

TURASAS

TÜRKİYE

RAYLI SİSTEM ARAÇLARI SAN. A.Ş.

ESKİŞEHİR İLİ, TEPEBAŞI İLÇESİ, HOŞNUDİYE

MAHALLESİ 25431 ADA, 1 PARSEL

TÜRASAŞ ESKİŞEHİR BÖLGE

MÜDÜRLÜĞÜNE AİT MİSAFİRHANE

BİNASININ GÜÇLENDİRME UYGULAMA

PROJELERİNİN HAZIRLANMASI İŞİ

“ZEMİN İYİLEŞTİRME RAPORU”



ONAT MÜŞAVİRLİK PROJE MÜHENDİSLİK

Mustafa Kemal Mahallesi 2141. Cadde No:17/8 Çankaya/ANKARA

Tel : 0312 473 61 14 / 0555 726 62 49

www.onatmpm.com.tr - info@onatmpm.com.tr

HAZİRAN – 2026

İÇİNDEKİLER

1	GİRİŞ.....	1
2	YAPININ MEVCUT DURUMU HAKKINDA.....	2
3	BÖLGESEL & JEOLJİK BİLGİLER.....	13
3.1	BÖLGESEL JEOLJİ.....	13
3.2	YAPISAL JEOLJİ VE AKTİF TEKTONİK.....	13
4	ZEMİN ARAŞTIRMA ÇALIŞMALARI.....	16
4.1	JEOLJİK ARAŞTIRMALAR.....	16
4.2	JEOFİZİK ARAŞTIRMALAR.....	19
4.3	LABORATUVAR ÇALIŞMALARI.....	20
5	DEPREMSELLİK.....	23
6	GEOTEKNİK DEĞERLENDİRMELER.....	24
6.1	SIVILAŞMA DEĞERLENDİRMESİ.....	24
6.2	OTURMA DEĞERLENDİRMESİ.....	26
6.3	MEVCUT GERİLMELER / GERİLME DEĞİŞİMLERİ.....	27
7	ZEMİN İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ.....	33
7.1	BENZER VAKALAR VE UYGULANAN YÖNTEMLER.....	33
7.2	BİNA ÇEVRESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ (1. ETAP).....	38
7.3	BİNA TEMELİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ (2. ETAP).....	47
7.4	UYGULAMA ÖNERİLERİ – ÖNEMLİ NOTLAR.....	56
8	SONUÇLAR - ÖNERİLER.....	59

EKLER

Ek-1 : Sondaj Logları & Laboratuvar Deney Sonuçları

Ek-2 : Zemin İyileştirme Paftası

TABLolar

TABLO 1 YAPI BİLGİLERİ ÖZET TABLOSU.....	4
TABLO 2 FAY BİLGİLERİ ÖZET TABLOSU	14
TABLO 3 SONDAJ BİLGİLERİ ÖZET TABLOLARI.....	17
TABLO 4 PRESİYOMETRE SONUÇ TABLOSU	17
TABLO 5 SPT-N & LİTOLJİK BİRİM ÖZET TABLOLARI	18
TABLO 6 JEOFİZİK ARAŞTIRMALAR ÖZET TABLOSU (MASW).....	19
TABLO 7 LABORATUVAR NUMUNELERİ ÖZET TABLOSU.....	20
TABLO 8 LABORATUVAR DENEY SONUÇLARI ÖZET TABLOLARI.....	21
TABLO 9 YEREL ZEMİN SINIFLARI (TBDY, 2018)	23
TABLO 10 SIVILAŞMA HESAP TABLOSU (REF: JEOLojİK ETÜT RAPORU; JEOLojİ MÜHENDİSLERİ ODASI SIVILAŞMA POTANSİYELİ ANALİZ TABLOSU)	25
TABLO 11 GERİLME DEĞİŞİMLERİ ÖZET TABLOSU	27
TABLO 12 FARKLI ZEMİNLERDE ÇİMENTO ORANINA BAĞLI UCS DEĞERLERİ (TOPOLNICKİ, 2004)	40
TABLO 13 ÖNERİLEN İZLEME VE ÖLÇÜM PROGRAMI.....	57

ŞEKİLLER

ŞEKİL 1 YER BULDURU HARİTASI (GOOGLE EARTH).....	1
ŞEKİL 2 YAPININ TEMEL PLANI / PROJE ANTETİ.....	3
ŞEKİL 3 KARAYOLU CEPHESİNDEN GÖRÜNTÜ - 1	4
ŞEKİL 4 KARAYOLU CEPHESİNDEN GÖRÜNTÜ - 2	5
ŞEKİL 5 KARAYOLU CEPHESİNDEN GÖRÜNTÜ - 3	5
ŞEKİL 6 KARAYOLU CEPHESİNDEN GÖRÜNTÜ - 4	6
ŞEKİL 7 ARKA CEPHESİNDEN GÖRÜNTÜ - 1	6
ŞEKİL 8 ARKA CEPHESİNDEN GÖRÜNTÜ - 2	7
ŞEKİL 9 ARKA CEPHESİNDEN GÖRÜNTÜ - 3	7
ŞEKİL 10 YAN CEPHESİNDEN GÖRÜNTÜ - 1.....	8
ŞEKİL 11 YAN CEPHESİNDEN GÖRÜNTÜ – 2	8
ŞEKİL 12 YAN CEPHESİNDEN GÖRÜNTÜ – 3	9
ŞEKİL 13 YAN CEPHESİNDEN GÖRÜNTÜ – 4	10
ŞEKİL 14 KAZAN DAİRESİ GÖRÜNTÜSÜ - 1	11
ŞEKİL 15 KAZAN DAİRESİ GÖRÜNTÜSÜ - 2	11
ŞEKİL 16 KONFERANS SALONU	12
ŞEKİL 17 YAPI ARA KATI (DİLASYON BİRLEŞİMİ).....	12
ŞEKİL 18 BÖLGESEL STRATİGRAFİK KESİT	15
ŞEKİL 19 ZEMİN ARAŞTIRMA ÇALIŞMALARI KROKİSİ	16
ŞEKİL 20 İYİLEŞTİRME YERLEŞİM PLANI (VAKA-1)	33
ŞEKİL 21 İYİLEŞTİRME YERLEŞİM PLANI (VAKA-2)	34
ŞEKİL 22 KESİŞEN DSM PERDE TASARIM HUSUSLARI (MİLEV, 2024)	35
ŞEKİL 23 KESİŞEN DSM PERDE UYGULAMASI (MİLEV, 2024)	36
ŞEKİL 24 ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ÖNERİLEN UYGULAMA GRADASYONLARI.....	38
ŞEKİL 25 SIVILAŞMAYA KARŞI ÖNLEMLER: (A) NEHİR MECRASINDA TAŞKIN SEDDESİ, (B) BİNA TEMELLERİNİN STABİLİZASYONU (BOULANGER VD. 2021).....	39
ŞEKİL 26 AZALTIM FAKTÖRÜ – ALAN ORANI – RİJİTLİK ORANI İLİŞKİSİ (ÖZSOY VD. 2003)	40
ŞEKİL 27 FARKLI ZEMİN TÜRLERİ İÇİN RAPOR EDİLEN UCS DEĞERLERİ (TAKİ VE YANG, 1991)	41
ŞEKİL 28 SAHA KOŞULLARI ELDE EDİLEN E50 – QU KORELASYONLARI (TOPOLNICKİ, 2016).....	41
ŞEKİL 29 ENJEKSİYON YÖNTEMİ SEÇİMİ (ZEMİN TÜRLERİNE GÖRE) (FHWA)	48
ŞEKİL 30 ANA ENJEKSİYON TİPLERİ (FHWA GROUND MODİFİCATION MANUAL)	49
ŞEKİL 31 ANA ENJEKSİYON TİPLERİ (DLH GEOTEKNİK TASARIM ESASLARI).....	50

ŞEKİL 32 ZEMİN İYİLEŞTİRME METOTLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (ALTUĞ SAYGILI)	50
ŞEKİL 33 ENJEKSİYON MALZEME TÜRLERİ (FHWA GROUND MODIFICATION MANUAL).....	51
ŞEKİL 34 AŞAĞIDAN YUKARIYA & YUKARIDAN AŞAĞIYA KOMPAKSİYON ENJEKSİYONU İŞLEMLERİ	53
ŞEKİL 35 KOMPAKSİYON ENJEKSİYONU - KUM İÇİN ÖNGÖRÜLEN DANE ÇAPI DAĞILIM ARALIĞI (WARNER, BROWN,1974).....	55
ŞEKİL 36 SIVILAŞMA DİRENCİ EĞRİLERİ (ANDRUS VE STOKOE, 2000)	58

1 GİRİŞ

Bu rapor, “Eskişehir İli, Tepebaşı İlçesi, Hoşnudiye Mahallesi, 25431 Ada, 1 Parsel – Türasaş Misafirhane Binası Güçlendirme Projesi” kapsamında yapılması planlanan zemin iyileştirme çalışmalarının sunulması amacıyla hazırlanmıştır.



Şekil 1 Yer Bulduru Haritası (Google Earth)

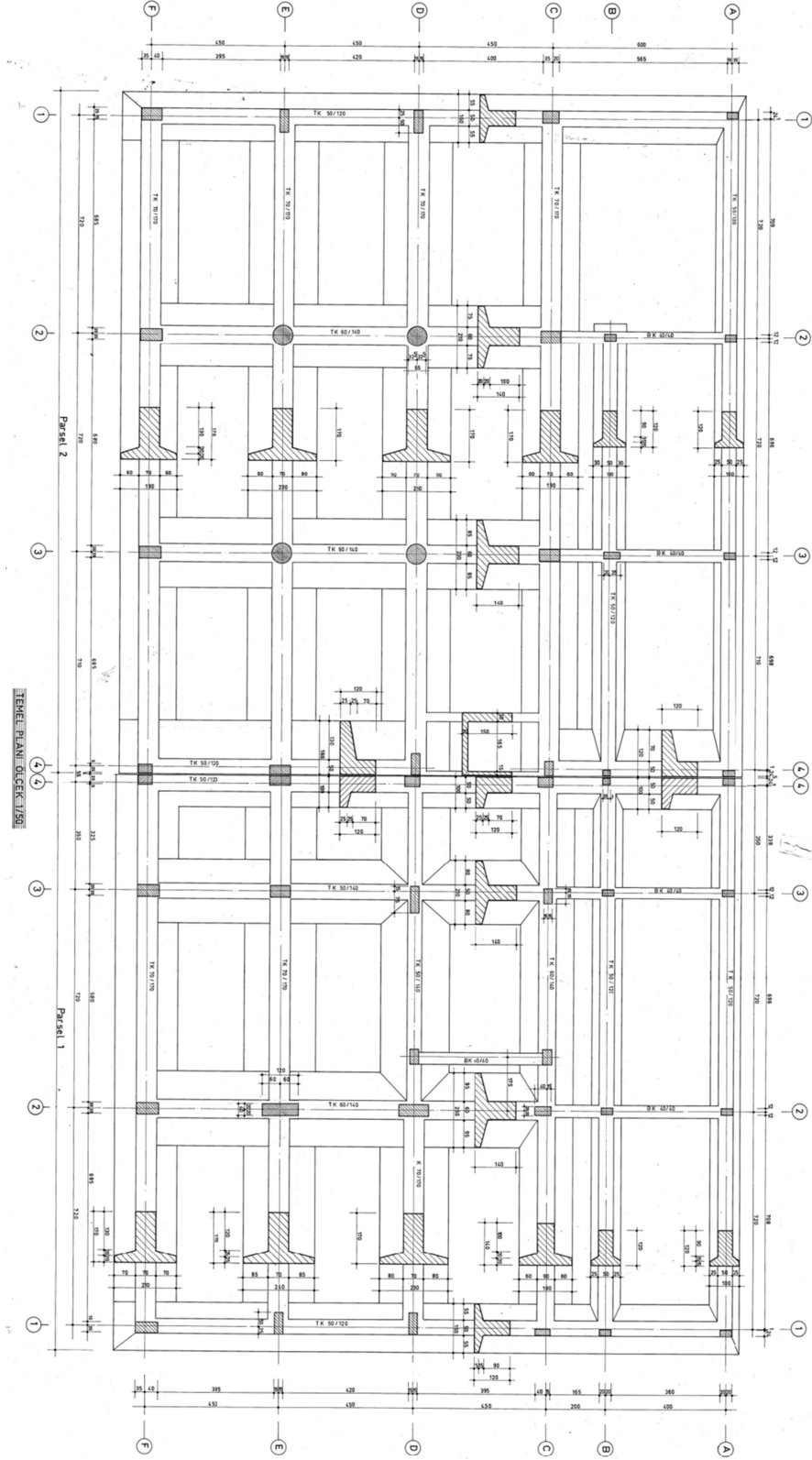
Zemin iyileştirme çalışmaları kapsamındaki tüm jeolojik datalar “YERTEKNİK Müh. İnş. Mak. Jeo. ve Sondaj. Taah. Jeotermal San. ve Tic. Ltd. Şti.” tarafından hazırlanan “Zemin ve Temel Etüt Raporu” içeriğinden alınmıştır.

2 YAPININ MEVCUT DURUMU HAKKINDA

Yapının mevcut durumunun yerinde incelenmesi amacıyla farklı zamanlarda saha gezileri düzenlenmiştir. 04.04.2026 tarihinde yapılan geziye ait saha fotoğrafları ve değerlendirmeler raporun bu kısmında yer almaktadır.

Çıkarımlar ve değerlendirmeler aşağıdaki gibidir;

- ❖ Mevcut durumda yapı kullanımda değildir. Yapının uzun süre boyunca herhangi bir sorun olmaksızın hizmet verdiği, saha personeline edinilen bilgiler doğrultusunda değerlendirilmektedir.
- ❖ Kazan dairesi yapının en alt kotunda yer almakta olup, yapılan gözlemler neticesinde çatlak, rutubet veya benzeri temel kaynaklı problemlere rastlanmamıştır.
- ❖ Yapının kullanım süresi dikkate alındığında genel yıpranmalar gözlenmekle birlikte, herhangi bir oturma problemi veya önemli bir zemin kaynaklı olumsuzluk tespit edilmemiştir.
- ❖ Statik proje mühendisi ile yapılan görüşmeler doğrultusunda dilatasyon bölgesi özel olarak incelenmiş olup, farklı oturma veya yapısal süreksizlik oluşturabilecek bir probleme rastlanmamıştır.
- ❖ Proje kapsamında açılan zemin araştırma kuyularında yer altı suyu seviyeleri kontrol edilmiş olup, elde edilen bulguların sondaj logları ile uyumlu olduğu değerlendirilmiştir. Proje sahasında yer altı su seviyesi yüksek olup, yapının Porsuk Çayı'na yakın konumda bulunması bu durumu desteklemektedir.
- ❖ Yapı çevresinde yüzeysel drenaj koşulları incelendiğinde, yağış sularının yapıdan uzaklaştırılmasına yönelik mevcut sistemlerin genel olarak yeterli olduğu, ancak uzun vadede yer altı su seviyesinin yüksekliği nedeniyle drenaj sürekliliğinin korunmasının önem arz ettiği değerlendirilmektedir.



Şekil 2 Yapının Temel Planı / Proje Anteti

Tablo 1 Yapı Bilgileri Özet Tablosu

Bina En ve Boyu (B/L) (m)	:	20.10	40.40
Oturum Alanı (m²)	:	812	
Kazı Derinliği (m)	:	1.70	
Yapı Malzemesi	:	Betonarme	
Kullanım Amacı	:	Misafirhane	
Toplam Kat Adedi	:	Z+ 3	
Yapı Yüksekliği (m)	:	16.00	
İnşaat Nizamı	:	Ayrık	



Şekil 3 Karayolu Cephesinden Görüntü - 1



Şekil 4 Karayolu Cephesinden Görüntü - 2



Şekil 5 Karayolu Cephesinden Görüntü - 3



Şekil 6 Karayolu Cephesinden Görüntü - 4



Şekil 7 Arka Cephesinden Görüntü - 1



Şekil 8 Arka Cephesinden Görüntü - 2



Şekil 9 Arka Cephesinden Görüntü - 3



Şekil 10 Yan Cephesinden Görüntü - 1



Şekil 11 Yan Cephesinden Görüntü - 2



Şekil 12 Yan Cephesinden Görüntü – 3



Şekil 13 Yan Cephesinden Görüntü – 4



Şekil 14 Kazan Dairesi Görüntüsü - 1



Şekil 15 Kazan Dairesi Görüntüsü - 2



Şekil 16 Konferans Salonu



Şekil 17 Yapı Ara Katı (Dilatasyon Birleşimi)

3 BÖLGESEL & JEOLJİK BİLGİLER

İnceleme alanı, jeomorfolojik olarak düz bir alan üzerinde bulunmaktadır. Çalışılan saha içinde sulu ve kuru dere yoktur. Ayrıca, Eskişehir il merkezine ulaşım sorunu yoktur. Çalışma alanının topoğrafik eğimi oldukça düşüktür.

3.1 Bölgesel Jeoloji

Etüdü yapılan alanda, Kuvaterner yaşlı genç akarsu çökellerinden oluşan alüvyon istif mostra vermektedir. Yüzeyden itibaren genel olarak siltli kil, hakim litoloji olarak görülmektedir. Bu litolojik istif içerisinde yer yer killi kum, siltli kum mercekleri bulunmaktadır. İçerdiği kil, kum silt ve çakıl miktarına göre birleştirilmiş zemin sınıflamasından sembol almaktadır. Daha altta neojen konglomera sedimentleri ile devam ederek, paleozoik yaşlı metamorfikler üzerine diskordansla oturarak istifini tamamlamaktadır. Etüt alanında mostra veren birim genç akarsu çökeli olup, mercek ve çapraz tabakalanmaya sahiptir. Düşey ve yatayda heterojen istiflenme hakimdir. Alttaki birimlerle ilişkisi diskordanslıdır.

3.2 Yapısal Jeoloji ve Aktif Tektonik

Genel doğrultusu BKB-DGD olan ve batıda Uludağ ile doğuda Kaymaz arasında uzanan Eskişehir fay zone Ege-Batı Anadolu bloğunu kuzeydoğuda Orta Anadolu bloğundan ayıran sağ yönlü doğrultu atımlı normal bileşenli bir fay zoneudur. Bu fay zoneu, Eskişehir bölgesinde doğrultusu D-B ile KB-GD arasında değişen fay segmentleri ile temsil edilir. Pleyistosen ve Holosen birimlerinde görülen depolanma sırasına ve sonrasına ait faylar, Eskişehir fay zoneunun en az Pleyistosen' den bu yana aktif olduğunu göstermektedir. Eskişehir fay zoneu üzerinde ve yakın çevresinde 20. yy'da magnitüdü 4 ve üzerinde ($M_d \geq 4.5$) en az 14 adet deprem meydana gelmiştir ve 20 Şubat 1956 Eskişehir depremi ($M=6.4$) bu yüzyılda meydana gelen en büyük depremdir. 1956 Eskişehir depreminin

hasar dağılımına bakıldığında Oklubal Turgutlar arasında uzanan yaklaşık 10 km uzunluğundaki BKB-DGD doğrultulu segment üzerinde meydana geldiği anlaşılmaktadır. Tarihsel deprem kataloglarında ve Eskişehir'in tarihi ile ilgili literatürlerde 20. yy'dan önceki dönemlere ait önemli deprem kaydı yoktur. Ancak, Pleyistosen birimleri içinde görülen çamurtaşı daykları ve fay yüzeyleri önünde Holosen birimlerinin kesintiye uğraması, Eskişehir fay zonunu oluşturan segmentlerin bu bölgede aktif olduklarını ve son 10000 yılda birkaç defa magnitüdü 6'nın üzerinde deprem oluşturduklarını göstermektedir. 1956 depremi fay düzlemi çözümü ve arazi gözlemleri, İnönü ve Eskişehir havzalarının oluşmasında önemli rol oynayan Eskişehir fay zonunun transtansiyonal fay zonu olduğunu göstermektedir.

