Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERDE BAĞLAYICI SİSTEMİN DSM KOLON PERFORMANSINA ETKİSİ: VAKA ANALİZİ

EFFECT OF BINDER SYSTEM ON DSM COLUMN PERFORMANCE IN HIGH-PLASTICITY CLAY SOILS: CASE STUDY

Muhammed AYDIN[1], Gözde SEZGİN TUNÇAY[2]

ÖZET

Derin Zemin Karıştırma (Deep Soil Mixing–DSM) yöntemi, düşük taşıma gücüne sahip zeminlerin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan ve uygulama performansı zemin özelliklerine önemli ölçüde bağlı olan bir zemin iyileştirme tekniğidir. Yüksek plastisiteli kil zeminlerde ise karıştırma etkinliğinin azalması, kolon sürekliliğinin bozulması ve hedeflenen dayanım düzeylerine ulaşılamaması, yöntemin başarısını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, yüksek plastisiteli kil zemin koşullarında gerçekleştirilen bir DSM uygulamasının performansı; saha gözlemleri, kalite kontrol çalışmaları ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Saha uygulaması sırasında, yüksek plastisiteli kilin karıştırıcı takım üzerine sarılması ve topaklanması sonucunda karıştırma etkinliğinin azaldığı, bağlayıcının zemin içerisinde homojen biçimde dağılmasının güçleştiği ve kolon sürekliliğinde sorunlar meydana geldiği belirlenmiştir. Boy karot, tek eksenli basınç dayanımı deneyleri ve jeofizik yöntemlerden elde edilen bulgular da saha gözlemleriyle uyumlu sonuçlar vermiştir. Belirlenen problemlerin giderilmesi amacıyla bağlayıcı bileşimi yeniden düzenlenmiş ve çimento–kireç esaslı bir bağlayıcı sistem kullanılarak ilave DSM kolonları imal edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kireç katkısının kil zeminin işlenebilirliğini artırdığını, karıştırma davranışını iyileştirdiğini ve buna bağlı olarak kolon sürekliliği, homojenliği ve mekanik performansında belirgin gelişmeler sağladığını göstermiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular, yüksek plastisiteli kil zeminlerde DSM performansının yalnızca bağlayıcı dozajına bağlı olmadığını; bağlayıcı bileşimi, zemin özellikleri, ekipman özellikleri ve uygulama parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, benzer zemin koşullarında gerçekleştirilecek DSM uygulamalarına yönelik mühendislik değerlendirmeleri yapılmış ve uygulama başarısının artırılmasına yönelik çözüm önerileri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Derin Zemin Karıştırma (DSM), zemin iyileştirme, yüksek plastisiteli kil, çimento–kireç bağlayıcı, kolon sürekliliği, tek eksenli basınç dayanımı.*

ABSTRACT

Deep Soil Mixing (DSM) is a widely used ground improvement technique for soils with low bearing capacity, and its field performance is highly dependent on soil properties. In high-plasticity clay soils, reduced mixing efficiency, loss of column continuity, and failure to achieve the target strength levels may adversely affect the overall success of the method. In this study, the performance of a DSM application carried out under high-plasticity clay soil conditions was evaluated based on field observations, quality control studies, and laboratory test results. During field implementation, it was observed that the high-plasticity clay adhered to and wrapped around the mixing tool and formed lumps, which reduced the mixing efficiency, hindered the homogeneous distribution of the binder within the soil, and resulted in problems related to column continuity. The findings obtained from continuous coring, unconfined compressive strength tests, and geophysical methods were also consistent with the field observations. To overcome the identified problems, the binder composition was modified, and additional DSM columns were constructed using a cement–lime-based binder system. The results showed that the addition of lime improved the workability of the clayey soil and the mixing behavior, thereby providing significant improvements in column continuity,

[1] İnşaat Mühendisi, FMA Geoteknik Proje Dan.ve Zemin Arşt. Ltd. Şti, fmageoteknik@gmail.com
[2] Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, gozdesezgin.tuncay@nisantasi.edu.tr (Sorumlu yazar)

homogeneity, and mechanical performance. The findings of the study demonstrate that DSM performance in high-plasticity clay soils depends not only on binder dosage but also on the combined evaluation of binder composition, soil properties, equipment characteristics, and operational parameters. Accordingly, engineering assessments were carried out for DSM applications under similar soil conditions, and recommendations were proposed to improve field performance and implementation success.
Keywords: *Deep Soil Mixing (DSM), high-plasticity clay, cement–lime binder, column continuity, unconfined compressive strength.*

1. GİRİŞ

Derin Karıştırma Yöntemi (Deep Soil Mixing, DSM), zayıf zeminlerin yerinde çimento, kireç veya farklı bağlayıcı malzemelerle mekanik olarak karıştırılması yoluyla zemin içerisinde daha yüksek dayanım ve rijitliğe sahip zemin-bağlayıcı elemanların oluşturulmasına dayanan bir zemin iyileştirme yöntemidir. DSM uygulamaları ile zeminin taşıma gücünün artırılması, toplam ve farklı oturmaların sınırlandırılması, deformasyon özelliklerinin iyileştirilmesi ve uygun zemin koşullarında sıvılaşma riskinin azaltılması amaçlanmaktadır. Yöntemin farklı zemin türlerine ve proje gereksinimlerine uyarlanabilmesi, özellikle yumuşak kohezyonlu zeminler ve gevşek granüler zeminlerde geniş bir uygulama alanı oluşturmuştur (EuroSoilStab, 2002; Topolnicki, 2004; FHWA, 2013; Kitazume & Terashi, 2013).

