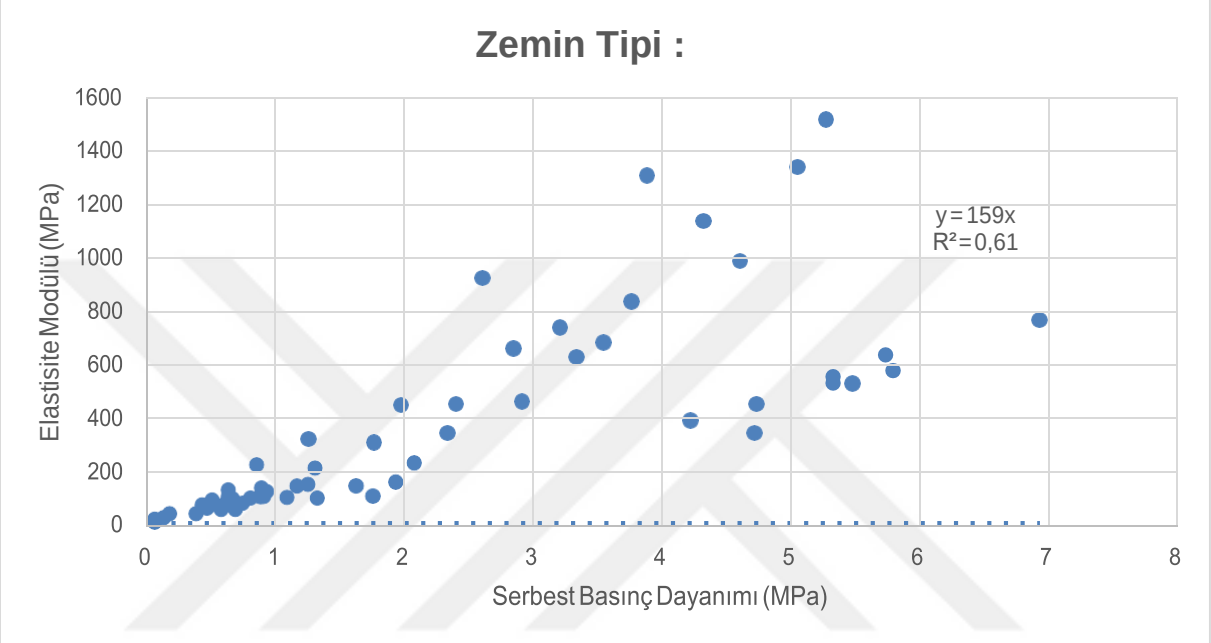
Kumlu zemin durumunda minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.10)'da ve maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.11)'de verilmiştir.

$$E = 83q_u \tag{4.10}$$

$$E = 280q_u \tag{4.11}$$

Sonuç olarak zemin tipinin kum olduğu laboratuvar deneylerinde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin 83 ila 280 katı aralığında değiştiği söylenebilir.

Şekil 4.8'de ise zemin tipinin kum olduğu durumlarda ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E-q_u ilişkisi denklem (4.12)'da verilmiştir.

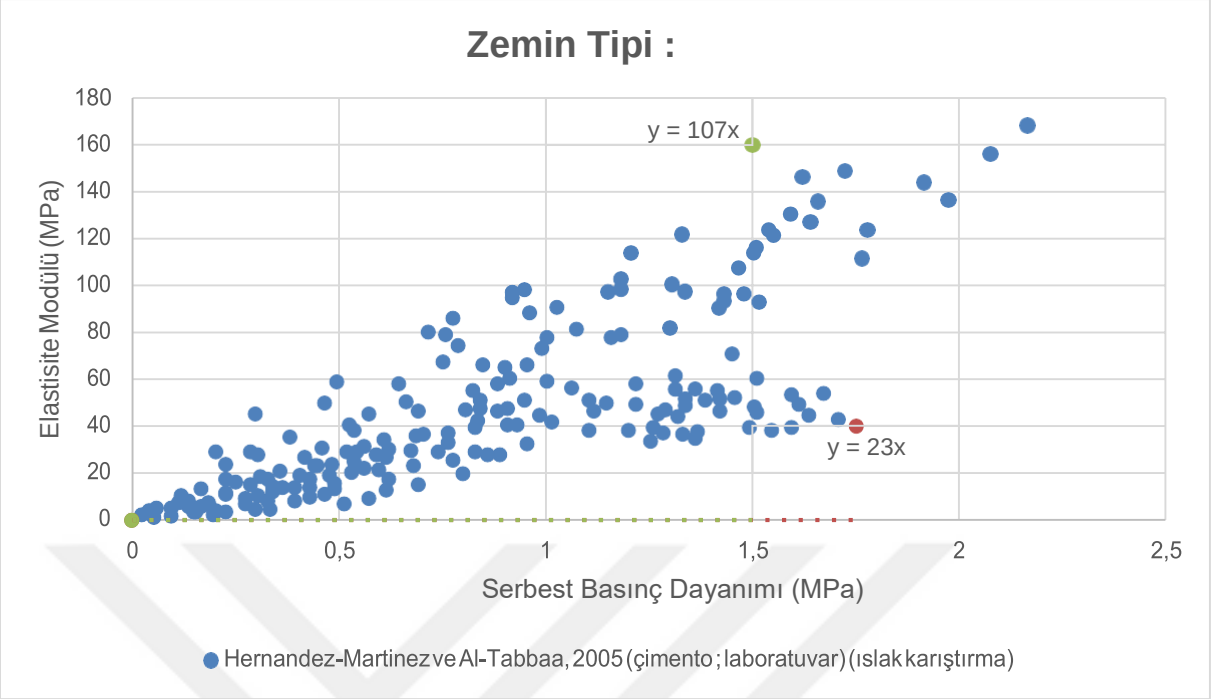


Şekil 4.8: Zemin tipinin kum olduğu durumlarda ortalama E-q_u ilişkisi (Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Nguyen ve diğ., 2014).

$$E = 159q_u \quad ; \quad (R^2 = 0{,}61) \tag{4.12}$$

Şekil 4.8'e göre kumlu zeminlerde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin ortalama 159 katı olduğu sonucuna varılmıştır.

Zemin tipinin turba olduğu durumda Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa (2005)'nın çalışmasından elden edilen laboratuvar deneylerine ait veriler Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9: Zemin tipinin turba olduğu durumda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005).

Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa (2005), karıştırma yöntemi olarak ıslak karıştırmayı ve katkı malzemesi olarak Portland çimentosunu kullanarak elde ettiği laboratuvar verilerinde turbalı zemindeki Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisini incelemiştir. Laboratuvardaki numenelerin kür süreleri ise 28 gündür.

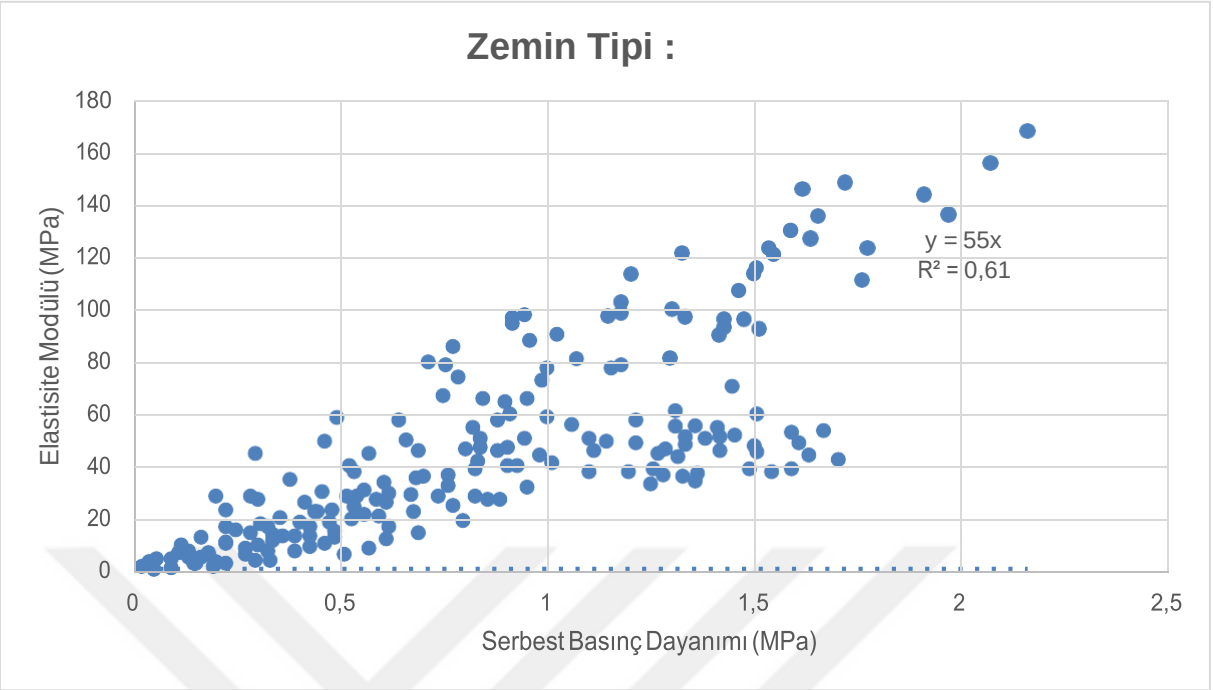
Turba zemin durumunda minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.13)'te ve maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.14)'te verilmiştir.

$$E = 23q_u \tag{4.13}$$

$$E = 107q_u \tag{4.14}$$

Şekil 4.9'dan ve denklemler (4.13) ve (4.14)'ten elden edilen sonuçlara göre zemin tipinin turba olduğu laboratuvar deneylerinde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin 23 ila 107 katı aralığında değiştiği söylenebilir.

Şekil 4.10'da ise zemin tipinin turba olduğu durumlarda ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E-q_u ilişkisi denklem (4.15)'te verilmiştir.



Şekil 4.10: Zemin tipinin turba olduğu durumda ortalama E-q_u ilişkisi (Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005).

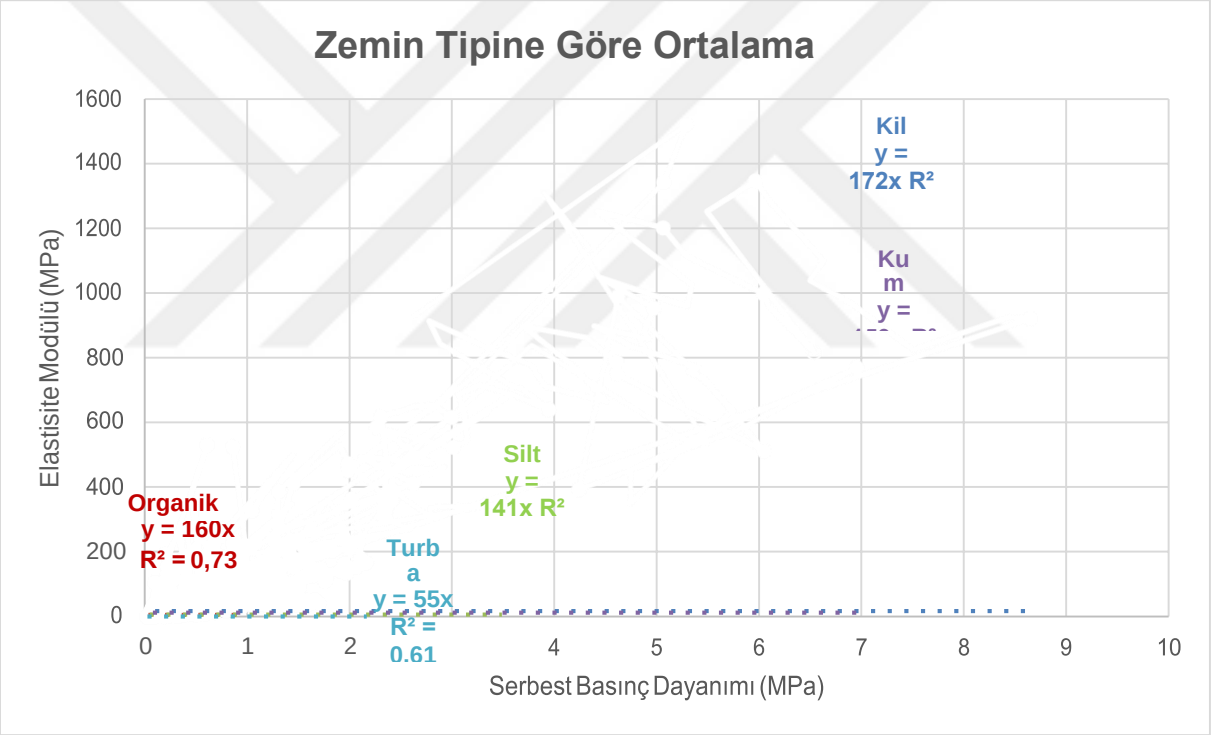
$$E = 55q_u \quad ; \quad (R^2 = 0{,}61) \tag{4.15}$$

Şekil 4.10'a göre zemin tipinin turba olduğu durumlarda Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin ortalama 55 katı olduğu sonucuna varılmıştır.

Zemin tipine göre yapılan karşılaştırmaları özetlemek için sonuç olarak farklı tip zeminlerdeki ilgili bilgiler ve ortalama farklı eğim çizgileri ile formülleri Tablo 4.1'de ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Organik zeminde ve turba zeminde gerek mukavemet, gerekse modül değerlerinin diğer zeminlere nazaran düşük olduğu görülmektedir. Siltli zeminlere ait dağılım çok yüksek olduğu için bu formül önerilememektedir.

Tablo 4.1: Zemin tipine göre E-qu ilişki (Akçakal ve diğ., 2019 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005; Massarch, 2005; Yenginar ve diğ., 2017 ; Van Impe ve diğ., 2005; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Nguyen ve diğ., 2014; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005).

