

DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ (DSM) İLE İYİLEŞTİRİLEN ZEMİNLERDE ELASTİSİTE MODÜLÜ VE SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Engin Can KAPTAN^{1*}, Fatma Tuğçe ÇINAR², İlknur BOZBEY³

- ¹ İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul,
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-9726-9839>
- ² İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul,
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-4137-9200>
- ³ İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul,
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-1580-8876>

Anahtar Kelimeler	Öz
Derin karıştırma yöntemi Elastisite modülü Serbest basınç mukavemeti Korelasyon	<i>Derin karıştırma yöntemi (DSM), zayıf zeminlerin puzolanik bir bağlayıcı ile karıştırılarak mekanik olarak yerinde iyileştirilmesi ve kolonlar oluşturulması olarak tanımlanan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemde bağlayıcı malzeme olarak genellikle çimento veya çimento ve kireç kullanılmaktadır. Bu yöntem ile iyileştirilen zeminlerin özellikleri, zeminin ve katkının özelliklerine, katkı miktarına ve kür süresine bağlıdır. Derin karıştırma ile iyileştirilmiş zeminlerin gerilme-deformasyon davranışları, performanslarını belirleyen en önemli faktörlerden birisidir. Bu nedenle DSM kolonlarının modül değerlerinin doğru olarak tayin edilmesi büyük önem taşır. Derin karıştırma ile iyileştirme yapılan tasarımlarda, kalite kontrol deneylerinde genellikle serbest basınç mukavemet değerleri ölçülmekte ve deformasyonların tayini için gereken modül değerlerine korelasyonlar ile geçilmektedir. Bu bakımdan zemin türü, katkı tipi gibi önemli parametreleri dikkate alan korelasyonların kullanılması modül değerinin doğru tahmin edilebilmesi bakımından önemlidir. Bu çalışma kapsamında literatürde mevcut olan DSM konulu çalışmalar incelenmiş ve derin karıştırma ile elde edilen malzemelerin mukavemet-modül değerleri bir veri tabanına işlenmiştir. Bu kapsamda 12 ayrı çalışmadan toplamda 1090 adet veri toplanmıştır. Oluşturulan veri tabanı zemin türü, katkı tipi ve miktarı, serbest basınç mukavemeti, elastisite modülü ve karıştırma yöntemi bilgilerini içermektedir. Veri tabanı kullanılarak farklı zemin türleri ve katkı tipleri için yeni korelasyonlar sunulmuştur. Elde edilen korelasyonların ülkemizde son yıllarda çok yoğun kullanım alanı bulmakta olan derin karıştırma yöntemi için faydalı olacağı düşünülmektedir.</i>

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN MODULUS OF ELASTICITY AND UNCONFINED COMPRESSION STRENGTH IN SOILS IMPROVED BY DEEP MIXING METHOD

Keywords	Abstract
Deep mixing method The modulus of elasticity Unconfined compressive strength Correlation	<i>Deep mixing method (DSM) is a soil improvement method where weak soils are improved mechanically by forming columns in the ground via mixing the soil with a pozzolanic binder. In this method, cement or cement and lime are generally used as binding materials. The properties of soils treated with this method depend on the properties of the soil and the additive, the amount of additive and the curing time. Stress -deformation behavior of deep mixing soils is one of the most important factors determining their performance. For this reason, it is very important to determine the modulus values of DSM columns correctly. In deep soil mix design, unconfined compression strength values are usually measured in quality control experiments and correlations are used to</i>

* Sorumlu yazar: e-posta : engincankaptan@gmail.com



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

determine the modulus values based on strength values. In this context, it is important to use correlations that take into account important parameters such as soil and binder type in order to estimate the modulus value correctly. Within the scope of this study, DSM studies in the literature were compiled and unconfined compression strength-modulus values for DSM materials were used to create a database. In this context, a total of 1090 data were collected from twelve separate studies. The database contains information on soil and binder type and amount, unconfined compression strength, modulus of elasticity and mixing method. New correlations are presented for different soil and binder types using the database. It is thought that the correlations obtained will be useful for deep soil mixing, which have been used extensively in Turkey in recent years.

Araştırma Makalesi		Research Article	
Başvuru Tarihi	: 27.10.2020	Submission Date	: 27.10.2020
Kabul Tarihi	: 14.08.2021	Accepted Date	: 14.08.2021

1. Giriş

Günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi derin karıştırma yöntemidir (DSM). Bu yöntem ilk olarak Japonya ve İsveç'te kullanılmaya başlanmıştır. 1960'lı yıllardan itibaren dünya genelinde birçok ülkede yaygın olarak kullanım alanı bulmuştur. Derin karıştırma yöntemi ülkemizde ise 2006 yılından sonra uygulanmaya başlanmıştır (Kaya, 2016).

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, Adams, Navin ve Templeton, 2012). Asıl amaç, zemine mekanik karıştırıcılar yolu ile çimento, kireç vb. katkı malzemelerinin ilave edilmesidir (Mitchell, 1976). Böylelikle ilave yükler altında toplam ve farklı oturumların azaltılması, proje gereksinimlerine göre zeminin taşıma kapasitesinin ve sıvılaşma direncinin artırılması, şev ve dolguların stabilitesinin sağlanması amaçlanır. Derin karıştırma yöntemi kullanılarak iyileştirme yapılan zeminlerdeki özellikler, katkı malzemelerinin 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. Derin karıştırma yöntemi çok katı ve sert, çakıl zeminlerde uygulanmaya müsait değildir.

