DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİNDE UÇUCU KÜL VE ÇİMENTO KULLANIMININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE USE OF FLY ASH AND CEMENT IN THE DEEP MIXING METHOD

Ümmü Beste ÖZEL[1], Devrim ALKAYA[2]

ÖZET

Yapılaşmaya elverişli olmayan zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, düşük plastisiteli CL sınıfı ve %30 su içeriğine sahip bir kil zeminin çimento ve uçucu kül katkıları ile derin karıştırma yöntemi kullanılarak iyileştirilmesi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Zeminin kuru ağırlığına göre %5, %10 ve %15 çimento ile %2,5 çimento + %2,5 uçucu kül, %5 çimento + %5 uçucu kül ve %7,5 çimento + %7,5 uçucu kül içeren karışımlar hazırlanmıştır. Zemin özellikleri elek analizi, hidrometre, likit limit ve plastik limit deneyleriyle belirlenmiş; laboratuvarda oluşturulan ıslak derin karıştırma düzeneği ile numuneler üretilmiştir. Numunelerin 7, 14, 28, 45 ve 60 günlük kür sonundaki dayanımları tek eksenli serbest basınç deneyi ile belirlenmiş, bu veriler kullanılarak PLAXIS 2D analizleri yapılmıştır. En yüksek dayanım yalnızca çimento içeren numunelerde %15 çimento oranında 3025,37 kPa, çimento ve uçucu kül içeren karışımlarda ise %7,5 çimento + %7,5 uçucu kül oranında 1591,32 kPa olarak elde edilmiştir. Sonuçlar, yalnızca çimento içeren karışımların daha kısa kür sürelerinde daha yüksek dayanım sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Derin karıştırma yöntemi, zemin iyileştirme, serbest basınç mukavemeti, uçucu kül, sonlu elemanlar analizi

ABSTRACT

Various ground improvement methods are used to enhance the engineering properties of soils that are not suitable for construction. This study experimentally and numerically investigated the improvement of a low-plasticity CL clay with 30% water content by the deep mixing method using cement and fly ash. Mixtures containing 5%, 10%, and 15% cement, as well as 2.5% cement + 2.5% fly ash, 5% cement + 5% fly ash, and 7.5% cement + 7.5% fly ash by dry soil weight, were prepared. Soil properties were determined by sieve analysis, hydrometer, liquid limit, and plastic limit tests, and specimens were produced using a laboratory wet deep mixing setup. Unconfined compressive strengths after 7, 14, 28, 45, and 60 days of curing were used in PLAXIS 2D analyses. The highest strength among cement-only mixtures was 3025.37 kPa at 15% cement, while the maximum value for cement-fly ash mixtures was 1591.32 kPa at 7.5% cement + 7.5% fly ash. The results showed that cement-only mixtures achieved higher strength in shorter curing periods.

Keywords: Deep mixing method, ground improvement, unconfined compressive strength, fly ash, finite element analysis

1. GİRİŞ

Taşıma gücü, oturma, sıvılaşma problemlerinin olduğu zeminlerde farklı zemin iyileştirme yöntemleri uygulanarak zemin iyileştirme yapılabilmektedir. Zemin iyileştirmede taşıma gücünün artırılması, oturmaların ve şişme-büzülme potansiyelinin

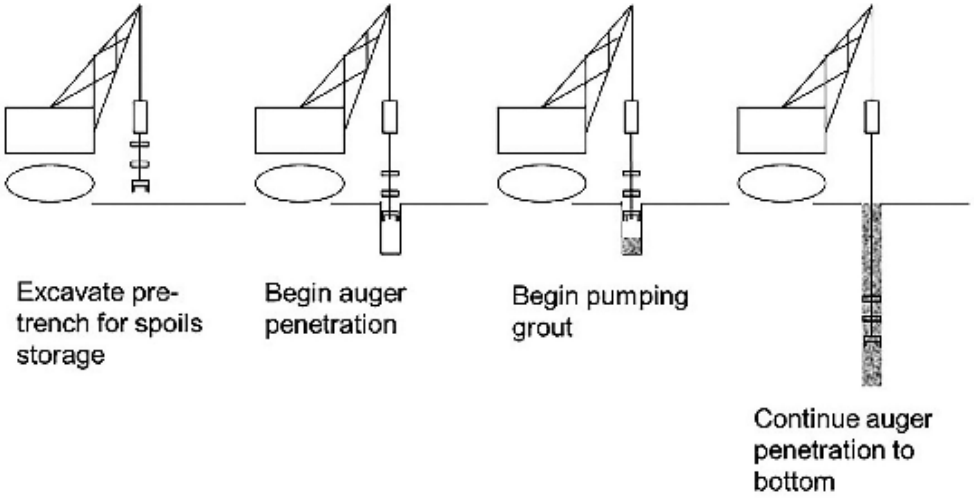
[1] İnşaat Yüksek Mühendisi, Ege Üniversitesi (Doktora Öğrencisi), gorenbeste@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Doç. Dr., Pamukkale Üniversitesi, dalkaya@pau.edu.tr

azaltılması, geçirimliliğin düşürülmesi ve sıvılaşma potansiyelinin azaltılması amaçlanmaktadır (Özaydın, 2012). Uygulanacak yöntemin seçimi zemin parametre özellikleri, zemin yapısı, inşa edilecek yapının özellikleri, iyileştirme yapımında kullanılacak olan ekipman seçimi, kullanılacak olan malzemenin ulaştırılması gibi çeşitli etkenlere bağlı olarak değişmektedir.