DSM uygulamalarında elde edilen performans, yalnızca kullanılan bağlayıcı miktarına veya kolon geometrisine bağlı değildir. Zemin türü, tane boyu dağılımı, doğal su muhtevası, plastisite ve mineralojik özellikler ile bağlayıcı türü ve uygulama parametreleri, zemin-bağlayıcı etkileşimini ve sonuçta oluşan kolonun mühendislik özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Bruce, 2000; EuroSoilStab, 2002; Topolnicki, 2004; FHWA, 2013). Bu nedenle aynı bağlayıcı sistemi ve benzer imalat parametreleri farklı zemin koşullarında farklı performans gösterebilmekte; DSM tasarımının saha koşullarına özgü olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Özellikle yüksek plastisiteli kil zeminler, DSM uygulamaları açısından daha karmaşık karıştırma davranışı gösterebilmektedir. Kilin yüksek kohezyonu ve plastisitesi, karıştırma sırasında zeminin karıştırıcı ekipmana yapışmasına veya sarılmasına, bağlayıcının zemin kütlesi içerisinde homojen biçimde dağılmasının güçleşmesine ve yer yer zemin-bağlayıcı topaklarının oluşmasına neden olabilmektedir. Bu durum kolon boyunca bağlayıcı dağılımında farklılıklara, dayanım değişkenliğine ve düşey sürekliliğin olumsuz etkilenmesine yol açabilmektedir. Literatürde bu nedenle DSM performansının değerlendirilmesinde yalnızca bağlayıcı dozajının veya tek eksenli basınç dayanımının dikkate alınmasının yeterli olmadığı; karıştırılabilirlik, bağlayıcı-zemin uyumu, kolon sürekliliği ve saha kalite kontrol sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (EuroSoilStab, 2002; Topolnicki, 2004; FHWA, 2013; Kitazume & Terashi, 2013).

Kohezyonlu zeminlerde karşılaşılan bu problemlerin azaltılması amacıyla bağlayıcı sisteminin zemin özelliklerine göre düzenlenmesi önemli çözüm yaklaşımlarından biridir. Çimentoya ek olarak kireç kullanılması, özellikle kil zeminlerde zeminin fiziksel ve kimyasal davranışını değiştirebilmektedir. Kireç ile kil mineralleri arasındaki katyon değişimi ve flokülasyon-aglomerasyon mekanizmaları zeminin plastisite ve işlenebilirlik özelliklerini etkilerken, daha uzun dönemde meydana gelen puzolanik reaksiyonlar dayanım gelişimine katkı sağlayabilmektedir (Bell, 1996). Bu özellikler nedeniyle çimento-kireç esaslı bağlayıcı sistemleri, yüksek plastisiteli zeminlerde karıştırma

davranışının ve zemin-bağlayıcı etkileşiminin geliştirilmesi açısından alternatif bir yaklaşım oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, yüksek plastisiteli kil zeminlerde DSM uygulaması sırasında karşılaşılan imalat ve performans problemlerini gerçek bir saha uygulaması üzerinden ortaya koymak ve bağlayıcı bileşiminde yapılan değişikliğin bu problemlerin giderilmesine etkisini araştırmaktır. Bu kapsamda Sakarya ili Serdivan ilçesinde gerçekleştirilen DSM uygulaması vaka analizi olarak ele alınmıştır. İlk uygulama sırasında karıştırıcı ekipman üzerinde belirgin kil sarılması, bağlayıcı şerbetinin zemin içerisinde homojen dağılamaması ve şerbetin bir bölümünün yüzeye geri dönmesi gibi saha problemleri gözlenmiştir. Bu gözlemler, yüksek plastisiteli kilin karıştırılabilirlik özelliklerinin kolon oluşumu üzerindeki etkisinin ayrıca değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Sahada belirlenen problemlerin giderilmesi amacıyla, literatürde yüksek plastisiteli killer için belirtilen zemin-bağlayıcı etkileşimleri dikkate alınarak bağlayıcı bileşiminde değişikliğe gidilmiş ve çimento esaslı sisteme kireç dahil edilmiştir. Buradaki temel yaklaşım yalnızca kolon basınç dayanımının artırılması değil; kilin karıştırılabilirliğinin geliştirilmesi, karıştırıcı ekipman üzerindeki kil sarılmasının azaltılması, bağlayıcının kolon kesiti ve derinliği boyunca daha homojen dağılımının sağlanması ve kolon sürekliliğinin geliştirilmesidir. Böylece bağlayıcı bileşimindeki değişikliğin hem imalat sürecindeki fiziksel davranışa hem de nihai kolon performansına etkisinin birlikte incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın diğer bir amacı, DSM kolon performansının tek bir deney veya yalnızca basınç dayanımı üzerinden değerlendirilmesi yerine, birbirini tamamlayan farklı kalite kontrol yöntemlerinden elde edilen veriler kullanılarak bütüncül biçimde incelenmesidir. Bu doğrultuda kolonların düşey sürekliliği ve bütünlüğü Pile Integrity Test (PIT) ve boy karot çalışmalarıyla, mekanik performansı tek eksenli basınç dayanımı (UCS) deneyleriyle, kolonların saha ölçeğindeki süreklilik ve homojenlik özellikleri Yer Radarı (GPR) ölçümleriyle değerlendirilmiştir. Ayrıca Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) sonuçları kullanılarak uygulama öncesi ve sonrası zemin kütlesinin kayma dalgası hızı özelliklerindeki değişim incelenmiştir.