	E-qu ilişkisi				
Zemin Tipi	**Alt Limit**	**Üst Limit**	**Ortalama Değer**	**Veri Sayısı**	**R^2**
Kil	78	273	172	159	0,82
Organik Kil	$50q_u$ veya $204q_u$ - 46	313	160	63	0,73
Silt	92	1000	141	56	0,19
Kum	83	280	159	58	0,61
Turba	23	107	55	196	0,61

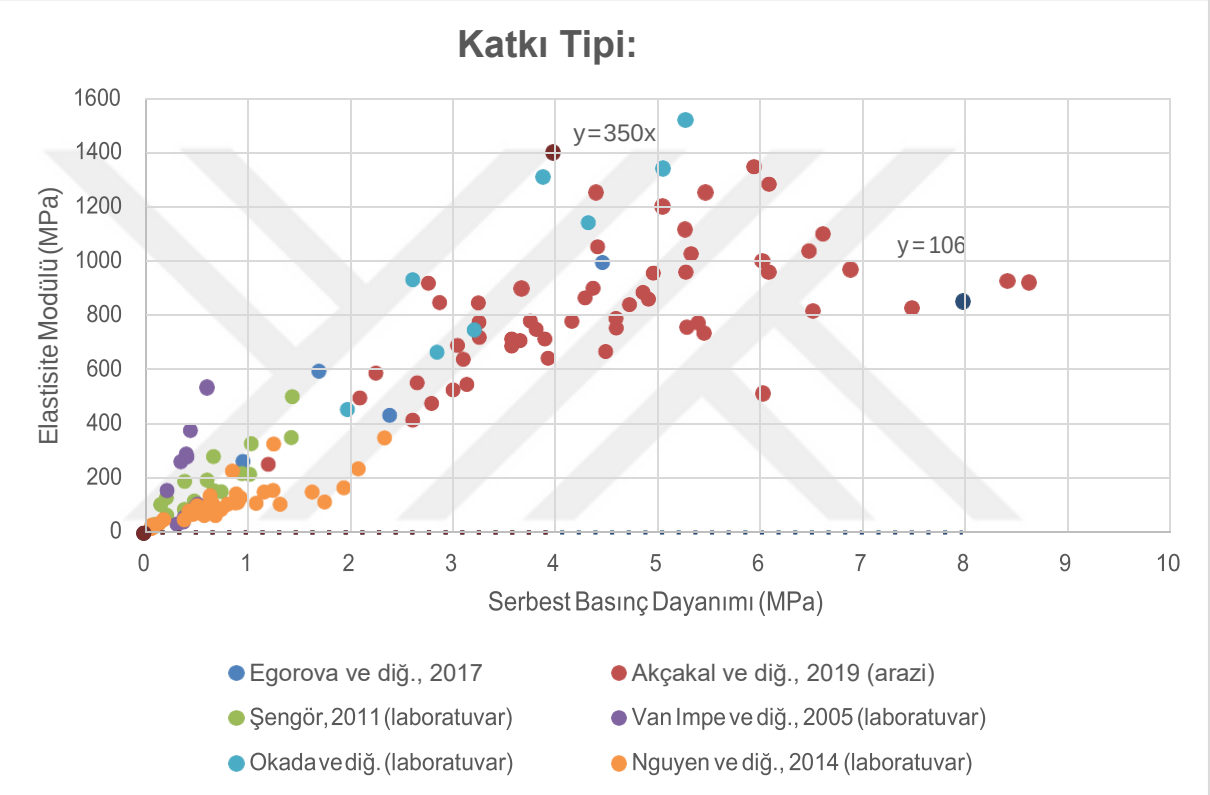


Şekil 4.11: Zemin tipine göre ortalama E-q_u ilişkisi (Akçakal ve diğ., 2019 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005 ; Massarch, 2005 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Nguyen ve diğ., 2014 ; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005).

Şekil 4.11'e göre zemin tipine göre Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti karşılaştırmasında ortalama değerler dikkate alındığında serbest basınç mukavemeti arttıkça Elastisite modülünün artışı en çoktan en az kil, organik kil, kum, silt ve turba sıralaması şeklinde olmaktadır.

4.2. KATKI TİPİNE GÖRE ELASTİSİTE MODÜLÜ-SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ İLİŞKİSİ

Verilerin elde edildiği çalışmalar arasından Egorova ve diğ. (2017), Akçakal ve diğ. (2019), Şengör (2011), Van Impe ve diğ. (2005), Okada ve diğ., Nguyen ve diğ. (2014) çalışmalarından katkı tipi olarak sadece çimentonun kullanıldığı verileri içeren dağılımı, Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti değerlerini içeren grafik Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12: Katkı tipinin çimento olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Şengör, 2011 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Okada ve diğ. ; Nguyen ve diğ., 2014).

Şekil 4.12'de açıkça görülmektedir ki Akçakal ve diğ. (2019)'nin elde etmiş oldukları veriler daha dağınık ve büyük değerlerdedir. Bunun sebebi olarak bu verilerin arazi deneylerinden elde edilmiş olması gösterilebilir. Laboratuvar verileri olan Şengör (2011), Van Impe ve diğ. (2005) ve de Nguyen ve diğ. (2014)'nin çalışmalarındaki veriler E-q_u grafiğinde minumum ve maksimum eğim çizgilerinin kesiştiği bölgede yoğunlaşırken, Okada ve diğ.'nin verileri daha büyük değerlerde maksimum eğim çizgisine yakın şekilde dağılmıştır.

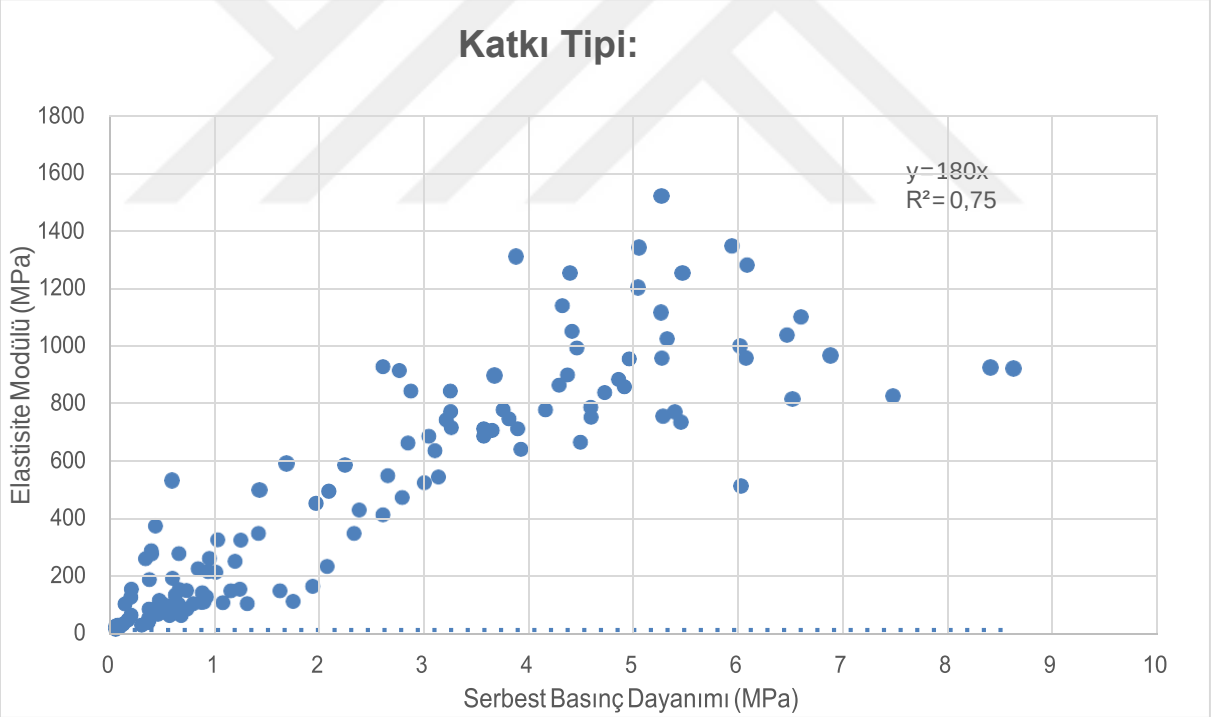
Çimento katkı tipi durumunda minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.16)'da ve maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.17)'de verilmiştir.

$$E = 106q_u \tag{4.16}$$

$$E = 305q_u \tag{4.17}$$

Şekil 4.12'den ve denklemler (4.16) ve (4.17)'den elden edilen sonuçlara göre katkı tipinin çimento olduğu durumlarda Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin 106 ila 305 katı aralığında değiştiği söylenebilir.

Şekil 4.13'te ise katkı tipinin çimento olduğu durumlarda ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E-q_u ilişkisi denklem (4.18)'te verilmiştir.



Şekil 4.13: Katkı tipinin çimento olduğu durumlarda ortalama E-q_u ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Şengör, 2011 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Okada ve diğ. ; Nguyen ve diğ., 2014).

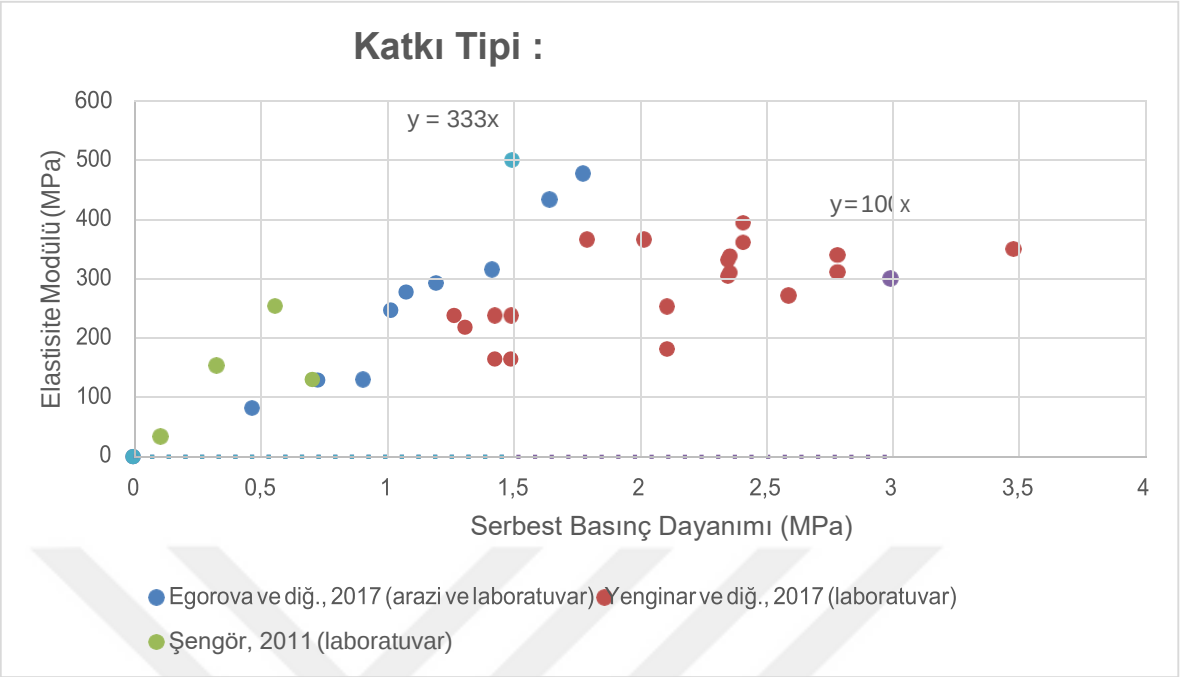
$$E = 180q_u \quad ; \quad (R^2 = 0{,}75) \tag{4.18}$$

Şekil 4.13'e göre katkı tipinin sadece çimento olduğu durumlarda Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin ortalama 180 katı olduğu sonucuna varılmıştır.

Niina ve diğ. (1981) tarafından 16 kil ve kumlu siltli zemin farklı oranlardaki Portland çimentosu ile laboratuvarda stabilize edilmiştir. E_{50} değerinin q_u'ya bağlı olarak neredeyse doğrusal olarak (350-1000)q_u oranıyla arttığı görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen E=180q_u değeri Niina ve diğ. (1981)'nin bulmuş olduğu değerlerle karşılaştırılanca ilgili aralığın dışında kaldığı görülmüştür. İlgili çalışmada E değeri belli değildir.

Daramalinggam ve Yohannes (2019), Malezya'nın 7 farklı bölgesinden ve 10 farklı şantiye alanından son 5-6 yıl içerisinde derin karıştırma yöntemine ait birçok veriyi bir araya getirerek çalışmalarında kullanmışlardır. Zemin tipi, bağlayıcı içeriği, serbest basınç mukavemeti (UCS) ve Young modülü gibi mühendislik parametreleri ile işlevsel parametreler arasındaki korelasyonları araştırmışlardır. Katkı malzemesi olarak çimento kullanıldığında minimum ve maksimum eğim çizgilerine dair eşitlikler sırası ile E = 100q_u ve E = 500q_u olarak elde edilmiştir. Bu tez kapsamında çimento katkı malzemesi kullanıldığında elde edilen minimum ve maksimum eğim çizgileri ise sırasıyla E = 106q_u ve E = 350q_u'dur. Sonuç olarak aralığın Daramalinggam ve Yohannes (2019) çalışmasına yakın olduğu gözlemlenmektedir. Young modülü ile serbest basınç mukavemeti oranına dair aralığın 100 ila 500 olduğu bu çalışmadaki iki farkı arazideki ortalama değerler ise E = 163q_u ve E = 158q_u şeklinde elde edilmiştir. Aynı değer bu tez kapsamında ise E = 180q_u şeklinde bulunmuştur ve ilgili çalışmadaki değerlere yakın olduğu görülmektedir.

Katkı tipi olarak çimento ve uçucu külün beraber kullanıldığı çalışmalar olan Egorova ve diğ. (2017), Yenginar ve diğ. (2017) ve de Şengör (2011) çalışmalarından alınıp grafiğe işlenen veriler Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Katkı tipinin çimento ve uçucu kül olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Egorova ve diğ., 2017 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Şengör, 2011).

Tüm yazarların çalışmalarında laboratuvar verileri yer almaktadır fakat Egorova ve diğ. (2017) çalışmalarında ayrıca arazi verilerini de elde etmişlerdir. Her çalışmaya ait veriler birçok farklı kür süresine sahip numunelerden elde edilmiştir. Şekil 4.14'e göre Yenginar ve diğ. (2017)'nin verileri minimum eğim çizgisine daha yakın iken Egorova ve diğ. (2017)'nin verileri ise maksimum eğim çizgisine daha yakın gözlemlenmektedir.