Tablo 2 Fay Bilgileri Özet Tablosu

<i>Aktif Fay Adı</i>	<i>Etüt Alanına Olan Mesafe</i>	<i>Coğrafi Konumu</i>	<i>M Maks</i>
Eskişehir Fayı	>4 km	Güney - GB	6.4
Kuzey Anadolu fayı	96 km	Kuzey - KD	7.5
KAF (Güney kanat)(Akyazı–Taraklı bat.)	82 km	Kuzey - KB	5.4
Kütahya Fayı	52 km	Güney - GB	6.2

17 Ağustos 1999 tarihinde Kuzey Anadolu Fay' ının Marmara Bölgesi hareketinin sismik dağılımından önemli derecede etkilenmiştir. Günümüz ve gelecekte; yerel fayların veya Kuzey Anadolu Fay' ının etkisi ile >6 aletsel büyüklükte depreme maruz kalma olasılığı yüksektir.

ESKİŞEHİR VE ÇEVRESİ STRATİGRAFİK KESİTİ									
JEOLOJİ ZAMAN BİRİMLERİ Geochronology			KALINLIK Thickness (m)	STRATİGRAFİ Stratigraphy	LİTOLOJİ Lithology	FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ Features		Physical	
Zaman Era	Devir Period	ALT DEVİR Lower Period							
SENOZOİK Cenozoic	KUATERNER Quaternary	NEOJEN Neogene		15-30	-o-o-o-o-o-o-o -o-o-o-o-o-o-o -o-o-o-o-o-o-o -o-o-o-o-o-o-o	Alüvyon:Çakıl,kum,silt,kumlu kıl	Yüzeyde kılıl,derine doğru çakıllı ve kumlu		
				30-50	-o-o-o-o-o-o-o -o-o-o-o-o-o-o -o-o-o-o-o-o-o	Kıl,Kum,Çakıl	Gevşek istiflenmiştir.Yer yer kıl bantları taşır.		
	TERSİYER Tertiary			10-150		Bazalt	Sert,çatlaklı,yer yer cürufumsu		
				20-200		Kalker	Kirlı beyaz renklı yer yer silileşmiş seviyeleri kıl çimentolu		
				40-150		Tüft	İri elemanlı yer yer silileşmiş seviyeler ihtiva eder		
				200		Fliş:Konglomera,kumtaşı mam kıltaşı.	Umumiyette gevşek dokulu olup kalker ve kıl çimentolu		
				10-40		Andazit	Sert masif		
				120	-o-o-o-o-o-o-o -o-o-o-o-o-o-o -o-o-o-o-o-o-o	Konglomera	Kirlı kırmızı renkte yer yer greli seviyeleri kıl çimentoludur.		
	PALEOJEN Paleogene		ESOS ENEo cene	30		Kalker	Sarımtrak renklı bol fosillil		
			PALEOSEN Paleocene	150	-o-o-o-o-o-o-o -o-o-o-o-o-o-o -o-o-o-o-o-o-o	Konglomera	Şarap kırmızı renklı,tabanda İri çakıllı yer yer		
MESOZOİK Mesozoic	KRETASE Cretaceous			—		Ofiolotik seri Peridotit-serpantin-gabrodiorit	Yeşil renklı serpantileşmiş kısımları kırık ve çatlaklı.		
	JURA Jurassic			40		Kalker	Açık krem renklı kompakt ve yer kalsit damarlı		
				600		Fliş::Gre,mam,kıl	Kahve renklı elemanları volkanik menşeli Mamlı ve kılil seviyeler çok İnce tabakalı.		
PALEOZOİK Paleozoic				350		Mermer	Kırık,çatlak ve boşluklu tabakalanma bartz olarak görülmez.		
				—		Mikaşist,filit,koritt şist	Yeşil kahverengil renklı		

Şekil 18 Bölgesel Stratigrafik Kesit

4 ZEMİN ARAŞTIRMA ÇALIŞMALARI

4.1 Jeolojik Araştırmalar

Proje kapsamında 2 adet zemin araştırma sondajı yapılmıştır. Yapılan 2 sondaj (SK-1 ve SK-2) 19,95 m derinliğe ulaşmıştır. Her iki noktada killi silt (MH), siltli kil (CH) ve kumlu çakıl (GW-GM) tabakaları geçilmiş, SK-2 sondajında ek olarak siltli kum (SW-SM) tabakası da gözlenmiştir. Yer altı su seviyesi her iki noktada 4,20 metre olarak ölçülmüştür.



Şekil 19 Zemin Araştırma Çalışmaları Krokisi

*** 04/04/2026 tarihli saha gezisinde kuyulardan yer altı su seviyesi kontrolü sağlanmıştır. Yer altı seviyesinin yüzeye çok yakın olduğu ve sondajlar ile benzer tespit edilmiştir.*

Tablo 3 Sondaj Bilgileri Özet Tabloları

Makine tipi	:	NK 15 ROTARY
İlerleme Yöntemi	:	Auger
Şahmerdan Tipi	:	Otomatik
Sondaj adedi, Toplam metraj	:	2 adet 39.9 m
Arazi deney cinsi ve adedi	:	SPT, 26 adet
Deneyin yapıldığı derinlikler	:	her 1,50 m de SPT deneyi yapıldı

Sondaj	Derinlik	Geçilen Litoloji	Yass	Koordinat (WGS84)
SK-1	19.95	Killi Silt (MH), Siltli Kil (CH), Kumlu Çakıl (GW-GM)	4.2	286270
				4405821
SK-2	19.95	Killi Silt (MH), Siltli Kil (CH), Kumlu Çakıl (GW-GM), Siltli Kum (SW-SM)	4.2	286330
				4405856

Proje sahasında yerinde yapılan zemin araştırma çalışmaları aşağıdaki gibi özetlenmektedir;

- 2 adet L=19,95 metre derinliğinde zemin araştırma sondajı
- 26 adet SPT (Standart Penetrasyon Testi) testi
- 3 adet presiyometre testi (SK-1)
- 1 adet MASW jeofizik testi

Tablo 4 Presiyometre Sonuç Tablosu

		3,00 m	6,00 m	9,00 m	
Limit Basınç (PL)	:	8	9	16	kg/cm ²
Elastisite Modülü	:	119	142	265	kg/cm ²
PLN	:	7.5	7.5	14.6	kg/cm ²

Tablo 5 SPT-N & Litolojik Birim Özet Tabloları

	<i>Numune</i>	<i>Derinlik</i>	<i>SPT-N</i>	<i>YASS</i>	<i>Litolojik Birim</i>
SK-1	1 -SPT	1,50-1,95	8	4.20	Killi Silt
	2 -SPT	3,00-3,45	11		Killi Silt
	3 -SPT	4,50-4,95	8		Siltli Kil
	4 -SPT	6,00-6,45	15		Killi Silt
	5 -SPT	7,50-7,95	100		Kumlu Çakıl
	6 -SPT	9,00-9,45	47		Kumlu Çakıl
	7 -SPT	10.50-10.95	100		Kumlu Çakıl
	8 -SPT	12.00-12.45	100		Kumlu Çakıl
	9 -SPT	13.50-13.95	100		Kumlu Çakıl
	10 -SPT	15.00-15.45	100		Kumlu Çakıl
	11 -SPT	16.50-16.95	100		Kumlu Çakıl
	12 -SPT	18.00-18.45	100		Kumlu Çakıl
	13 -SPT	19.50-19.95	100		Kumlu Çakıl

	<i>Numune</i>	<i>Derinlik</i>	<i>SPT-N</i>	<i>YASS</i>	<i>Litolojik Birim</i>
SK-2	1 -SPT	1,50-1,95	10	4.20	Killi Silt
	2 -SPT	3,00-3,45	12		Siltli Kil
	3 -SPT	4,50-4,95	4		Kumlu Çakıl
	4 -SPT	6,00-6,45	8		Siltli Kum
	5 -SPT	7,50-7,95	100		Siltli Kum
	6 -SPT	9,00-9,45	46		Siltli Kum
	7 -SPT	10.50-10.95	100		Siltli Kum
	8 -SPT	12.00-12.45	100		Siltli Kum
	9 -SPT	13.50-13.95	100		Siltli Kum
	10 -SPT	15.00-15.45	100		Siltli Kum
	11 -SPT	16.50-16.95	100		Siltli Kum
	12 -SPT	18.00-18.45	100		Siltli Kum
	13 -SPT	19.50-19.95	100		Siltli Kum

4.2 Jeofizik Araştırmalar

04.07.2025 tarihinde, sahada gerçekleştirilen, jeofizik çalışmalardan S dalgası hızlarını belirlenmeye yönelik olarak MASW-aktif kaynak hat ölçümü yapılmıştır. 4.5 Hz'lik P jeofonlar kullanılmış, jeofonlar arası 2 metre olup, jeofon açılım mesafesi 22 m, ofset uzaklığı 6 m'dir. Hedeflenen derinlik 30 metredir.

Tablo 6 Jeofizik Araştırmalar Özet Tablosu (MASW)

<i>Sismik Serim Yönü ve Koordinat Tablosu</i>												
<i>MASW Serim No:</i>		<i>Açılım Yönü</i>		<i>Y</i>		<i>X</i>		<i>Z</i>				
Masw-1		KB - GD		286270		4405821		799				

<i>Katman No</i>	<i>V_p (m/sn)</i>	<i>V_s (m/sn)</i>	<i>V_p / V_s</i>	<i>Katman Kalınlığı (m)</i>	<i>İnceleme Derinliği (m)</i>	<i>Yoğunluk (gr/cm³)</i>	<i>Poisson Oranı Birimsiz</i>	<i>Kayma Modülü (kg/cm²)</i>	<i>Elastisite Modülü (kg/cm²)</i>	<i>Bulk Modülü (kg/cm²)</i>	<i>Ak Büyütme</i>	<i>V_{s30} (m/sn)</i>	<i>Titreşim Periyodu (sn)</i>
1	399	162	2.46	3.8	3.8	1.68	0.40	441	1236	2086	2.19	308	0.57
2	498	248	2.01	6.2	10.0	1.70	0.34	1045	2791	2821			
3	649	375	1.73	8.8	18.8	1.73	0.25	2433	6078	4043			
4	758	438	1.73	11.2	30.0	1.75	0.25	3360	8397	5584			

<i>Katman No</i>	<i>V_p (m/sn)</i>	<i>V_s (m/sn)</i>	<i>V_p / V_s</i>	<i>Katman Kalınlığı (m)</i>	<i>İnceleme Derinliği (m)</i>	<i>Yoğunluk (gr/cm³)</i>	<i>Poisson Oranı Birimsiz</i>	<i>Kayma Modülü (kg/cm²)</i>	<i>Elastisite Modülü (kg/cm²)</i>	<i>Bulk Modülü (kg/cm²)</i>	<i>Ak Büyütme</i>	<i>V_{s30} (m/sn)</i>	<i>Titreşim Periyodu (sn)</i>
1	397	160	2.48	3.8	3.8	1.68	0.40	430	1206	2074	2.32	278	0.65
2	502	252	1.99	6.2	10.0	1.70	0.33	1080	2876	2845			
3	656	307	2.14	8.8	18.8	1.73	0.36	1632	4437	5274			
4	628	362	1.73	11.2	30.0	1.73	0.25	2261	5659	3790			

<i>VS 3.8</i>		<i>VS 10</i>		<i>VS 18.8</i>		<i>VS 30</i>	
162	m/sn	206	m/sn	261	m/sn	308	m/sn

4.3 Laboratuvar Çalışmaları

Sondajlardan alınan zemin numuneleri üzerinde, zemin sınıflaması, tane boyu dağılımı, plastisite ve diğer mühendislik özelliklerini belirlemeye yönelik laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Zemin etüd raporunda 14.0 adet örselenmiş numune alınarak zemin deneyi ve 2.0 adet örselenmemiş numune alınarak zemin deneyi yapıldığı bildirilmektedir.

Tablo 7 Laboratuvar Numuneleri Özet Tablosu

<i>Sondaj No</i>	<i>Derinlik (m)</i>	<i>Numune Tipi</i>	<i>Uygulanan Deneyler</i>
SK-1	1.50-1.95	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-1	3.00-3.45	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-1	4.00-4.50	UD	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası, Birim Hacim Kütle, Serbest Basınç
SK-1	6.00-6.45	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-1	9.00-9.45	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-1	12.00-12.45	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-1	15.00-15.45	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-1	19.50-19.95	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-2	1.50-1.95	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-2	3.00-3.50	UD	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası, Birim Hacim Kütle, Üç Eksenli Basınç
SK-2	4.50-4.95	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-2	7.50-7.95	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-2	10.50-10.95	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-2	13.50-13.95	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası
SK-2	19.50-19.95	SPT	Elek Analizi, Atterberg Limitleri, Su Muhtevası

Tablo 8 Laboratuvar Deney Sonuçları Özet Tabloları

<i>Sondaj No</i>	<i>Derinlik</i>	<i>Doğal Su İçeriği</i>	<i>Çakıl</i>	<i>Kum</i>	<i>Silt-Kil</i>	<i>LL</i>	<i>PL</i>	<i>PI</i>	<i>TS 1500</i>
SK-1	1.50-1.95	33.4	1.3	6.7	92	56.3	32.5	23.8	MH
SK-1	3.00-3.45	34.5	1.8	8.2	90	55.7	33.6	22.1	MH
SK-1	4.00-4.50	21.5	1.7	13.9	84.4	51.2	20.7	30.5	CH
SK-1	6.00-6.45	35.6	2.6	10.1	87.3	59.8	34.1	25.7	MH
SK-1	9.00-9.45	8.4	48.2	43.5	8.3	NP	NP	-	GW-GM
SK-1	12.00-12.45	7.6	50.4	39.2	10.4	NP	NP	-	GW-GM
SK-1	15.00-15.45	3.2	51.2	40.6	8.2	NP	NP	-	GW-GM
SK-1	19.50-19.95	5.2	46.5	41.9	11.6	NP	NP	-	GW-GM
SK-2	1.50-1.95	32.6	2.2	8.5	89.3	56.5	31.4	25.1	MH
SK-2	3.00-3.50	23.1	1.4	11.5	87.1	52.3	22.8	29.5	CH
SK-2	4.50-4.95	7.4	48.3	43.5	8.2	NP	NP	-	GW-GM
SK-2	7.50-7.95	11.6	1	89.3	9.7	NP	NP	-	SW-SM
SK-2	10.50-10.95	10.5	1.3	93.3	5.4	NP	NP	-	SW-SM
SK-2	13.50-13.95	9.6	1.7	87.6	10.7	NP	NP	-	SW-SM
SK-2	19.50-19.95	6.2	1.4	88.2	10.4	NP	NP	-	SW-SM

<i>Sondaj No</i>	<i>Derinlik</i>	<i>Birim Hacim Kütle (g/cm³)</i>	<i>Serbest Basınç</i>		<i>Üç Eksenli Kesme</i>		<i>Konsolidasyon</i>	
			<i>qu kg /cm²</i>	<i>C kg /cm²</i>	<i>C</i>	<i>Ø</i>	<i>Şişme Yüzdesi</i>	<i>Şişme Basıncı</i>
SK-1	4.00-4.50	1.86	1.3889	0.6945			-	-
SK-2	3.00-3.50	1.82	-	-	68.51	5	-	-

<i>Sondaj No</i>	<i>Derinlik</i>	<i>Doğal Su İçeriği</i>	<i>LL</i>	<i>PI</i>	<i>Zemin Sıkışabilirliği</i>		<i>Kıvamlılık İndisi</i>	
					<i>Cc</i>	<i>Sınıflama</i>	<i>Ic</i>	<i>Sınıflama</i>
SK-1	1.50-1.95	33.4	56.3	23.8	0.42	Yüksek Sıkışabilirlik	0.96	Sert
SK-1	3.00-3.45	34.5	55.7	22.1	0.41	Yüksek Sıkışabilirlik	0.96	Sert
SK-1	4.00-4.50	21.5	51.2	30.5	0.37	Orta Sıkışabilirlik	0.97	Sert
SK-1	6.00-6.45	35.6	59.8	25.7	0.45	Yüksek Sıkışabilirlik	0.94	Sert
SK-2	1.50-1.95	32.6	56.5	25.1	0.42	Yüksek Sıkışabilirlik	0.95	Sert
SK-2	3.00-3.50	23.1	52.3	29.5	0.38	Orta Sıkışabilirlik	0.99	Sert

- ✓ Sondaj verileri incelendiğinde, saha zemin profilinin üst kesimlerinde ($\approx 1.50\text{--}6.50$ m) yüksek oranda ince taneli (silt-kil) birimlerin hâkim olduğu, daha derin seviyelerde ise granüler (kum-çakıl) zeminlere geçiş yaptığı belirlenmiştir.
- ✓ Üst seviyelerde yer alan zeminler, yüksek likit limit ve plastisite indeksi değerlerine bağlı olarak orta-yüksek plastisiteli silt (MH) ve kil (CH) karakterinde olup, bu birimlerin konsolidasyon ve oturma potansiyelinin yüksek olduğu değerlendirilmektedir.
- ✓ İnce taneli birimlerde ölçülen doğal su içeriklerinin yüksek olması, zeminlerin yumuşak-orta kıvamlı davranış gösterebileceğine ve kazı aşamasında stabilite problemleri oluşabileceğine işaret etmektedir.
- ✓ 9.00 m derinlikten itibaren zemin profilinde belirgin şekilde granüler bir yapı gözlenmiş olup, bu seviyelerde zeminler GW-GM ve SW-SM sınıfında tanımlanmıştır.
- ✓ Derin seviyelerde plastisite özelliğinin kaybolduğu (NP) ve zemin davranışının tamamen granüler karaktere geçtiği anlaşılmaktadır.

5 DEPREMSELLİK

Proje sahasında yapılan jeolojik değerlendirmeler neticesinde, yerel zemin sınıfının ZD-ZE olarak değerlendirilmesi uygun görülmektedir.