Derin karıştırma ile iyileştirilmiş zeminlerin deformasyon davranışları, performanslarını belirleyen en önemli faktörlerden birisidir. Derin karıştırma ile iyileştirme yapılan tasarımlarda oluşacak deformasyonlar için ise modül değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Modül değerleri çoğunlukla laboratuvar veya arazide ölçülmekte, mukavemet değerleri kullanılarak korelasyonlar ile deformasyon davranışına geçilmektedir. Diğer taraftan gerek zeminlerin gerekse katkı maddelerin ve uygulamaların farklılığı nedeniyle mukavemet-modül arasındaki ilişkinin tek bir universal formül ile ifade edilmesinin mümkün olmadığı

görülmektedir. Literatür çalışmaları mukavemet ve modül arasındaki ampirik ilişkinin aslında son derece dağınık olduğunu ve zemin türüne ve katkı miktarına göre verilerin sınıflandırılmasının uygun olacağını göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında derin karıştırma iyileştirmesine yönelik temel bilgiler verilmiş, literatürde yer alan ve derin karıştırma ile iyileştirilmiş zeminlerin mukavemet-modül ilişkisine dair bir veri tabanı oluşturulmuştur. Farklı zemin türü ve katkı tipine sahip çalışmalardan elde edilen modüller için korelasyonlar oluşturulmuştur. Laboratuvar ve arazide imal edilen DSM kolonları için farklı modül aralıkları sunulmuştur. Bu korelasyonların derin karıştırma iyileştirmesi tasarımlarında modüllerin doğru tahmin edilmesine yönelik olarak kullanılması hedeflenmektedir (Kaptan, 2020).

2. Bilimsel Yazın Taraması

2.1. Yapım ve İmalat

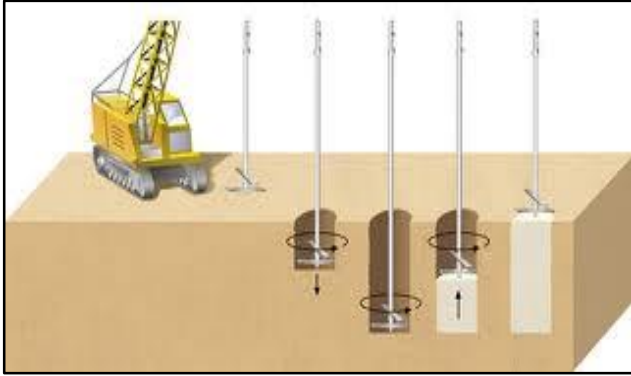
Derin karıştırma yöntemi 1970'lerde Japonya'da ortaya çıkmıştır. Aynı dönemde İsveç'te geliştirilen kireç kolonları da temelde benzer bir uygulamadır. Daha yüksek mukavemet sağlamak için çimento da kuru olarak katkı maddesi olarak kullanılmaya başlamıştır. Bugün ise kireç/çimento ya da çimento kolonlar neredeyse tamamen kireç kolonların yerini almıştır (Kivelo, 1998).

Toz halinde kireç ya da çimentonun kuru şekilde katkı maddesi olarak kullanılması genel olarak "Kuru Derin Karıştırma Yöntemi" ismiyle bilinmektedir. Japonya'da yapılan uygulamalarda derin karıştırma ile iyileştirilen zeminlerde homojenliği artırmak amacıyla katkı maddesi olarak çimento sulu harç şeklinde uygulanmaya başlamıştır. Katkı maddelerinin sulu harç şeklinde kullanımı "Islak Derin Karıştırma Yöntemi" olarak adlandırılmaktadır. Islak yöntem Japonya'da ilk olarak deniz killilerinin iyileştirilmesinde uygulanmış ve daha sonra kara uygulamalarında da kullanılmaya

başlamıştır. Bugün ıslak ve kuru olarak her iki derin karıştırma yöntemi de kullanılmaktadır (Smith, 2005). 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.

Derin karıştırma yöntemi ile killi ve organik zeminlerde taşıma kapasitesini artırmak, oturmayı azaltmak, pasif toprak basıncını artırmak, aktif toprak basıncını azaltmak, kazık ve palplanj duvarların yatay direncini artırmak amaçlanmaktadır. Kumlu zeminlerdeki uygulamaların amacı ise taşıma kapasitesini artırmak, oturmayı azaltmak ve sıvılaşmayı engellemektir.

Islak derin karıştırma yönteminin yapım ve imalat aşamaları şu şekilde sıralanabilir: İlk olarak delici makine ilgili kolon koordinatlarında konumlanır. Sonrasında karıştırıcı shaftı zemini parçalayarak istenilen derinliğe kadar indirilir. Karıştırıcı shaftı istenilen derinliğe ulaştıktan sonra zemini karıştırarak yukarı çekilir. İstenilen derinliğe inme ve bu derinliğe ulaştıktan sonra geri çekme evrelerinin birinde veya her ikisinde de katkı şerbeti verilerek zemin ile karıştırma sağlanır. Derin karıştırma yöntemine dair uygulama Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Derin Karıştırma Yöntemi Uygulaması (insapedia.com)

Derin karıştırma iyileştirmesi kapsamında dünya çapında kabul gören önemli dokümanlar mevcuttur. Derin karıştırmaya yönelik en kapsamlı ve bilinen dokümanlar İsveç Geoteknik Topluluğu Kireç ve Kireç-Çimento Kolonları (Swedish Geotechnical Society, Lime and Lime-Cement Columns) (1997), ABD Federal Karayolu İdaresi Tasarım Kılavuzu Dolgu ve Temel Desteği İçin Derin Karıştırma (Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support) (Bruce, Berg, Collin, Filz, Terashi ve Yang, 2013) ve ülkemizde halen İngilizce olarak mevcut olan TS EN 14679, Özel

Jeoteknik Uygulamalar Derin Karıştırma (2006) olarak sunulabilir.

Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen zeminin elastisite modülü için literatürde önerilen korelasyonlar bulunmaktadır. Bu değer tüm zeminler için geçerli bir formül olarak sunulmuştur. Diğer taraftan modül değerlerinin zemin tipi ve katkı tipinden önemli ölçüde etkilendiği gözönüne alındığında, farklı zeminler için de korelasyonlar aramanın önemli olduğu görülmektedir.

3. Yöntem

Bu çalışma kapsamında derin karıştırma ile elde edilen malzemelerin mukavemet-modül değerleri kullanılarak bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu kapsamda 12 ayrı çalışmadan toplamda 1090 adet veri toplanmıştır. Bu çalışmalarda mukavemet ve modül değerleri tablo veya grafik formatında sunulmaktadır. Veri tabanını oluşturan çalışmalar aşağıda kısaca tanıtılmaktadır. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Akçakal, Koçak, Velioglu ve Kulaç (2019) çalışmalarında Türkmenistan'ın Hazar Denizi kıyısında konumlanmış Türkmenbaşı Uluslararası Liman Projesi yapısı için uygulanan DSM kolonları için elde edilen sonuçları sunmaktadır. Derin karıştırılmış kolonların çapı 80 cm'dir. Katkı tipi olarak çimento kullanılmıştır. Zemin tipi kildir.