2. DSM UYGULAMALARINDA KARŞILAŞILAN MÜHENDİSLİK PROBLEMLERİ

Derin Karıştırma (Deep Soil Mixing-DSM) yöntemi, farklı zemin koşullarında uygulanabilen etkili bir zemin iyileştirme tekniği olmakla birlikte, uygulama performansı zemin özellikleri ve imalat parametrelerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir (Topolnicki, 2004; FHWA, 2013). Aynı bağlayıcı sistemi ve benzer ekipman kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalarda dahi zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak karıştırma etkinliği ve elde edilen kolon özellikleri farklılık gösterebilmektedir (Kitazume & Terashi, 2013). Bu nedenle, saha uygulamaları sırasında karşılaşılan problemlerin doğru şekilde belirlenmesi ve zemin koşullarına uygun çözüm yöntemlerinin geliştirilmesi, hedeflenen kolon kalitesinin ve performansının sağlanması açısından kritik öneme sahiptir (FHWA, 2013).

DSM uygulamalarında karşılaşılan problemler genel olarak zemin özellikleri, uygulama koşulları ve bağlayıcı sistemine bağlı olarak değerlendirilebilmektedir. Zemin kaynaklı problemler; tane boyu dağılımı, plastisite, doğal su muhtevası, yeraltı suyu koşulları ve

organik madde içeriği gibi özelliklerden etkilenmektedir (EuroSoilStab, 2002; FHWA, 2013). Uygulama kaynaklı problemler ise karıştırıcı takımın dönme hızı, ilerleme ve geri çekilme hızı, enjeksiyon basıncı ve debisi ile kullanılan ekipmanın kapasitesi gibi imalat parametreleriyle ilişkilidir (Topolnicki, 2004; Kitazume & Terashi, 2013). Bağlayıcı sistemine bağlı olarak ortaya çıkabilecek performans farklılıkları ise kullanılan bağlayıcının türü ve dozajı ile su/bağlayıcı oranı gibi karışım özelliklerinden etkilenmektedir (EuroSoilStab, 2002; FHWA, 2013)

DSM uygulamalarında yüksek plastisiteli killerde karşılaşılan önemli problemlerden biri, kilin karıştırıcı takım üzerine yapışarak kil sarılmasına (clay wrapping) neden olmasıdır. Bu durum, karıştırma etkinliğini azaltarak bağlayıcının homojen dağılımını engellemekte, şerbet kusmasına ve kolon süreksizliklerine yol açabilmektedir. Şekil 1'de, uygulama sahasında gözlenen kil topaklanması örneği görülmektedir. Bu tür problemlerin azaltılmasında bağlayıcı sisteme kireç ilave edilmesi, kilin işlenebilirliğini artırarak topaklanma ve kil sarılmasının azaltılmasına katkı sağlayabilecek bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.



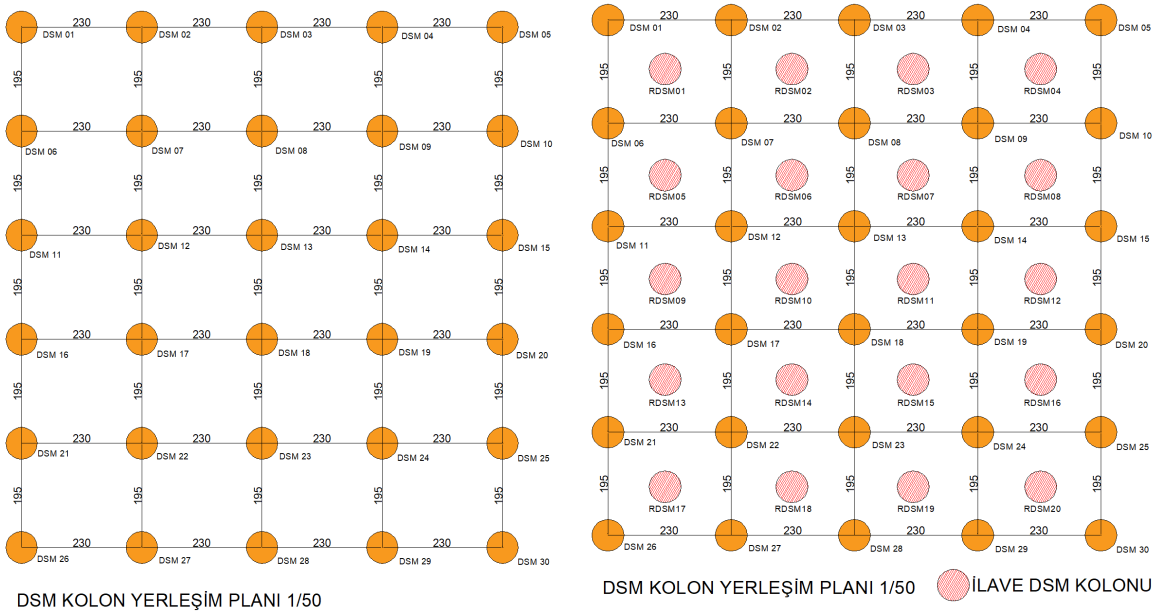
Şekil: 1 Serdivan İlçesi Yüksek Plastisiteli Kil Zeminde DSM İmalatı Sırasında Gözlenen Kil Topaklanması

Bağlayıcı Bağlayıcı sisteminin özellikleri, DSM kolonlarının oluşumu, sürekliliği ve mekanik performansı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bağlayıcı türü ve dozajı zemin–bağlayıcı etkileşimi ile dayanım gelişimini belirlerken, su/bağlayıcı oranı karışımın işlenebilirliğini ve homojen dağılımını etkilemektedir. Özellikle yüksek plastisiteli kil zeminlerde uygun bağlayıcı bileşiminin seçilmesi, kil sarılması, topaklanma ve heterojen dağılım gibi imalat sorunlarının azaltılması açısından önemlidir. Bu kapsamda çimentonun kireç gibi farklı bağlayıcılarla birlikte kullanılması, işlenebilirliğin ve karıştırma etkinliğinin artırılarak daha homojen bir zemin–bağlayıcı yapısının elde edilmesine yönelik çözüm yaklaşımlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

3. YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNDE DSM UYGULAMALARI VE KİREÇ KATKILI BAĞLAYICI SİSTEMİNİN ETKİSİ

Bu çalışma kapsamında, Sakarya ili Serdivan ilçesindeki yüksek plastisiteli kil (CH) zeminde gerçekleştirilen DSM uygulamasında 450 kg/m³ çimento dozajı ve 1/1 su-çimento

oranı kullanılmış; kolonlar 60 cm çapında ve 8,0 m boyunda projelendirilmiştir. İlk uygulamada yalnızca çimento esaslı bağlayıcı kullanılarak imal edilen 30 adet DSM kolonuna ait aplikasyon planı Şekil 2.a'da sunulmuştur. İmalat sırasında yoğun kil sarılması (clay wrapping), şerbet kusması ve bağlayıcının homojen dağılamamasına bağlı süreksizlikler gözlenmiş; Boy Karot, PIT ve GPR sonuçları da bu bulguları desteklemiştir. Bunun üzerine mevcut 30 kolon korunarak aralarına 20 adet ilave DSM kolonu yerleştirilmiş ve toplam kolon sayısı 50'ye çıkarılmıştır. Kireç katkılı ilave kolonların yerleşimini gösteren aplikasyon planı ise Şekil 2.b'de verilmiştir. İlave kolonlarda toplam bağlayıcı dozajı sabit tutularak %75 çimento–%25 kireç içeren bağlayıcı sistemi kullanılmış; böylece kilin işlenebilirliğinin artırılması, topaklanmanın azaltılması ve daha homojen bir kolon yapısının elde edilmesi amaçlanmıştır.



a) **b)**

Şekil: 2 Yüksek Plastisiteli Kil Zemininde DSM Kolonlarının Aplikasyon Planı: (a) İlk Uygulamada Çimento Esaslı Bağlayıcı ile İmal Edilen DSM Kolonlarının, (b) Çimento–Kireç Esaslı Bağlayıcı ile İmal Edilen İlave DSM Kolonlarının Yerleşimi

İlk uygulamada karşılaşılan problemlerin çözümüne yönelik gerçekleştirilen literatür incelemelerinde, kireç katkısının kil mineralleri üzerinde meydana getirdiği fizikokimyasal etkiler sayesinde yüksek plastisiteli killerin işlenebilirliğini artırabildiği, topaklanma eğilimini azaltabildiği ve karıştırma verimini iyileştirebildiği belirtilmektedir (Çınar Özkan, 2023). Bu doğrultuda, karşılaştırmanın daha sağlıklı yapılabilmesi amacıyla diğer imalat parametreleri sabit tutulmuş ve yalnızca bağlayıcı bileşiminde değişikliğe gidilmiştir. Böylece uygulama sonrasında gözlenen performans farklılıklarının, kireç katkılı bağlayıcı sisteminin etkisi çerçevesinde değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Saha uygulamasında, kirecin çimento ile fabrikada önceden karıştırılmış olarak temin edilememesi nedeniyle bağlayıcı bileşimi doğrudan sahadaki karışım ünitesinde hazırlanmıştır. Karışım hazırlama aşamasında öncelikle toplam bağlayıcı miktarının %75'ine karşılık gelen çimento, kilogram cinsinden ölçülerek karıştırıcı kazana aktarılmıştır. Ardından toplam bağlayıcının %25'ine karşılık gelen kireç, çuvallar halinde manuel olarak kazana ilave edilmiştir. Çimento ve kireç miktarları santralde bulunan

datalogger sistemi üzerinden kilogram cinsinden takip edilerek hedeflenen bağlayıcı oranı kontrol edilmiştir. Belirlenen toplam bağlayıcı miktarına ulaşıldıktan sonra sisteme su ilave edilmiş ve bağlayıcı bileşenlerinin homojen bir şerbet oluşturmasını sağlamak amacıyla mekanik karıştırma işlemine enjeksiyon aşamasına kadar devam edilmiştir.



Şekil: 3 Kireç Katkılı DSM İmalatı ve Kirecin Bağlayıcı Sistemine Dahil Edilmesine İlişkin Saha Görünümleri

Şekil 3'te, kireç katkılı bağlayıcı sistemi ile gerçekleştirilen DSM uygulamasına ait saha imalatı ve bağlayıcı hazırlama süreci gösterilmektedir. Soldaki görsel DSM kolonlarının saha imalatını, sağdaki görsel ise kirecin bağlayıcı sistemine dahil edilmek üzere sahada hazırlanması ve aktarılması sürecini göstermektedir. Kirecin mevcut sisteme manuel olarak dahil edilmesi ek iş gücü ve zaman gerektirmekle birlikte, bağlayıcı bileşiminin mevcut saha ve ekipman koşullarında uygulanmasına olanak sağlamıştır.

Kireç katkılı bağlayıcı sistemi ile gerçekleştirilen uygulamada, ilk uygulamaya kıyasla karıştırıcı takım üzerinde oluşan kil sarılması ve topaklanmanın belirgin şekilde azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, karıştırıcı takımın zemin içerisindeki hareketini kolaylaştırmış ve bağlayıcı şerbetinin zeminle daha etkin biçimde karışmasına katkı sağlamıştır. Aynı zamanda yüzeye geri dönen bağlayıcı şerbeti miktarında azalma gözlenmiş; böylece imalat sırasında karşılaşılan uygulama sorunları sınırlandırılarak daha düzenli ve kontrollü bir karıştırma süreci elde edilmiştir.

