Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

ÇİMENTO BAZLI ZEMİN İYİLEŞTİRMENİN ZEMİN SINIFINA ETKİSİNİN SAHA ÖLÇEKLİ SİSMİK DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF SOILCRETE GROUND IMPROVEMENT EFFECTS ON SOIL CLASS PARAMETERS VIA FIELD-SCALE SEISMIC TESTS

Veysel ÖZLÜ[1], Arif ÇINAR[2], Osman PEKARUN[3], Bora BERK[4], Kaan DOĞANIŞIK[5]

ÖZET

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018), yapı alanlarını sismik kayma dalgası hızına (V_{s30}) göre ZA'dan ZE'ye kadar sınıflandırmakta; bu sınıflandırma deprem tasarım spektrumlarını ve üst yapıya etki eden sismik yükleri doğrudan belirlemektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı bölgelerinde yer alan altı ayrı proje sahasında uygulanan Jet Grout ve Donatılı Derin Karıştırma (DSM) zemin iyileştirme projelerinin statik ve dinamik davranışları saha ölçekli sismik ve kalite kontrol deneyleriyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İyileştirme öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen Cross-Hole (CHT), Downhole (DHT) ve Çok Kanallı Yüzey Dalgaları Analizi (MASW) testleri aracılığıyla sismik kayma dalgası hızı (V_s) değişimleri sayısal olarak analiz edilmiştir. Ayrıca karot numuneleri üzerinde yapılan tek eksenli serbest basınç testleri (q_u) testleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları, çimento enjeksiyonu ve mekanik karıştırma ile oluşturulan kompozit zeminin sismik V_s hızlarında %14 ile %100 arasında bir artış sağladığını; TBDY 2018 zemin sınıflamasında ZE sınıfından ZD sınıfına veya ZD sınıfından ZC sınıfına geçiş imkanı sunarak tasarım spektral ivme katsayılarında önemli düşüşler meydana getirdiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: *Jet Grout, Derin Karıştırma (DSM), Zemin Sınıfı, Sismik Saha Deneyleri, Kayma Dalgası Hızı (V_s), Tek Eksenli Basınç Dayanımı (q_u)*

ABSTRACT

The Turkish Building Earthquake Code (TBDY 2018) classifies construction sites based on shear wave velocity (V_{s30}) parameters ranging from ZA to ZE, which directly governs seismic design spectra and structural earthquake loads. In this study, the static and dynamic behavior of Jet Grouting and Reinforced Deep Soil Mixing (DSM) ground improvement projects implemented across six different project sites in various regions of Turkey were comparatively investigated using field-scale seismic and quality control testing. Variations in shear wave velocity (V_s) were numerically analyzed through pre- and post-treatment seismic tests, including Cross-Hole Test (CHT), Downhole Test (DHT), and Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). Additionally, unconfined compressive strength (q_u) tests performed on core samples were evaluated. The results reveal that the composite ground formed via cement injection and mechanical mixing achieves an increase of 14% to 100% in seismic V_s velocities. Furthermore, it enables a transition from Soil Class ZE to ZD or Class ZD to ZC under TBDY 2018 classification, thereby yielding significant reductions in design spectral acceleration coefficients.

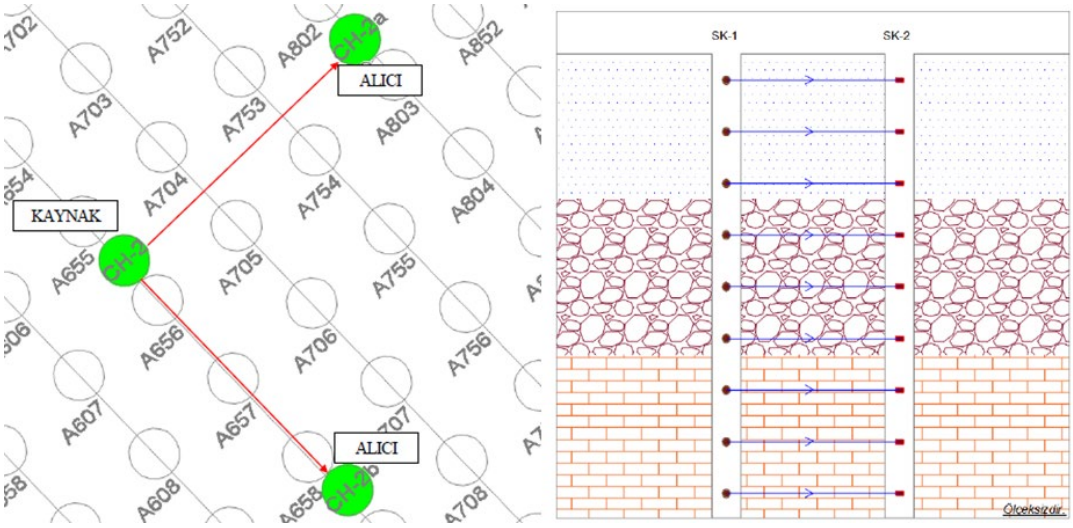
Keywords: *Jet grouting, Deep Soil Mixing (DSM), Soil classification, Seismic field testing, Shear wave velocity (V_s), Unconfined compressive strength (q_u)*

[1] İnş. Yük. Müh., Geobos Zemin Güçlendirme Ltd. Şti., veysel@geobos.com (Sorumlu Yazar)
[2] Dr. İnş. Müh., Geobos Zemin Güçlendirme Ltd. Şti., arifcinar@geobos.com
[3] İnş. Yük. Müh., Geobos Zemin Güçlendirme Ltd. Şti., pekarun@geobos.com
[4] İnş. Yük. Müh., Geobos Zemin Güçlendirme Ltd. Şti., berk@geobos.com
[5] İnş. Yük. Müh., Geobos Zemin Güçlendirme Ltd. Şti., kdoganisik@geobos.com

