DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ (DSM) İÇİN SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ-MODÜL KORELASYONLARI

UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH-MODULUS CORRELATIONS FOR DEEP MIXING METHOD (DSM)

Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN[1], Güldem KORKMAZ[2], İlknur BOZBEY[3]

ÖZET

Derin karıştırma yöntemi (DSM), doğal zeminin çeşitli bağlayıcılar ile karıştırılarak yerinde iyileştirilmesi işlemidir. Derin karıştırma ile iyileştirilmiş zeminlerin performanslarını belirleyen en önemli faktörlerden birisi de gerilme-şekil değiştirme davranışlarıdır. 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. Ülkemizde mevcut olan DSM uygulamalarında katkı türü olarak sadece çimento kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında literatürde mevcut olan ve katkı türü olarak sadece çimento kullanılarak derin karıştırma ile elde edilen iyileştirilmiş zeminlerin mukavemet-modül değerleri incelenerek bir veri tabanına oluşturulmuştur. Oluşturulan veri tabanı zemin türü, katkı tipi ve miktarı, serbest basınç mukavemeti, elastisite modülü ve karıştırma yöntemi bilgilerini içermektedir. Veri tabanı kullanılarak bağlayıcı malzemesi sadece çimento olan farklı zemin türleri için yeni korelasyonlar sunulmuştur. Elde edilen korelasyonların ülkemizde son yıllarda çok yoğun kullanım alanı bulmakta olan derin karıştırma yöntemi için faydalı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Derin karıştırma yöntemi, zemin iyileştirmesi, serbest basınç mukavemeti, elastisite modülü*

ABSTRACT

Deep mixing method (DSM) is the process of in-situ improvement of natural soil by mixing it with various binders. One of the most important factors determining the performance of soils improved by deep mixing is their stress-strain behavior. Therefore, it is very important to determine the modulus values of DSM columns correctly. In deep mixing designs, unconfined compressive strength values are usually measured in quality control tests and the modulus values required for the determination of deformations are obtained by correlations. In this respect, it is important to use correlations that take into account important parameters such as soil type and admixture type in order to correctly estimate the modulus value. In the existing DSM applications in our country, only cement is used as an additive type. Within the scope of this study, a database was created by examining the strength-modulus values of the improved soils, which are available in the literature and obtained by deep mixing using only cement as an additive type. The created database includes information on soil type, type and amount of admixture, unconfined compressive strength, modulus of elasticity and mixing method. Using the database, new correlations are presented for different soil types whose binding material is only cement. It is thought that the obtained correlations will be useful for the deep

[1] Arş. Gör., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, fatmatugce.cinar@iuc.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Arş. Gör., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, gkorkmaz@iuc.edu.tr
[3] Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, ibozbey@iuc.edu.tr

mixing method, which has been widely used in our country in recent years.
Keywords: *Deep mixing method, soil improvement, unconfined compressive strength, modulus of elasticity*

1. GİRİŞ

Derin karıştırma yöntemi, çeşitli bağlayıcılar kullanılarak zeminin yerinde iyileştirilmesi işlemidir. Bu yöntem son yıllarda ülkemizde de yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Derin karıştırma yönteminde kullanılan bağlayıcılar genellikle çimento ve kireçtir. Bunların yanı sıra uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu vb. gibi bağlayıcılar da kullanılmaktadır. Ülkemizde mevcut olan DSM uygulamalarında bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılmaktadır. Kuru ve ıslak karıştırma olmak üzere iki çeşidi bulunan derin karıştırma yönteminin, kara ve deniz yapılarında birçok uygulama alanı mevcuttur. Bu yöntemde amaç zeminlerin sıkışabilirliğini azaltmak ve mukavemetini artırmaktır. Derin karıştırma yöntemi ile elde edilen iyileştirilmiş zeminin mukavemet, elastisite modülü, poisson oranı, permeabilite ve birim ağırlığı gibi mühendislik özellikleri değişmektedir. Bu zemin özellikleri, tabii zeminin ve bağlayıcının özelliklerine, kür süresine ve yükleme durumuna bağlıdır (Bruce vd., 2013).

