

ZEMİN İYİLEŞTİRME UYGULAMASININ DİNAMİK ZEMİN TEPKİ ANALİZ SONUÇLARINA ETKİSİ

Mesut Aslan¹, Ender Başarı^{2*}

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü / Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye (Yüksek Lisans Öğrencisi), mesutaslantr@gmail.com

^{2*} İnşaat Mühendisliği Bölümü / Mühendislik Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye, ender.basari@cbu.edu.tr

*Başlıca yazar

Özet – Türkiye ve dünyanın birçok yerleşim yeri deprem tehdidi altındadır. Deprem neticesinde suya doymuş ve gevşek kumlu zeminlerde sıvılaşma olayı meydana gelebilmekte buna müteakip yapıların temellerinde taşıma gücündeki aşırı azalma ya da zeminin akması ve yüksek deformasyonu neticesinde geniş bir alanda birçok yapıyı aynı anda etkileyebilecek zeminden kaynaklı kayma, göçme, aşırı otuma, eğilme, devrilme gibi hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu tür zeminler Türkiye, Avrupa ve dünyanın birçok yerinde marjinal zemin davranışı gösteren zeminler olarak tanımlanmaktadır. Marjinal zeminlerde yer alan yapıların tasarımı için sahaya özel deprem tepki analizleri önerilmektedir. Aynı zamanda sıvılaşma gibi davranışa sahip olabilecek marjinal zeminlerde enjeksiyon ve jet-grout gibi zemin iyileştirme ve güçlendirmeleri uygulanmaktadır. Bu tür sıvılaşma potansiyeli olan ve iyileştirme ya da güçlendirme uygulanmış zeminlerde yapı tasarımı için güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası zemin durumunun (sınıfının) dikkate alınması hususunda fikir ayrılıkları olabilmektedir. Bu çalışmada sıvılaşma potansiyeline sahip bir zemin profili için güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası için sahaya özel zemin tepki analizleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırmalı olarak takdim edilmiştir. Ele alınan problemde yapı temel taban seviyesinden (-5m) itibaren sıvılaşma bölgesi içinde 15 m'lik -20 m seviyesine kadar jet-grout uygulaması ile güçlendirme yapılmıştır. Zemin tepki analizlerinin yapıldığı saha için alüvyon istifinin kalınlığı ise 150 m civarındadır. Bu çalışma sonucunda burada verilen örnek uygulamada olduğu gibi alüvyon istifinin kalın olduğu durumlarda alansal ve derinlik bakımından sınırlı bir bölgede yapılan zemin güçlendirmelerinin dinamik zemin tepki analizleri üzerinde etkisinin nispeten düşük ve sınırlı kaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler – Saha Özel Zemin Tepki Analizleri, Sıvılaşma, Deprem, Jet-Gout

1. GİRİŞ

Birçok inşaat faaliyeti esnasında iyileştirilmesi gereken zayıf zeminler ile karşılaşılabilir. Yapılan çalışmalar ve günümüz teknolojisinde zemin koşullarının elverişsiz olduğu durumlarda, zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak zemin özellikleri iyileştirilebilmektedir. Özellikle aktif fay hatlarına yakın bölgelerde depreme dayanıklı yapı tasarımı büyük önem arz etmektedir. Depremi engellemek mümkün olmamakla birlikte bazı uygulamalar ile azaltmak mümkün olmaktadır [1].

Bu çalışmada Manisa İli, Şehzadeler İlçesinde yer alan jet-grout yöntemi ile iyileştirilen sahanın iyileştirme öncesi ve iyileştirme sonrası için zemin

teпки analizleri bir boyutlu doğrusal olmayan hesap yöntemi ile zaman tanım alanı içinde yapılmıştır. Analizler için ihtiyaç duyulan zemin verileri iyileştirme öncesi ve sonrası yapılmış araştırma ve bulgular ile çalışma sahasına yakın civarlarda yapılmış derin su sondajları ve literatürde yer almış açık kaynak bilgilerinden yararlanılmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında 150 metrelik zemin profili oluşturulmuştur. Daha sonra, analizler için 12 adet deprem ivme kaydı seçilerek taban kayası seviyesinde girdi hareketi olarak uygulanmıştır.