1. GİRİŞ

Aktif deprem kuşaklarında yer alan ülkemizde, gevşek kumlu ve yumuşak killi alüvyal zeminler üzerine inşa edilecek sanayi yapıları, tarihi binalar ve ağır mühendislik tesisleri için sıvılaşma potansiyeli, yetersiz taşıma kapasitesi ve aşırı oturma problemleri en kritik geoteknik riskleri oluşturmaktadır (Durgunoğlu, 2004; Mitchell & Santamarina, 2005). Bu tür sorunlu zemin profillerinin iyileştirilmesinde, yüksek basınçlı çimento şerbetinin zemini kesip karıştırması esasına dayanan Jet Grout yöntemi ve mekanik bıçaklarla zemini karıştıran Derin Karıştırma (Deep Soil Mixing - DSM) yöntemleri yaygın olarak tercih edilmektedir (Moseley & Kirsch, 2004; Topolnicki, 2004).

Geleneksel geoteknik tasarımda iyileştirme imalatlarının kabulü; çoğunlukla serbest basınç dayanımları (q_u), kazık bütünlük (PIT) ve statik yükleme testleri üzerinden yürütülmektedir (Bruce, 2012). Ancak üst yapıya etki edecek dinamik deprem yüklerinin belirlenmesinde ve zemin-yapı etkileşiminde, kompozit ortamın küçük şekil değiştirmeler altındaki rijitliğini temsil eden sismik kayma dalgası hızı (V_s) belirleyici parametredir (Stokoe vd., 2004; Gazetas, 1991). İyileştirilmiş kompozit zeminin küçük şekil değiştirmeler altındaki rijitliğini ve kayma modülünü belirlemek amacıyla, sahada tahribatsız jeofizik test yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu kapsamda yaygın olarak kullanılan yöntemlerden Cross-Hole (CHT) sismik testi, aralarında belirli mesafe bulunan en az iki sondaj kuyusu arasında yatay doğrultuda doğrudan dalga iletimi sağlayarak derinliğe bağlı nokta bazlı hassas V_s ve V_p hız profilleri sunmaktadır. Cross-Hole testine ait temsili plan ve kesit görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Cross-Hole Testi arazi fotoğrafları Şekil 2'de verilmiştir. Downhole (DHT) testi, kuyu ağzı yüzeyinden uygulanan darbenin kuyu içi jeofonlara düşey iletim zamanını okuyarak derinlik boyunca katman hızlarını belirlemektedir. Yüzey sismiğine dayanan Çok Kanallı Yüzey Dalgaları Analizi (MASW) ise, Rayleigh yüzey dalgalarının dispersiyon (frekansa bağlı faz hızı değişimi) özelliğinden faydalanarak kuyu açılmasına gerek kalmaksızın geniş alanlarda 2 boyutlu katman V_{s30} ortalamalarını elde etmeye imkan tanımaktadır.



Şekil 1. Cross-Hole testi plan ve kesit görünümü (temsili)



Şekil 2. Cross-Hole testi yapımı (genel imalat görüntüsü ve ölçüm aletleri görüntüsü)

Literatürde Jet Grout ve Derin Karıştırma uygulamalarının sismik hızlar (V_s) ve alan rijitliği üzerindeki etkileri farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Örneğin, Bouassida vd. (2009) ile Kitazume ve Terashi (2013), kolon tipi zemin iyileştirmelerinde alan değiştirme oranı (a_r) ve iyileştirilmiş zemin kütlesi rijitliğindeki artış arasındaki ilişkileri saha ve laboratuvar ölçeğinde analiz ederek iyileştirilmiş-kompozit ortamın V_s hızlarındaki belirgin artışları ortaya koymuşlardır. Benzer şekilde, Soga ve Mitchell (2006)

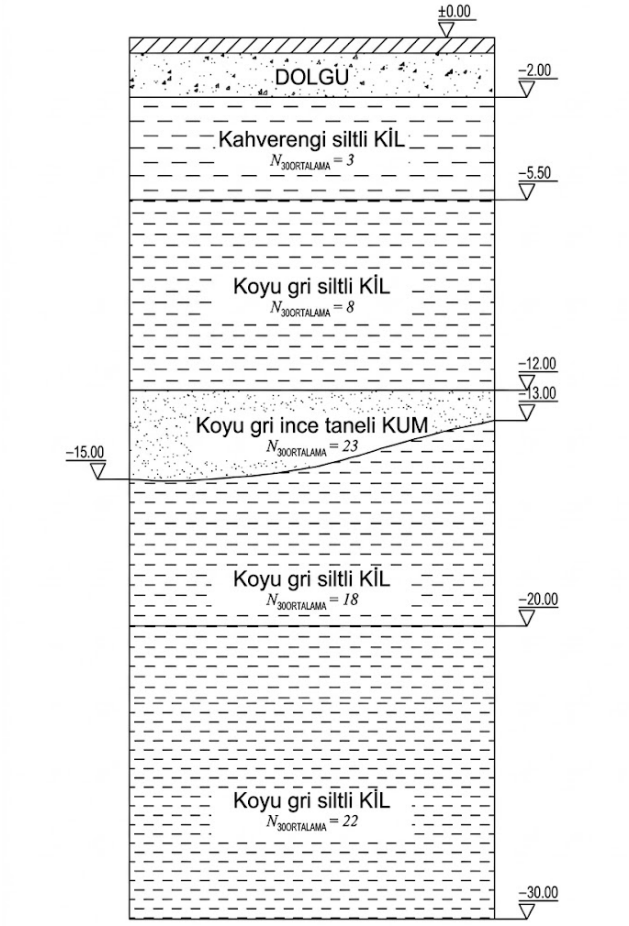
ile Rainieri vd. (2020), çimentolaşmış zeminlerde kür süresine (28+ gün) bağlı olarak küçük şekil değiştirmelerdeki kayma modülü (G_0) ve V_s gelişimini tahribatsız sismik testlerle (MASW ve Cross-Hole) doğrulayarak tasarım spektrumlarındaki düşüşü saptamışlardır.