Derin karıştırma yöntemi, sıvılaşma riskinin azaltılması ve kazı destek sistemlerinin desteklenmesi gibi çeşitli geoteknik uygulamalarda kullanılmaktadır (FHWA, 2013). Yöntem, zeminin yerinde çimento, kireç veya benzeri bağlayıcılarla mekanik olarak karıştırılması ve daha yüksek dayanım, daha düşük sıkışabilirlik ve daha düşük geçirimlilik özelliklerine sahip bir zemin-bağlayıcı kompozitinin oluşturulması esasına dayanır. Kil zeminlerde taşıma kapasitesinin artırılması, oturmaların azaltılması ve yanal toprak basınçlarının kontrolü; kumlu zeminlerde ise taşıma kapasitesinin artırılması, oturmaların azaltılması ve sıvılaşma potansiyelinin düşürülmesi amacıyla uygulanabilmektedir (Kaptan vd., 2021).

Derin karıştırma yöntemi ıslak ve kuru derin karıştırma olarak iki grupta incelenebilir. Islak yöntem zeminin taşıma kapasitesini artırmak, dolgularda oturmayı kontrol etmek ve kesme mukavemetinin artırılmasına kullanılmaktadır. Kolon serbest basınç dayanımı, zemine ve bağlayıcı türüne bağlı olarak 200 kPa ila 2000 kPa arasında değişkenlik göstermektedir (Kitazume, 2017). Yumuşak kil, silt ve ince kumlarda su muhtevasının düşük olduğu (<%60) olan zeminlerde uygulanabilmektedir. Kuru yöntem, yüksek su muhtevasına sahip kohezyonlu zeminlerde zemin stabilizasyonu için kullanılmaktadır. Kuru yöntemle iyileştirilen bir kilin dayanımı 1.7-3.2 katına çıkabilmektedir (Rashid, 2017). Kuru yöntem ile iyileştirilen bir zeminin drenajsız kayma mukavemeti 50 kPa düzeyinden 150 kPa düzeyine değişmekte iken laboratuvar deneyleri ile elde edilen değerlerin yaklaşık 10 katı kadar elde edilmektedir. Mukavemetlerin arasındaki fark oluşmasının nedeni ise bu tür mukavemet artışlarının yerinde pek görünmemesidir (EuroSoilStab, 2002).

Derin karıştırma yöntemi uygulamasında delici makine, projede belirlenen kolon noktasına yerleştirilir (Şekil 1). Zeminin bağlayıcı malzeme ile karıştırılmasını sağlayan karıştırıcı uç Şekil 2'de gösterilmiştir. Karıştırıcı şaft belirlenen derinliğe ilerletilir; bağlayıcı malzeme zemine verilerek karıştırılır ve şaftın geri çekilmesiyle iyileştirilmiş kolon oluşturulur.



Şekil 1. Islak derin karıştırma yöntemi uygulaması (Evans vd., 2022)



Şekil 2. Karıştırıcı uç (Gören, 2023)

Termik santraller her yıl milyonlarca ton atık malzeme oluşturmakta ve bu atık malzemelerin depolanması çeşitli sorunlara yol açmaktadır. Bu çalışma kapsamında düşük plastisiteli bir kilin farklı oranlarda kullanılan uçucu kül ve çimento ile derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmesi incelenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Bu çalışmada Denizli ilinin Çardak ilçesinden alınan kil numuneleri kullanılmıştır. Kilin temel indeks özellikleri ve doğal durumdaki serbest basınç dayanımı Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan uçucu kül Yatağan Termik Santrali'nden temin edilmiş olup kimyasal bileşimi Tablo 2'de sunulmuştur. İlk aşamada zeminin doğal haldeki dayanımı belirlenmiş sonrasında ise belirlenen oranlarda çimento ve uçucu kül ile karıştırılarak kür sürelerinin tamamlanması ile tek eksenli basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Zeminin doğal durumdaki su muhtevası %2 olup iyileştirme için belirlenen %30 su muhtevasına getirilmiştir.