Egorova, Rybak, Stefaniuk ve Zajaczkowski (2017) çimento ile iyileştirilmiş zeminler için iki veri grubu oluşturmuştur. İlkinde laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İkincisinde ise arazi deneylerine dair sonuçlar yer almaktadır. Laboratuvar verileri zemin-çimento ve zemin-çimento-uçucu kül numuneleri üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyi sonuçlarından oluşmaktadır. Arazi verileri ise ıslak derin karıştırma yönteminin uygulandığı bir sahaya ait zemin-çimento karışımı numunelerinden alınarak elde edilmiştir.

Yenginar, Olgun ve Tan (2017) yaptıkları çalışmada zeminin çimento ve uçucu kül ile iyileştirilmesini araştırmışlardır. Bu amaca yönelik olarak çapı 5 cm ve boyu 10 cm olan numuneler hazırlanmış ve 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deney numuneleri hazırlanmıştır. Deneyler sonucunda her bir karışım için zeminin serbest basınç mukavemeti ve elastisite modülü değerleri bulunmuştur. Zemin tipi silttir.

Nguyen, Kitazume, Luong ve Bui (2014) hafif yük kamyonlarının (≤ 2.5 ton) geçeceği bir kırsal yolda kuru çimento ile iyileştirilen zemin için yapılan deneyleri sunmaktadır. Deneyler farklı su muhtevası ile hazırlanan ve farklı kür süreleri sonunda test edilen numuneler üzerinde yapılmıştır. Zemin tipi kumdur.

Azadegan (2012) yapmış olduğu çalışmada kireç/çimento kolonlarının mekanik karakteristiklerini çalışmıştır. Serbest basınç mukavemeti deneyleri uygulanmış ve böylelikle her tasarım karışımı için basınç mukavemeti ve elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Zemin tipi kumdur.

Şengör (2011) iyileştirilmiş zeminlerde tek eksenli basınç deneyleri yaparak yumuşak killi zeminler için (Eymir gölü kili ve kaolin) etkili karışım oranları ve karışım tiplerini araştırmıştır. İyileştirilmiş zeminlerin elastisite modülü (E_{50}) ve serbest basınç dayanımı (UCS) değerleri sunulmuştur.

Puppala, Madhyannapu, Nazarian, Yuan ve Hoyos (2008) DSM kolonlarının inşası için laboratuvar çalışmalarında kullanılan malzemeler, farklı bağlayıcı ve su oranları ile çalışmıştır. %25 oranında kireç ve %75 oranında çimento bileşiminden oluşan bağlayıcının etkili olduğu belirtilmiştir. Uygulamanın yapıldığı zemin tipi kildir.

Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa (2005) yapmış oldukları çalışmada, turba-çimento karışımı üzerinde deneyler yaparak serbest basınç mukavemeti ve tanjant modülü değerlerini elde etmişlerdir. Bağlayıcı olarak kullanılan çimento Portland çimentosudur. Zemin tipi turbadır.

Löfroth (2005) çalışmasında İsveç'teki iki farklı araziye ait 10 yıllık kireç-çimento kolonları üzerinde çalışmıştır. Bunların ilkinde zemin yüksek hassaslıkta yumuşak kil içermektedir. Kireç-çimento kolonlarının çapları 50 cm'dir. İkinci arazide ise kolonların çapları 60 cm ve uzunlukları 8 metredir. Her iki arazide de kuru zemin karıştırma yöntemi kullanılmıştır.

Massarch (2005) İsveç'te çok yumuşak ve sıkışabilir bir organik zemin üzerinde 7 metre yüksekliğe ulaşan ve bir demir yolu hattının geçtiği bir dolgu üzerinde çalışmıştır. Test alanı 10 metre derinliğe varan yumuşak organik kil içermektedir.

Okada, Murray ve Quickfall (2005) çalışmalarında sivilaşabilir ponza taşı kumu olan bir zemin tabakası için derin karıştırılmış kolonlar üzerinde incelemeler yapmışlardır. Sivilaşmayı önlemeye yönelik olarak çimento zemin kolonları inşa edilmiştir.

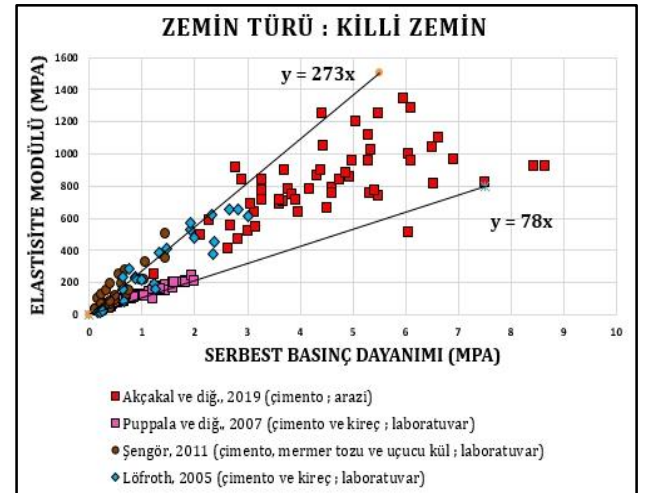
Van Impe ve Verástegui Flores (2005) bir yer altı su deposu için imal edilen DSM kolonlarından elde edilen sonuçları sunmaktadır. Zemin türünün silt olduğu belirtilmektedir. Bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu kullanılmıştır. Derin karıştırma kolonlarından alınan numuneler üzerinde farklı kür süreleri sonunda serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

4. Bulgular

Çalışma kapsamında elde edilen bulgular zemin ve katkı türüne göre sınıflandırılmıştır. Zemin ve katkı arasındaki etkileşimin zeminin mineralojisine, ortam sıcaklığına, ortam pH'ına bağlı olması nedeniyle aynı zemin türleri ve katkı türleri için dahi verilerin dağınık olabildiği görülmüştür. Bu nedenle verilerin ilişkisini bir aralık içinde tarif edebilmek amacıyla veri gruplarının büyük çoğunluğunu içerisine alan alt limit ve üst limit çizgileri oluşturulmuş ve bu çizgilerin denklemleri elde edilmiştir. Böylece serbest basınç mukavemetini kullanarak elastisite modülü değerlerinin elde edilmesine yönelik korelasyonlar ve alt ve üst limit değerleri önerilebilmiştir.