Derin karıştırma ile iyileştirilmiş zeminlerin performanslarını belirleyen en önemli faktörlerden birisi de gerilme-şekil değiştirme davranışlarıdır. 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 ve katkı türü olarak sadece çimento kullanılarak derin karıştırma ile elde edilen iyileştirilmiş zeminlerin mukavemet-modül değerleri incelenerek bir veri tabanına oluşturulmuştur. Oluşturulan veri tabanı zemin türü, katkı tipi ve miktarı, serbest basınç mukavemeti, elastisite modülü ve karıştırma yöntemi bilgilerini içermektedir. Veri tabanı kullanılarak bağlayıcı malzemesi sadece çimento olan farklı zemin türleri için yeni korelasyonlar sunulmuştur. Elde edilen korelasyonların ülkemizde son yıllarda çok yoğun kullanım alanı bulmakta olan derin karıştırma yöntemi için faydalı olacağı düşünülmektedir.

2. LİTERATÜRE GENEL BAKIŞ

GeoTesting Express (1996) tarafından Boston blue killeri CEM II çimento türü kullanılarak laboratuvarda derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiştir. Eriksson vd. (2005) tarafından arazide kuru karıştırma yöntemi ile iyileştirilen yumuşak kil zeminin iyileşme performansını değerlendirmek amacıyla DSM kolonlarından karot numuneler alınmıştır. DSM kolanlarının imalatında bağlayıcı olarak çimento kullanılmıştır (CEM II/A-L). Arazide alınan karot numuneleri ile laboratuvarda deneyler yapılmıştır. Van Impe vd., (2005) laboratuvarda yaptıkları çalışmada kil zemini çimento (Portland çimentosu ve yüksek fırın çimentosu) kullanarak ıslak derin karıştırma yöntemi ile iyileştirmiştir. Lorenzo ve Bergado (2006) bir kil zemini laboratuvarda ıslak derin karıştırma yöntemi ile iyileştirmiştir. Bağlayıcı olarak CEM I Portland çimentosu kullanılmıştır. Puppala ve diğ, (2008) iki farklı sahadan alınan kil zeminleri laboratuvarda ıslak derin karıştırma yöntemi kullanarak çimento ile iyileştirmiştir. Farklı su/çimento oranlarında hazırlanan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Jamsawang vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada yumuşak Bangkok kilini iyileştirmek amacıyla arazide DSM kolonları imal edilmiştir. DSM kolonlarında bağlayıcı olarak çimento kullanılmış ve ıslak karıştırma yöntemine göre iyileştirme yapılmıştır. Araştırmacılar, DSM kolonlarından aldıkları karot numuneleri ile laboratuvarda mukavemet deneyleri yapmıştır. Şengör (2011) çalışmasında laboratuvarda ıslak derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen kil zemini ele almıştır. Bağlayıcı olarak çimento kullanılmış ve deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Farouk ve Shahien (2013) laboratuvarda yaptıkları çalışma kapsamında derin karıştırma yöntemi ile siltli kum zemini iyileştirmiştir. Farklı çimento dozajları ve su/çimento oranlarında numuneler hazırlamış ve deneylerini yapmıştır. Szymkiewic vd. (2015) tarafından yapılan çalışma, farklı zemin türlerinde derin karıştırma yönteminin etkisini incelemek amacıyla yürütülen kapsamlı bir laboratuvar deney programı sunmaktadır. Numuneler ıslak karıştırma yöntemi ile hazırlanmış ve bağlayıcı olarak çimento kullanılmıştır. Alipour vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada bir kil zemini derin karıştırma yöntemi kullanılarak iyileştirilmiştir. Bağlayıcı olarak çimento kullanılmış ve ıslak yöntem ile iyileştirme yapılmıştır. Farklı çimento dozajları ve farklı su muhtevalarının iyileştirme üzerinde etkisi incelenmiştir. Kanty vd. (2017) iki farklı turba zemini ıslak derin karıştırma yöntemi kullanarak çimento ile iyileştirmiştir. Laboratuvarda