Tablo 1. Kil zeminin temel indeks ve dayanım özellikleri

Özellik	**Değer**
Zemin sınıfı	CL
Deney su içeriği, w	%30
Likit limit, w_L	%34,89
Plastik limit, w_P	%20,49
Plastisite indisi, I_P	%14,1
Doğal zeminin q_u değeri	7,64 kPa

Tablo 2. Uçucu külün kimyasal bileşimi

Bileşen	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
Oran (%)	50,77	21,13	6,17	12,44	4,53	1,33	0,24	2,54

2.2. Deney programı

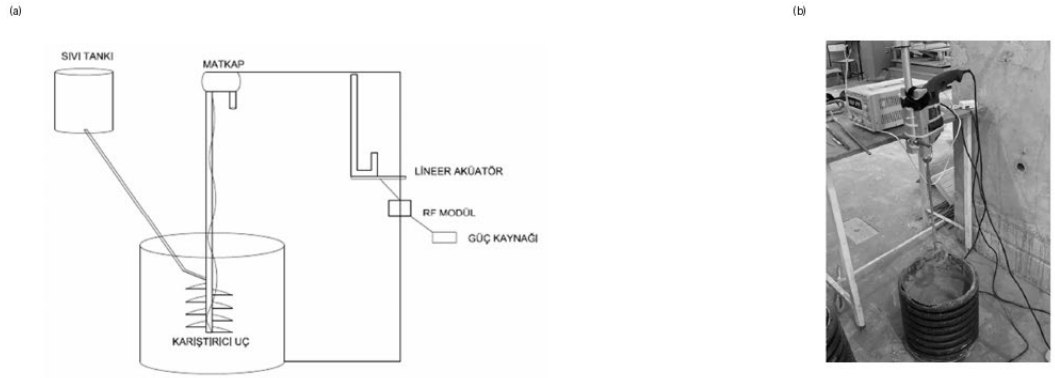
Deneylerde bağlayıcı malzeme olarak çimento ve uçucu kül kullanılmıştır. Çimento ve uçucu kül karışım oranları ve kür programları Tablo 3. de verilmiştir. İki deney seti oluşturularak elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. İlk deney setinde kil numunesinin %5, %10 ve %15 çimento kullanılırken ikinci deney setinde %5, %10 ve %15 olmak üzere eşit oranda çimento ve uçucu kül kullanılmıştır.

Tablo 3. Karışım oranları ve kür programı

Karışım kodu	Çimento (%)	Uçucu kül (%)	Kür süreleri (gün)
C5	5	-	7, 14, 28, 45, 60
C10	10	-	7, 14, 28, 45, 60
C15	15	-	7, 14, 28, 45, 60
C2,5-UK2,5	2,5	2,5	7, 14, 28, 45, 60
C5-UK5	5	5	7, 14, 28, 45, 60
C7,5-UK7,5	7,5	7,5	7, 14, 28, 45, 60

2.3. Deney düzeneği ve numune hazırlama

Pamukkale Üniversitesi Deprem ve Yapı Teknolojileri Araştırma Laboratuvarında hazırlanan düzenek Şekil 3'te verilmiştir. Ölçekli derin karıştırma düzeneğinde karıştırıcı olarak matkap kullanılmış ve karıştırma verimini artırmak amacıyla matkap ucuna kanatlar kaynak ile eklenmiştir. Karıştırıcı ucun sabit hızla düşey hareketi lineer aktüatörle sağlanmış; sistem RF modül ve güç kaynağıyla kontrol edilmiştir. Numuneler 30 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde koruge PVC borular içinde hazırlanmıştır. Boru tabanında drenaj amacıyla geosentetik tabaka ve yaklaşık 1 mm çaplı delikler kullanılmıştır.



Şekil 3. Laboratuvar derin karıştırma düzeneği: (a) şematik gösterim, (b) hazırlanan düzenek

Kil, hedef su içeriğine getirildikten sonra kalıplara yerleştirilmiş ve her numuneye 24 saat boyunca 5 kN/m² ön yükleme uygulanmıştır. Ön yüklemenin ardından zemin önce karıştırılmış, daha sonra belirlenen bağlayıcı malzemeler eklenerek karıştırma işlemine

devam edilmiştir. Hazırlanan kolonlardan 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik numuneler alınmış, nem kaybını önleyecek şekilde saklanmıştır.

2.4. Serbest basınç deneyi

Her karışım ve kür süresi için 5'er adet numune hazırlanmıştır. Serbest basınç deneyleri 3 kN kapasiteli yükleme sistemi ve 0,01 mm hassasiyetli deformasyon halkası kullanılarak 0,5 mm/dakika yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Karışımların ortalama serbest basınç dayanımları doğal zemin değeriyle karşılaştırılmıştır. Deney programında 7, 14, 28, 45 ve 60 günlük kür süreleri esas alınmıştır. Deney öncesi numune görseli Şekil 4'te ve serbest basınç deneyi sonrası numune görselleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Numunelerin deneye başlamadan önceki durumu.



Şekil 5. 14 günlük numunelerin tek eksenli basınç deneyi sonrası.