4.1. Zemin Türüne Göre Elastisite Modülü - Serbest Basınç Mukavemeti İlişkisi

Zeminin killi zemin olduğu durumlar için farklı çalışmalardan elde edilen serbest basınç mukavemeti ve elastisite modülüne ait veriler Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Killi Zeminler İçin Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri

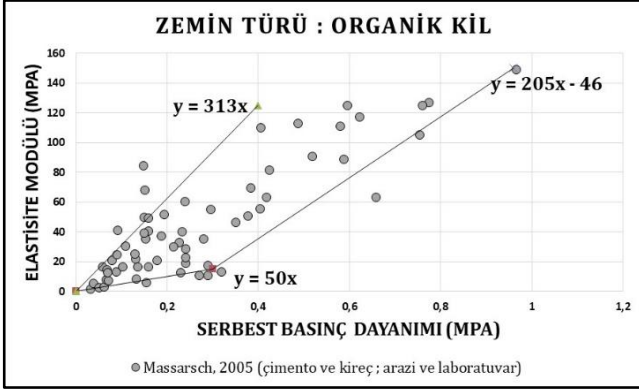
Bu grafik kullanılarak elastisite modülü-serbest basınç mukavemeti ilişkileri için alt limit, üst limit ve ortalamayı temsil eden denklemler verilmiştir. Bu eşitlikler sırasıyla eşitlik (1), (2) ve (3)'te verilmektedir. Burada E elastisite modülünü, q_u serbest basınç mukavemeti ve R^2 ise regresyon/determinasyon katsayısını temsil etmektedir.

$$E = 78q_u \quad (1)$$

$$E = 273q_u \quad (2)$$

$$E = 172q_u \quad ; \quad (R^2 = 0,82) \quad (3)$$

Zemin türünün organik kil olması durumunda elde edilen grafik Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Organik Killi Zeminler İçin Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri

Organik killi zeminler için alt limit, üst limit ve ortalama elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkileri sırasıyla eşitlik (4), (5) ve (6)'da verilmektedir. Burada E_{50} sekant elastisite modülünü, q_u serbest basınç mukavemeti ifade etmektedir. Bu formüller q_u değerinin 1 MPa ve altında olması durumu için geçerlidir.

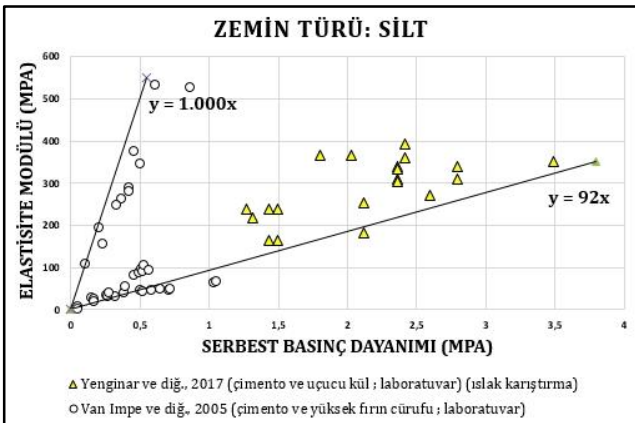
$$q_u < 0,3 \text{ MPa için } E_{50} = 50q_u \quad \text{ve}$$

$$q_u > 0,3 \text{ MPa için } E_{50} = 205q_u - 46 \quad (4)$$

$$E_{50} = 313q_u \quad (5)$$

$$E_{50} = 160q_u \quad ; \quad (R^2 = 0,73) \quad (6)$$

Zemin türünün silt olduğu durumlara dair grafik Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Siltli Zeminler İçin Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri

Siltli zeminler için alt limit, üst limit ve ortalama elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkileri sırasıyla eşitlikler (7), (8) ve (9)'da verilmiştir.

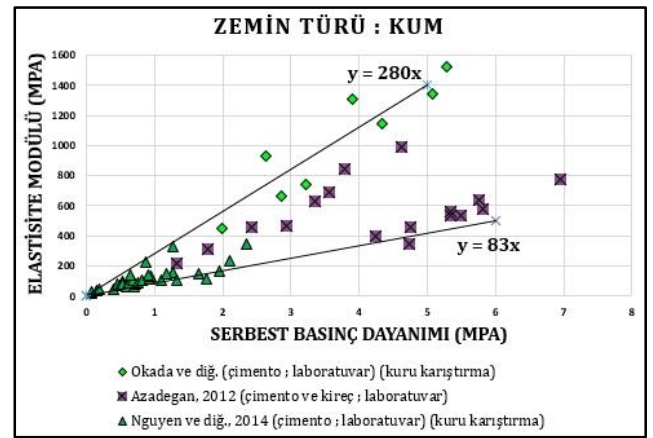
$$E = 92q_u \quad (7)$$

$$E = 1000q_u \quad (8)$$

Tüm veriyi temsil eden denklem ise,

$$E = 142q_u \quad ; \quad (R^2 = 0,20) \quad (9)$$

olarak elde edilmiştir. Ancak R^2 değerinin çok düşük olması nedeniyle bu formül tavsiye edilmemektedir. Zemin türünün kum olduğu durumlar için elde edilen grafik Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Kum Zeminler İçin Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri

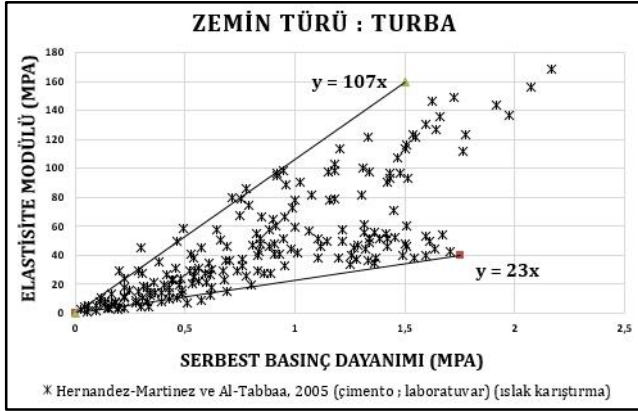
Buradan kum zeminler için alt limit, üst limit ve ortalama elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkileri sırasıyla eşitlikler (10), (11) ve (12)'de verilmektedir.