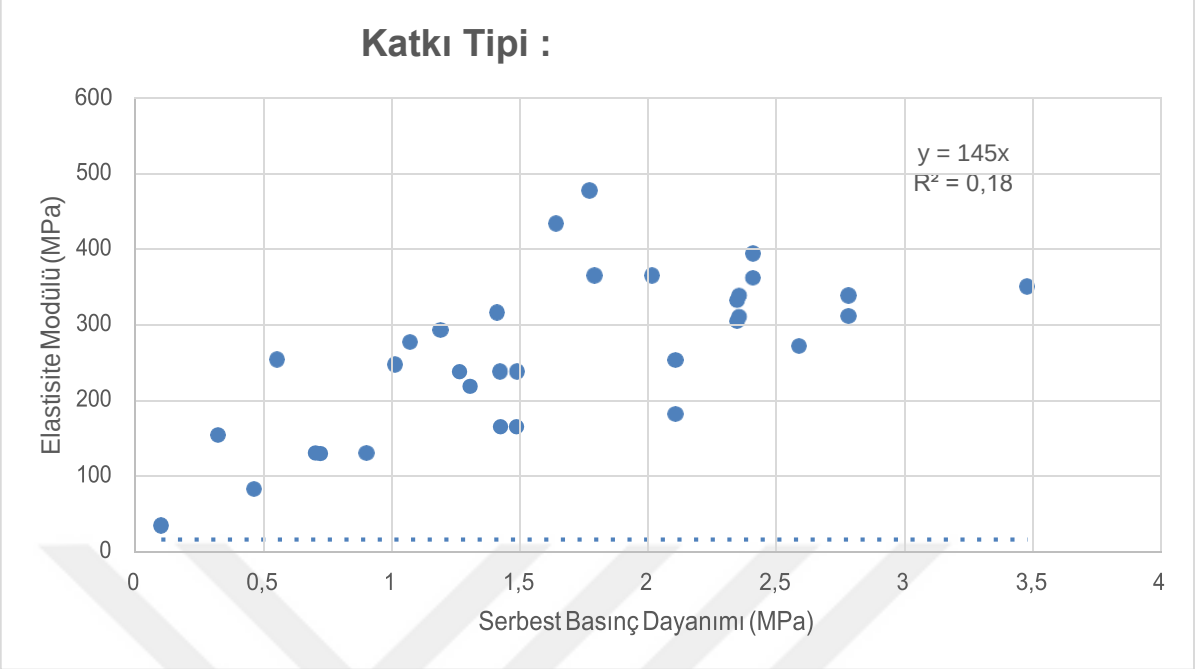
Çimento ve uçucu kül katkı tipi durumunda minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.19)'da ve maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.20)'de verilmiştir.

$$E = 100q_u \tag{4.19}$$

$$E = 333q_u \tag{4.20}$$

Şekil 4.14'ten ve denklemler (4.19) ve (4.20)'den elden edilen sonuçlara göre katkı tipinin çimento ve uçucu kül olduğu durumlarda Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin 100 ila 333 katı aralığında değiştiği söylenebilir.

Şekil 4.15'te ise katkı tipinin çimento ve uçucu kül olduğu durumlarda ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E-q_u ilişkisi denklem (4.21)'de verilmiştir.

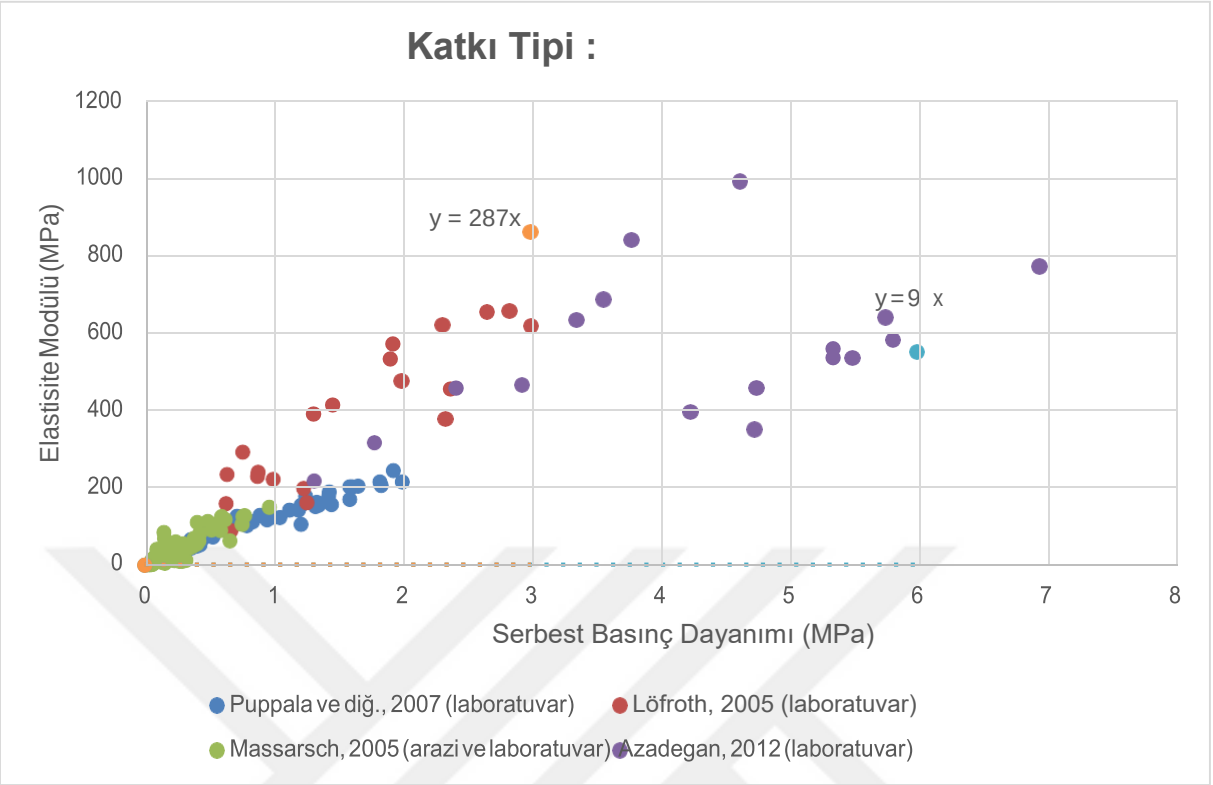


Şekil 4.15: Katkı tipinin çimento ve uçucu kül olduğu durumlarda ortalama E-q_u ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Şengör, 2011).

$$E = 145q_u \quad ; \quad (R^2 = 0{,}18) \tag{4.21}$$

Şekil 4.15'e göre katkı tipinin çimento ve uçucu kül olduğu durumlarda Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin ortalama 145 katı olduğu sonucuna varılmıştır. Verinin çok dağınık olması nedeniyle bu formül önerilmemektedir.

Katkı tipi olarak çimento ve kirecin birlikte kullanıldığı çalışmalar olan Puppala ve diğ. (2007), Löfroth (2005), Massarsch (2005) ve de Azadegan (2012)'nın çalışmalarından elde edilen verilerin işlendiği grafik Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16: Katkı tipinin çimento ve kireç olduğu durumlarda maksimum ve minimum E-qu aralığı (Puppala ve diğ., 2007 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005 ; Azadegan, 2012).

Şekil 4.16'ya göre tüm veriler laboratuvar deneylerinden elde edilmiştir, sadece Massarsch (2005), çalışmasındaki verilerin bir kısmını da arazi deneylerinden elde etmiştir. Löfroth (2005)'un verilerinin maksimum eğim çizgisine daha yakın olduğu görülürken, Puppala ve diğ. (2007)'nin çoğunluğunun ve Azadegan (2012)'ın verilerinin bir kısmının minimum eğim çizgisine yakın olduğu görülmektedir.

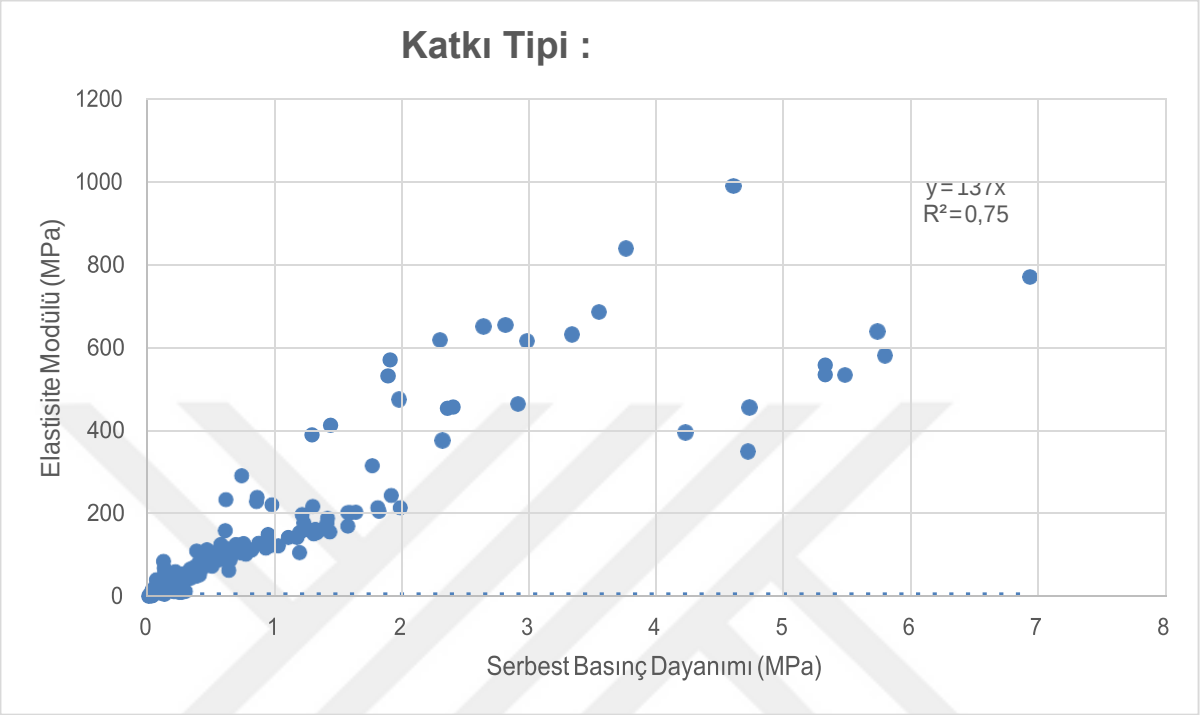
Çimento ve kireç katkı tipi durumunda minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.22)'de ve maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.23)'te verilmiştir.

$$E = 92q_u \tag{4.22}$$

$$E = 287q_u \tag{4.23}$$

Şekil 4.16'dan ve denklemler (4.22) ve (4.23)'ten elden edilen sonuçlara göre katkı tipinin çimento ve kireç olduğu durumlarda Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin 92 ila 287 katı aralığında değiştiği söylenebilir.

Şekil 4.17'de ise katkı tipinin çimento ve kireç olduğu durumlarda ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E-q_u ilişkisi denklem (4.24)'te verilmiştir.



Şekil 4.17: Katkı tipinin çimento ve kireç olduğu durumlarda ortalama E-qu ilişkisi (Puppala ve diğ., 2007 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005 ; Azadegan, 2012).

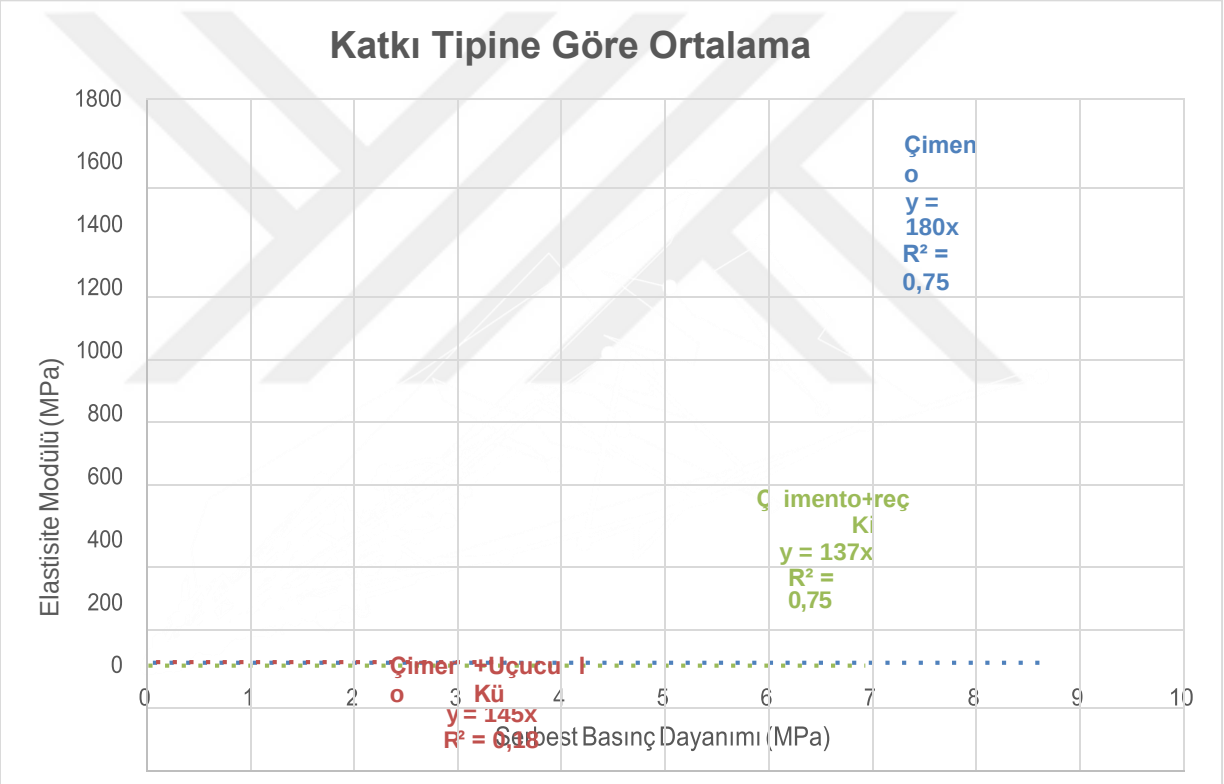
$$E = 137q_u \quad ; \quad R^2 = (0,75) \tag{4.24}$$

Şekil 4.17'ye göre katkı tipinin çimento ve kireç olduğu durumlarda Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin ortalama 137 katı olduğu sonucuna varılmıştır ve bu sonuç literatür için önerilmektedir.