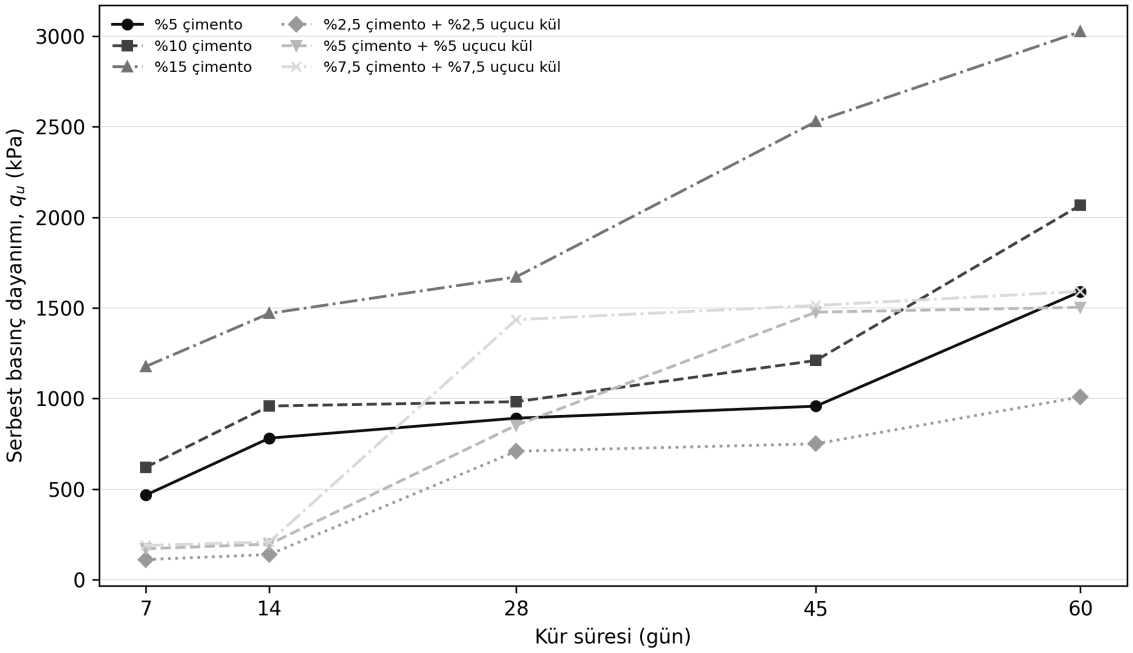
3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Serbest basınç deneylerinden elde edilen ortalama dayanımlar Tablo 4'te verilmiştir. Bütün bağlayıcı kombinasyonlarında doğal zeminin 7,64 kPa olan dayanımına göre belirgin artış gerçekleşmiştir. Çimento içeren numuneler ilk 7 ve 14 günde yüksek dayanım

kazanırken, uçucu kül içeren karışımlarda erken yaş dayanımları daha düşük kalmış ve temel artış 14-28 gün arasında meydana gelmiştir.

Tablo 4. Kür süresine bağlı ortalama serbest basınç dayanımları, q_u (kPa)

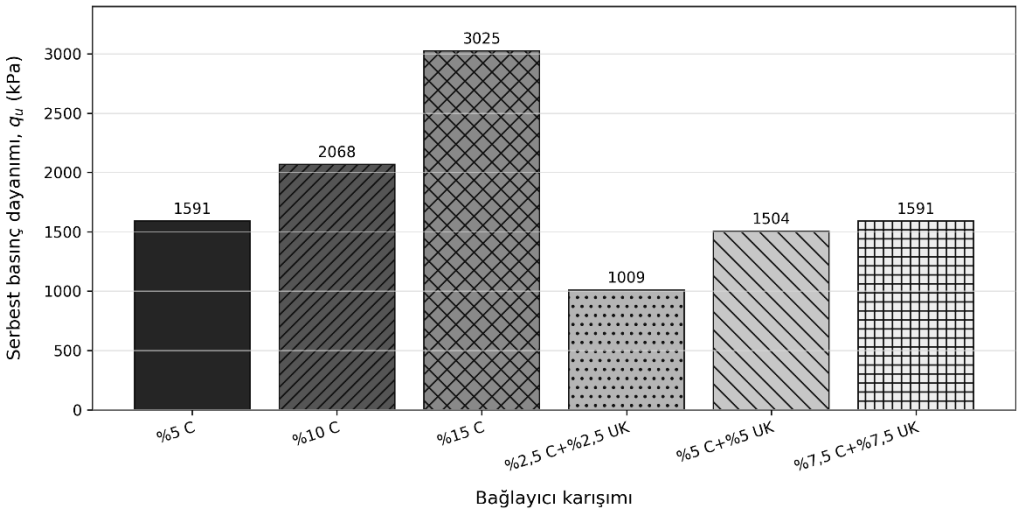
Karışım	7 gün	14 gün	28 gün	45 gün	60 gün
C5	467,46	781,51	891,71	957,94	1590,51
C10	620,88	958,77	982,62	1210,26	2067,73
C15	1177,61	1470,11	1671,60	2528,82	3025,37
C2,5-UK2,5	111,28	139,11	709,28	750,32	1008,68
C5-UK5	170,77	196,40	852,56	1477,11	1503,79
C7.5-UK7.5	189,04	208,78	1435,53	1513,98	1591,32



Şekil 6. Karışımların kür süresine bağlı serbest basınç dayanımı değişimi.