Tablo 9 Yerel Zemin Sınıfları (TBDY, 2018)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe /30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

ZE zemin sınıfı için AFAD deprem tehlike haritasından aşağıdaki veriler elde edilmektedir.;

- Deprem yer hareketi düzeyi: DD2
- Yerel zemin sınıfı: ZE
- Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı S_s : 0.681
- 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı S_1 : 0.182
- En büyük yer ivmesi (g) PGA: 0.289
- En büyük yer hızı (cm/sn) PGV: 17.449
- Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı S_{Ds} : 0.960

6 GEOTEKNİK DEĞERLENDİRMELER

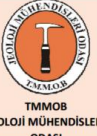
6.1 Sıvılaşma Değerlendirmesi

“Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar” sıvılaşma değerlendirme için aşağıda yer alan önerileri paylaşmaktadır.

- **16.6.1 – Bölüm 3’e göre Deprem Tasarım Sınıfı DTS=1, DTS=1a, DTS=2 ve DTS=2a olan binalar için Tablo 16.1’de ZD, ZE veya ZF grubuna giren, sürekli bir tabaka veya kalın mercerler halinde bulunan ve 16.6.6’da tanımlanan durumlar dışındaki kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyeli’nin bulunup bulunmadığının, arazi ve laboratuvar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi ve analiz sonuçlarının ayrıntılı olarak rapor edilmesi zorunludur.**
- **16.6.2 – Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesinin altında yer alan ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan kohezyonsuz ya da düşük kohezyonlu ($PI < 12$) zeminlerin deprem sarsıntısı altında, boşluk suyu basıncındaki artışa paralel kayma mukavemeti ve rijitliğindeki önemli oranda azalış olarak tanımlanacaktır.**
- **16.6.3 – Zemin sıvılaşmasının değerlendirilmesine yönelik olarak yapılacak zemin araştırma çalışmaları en az, standart penetrasyon deneyi, (SPT) ve/veya koni penetrasyon deneyinin (CPT)’nin yapımına ek olarak, ilgili zemin tabakalarındaki dane çapı dağılımı, su muhtevası ve Atterberg limit değerlerinin belirlenmesini içerecektir.**
- **16.6.4 – Potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı su tablasının altında yer alan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olarak tanımlanacaktır.**
- **16.6.5 – Temel altı zeminlerinin potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminlerden oluştuğu ve bu zemin tabakalarında düzeltilmiş SPT vuruş sayısının, N1,60, 30 darbe / 30 cm değerinden küçük olduğu durumlarda zemin sıvılaşması tetiklenme değerlendirme yapılacaktır.**
- **16.6.7 – Zemin sıvılaşması değerlendirmesinde sıvılaşma tetiklenmesi riski yanında, sıvılaşma sonrası zemin mukavemeti ve rijitlik kaybı ile temel zemininde oluşabilecek yerdeğiştirmelerin dikkate alınması gereklidir.**
- **16.6.10 – Belirlenen sıvılaşma sonrası yerdeğiştirmelerin üstyapı/altyapı davranışına etkileri değerlendirilerek ihtiyaç duyulması halinde üstyapı ve/veya zemin iyileştirmeleri uygulanacaktır.**

Yapılan değerlendirmeler ve analizler sonucunda, yapı temeli altında yer alan 3.0 - 7.0 metre derinlikleri arasında zemin birimlerinin sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Bu birimlerin, özellikle deprem etkisi altında efektif gerilme kaybına uğrayarak taşıma gücünde azalma ve aşırı oturma riskleri oluşturabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle, sıvılaşma etkilerinin dikkate alınması, gerekli iyileştirme önlemlerinin değerlendirilmesi ve temel sisteminin bu olumsuzlukları minimize edecek şekilde tasarlanması önerilmektedir.

Tablo 10 Sıvılaşma Hesap Tablosu (Ref: Jeolojik Etüt Raporu; Jeoloji Mühendisleri Odası Sıvılaşma Potansiyeli Analiz Tablosu)

TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ İLE UYUMLU BASİTLEŞTİRİLMİŞ ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİ ANALİZİ																																		
 TMMOB JEOLOJİ MÜHENDİSLERİ ODASI				PROJE ADI:		TÜRASAŞ MİSAFİRHANESİ																												
				Ada No:		25431		Koordinatlar:		X		Y		Datum:		Kot:																		
				Parsel No:		1		286330.00		4405856.00		WGS 84		799.00m																				
				Sondaj Kuyu No:		SK-2		Yeraltı Su Seviyesi:		4.20m		Zemin Sınıfı:		ZE																				
				Deprem Hesabı Verileri:		M _w :		6.50		DTS:		DTS - 1		S _{ds} :		0.960																		
				SPT Verileri:		Numune Alıcı Tipi		Sondaj Delgi Çapı		Tokmak Tipi		Enerji Oranı (%)																						
				İç tüpü olmayan		Çap 65mm-115mm arasında		Otomatik darbeli tokmak				45																						
Deneylerden Alınan Veriler				SPT Verilerinin Düzeltilmesi (168.2)												Sıvılaşma Direnci Hesabı				Deprem Kayma Gerilmesi		Sıvılaşma Güvenlik Koşulu		Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi										
																								Sönmez ve Gökçeoğlu [2005]							İwasaki vd. [1982]			

6.2 Oturma Değerlendirmesi

İnceleme alanında yüzeyden itibaren yer yer düşük–orta plastisiteli killi silt ve siltli kil birimlerinin bulunduğu, daha derinde ise kumlu çakıl ve siltli kum seviyelerine geçildiği anlaşılmaktadır. Yeraltı su seviyesinin yaklaşık -4.50 m kotlarında gözlenmiş olması ve yapının uzun yıllardır hizmet veriyor olması birlikte değerlendirildiğinde, bina temel yükleri altında oluşabilecek primer konsolidasyon oturmalarının büyük ölçüde geçmişte tamamlandığı düşünülmektedir.

Özellikle ince daneli killi seviyelerde meydana gelen zamana bağlı konsolidasyon oturmalarının önemli kısmının yapının ilk hizmet yıllarında gerçekleşmiş olması beklenmektedir. Uzun yıllardır servis veren yapılarda mevcut gerilme rejiminin zeminde yeniden dengelenmiş olması nedeniyle, günümüzde gözlenebilecek ilave oturmaların çoğunlukla sekonder sıkışma karakterinde ve düşük mertebelerde gelişeceği öngörülmektedir.

Bununla birlikte, kesitte yanal yönde litolojik değişimlerin bulunması, özellikle kumlu çakıl ile ince daneli birimler arasındaki geçiş zonlarında farklı deformasyon davranışlarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, geçmişte yapıda diferansiyel oturmaların gelişmiş olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak yapının uzun süreli performansı dikkate alındığında, zeminin büyük ölçüde konsolide olduğu ve mevcut koşullarda ani veya yüksek mertebeli yeni oturma potansiyelinin sınırlı olduğu değerlendirilmektedir.

İlerleyen süreçte meydana gelebilecek oturmaların ise daha çok yeraltı su seviyesi değişimleri, ilave yüklemeler, yakın çevrede gerçekleştirilebilecek derin kazılar, titreşim etkileri ve depreme bağlı sıvılaşma oturması gibi dış etkenlere bağlı olarak gelişebileceği düşünülmektedir.

6.3 Mevcut Gerilmeler / Gerilme Değişimleri

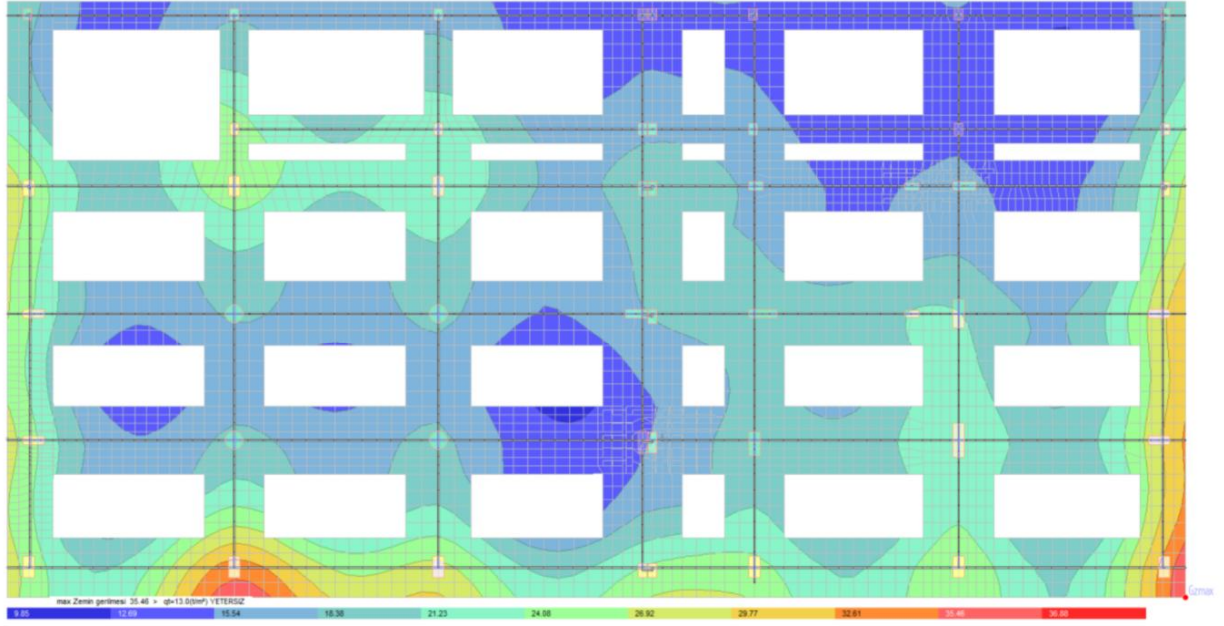
Mevcut yapının ve güçlendirme sonrası oluşacak yükleme koşullarının, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) kapsamında tanımlanan yük ve deprem kombinasyonlarına göre gerçekleştirilen analizleri sonucunda elde edilen temel gerilmesi dağılımları ile gerilme değişimleri aşağıdaki grafik ve tablolarda sunulmaktadır. Yapılan değerlendirmelerde, mevcut durum ile restorasyon sonrası durum karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Tablo 11).

Tablo 11 Gerilme Değişimleri Özet Tablosu

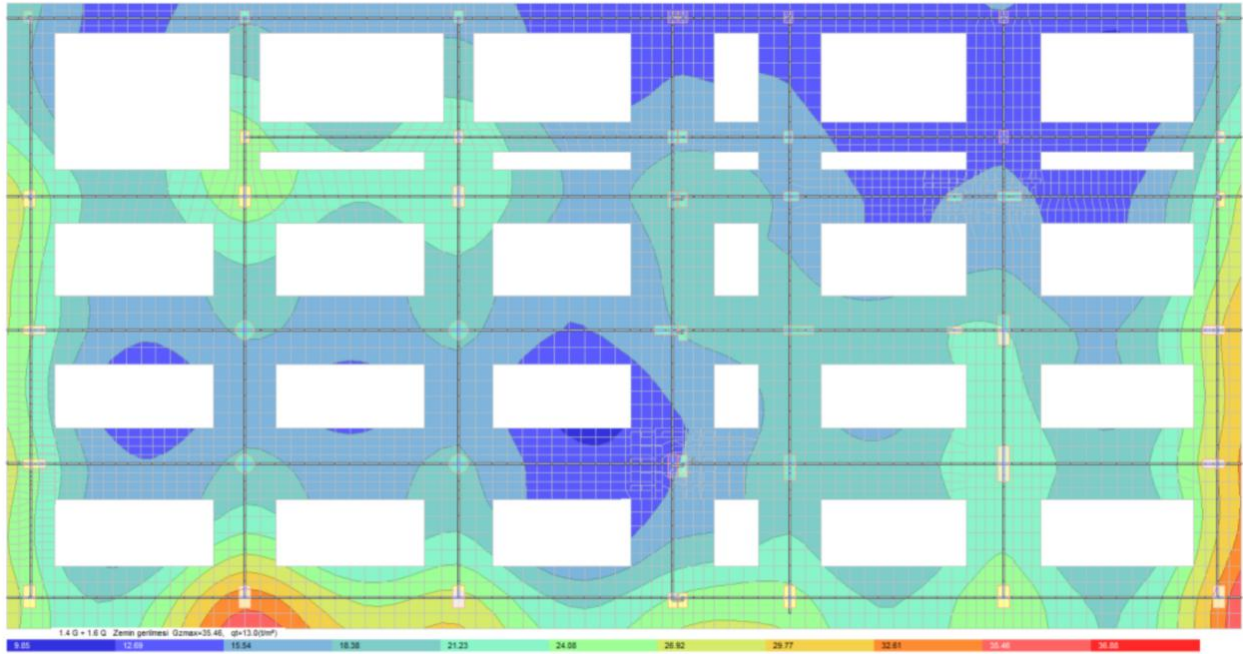
	GERİLME KOMBİNASYONLARI		
	1.4 G + 1.6 Q (t/m ²)	G + Q (t/m ²)	G + Q + E (t/m ²)
Mevcut Üstyapı Gerilmesi	35.46	24.51	28.47
Güçlendirme Sonrası Üstyapıdan Gelen Gerilme	25.84	17.76	19.19

Yapı için gerçekleştirilen analizler sonucunda, güçlendirme sonrası tüm yük kombinasyonlarında temel gerilmelerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. En yüksek gerilme değeri 1.4G + 1.6Q kombinasyonunda mevcut durumda 35.46 t/m² iken güçlendirme sonrası 25.84 t/m²'ye düşmüştür. Benzer şekilde diğer yük kombinasyonlarında da gerilme seviyelerinde azalma sağlanmış olup, güçlendirme uygulamalarının temel davranışına olumlu katkı sunduğu değerlendirilmiştir.

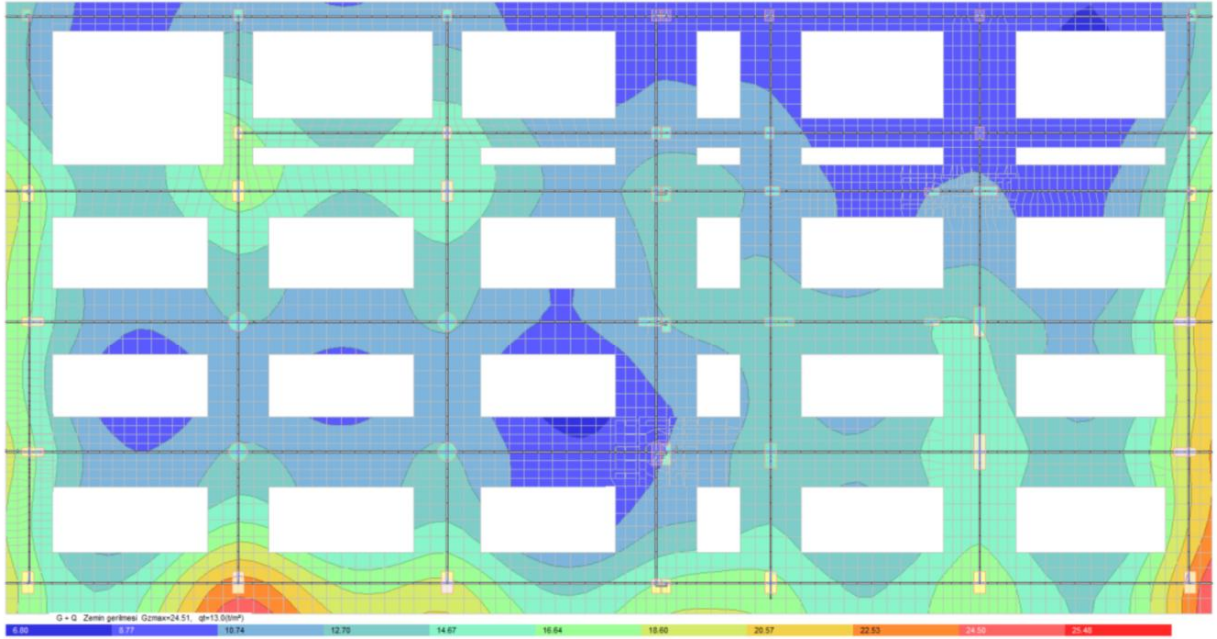
Mevcut Gerilme Diyagramları



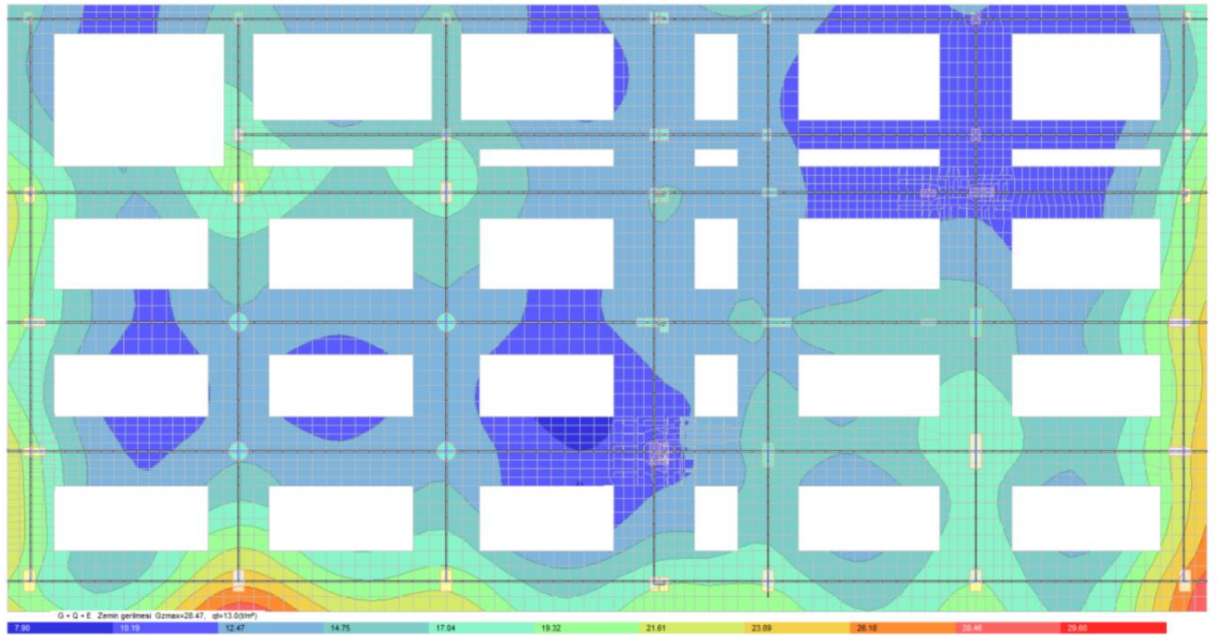
MAX ZEMİN GERİLMESİ 35.46 t/m²



1.4G+1.6Q ZEMİN GERİLMESİ 35.46 t/m²



G+Q ZEMİN GERİLMESİ 24.51 t/m²



G+Q+E ZEMİN GERİLMESİ 28.47 t/m²

TOPLAM $\Sigma N_g = 3958.96$ $\Sigma N_q = 1462.89$ $\Sigma N_{qf} = 1462.89$

Temellerin kayma kontrolü **TBDY2018-16.8.4 (t,m)**

$\Phi = 30.0^\circ$ $\theta = 0, \beta = 0, \varphi = 90^\circ$ $K_p = \frac{\sin^2(90+\Phi)}{(1-\sin\Phi)^2} = 3.0$