$$E = 83q_u \quad (10)$$

$$E = 280q_u \quad (11)$$

$$E = 159q_u \quad ; \quad (R^2 = 0,61) \quad (12)$$

Zemin türünün turba olduğu durum için grafik Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Turba Zeminler İçin Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri

Buradan turba zeminler için alt limit, üst limit ve ortalama elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkileri sırasıyla eşitlik (13), (14) ve (15)'deki gibi elde edilmiştir. Bu formüller q_u değerinin 2 MPa'dan daha küçük olduğu değerler için geçerlidir.

$$E = 23q_u \quad (13)$$

$$E = 107q_u \quad (14)$$

$$E = 56q_u ; \quad (R^2 = 0,62) \quad (15)$$

Zemin türüne göre yapılan karşılaştırmaları özetlemek için farklı türden zeminlerle ilgili bilgiler Tablo 1'de ve ortalama farklı eğim çizgileri ile formülleri Şekil 7'de verilmiştir. Organik zeminde ve turba zeminde gerek mukavemet gerekse modül değerlerinin diğer zeminlere nazaran düşük olduğu görülmektedir. Siltli zemine ait "ortalama" değeri veren formül için regresyon/determinasyon katsayısının düşük olması sebebiyle bu eşitlik önerilmemektedir. Alt ve üst değerler yol gösterici olabilir.

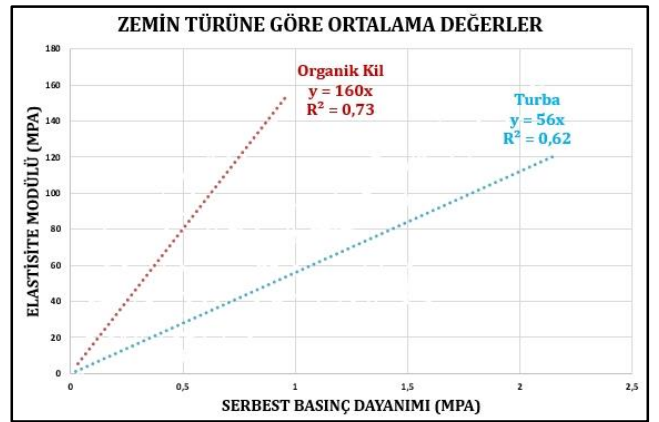
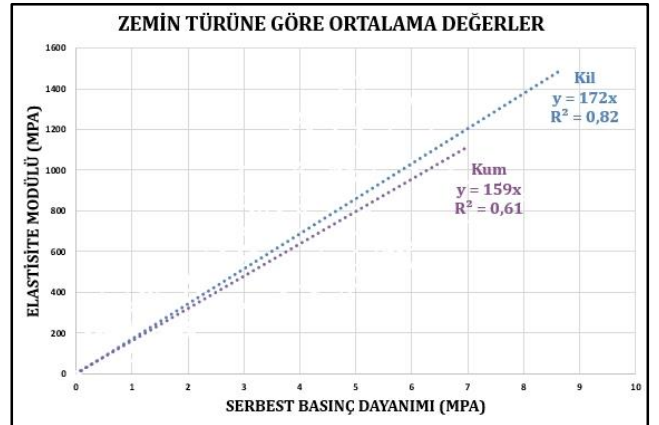
Tablo 1.

Zemin Türüne Göre E- q_u İlişkisi

Zemin Tipi	Alt Limit	Üst Limit	Ortalama Değer	Veri Sayısı	R^2
Kil	78	273	172	318	0,82
*Organik Kil	50 q_u veya 205 $q_u - 46$	313	160	126	0,73
Silt	92	1000	-	112	-
Kum	83	280	159	116	0,61
**Turba	23	107	56	392	0,62

* E_{50} değeri verilmektedir. q_u değerlerinin 1 MPa ve altında olması durumu için geçerlidir.

** q_u değerlerinin 2 MPa ve altında olması durumu için geçerlidir.

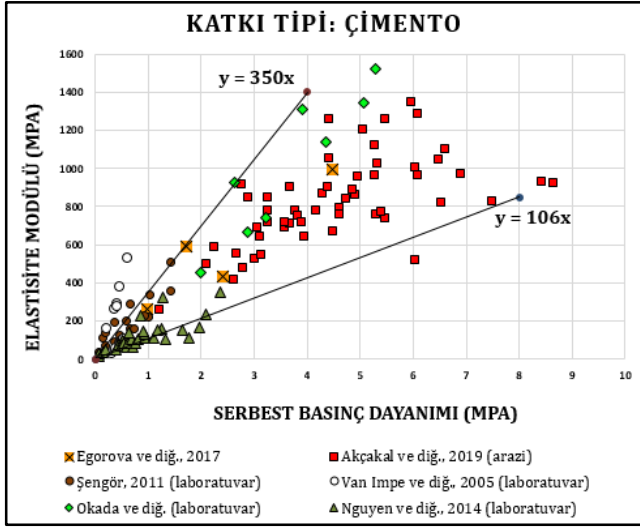


Şekil 7. Zemin Türüne Göre Ortalama E- q_u İlişkisi (Organik Kil İçin E_{50} Değeri)

Bu grafikte de görüldüğü gibi, organik kil için elde edilen değerler, eğim bakımından kil ve kum için elde edilen değerlere yakın olmakla birlikte gerek mukavemet, gerekse modül bakımından çok düşük değerlerle sınırlı kalmaktadır. Organik zeminlerde yapılan iyileştirmelerde çok yüksek mukavemet ve modül değerlerinin elde edilemeyeceği, bu bakımdan tasarımda bunun dikkate alınması gerektiği görülmektedir. Turba zeminlerde de benzer durum söz konusudur. Turba zeminler için elde edilen modül değerlerinin maksimum 120 MPa seviyelerine ulaşabildiği görülmektedir. Organik killer için bu değer 160 MPa seviyelerinde görülmektedir.