Bu çalışmanın amacı; farklı zemin koşullarına ve tasarım teknolojilerine (Jet Grout, JET-1, JET-2 ve Donatılı DSM) sahip altı büyük sahada imal edilen kolonların zemin dinamik ve statik parametreleri üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak incelemektir. İyileştirme öncesi ve sonrası sismik V_s hız değişimleri saptanmış, TBDY 2018 yönetmeliğine göre zemin sınıflarındaki geçişler gösterilmiştir.

2. SAHA İNCELEMELERİ VE ZEMİN KOŞULLARI

2.1. Sakarya - Fabrika Depolama Sahası

Sakarya Adapazarı'ndaki sahada açılan 30 m derinliğindeki sondajlarda, yüzeydeki çakıllı dolgunun altında 2.00 - 12.00 m derinliklerde sığ YASS etkisiyle sıvılaşma ve oturma hassasiyeti yüksek ince kum ara tabakalı killi/siltli alüvyon birimler (CH, CL, ML) yer almaktadır (SPT_{N30} = 3 ; SPT_{N30} = 8). 20.0–30.0 m arasında ise katı-çok katı alüvyonel kil tabakası (SPT_{N30} = 22) tespit edilmiştir. Sahaya ait jeolojik kesit Şekil 3'de verilmiştir.



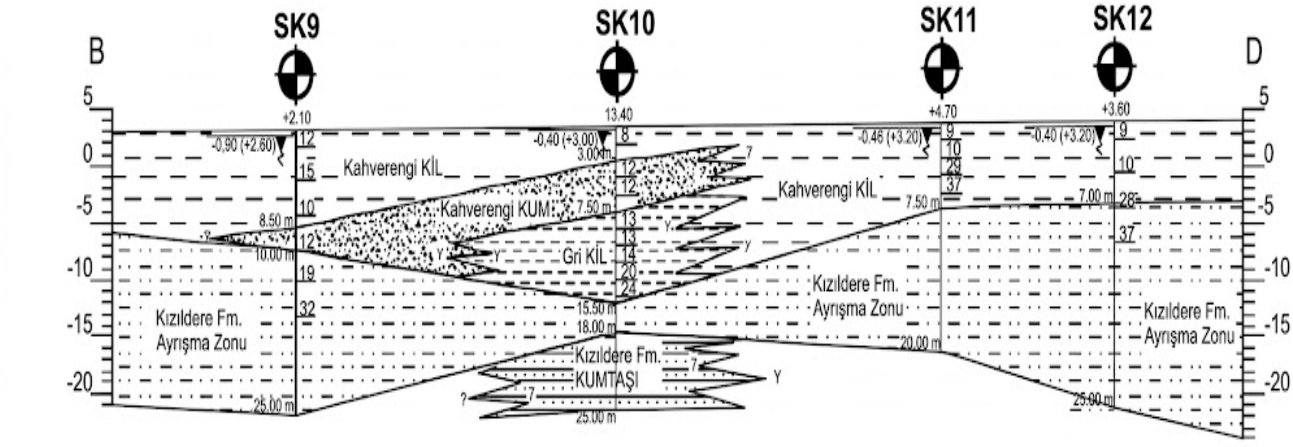
Şekil 3. Sakarya fabrika sahasına ait jeolojik kesit

2.2. Bursa – Üre Depoları

Sahada yapılan 80 adet sondaja göre; Depo-1 Bölgesi: Üst killi dolgunun altında Kuvaterner yaşlı katı alüvyonel kil (SPT_{N30} = 12-27) yer almakta, 9.0 m derinlikte Eosen yaşlı katı/çok katı killi/kiltaşı tabakasına geçilmektedir. Depo-2 Bölgesi: Yüzeyde 3.0–5.0 m kalınlığında kontrolsüz killi dolgu ve altında düşük dayanımlı alüvyal yumuşak kil bulunmaktadır. Katı anakaya sınırı 13.0–17.0 m derinliktedir.