Kat	H _i	L _x	L _y	R _{pkX} = H _i · K _{pd} · L _y	R _{pkY} = H _i · K _{pd} · L _x
TEMEL	0.50	256.65	146.23	219.34	384.97

$R_{pX} = 219.34/1.4 = 219.34$, $R_{pY} = 384.97/1.4 = 384.97$
 $W_g = 3958.96(\text{Yapi}) + 1758.96(\text{Temel}) = 5717.92$
 $W_q = 5717.92$, $W_q = 1462.89$
 $W_{gq} = W_g + C_q \cdot W_q = 7180.82$

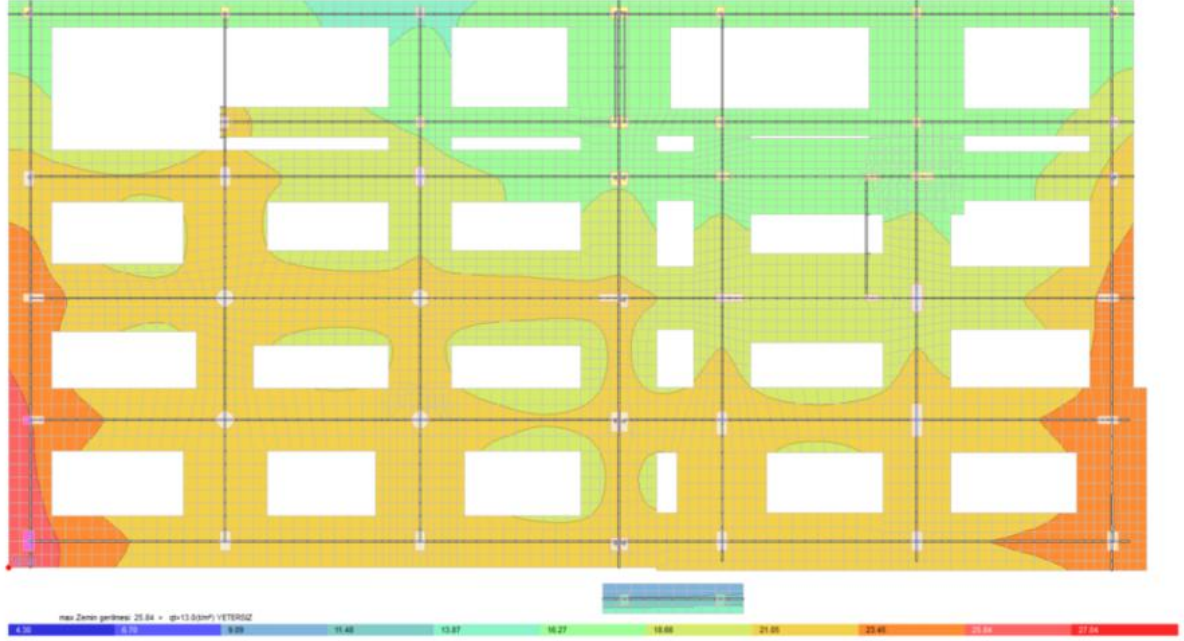
$V_{beX} = 796.82$, $V_{beY} = 796.82$ deprem , $V_{bsX} = 0.0$, $V_{bsY} = 0.0$ zemin

$V_{eX} = 796.82 < W_{ge} \cdot \tan\delta + 0.3 \cdot R_{ptX} = 7180.82 \cdot 0.5 + 0.3 \cdot 219.34 = 3656.21$ ✓

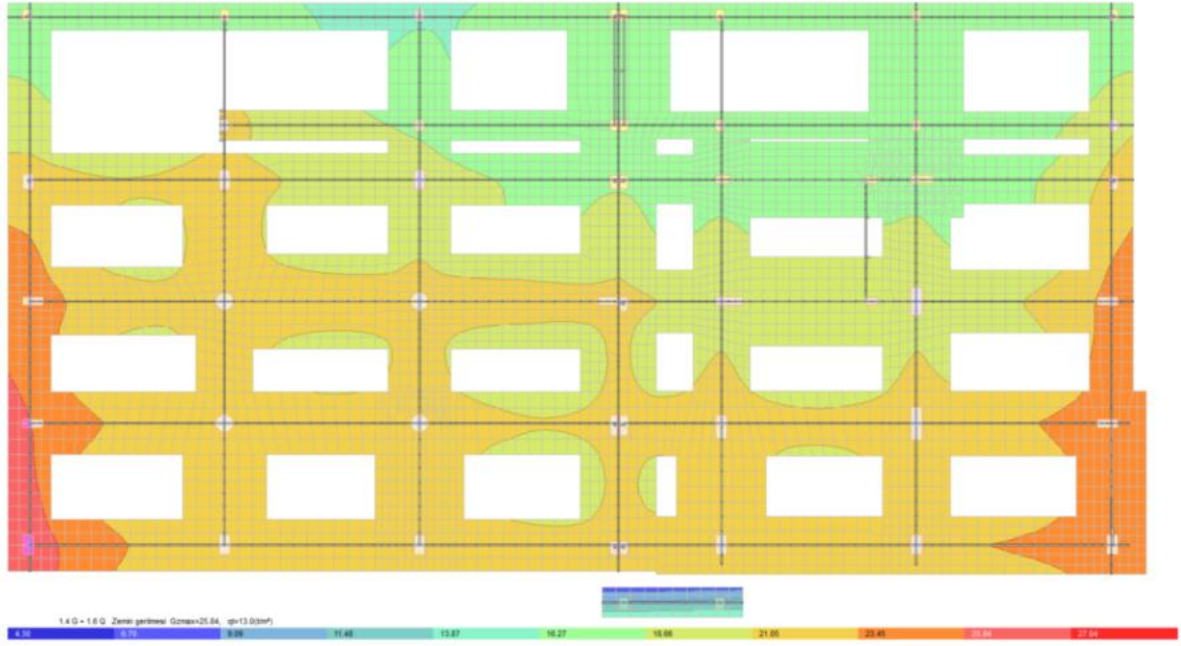
$V_{eY} = 796.82 < W_{ge} \cdot \tan\delta + 0.3 \cdot R_{ptY} = 7180.82 \cdot 0.5 + 0.3 \cdot 384.97 = 3705.9$ ✓

Temellerin kayma kontrolü yeterlidir

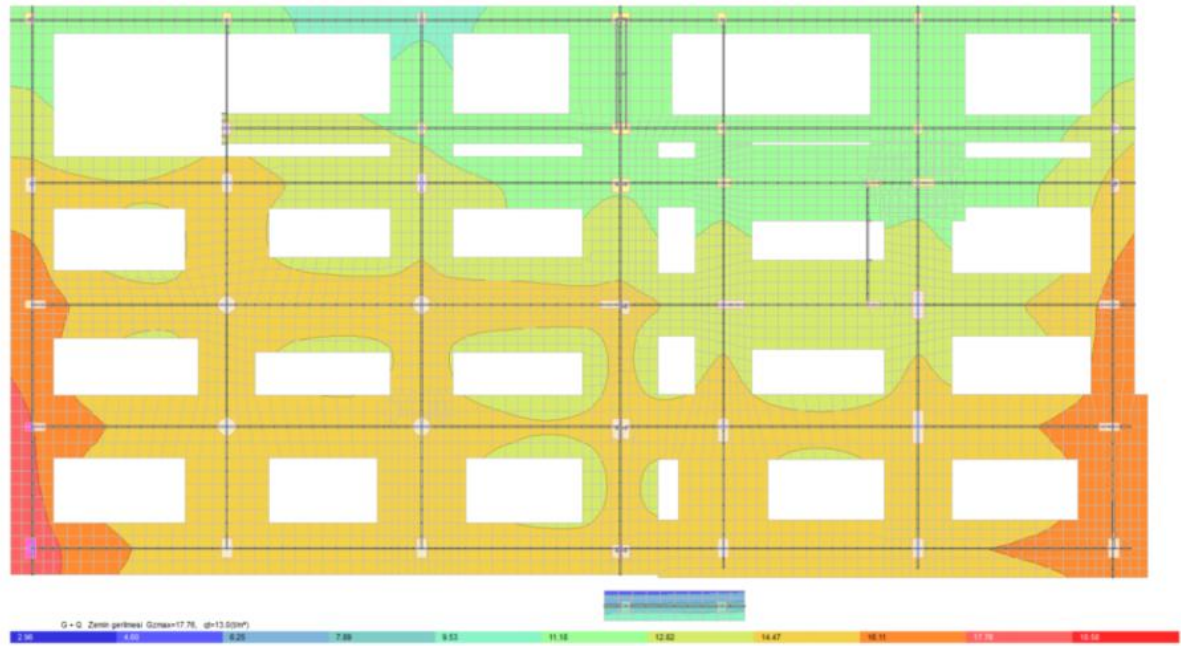
Güçlendirme Sonrası Gerilme Diyagramları



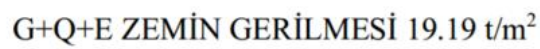
MAX ZEMİN GERİLMESİ 25.84 t/m²



1.4G+1.6Q ZEMİN GERİLMESİ 25.84 t/m²



G+Q ZEMİN GERİLMESİ 17.76 t/m²



$$\text{VeX}=1097.35 < \text{Wge} \cdot \tan\delta + 0.3 \cdot \text{RptX} = 10011.09 \cdot 0.5 + 0.3 \cdot 728.62 = 5224.13 \quad \checkmark$$

$$\text{VeY}=1097.35 < \text{Wge} \cdot \tan\delta + 0.3 \cdot \text{RptY} = 10011.09 \cdot 0.5 + 0.3 \cdot 1289.63 = 5392.44 \quad \checkmark$$
 Temellerin kayma kontrolü yeterlidir

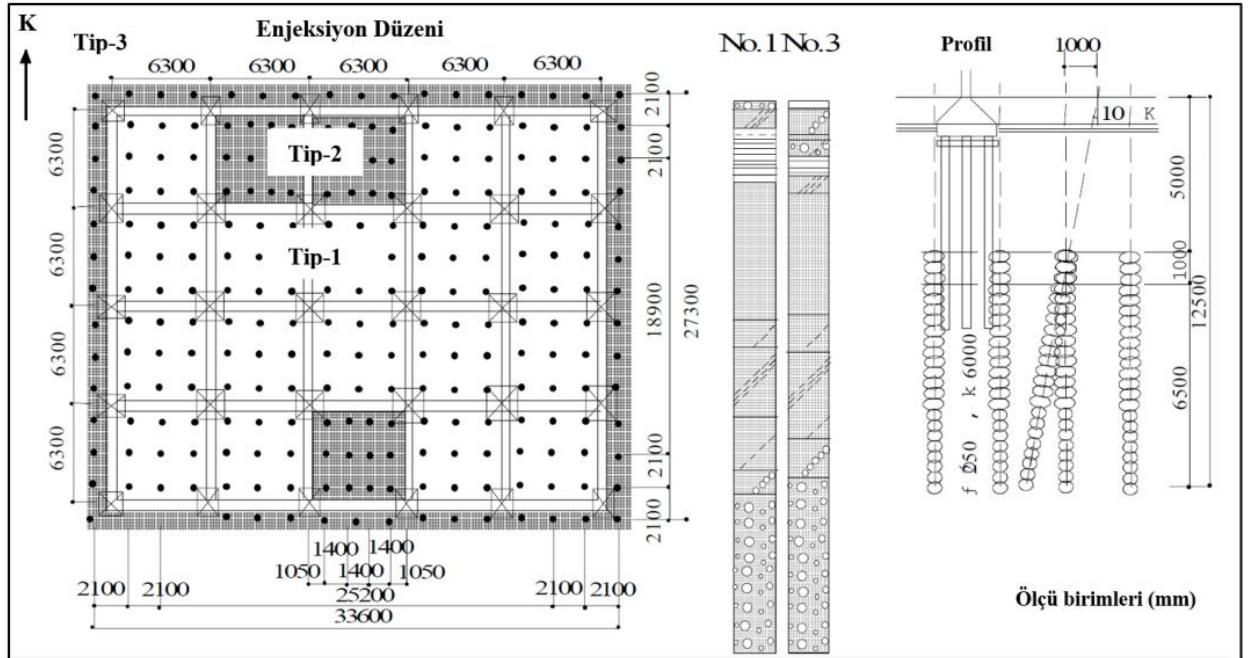
7 ZEMİN İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ

7.1 Benzer Vakalar ve Uygulanan Yöntemler

Nagoya, Japonya Fabrika Binası Sıvılaşma Problemi

SPT sonuçlarına göre, temel altından itibaren 12,00–13,00 m derinliklere kadar N değerleri 15'in altında bulunmuştur. Yapılan sıvılaşma analizleri, temel altından itibaren 5,00–12,50 m derinlik aralığının sıvılaşabilir zemin tabakası olduğunu ortaya koymuştur. Operasyonel kısıtlar çerçevesinde, söz konusu yapı için en uygun iyileştirme yöntemi olarak kompaksiyon enjeksiyonu belirlenmiştir.

Uygulama tamamlandıktan sonra, sahada gerçekleştirilen kontrol amaçlı SPT deneyleri sonucunda hedeflenen SPT-N değerlerinin aşıldığı belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, yapılan değerlendirmelerde sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının (FS) 1,0 değerinin üzerine çıktığı tespit edilmiştir.

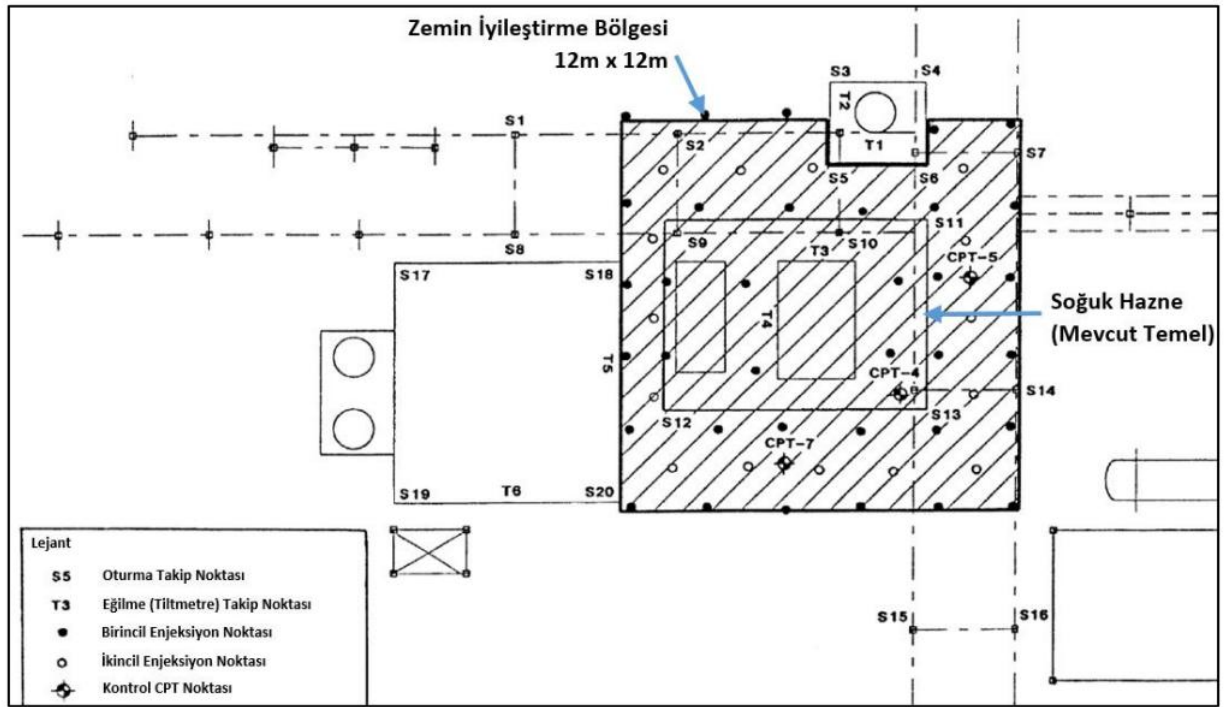


Şekil 20 İyileştirme Yerleşim Planı (Vaka-1)

Delta, Kanada Doğalgaz Tesisi Sıvılaşma Problemi

Gerçekleştirilen jeoteknik mühendislik analizleri sonucunda, yapı temeli altında bulunan zeminlerin yaklaşık 22,0 m derinliğe kadar sıvılaşma riski taşıdığı belirlenmiştir. Soğuk hazne çevresinde bulunan boru hatları ve yapısal elemanlar nedeniyle çalışma alanında yalnızca 2,00 m yatay boşluk mevcut olup, bu durum ekipman kullanımını önemli ölçüde kısıtlamaktadır. Ayrıca, zemin iyileştirme alanı oturmaya ve titreşime duyarlı yapılara çok yakın konumda bulunmaktadır. Bu teknik kısıtlar dikkate alındığında, en uygun iyileştirme yöntemi olarak kompaksiyon enjeksiyonu tercih edilmiştir.

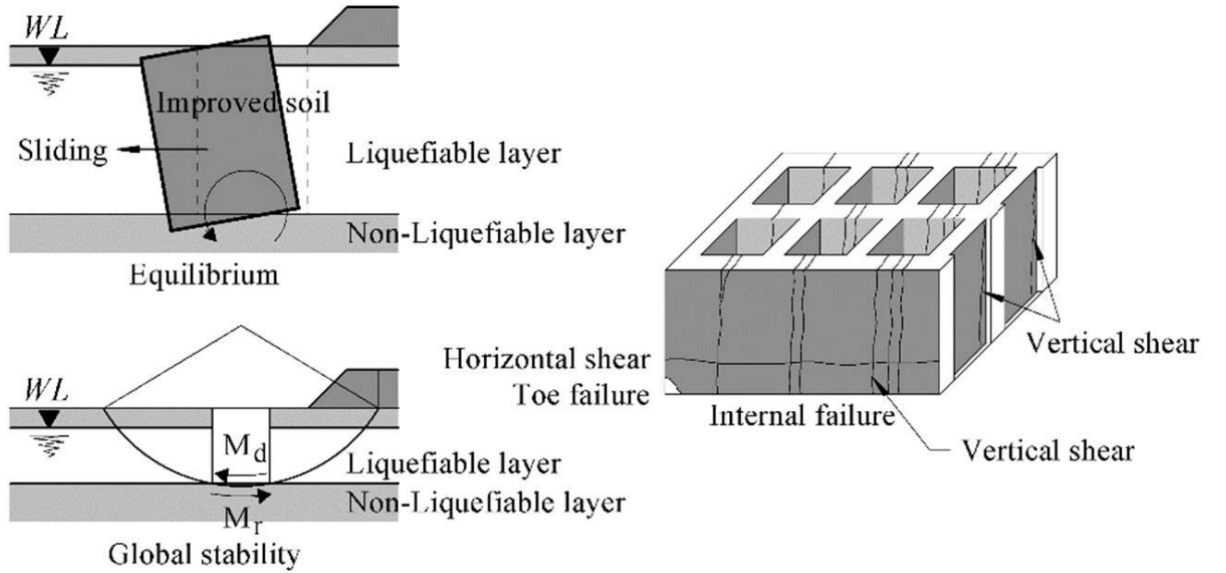
Uygulama öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilen CPT (Koni Penetrasyon Testi) sonuçları karşılaştırılmıştır. Değerlendirme neticesinde, hedeflenen alanda koni ucu taşıma direncinde (q_c) iyileşme sağlandığı görülmüştür.