4.2. Katkı Tipine Göre Elastisite Modülü - Serbest Basınç Mukavemeti İlişkisi

Katkı tipinin sadece çimento olduğu çalışmalara dair elde edilen grafik Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Katkı Tipinin Çimento Olduğu Durumda Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri

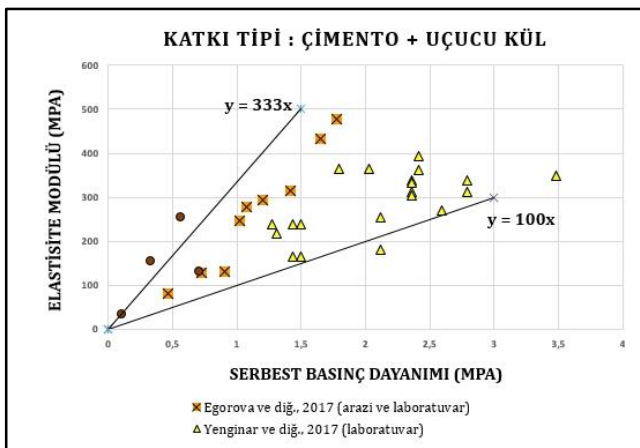
Katkı tipi olarak sadece çimento için elde edilen ilişkiler alt limit, üst limit ve ortalama için sırasıyla eşitlikler (16), (17) ve (18)'deki gibi elde edilmiştir.

$$E = 106q_u \quad (16)$$

$$E = 350q_u \quad (17)$$

$$E = 180q_u \quad ; \quad (R^2 = 0,75) \quad (18)$$

Katkı tipinin çimento ve uçucu kül olduğu durumlara dair grafik Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Katkı Tipinin Çimento ve Uçucu Kül Olduğu Durumda Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri

Katkı tipi olarak çimento ve uçucu kül için elde edilen değerler (19), (20) ve (21)'deki denklemlerde

gösterilmiştir. Dağılım çok fazla olduğu için ortalama için bulunan formül önerilmemektedir.

$$E = 100q_u \quad (19)$$

$$E = 333q_u \quad (20)$$

Ortalama için elde edilen değer R^2 bakımından;

$$E = 145q_u \quad ; \quad (R^2 = 0,18) \quad (21)$$

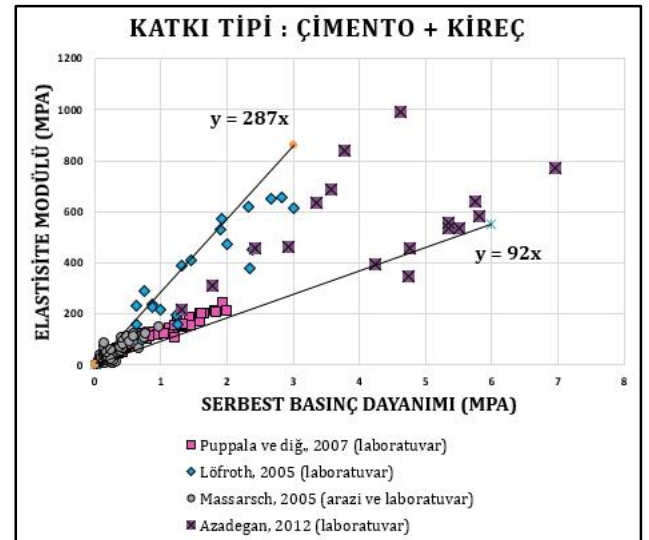
Katkı tipinin çimento ve kireç olduğu duruma ait grafik Şekil 10'da verilmiştir.

Katkı tipi olarak çimento ve kireç için elde edilen ilişkiler sırasıyla eşitlikler (22), (23) ve (24)'deki gibi elde edilmiştir.

$$E = 92q_u \quad (22)$$

$$E = 287q_u \quad (23)$$

$$E = 138q_u \quad ; \quad (R^2 = 0,76) \quad (24)$$



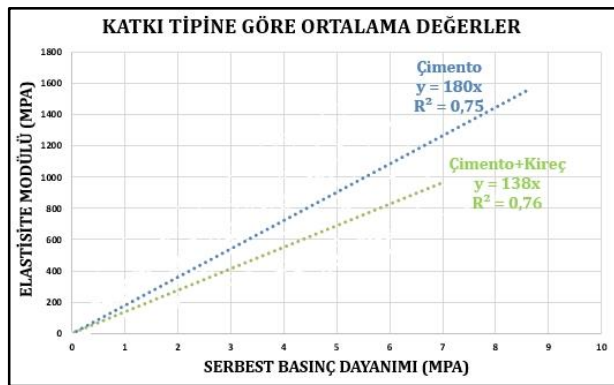
Şekil 10. Katkı Tipinin Çimento ve Kireç Olduğu Durumda Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri

Katkı tipine göre yapılan karşılaştırmaları özetlemek için sonuç olarak farklı tip katkılara dair bilgiler Tablo 2'de özetlenmiştir. Ortalama farklı eğim çizgileri Şekil 11'de verilmiştir. Ortalama değerler dikkate alındığında serbest basınç mukavemeti arttıkça Elastisite modülünün artışı çoktan aza olacak şekilde çimento daha sonra çimento ve kireç karışımı sıralamasındadır. Daha düşük modül artışı gerektiren projelerde ekonomik uygunluğun sağlanması durumunda çimento ve kirecin de bir arada kullanılabileceği görülmektedir.

Tablo 2.

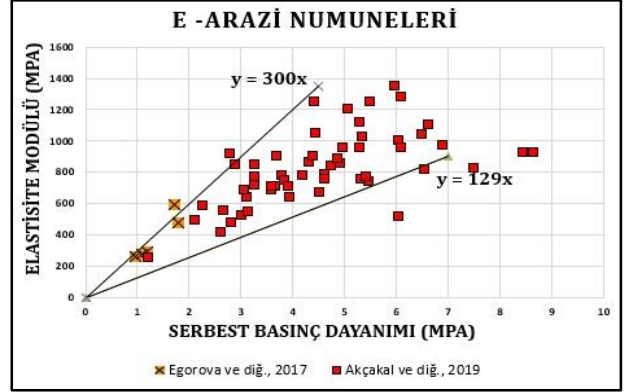
Katkı Tipine Göre E-q_u İlişkisi

Katkı Tipi	Alt Limit	Üst Limit	Ortalama Değer	Veri Sayısı	R ²
Çimento	106	350	180	264	0,75
Çimento+ Uçucu Kül	100	333	-	66	-
Çimento + Kireç	92	287	138	304	0,76