Sadece çimento serilerinde serbest basınç dayanımı, kullanılan bağlayıcı oranıyla birlikte düzenli biçimde artmıştır. C15 karışımının dayanımı 7 günde 1177,61 kPa iken 60 günde 3025,37 kPa düzeyine ulaşmıştır. C5 ve C10 karışımlarının 60 günlük dayanımları sırasıyla 1590,51 kPa ve 2067,73 kPa değerindedir. Bu değerler doğal zeminin dayanımının yaklaşık 208, 271 ve 396 katına karşılık gelmektedir.

Uçucu kül içeren numunelerde erken yaş dayanımının düşük olması, çimento hidratasyonuna ek olarak zamana bağlı puzolanik reaksiyonların etkili olduğunu göstermektedir. C2,5-UK2,5, C5-UK5 ve C7,5-UK7,5 karışımlarının 28 günlük dayanımları 7 günlük dayanımlarının sırasıyla yaklaşık 6,37, 4,99 ve 7,59 katıdır. Buna karşılık aynı oran çimento serilerinde 1,42-1,91 aralığındadır. Dolayısıyla uçucu külün temel katkısı özellikle 14. günden sonra belirginleşmiştir.



Şekil 7. Karışımların 60 günlük serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

Altmış günlük kür sonunda en yüksek dayanım %15 çimento karışımında 3025,37 kPa olarak belirlenmiştir. Uçucu kül içeren karışımlarda en yüksek değer %7,5 çimento+%7,5 uçucu kül için 1591,32 kPa'dır. Aynı toplam bağlayıcı oranına sahip karışımlar karşılaştırıldığında saf çimento daha yüksek dayanım sağlamıştır. Bununla birlikte C5-UK5 karışımının 60 günlük dayanımı 1503,79 kPa olup C5 karışımının 1590,51 kPa değerine yaklaşmıştır.

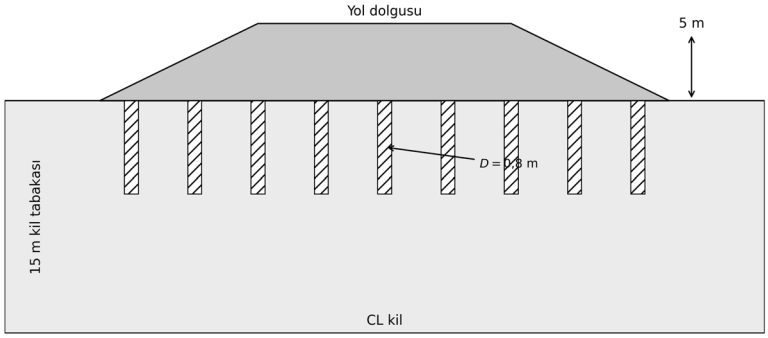
Bergado ve Lorenzo (2005), uygun su içeriğinde çimento gereksiniminin azaltılabileceğini; Dias vd. (2012) ise bağlayıcı dozajının artmasıyla dayanımın yükseldiğini bildirmiştir. Bu çalışmadaki çimento serileri söz konusu eğilimlerle uyumludur. Uçucu kül serilerinde görülen gecikmiş dayanım gelişimi, atık malzemenin yalnızca erken yaş dayanımı üzerinden değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir. Uygulamada hedef kür süresi, gerekli tasarım dayanımı ve bağlayıcı maliyeti birlikte ele alınmalıdır.

Sonlu elaman analizlerinde 60 günlük serbest basınç dayanımları dikkate alınmıştır. Bu bildirinin dayandığı yüksek lisans tezinde (Gören, 2023) uygulanan kabule göre kolon tasarım dayanımı (qdm,spec), serbest basınç dayanımının yarısı olarak belirlenmiştir. Alan değiştirme oranına bağlı eşdeğer kompozit kohezyon değerleri ise FHWA (2013) yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır.

4. SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

4.1. Model geometrisi ve malzeme yaklaşımı

Sayısal analizlerde, 15 m kalınlığındaki kil tabakası üzerinde 5 m yüksekliğinde ve 1D:2Y şev eğimine sahip bir yol dolgusu modellenmiştir. Dolgu tabanında 0,8 m çaplı derin karıştırma kolonları; 2,0, 2,5 ve 3,0 m kare yerleşim aralıkları ile 4,5-6,0 m arasında değişen kolon boylarında incelenmiştir. Analizler PLAXIS 2D yazılımında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8. Yol dolgusu ve derin karıştırma kolonlarının şematik gösterimi.