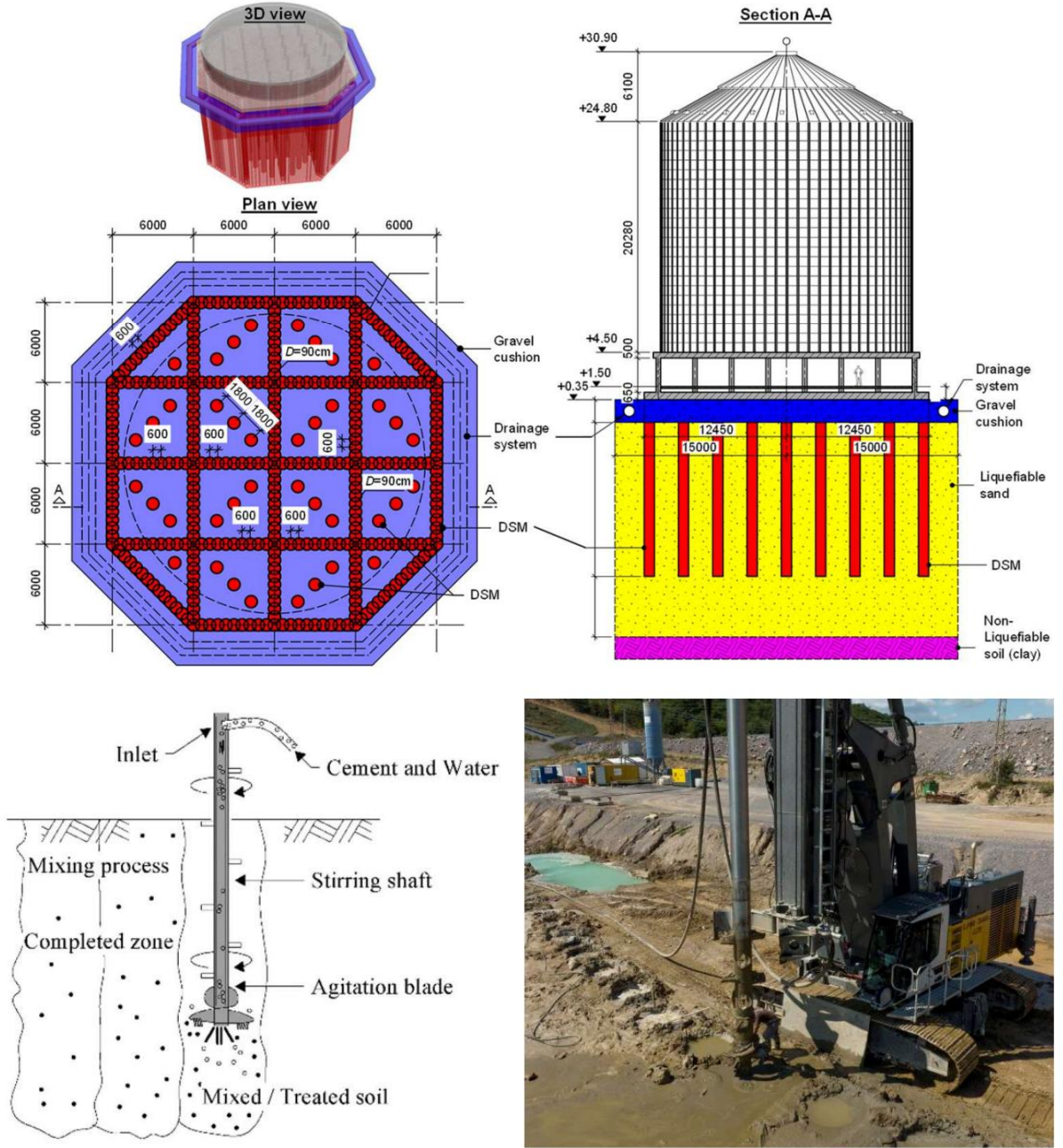
Şekil 21 İyileştirme Yerleşim Planı (Vaka-2)

Bulgaristan – Varna Silo Temeli Sıvılaşma Problemi

Milev (2024) tarafından sunulan çalışmada, Bulgaristan'ın Varna Limanı bölgesinde planlanan silo temelleri altında sıvılaşma riskinin azaltılması amacıyla Derin Zemin Karıştırma (DSM) yöntemi değerlendirilmiştir. Saha araştırmalarında yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu, yaklaşık 20 m kalınlığındaki gevşek ve doygun kum tabakasının deprem sırasında sıvılaşmaya yatkın olduğu belirlenmiştir. Ön değerlendirmelerde büyük bir deprem sırasında 20–30 cm mertebesinde oturma oluşabileceği öngörülmüştür. Çalışmada, hem sıvılaşma kaynaklı oturmaların azaltılması hem de kazı sırasında karşılaşılabilecek doygun dolgu tabakasının kontrol altına alınması amacıyla, 900 mm çaplı örtüşen DSM kolonlarından oluşan 6 m × 6 m boyutlarında hücresel bir DSM sistemi önerilmiştir. Önerilen çözüm, iyileştirme derinliğini sıvılaşmayan tabakaya kadar indirmemekle birlikte, performans esaslı bir yaklaşımla kabul edilebilir oturma seviyelerinin sağlanmasını hedeflemektedir.



Şekil 22 Kesişen DSM Perde Tasarım Hususları (Milev, 2024)



Şekil 23 Kesişen DSM Perde Uygulaması (Milev, 2024)

Proje sahasında görülen sıvılaşma riskine karşı deprem yönetmeliği aşağıdaki metin ile iyileştirme yöntemlerini önermektedir. TBDY Madde 16D.2;

“Yumuşak-katı kohezyonlu (ince daneli) zeminlerde, zeminin su muhtevasını azaltıcı, konsolidasyon basıncını arttırıcı ve iç yapısını kuvvetlendirici yöntemler ile etkili iyileştirme sağlanabilir. Bu kapsamda, drenaj, yeraltı suyu düzeyini düşürme, konsolidasyon yöntemleri (önyüklem, elektro ozmotik, vakum etkisinde) kullanılabilir. Ayrıca, çimento, kireç gibi bağlayıcı katkı malzemeleri karıştırarak katılaştırma (derin karıştırma) ve enjeksiyon yöntemleri kullanılabilir. Suya doymun olmayan ve plastisitesi yüksek olmayan kohezyonlu zeminlerde, derin kompaksiyon (sıkıştırma) yönteminden de yararlanılabilir.”

Yapılan geoteknik değerlendirmeler sonucunda mevcut yapı temel sistemi açısından taşıma gücü ve toplam/diferansiyel oturma yönünden herhangi bir yetersizlik öngörülmemiştir. Ancak proje sahasında deprem etkisi altında sıvılaşma potansiyeli bulunan zemin tabakalarının tespit edilmesi nedeniyle, yapının deprem performansının artırılması amacıyla zemin iyileştirme uygulaması önerilmiştir. Zemin iyileştirme uygulaması iki temel bölgeden oluşacak şekilde planlanmaktadır:

Birinci kısım (1. Etap) bina çevresi zemin iyileştirmesi olup, yapının dışındaki etki bölgesini kapsamaktadır. Bu bölgede yapılan iyileştirme ile deprem ve dış yükler etkisinde oluşabilecek yanıl deformasyonların sınırlandırılması, yeraltı suyu ve buna bağli olarak boşluk suyu basıncı artışının kontrol edilmesi ve zemin sürekliliğinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

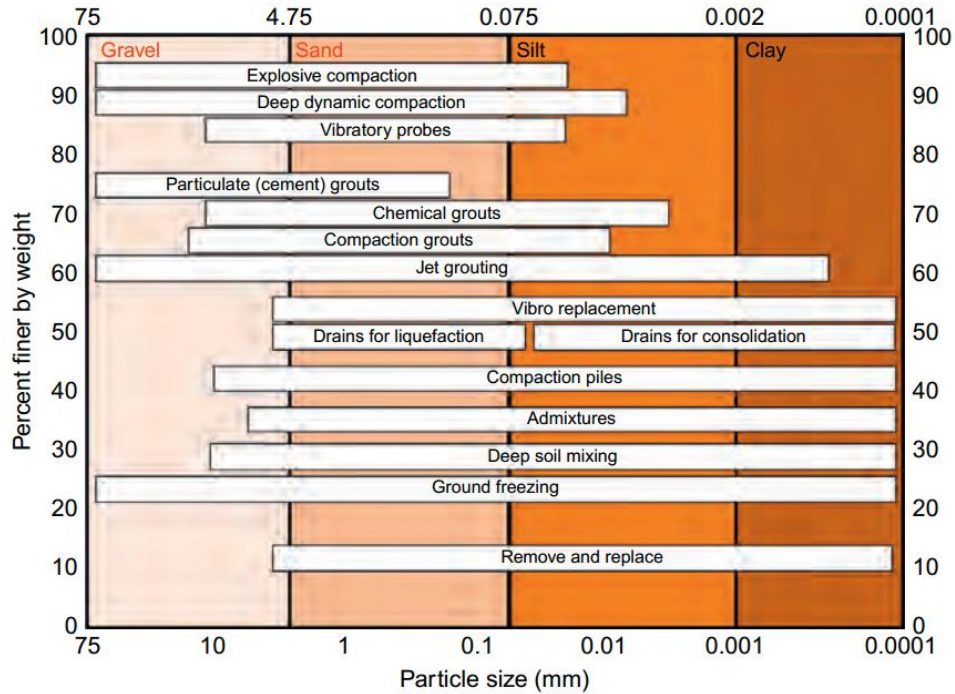
İkinci kısım (2. Etap) ise bina altı zemin iyileştirmesidir. Bu uygulama doğrudan yapı temelının altında gerçekleştirilerek taşıma gücünün artırılması, oturma miktarlarının azaltılması ve özellikle deprem anında yeraltı suyunun dış etki bölgesinin altından bina temeline doğru basınçlı olarak yükselmesi (uplift pressure) ve buna mukabil boşluk suyu basıncının artarak sıvılaşma durumunun ortaya çıkması gibi potansiyel geoteknik risklerin ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır. Bu iki bölge birlikte

değerlendirildiğinde, hem yapının altındaki hem de çevresindeki zeminin iyileştirilmesiyle sistem bütüncül olarak güvenli hale getirmesi hedeflenmektedir.

7.2 Bina Çevresinin İyileştirilmesi (1. Etap)

Mevcut yapı çevresinde sıvılaşma riskini azaltmak, zeminin kayma dayanımını artırmak ve deprem sırasında oluşabilecek aşırı deformasyonları sınırlandırmak amacıyla birbirleriyle kesişimli (secant) DSM (Deep Soil Mixing) kolonları imal edilecektir. Planlanan DSM sistemi ile zemin rijitliğinin artırılması, boşluk suyu basıncı gelişiminin kontrol altına alınması ve sıvılaşmaya karşı iyileştirilmiş bir zemin ortamı oluşturulması hedeflenmektedir.

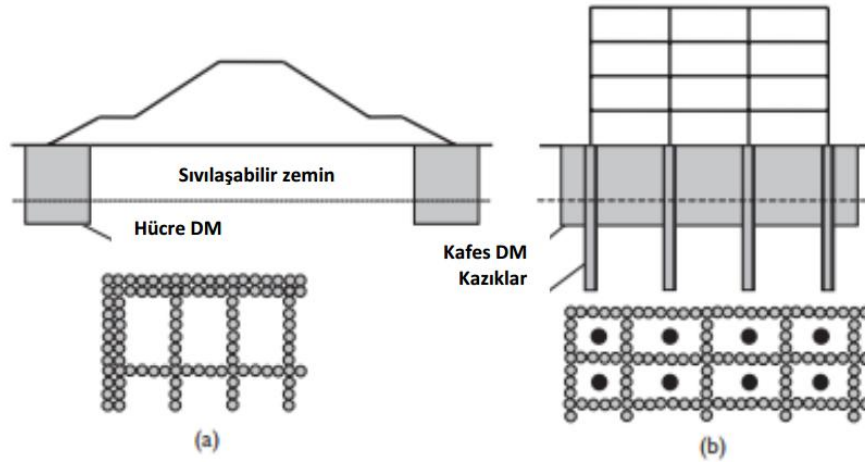
Literatür çalışmaları dikkate alındığında, derin zemin karıştırma (DSM) yönteminin mevcut jeolojik yapıya uygun bir zemin iyileştirme yöntemi olduğu değerlendirilmektedir.



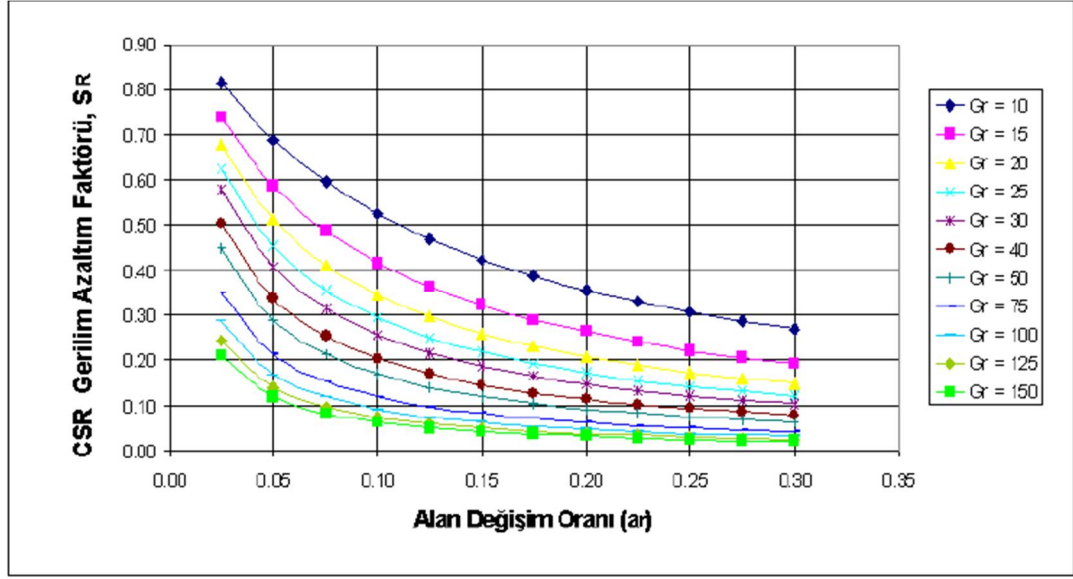
Şekil 24 Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Önerilen Uygulama Gradasyonları

Bina çevresi zemin iyileştirmesinde (Kafes sistemi) sıvılaşmaya karşı iyileşme aşağıdaki nedenlerle oluşmaktadır:

- Hücre içerisindeki zeminde depremin oluşturacağı kayma birim deformasyonları ve dolayısıyla sıvılaşmanın esas nedeni olan yeraltı suyunun yükselmesi ve buna mukabil boşluk suyu basıncındaki yükselmeler sınırlanmaktadır.
- Kafes içerisinde hapsolmuş zemin ve panellerden oluşan kompozit malzemenin dayanımı artmakta ve sıkışabilirliği azalmaktadır.
- Sıvılaşma sonrası oluşacak potansiyel oturmalar önemli ölçüde azalmaktadır.
- Kafes çevresindeki orijinal zeminde gelişen aşırı boşluk suyu basınçlarının yapı bölgesine nüfuz etmesi önlenmektedir.



Şekil 25 Sıvılaşmaya Karşı Önlemler: (A) Nehir Mecrasında Taşkın Seddesi, (B) Bina Temellerinin Stabilizasyonu (Boulanger vd. 2021)



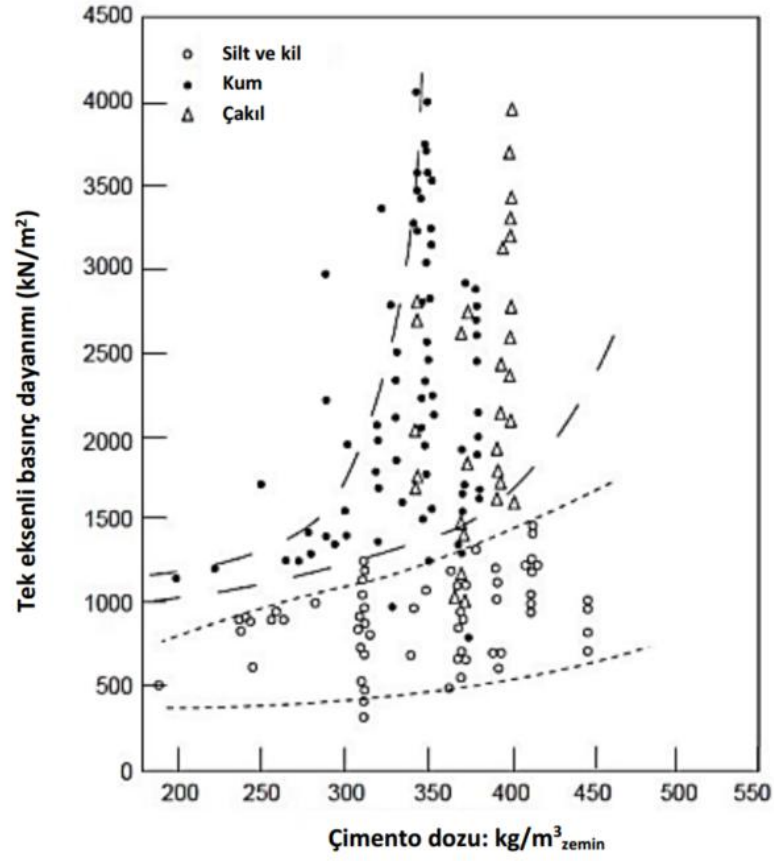
Şekil 26 Azaltım Faktörü – Alan Oranı – Rijitlik Oranı İlişkisi (Özsoy vd. 2003)

DSM perdenin sıvılaşmaya karşı dayanımı için SK-1 ve SK-2 sondajlarından elde edilen en olumsuz parametreler ile kontrol sağlanmıştır.