2.3. Adana - Çimento Siloları Sahası

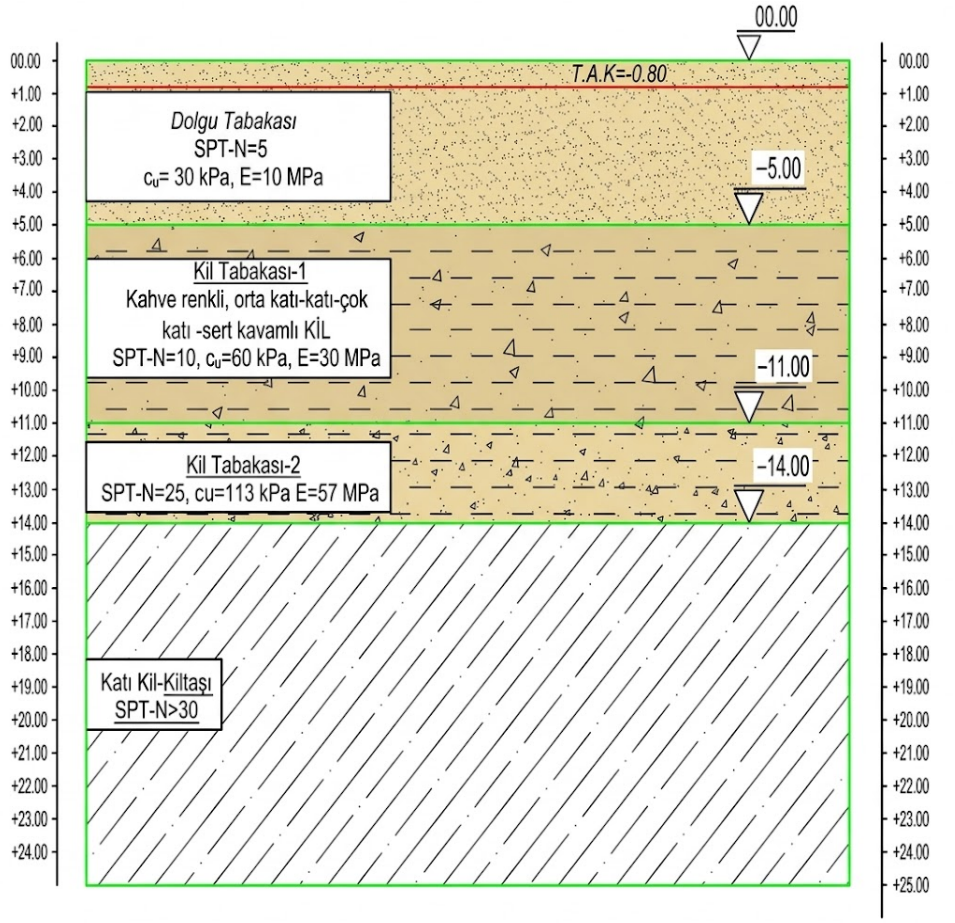
Sığ YASS (0.00 - 1.60 m) sahip sahada yürütülen 13 adet sondajda; üstte denizel fosil kavkılı gevşek alüvyon kum (0.0-4.5 m ve 9.0-15.0 m, SPT_{N30} = 11) ile yumuşak/orta katı alüvyon kil yer almaktadır. 22.0–30.0 derinlikte Kızıldere Formasyonu'na ait ayrışmış kiltaşı-kumtaşı taban kayası bulunmaktadır. İlgili sahaya ait jeolojik kesit Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Adana silo sahasına ait jeolojik kesit

2.4. Bursa - Yük Depoları Sahası

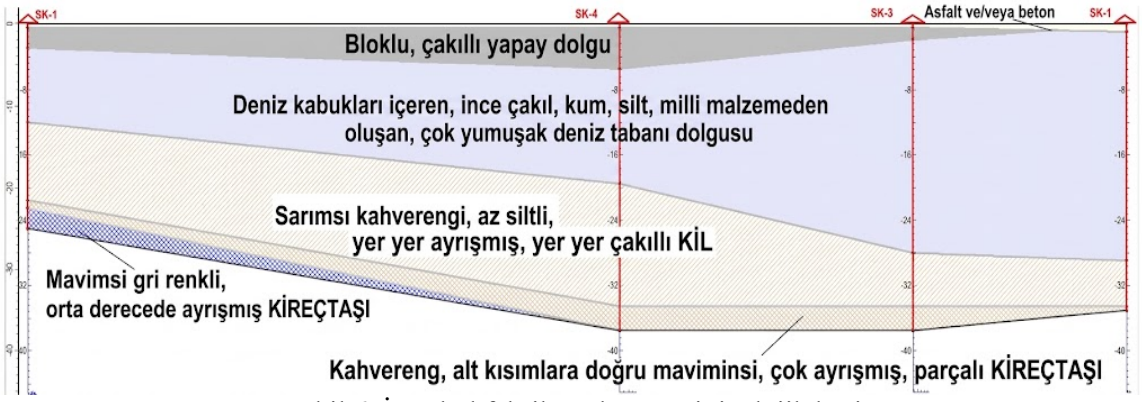
26 adet sondaj yapılmıştır. Üstte 5.0 m kontrolsüz dolgu (SPT_{N30} = 4-17), altında yumuşak-çok katı alüvyonel kil tabakası (5-11 m, SPT_{N30} = 5-42) ve yer yer kum arabantlı siltli kil seviyeleri yer almaktadır. 14.0 m derinlikten sonra ise sert kil-kiltaşı birimlerine ulaşılmaktadır (SPT_{N30} > 30). Bursa Yük Depolarına ait tasarımda kullanılan idealize zemin profili Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Bursa yük depoları sahasına ait idealize zemin profili

2.5. İstanbul – Fabrika Sahası

Sahanın üst seviyelerinde 2.00 – 3.00 m kalınlığında asfalt, beton ve bloklu dolgu tabakası yer almaktadır. Dolgunun altında, ortalama 19.25 m kalınlığında (SK-1, SK-2, SK-3 ve SK-4 sondajlarında 9.0 m ile 28.0 m arasında değişen) Kuşdili Formasyonu'na ait deniz kabukları içeren, ince çakıllı, kumlu, siltli çok yumuşak Deniz Tabanı Dolgusu / Turba-Balçık tipi organik çökeller bulunmaktadır. Arazi deneylerinde SPT_{N30} = 1 - 6 darbe aralığında ölçülmüştür. İlgili sahaya ait jeolojik kesit Şekil 6'te sunulmuştur.



Şekil 6. İstanbul fabrika sahasına ait jeolojik kesit

2.6. Kocaeli – Konut Yapısı

Üst seviyelerdeki alüvyonel dolgunun altında orta-katı kıvamlı killi ve siltli alüvyon tabakaları tespit edilmiştir. Standart penetrasyon deneylerinde SPT_{N30} = 7 - 16 aralığında değerler kaydedilmiştir.