Katkı tipine göre yapılan karşılaştırmaları özetlemek için sonuç olarak farklı tip katkılardaki ilgili bilgiler ve farklı ortalama eğim çizgileri ile formülleri Tablo 4.2'de ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Katkı tipine göre E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Şengör, 2011 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Okada ve diğ. ; Nguyen ve diğ., 2014 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005 ; Azadegan, 2012).

	E-qu ilişkisi				
Katkı Tipi	**Alt Limit**	**Üst Limit**	**Ortalama Değer**	**Veri Sayısı**	**R^2**
Çimento	106	350	180	132	0,75
Çimento+Uçucu Kül	100	333	145	33	0,18
Çimento+Kireç	92	287	137	152	0,75



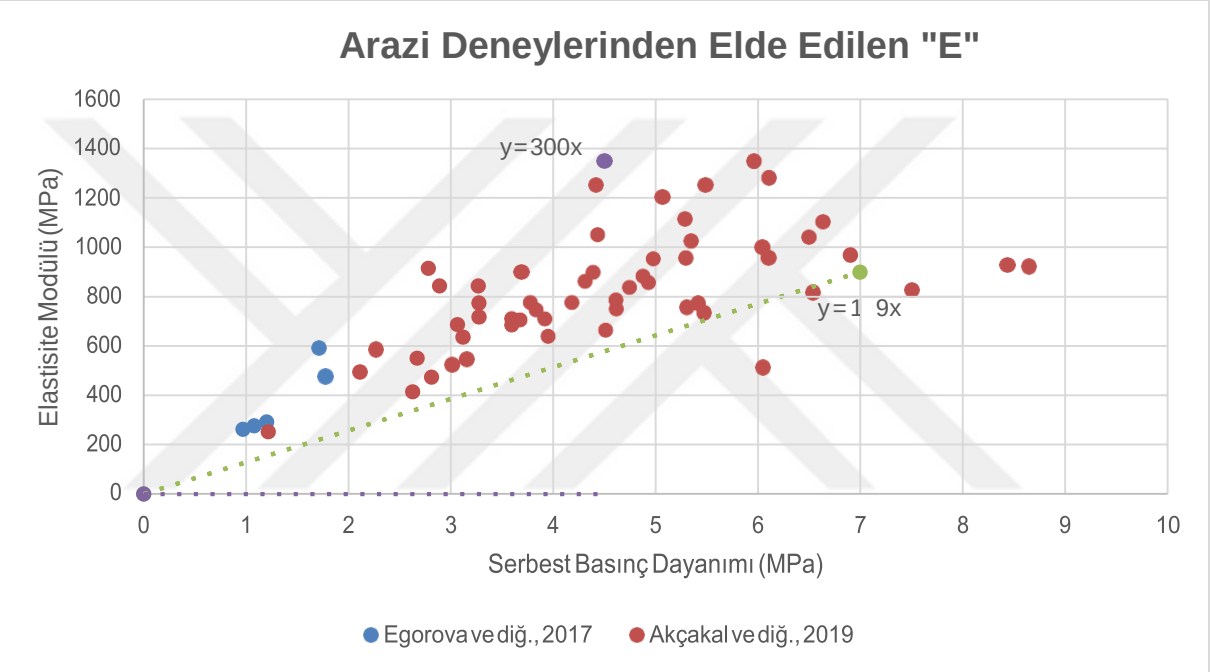
Şekil 4.18: Katkı tipine göre ortalama E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Şengör, 2011 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Okada ve diğ. ; Nguyen ve diğ., 2014 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005).

Şekil 4.18'e göre katkı tipine göre Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti karşılaştırmasında ortalama değerler dikkate alındığında serbest basınç mukavemeti arttıkça Elastisite modülünün artışı en çoktan en az sadece çimento, çimento ve uçucu kül karışımı, çimento ve kireç karışımı sıralaması şeklinde olmaktadır.

4.3. ELASTİSİTE MODÜLÜNE GÖRE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ İLİŞKİSİ

Çalışmanın bu kısmında ise Elastisite modülüne göre, E ya da E_{50} için, arazi ve labortuvar deneyleri sonucu elde edilen verilerin karşılaştırması yapılmıştır.

E için arazi deneylerinden elde edilen verilerin çalışmaları olan Egorova ve diğ. (2017) ve de Akçakal ve diğ. (2019)'nin çalışmaları sonucu oluşturulan grafik Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19: E için arazi deneylerinde maksimum ve minimum E-qu aralığı (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019).

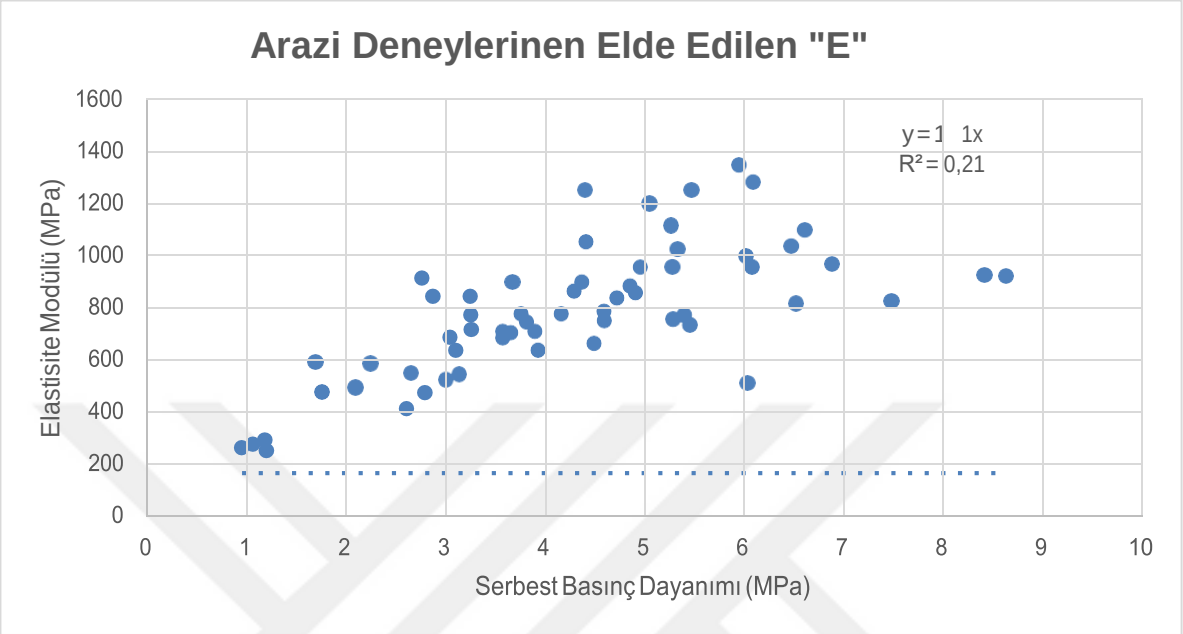
E için arazi deneylerinde minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.25)'de ve maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.26)'te verilmiştir.

$$E = 129q_u \tag{4.25}$$

$$E = 300q_u \tag{4.26}$$

Şekil 4.19'ten ve denklemler (4.25) ve (4.26)'ten elden edilen sonuçlara göre E için arazi deneylerinde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin 129 ila 300 katı aralığında değiştiği söylenebilir.

Şekil 4.20'de ise E için arazi deneylerinde ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E-q_u ilişkisi denklem (4.26)'da verilmiştir.

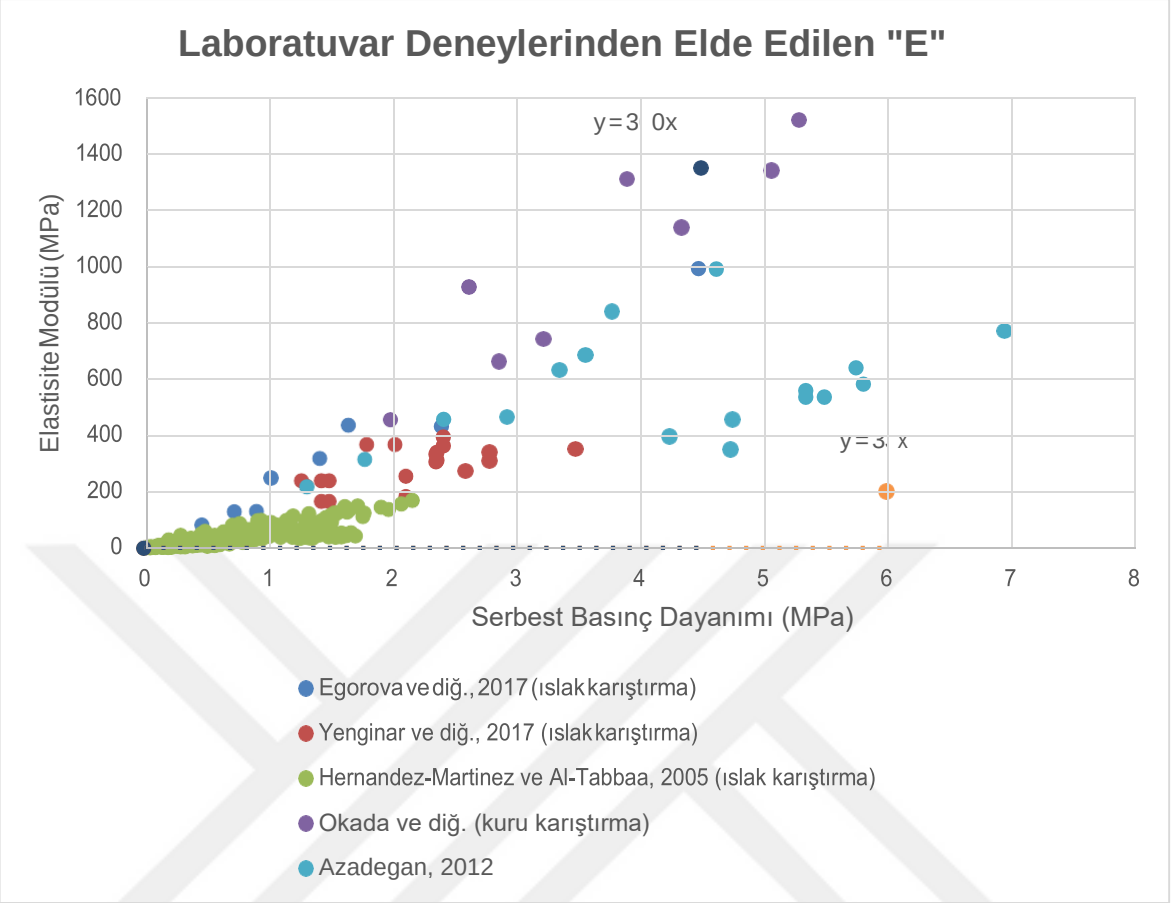


Şekil 4.20: E için göre arazi deneylerinde ortalama E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019).

$$E = 171q_u \quad ; \quad (R^2 = 0{,}21) \tag{4.27}$$

Şekil 4.20'ye göre E için arazi deneylerinde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin ortalama 171 katı olduğu sonucuna varılmıştır. Verinin çok dağınık olduğu görülmektedir.

E için laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin çalışmaları olan Egorova ve diğ. (2017) ; Yenginar ve diğ. (2017) ; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa (2005) ; Okada ve diğ. ; Azadegan (2012) 'nın çalışmaları sonucu oluşturulan grafik Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21: E için laboratuvar deneylerinde maksimum ve minimum E-qu aralığı (Egorova ve diğ., 2017 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005 ; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012).

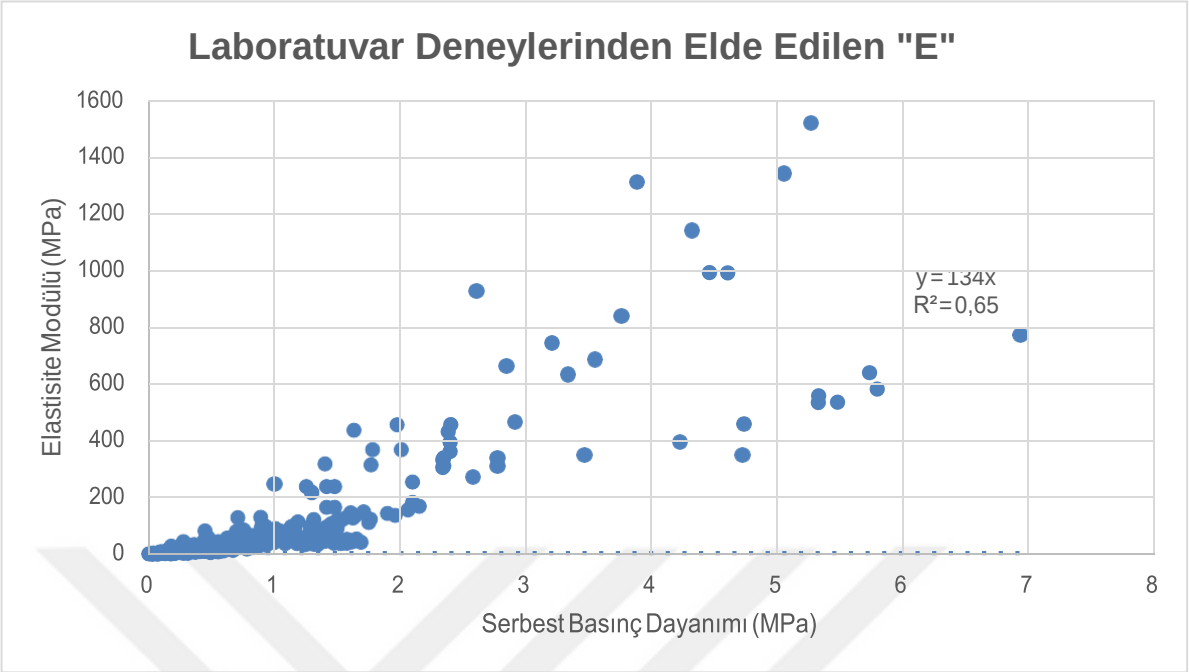
E için laboratuvar deneylerinde minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.28)'te ve maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.29)'da verilmiştir.

$$E = 33q_u \tag{4.28}$$

$$E = 300q_u \tag{4.29}$$

Şekil 4.21'den ve denklemler (4.28) ve (4.29)'dan elden edilen sonuçlara göre E için laboratuvar deneylerinde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin 33 ila 300 katı aralığında değiştiği söylenebilir.