Saha uygulamasından elde edilen bulgular, yüksek plastisiteli kil zeminlerde bağlayıcı bileşiminin karıştırma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Kireç ilavesiyle birlikte kilin işlenebilirliğinde gözlenen iyileşme, yalnızca karıştırıcı ekipmanın çalışma koşullarını olumlu yönde etkilememiş, aynı zamanda bağlayıcının zemin içerisinde daha homojen dağılımını sağlayabilecek daha uygun bir karıştırma ortamının oluşmasına da katkıda bulunmuştur. Dolayısıyla saha gözlemleri, kireç katkılı bağlayıcı sisteminin yüksek plastisiteli kil zeminlerde DSM imalatı sırasında karşılaşılan kil sarılması, topaklanma ve karıştırma güçlüğü gibi uygulama problemlerinin azaltılmasında etkili bir çözüm yaklaşımı oluşturabileceğini göstermektedir.

3.1. Yüksek Plastisiteli Kil Zeminde DSM Uygulamalarının Kalite Kontrol Sonuçlarının Karşılaştırılması

Serdivan ilçesinde yüksek plastisiteli kil zemin koşullarında gerçekleştirilen DSM uygulamalarının performansı, imalat sonrasında yürütülen kalite kontrol çalışmaları kapsamında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İlk uygulamada çimento esaslı bağlayıcı ile imal edilen kolonlarda, karıştırıcı takım üzerinde yoğun kil sarılması ve topaklanma meydana geldiği, bağlayıcı şerbetinin zemin içerisinde homojen dağılımının sınırlı kaldığı ve şerbetin bir bölümünün yüzeye geri döndüğü gözlenmiştir. Bu sorunların giderilmesi amacıyla bağlayıcı bileşiminde yapılan değişiklik sonrasında 20 adet ilave DSM kolonu imal edilmiştir.

İlave kolonların performansının değerlendirilmesi amacıyla, 28 günlük kür süresinin ardından 20 adet DSM kolonu içerisinden rastgele seçilen kolonlarda 4 adet Pile Integrity Test (PIT), 1 adet boy karot ve 3 adet kafa karot çalışması gerçekleştirilmiştir. Alınan karot numuneleri üzerinde Tek Eksenli Basınç Dayanımı (UCS) deneyleri yapılarak kolonların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca saha ölçeğindeki iyileşmenin ve kolonların süreklilik özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla Yer Radarı (GPR) ve MASW ölçümlerinden elde edilen sonuçlar da incelemeye dahil edilmiştir.

İlk uygulamaya ait PIT kayıtlarında bazı kolonlarda düzensiz sinyal davranışları ve belirgin yansımalar elde edilirken, çimentonun %25'inin kireç ile ikame edildiği bağlayıcı sistemi kullanılarak imal edilen ilave DSM kolonlarında sinyal davranışının daha düzenli hâle geldiği ve belirgin yansımaların azaldığı belirlenmiştir. Şekil 4'te ilk ve ikinci uygulamaya ait PIT kayıtları karşılaştırmalı olarak verilmiş olup, kireç katkılı bağlayıcı sistemiyle gerçekleştirilen uygulama sonrasında kolonların düşey bütünlüğü açısından daha olumlu bir sinyal karakterinin elde edildiği görülmektedir.

Boy karot çalışmaları, iki uygulama arasındaki farkın doğrudan gözlenebildiği önemli kalite kontrol yöntemlerinden biri olmuştur. İlk uygulamada karot veriminin yaklaşık %20 düzeyinde kaldığı, elde edilen numunelerde süreksiz bölgeler, doğal zemin parçaları ve bütünlüğü bozulmuş kolon yapıları bulunduğu belirlenmiştir. Kireç katkılı bağlayıcı sistemi kullanılarak imal edilen ilave kolonlarda ise karot verimi yaklaşık %80 seviyesine yükselmiş ve kolon boyunca daha bütünlüklü numuneler elde edilmiştir. Şekil 5'te verilen boy karot sandıkları, ilk uygulamadaki düşük karot verimi ile ikinci uygulama sonrasında elde edilen daha bütünlüklü kolon yapısını karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

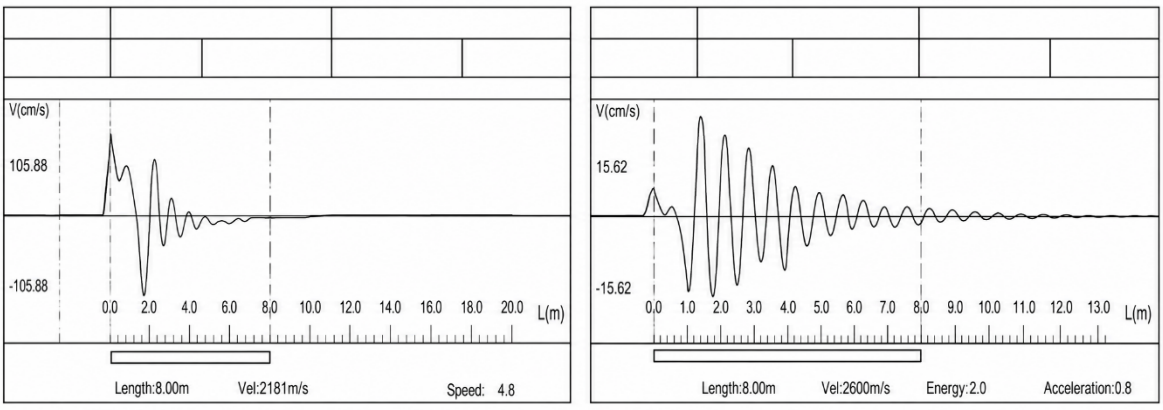
Yer Radarı (GPR) sonuçları da PIT ve boy karot çalışmalarından elde edilen bulguları desteklemiştir. İlk uygulamaya ait GPR görüntülerinde bazı kolon bölgelerinin düşey doğrultuda süreksiz ve parçalı biçimde izlendiği, kireç katkılı bağlayıcı ile ilave DSM kolonlarının imal edilmesinden sonra ise kolonlarla ilişkilendirilen düşey anomalilerin daha belirgin ve düzenli bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 6'da uygulama öncesi ve sonrası GPR görüntüleri karşılaştırmalı olarak sunulmakta ve ikinci uygulama sonrasında iyileştirilmiş bölgenin düşey doğrultudaki sürekliliğinde meydana gelen gelişim görülmektedir.