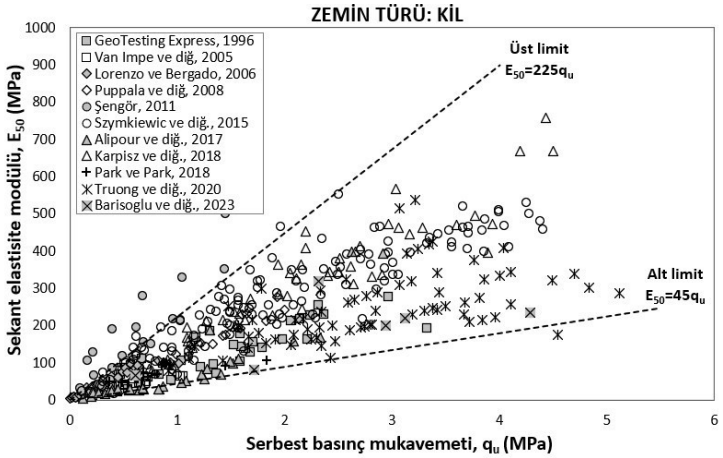
gerçekleştirdikleri çalışmada bağlayıcı olarak iki tür çimento kullanılmıştır (CEM II B-S 32.5 R - NA ve CEM IIIA 32.5 N/LH/HSR/NA). Karpisz vd. (2018) yaptıkları çalışmada organik içerikli kil zemini iki farklı çimento türü (CEM I 42.5R ve CEM II/B-S 32.5R-NA) kullanarak derin karıştırma yöntemi ile iyileştirmiştir. Numuneler laboratuvarda farklı çimento dozajları kullanılarak ıslak karıştırma yöntemine göre hazırlanmıştır. Kiecana vd. (2018) yaptıkları laboratuvar çalışması kapsamında bir turba zemini kuru derin karıştırma yöntemi ile iyileştirmiştir. Turba zeminin iyileştirilmesinde bağlayıcı olarak çimento kullanılmıştır. Park ve Park (2018) tarafından laboratuvarda farklı zemin türlerinde derin karıştırma yöntemi ile iyileştirme yapılmıştır. Bağlayıcı olarak çimento kullanılmıştır. Akçakal vd. (2019) çalışmalarında arazide yumuşak kil zemin iyileştirmesinde kullanılan derin karıştırma kolonlarından alınan karot numuneleri üzerinde laboratuvarda mukavemet deneyleri yapmıştır. Truong vd. (2020) kil zeminde farklı çimento dozajları kullanarak laboratuvarda ıslak derin karıştırma yöntemi ile numuneler hazırlamış ve farklı kür günlerinde mukavemet deneyleri yapmıştır. Do vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada ıslak derin karıştırma yöntemi kullanılarak çimento ile kum zemin iyileştirilmiştir. Laboratuvarda yapılan deneysel çalışma ile farklı çimento dozajlarının kum zeminin iyileşmesi üzerindeki performansı araştırılmıştır. Barisoglu vd. (2023) çalışmaları kapsamında turba ve kil zemini derin karıştırma yöntemi ile iyileştirmiştir. Her iki zemin türünde bağlayıcı olarak çimento kullanılmıştır. Bu araştırmacılar tarafından, elastisite modülünün serbest basınç mukavemetine bağlı korelasyon formülleri önerilmiştir. Bu çalışmada tüm bu korelasyonlar biraraya getirilmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

3. SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ-MODÜL KORELASYONLARI

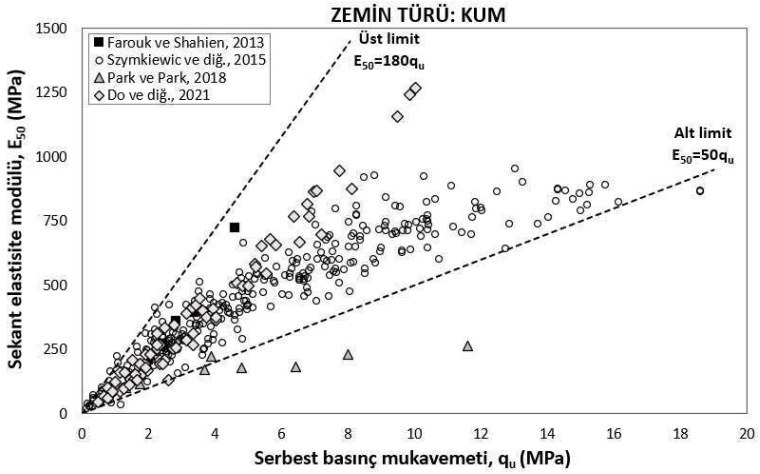
Çalışma kapsamında yapılan literatür taraması sonrasında derin karıştırma yöntemi ile çimento kullanılarak laboratuvarda iyileştirilen zeminler, kil, kum ve turba zemin olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır. Aynı zemin türünün çimentoyla iyileştirilmesi ile farklı değerler elde edilebilmekte ve sonuçlar büyük bir aralıkta dağılım gösterebilmektedir. Bu nedenle her bir zemin sınıfında elastisite modülü-serbest basınç mukavemeti korelasyonu için verilerin büyük çoğunluğunu içerisine alan alt ve üst limitler oluşturulmuştur. Ortalamayı temsil eden değerler de verilmiştir. Aynı zamanda arazide yapılan kalite kontrol çalışmaları da ayrıca değerlendirilmiştir.

3.1. Zemin Türüne Göre Elastisite Modülü-Serbest Basınç Mukavemeti Korelasyonu

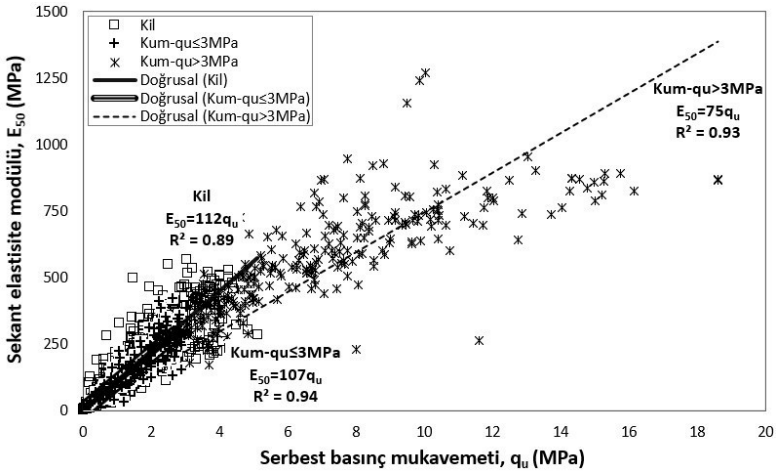
Kil zeminin çimento ile laboratuvarda iyileştirilmesi sonucu farklı çalışmalardan elde edilen sekant elastisite modülü ve serbest basınç mukavemetine ait veriler Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu veriler değerlendirildiğinde kil zeminlerin E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 45 ila 225 katı arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Laboratuvarda yapılan çalışmalardan elde edilen kum zeminlere ait veriler ise Şekil 2'de gösterilmektedir. Kum zeminlerin E_{50} değerleri ise, q_u değerinin 50 ila 180 katı arasında değişiklik göstermektedir. Şekil 3'te ise kum ve kil zeminler için tüm verilerin ortalama ve regresyon, R^2 değerleri verilmektedir. Kil zeminler için ortalama E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 112 katı olduğu görülmektedir. Kum zeminler için ise q_u değerinin 3.0 MPa altında olması durumunda ortalama E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 107 katı; q_u değerinin 3.0 MPa üstünde olması durumunda da ortalama E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 75 katı olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Kil zeminlerin elastisite modülünün serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi

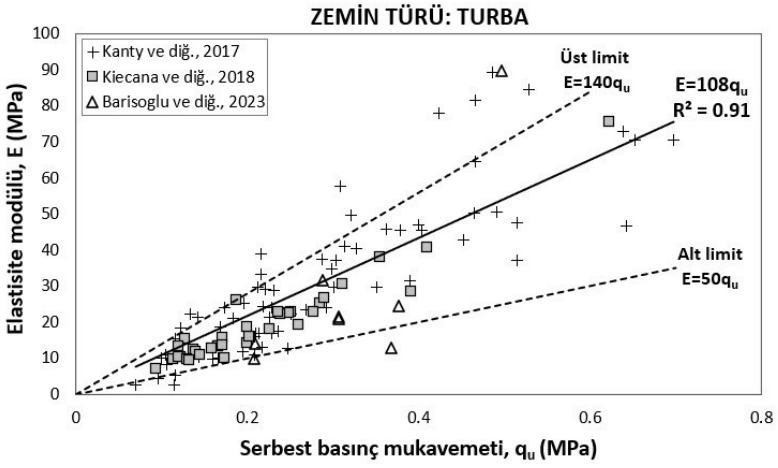


Şekil 2. Kum zeminlerin elastisite modülünün serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi



Şekil 3. Kil ve kum zeminlerin ortalama E_{50}-q_u değerleri

Turba zeminin çimento ile laboratuvarda iyileştirilmesi sonucu farklı çalışmalardan elde edilen elastisite modülü ve serbest basınç mukavemetine ait veriler Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu veriler değerlendirildiğinde turba zeminin E değerlerinin, q_u değerinin 50 ila 140 katı arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Ortalama E değerlerinin ise, q_u değerinin 108 katı olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Turba zeminin elastisite modülünün serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi

Laboratuvarda yapılan çalışmalardan oluşan ve zemin türüne göre elde edilen E-q_u korelasyonları Tablo 1'de verilmektedir. Verilen değerler, kum ve kil zeminler için sekant elastisite modülünü (E_{50}), turba zeminler için ise elastisite modülünü (E) temsil etmektedir. Turba zeminlerde gerek mukavemet gerekse modül değerlerinin diğer zeminlere göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Turba zeminler için elde edilen modül değerleri maksimum 90 kPa seviyelerinde, mukavemet değerleri ise maksimum 700 kPa seviyelerindedir. Bu nedenle turba zeminlerin derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmesi için yapılan tasarımlarda bu durumun dikkate alınması gerekmektedir.

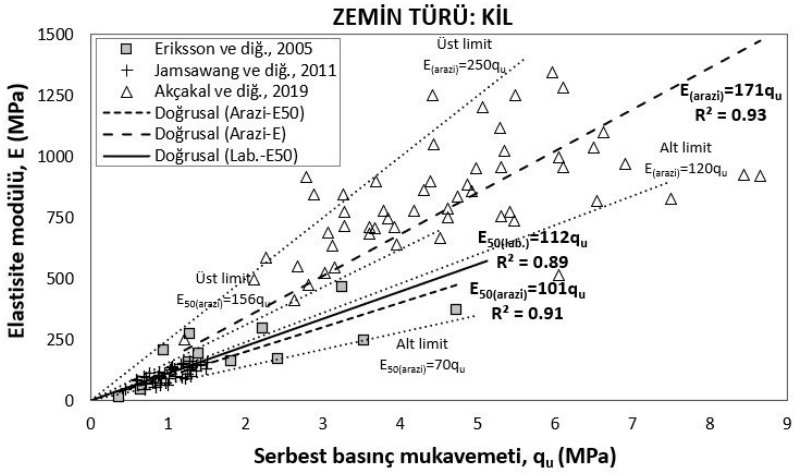
Tablo 1. Zemin türüne göre E-q_u korelasyonları