Şekil 4.22'de ise E için laboratuvar deneylerinde ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E-q_u ilişkisi denklem (4.30)'da verilmiştir.

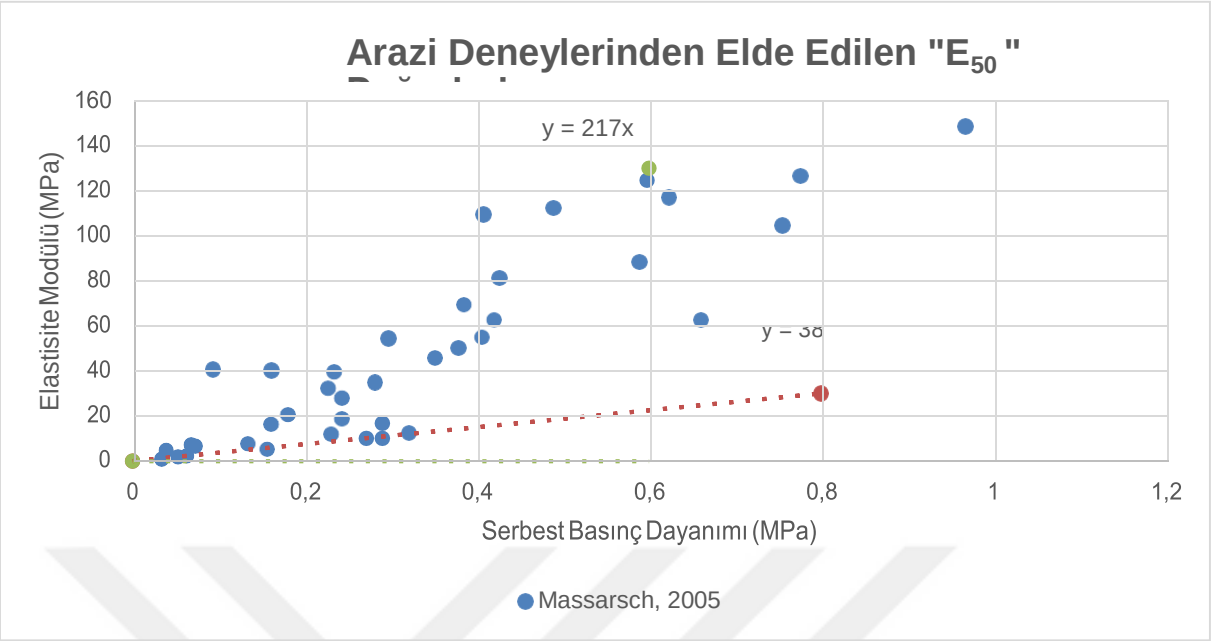


Şekil 4.22: E için laboratuvar deneylerinde ortalama E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005 ; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012).

$$E = 134q_u \quad ; \quad (R^2 = 0{,}65) \tag{4.30}$$

Şekil 4.22'ye göre E için laboratuvar deneylerinde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin ortalama 134 katı olduğu sonucuna varılmıştır.

E_{50}'ye göre arazi deneylerinden elde edilen verilerin çalışma olan Massarsch (2005)'ın çalışması sonucu oluşturulan grafik Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23: E_{50} için arazi deneyinde maksimum ve minimum E_{50}-qu aralığı (Massarsch, 2005).

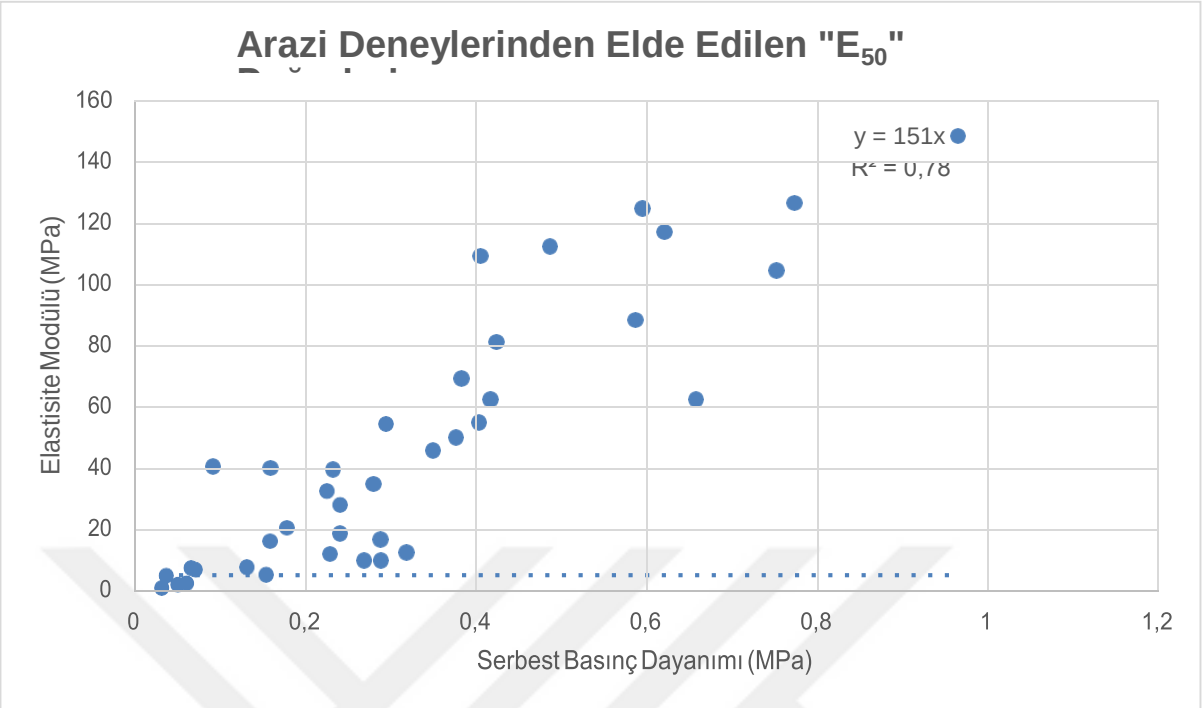
E_{50} için arazi deneyinde minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.31)'de ve maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.32)'de verilmiştir.

$$E_{50} = 38q_u \tag{4.31}$$

$$E_{50} = 217q_u \tag{4.32}$$

Şekil 4.23'ten ve denklemler (4.31) ve (4.32)'den elden edilen sonuçlara göre E_{50} için arazi deneyinde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin 38 ila 217 katı aralığında değiştiği söylenebilir.

Şekil 4.24'te ise E_{50} için arazi deneyinde ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E_{50}-q_u ilişkisi denklem (4.33)'te verilmiştir.

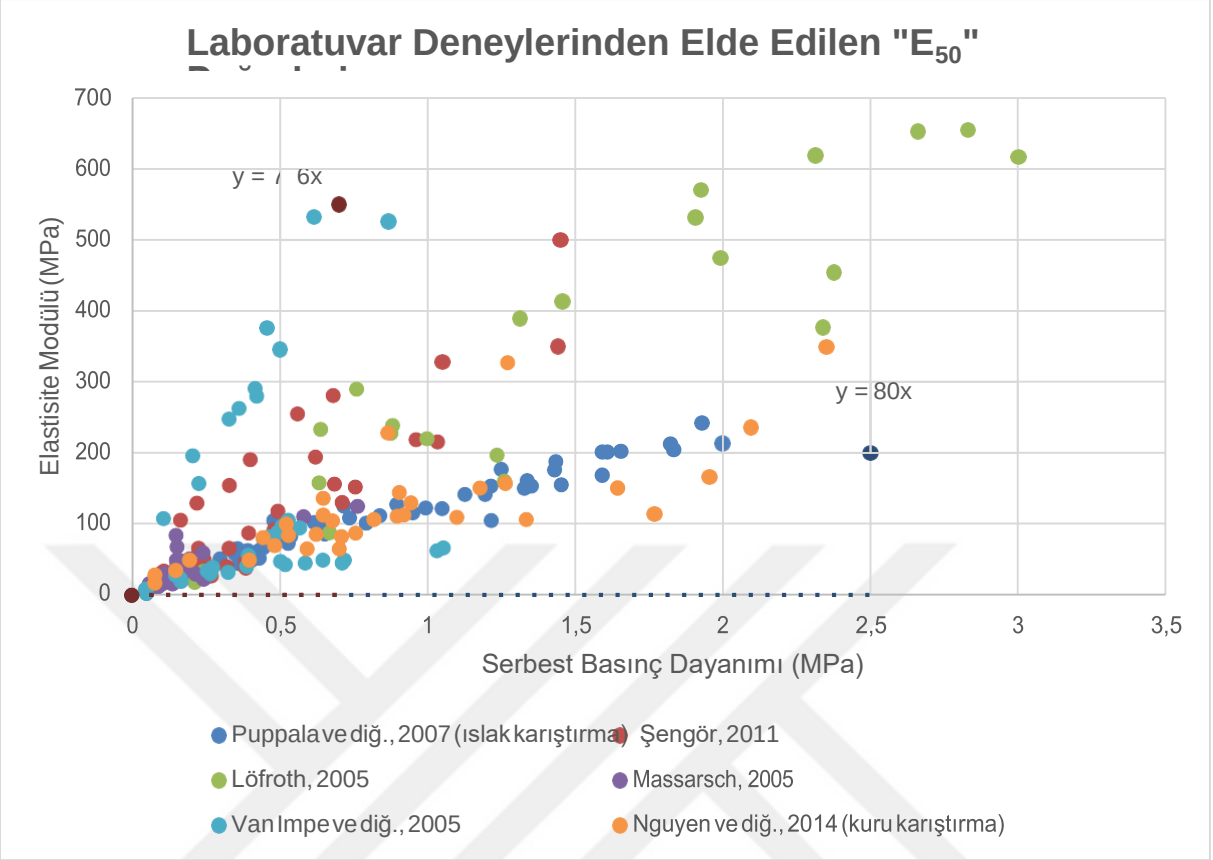


Şekil 4.24: E_{50} için arazi deneyinde ortalama E_{50}-qu ilişkisi (Massarsch, 2005).

$$E = 151q_u \quad ; \quad (R^2 = 0{,}78) \tag{4.33}$$

Şekil 4.24'te göre E_{50} için arazi deneylerinde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin ortalama 151 katı olduğu sonucuna varılmıştır ve bu sonuç literatür için önerilmektedir.

E_{50} için laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin çalışma olan Puppala ve diğ. (2007), Şengör (2011), Löfroth (2005), Massarsch (2005), Van Impe ve diğ. (2005) ve de Nguyen ve diğ. (2014)'nin çalışmaları sonucu oluşturulan grafik Şekil 4.25'te verilmiştir.



Şekil 4.25: E_{50} için laboratuvar deneylerinde maksimum ve minimum E_{50}-qu aralığı (Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Nguyen ve diğ., 2014).

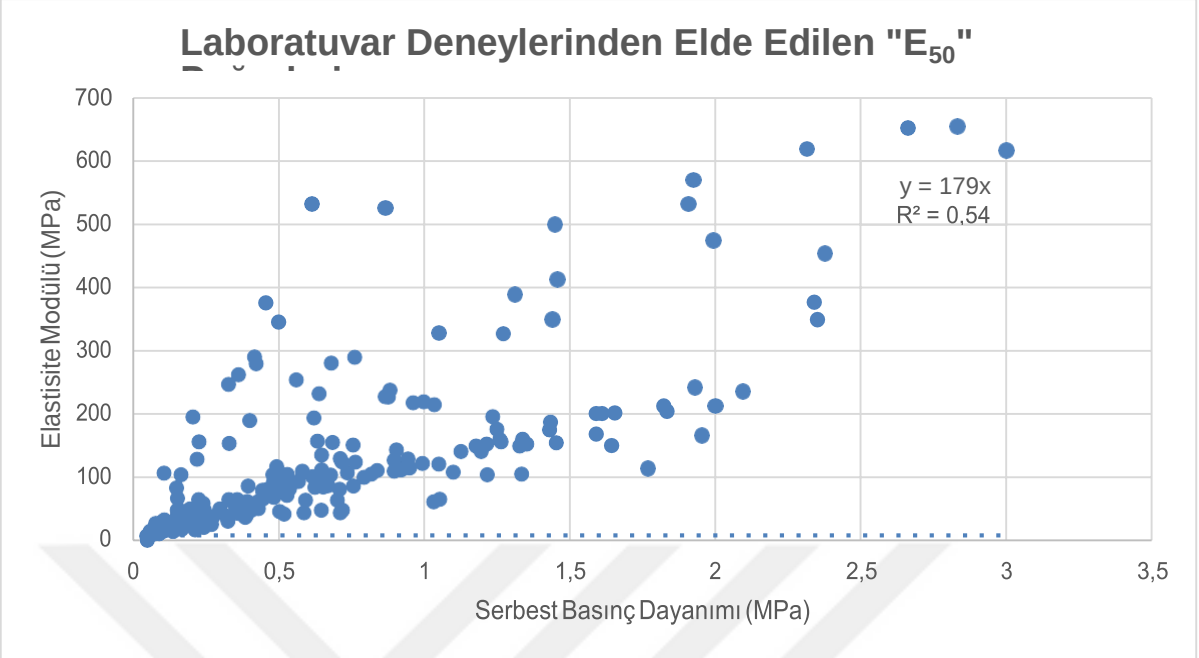
E_{50} için laboratuvar deneylerinde minimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi denklem (4.34)'te ve maksimum Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi ise denklem (4.35)'te verilmiştir.

$$E_{50} = 80q_u \tag{4.34}$$

$$E_{50} = 786q_u \tag{4.35}$$

Şekil 4.25'ten ve denklemler (4.34) ve (4.35)'ten elden edilen sonuçlara göre E_{50} için laboratuvar deneylerinde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin 80 ila 786 katı aralığında değiştiği söylenebilir.

Şekil 4.26'da ise E_{50} için laboratuvar deneylerinde ortalama eğim çizgisi ve bu çizgiye ait denklem gösterilmiştir. Elde edilen E_{50}-q_u ilişkisi denklem (4.36)'da verilmiştir.



Şekil 4.26: E_{50} için laboratuvar deneylerinde ortalama E_{50}-qu ilişkisi (Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfroth, 2005 ; Massarsch, 2005 ; Van Impe ve diğ., 2005 ; Nguyen ve diğ., 2014).