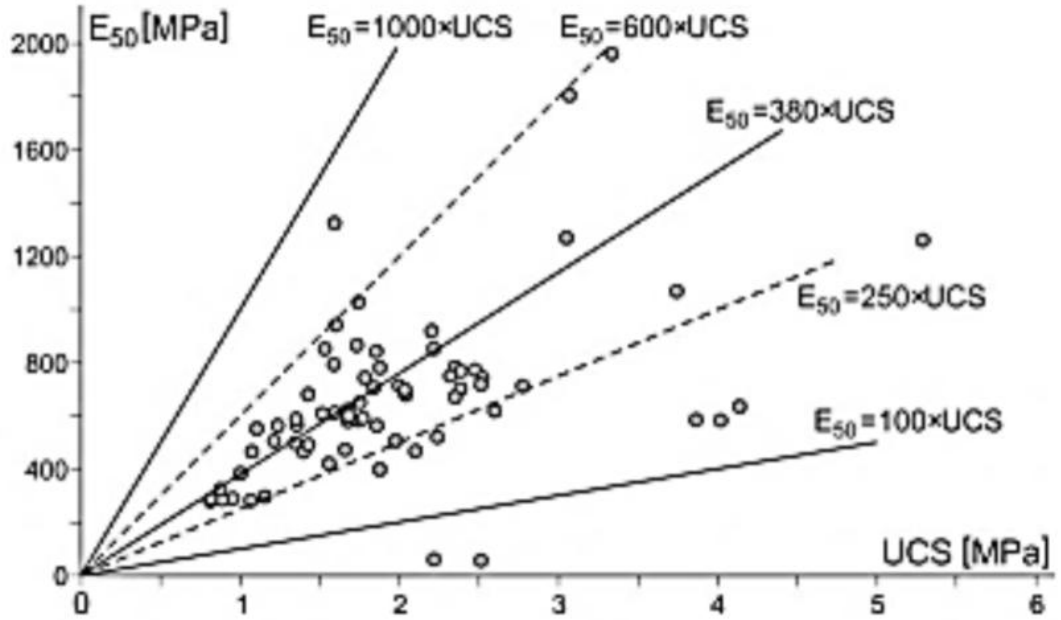
* Hesaplamalarda DSM kolonları için en düşük 4.0 MPa dayanım elde edilmesi hedeflenmektedir.

Tablo 12 Farklı Zeminlerde Çimento Oranına Bağlı UCS Değerleri (Topolnicki, 2004)

Zemin Türü	Çimento Miktarı Kg/m ³	28 Günlük UCS değeri (MPa)
Bataklık	250 – 400	0.1 – 0.4
Turba, Organik kil/silt	150 – 350	0.2 – 1.2
Yumuşak killer	150 – 300	0.5 – 1.7
Orta sert killer	120 – 300	0.7 – 2.5
Silt ve siltli kumlar	120 – 300	1.0 – 3.0
İnce-orta daneli kumlar	120 – 300	1.5 – 5.0
İri kum ve çakıllar	120 – 250	3.0 – 7.0



Şekil 27 Farklı Zemin Türleri İçin Rapor Edilen UCS Değerleri (Taki ve Yang, 1991)



Şekil 28 Saha Koşulları Elde Edilen E_{50} – q_u Korelasyonları (Topolnicki, 2016)

KAYMA MODÜLÜ REFERANS TABLOSU

Parametre / Zemin Türü	Tipik Aralık	Referans
G _{dsm} (DSM Kayma Modülü)	50-500 × q _u	Bruce et al. (2013), FHWA-HRT-13-046 Ch.5
G _{dsm} = 100-300 × q _u	75,000-450,000 kPa	Terashi (1977), Porbaha et al. (2000)
G _{soil,static} - Gevşek Kum	10,000-40,000 kPa	Seed & Idriss (1970), V _s ölçümü
G _{soil,static} - Orta Sıkı Kum	25,000-80,000 kPa	Hardin & Drnevich (1972)
G _{soil,static} - Sıkı Kum	60,000-180,000 kPa	Kokusho (1980), EPRI (1993)
G _{soil,static} - Yumuşak Kil	5,000-25,000 kPa	Vucetic & Dobry (1991)
G _{soil,static} - Katı Kil	25,000-100,000 kPa	Seed et al. (1986)
G _{soil,liq} (Sıvılaşmış Zemin)	500-5,000 kPa	Yoshida et al. (2001), Dashti et al. (2010)
G _{liq} /G _{max} ≈ 0.01-0.05	(Çok düşük rijitlik)	Idriss & Boulanger (2008)
G = ρ × V _s ²	V _s sahadan ölçülür	TBDY-2018 Bölüm 16A, ASTM D7400
G _{max} (küçük şekil değ.)	V _s ² ×ρ veya lab.	Kramer (1996), FHWA-HRT-13-046 Table 5-1

DSM KESİŞEN DUVAR GEOMETRİSİ

Parametre	Değer	Birim
Kolon Çapı (D)	0.80	m
Merkezler Arası Mesafe (s)	0.60	m
Kesişim (Overlap) Mesafesi (a)	0.20	m
Duvar Uzunluğu (L _{wall})	50.00	m
Duvar Derinliği (H)	8.00	m
Bir Paneldeki Kolon Sayısı (n _{col})	84.00	adet

MALZEME ÖZELLİKLERİ		
Parametre	Değer	Birim
DSM Serbest Basınç Dayanımı (q_u)	4000.0	kPa
Kür katsayısı (f_c)	0.8	-
Varyasyon katsayısı (f_v)	0.8	-
DSM Kesme Dayanımı ($c_u = q_u/2$) katsayılı	1280.0	kPa
DSM Kayma Modülü (G_{dsm})	360000.0	kPa
Zemin Kayma Modülü - Sıvılaşmış ($G_{soil,liq}$)	5000.0	kPa
Zemin Kayma Modülü - Statik ($G_{soil,static}$)	43000.0	kPa
Zemin Birim Hacim Ağırlığı (γ)	19.0	kN/m ³
Su Seviyesi (GWL)	0.0	m

SİSMİK YÜKLEME PARAMETRELERİ		
Parametre	Değer	Birim
Maksimum Yer İvmesi (PGA)	0.38	g
Derinlik Azaltma Faktörü (r_d)	0.97	-
Toplam Düşey Gerilme σ_v (orta derinlik)	76.00	kPa
CSR (Cyclic Stress Ratio)	0.50	-
Toplam Kesme Kuvveti (V_{total})	919.5	kN/m
TBDY-2018 Denk.16A.2: $z \leq 9.15m \rightarrow r_d = 1 - 0.00765z$ $9.15 < z \leq 23m \rightarrow r_d = 1.174 - 0.0267z$		

KESİŞEN DAİRESEL KESİT GEOMETRİSİ		
Hesap Adımı	Değer	Birim
Yarıçap ($R = D/2$)	0.400	m
Overlap mesafesi ($a = D - s$)	0.200	m
Yarım merkez açısı (θ) [rad]	0.723	rad
Tek Kolon Alanı (A_{col})	0.503	m ²
Kesişim (Lens) Alanı (A_{lens})	0.073	m ²
Net Kolon Alanı ($A_{net} = A_{col} - A_{lens}/2$)	0.466	m ²
Efektif Duvar Kalınlığı (t_{avg})	0.784	m

CSR azaltma faktörü ile sınılaşma güvenlik değerleri yeniden incelendiğinde (Bkz. Şekil 26), sınılaşma için gerekli güvenlik değerlerinin sağlandığı görülmektedir.

ALAN DEĞİŞTİRME ORANI (AREA REPLACEMENT RATIO, a_r)		
Hesap Adımı	Değer	Birim
DSM Duvar Kesit Alanı (A_{dsm})	6.268	m ²
Alan Yer değiştirme Oranı (a_r)	0.016	-
Zemin Alanı Oranı ($1 - a_r$)	0.984	-

GERİLME YOĞUNLAŞMASI & KESME PAYLAŞIMI (SIVILAŞMA DURUMU)		
Hesap Adımı	Değer	Birim
Gerilim Yoğunlaşma Katsayısı ($n = G_{dsm} / G_{soil,liq}$)	72.00	-
Kompozit Kayma Modülü (G_{comp})	360000.00	kPa
DSM'e Gelen Kesme Oranı (β_{dsm})	1.00	-
Zemine Gelen Kesme Oranı (β_{soil})	0.00	-
V_{total} (Sismik Kesme Kuvveti)	919.46	kN/m
DSM Kesme Kuvveti (V_{dsm})	919.46	kN/m
Zemin Kesme Kuvveti (V_{soil})	0.00	kN/m
DSM Gerilmesi ($\tau_{dsm} = V_{dsm} / A_{dsm}$)	1173.47	kPa

DSM sistemi, temel altında alan iyileştirmesi yapan bir kompozit zemin sistemi olarak değil; yapı çevresinde sıvılaşma kaynaklı yanal deformasyonları sınırlayan kesişen DSM perde sistemi olarak değerlendirilmelidir.

DSM KESME KAPASİTESİ (FHWA)		
Hesap Adımı	Değer	Birim
DSM Kesme Dayanımı ($c_u = q_u/2$)	1277.60	kPa
Efektif Duvar Kalınlığı (t_{avg})	0.78	m
Nominal Kesme Kapasitesi ($V_{rc} = c_u \times A_e$)	1001.04	kN/m
Faktörlü Kapasite - Sismik ($\varphi \times V_{rc}$)	1001.04	kN/m

SİSMİK KONTROL - TALEP vs KAPASİTE		
Kontrol Parametresi	Değer	Birim
DSM Kesme Kuvveti (V_{dsm})	919.46	kN/m
Faktörlü Kesme Kapasitesi ($\varphi \times V_{rc}$) - Sismik	1001.04	kN/m
Check ($V_{dsm} / \varphi V_{rc}$)	0.918	-
KONTROL	✓ İYİLEŞTİRME YETERLİ	

D = 80 cm çapında ve 20 cm bindirmeli (kesişmeli) tek sıra DSM kolon perdesinin, sıvılaşma durumunda oluşabilecek tasarım yüklerini güvenli şekilde karşılayabildiği hesap sonuçlarından görülmektedir. Hesap tablolarında da gösterildiği üzere DSM kolonları için en az 4.0 MPa tek eksenli basınç dayanımı asgari tasarım kriteri olarak sağlanmalıdır. Kolonların, sıvılaşabilir zemin tabakasının taban kotunun en az 2.0 m altına kadar devam ettirilmesi gerekmektedir. Bu şartlar altında kolon boyu $L = 8.0$ m olarak belirlenmiştir.

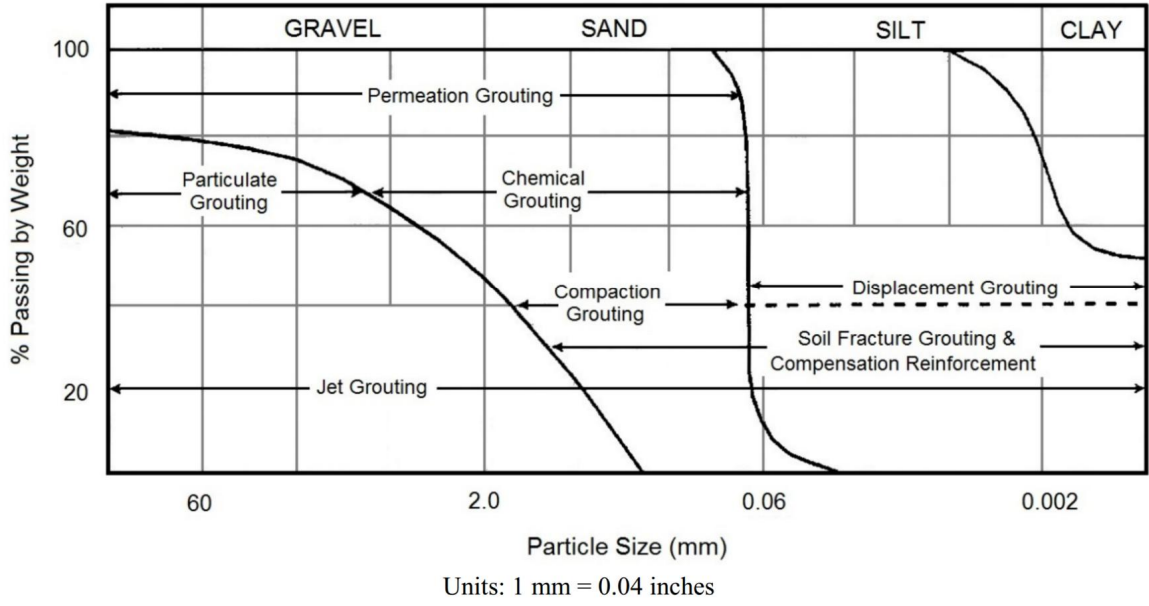
Uygulamada test kazık aşaması ve kazıklar tamamlandıktan sonra yapılacak Kazık Süreklilik (Pile Integrity Test; PIT) testleri yapılacak kazık adedi, uluslararası standartlar ve uygulama rehberleri doğrultusunda belirlenmelidir. FHWA 2013 dokümanlarında yüksek riskli projelerde kazıkların %10–15’inde, ISO 22477-4 standardında ise projeye özgü risk seviyesine bağlı olarak %5–25 oranında test önerilmektedir. Ayrıca BS 8004 standardı, zemin koşulları, kazık boyu ve yapısal önem gibi faktörlerin dikkate alınarak test oranının belirlenmesini vurgulamaktadır. ASTM D5882-16 standardı ise toplam kazık sayısının %5’inde bölgelerdeki kazıkların test edilmesini tavsiye etmektedir. Bu doğrultuda, zemin heterojenitesi, yapı kritikliği ve imalat sırasındaki çevresel koşullar (örneğin hava durumu, yeraltı su seviyesi değişimleri vb.) dikkate alınarak, sahada yeterli sayıda kazıkta süreklilik testi yapılması, imalat kalitesinin güvence altına alınması

açısından önemlidir. Olumsuz sonuç alınması durumunda kolonların tam boy karot alımıyla kontrol edilmesi gerekir.

- *Federal Highway Administration (FHWA) (2013). Geotechnical Engineering Circular No. 13: Design and Construction of Ground Improvement (FHWA GEC 013). U.S. Department of Transportation.*
- *BS 8004 (2015). Code of Practice for Foundations. British Standards Institution.*
- *ASTM D5882 (2021). Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. ASTM International.*
- *ISO 22477-4 (2018). Geotechnical Investigation and Testing – Testing of Geotechnical Structures – Part 4: Dynamic Load Testing of Piles. International Organization for Standardization.*

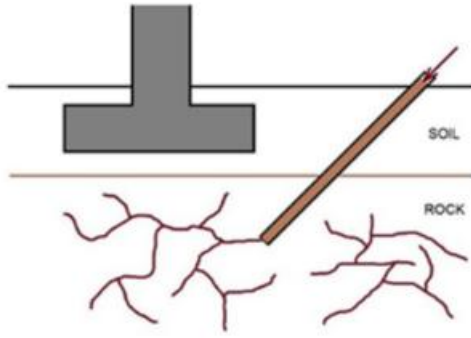
7.3 Bina Temelinin İyileştirilmesi (2. Etap)

Bina altında sıvılaşma potansiyeline sahip zemin tabakalarında, potansiyel riskleri azaltmak amacıyla, zemin özelliklerinin iyileştirilmesi için enjeksiyon (grout) yöntemi önerilmektedir. Enjeksiyon uygulaması ile özellikle temel altındaki sıvılaşabilir zemin boşluklarının bağlayıcı malzeme ile doldurulması sağlanarak hem zeminin rijitliği ve dayanımı artırılmakta hem de boşluk suyu basıncının artarak deprem yükleri altında kritik seviyelere ulaşması sınırlandırılmaktadır. Böylece sıvılaşma potansiyeli düşürülerek, olası deformasyonların kontrol altına alınması ve yapı güvenliğinin artırılması hedeflenmektedir.

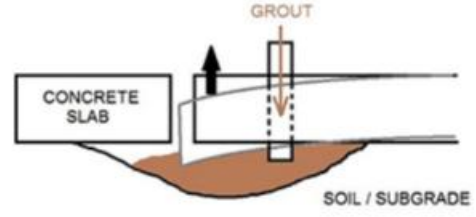


Şekil 29 Enjeksiyon Yöntemi Seçimi (Zemin Türlerine Göre) (FHWA)

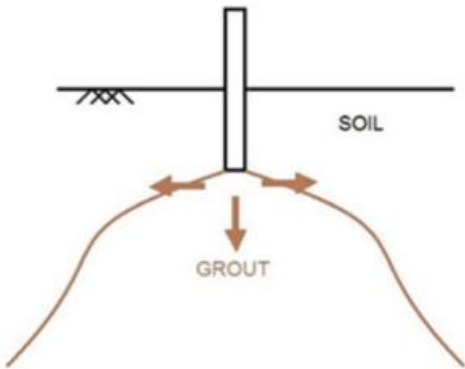
Jeolojik araştırmalardan elde edilen sonuçlara göre; kompaksiyon enjeksiyon yöntemi, boşluk yapısına uygunluğu nedeniyle etkili bir iyileştirme yöntemi olarak değerlendirilmektedir. Enjeksiyon sayesinde, düşük viskoziteli enjeksiyon malzemesi zemin boşluklarına nüfuz ederek tane yapısını değiştirmeden zemini bağlar ve geçirgenliği önemli ölçüde azaltması hedeflenmektedir.