Kil ve dolgu tabakalarının gerilme–şekil değiştirme davranışı Mohr–Coulomb (MC) bünye modeli ile temsil edilmiştir. Kil için drenajsız, dolgu için drenajlı; eşdeğer kompozit bölge için ise boşluk suyu basıncı oluşumu ve akışının dikkate alınmadığı geçirimsiz malzeme davranışı dikkate alınmıştır. Kompozit bölgenin elastisite modülü, eşdeğer kohezyonun 500-1000 katı aralığında değerlendirilmiştir (Ameratunga vd., 2016). Analiz için kullanılan kil ve dolgu malzeme parametreleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. s=3,0 m ve L=5,0 m için kil ve dolgu malzeme parametreleri

Malzeme	γunsat (kN/m³)	γsat (kN/m³)	E (MPa)	ν	c′ (kPa)	φ′ (°)	ψ (°)
Kil	15	17	30	0,35	0	30	0
Dolgu	19	19,5	50	0,35	5	35	5

4.2. Eşdeğer kompozit parametreler

Kolon-zemin kompozit bölgesinin parametreleri FHWA (2013) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Kare kolon yerleşimi için alan değiştirme oranı a_s, tasarım kolon dayanımı $q_{dm,spec}$ ve eşdeğer kohezyon c_{eq} aşağıdaki bağıntılarla belirlenmiştir. Burada d_{dm} kolon çapını, s kolonlar arası merkezden merkeze mesafeyi ve s_{soil} doğal zeminin kayma dayanımını göstermektedir.

$$a_s = \pi\, d_{dm}^2 / (4\, s^2) \tag{1}$$

$$q_{dm,spec} = qu / 2 \tag{2}$$

$$c_{eq} = a_s\, q_{dm,spec} + (1 - a_s)\, s_{soil} \tag{3}$$

Tablo 6. Seçilen 60 günlük dayanımlara göre kolon tasarım parametreleri

Karışım	q_u (kPa)	$q_{dm,spec}$ (kPa)	c_{eq}, s=2,0 m (kPa)	c_{eq}, s=2,5 m (kPa)	c_{eq}, s=3,0 m (kPa)
C5	1590,51	795,26	102,75	67,14	48,06
C10	2067,73	1033,87	132,58	86,22	61,40
C15	3025,37	1512,66	192,43	124,53	88,17
C2,5-UK2,5	1008,68	504,34	66,39	43,86	31,80
C5-UK5	1503,79	751,90	97,33	63,67	45,64
C7,5-UK7,5	1591,32	795,66	102,80	67,17	48,01

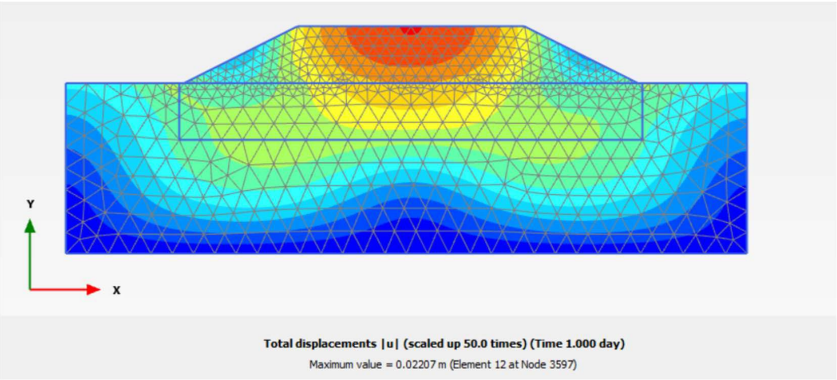
Alan değiştirme oranı kolon aralığının artmasıyla azalmış; bu nedenle bütün karışımlarda eşdeğer kompozit kohezyon 2,0 m yerleşime göre 3,0 m yerleşimde belirgin biçimde düşmüştür. Bu parametreler sonraki stabilite ve deplasman analizlerinde kullanılmıştır.

4.3. Sonlu eleman analizi sonuçları

Yol dolgusuna ait şev stabilitesi değerlendirmesinde hedef güvenlik katsayısı FS≥1,50 olarak kabul edilmiştir. Yapılan analizlerde kolon aralığı arttıkça eşdeğer kompozit kohezyon azalmış, buna bağlı olarak deplasmanlar artmış ve güvenlik katsayısı düşmüştür. En düşük bağlayıcı içerikli C2,5-UK2,5 karışımı, 3,0 m aralık ve 5,0 m kolon boyunda 1,45 güvenlik katsayısıyla hedef değeri sağlayamamıştır. Diğer karışımlar aynı geometri için 1,64-2,05 aralığında güvenlik katsayısı vermiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen toplam deplasman ve güvenlik katsayısı değerleri Tablo 7'de ve Şekil 9'da verilmiştir.