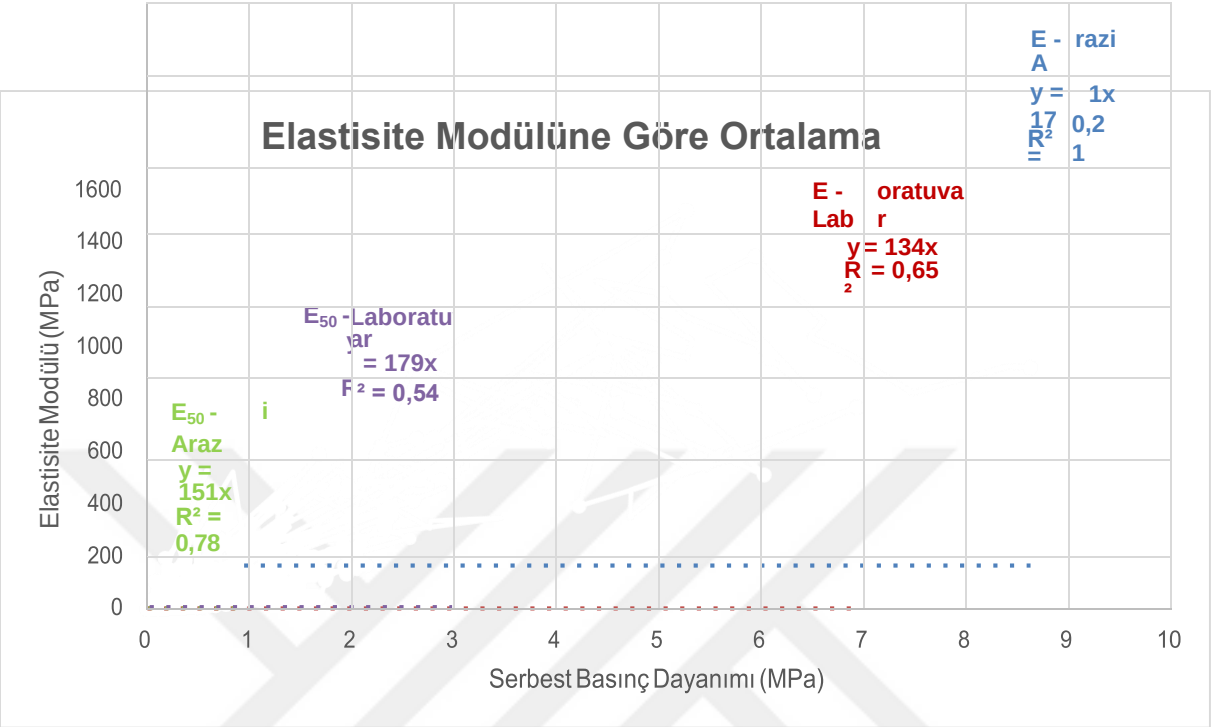
$$E = 179q_u \quad ; \quad (R^2 = 0{,}54) \tag{4.36}$$

Şekil 4.26'ya göre E_{50} için laboratuvar deneylerinde Elastisite modülünün, serbest basınç mukavemetinin ortalama 179 katı olduğu sonucuna varılmıştır.

Elastisite modülüne göre yapılan karşılaştırmaları özetlemek için sonuç olarak elastisite modüllerine ait ilgili bilgiler ve bunların ortalama eğim çizgileri ve E-q_u ilişkisine ait denklemler Tablo 4.3'te ve Şekil 4.27'de gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Elastisite modülüne göre E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005 ; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Massarsch, 2005 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011 ; Löfrtoh, 2005; Van Impe ve diğ., 2005).

	E-qu ilişkisi				
Elastisite Modülü	**Alt Limit**	**Üst Limit**	**Ortalama Değer**	**Veri Sayısı**	**R^2**
E-Arazi	129	300	171	60	0,21
E-Laboratuvar	33	300	134	249	0,65
E_{50}-Arazi	38	217	151	38	0,78
E_{50}-Laboratuvar	80	786	179	198	0,54



Şekil 4.27: Elastisite modülüne göre ortalama E-qu ilişkisi (Egorova ve diğ., 2017 ; Akçakal ve diğ., 2019 ; Yenginar ve diğ., 2017 ; Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005 ; Okada ve diğ. ; Azadegan, 2012 ; Massarsch, 2005 ; Puppala ve diğ., 2007 ; Şengör, 2011).

Şekil 4.27'ye göre Elastisite modülüne göre serbest basınç mukavemeti ilişkisinde ortalama değerler dikkate alındığında serbest basınç mukavemeti arttıkça Elastisite modülünün artışı en çoktan en aza E_{50}-laboratuvar, E-arazi, E_{50}-arazi ve E-laboratuvar sıralaması şeklinde olmaktadır. E değerinin başlangıç modülü olması nedeniyle E_{50}'den daha büyük olarak bulunduğu kabul edilmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tezde derin karıştırma yöntemine dair ilgili standartlar/şartnameler tanıtılıp incelenmiştir. Bu konuda çok kullanılan şartname ve rehberler incelenmiş ve hangi konuları kapsadıkları belirlenmiştir. Ülkemiz için oluşturulacak olan bir Derin Karıştırma Şartnamesi için bir altypaı hazırlanmıştır. İlgili standartlar ve şartnamelerde kolon dizilimleri, servis ömrü, nihai limit ve işletilebilirlik limit durumlarındaki gereksinimler, arazi ve laboratuvar incelemelerine dair bilgiler, iyileştirilmiş zeminin oturmasını etkileyebilecek faktörler, tasarım aşamasında takip edilecek adımlar, karıştırma yöntemine göre uygulamanın nasıl yapılacağı gibi konular incelenmiştir. Bir Türk şartnamesi için gerekenlerin adım adım tasarım aşamaları, ilgili analizler, kalite kontrol aşamasında yapılması gereken deneyleri sayısı ve türü, arazi ve laboratuvar deneylerine dair kapsamlı bilgiler gibi bölümler olması gerektiği değerlendirilmiştir.

Tezin diğer bölümünde derin karıştırma yönteminde zemin tipi, katkı tipi ve miktarı, kür süresi, karıştırma yöntemi gibi farklı koşullara bağlı olarak Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Çalışma kapsamında 12 ayrı literatür çalışmasından toplamda 545 adet veri toplanmış ve bu veriler bir veri tabanına işlenmiştir. Veri tabanı kullanılarak grafikler elde edilmiştir ve bu grafikler yardımı ile korelasyon denklemlerine ulaşılmıştır.

Zemin tipi, katkı tipi ve arazi ve laboratuvar numuneleri için elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkileri bulunmuştur. Zemin tipine göre Elastisite modülü ile serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişki araştırılırken killi, organik killi, siltli, kumlu ve turbalı zeminlere dair veriler incelenmiştir. Bu zeminlerden alınan numunelerin laboratuvar ya da arazi numunesi olduğu belirtilmiştir.

Katkı tipine göre Elastisite modülü ile serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişki araştırılırken çimento, çimento+uçucu kül ve çimento+kireç katkıları incelenmiştir. Katkı tipine göre Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti karşılaştırmasında ortalama değerler dikkate alındığında serbest basınç mukavemeti arttıkça Elastisite modülünün artışı en çoktan en aza sırası ile sadece çimento, çimento ve uçucu kül karışımı, çimento ve kireç karışımı sıralaması şeklinde olmaktadır.

Elastisite modülüne göre arazi ve laboratuvar verileri dikkate alınarak serbest basınç mukavemeti ilişki araştırılırken araziye ait E ve E_{50} değerleri ile laboratuvara ait E ve E_{50} değerlerine dair sonuçlar elde edilmiştir. Elastisite modülüne göre serbest basınç mukavemeti ilişkisinde ortalama değerler dikkate alındığında serbest basınç mukavemeti arttıkça Elastisite modülünün artışı en çoktan en aza E_{50}-laboratuvar, E-arazi, E_{50}-arazi ve E-laboratuvar sıralaması şeklinde olmaktadır.

Sonuç olarak bu tez, derin karıştırma yöntemine dair farklı koşullar altındaki Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti arasındaki korelasyonlar arasındaki ilişkiye dikkat çekmektedir. Elde edilen korelasyon sonuçları literatür için önerilmektedir ve daha sonraki çalışmalarda kullanılmak üzere tavsiye vermektedir.

KAYNAKLAR

Akçakal, Ö., Koçak, B., Velioğlu, N. ve Kulaç, H.F., 2019, Deep soil mixing design under seismic conditions – a case study, *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions – Silvestri & Moraci (Eds), Associazione Geotecnica Italiana, Rome, Italy*, ISBN 978-0-367-14328-2.

Azadegan, O., 2012, Laboratory study and FE analysis on the behaviour of the unreinforced lime/cement piles, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Iran.*

Baker, S., 2000, Deformation behaviour of lime/cement column stabilized clay, *Swedish Deep Stabilization Research Centre, Rapport 7, Chalmers University of Technology, Göteborg.*

Broms, B.B., 2003, Deep soil stabilization: design and construction of lime and lime/cement columns, *Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.*

Bruce, D. ve Bruce, M., 2003, The Practitioner's guide to deep mixing. *Grouting and Ground Treatment*, 474-488.

Bruce, M.E.C., Berg, R.R., Collin, J.G., Filz, G.M., Terashi, M. ve Yang, D.S., 2013, Federal highway administration design manual: deep mixing for embankment and foundation support (No. FHWA-HRT-13-046).

Carlsten, P. ve Ekstrom, J., 1997, Lime and Lime Cement Columns: Guide for Project Planning, Construction and Inspection, SGF Report 4:95E, *Swedish Geotechnical Society, Linköping, Sweden.*

Coastal Development Institute of Technology, 2002, The Deep Mixing Method: Principle, Design, and Construction, *Balkema, Lisse, Netherlands.*

Çınar, F.T., 2016, *Derin karıştırma yönteminde iyileştirme seviyesini etkileyen faktörlerin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.

Das B.M., 1984, Principles of foundation engineering, *Brooks Cole Engineering Division, A.B.D.*

Egorova, A.A., Rybak, J., Stefaniuk, D. ve Zajaczkowski, P., 2017, Basic aspects of deep soil mixing technology control, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 245.

EuroSoilStab, 2002, Development of Design and Construction Methods to Stabilise Soft Organic Soils—Design Guide: Soft Soil Stabilization, CT97-0351, Project No. BE 96-3177, *IHS BRE Press, Watford, UK.*

Filz, G., Adams, T., Navin, M. ve Templeton, A.E., 2012, Design of deep mixing for support of levees and floodwalls, *In Keynote Lecture, Proc. of 4th Int'l Conference on Grouting and Deep Mixing, New Orleans, LA, LF Johnson, DA Bruce, MJ Byle Eds., Geotechnical Special Publication* (Vol. 228).

Hebib, S. ve Farrell, E.R., 2003,Some experiences on the stabilization of irish peats, *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 107‑120.

Hernandez-Martinez, F.G. ve Al-Tabbaa, A., 2005, Mechanical properties of stabilised peat based on laboratory testing, *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10.3233/978-1-61499-656-9-1193.

Hodges, D.K., Filz, G.M., ve Weatherby, D.E., 2008, Laboratory Mixing, Curing, and Strength Testing of Soil-Cement Specimens Applicable to the Wet Method of Deep Mixing, *CGPR Report No. 48, Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research, Blacksburg, VA.*

Jacobson, J.R., Filz, G.M., ve Mitchell, J.K., 2003, Factors affecting strength gain in lime-cement columns and development of a laboratory testing procedure, *Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA.*

Jacobson, J.R., Filz, G.M., ve Mitchell, J.K., 2005, Factors affecting strength of lime- cement columns based on a laboratory study of three organic soils, *Proceedings of the International Conference on Deep Mixing—Best Practice and Recent Advances, Deep Mixing'05, 87–94, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sweden.*

Japanese Geotechnical Society, 2000, Practice for Making and Curing Stabilized Soil Specimens Without Compaction, JGS T 0821-2000, *Japanese Geotechnical Society, Tokyo, Japan.*

Kitazume, M., Okano, K., ve Miyajima, S., 2000, Centrifuge model tests on failure envelope of column-type DMM-improved ground, *Soils and Foundations*, 40(4), 43‑55.

Kitazume M., ve Terashi M., 2013, The deep mixing method, *CRC Press, Balkema,* ISBN: 978-1-138-00005-6.

Löfroth, H., 2005, Properties of 10-year-old lime-cement columns, *Swedish Geotechnical Institute/Chalmers University of Technology*. SE-581 *93 Linköping, Sweden from International Conference on Deep Mixing Vol1.1. - Best Practise and Recent Advances.*

Massarch, K.R., 2005, Deformation properties of stabilized soil columns, *Vibisol International AB,* SE-168 41 BROMMA, *Sweden - from International Conference on Deep Mixing Vol1.1. - Best Practise and Recent Advances.*

McGinn, A.J. ve O' Rourke, T.D., 2003, Performance of deep mixing methods at fort point channel, *Federal Highway Administration, Washington, DC.*

Mitchell, J.K., 1976, Stabilisation of soils for foundations of structures, *Geot. Eng. Univ. California.*

Miura, N., Horpibulsuk, S., ve Nagaraj, T.S., 2002, Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soils and Foundations*, 41(5), 33–45.

Navin, M.P. ve Filz, G.M., 2006, Simplified reliability-based procedures for design and construction quality assurance of foundations improved by the deep mixing method, *Federal Highway Administration, Washington, DC.*

Niina, A., Saitoh, S., Babasaki, R., Miyata, T. ve Tanaka, K., 1981, Engineering properties of improved soil obtained by stabilizing alluvial clay from various regions with cement slurry, *Takenaka Technical Research Report*, 25, 1-21.

Nguyen, H.T., Kitazume, M., Luong, B.T. ve Bui, T.T., 2014, Laboratory investigation on an giang soil mixed with dry cement, Malaysian Journal of Civil Engineering, E-ISSN 2600-9498.

Okada, W., Murray, G. ve Quickfall, G., Deep soil mixing in liquefiable pumiceous sand, New Zealand.

Ou, C., Wu, T., ve Hsieh, H., 1996, Analysis of deep excavation with column type of ground improvement in soft clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(9), 709‑716.