Şekil 11. Katkı Tipine Göre Ortalama E-q_u İlişkisi

4.3. Elastisite Modülüne Göre Serbest Basınç Mukavemeti İlişkisi

Çalışmaların bir kısmında modül değerinin tam olarak hangi modüle tekabül ettiği belirtilmemektedir. Bazı çalışmalarda sadece E olarak, bazı çalışmalarda ise E₅₀ olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca veri tabanının arazide veya laboratuvar ortamında oluşturulmuş olması da önemlidir. Çalışmanın bu kısmında veriler E ya da E₅₀ için ve ayrıca arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen modül değerlerine göre sınıflandırılarak karşılaştırılmıştır. Böylece tasarımcının ihtiyaç duyduğu modül değeri için referans olarak kullanabileceği bir veri tabanı oluşturulmuştur. Araziden alınan numunelerden elde edilen ve E olarak tanımlanan modül değerleri için veriler Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Arazi Numunelerinden Elde Edilen E Değerleri İçin Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri

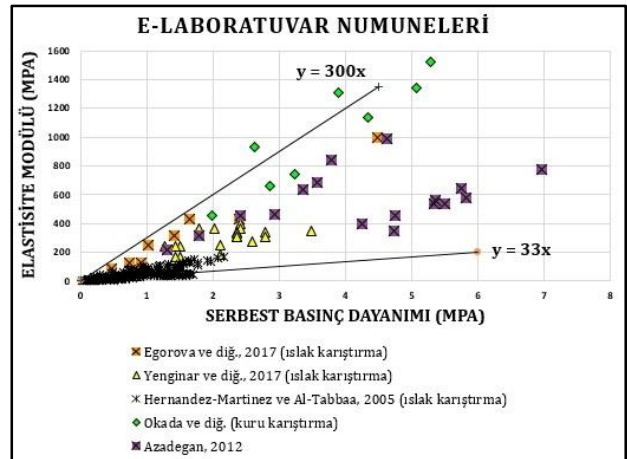
Arazi numunelerinden elde edilen alt limit, üst limit ve ortalama elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkileri sırasıyla eşitlikler (25), (26) ve (27)’deki gibi elde edilmiştir. R² değerinin çok küçük olması nedeniyle ortalama için elde edilen değer tavsiye edilmemektedir.

$$E = 129q_u \quad (25)$$

$$E = 300q_u \quad (26)$$

$$E = 171q_u \quad ; \quad (R^2 = 0,21) \quad (27)$$

Laboratuvar numunelerinden elde edilen ve sadece E olarak tanımlanan veriler Şekil 13’te verilmiştir.



Şekil 13. Laboratuvar Numunelerinden Elde Edilen E Değerleri İçin Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri

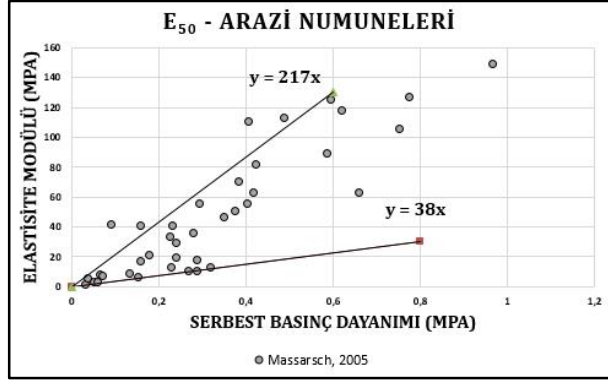
E için laboratuvar deneylerinden minimum, maksimum ve ortalama Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkileri sırasıyla eşitlikler (28), (29) ve (30)’daki gibi elde edilmiştir.

$$E = 33q_u \quad (28)$$

$$E = 300q_u \quad (29)$$

$$E = 134q_u \quad ; \quad (R^2 = 0,65) \quad (30)$$

E_{50} için arazi numunelerinden elde edilen veriler Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. Arazi Numunelerinden Elde Edilen E_{50} Değerleri İçin Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri (Sadece Organik Zeminler İçin Geçerlidir.)

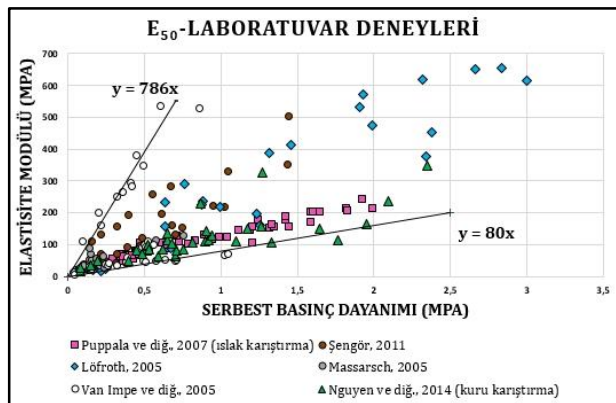
Arazi numunelerinden E_{50} için elde edilen alt limit, üst limit ve ortalama Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkileri sırasıyla eşitlikler (31), (32) ve (33)'teki gibi elde edilmiştir.

$$E_{50} = 38q_u \quad (31)$$

$$E_{50} = 217q_u \quad (32)$$

$$E_{50} = 151q_u \quad ; \quad (R^2 = 0,78) \quad (33)$$

E_{50} için laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Laboratuvar Numunelerinden Elde Edilen E_{50} Değerleri İçin Alt Limit ve Üst Limit Çizgileri

Buradan E_{50} için laboratuvar deneylerinden minimum, maksimum ve ortalama Elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkileri sırasıyla eşitlikler (34), (35) ve (36)'daki gibi elde edilmiştir.

$$E_{50} = 80q_u \quad (34)$$

$$E_{50} = 786q_u \quad (35)$$

$$E_{50} = 179q_u \quad ; \quad (R^2 = 0,54) \quad (36)$$

Elastisite modülüne için elde edilen değerleri özet olarak Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3.