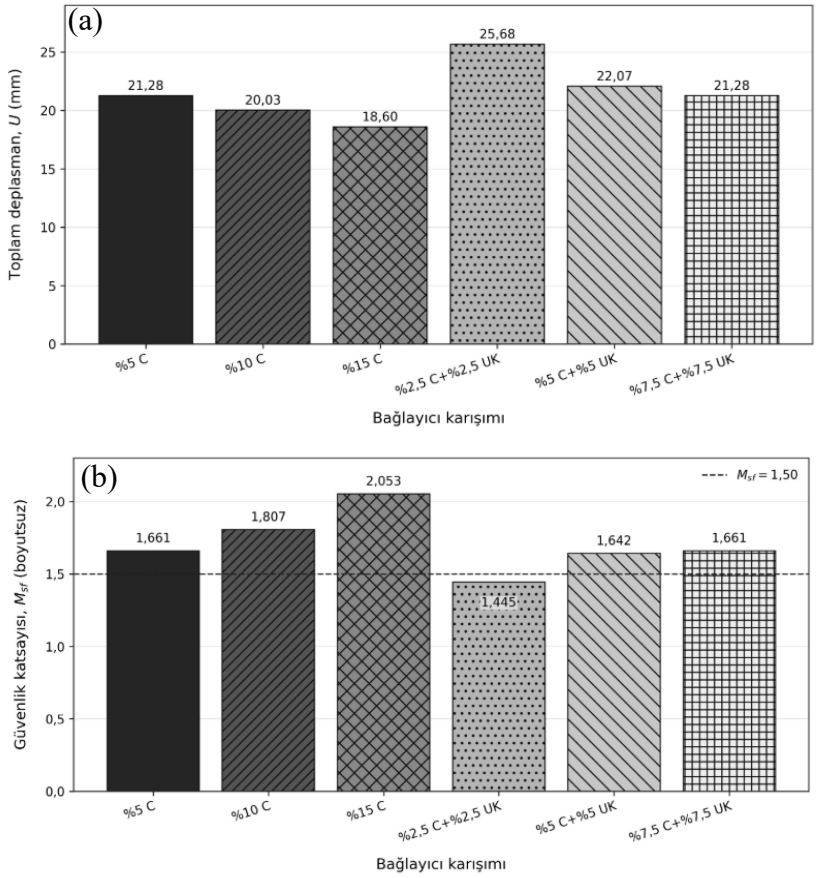
Tablo 7. s=3,0 m ve L=5,0 m için sayısal analiz sonuçları

Karışım	Toplam deplasman U (m)	Güvenlik katsayısı Msf	Değerlendirme
C5	0,02128	1,66	Uygun
C10	0,02003	1,81	Uygun
C15	0,01860	2,05	Uygun
C2,5-UK2,5	0,02568	1,45	Yetersiz
C5-UK5	0,02207	1,64	Uygun
C7,5-UK7,5	0,02128	1,66	Uygun



Şekil 9. %5 çimento+%5 uçucu kül için analiz deplasman değeri

C5-UK5 karışımının toplam deplasmanı 22,07 mm ve güvenlik katsayısı 1,64'tür. Analiz sonucu elde edilen deplasman değerine ait görsel Şekil 9'da verilmiştir. Aynı çimento içeriğine sahip C5 karışımında bu değerler 21,28 mm ve 1,66 olarak hesaplanmıştır. İki tasarımın sayısal performansı birbirine yakın olduğundan, uçucu kül kullanımı bağlayıcı tüketimini azaltan çevresel bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte saha uygulamasında trafik yükleri, kolon imalat toleransları, arazi dayanımı ve uzun süreli deformasyonlar ayrıca değerlendirilmelidir.



Şekil 10. s=3,0 m ve L=5,0 m için (a) toplam deplasman ve (b) güvenlik katsayısı sonuçları.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, CL sınıfındaki kil zeminin çimento ve çimento–uçucu kül karışımları kullanılarak ıslak derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmesi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen dayanım parametrelerinin bir yol dolgusu tasarımına aktarılması incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, bağlayıcı içeren tüm karışımlarda doğal zemine kıyasla belirgin bir dayanım artışı sağlandığını göstermiştir. Saf çimento içeren numunelerde serbest basınç dayanımının hem erken kür yaşlarında hem de 60 günlük kür süresi sonunda çimento içeriğinin artmasıyla birlikte yükseldiği belirlenmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımı, %15 çimento içeren karışımda 60 günlük kür sonunda 3025,37 kPa olarak elde edilmiş; aynı kür süresinde %5 ve %10 çimento içeren numunelerde sırasıyla 1590,51 kPa ve 2067,73 kPa dayanım değerlerine ulaşılmıştır.

Çimento–uçucu kül karışımlarında ise erken yaş dayanımlarının saf çimento içeren numunelere kıyasla daha düşük olduğu, ancak dayanım gelişiminin özellikle 14–28 günlük kür aralığında belirgin biçimde hızlandığı görülmüştür. Uçucu kül içeren karışımlar arasında en yüksek dayanım, %7,5 çimento + %7,5 uçucu kül içeren numunede 1591,32 kPa olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, %5 çimento + %5 uçucu kül karışımının 60 günlük kür sonunda ulaştığı 1503,79 kPa dayanım değeri, yalnızca %5 çimento içeren karışımın 1590,51 kPa değerine oldukça yakın bulunmuştur. Bu bulgu, yeterli kür süresinin sağlanması durumunda uçucu külün çimentonun belirli bir bölümünün yerine kullanılabileceğini ve bunun sonucunda çimento tüketiminin azaltılabileceğini göstermektedir.