Porbaha, A., 1998, State of the art in deep mixing technology: Part I. basic concepts and overview. *Ground Improvement*, 2(2), 81-92.

Porbaha, A., Weatherby, D., Macnab, A., Lambrechts, J., Burke, G., Yang, D., ve Puppala, A.J., 2005, Regional Report: North American practice of deep mixing technology, *International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances*, R47‑R73, *Swedish Deep Stabilization Research Centre, Stockholm, Sweden.*

Puppala, A.J., Madhyannapu, R.S., Nazarian, S., Yuan, D. ve Hoyos, L., 2008, Deep soil mixing technology for mitigation of pavement roughness, Report 0-5179-1.

Smith M.E., 2005, *Design of bridging layers in geosynthetic-reinforced column supported embankments*, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Şengör, M.Y., 2011, *The deformantion characteristics of deep mixed columns in soft clayey soils: a model study*, Thesis (PhD), Ankara.

Terashi M., 1997, Deep mixing method - brief state-of-the-art, *Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, 2475-2478.*

Terashi, M., 2003, The state of practice in deep mixing methods, *Grouting and Ground Treatment: Proceedings of the Third International Conference, Geotechnical Special Publication* 120, 25–49, *American Society of Civil Engineers, Reston, VA.*

Tuncan, A., 2007, Yapı denetimi alanında hizmet veren yapı denetçileri ve yardımcı kontrol mühendisleri için hazırlanan meslek içi eğitim programı kurs notları, *İnşaat Mühendisleri Odası, Eskişehir.*

Van Impe, W.F. ve Verástegui Flores R.D., 2005, Considerations on laboratory test results of cement stabilized sludge, *Laboratory of Soil Mechanics, Ghent University, 905 Technologiepark, B-9052 Zwijnaarde, Belgium - Mengé, P. & Van den Broeck, M. Dredging International, Hydro Soil Services-HSS, 30 Scheldedijk, B-2070 Zwijndrecht, Belgium - from International Conference on Deep Mixing Vol1.1. - Best Practise and Recent Advances.*

Yenginar, Y., Olgun, M. Ve Tan, Ö., 2017, Siltli zeminlerde oluşturulan derin karıştırma kolonlarının dayanım özelliklerinin araştırılması, *7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul*.

EKLER

EK 1. Egorova ve diğ., 2017

Katkı Tipi	Çimento Miktarı (kg/m^3)	Uçucu Kül Miktarı (kg/m^3)	Kür Süresi (gün)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Deney Tipi	Karıştırma Yöntemi
çimento	160	0	14	1,71	593	arazi	ıslak karıştırma
çimento	200	0	14	0,97	263	arazi	ıslak karıştırma
çimento + uçucu kül	136	72	14	1,2	293	arazi	ıslak karıştırma
çimento + uçucu kül	170	90	14	1,78	477	arazi	ıslak karıştırma
çimento + uçucu kül	174	116	14	1,08	277	arazi	ıslak karıştırma
çimento + uçucu kül	145	145	7	0,91	130	laboratuvar	ıslak karıştırma
çimento + uçucu kül	145	145	7	1,42	316	laboratuvar	ıslak karıştırma
çimento + uçucu kül	116	174	7	0,47	82	laboratuvar	ıslak karıştırma
çimento + uçucu kül	116	174	7	0,73	129	laboratuvar	ıslak karıştırma
çimento	160	0	28	2,4	431	laboratuvar	ıslak karıştırma
çimento	200	0	28	4,48	993	laboratuvar	ıslak karıştırma
çimento + uçucu kül	136	72	28	1,02	247	laboratuvar	ıslak karıştırma
çimento + uçucu kül	170	90	28	1,65	434	laboratuvar	ıslak karıştırma

EK 2. Yenginar ve diğ., 2017

Zemin Tipi	Katkı Tipi	Çimento Miktarı (%)	Uçucu Kül Miktarı (%)	(W/B) (%)	Su Muh. (%)	Akışkan laştırıcı (%)	Kür Süresi (gün)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (Mpa)	Deney Tipi	Karıştırma Yöntemi
silt	çimento+uçucu kül	15%	10%	0.75%	19%	1%	7	2,0245	365,5	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	15%	10%	0.75%	15%	1.5%	7	2,1137	253,3	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	15%	10%	0.75%	23%	1.5%	7	2,1137	181,5	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	15%	10%	0.75%	19%	2%	7	1,7981	365,5	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	10%	0.75%	19%	1.5%	7	1,4954	237,6	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	10%	0.75%	19%	1%	7	1,4323	237,6	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	10%	0.75%	15%	1.5%	7	1,4954	164,7	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	11%	10%	0.75%	19%	1%	7	1,3139	218,1	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	10%	0.75%	15%	1%	7	1,4323	164,7	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	10%	0.75%	19%	2%	7	1,2721	237,6	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	15%	25%	1%	27%	1.5%	28	3,4867	350,1	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	25%	0.75%	15%	1.5%	28	2,7903	338,7	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	25%	0.75%	27%	1.5%	28	2,7903	311,1	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	10%	0.75%	15%	1.5%	28	2,4161	393,6	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	10%	0.75%	27%	1.5%	28	2,4161	361,5	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	25%	1%	27%	1.5%	28	2,3646	311,1	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	25%	1%	15%	1.5%	28	2,3646	338,7	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	11%	10%	0.75%	15%	1.5%	28	2,3577	332,2	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	11%	10%	0.75%	27%	1.5%	28	2,3577	305,1	laboratuvar	ıslak karıştırma
silt	çimento+uçucu kül	7%	40%	0.75%	15%	1.5%	28	2,5962	271,5	laboratuvar	ıslak karıştırma

EK 3. Akçakal ve diğ., 2019

Zemin Tipi	Katkı Tipi	Çimento Miktarı (kg/m^3)	Serbest Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Deney Tipi	Karıştırma Yöntemi
kil	çimento	350	1,21632	252,549	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	2,62642	413,86	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	2,11159	495,133	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	2,81002	474,527	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	2,26634	586,194	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	2,67087	550,546	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,02111	525,053	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,1538	545,239	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,12089	636,394	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,06387	687,056	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,27632	717,328	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,60008	686,785	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,95167	641,037	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,67916	706,998	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,59838	712,102	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,27259	773,027	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	2,89049	844,105	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	2,78049	915,048	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,26783	843,915	arazi	kuru karıştırma

kil	çimento	350	3,78165	777,832	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,8373	747,424	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,92011	711,939	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,513	666,069	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,18381	777,628	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	3,69307	899,639	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,31209	863,639	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,6121	787,538	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,61447	752,094	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	6,05138	513,392	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	5,47343	736,469	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	5,31121	756,804	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	5,41743	771,941	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,74275	838,105	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,39014	899,043	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,92907	858,264	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,87375	883,608	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,97624	954,442	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,43358	1050,92	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	5,29763	959,343	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	5,34684	1025,14	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	4,42001	1253,46	arazi	kuru karıştırma

kil	çimento	350	5,06686	1202,5	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	5,28711	1116,31	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	6,04561	999,471	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	6,10195	958,936	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	6,54042	816,942	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	5,49243	1252,92	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	5,96688	1347,19	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	6,10704	1282,98	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	6,62866	1100,44	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	6,49868	1039,75	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	6,90559	968,655	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	7,50492	826,58	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	8,4365	927,374	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento	350	8,65133	922,202	arazi	kuru karıştırma

EK 4. Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa, 2005

Zemin Tipi	Katkı Tipi	Kür Süresi (gün)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Deney Tipi	Karıştırma Yöntemi
turba	çimento + turba	28	0,0238663	2,32258	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,0417661	4,06452	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,0596659	5,22581	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,0536993	1,16129	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,0954654	1,74194	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,0954654	5,22581	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,113365	7,54839	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,119332	10,4516	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,137232	8,12903	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,137232	5,80645	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,155131	3,48387	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,167064	5,80645	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,184964	6,96774	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,202864	4,06452	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,167064	13,3548	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,22673	11,6129	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,274463	6,96774	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,304296	10,4516	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,286396	15,0968	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,250597	16,2581	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,22673	17,4194	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,22673	23,8065	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,202864	29,0323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,286396	29,0323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,304296	27,871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,328162	17,4194	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,340095	14,5161	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,340095	12,1935	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,363962	13,9355	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,393795	13,9355	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,357995	20,9032	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,429594	13,9355	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,429594	17,4194	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,405728	19,1613	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,48926	15,6774	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,477327	19,1613	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,441527	23,2258	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,417661	26,7097	laboratuvar	ıslak karıştırma

turba	çimento + turba	28	0,381862	35,4194	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,298329	45,2903	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,459427	30,7742	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,483294	23,8065	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,531026	20,3226	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,560859	22,0645	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,536993	24,9577	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,519093	29,0323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,560859	31,3548	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,590692	27,871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,620525	30,1935	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,608592	34,3226	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,536993	38,3226	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,52506	40,6452	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,465394	49,9355	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,495227	58,9355	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,572792	45,2903	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,704057	36,5806	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,692124	46,4516	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,662124	50,4516	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,644391	58,0645	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,883055	58,0645	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,75179	67,3548	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,71599	80,129	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,757757	78,9677	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,787589	74,3226	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,847255	66,1935	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,900955	65,0323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,954654	66,1935	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,775656	85,9355	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,918854	94,7742	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,990453	73,1613	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,00239	77,8065	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,960621	88,2581	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,918854	96,9677	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,948687	98,129	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,02625	90,5806	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,07399	81,2903	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,18138	78,9677	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,30072	81,871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,15155	97,5484	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,18138	98,7097	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,18138	102,774	laboratuvar	ıslak karıştırma

turba	çimento + turba	28	1,20525	113,806	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,30668	100,452	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,33652	97,5484	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,42005	90,5806	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,43198	93,4839	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,43198	96,3871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,47971	96,3871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,51551	92,9032	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,46778	107,419	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,33055	121,935	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,50358	113,806	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,50955	116,129	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,53938	123,677	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,55131	121,355	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,59308	130,355	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,64081	127,161	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,76611	111,484	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,77804	123,677	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,65871	135,871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,62291	146,323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,72434	148,645	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,91527	144	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,97494	136,452	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	2,07637	156,194	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	2,16587	168,387	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,149165	3,48387	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,196897	2,32258	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,22673	3,48387	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,184964	7,54839	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,22673	11,0323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,274463	9,29032	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,298329	4,64516	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,334129	4,64516	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,328162	8,12903	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,310263	18,5806	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,393795	8,12903	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,429594	9,87097	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,465394	11,0323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,513126	6,96774	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,48926	13,3548	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,572792	9,29032	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,614558	12,7742	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,620525	17,4194	laboratuvar	ıslak karıştırma

turba	çimento + turba	28	0,447494	23,2258	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,542959	29,0323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,596659	21,4839	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,614558	26,7097	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,680191	23,2253	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,692124	15,0968	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,799523	19,7419	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,775656	25,5484	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,739857	29,0323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,674224	29,6129	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,686158	36	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,763723	37,1613	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,763723	33,0968	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,829356	29,0323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,859189	27,871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,889021	27,871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,954654	32,5161	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,829356	39,4839	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,805489	47,0323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,835322	42,3871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,841289	47,6129	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,841289	51,0968	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,823389	55,1613	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,912888	60,3871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,883055	46,4516	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,906921	47,6129	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,906921	40,6452	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,930788	40,6452	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,948687	51,0968	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	0,984487	44,7097	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,01432	41,8065	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,00239	59,2258	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,06205	56,3226	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,10382	51,0968	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,10382	38,3226	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,11575	46,4516	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,14558	49,9355	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,21718	58,0645	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,21718	49,3548	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,19928	38,3226	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,25298	33,6774	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,28282	37,1613	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,25895	39,4839	laboratuvar	ıslak karıştırma

turba	çimento + turba	28	1,27088	45,2903	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,28878	47,0323	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,31862	44,129	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,33055	36,5806	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,36038	34,8387	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,36635	37,7419	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,33652	48,7742	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,33652	51,6774	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,31265	55,7419	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,31265	61,5484	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,15752	77,8065	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,44988	70,8387	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,36038	55,8387	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,38425	51,0968	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,42005	46,4516	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,42005	51,6774	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,41408	55,1613	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,45585	52,2581	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,50955	60,3871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,50358	48,1935	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,50955	45,871	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,49165	39,4839	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,54535	38,3226	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,59308	39,4839	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,63484	44,7097	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,61098	49,3548	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,59308	53,4194	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,67064	54	laboratuvar	ıslak karıştırma
turba	çimento + turba	28	1,70644	42,9677	laboratuvar	ıslak karıştırma

EK 5. Puppala ve diğ., 2007

Zemin Tipi	Katkı Tipi	Kür Süresi (gün)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Deney Tipi	Karıştırma Yöntemi	Kireç-Çimento Oranı	Arazi No
kil	çimento + kireç	7	0,361858	44,1176	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 2
kil	çimento + kireç	7	0,405868	49,0196	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 2
kil	çimento + kireç	7	0,430318	51,9608	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 2
kil	çimento + kireç	7	0,444988	66,6667	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 2
kil	çimento + kireç	7	0,528117	72,549	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 2
kil	çimento + kireç	7	0,616137	101,961	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 2
kil	çimento + kireç	7	0,792176	100,98	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:100	Site 2
kil	çimento + kireç	7	0,894866	127,451	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:100	Site 2
kil	çimento + kireç	7	1,24694	176,471	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:100	Site 2
kil	çimento + kireç	7	0,992665	122,549	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 2
kil	çimento + kireç	7	1,32518	150	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 2
kil	çimento + kireç	7	1,82396	212,745	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 2
kil	çimento + kireç	7	0,298289	50,9804	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 1
kil	çimento + kireç	7	0,347188	58,8235	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 1
kil	çimento + kireç	7	0,356968	65,6863	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 1
kil	çimento + kireç	7	0,391198	62,7451	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 1
kil	çimento + kireç	7	0,444988	78,4314	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 1
kil	çimento + kireç	7	0,479218	104,902	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 1
kil	çimento + kireç	7	0,948655	115,686	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:100	Site 1

kil	çimento + kireç	7	1,19315	141,176	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:100	Site 1
kil	çimento + kireç	7	1,34963	152,941	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:100	Site 1
kil	çimento + kireç	7	1,12469	141,176	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 1
kil	çimento + kireç	7	1,21271	152,941	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 1
kil	çimento + kireç	7	1,42787	175,49	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 1
kil	çimento + kireç	14	0,364217	61,3383	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 1
kil	çimento + kireç	14	0,479233	73,6059	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 1
kil	çimento + kireç	14	0,536741	82,5279	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 1
kil	çimento + kireç	14	0,651757	85,8736	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 1
kil	çimento + kireç	14	0,734824	108,178	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 1
kil	çimento + kireç	14	0,837061	111,524	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 1
kil	çimento + kireç	14	1,21406	104,833	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:75	Site 1
kil	çimento + kireç	14	1,43131	187,361	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:75	Site 1
kil	çimento + kireç	14	1,83387	204,089	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:75	Site 1
kil	çimento + kireç	14	1,45048	155,019	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 1
kil	çimento + kireç	14	1,65495	201,859	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 1
kil	çimento + kireç	14	1,92971	242,007	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 1
kil	çimento + kireç	14	0,428115	62,4535	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 2
kil	çimento + kireç	14	0,453674	75,8364	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 2
kil	çimento + kireç	14	0,485623	81,4126	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-100:0	Site 2
kil	çimento + kireç	14	0,517572	79,1822	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 2
kil	çimento + kireç	14	0,651757	95,9108	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 2

kil	çimento + kireç	14	0,715655	124,907	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-75:25	Site 2
kil	çimento + kireç	14	1,04792	121,561	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:75	Site 2
kil	çimento + kireç	14	1,33546	160,595	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:75	Site 2
kil	çimento + kireç	14	1,59105	200,743	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-25:75	Site 2
kil	çimento + kireç	14	1,59105	168,401	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 2
kil	çimento + kireç	14	1,61022	200,743	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 2
kil	çimento + kireç	14	2	213,011	laboratuvar	ıslak karıştırma	LC-0:100	Site 2