3. ZEMİN İYİLEŞTİRME TASARIMLARI VE UYGULAMALARI

Sakarya-Fabrika: D=80 cm, L= 20.0 m, 2.1x2.1 m karelaj ile a_r=%11.4-%13.1 (a_r : alan değiştirme oranı) sağlanmıştır. Jet grout tasarım kabulü $q_{u\ tasarım}$ = 2.0 MPa'dır.

Bursa-Üre Depoları: Depo-1'de D=60 cm, L=4-10 m çift akışkanlı JET-2; Depo-2'de D=70 cm, L= 12-14 m ön yıkamalı JET-1 uygulanmıştır. (a_r= %7.1-%11.9, $q_{u\ tasarım}$ = 3.0 MPa)

Adana-Silo: D= 80 cm (saha çap kontrollerinde D=85 cm), L= 23.0 m derin kolonlar 450 bar basınçlı ön yıkamalı JET-1 yöntemiyle imal edilmiştir (a_r= %9.6-%11.9, $q_{u\ tasarım}$ = 2.5 MPa).

Bursa-Yük Depoları: D= 80 cm, L= 14.0 m boyunda ön yıkamalı jet grout kolonları imal edilmiştir. 2.25x2.25 m karelaj ile a_r= %9.9 sağlanmıştır ($q_{u\ tasarım}$ = 2.0 MPa).

İstanbul-Fabrika: Donatılı Derin Karıştırma (DSM - Deep Soil Mixing) yöntemi uygulanmıştır. İmalatlar D = 35 cm çapında ve L = 11.0 - 15.5 m boylarında mekanik karıştırma kolonları a_r=%14.6 olacak şeklinde gerçekleştirilmiş, kolon gövdelerine çelik donatılar yerleştirilerek hem düşey basınç hem de eksenel çekme/devrilme momentlerine karşı yüksek rijitlik elde edilmiştir.

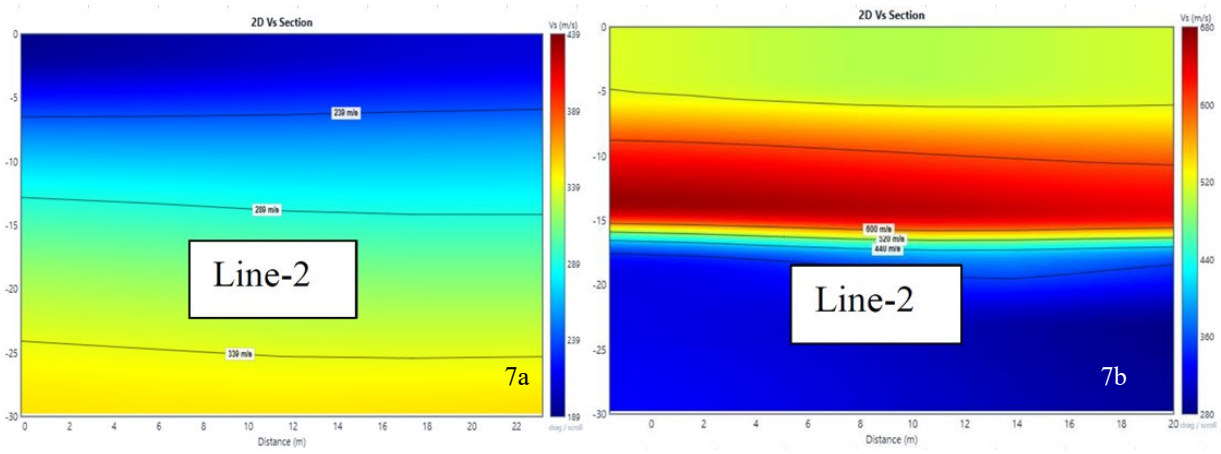
Kocaeli-Konut Yapısı: D= 60 cm, L= 15.0 m boyunda jet grout kolonları imal edilmiştir. 1.60x1.60 m karelaj ile a_r= %11.0 sağlanmıştır.

İlgili sahaların konum, zemin özellikleri, eleman tip ve boyutları, iyileşme öncesi/sonrası V_s hızları ve TBDY 2018'e göre yer aldığı zemin sınıflarını içeren özet bilgiler Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Farklı sahalara ait genel karşılaştırma