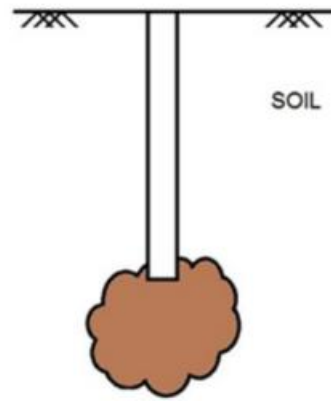
Rock fissure grouting



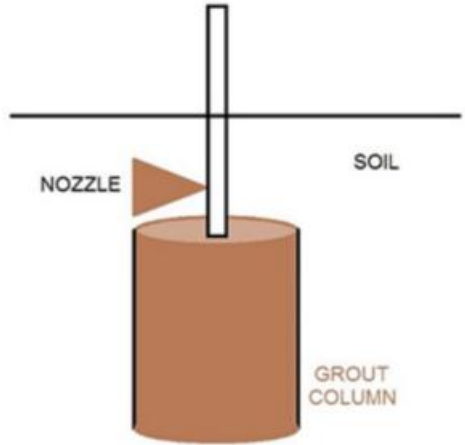
Slabjacking



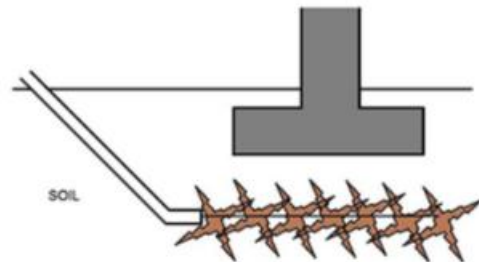
Permeation grouting



Compaction grouting

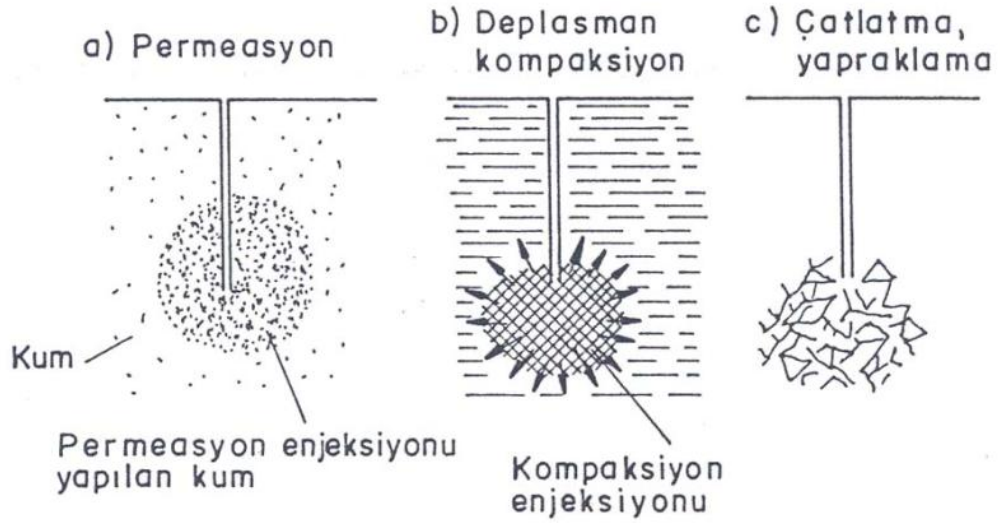


Jet grouting

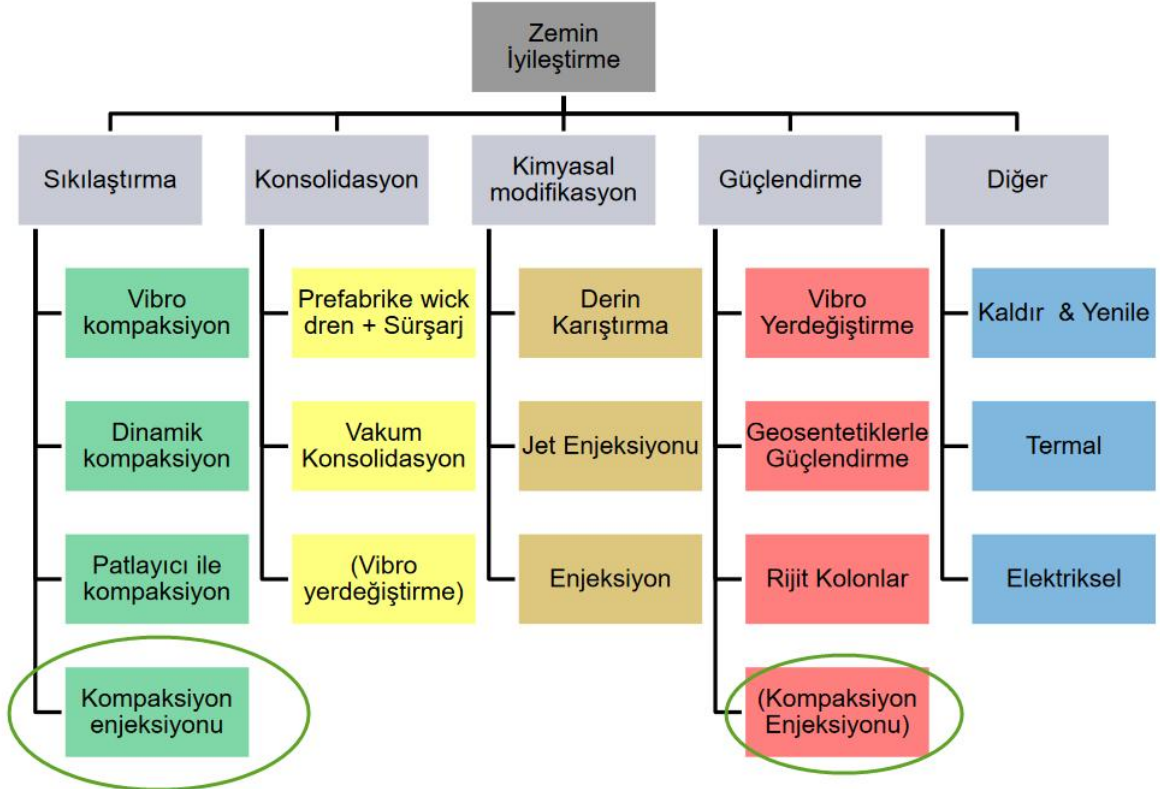


Soil fracture grouting

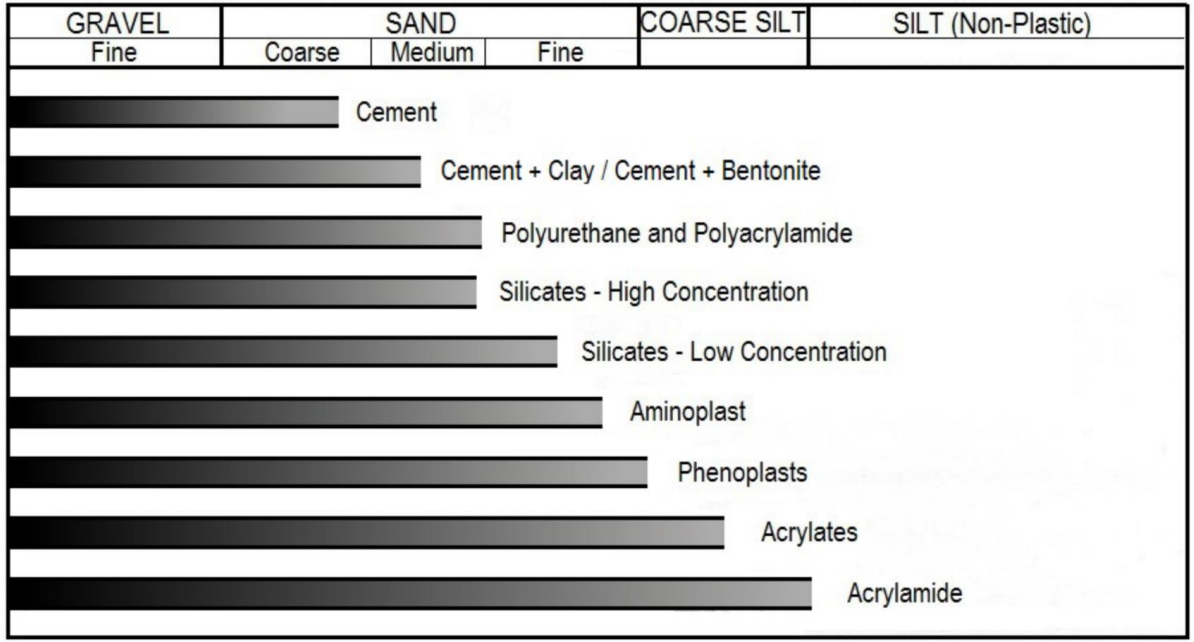
Şekil 30 Ana Enjeksiyon Tipleri (FHWA Ground Modification Manual)



Şekil 31 Ana Enjeksiyon Tipleri (DLH Geoteknik Tasarım Esasları)



Şekil 32 Zemin İyileştirme Metotlarının Değerlendirilmesi (Altuğ Saygılı)



Şekil 33 Enjeksiyon Malzeme Türleri (FHWA Ground Modification Manual)

Çakıl ve kum birimlerden oluşan proje sahasında enjeksiyon malzemesi olarak çimento kullanımı literatüre göre uygun görülmektedir.

Sıkıştırma enjeksiyonu (compaction grouting) ile zeminin sıkılaştırılması veya yeniden sıkılaştırılması uygulamalarında, enjeksiyon boruları genellikle:

- Tünel projelerinde 8–15 ft (yaklaşık 2,4–4,6 m) aralıklarla,
- Saha iyileştirme çalışmalarında 6,6–16 ft (yaklaşık 2,0–4,9 m) aralıklarla,
- Mevcut yapıların remedial (onarım/iyileştirme) çalışmalarında ise 3,3–10 ft (yaklaşık 1,0–3,0 m) aralıklarla yerleştirilir.

Obrukların (sinkhole) veya yeraltı suyu kanallarının tespiti ve doldurulması amacıyla kullanılan birincil enjeksiyon deliklerinin aralığı, problemin niteliğine bağlı olarak belirlenmekle birlikte genellikle 10–30 ft (yaklaşık 3–9 m) arasında değişmektedir. Bu tür uygulamalarda, istenen performansın sağlandığını garanti etmek ve doğrulamak amacıyla çoğunlukla üçüncül (tertiary) deliklerin açılması gerekir.

Belirtilen düşük çökme değerine (low slump) sahip enjeksiyon malzemesinin tıkanma olmadan iletilebilmesi ve kesme direncinin azaltılabilmesi için, enjeksiyon borusu çapının en az 3 inç (yaklaşık 75 mm) olması önerilmektedir.

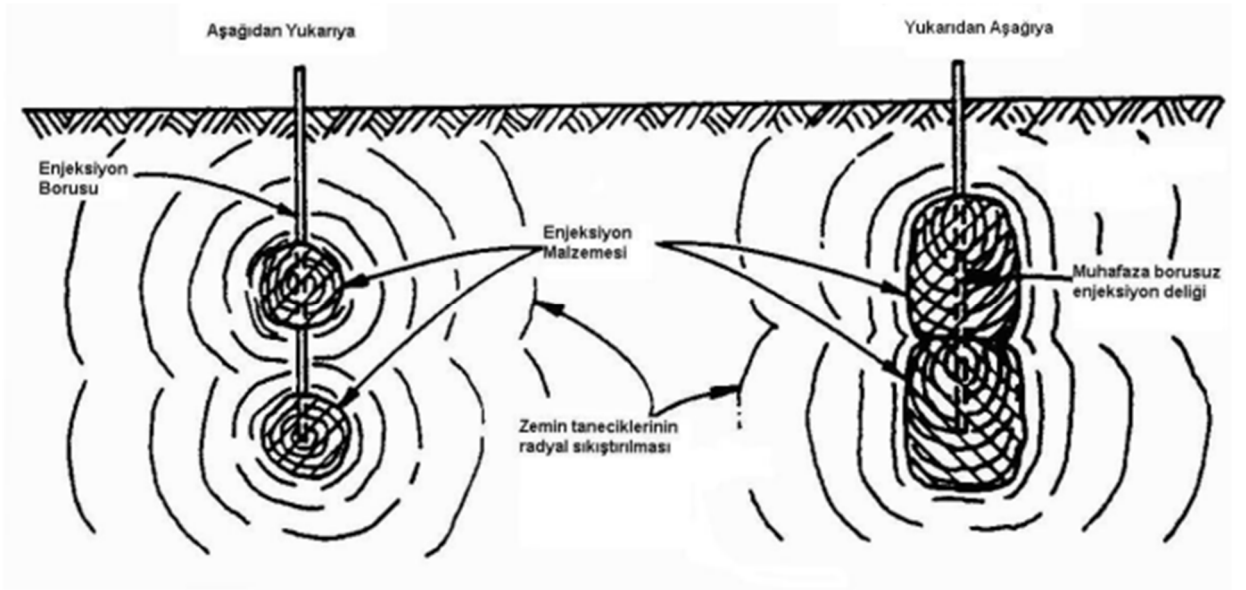
Uygulama sırasında dikkat edilecek önemli noktalardan birisi yapılacak enjeksiyon çalışmasının temel altında belirlenen hedef derinlik olan sıvılaştırılabilir zeminlere doğrudan uygulanması gerekliliğidir. Bu nedenle uygulama aşamasında yapılacak hataları engellemek ve bina temeline zarar verilmemek için sürekli olarak izleme yapılması çok önemlidir. Enjeksiyon işlemi sırasında enjeksiyon basıncı hem pompada hem de enjeksiyon noktasında gözlenmelidir. Çünkü basınç – enjekte edilen hacim ilişkisi hem zemin koşulları hakkında hem de karşılaşılan herhangi bir problem hakkında bilgi sağlayacaktır. Örneğin basınçta meydana gelen bir düşme enjeksiyon malzemesinin ya bir boşluk veya yeraltı yapısı içine enjekte edildiğini veya zeminin hidrolik çatlatmaya maruz kaldığını veya bir dayanma yapısıyla sağlanan yanıl direncin yenildiği anlamına gelebilir. Genellikle enjeksiyon pompalamanın durdurulması gereken bir kriter belirlenir. Pompalama aşağıda belirtilenlerden hangisi ilk olarak gerçekleşirse durdurulur;

- Belli bir hızda pompalama esnasında basıncın ani olarak düşmesi ki bu durum zeminin kayma direncinin düştüğünü göstermektedir.
- Yüzeysel kabarmaların meydana gelmesi durumunda (enjeksiyonun oturmaların engellenmesi amacıyla uygulanması hariç).
- Önceden belirlenen azami enjeksiyon miktarının enjekte edilmesi durumunda
- Enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine enjekte edilememesi durumunda.

Zeminin homojen, eş yönlü, lineer ve elastik olduğuna dair başlangıçta yapılan varsayımlardan ötürü, herhangi bir uygulamada hataya düşmemek için zemin tipi, kalınlığı ve birim deformasyon seviyeleri göz önünde bulundurularak gerekli değişiklikler yapılmalıdır.

Enjeksiyonun zemin içerisine yerleştirilmesi bütün arazi koşullarını (zemin, yapı, mülkiyet hakkı sınırlamaları) göz önüne almayı gerektirmekte ve genellikle yukarıdan aşağıya, aşağıdan yukarıya ve bazen de her ikisi birden gerçekleştirilmektedir.

Yüzeysel uygulamalar ve farklı oturmuş sömellerin kaldırılmaları yukarıdan aşağıya, yüzeysel kabarmaların asgari tutulması gereken stabilizasyon işleri ise aşağıdan yukarıya gerçekleştirilmektedir. Enjeksiyonun yukarıdan aşağıya yapılmasının avantajı ilk olarak üst tabakaların sıkıştırılması ve bu sayede aşağıya doğru ilerledikçe daha yüksek enjeksiyon basınçlarının kullanılabilmesidir. Fakat her enjeksiyon aşamasında ek delgi gerektiğinden maliyetin artması bu yöntemin dezavantajını oluşturmaktadır. Şayet yukarıdan aşağıya gerçekleştirilen enjeksiyon işlemi derin formasyonlarda oturma problemlerine yol açacaksa ilk olarak aşağıdan yukarıya yapılan birkaç enjeksiyondan sonra işlem yukarıdan aşağıya tabandaki son enjeksiyon kütesine ulaşılan kadar devam ettirilir.



Şekil 34 Aşağıdan Yukarıya & Yukarıdan Aşağıya Kompaksiyon Enjeksiyonu İşlemleri

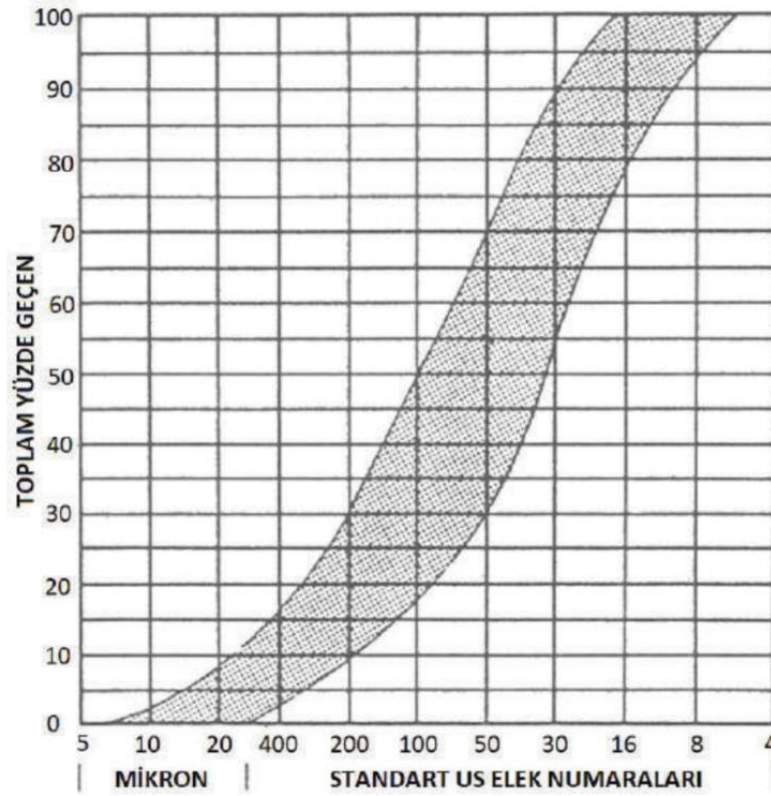
Enjeksiyon sondaj deliklerinin aralıkları ve yerleşimi büyük önem arz etmektedir. Zemin tipi, su muhtevası, zeminin mevcut rölatif sıklığı ve istenilen iyileştirme derecesi, statik gerilmeler, mevcut yapısal elemanlar vb. gibi faktörler enjeksiyon malzemesinin zemin

içerisine yerleştirilme şeklini ve dolayısıyla elde edilen nihai iyileştirmeyi etkilemektedir. Enjeksiyon delikleri aralığı temel merkezi altında genellikle 2.50 m civarında olup tercihen üçgensel konum seçilir. Yapının çevresi etrafında bir veya iki sıra ek enjeksiyon bölgesi oluşturmak etraftaki yapısal elemanlara yanal yükleme nedeniyle zarar vermemek açısından uygun görülmektedir. Enjeksiyon noktaları arasındaki yatay aralıklar yüksek statik gerilmelerin olması durumunda (ya derin formasyonlarda ya da yapısal yükler altındaki enjeksiyon noktaları) daha yüksek enjeksiyon hacmi ve basınçları gerektireceğinden daha geniş tutulmaktadır. Gevşek zeminler içerisinde gerçekleştirilen enjeksiyon işlemi daha sıkı zeminlerdekine göre daha büyük enjeksiyon kütlesi oluşturduğundan yatay aralık daha büyüktür.

Kompaksiyon enjeksiyonunun son 10 yıllık bir süreç içerisinde sivilaşmayı önleyici bir teknik olarak da kullanılmaya başlandığını görmekteyiz. Gerçekten Boulanger ve Hayden (1995) kompaksiyon enjeksiyonunun sivilaşmayı önlemek için kullanıldığı geniş bir vaka analizleri özeti hazırlamışlardır. Vaka analizlerinde, bu enjeksiyon tekniğinin siltli kumlarla siltli zeminlerin SPT ve CPT direnç değerlerini önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir.

Enjeksiyon Karışım Tayin Deneyleri Enjeksiyon çalışmalarında “TS EN 197-1 CEM I 42.5 R - SR5” tipi çimento kullanılacaktır. Enjeksiyon çalışmalarında torba ve/veya dökme çimento kullanılacaktır. Çimento bazlı enjeksiyonlarda diğer bir önemli bir konu w/c oranıdır. w/c=1.0 seviyesinde değerler genellikle kullanılmaktadır. İmalatlara başlamadan önce yeraltı su analizi yapılmalı ve uygun çimento tipi kontrol edilmelidir.