EK 6. Şengör, 2011

Zemin Tipi	Katkı Tipi	Çimento Miktarı (%)	Uçucu Kül Miktarı (%)	Mermer Tozu Miktarı (%)	Kür Süresi (gün)	Serbest Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Deney Tipi
kil	çimento + mermer tozu	5%	0%	8%	7	0,2	32,25	laboratuvar
kil	çimento + mermer tozu	5%	0%	8%	28	0,26	27,1	laboratuvar
kil	çimento + mermer tozu	5%	0%	8%	90	0,32	40	laboratuvar
kil	çimento + mermer tozu	5%	0%	15%	7	0,217	36	laboratuvar
kil	çimento + mermer tozu	5%	0%	15%	28	0,385	47,1	laboratuvar
kil	çimento + mermer tozu	5%	0%	15%	90	0,269	27	laboratuvar
kil	çimento + mermer tozu	5%	0%	15%	365	0,385	38	laboratuvar
kil	çimento + mermer tozu	5%	0%	20%	7	0,245	49,2	laboratuvar
kil	çimento + mermer tozu	5%	0%	20%	28	0,329	66	laboratuvar
kil	çimento + mermer tozu	5%	0%	20%	90	0,238	40	laboratuvar
kil	çimento + mermer tozu	5%	0%	20%	365	0,48	91,7	laboratuvar
kil	çimento	10%	0%	0%	7	0,493	117,6	laboratuvar
kil	çimento	10%	0%	0%	28	0,684	155,5	laboratuvar
kil	çimento	10%	0%	0%	90	1,033	215	laboratuvar

kil	çimento	15%	0%	0%	7	0,62	193,8	laboratuvar
kil	çimento	15%	0%	0%	28	1,051	328,1	laboratuvar
kil	çimento	15%	0%	0%	90	1,45	500	laboratuvar
kil	çimento	5%	0%	0%	7	0,1	31,2	laboratuvar
kil	çimento	5%	0%	0%	28	0,165	105	laboratuvar
kil	çimento	5%	0%	0%	90	0,22	129	laboratuvar
kil	çimento	5%	0%	0%	365	0,115	25	laboratuvar
kil	çimento + uçucu kül	5%	20%	0%	7	0,108	34	laboratuvar
kil	çimento + uçucu kül	5%	20%	0%	28	0,33	154	laboratuvar
kil	çimento + uçucu kül	5%	20%	0%	90	0,56	254	laboratuvar
kil	çimento + uçucu kül	5%	20%	0%	365	0,71	130	laboratuvar
kil	çimento	15%	0%	0%	7	0,225	66	laboratuvar
kil	çimento	15%	0%	0%	28	0,4	190	laboratuvar
kil	çimento	15%	0%	0%	90	0,68	280	laboratuvar
kil	çimento	15%	0%	0%	365	0,755	151,5	laboratuvar
kil	çimento	30%	0%	0%	7	0,395	87	laboratuvar
kil	çimento	30%	0%	0%	28	0,96	218	laboratuvar
kil	çimento	30%	0%	0%	90	1,44	350	laboratuvar

EK 7. Löfroth, 2005

Zemin Tipi	Katkı Tipi	Çimento Miktarı (%)	Kireç Miktarı (%)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Deney Tipi	Karıştırma Yöntemi	Derinlik (m)
kil	çimento + kireç	50%	50%	0,668403	87,7419	laboratuvar	kuru karıştırma	4,3 m kil
kil	çimento + kireç	50%	50%	1,23351	196,129	laboratuvar	kuru karıştırma	4,3 m kil
kil	çimento + kireç	50%	50%	1,45833	412,903	laboratuvar	kuru karıştırma	4,3 m kil
kil	çimento + kireç	50%	50%	1,90799	531,903	laboratuvar	kuru karıştırma	4,3 m kil
kil	çimento + kireç	50%	50%	1,99306	474,839	laboratuvar	kuru karıştırma	4,3 m kil
kil	çimento + kireç	50%	50%	2,33941	376,774	laboratuvar	kuru karıştırma	4,3 m kil
kil	çimento + kireç	50%	50%	2,37587	454,194	laboratuvar	kuru karıştırma	4,3 m kil
kil	çimento + kireç	50%	50%	2,3151	619,355	laboratuvar	kuru karıştırma	4,3 m kil
kil	çimento + kireç	50%	50%	2,66146	652,903	laboratuvar	kuru karıştırma	4,3 m kil
kil	çimento + kireç	50%	50%	2,8316	655,484	laboratuvar	kuru karıştırma	4,3 m kil
kil	çimento + kireç	50%	50%	3,00174	616,774	laboratuvar	kuru karıştırma	4,3 m kil
kil	çimento + kireç	50%	50%	0,164063	20,6452	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili
kil	çimento + kireç	50%	50%	0,212674	18,0645	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili
kil	çimento + kireç	50%	50%	0,243056	33,5484	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili
kil	çimento + kireç	50%	50%	0,243056	23,2258	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili
kil	çimento + kireç	50%	50%	0,631944	157,419	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili
kil	çimento + kireç	50%	50%	0,638021	232,258	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili

kil	çimento + kireç	50%	50%	0,759549	289,032	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili
kil	çimento + kireç	50%	50%	0,881076	237,742	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili
kil	çimento + kireç	50%	50%	0,875	227,097	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili
kil	çimento + kireç	50%	50%	0,996528	219,355	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili
kil	çimento + kireç	50%	50%	1,25781	160	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili
kil	çimento + kireç	50%	50%	1,3125	389,677	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili
kil	çimento + kireç	50%	50%	1,92622	570,323	laboratuvar	kuru karıştırma	2,3 m gitya kili

EK 8. Massarsch, 2005

Zemin Tipi	Katkı Tipi	Çimento Miktarı (%)	Kireç Miktarı (%)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Deney Tipi	Karıştırma Yöntemi
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0339559	0,955224	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0390492	4,77612	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0526316	1,91045	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0628183	2,38806	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0679117	7,16418	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0730051	6,68657	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,134126	7,64179	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,156197	5,25373	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,16129	16,2388	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,179966	20,5373	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0933786	40,597	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,16129	40,1194	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,234295	39,6418	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,227504	32,4776	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,242784	28,1791	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,242784	18,6269	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,2309	11,9403	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,271647	10,0299	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,290323	10,0299	arazi	kuru karıştırma

kil	çimento+kireç	50%	50%	0,320883	12,4179	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,290323	16,7464	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,281834	34,8657	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,297114	54,4478	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,351443	45,8507	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,378608	50,1493	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,405772	54,9254	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,419355	62,5672	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,385399	69,2537	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,426146	81,194	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,40747	109,373	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,488964	112,239	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,589134	88,3582	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,660441	62,5672	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,62309	117,015	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,597623	124,657	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,75518	104,597	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,775891	126,567	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,967742	148,537	arazi	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0594228	16,2388	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0696095	13,8507	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0713073	11,9403	laboratuvar	kuru karıştırma

kil	çimento+kireç	50%	50%	0,089983	12,4179	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0797963	20,5373	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,0916808	24,3582	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,103565	16,2388	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,137521	15,7612	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,132428	21,4925	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,13073	24,8358	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,110357	30,0896	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,154499	34,8657	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,151104	38,6866	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,151104	49,194	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,16129	48,7164	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,152801	67,8209	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,149406	84,0597	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,188455	36,7761	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,21562	29,6119	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,242784	22,4478	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,195246	51,1045	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,241087	59,7015	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,519525	90,2687	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,580645	110,328	laboratuvar	kuru karıştırma
kil	çimento+kireç	50%	50%	0,762309	124,657	laboratuvar	kuru karıştırma

EK 9. Van Impe ve diğ., 2005

Zemin Tipi	Katkı Tipi	Kür Süresi (gün)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Deney Tipi
silt	çimento	7	0,226464	156,748	laboratuvar
silt	çimento	28	0,32538	32,2086	laboratuvar
silt	çimento	28	0,387852	40,7975	laboratuvar
silt	çimento	28	0,393059	55,8282	laboratuvar
silt	Portland çimentosu	15	0,361822	261,963	laboratuvar
silt	çimento	49	0,416486	289,877	laboratuvar
silt	çimento	49	0,421692	279,141	laboratuvar
silt	çimento	28	0,460738	81,5951	laboratuvar
silt	çimento	28	0,491974	88,0368	laboratuvar
silt	çimento	28	0,507592	96,6258	laboratuvar
silt	çimento	28	0,518004	90,184	laboratuvar
silt	çimento	28	0,528416	105,215	laboratuvar
silt	çimento	120	0,567462	94,4785	laboratuvar
silt	çimento	78	0,455531	375,767	laboratuvar
silt	çimento	173	0,614317	532,515	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	28	0,0468547	8,58896	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	28	0,0494577	2,14724	laboratuvar

silt	Yüksek fırın çimentosu	7	0,106725	107,362	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	28	0,148373	27,9141	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	28	0,163991	23,6196	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	28	0,166594	19,3252	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	28	0,255098	34,3558	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	28	0,26551	30,0613	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	28	0,273319	38,6503	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	14	0,20564	195,399	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	28	0,327983	246,933	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	28	0,502386	47,2393	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	28	0,518004	42,9448	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	42	0,499783	345,706	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	120	0,585683	45,092	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	120	0,645553	49,3865	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	120	0,710629	45,092	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	120	0,718438	49,3865	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	120	1,0308	62,2699	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	120	1,05163	66,5644	laboratuvar
silt	Yüksek fırın çimentosu	98	0,866811	526,074	laboratuvar

EK 10. Okada ve diğ.

Zemin Tipi	Katkı Tipi	Su Muhtevası (%)	Kür Süresi (gün)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Deney Tipi	Karıştırma Yöntemi
kum	çimento	48.2 %	7	2,626	928	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	38.5 %	7	5,291	1521	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	32.4 %	7	5,072	1343	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	47.2 %	7	3,228	744	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	15.7 %	7	1,99	453	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13.5 %	7	2,864	663	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	36.3 %	7	4,342	1140	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	39.2 %	7	3,901	1311	laboratuvar	kuru karıştırma

EK 11. Azadegan, 2012

Zemin Tipi	Katkı Tipi	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Deney Tipi
kum	çimento + kireç	5,4991	534,789	laboratuvar
kum	çimento + kireç	5,3475	558,009	laboratuvar
kum	çimento + kireç	4,7391	349,331	laboratuvar
kum	çimento + kireç	4,7527	456,986	laboratuvar
kum	çimento + kireç	6,9543	770,921	laboratuvar
kum	çimento + kireç	5,8144	581,44	laboratuvar
kum	çimento + kireç	4,2439	394,989	laboratuvar
kum	çimento + kireç	4,626	990,857	laboratuvar
kum	çimento + kireç	5,7546	639,585	laboratuvar
kum	çimento + kireç	5,347	534,7	laboratuvar
kum	çimento + kireç	3,7792	839,822	laboratuvar
kum	çimento + kireç	2,4204	456,679	laboratuvar
kum	çimento + kireç	3,5669	685,942	laboratuvar
kum	çimento + kireç	1,7834	312,877	laboratuvar
kum	çimento + kireç	3,3546	632,943	laboratuvar
kum	çimento + kireç	1,3164	215,803	laboratuvar
kum	çimento + kireç	2,9299	465,063	laboratuvar

EK 12. Nguyen ve diğ., 2014

Zemin Tipi	Katkı Tipi	Su Muhtevası (%)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Deney Tipi	Karıştırma Yöntemi
kum	çimento	9%	0,0778816	17,3913	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	0,0778816	28,4585	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	0,147975	34,7826	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	0,194704	49,0119	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	0,397196	49,0119	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	0,443925	80,6324	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	0,521807	99,6047	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	0,646417	112,253	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	0,895639	110,672	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	1,26168	156,522	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	1,33178	105,929	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	1,26947	325,962	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	1,6433	150,198	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	1,76791	113,834	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	1,95483	166,008	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	2,09502	235,573	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	9%	2,35202	349,407	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,482866	69,5652	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,529595	83,7945	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,5919	64,8221	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,700935	64,8221	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,708723	82,2134	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,623053	85,3755	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,67757	104,348	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,755452	86,9565	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,817757	105,929	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,646417	135,968	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,919003	112,253	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,942368	129,644	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,903427	143,874	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	0,864486	227,668	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	1,09813	109,091	laboratuvar	kuru karıştırma
kum	çimento	13%	1,17601	150,198	laboratuvar	kuru karıştırma

ÖZGEÇMİŞ

Engin Can KAPTAN	
İstanbul	
14.07.1995	
☑ T.C. ❒ Diğer:	
+905315187165	