Kireç katkılı bağlayıcı sistemiyle imal edilen kolonların mekanik performansının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen UCS deneylerinde 4,15–8,25 MPa arasında değişen dayanım değerleri elde edilmiş ve tüm sonuçların proje kapsamında benimsenen 3,00 MPa minimum dayanım kriterinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu durum, ikinci

uygulamada yalnızca kolon oluşumu ve fiziksel bütünlük açısından değil, mekanik performans bakımından da hedeflenen düzeyin sağlandığını göstermektedir.

DSM uygulamasının iyileştirilmiş zemin kütlesinin dinamik özellikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla MASW ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, uygulama öncesinde 165,0 m/s olarak belirlenen ortalama Vs30 değeri, ilave DSM kolonlarının imalatı sonrasında 185,3 m/s seviyesine yükselmiş ve yaklaşık %12,3 oranında artış meydana gelmiştir. Bu artış, iyileştirilmiş zemin kütlesinin küçük şekil değiştirme seviyesindeki rijitliğinde artış olduğuna işaret etmektedir. Bununla birlikte, ikinci uygulamada mevcut 30 DSM kolonunun arasına 20 adet ilave kolon yerleştirilmiş olması nedeniyle Vs30 değerindeki artışın yalnızca kireç katkısına bağlanması uygun değildir. Bu sonuç, bağlayıcı sisteminde yapılan değişiklik ile kolon sayısındaki artışın birlikte oluşturduğu saha ölçeğindeki iyileşmenin tamamlayıcı bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

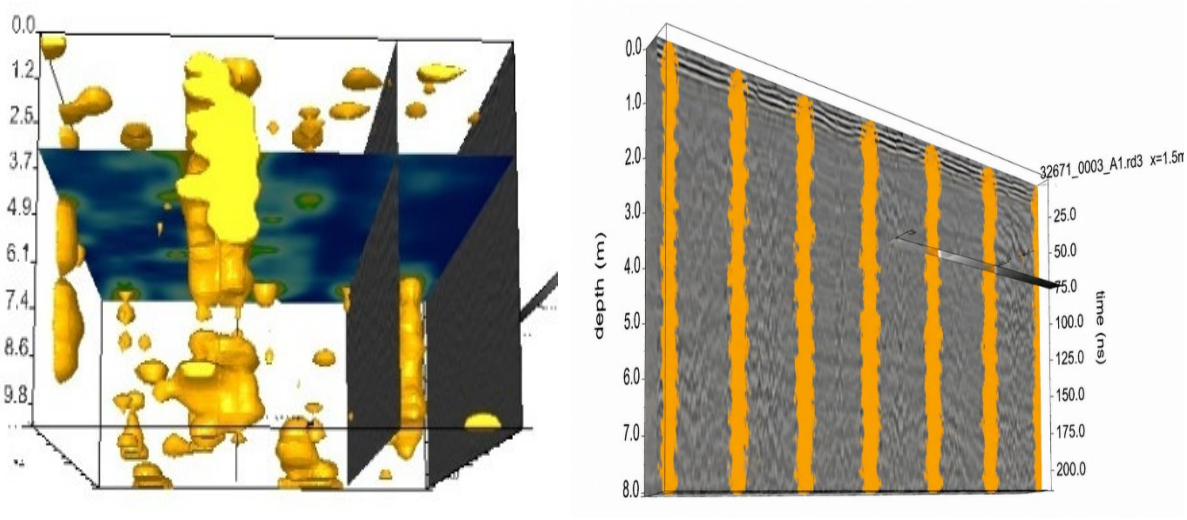
Tüm kalite kontrol sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, ilk uygulamada yüksek plastisiteli kilin karıştırma davranışına bağlı olarak kolon oluşumu, homojenliği ve düşey bütünlüğü açısından önemli sorunlar meydana geldiği; çimento–kireç esaslı bağlayıcı sistemi kullanılarak gerçekleştirilen ikinci uygulamada ise bu sorunların büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. PIT kayıtlarındaki iyileşme, boy karot veriminin yaklaşık %20'den %80'e yükselmesi, GPR görüntülerinde daha düzenli bir kolon dağılımının elde edilmesi ve UCS sonuçlarının proje kriterinin üzerinde kalması, ikinci uygulamada kolonların fiziksel bütünlüğü ve mekanik performansı açısından belirgin bir gelişme sağlandığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, yüksek plastisiteli kil zeminlerde DSM performansının yalnızca bağlayıcı dozajına değil, zemin özellikleriyle uyumlu bağlayıcı bileşiminin belirlenmesine ve bağlayıcı–zemin etkileşiminin saha koşulları altında etkin biçimde sağlanmasına da bağlı olduğunu göstermektedir.