Zemin türü	Alt limit	Üst limit	Ortalama değer	Veri sayısı	R^2
Kil	45	225	112	427	0.89
*Kum	50	180	107	137	0.94
**Kum	50	180	75	260	0.93
***Turba	50	140	108	110	0.91

*q_u değerinin 3.0 MPa ve altı olması durumu için geçerlidir.
**q_u değerinin 3.0 MPa üstü olması durumu için geçerlidir.
***q_u değerinin 1.0 MPa ve altı olması durumu için geçerlidir.

3.2. Arazide Yapılan Çalışmalar

Bazı araştırmacılar, kil zemini iyileştirmek amacıyla arazide imal edilen DSM kolonlarından karot numuneleri alarak laboratuvarda bu numuneler üzerinde mukavemet deneyleri yapmıştır (Eriksson vd., 2005; Jamsawang vd., 2011; Akçakal vd., 2019). Bu çalışmalardan elde edilen elastisite modülü ve serbest basınç mukavemetine ait veriler Şekil 5'te gösterilmektedir. Bu veriler değerlendirildiğinde sekant elastisite modülünün daha düşük korelasyona sahip olduğu, ancak laboratuvarda kil zeminler ile elde edilen E_{50}-qu korelasyonuna yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Arazi verilerinden elde edilen E-q_u korelasyonları Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 5. Karot numunelerinin E-q_u ilişkisi ve laboratuvar verileri ile karşılaştırılması

Tablo 2. Arazi verilerine göre E-q_u korelasyonları

Elastisite modülü	Alt limit	Üst limit	Ortalama değer	Veri sayısı	R^2
E-Arazi numuneleri	120	250	171	55	0.93
E_{50}-Arazi numuneleri	70	156	112	52	0.91

4. SONUÇLAR

Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirme yapılan tasarımlarda arazide oluşacak oturmaların doğru tahmin edilmesi için DSM ile iyileştirilmiş zeminlerin modül değerlerinin doğru olarak tayin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında literatürde mevcut olan ve çimento kullanılarak derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen zeminlerin mukavemet-modül korelasyonlarına dair bir veri tabanı oluşturulmuştur.

Bu veri tabanı çimento kullanılarak DSM ile iyileştirme yapılacak tasarımlarda uygun modül değerinin serbest basınç mukavemetine bağlı olarak seçilmesi için bir referans olarak kullanılabilir. Literatürde mevcut olan ve çimento ile iyileştirilmiş zeminler kil, kum ve turba olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır. Her bir zemin sınıfında elastisite modülü-serbest basınç mukavemeti korelasyonu için alt ve üst limitler oluşturulmuştur. Ayrıca ortalamayı temsil eden değerler de verilmiştir. Kum ve kil zeminlerde belirli mukavemet değerlerinde benzer korelasyonlar elde edilmiştir. Turba zeminlerde ise gerek mukavemet gerekse modül değerlerinin diğer zeminlere göre çok daha düşük olduğu görülmüştür. Turba zeminler için elde edilen modül değerleri maksimum 90 kPa ve altında kalmaktadır. Bu nedenle turba zeminlerin derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmesi için yapılan tasarımlarda bu durumun dikkate alınması gerekmektedir. Arazide kil zeminin iyileştirilmesi ile yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde modül değerlerinin E veya E_{50} olması farklı korelasyonlar verebilmektedir. Sunulan korelasyonlar sadece bu çalışmada kullanılmış olan verilere bağlı olarak oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

Akçakal, Ö., Koçak, B., Velioğlu, N., Kulaç, H.F. ve Durgunoğlu, H. T. (2019). "Deep Soil Mixing Design under Seismic Conditions-A Case Study", In *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*, 1034-1041, CRC Press.