Elastisite Modülüne Göre $E-q_u$ İlişkisi

Elastisite Modülü	Alt Limit	Üst Limit	Ortalama Değer	Veri Sayısı	R^2
E-Arazi numuneleri	129	300	-	120	-
E-Laboratuvar numuneleri	33	300	134	498	0,65
E_{50}-Arazi numuneleri (Organik kil)	38	217	151	76	0,78
E_{50} -Laboratuvar numuneleri	80	786	179	396	0,54

5. Sonuçlar

Derin karıştırma ile yapılan iyileştirme projelerinde arazide oluşacak oturmaların doğru tahmin edilmesi ve kolonlara gelecek gerilmelerin belirlenmesi bakımından DSM ile iyileştirilmiş zeminlerin modül değerlerinin gerçeğe yakın olarak belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada derin karıştırma ile iyileştirilen zeminlerin mukavemet-modül ilişkilerine dair bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu tür bir veri tabanı DSM için yapılacak tasarımlarda uygun modül değerinin serbest basınç mukavemetine bağlı olarak seçilmesi için bir referans olarak kullanılabilir. Literatürdeki toplam 1090 adet veri, 12 adet çalışmadan alınarak sınıflandırılmış, farklı zemin türü, katkı tipi ve modülün laboratuvar veya arazi numunesi olması ve E veya E_{50} olarak sunulmuş olmasına göre serbest basınç mukavemeti-elastisite modülü ilişkileri alt limit, üst limit ve ortalama değer olarak sunulmuştur. Özellikle organik zemin ve turba zeminler için modül değerlerinin 160 MPa ve altında kaldığı görülmektedir. Çimento ve kirecin birlikte kullanıldığı durumlarda sadece çimentonun olduğu duruma göre daha küçük modül değerlerine ulaşılmaktadır. Modül değerlerinin E veya E_{50} olması veya laboratuvar veya arazi numunelerinden elde edilmiş olması da farklı alt ve üst limitler verebilmektedir. Sunulan denklemler bu

çalışmada kullanılmış olan verilere bağlı olarak oluşturulmuştur.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada, Engin Can Kaptan, literatür araştırmasının yapılması, verilerin toplanıp işlenmesi ve grafiklerin oluşturulması konularında; Fatma Tuğçe Çınar, bu çalışmada kullanılan makalelerin seçimi, verilerin analizi, sonuçların değerlendirilmesi konularında; İlknur Bozbey, makalenin genel kontrollerinin ve düzeltmelerinin yapılması, çalışma kapsamında genel gidişatın yönetilmesi konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

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. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1426278>

Azadegan, O. (2012). *Laboratory study and FE analysis on the behaviour of the unreinforced lime/cement piles*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Iran. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/265379901_A_Laboratory_Study_of_the_Behavior_of_the_LimeCement_Slurry_and_Compacted_Un-Reinforced_Piles

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). Retrieved from <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/13046/13046.pdf>

Derin Karıştırma Yöntemi – Deep Mixing. (2019). Erişim adresi: <https://insapedia.com/derin-karistirma-yontemi-deep-mixing/>

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

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017MS%26E..245b2019E/abstract>

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). Doi: [10.1061/9780784412350.0004](https://doi.org/10.1061/9780784412350.0004)

Hernandez-Martinez, F.G. ve Al-Tabbaa, A. (2005). *Mechanical properties of stabilized peat based on laboratory testing*, 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Doi: [10.3233/978-1-61499-656-9-1193](https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-1193).

Kaptan, Engin C. (2020). *Derin karıştırma yönteminde elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişkinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye.

Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>

Kaya, Zeynep (2016). *Derin karıştırma kolonlarının ölçülen ve hesaplanan kapasitelerinin tam ölçekli yükleme deneyleri ile incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye. Erişim adresi: <https://avesis.gazi.edu.tr/yonetilen-tez/46147b30-d343-4ca6-a620-76ae87a19abf/derin-karistirma-kolonlarinin-olculen-ve-hesaplanan-kapasitelerinin-tam-olcekli-yukleme-deneyleri-ile-incelemesi>

Kivelo, M. (1998). *Stabilization of embankments on soft soil with lime/cement columns* (Ph.D. Thesis) Royal Institute of Technology, Sweden, 170. Erişim adresi: <http://kth.divaportal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A8391&dswid=-6685>

Lime and Lime Cement Columns: Guide for Project Planning, Construction and Inspection, SGF Report 4:95E, Swedish Geotechnical Society, Linköping, Sweden. Erişim adresi: <https://www.issmge.org/membersocieties/europe/swedish-geotechnical-society>

Löfroth, H. (2005). *Properties of 10-year-old lime-cement columns*, Swedish Geotechnical Institute/Chalmers University of Technology. SE-581 93 Linköping, Sweden, International Conference on Deep Mixing Vol1.1. - Best Practise and Recent Advances. Erişim adresi: <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/sve-nsk-djupstabilisering/sd-r13-v1-2.pdf>

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

https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/sve_nsk-djupstabilisering/sd-r13-v2.pdf

Mitchell, J.K. (1976). *Stabilization of soils for foundations of structures*, Geot. Eng. Univ. California. Erişim adresi:

<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1977/641/641.pdf>

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. Doi: [10.11113/mjce.v26.15877](https://doi.org/10.11113/mjce.v26.15877)

Okada, W., Murray, G. ve Quickfall, G. (2005). *Deep soil mixing in liquefiable pumiceous sand*, New Zealand. Erişim adresi:

<http://www.hiways.co.nz/assets/Uploads/deep-soil-mixing-in-liquefiable-pumiceous-sand.pdf>

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. Erişim adresi: <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-5179-1.pdf>

Smith M.E. (2005). *Design of bridging layers in geosynthetic-reinforced column supported embankments* (PhD Thesis) Virginia Polytechnic Institute and State University. Erişim adresi: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/28260>

Şengör, M.Y. (2011). *The deformation characteristics of deep mixed columns in soft clayey soils: a model study* (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara. Erişim adresi: <https://cupdf.com/document/the-deformation-characteristics-of-deep-mixed-columns-in-soft-clayey-soils-56818193791ad.html>

TS EN 14679, (2006). Özel Jeoteknik Uygulamalar, Derin Karıştırma. ICS 93.020. Erişim adresi: <https://standards.globalspec.com/std/1069070/TS%20EN%2014679>

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, International Conference on Deep Mixing Vol1.1. - Best Practise and Recent Advances. Erişim adresi: <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/2/2/STAL9781614996569-1265.pdf>

Yenginar, Y., Olgun, M. Ve Tan, Ö. (2017). *Siltli zeminlerde oluşturulan derin karıştırma kolonlarının dayanım özelliklerinin araştırılması*, 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul. Erişim adresi https://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/18159_53_46.pdf