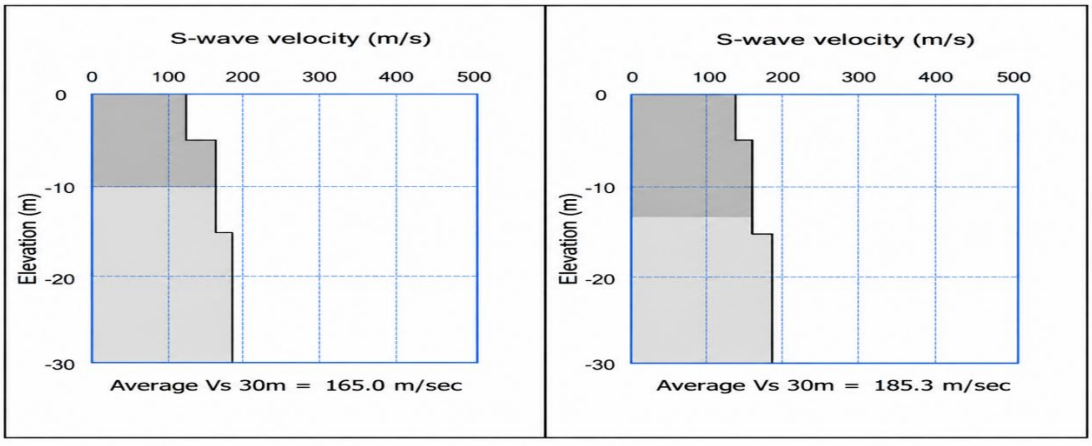
Şekil: 4 Kireçli İmalat Öncesi ve Sonrası P.İ.T Grafikleri



Şekil: 5 Kireçli İmalat Öncesi ve Sonrası Boy Karot Sandıkları



Şekil: 6 İyileştirme Öncesi ve Sonrası Gpr Görüntüleri



Şekil: 7 İyileştirme Öncesi ve İyileştirme Sonrası Vs30 Hızları

3.2. Bulguların Değerlendirilmesi

Yüksek plastisiteli kil zeminde gerçekleştirilen DSM uygulamaları birlikte değerlendirildiğinde, bağlayıcı bileşiminin sürekliliği ve kolon performansı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmüştür. Çimento esaslı bağlayıcının kullanıldığı ilk uygulamada, kil sarılması ve topaklanma nedeniyle karıştırma etkinliğinin azaldığı, bağlayıcı dağılımının homojenliğinin ve kolon sürekliliğinin olumsuz etkilendiği belirlenmiştir.

Bu problemlerin azaltılması amacıyla, toplam bağlayıcı miktarı ve temel imalat parametreleri değiştirilmeden çimentonun %25'i kireç ile ikame edilmiş ve %75 çimento–%25 kireç bileşimindeki bağlayıcı sistemiyle ilave DSM kolonları imal edilmiştir. İki uygulamaya ait saha gözlemleri ve kalite kontrol sonuçları Tablo 1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 1'de görüldüğü üzere, kireç katkılı uygulamada karıştırma davranışı ve kolon bütünlüğünde iyileşme gözlenmiştir. Boy karot verimi yaklaşık %80'e yükselmiş, PIT kayıtlarında daha düzenli sinyal davranışı elde edilmiş, GPR sonuçlarında sürekliliğin iyileştiği belirlenmiş ve UCS değerleri 4,15–8,25 MPa aralığında ölçülmüştür. Elde edilen bulgular, bağlayıcı bileşimindeki değişikliğin yüksek plastisiteli kil zemindeki DSM uygulamasının imalat ve performans özelliklerine olumlu yansıdığını göstermiştir.

Tablo 1. Kireç Katkılı Bağlayıcı Sistemi Öncesi ve Sonrası DSM Performansının Karşılaştırılması

Değerlendirme Kriteri	Çimento Esaslı Bağlayıcı ile DSM Uygulaması	Kireç Katkılı Bağlayıcı Sistemi ile İlave DSM Uygulaması
Zemin Türü	Yüksek Plastisiteli Kil	Yüksek Plastisiteli Kil
Bağlayıcı	%100 Çimento	%75 Çimento + %25 Kireç
Boy Karot Verimi	Düşük	≈ %80
UCS	1,5 – 2,0 MPa	4,15 – 8,25 MPa
PIT Sonucu	Düzensiz sinyal davranışı	Daha düzenli sinyal davranışı
GPR Sonucu	Süreksizlik tespit edildi	Süreklilikte iyileşme
Karıştırma Kalitesi	Kil topaklanması nedeniyle yetersiz	Daha homojen
Şerbet Dağılımı	Kusma gözlendi	İyileşti
Proje Performans Kriterlerinin Sağlanması	Sağlanamadı	Sağlandı

Saha ve kalite kontrol bulguları birlikte değerlendirildiğinde, ilk uygulamadaki temel problemin yüksek plastisiteli kilin karıştırılabilirliği ve bağlayıcının zemin içerisinde homojen biçimde dağıtılamamasıyla ilişkili olduğu görülmüştür. Kireç katkılı bağlayıcı sisteminin kullanılmasıyla karıştırma koşullarının iyileştiği; bu gelişmenin kolon sürekliliği, homojenliği ve mekanik performansa olumlu yansıdığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek plastisiteli kil zeminlerde DSM uygulamalarında bağlayıcı

bileşiminin zemin özellikleriyle uyumlu olarak belirlenmesinin uygulama performansı açısından önemli olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli kil zeminlerde gerçekleştirilen Derin Karıştırma (Deep Soil Mixing–DSM) uygulaması gerçek saha verileri kullanılarak değerlendirilmiş; uygulama sırasında karşılaşılan imalat problemleri ile bağlayıcı bileşiminde yapılan değişikliğin saha performansına etkileri incelenmiştir. Sakarya ili Serdivan ilçesinde gerçekleştirilen ilk DSM uygulamalarında, karıştırıcı ekipman üzerinde yoğun kil sarılması (clay wrapping) gözlenmiştir. Bu durum, karıştırma etkinliğini azaltmış, çimento esaslı bağlayıcının zemin içerisinde homojen dağılımını güçleştirmiş ve bağlayıcı şerbetinin yer yer yüzeye geri çıkmasına neden olmuştur. Kalite kontrol çalışmalarında belirlenen kolon süreksizlikleri de sahada gözlenen bu sorunlarla uyumlu bulunmuştur.