Laboratuvar deneylerinden elde edilen dayanım değerlerinin tasarım ölçeğindeki etkileri sonlu eleman analizleri ile değerlendirilmiştir. 3,0 m kolon aralığı ve 5,0 m kolon boyu esas alınarak gerçekleştirilen analizlerde, en düşük bağlayıcı içeriğine sahip %2,5 çimento + %2,5 uçucu kül karışımı dışındaki tüm tasarım alternatiflerinin 1,50 hedef güvenlik katsayısını sağladığı belirlenmiştir. Özellikle %5 çimento + %5 uçucu kül karışımı için toplam deplasman 22,07 mm, güvenlik katsayısı ise 1,64 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerlerin %5 çimento içeren tasarım seçeneğine yakın olması, söz konusu karışımın yalnızca geoteknik performans açısından değil, aynı zamanda atık malzemenin değerlendirilmesi ve çimento tüketiminin azaltılması bakımından da uygulanabilir bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, çalışmanın laboratuvar ölçeğinde yürütülmüş olması nedeniyle önerilen bağlayıcı oranlarının ve kolon geometrilerinin doğrudan saha uygulamasına aktarılmasından önce arazi koşullarında doğrulanması gerekmektedir. Bu kapsamda deneme kolonlarının teşkil edilmesi, saha kalite kontrol deneylerinin gerçekleştirilmesi ve uzun dönemli performansın izlenmesi önerilmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı özelliklere sahip uçucu kül türlerinin, değişen su/bağlayıcı oranlarının ve daha uzun kür sürelerinin dayanım ve deformasyon davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması, derin karıştırma uygulamalarında daha optimum ve sürdürülebilir karışım tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2021FEBE051 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Ameratunga, J., Sivakugan, N. ve Das, B.M. (2016), Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering, Springer India.

Bergado, D.T. vd. (2005), "Economical Mixing Method for Cement Deep Mixing", Geo-Frontiers Congress.

Dias, D.R. vd. (2012), "Preliminary Laboratory Tests to Study the Increase of Strength in Samples of Soft Soil with Cement, for Treatments Using Dry-Mix System", Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing.

EuroSoilStab (2002), "Design Guide: Soft Soil Stabilisation: Development of Design and Construction Methods to Stabilise Soft Organic Soils", BRE Press, EP 60.

Evans, J. ve Ruffing, D. (2022), Fundamentals of Ground Improvement Engineering, CRC Press, India.

Federal Highway Administration- FHWA (2013), Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support, U.S. Department of Transportation, Washington.

Gören, Ü. B. (2023). Laboratuvar Deneyleri ve Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri Kullanılarak Derin Karıştırma Yöntemi ile Zemin İyileştirmenin İncelenmesi. Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

İmançlı, G. (2002), "Uçucu Küllerin Zemin Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Kaptan, E.C. (2021), "Derin Karıştırma Yöntemi ile İyileştirilen Zeminlerde Elastisite Modülü ve Serbest Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişkinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

Kitazume, M. ve Terashi, M. (2013), The Deep Mixing Method, CRC Press, The Netherlands.

Kwan, P. vd. (2005), "Behaviour of Cement Treated Melbourne and Southeast Queensland Soft Clays in Deep Stabilization Works", International Conference on Deep Mixing, Deep Mixing'05, Stockholm, Sweden.

Özaydın, K. (2012), "Zeminlerin İyileştirilmesi", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi, 4-5 Ekim 2012, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Pathivada, S.P. (2005), "Effects of Water-Cement Ratio on Deep Mixing Treated Expansive Clay Characteristics", Yüksek Lisans Tezi, The University of Texas at Arlington.

Rashid, A.S.A., Bunawan, A.R. ve Mat Said, K.N. (2017), "The Deep Mixing Method: Bearing Capacity Studies", Geotechnical and Geological Engineering, 35(4), 1271-1298.

TSE (2006), TS EN 14679, Özel Geoteknik Uygulamalar- Derin Karıştırma.

Çakır, N.G. (2019), "Derin Karıştırma Yöntemi ve Farklı Analiz Tekniklerinin Karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
a_s	Alan değiştirme oranı	q_u	Serbest basınç dayanımı
c_{eq}	Eşdeğer kompozit kohezyon	$q_{dm,spec}$	Tasarım kolon dayanımı
d_{dm}	Derin karıştırma kolonu çapı	s	Kolonlar arası mesafe
L	Kolon boyu	U	Toplam deplasman
M_sf	Güvenlik katsayısı	w	Su içeriği
w_L	Likit limit	w_P	Plastik limit
I_P	Plastisite indisi	UK	Uçucu kül
s_{soil}	Doğal zeminin kayma dayanımı	C	Çimento