Saha Adı ve Konumu	**İyileştirme Yöntemi ve Eleman Boyutları**	**Zemin Özellikleri**	**İyileştirme Öncesi Sismik Hızlar (V_s)**	**İyileştirme Sonrası Sismik Hızlar (V_s)**	**Vs Hızındaki Artış Oranı (%)**	**TBDY 2018 Zemin Sınıfı Değişimi**
Sakarya - Fabrika	Jet Grout (D = 80 cm, L = 20 m, 2.1 x 2.1 m)	İnce kum ara tabakalı siltli KİL (SPT_{N30} = 22)	Downhole: V_s = 356 - 375 m/s MASW: V_s = 217-310 m/sn	Downhole: V_s = 415 - 430 m/s MASW: V_s = 252-310 m/sn	%14 - %17 (Erken test)	ZD sınıfı korundu
Bursa – Üre Depoları	Jet Grout (JET-1 & JET-2, D = 60 - 70 cm, L = 4 - 14 m)	Kiltaşı bloklu dolgu ve alüvyal KİL (SPT_{N30} = 12 - 27)	Cross-Hole: V_s = 140 - 272 m/s	Cross-Hole: V_s = 267 - 545 m/s	%90 - %100	ZD/ZC seviyesine yükseltildi
Adana - Silo	Ön Yıkamalı JET-1 (D = 80 cm, L = 23 m)	Fosil kavkılı gevşek KUM ve alüvyal KİL (SPT_{N30} = 11)	Cross-Hole: V_s = 201 - 284 m/s MASW V_{s30} = 125 - 176 m/s	Cross-Hole: V_s = 270 - 406 m/s MASW V_{s30} = 270-424 m/s	%42	ZE -> ZD
Bursa – Yük Depoları	JET-2 & Ön Yıkamalı JET-1 (D = 80 cm, L = 14 m, 2.25x2.25 m)	Dolgu (5 m) ve katı-çok katı alüvyal KİL (SPT_{N30}=5 - 42)	Cross-Hole: V_s = 184-289 m/s MASW: V_s = 264-290 m/sn	Cross-Hole: V_s = 296-403 m/s MASW: V_s = 382-412 m/sn	%45	ZE -> ZD
İstanbul - Fabrika	Donatılı Derin Karıştırma (DSM, D = 35 cm, L = 11 - 15.5 m, a_r=%14.6)	Deniz kabuklu çok yumuşak Deniz Tabanı Dolgusu / Turba-Balçık (SPT_{N30}=1-6)	Cross-Hole: V_s = 213 - 312 m/s	Cross-Hole: V_s = 325 - 447 m/s	%50	ZD/ZC seviyesine yükseltildi
Kocaeli – Konut Yapısı	Jet Grout (D=60 cm, L=15.0 m, 1.60x1.60 m)	Orta-katı kıvamlı KİL ve SİLT (SPT_{N30} = 7 - 16)	MASW: V_s = 182-256 m/sn	MASW: V_s = 312-418 m/sn	%63-%71	ZD zemin sınıfından ZC/ZD üst sınırına yükselmiştir.

Tüm sahalardaki MASW sonuçlarını temsilen Kocaeli Konut Yapısı çalışmasında elde edilen iyileşme öncesi ve iyileşme sonrasına ait Line-2 MASW kesiti Şekil 7'de verilmiştir.



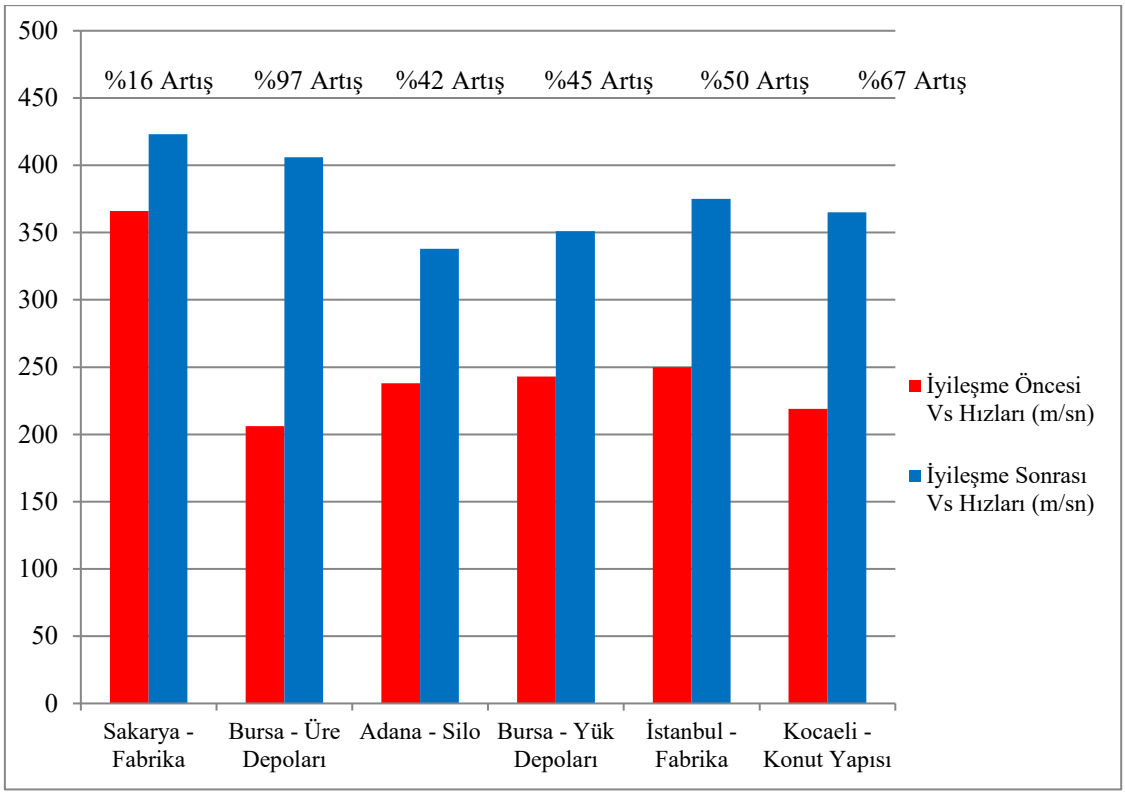
Şekil 7. Line-2 serimi için 7a) iyileşme öncesi 7b) iyileşme sonrasına ait MASW kesiti – Kocaeli konut yapısı

İmalatı tamamlanan yüksek modüllü kolonların (Jet grout ve Donatılı DSM) tasarım kabulleri ve tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Tasarım kabulleri (q_u) ile gerçekleşen karot dayanımları karşılaştırılması