Karşılaşılan problemlerin giderilmesi amacıyla saha gözlemleri ve literatür birlikte değerlendirilmiş; sorunun yalnızca bağlayıcı miktarından değil, zeminin yüksek plastisite özelliği, karıştırma davranışı ve bağlayıcı–zemin etkileşiminden de kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, toplam bağlayıcı miktarı değiştirilmeden çimentonun %25'i kireç ile ikame edilmiş ve %75 çimento–%25 kireç içeren bağlayıcı sistemi oluşturulmuştur. Böylece kireç katkısının yüksek plastisiteli kil zeminin karıştırma davranışı ve DSM kolon performansı üzerindeki etkisinin gerçek saha koşullarında incelenmesi amaçlanmıştır.

Bağlayıcı bileşimindeki değişiklikle birlikte kolon yerleşiminde de düzenlemeye gidilmiş; mevcut 30 DSM kolonu korunarak aralarına 20 ilave kolon imal edilmiş ve toplam kolon sayısı 50'ye çıkarılmıştır. Kireç katkılı bağlayıcı ile gerçekleştirilen uygulamada, kil sarılması ve topaklanmanın belirgin ölçüde azaldığı ve karıştırma işleminin daha düzenli gerçekleştiği gözlenmiştir. Boy karot, Pile Integrity Test (PIT), Yer Radarı (GPR) ve Tek Eksenli Basınç Dayanımı (UCS) deneylerinden elde edilen sonuçlar da kolon sürekliliği, homojenliği ve mekanik performansında sağlanan iyileşmeyi desteklemiştir.

Bununla birlikte, kireç kullanımının saha uygulamasında bazı operasyonel güçlükler oluşturduğu görülmüştür. Çimento için silo ve otomatik besleme sistemi bulunmasına karşın, kireç için ayrı bir depolama ve besleme sisteminin bulunmaması nedeniyle kireç karıştırma ünitesine manuel olarak ilave edilmiştir. Bu durum, ilave iş gücü gerektirmiş ve bağlayıcı hazırlama süresini uzatmıştır. Ayrıca, kireç içeren karışımın daha hızlı kıvam kazanması nedeniyle hazırlama ve enjeksiyon işlemlerinin koordineli biçimde yürütülmesi gerektiği görülmüştür. Bu nedenle, kireç katkılı bağlayıcıların saha ölçeğindeki uygulanabilirliğinin değerlendirilmesinde geoteknik performansın yanı sıra depolama, dozajlama, besleme ve karıştırma süreçlerinin de dikkate alınması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, yüksek plastisiteli kil zeminlerde DSM performansının; zemin özellikleri, bağlayıcı bileşimi, karıştırma davranışı ve saha uygulama koşullarının birlikte değerlendirilmesine bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Çalışmada kullanılan %75 çimento–%25 kireç esaslı bağlayıcı sistemi, imalat sırasında karşılaşılan kil sarılması ve karıştırma problemlerinin azaltılmasına katkı sağlamış; gözlenen iyileşmeler farklı kalite kontrol yöntemleriyle desteklenmiştir. Bununla birlikte, kolon sayısındaki artışın da sistem performansına katkı sağlayabileceği dikkate alınmalıdır. Benzer zemin koşullarında farklı

kireç oranları ve alternatif bağlayıcı bileşimlerinin araştırılmasının, saha uygulanabilirliği ve performans açısından daha uygun karışım tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın planlanması, yürütülmesi ve bilimsel olarak geliştirilmesi sürecinde değerli bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle katkı sağlayan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gözde Sezgin Tunçay'a teşekkür ederim. Çalışmaya sunduğu katkılarından dolayı Muhammet Enes Baş'a teşekkür ederim. Bu çalışmanın gerçekleştirildiği FMA Geoteknik bünyesindeki çalışma arkadaşlarıma destekleri, Sarıhan Zemin firmasına ise DSM makinesi ve yardımcı ekipmanların teminine sağladıkları katkılar için teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology, 42*(4), 223–237.

Bruce, D. A. (2000). An introduction to the deep soil mixing methods as used in geotechnical applications.

Bruce, M. E. C., Berg, R. R., Collin, J. G., Filz, G. M., Terashi, M., & Yang, D. S. (2013). Deep mixing for embankment and foundation support. *Federal Highway Administration Design Manual*.

Day, R. W. (2002). Geotechnical earthquake engineering handbook. *(No Title)*.

EN, B. (2005). Execution of special geotechnical works. *Deep mixing. EN, 14679*, 2005.

EuroSoilStab. (2002). Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils: Design guide soft soil stabilisation. *CT97-0351, Project No. BE 96-3177*.

Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Oxford University Press.

Kitazume, M., & Terashi, M. (2013). *The deep mixing method*. CRC press.

Özkan, F.T.Ç. (2023). *Derin karıştırma yönteminde elde edilen iyileştirilmiş zemin özelliklerinin laboratuvar ve arazi şartlarında belirlenmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Sivakugan, N., & Das, B. M. (2010). *Geotechnical engineering: a practical problem solving approach*. J. Ross Publishing.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97*(9), 1249–1273.

Terashi, M. (2003). The state of practice in deep mixing methods. In *Grouting and ground treatment* (pp. 25-49).

Topolnicki, M. (2004). In-situ soil mixing: ground improvement. *Edited by*.

Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 127*(4), 297-313.