Enjeksiyonlarda kullanılacak su, betonda kullanılan karma suyu niteliğinde temiz ve berrak olacaktır. Yağ, asit, alkali gibi maddeler ile odun, kömür ve diğer materyallerin parçalarından arındırılmış olacaktır. Kalitesinden şüphe edilen sulardan örnekler alınarak idarenin laboratuvarlarında kimyasal analizleri yapılacaktır. Suyun kimyasal analizlerine göre sodyum sülfat iyonu ve diğer iyonlar betona zarar vermeyecek limitlerde olacaktır.



Şekil 35 Kompaksiyon Enjeksiyonu - Kum İçin Öngörülen Dane Çapı Dağılım Aralığı (Warner, Brown, 1974)

Kompaksiyon enjeksiyonunun düzgün bir şekilde gerçekleştirilmesi için enjeksiyon esnasında gözlem şarttır. En azından enjeksiyon malzemesinin kıvamı, enjeksiyon hızı, enjeksiyon basıncı ve her aşamada enjekte edilen malzeme miktarı gözlenmeli ve kaydedilmelidir. Bu veriler zemin koşullarını ve enjeksiyon işleminin verimliliğini belirlemede kullanılabilir. Daha yumuşak ve gevşek zeminlerde enjeksiyon basınçları daha düşük, enjekte edilen hacimler ise daha fazladır. Birinci aşamada gerçekleştirilen enjeksiyon zeminin biraz olsun iyileştirilmesini sağladığından ikinci geçişte daha yüksek basınçlar ve daha az malzeme enjeksiyonu söz konusu olabilir.

Çok katı çimento harçlarının kullanılmasından dolayı kompaksiyon enjeksiyonu için özel ekipman gerekmektedir. Karıştırıcı (mikser) düşük çökme değerli, çok katı çimento harcını homojen bir şekilde karıştırabilecek kapasitede olmalıdır. Kompaksiyon enjeksiyonu için gerekecek pompa:

- düşük çökme değerli çimento harcını işleyecek kapasitede,
- yüksek basınçlarda (4000 – 7000 kPa) çalışabilen,
- pompalama esnasında ayarlanabilen ve 20 m³/saat'e kadar pompalama hızı sağlayabilen ve enjeksiyon noktasında basınç ölçümü yapabilen tipte olmalıdır.

Çimento harcı enjeksiyon pompasından enjeksiyon noktasına genellikle 38-50 mm çapındaki borularla iletilmekte olup, katı, yüksek viskoziteli çimento harcı kullanıldığından boru içerisinde sürtünmeden kaynaklanan yüksek basınç kayıpları söz konusudur. Bu nedenle pompa ile enjeksiyon noktası arası mesafe kısa tutulmalıdır.

7.4 Uygulama Önerileri – Önemli Notlar

Önerilen DSM ve kompaksiyon enjeksiyonu uygulamalarının mevcut yapı üzerindeki etkilerinin kontrol edilmesi, olası deformasyonların erken aşamada tespit edilmesi ve uygulamanın güvenli şekilde yürütülmesi amacıyla imalat öncesinde ve uygulama süresince bir enstrümantasyon ve izleme programı oluşturulmalıdır.

Özellikle kompaksiyon enjeksiyonu uygulamaları sırasında zemine yüksek basınç altında harç verilmesi nedeniyle mevcut temel sisteminde yukarı yönlü hareketler, diferansiyel deformasyonlar veya yapısal elemanlarda ilave gerilmeler oluşabilmektedir. Benzer şekilde DSM imalatları sırasında meydana gelebilecek hacim değişimleri ve ekipman kaynaklı etkilerin de kontrol edilmesi gerekmektedir.

Bu kapsamda, yapı çevresine ve kritik taşıyıcı sistem elemanlarına reflektörler, tiltmetreler ve gerekli görülen noktalarda oturma ölçüm sistemleri yerleştirilmesi önerilmektedir. Ölçüm sonuçları uygulama süresince düzenli olarak takip edilmeli, elde edilen veriler günlük olarak değerlendirilmelidir.

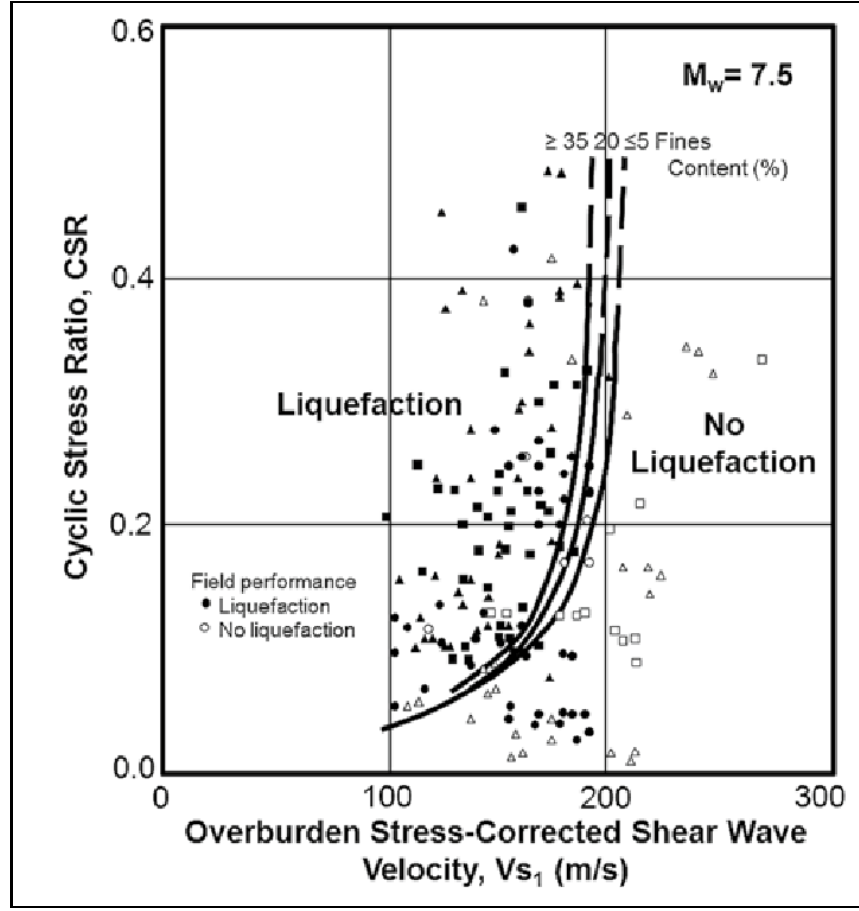
İmalat sürecinde belirlenen eşik değerlerin aşılması, beklenmeyen deformasyonların gözlenmesi veya yapı davranışında olağandışı bir durum tespit edilmesi halinde

çalışmalar derhal durdurulmalı, durum proje müellifi ve geoteknik kontrol mühendisleri tarafından değerlendirilerek gerekli düzeltici önlemler alınmalıdır.

Ayrıca proje sahasında yeraltı su seviyesinin değişiminin izlenmesi amacıyla gözlem kuyuları tesis edilmesi ve uygulama öncesi ile sonrası ölçümlerin karşılaştırılması tavsiye edilmektedir. Bu sayede iyileştirme uygulamalarının yeraltı su rejimine etkileri ve sıvılaşma potansiyelindeki değişimler değerlendirilebilecektir.

Tablo 13 Önerilen İzleme ve Ölçüm Programı

Ölçüm Sistemi	Amaç	Önerilen Adet	Ölçüm Sıklığı
Tiltmetre	Yapısal dönmelerin ve eğim değişimlerinin izlenmesi	Proje bazlı	İmalat aşaması Günlük
Reflektör (Total Station)	Düşey ve yatay deplasmanların izlenmesi	Proje bazlı	İmalat aşaması Günlük
Oturma Pimi	Temel ve zemin oturmalarının ölçülmesi	Proje bazlı	İmalat aşaması Günlük
İnklinometre	Zemin içi yatay deformasyonların izlenmesi	Proje bazlı	İmalat aşaması Günlük
Yeraltı Suyu Gözlem Kuyusu	Yeraltı su seviyesi değişimlerinin takibi	Proje bazlı	İmalat aşaması Günlük
Çatlak Ölçer	Mevcut çatlakların hareketlerinin izlenmesi	Proje bazlı	İmalat aşaması Günlük
SPT Kontrol Deneyleri	İyileştirme etkinliğinin doğrulanması	Proje bazlı	İmalat sonrası
MASW Ölçümleri	Dinamik zemin parametrelerinin doğrulanması	Proje bazlı	İmalat sonrası



Şekil 36 Sıvılaşma Direnci Eğrileri (Andrus ve Stokoe, 2000)

** İyileştirme sonrası yapılacak olan jeofizik ölçümler için Andrus ve Stoke (2000) çalışmasında yer alan direnç eğrileri ile kontrol sağlanabilir. Jeofizik ölçümler, jeolojik araştırmalar ile desteklenmeli ve tüm araştırma sonuçları iyileştirmenin başarılı olduğunu teyit etmelidir. Jeofizik ölçümler için aktif yüzey dalgası yöntemi MASW ve Georadar (Ground Penetrating Radar, GPR) ölçümleri önerilmektedir.

8 SONUÇLAR - ÖNERİLER

Bu rapor kapsamındaki tüm jeolojik datalar hazırlatılan “Zemin ve Temel Etüt Raporu” içeriğinden alınmıştır.

- Proje sahasında taşıma gücü ve zamana bağlı oturma problemi yapı özelinde bulunmamaktadır. Uzun kullanım süresi dikkate alındığında oturmaların önemli ölçüde tamamlandığı düşünülmektedir.
- Mevcut gerilme değerleri ile güçlendirme sonrası gerilme değerleri kıyaslandığında, gerilmeler azalacağı ve taşıma gücü problemi oluşmayacağı anlaşılmaktadır.
- Yapılan jeoteknik değerlendirmeler ve sıvılaşma analizleri sonucunda, proje sahasında özellikle yüksek yeraltı su seviyesi ve gevşek-orta sıkı kumlu zemin birimlerinde sıvılaşma potansiyelinin bulunduğu belirlenmiştir.
- Bu kapsamda sıvılaşma riskinin kontrol altına alınması amacıyla bütüncül bir iyileştirme yaklaşımı benimsenmiştir.
- Yapı çevresinde önerilen kafes tipi Derin Zemin Karıştırma (DSM) uygulaması ile sıvılaşma potansiyeli bulunan zemin zonunun lateral yayılımı sınırlandırılacak, deprem yükleri altında yeraltı suyunun ve deformasyonların kontrol edilmesi ve iyileştirilmiş zonun bütüncül bir davranış sergilemesi sağlanacaktır (Etap 1).
- Yapı altı bölgede uygulanması önerilen kompaksiyon enjeksiyonu yöntemi ile zemin boşluk oranının azaltılması, relatif sıklığın artırılması, potansiyel sıvılaşma etkilerinin ve yerel taşıma gücünün yükseltilmesi hedeflenmektedir (Etap 2).
- Bu iki yöntemin birlikte uygulanması ile yalnızca yerel zemin dayanımının artırılması değil, aynı zamanda yapı-zemin sisteminin genel rijitliğinin artırılması ve sıvılaşma potansiyeli kaynaklı diferansiyel oturma riskinin minimize edilmesi hedeflenmektedir.

- DSM imalatı sırasında bağlayıcı dozajı, su/çimento oranı, karıştırma enerjisi ve kolon sürekliliği saha şartlarına göre optimize edilmeli, homojen karışım elde edilmesine özellikle dikkat edilmelidir.
- Tasarımda öngörülen karışım yüzdelerinin ve enjeksiyon parametrelerinin yerindeki performansını doğrulamak amacıyla, saha genelindeki imalata başlanmadan önce mutlaka uygun bir lokasyonda deneme kolonları imal edilmelidir. Söz konusu deneme kolonlarının tamamlanmasını müteakip 28.0 günlük kür süresi beklenerek, DSM kolonu boyunca tam boy karot numunesi alınmalı ve laboratuvarda gerekli mekanik/fiziksel testlere tabi tutulmalıdır. Ana imalat fazına, ancak bu test sonuçlarının tasarım kriterlerini karşıladığı onaylandıktan sonra geçilecektir.
- DSM kolonlarının taşıyıcı kapasitesini doğrudan etkileyen beton kalitesinin kontrolü amacıyla da testler yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda; betonun basınç dayanımının belirlenmesi için yeter miktarda standart kürde silindir numune ve kolon boyunca yeter miktarda karot numune alınarak laboratuvar deneyleri yapılmalıdır. Bu miktar idare ile birlikte belirlenecektir. Test sonuçları, projede öngörülen karot numunelerin basınç dayanımları ön test sonuçlarıyla benzer mukavemet özellikleriyle ve basınç dayanım sınıflarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmeli, gerekirse ek kalite kontrol önlemleri alınmalıdır.
- $D = 80$ cm çapında ve 20 cm bindirmeli (kesişmeli) tek sıra DSM kolon perdesinin, sıvılaşma durumunda oluşabilecek tasarım yüklerini güvenli şekilde karşılayabildiği hesap sonuçlarından görülmektedir. Hesap tablolarında da gösterildiği üzere DSM kolonları için en az 4.0 MPa tek eksenli basınç dayanımı asgari tasarım kriteri olarak sağlanmalıdır. Karot alımları İDARE'nin öngördüğü sayıda ve/veya asgari olarak %3 oranında uygulanmalıdır.
- Tüm karot numuneleri, kurumayı önlemek için plastik sargıyla mühürlenecek ve Yüklenici tarafından laboratuvara taşınacaktır. Numuneler, test tarihine kadar

ASTM C192'ye göre nemli bir odada saklanmalıdır. Islah edilmiş zemin numuneleri, su geçirmez, plastik torbalara kapatılmadıkça, gerekli kür koşulları altında saklanmalıdır.

- Her tam boy karot alınan kolondan en az 5.0 test numunesi elde edilmelidir. Bu test numunelerinin en az 4.0 tanesi q_{ult} değerine eşit ya da yüksek olmalıdır (her kolondan %80 başarı). Eğer beklenen başarı sağlanamazsa aynı kolon üzerinden, kontrol mühendisi tarafından kolonun belirlenen bir yerinden 10 karot numunesi alınarak bu numunelerden 8 adedinin q_{ult} değerine eşit ya da yüksek olmalıdır. Eğer istenen kriterler sağlanamazsa İdare onayı ile ilave iyileştirme önlemleri alınmalı ya da tasarım değişikliğine gidilmelidir.
- Test numunelerinin boy/çap oranı 2.0 veya daha yüksek olmalıdır. Numuneler en az çift tüplü karotiyerle alınmalıdır. Karot çapı en az 64mm olmalıdır (HQ karotiyer ile wire-line sistemle alınmalıdır). Numune alınacak yer DSM kolonlarında ve plastik kazıklarda kolon çapının 1/4'ü kadar merkezden uzakta alınmalıdır.
- Kolonların, sıvılaştırılabilir zemin tabakasının taban kotunun en az 2.0 m altına kadar devam ettirilmesi gerekmektedir. Bu şartlar altında kolon boyu $L = 8.0$ m olarak belirlenmiştir.
- Kesişen (sekant) DSM perde geometrisinde sürekliliğin ve sızdırmazlığın sağlanması amacıyla, birincil kolonlar nihai sertliğe ulaşmadan (ilk 12-36 saat içinde) ikincil kolonların kesilerek imal edilmesi esastır.
- DSM kolonlarının tamamında süreklilik testi (PIT) yapılmalı ve diğer tüm kalite kontrol testleri sağlanmalıdır.
- İmalat sonrası kalite kontrol kapsamında, kolonlardan alınacak numuneler üzerinde dayanım deneyleri yapılmalı ve ayrıca SPT gibi in-situ testlerle iyileştirme etkinliği doğrulanmalıdır.

- Sahada güçlendirme uygulamaları sonrası kalite kontrol amaçlı karelajlar yaparak hatlar boyunca ERT tomografi veya jeofizik yüzey dalgası ölçümleriyle kolonlar arası sürekliliğin denetiminin yapılması yerinde olacaktır. Bu amaçla, sahada ve binanın altında kayma dalgası hızı sonuçlarının devamlılığının 4-8 m aralığında izlenebilmesi amacıyla en az 12 kanallı sismik ölçüm cihazı ile 4.5 Hz'lik jeofonlarla 5 m aralıklı jeofonlar kullanılarak tahribatlı yüzey dalgası MASW ölçümleri alınmalı (60 m hat boyunca), en az 10-15 m derinliğe inilmelidir. ($V_{s,30}$). $V_{s,30}$ değerinde zemin iyileştirme sonrası hedef derinlik için (4-8 m arası) kabul edilebilir kayma dalgası hızı değerlerine ulaşıldığı ve bu değerlerin sürekliliği belirlenen farklı hatlar boyunca kontrol edilmelidir.
- Sahada yapılan sondajlardan 4.0 derinlikte tespit edilen debili yeraltı suyu pompa yardımıyla tahliye edilerek su seviyesi düşürülecek; ardından DSM ve enjeksiyon uygulamalarına geçilecektir. Mevsimsel koşullara göre yeraltı su seviyesi yüzeye daha yakın olabilecektir.
- Uygulamanın proje performans hedeflerine ulaşması için imalatın deneyimli geoteknik mühendis gözetiminde yürütülmesi ve tüm üretim parametrelerinin düzenli olarak kayıt altına alınması önerilmektedir.
- İmalatlara başlamadan önce proje sahasında ve çevresinde yer alan tüm altyapı tesisleri tespit edilmeli ve gerekiyorsa deplase edilmelidir.
- Kompaksiyon enjeksiyonu uygulaması sonrasında belirli periyotlarla kalite kontrol testleri yapılmalı ve karelajın ve enjeksiyonun etkinliği kontrol edilmelidir. Uygulama esnasında yapıya kurulu gözlem sistemi günlük olarak takip edilmeli, yapının taşıyıcı sisteminde deformasyon gözlemlenmesi durumunda çalışmalar durdurulmalı ve proje müellifi ivedilikle bilgilendirilmelidir.
- Kompaksiyon enjeksiyonu basınçla ve çok katı harçla yapıldığı için mevcut radye temelde yukarı yönlü kabarmalara (heave) neden olabilir. Enjeksiyon esnasında

binanın dilatasyon noktalarına ve dış cephesine Reflektör / Tiltmetre yerleştirilerek milimetrik hassasiyetle uygulama boyunca izlenmesi şantiye güvenliği için önem arz etmektedir.

- Bu raporda yer alan değerlendirme ve öneriler, proje sahasında belirli lokasyonlarda yapılan jeolojik gözlemler ve laboratuvar deney sonuçlarına göre yapılmıştır. Önerilen yöntem ve hesaplar, araştırma çalışmalarında belirlenen zemin koşulları için geçerlidir. Yapım çalışmaları sırasında jeolojik koşulların izlenmesi, belirlenen zemin modelinden farklı bir durum ile karşılaşılması halinde; tasarımı yapan uzmandan görüş alınması, gerektiğinde tasarımın revize edilmesi uygun olacaktır.