Saha Adı	**Uygulanan Yöntem**	**Tasarım q_u (MPa)**	**Karot Min q_u (MPa)**	**Karot Max q_u (MPa)**	**Karot Ort q_u (MPa)**	**Numune Sayısı**	**Şartname / Tasarım Uygunluğu**
Sakarya - Fabrika	Jet Grout	2	-	-	-	-	-
Bursa – Üre Depoları	Jet Grout (JET-1/2)	Min 3.00	3.21	12.36	6.11	100 adet	Uygun
Adana - Silo	Jet Grout (JET-1)	Min 2.50	8.1	18.1	13.06	45 adet	Uygun
Bursa – Yük Depoları	Jet Grout (Ön Yıkamalı JET-1/ JET-2)	Min 2.00	≥ 2.00	≥ 2.00	≥ 2.00	40 adet	Uygun
İstanbul - Fabrika	Donatılı DSM	Proje Şartn.	Karot Testi	Karot Testi	Karot Testi	25 adet	Uygun

Çalışma sahalarının iyileşme öncesi ve sonrası V_s hızlarının ortalama değerlerini içeren sütun grafiği ise Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Çalışma sahalarının iyileşme öncesi/sonrası ortalama V_s hızı karşılaştırma grafiği

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı zemin profillerine sahip altı farklı sahada gerçekleştirilen Jet Grout ve Donatılı Derin Karıştırma (DSM) imalatları; saha sismik deneyleri (CHT, DHT, MASW) ve tek eksenli serbest basınç testi (q_u) ile incelenmiştir. Elde edilen veriler ve saha bulgularına göre ulaşılan temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Zemin Litolojisi ve Rijitlik Oranının ($E_{soilcrete}$ / E_{zemin}) V_s Artışına Etkisi: Saha sismik ölçümleri, çimento bazlı iyileştirme imalatlarının sağladığı nispî kayma dalgası hızı (V_s) artış oranının, doğrudan çevre zemin matrisinin başlangıç rijitliği ve litolojik yapısı tarafından denetlendiğini ortaya koymuştur. Yüksek plastisiteli yumuşak killi ve kalın kontrolsüz dolgu tabakalarının yer aldığı sahalarda (Bursa Üre Depoları %97 ve Kocaeli Konut Yapısı %67 artış), iyileştirme elemanı (soilcrete) ile çevre zemin matrisi arasındaki elastisite modülü farkı ($E_{soilcrete}/E_{zemin}$) rijitlik kontrastı) çok yüksek olduğundan kompozit ortam V_s hızında yaklaşık 2 katına ulaşan yüksek oranlı artışlar elde edilmiştir. Buna karşın, doğal/tabii çökelim ürünü olan orta katı alüvyal kil ve kum tabakalarında (Adana Silo %42, Bursa Yük Depoları % 45, İstanbul Fabrika Donatılı DSM %50) başlangıç zemin rijitliği görece daha yüksek olduğundan rijitlik kontrastı azalmış ve V_s hızındaki nispî artış %42 ile %50 bandında gerçekleşmiştir.

Deprem Yönetmeliği ve Spektrum Avantajları: Kompozit zemin ortamlarında V_{s30} > 180 m/s barajı aşılarak TBDY 2018 yerel zemin sınıfları ZE'den ZD'ye (Adana Silo ve Bursa Yük Depoları) veya ZD'den ZC'ye (Bursa Üre Depoları) yükselmiştir. Zemin sınıfındaki bu iyileşme, tasarım spektral ivme katsayısı S_{D1} değerinde %35 oranında net düşüş sağlatmış, spektrum köşe periyodunu (T_B) kısaltarak üst yapıya etki edecek toplam yatay deprem yüklerini ve yapısal maliyetleri azaltmıştır.

Tahribatsız Jeofizik Testlerin Uyumu: İnceleme yapılan saha boyutuna göre ufak ölçekte kuyu içi dalga iletimini ölçen Cross-Hole testleri ile inceleme yapılan sahanın genelinin ölçüldüğü hacimsel dispersiyon analizi MASW testlerinden elde edilen V_s hız artış yüzdelerinin (Adana Siloda CHT: %41.9, MASW: %41.5; Bursa Yük Depolarında CHT: %45, MASW: %41.5) birbirine yakın olması, zemin iyileştirme imalatlarının arazi genelindeki homojenliğini teyit etmektedir.

Serbest Basınç Dayanımı (q_u) ve Kompozit Sismik Hız (V_s) Arasındaki Etkileşim: Geleneksel zemin iyileştirme kabul şartnamelerinde imalat kalitesi çoğunlukla tek eksenli serbest basınç dayanımının ($q_u \geq 2.5$ - 3.0 MPa) sağlanması esasına dayandırılmaktadır. Ancak çalışma bulguları, çimentolu zemin (soilcrete) kolonunun tekil serbest basınç dayanımı ile sahanın kompozit sismik kayma dalgası hızı (V_s) artışı arasında doğrudan bir lineer orantı bulunmadığını ortaya koymuştur. Adana Silo sahasında gerçekleşen ortalama karot dayanımı $q_{u\ ort}$ = 13.06 MPa (2.5 MPa kabulünün 5.2 katı) mertebesine ulaşmasına rağmen ortalama V_s artışı %42 seviyesinde kalmış; Bursa Üre Depoları sahasında ise $q_{u\ ort}$ = 6.11 MPa iken ortamın sismik hızı %90 ile %100 arasında artış göstermiştir. Bu durum, sismik V_s artışının yalnızca tekil enjeksiyon elemanının rijitliğine bağlı olmadığını; alan değiştirme oranı (a_r), kolon aralığı ve çevre zemin matrisinin başlangıç rijitliği gibi kompozit parametreler tarafından yönetildiğini göstermektedir. Dolayısıyla kalite kontrol süreçlerinde q_u dayanımının yanı sıra sismik V_{s30} ölçümlerinin de bir kabul kriteri olarak yer almasının faydalı olacağı sonucuna varılmıştır.