Alipour, R., Khazaei, J., Pakbaz, M.S. ve Ghalandarzadeh, A. (2017). "Settlement Control by Deep and Mass Soil Mixing in Clayey Soil", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, *170*(1), 27-37.

Barisoglu, E.N., Meeusen, J., Snoeck, D., Verástegui-Flores, R.D. ve Di Emidio, G. (2023). "Feasibility of Using Recycled Construction and Demolition Materials for Deep Soil Mixing", *Sustainability*, *15*(6), 5223.

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).

Do, H.D., Pham, V.N., Pham, A.D., Huynh, P.N. ve Oh, E. (2021). "An Investigation of the Elastic Modulus of Cement-Stabilised Soil by Wet Mixing Method for Sand Ground", Geotechnical Engineering (00465828), 52(1).

Eriksson, H., Gunther, J. ve Ruin, M. (2005). "MDM Combines the Advantages of Dry and Wet Mixing", In Proc. of the International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advance (Vol. 1, pp. 509-520).

GeoTesting Express (1996). "Geotechnical Tests on Soil Cement Mix for Central Artery/Tunnel Project", GeoTesting Express, final report to Bechtel/Parsons Brinckerhoff.

Farouk, A. Ve Shahien, M.M. (2013). "Ground Improvement using Soil–Cement Columns: Experimental Investigation", Alexandria Engineering Journal, 52(4), 733-740.

Jamsawang, P., Bergado, D.T. ve Voottipruex, P. (2011). "Field Behaviour of Stiffened Deep Cement Mixing Piles", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 164(1), 33-49.

Kanty, P., Rybak, J. ve Stefaniuk, D. (2017). Some Remarks on Practical Aspects of Laboratory Testing of Deep Soil Mixing Composites Achieved in Organic Soils", In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 245, No. 2, p. 022018). IOP Publishing.

Karpisz, I., Pyda, J., Cichy, L. ve Sobala, D. (2018). "Study of the Effect of Cement Amount on the Soil-Cement Sample Strength", In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 365, No. 4, p. 042061). IOP Publishing.

Kiecana, M., Kanty, P. ve Łużyńska, K. (2018). "Optimal Control Time Evaluation for "Dry DSM" Soil-Cement Composites", In MATEC Web of Conferences (Vol. 251, p. 01023). EDP Sciences.

Lorenzo, G.A. ve Bergado, D.T. (2006). "Fundamental Characteristics of Cement-Admixed Clay in Deep Mixing", Journal of Materials in Civil Engineering, 18(2), 161-174.

Park, C.S. ve Park, H.K. (2018). "An Experimental Study on the Elastic Modulus of Deep Mixing Ground Specimen", Journal of the Korean Geotechnical Society, 34(10), 39-49.

Puppala, A.J., Madhyannapu, R.S., Nazarian, S., Yuan, D. Ve Hoyos, L.R. (2008). "Deep Soil Mixing Technology for Mitigation of Pavement Roughness", (No. FHWA/TX-08/0-5179-1).

Szymkiewicz, F., Barrett, A.G., Marino, J.P., Le Kouby, A. ve Reiffsteck, P. (2015). "Assessment of Strength and other Mechanical Properties of the Deep Mixing Material", In DFI Deep Mixing Conference 2015 (pp. 10-p).

Şengör, M.Y. (2011). "The Deformation Characteristics of Deep Mixed Columns in Soft Clayey Soils: A Model Study", Doctor of Philosophy in Civil Engineering Department, Middle East Technical University.

Truong, Q.T., Nguyen, N.L. ve Nguyen, T.Q.N. (2020). "Mechanical Behavior of Vinh Long Soil Mixed With Cement", In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 869, No. 7, p. 072004). IOP Publishing.

Van Impe, W.F., Verástegui Flores, R.D., Mengé, P. ve Van den Broeck, M. (2005). "Considerations on laboratory test results of cement stabilised sludge", In Proc. of the International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advance (Vol. 1, pp. 163-168).