Çimento Hidratasyonu ve Sismik Test Zamanlamasının Hız Gelişimine Etkisi: İmalat sonrası sismik testlerin gerçekleştirildiği tarih ile çimentonun prizlenme ve hidratasyon süreci arasındaki zaman farkı, sismik dalga hızlarına doğrudan yansımaktadır. Sakarya Fabrika sahasında imalattan 1–2 gün sonra yapılan erken yaş Downhole testlerinde elde edilen V_s hız artışının %14 ile %17 seviyesinde kalması, erken yaştaki ölçümlerin enjeksiyonun henüz prizini almamış fiziksel kütle etkisini yansıttığını göstermektedir. Çimento hidratasyonunu ve zemin-çimento matrisi için priz süresini 28 günden sonra tamamlayan diğer sahalarda (Bursa Üre Depoları, Adana Silo ve İstanbul Fabrika) sismik V_s artışlarının %40 ile %100 aralığına ulaşması zamana bağlı rijitlik gelişimini kanıtlamaktadır. Bu bulgu, TBDY 2018 zemin sınıfı revizyonuna esas teşkil edecek kabul sismik testlerinin imalat sonrasında en az 28 günlük kür süresi tamamlandıktan sonra gerçekleştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tartışma / Öneriler :

Saha deneylerini baz alan bir bilimsel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmadaki sonuçların, literatürdeki mevcut diğer çalışmalar ile uyumu irdelenebilir.

Cross-hole deneyi ile MASW deneyinin ölçek farklılıkları söz konusudur. Cross-hole ile belirli bir derinlik bazından daha lokal / noktasal sismik kayma dalgası hızları elde edilmektedir. MASW deneyinde ise daha uzun yatay mesafelerde daha geniş jeolojiyi tarayan ancak derinlik boyunca daha ortalama sismik kayma dalgası hızları elde edilmektedir. Başka bir çalışmada, bu yapılan deneysel çalışmalar daha fazla veri setiyle (özellikle daha fazla cross-hole deneyi yaparak) birbirlerine olan uyum ve tutarlılığı irdelenebilir.

TBDY 2018 uyarınca yerel zemin sınıflarının belirlenmesinde üst 30 metreye ait ortalama kayma dalgası hızı (V_{s30}), standart penetrasyon darbe sayısı [$(N_{60})_{30}$] ve drenajsız kayma mukavemeti [$(c_u)_{30}$] parametreleri birlikte değerlendirilmektedir. Bu çalışmada kapsama

alınan sahalarda, iyileştirme sonrasındaki kompozit zemin rijitliğinin belirlenmesinde sismik V_{s30} ölçümleri odak noktası olarak incelenmiştir. Zemin sınıfı değerlendirmelerinin ve TBDY 2018 parametrelerinin daha geniş bir perspektifte ele alınabilmesi amacıyla; bundan sonra yapılacak çalışmalarda sismik hız ölçümlerinin yanı sıra iyileştirme sonrası $(N_{60})_{30}$ ve $(c_u)_{30}$ verilerinin de deneysel/analitik olarak sürece dahil edilmesi ve bu parametreler arasındaki etkileşimin incelenmesi önerilmektedir.

Zemin Litolojisinin ve Rijitlik Oranının ($E_{soilcrete}/E_{zemin}$), V_s artışına etkisine bu çalışmada değinilmiştir. Ancak bu konu, derinlik ve zemin litolojisi bazında çok daha detaylı irdelenip, zemin sınıfının değiştirilmesi için ideal olan ve olmayan zemin litolojileri ve rijitlik oranları tespit edilebilir.

Daha ileri teknikler ve daha çok değişken kullanılarak yapılacak ilave çalışmaların bir bütün olarak değerlendirilmesi ve üst yapı tasarım uzmanları ile eş güdümlü çalışılarak irdelenen bu konunun yönetmelik ve şartnamelerde yer alması önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, saha sismik deneyleri ile kalite kontrol verilerinin derlenmesine imkan sağlayan, teknik altyapı ve uygulama tecrübelerini sunan Geobos Zemin Güçlendirme Sistemleri Ltd. Şti. yönetimine ve saha ekiplerine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

AFAD (2018), "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği", İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

ASTM D1143 (2020), "Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load", ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bruce, D.A. (2012), "Specialty Construction Techniques for Dam Foundation Improvement", CRC Press, Boca Raton, FL.

Durgunoğlu, H.T. (2004), "Zemin İyileştirmesinde Jet Grouting Uygulamaları", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 15-28.

Gazetas, G. (1991), "Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded Foundations", Journal of Geotechnical Engineering, Vol 117(9), 1363-1381.

Mitchell, J.K. ve Santamarina, J.C. (2005), "Biological Considerations in Geotechnical Engineering", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 131(10), 1222-1233.

Moseley, M.P. ve Kirsch, K. (2004), "Ground Improvement", İkinci Baskı, Spon Press, London.

Stokoe, K.H., Wright, S.G. ve Bay, J.A. (2004), "Characterization of Geotechnical Sites by SASW and MASW Methods", Geophysical Developments, Vol 12, 125-156.

Topolnicki, M. (2004), "In Situ Soil Mixing", Ground Improvement, İkinci Baskı, Editors: M. Moseley ve K. Kirsch, Spon Press, London, 331-428.

Bouassida, M., Jellali, B., & Porbaha, A. (2009). "Estimation of the shear strength of columns-reinforced soil." Geotechnical and Geological Engineering, 27(6), 713-723.

Kitazume, M., & Terashi, M. (2013). The Deep Mixing Method. CRC Press/Balkema.

Rainieri, S., vd. (2020). "Seismic wave velocity monitoring during soil improvement via cement injection." Construction and Building Materials, 258, 119582.

Soga, K., & Mitchell, J. K. (2006). Fundamentals of Soil Behavior. Wiley.