Analizler sonucunda, jet-grout ile iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zeminler için zemin profili boyunca deprem girdi hareketleri neticesinde yatay yer

değiştirmeler elde edilmiş ve karşılaştırmalı olarak takdim edilmiştir.

II. MATERYAL

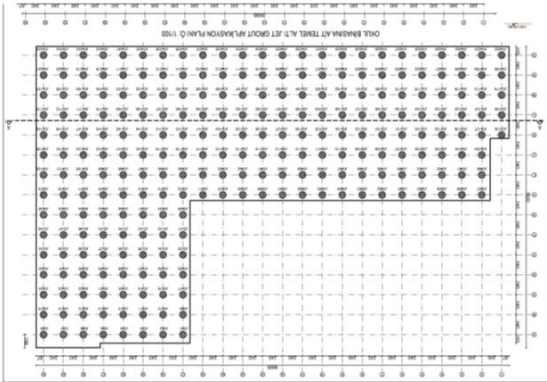
Çalışmanın materyalini saha zeminleri ve analizlerde girdi hareketi olarak kullanılan on iki adet deprem ivme kaydı oluşturmaktadır.

A. Saha Zemin Özellikleri

Çalışma alanı Manisa il merkezinde olup, yaklaşık 150 m kalınlığı olan bir sahada yer almaktadır. Çalışma alanının konumu ve zemin iyileştirmesi için yapılan jet-grout kolonlarının yerleşimleri Şekil 1 ve Şekil 2 ile aşağıda verilmiştir. Zemin özellikleri bu çalışma kapsamında ve geçmişte yapılan araştırma ve saha çalışmalarından yararlanılarak belirlenmiştir [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Sahada yapılan sondajlı zemin etüdü neticesinde elde edilmiştir. İdealize zemin profilinin oluşturulması için 150 metrelik alüvyon istifi 14 alt tabakaya ayrılmış olup zemin tabakalarının özellikleri Tablo 1 ile verilmiştir. Zemin profilinde yer alan zemin tabakalarının malzeme modellerini oluşturan kayma modülü azalım eğrileri (G/G_0) ise Şekil 3 ile verilmiştir. Jet-Grout uygulaması sonrası oluşan yeni kompozit zemin özellikleri ve parametreleri alan yer değiştirme oranına [8] göre belirlenmiştir.



Şekil 1. Çalışma sahası



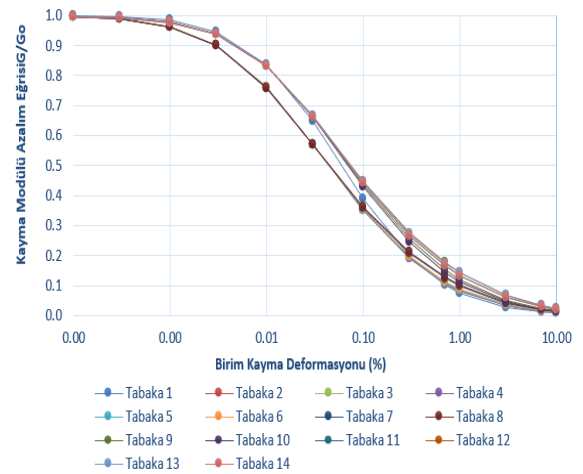
Şekil 2. Jet-Grout kolonlarının yerleşimi

Tablo 1. Zemin tabakaları ve özellikleri

Tabaka No	Tabaka İsmi	Başlangıç Derinliği (m)	Bitiş Derinliği (m)	Tabaka Kalınlığı (m)
1	(1) Nebatî Toprak ve Dolgu Zemin	0.0	0.5	0.5
2	(2) Kötü Derecelenmiş Kum (Orta Sıkı)	0.5	3.5	3.0
3	(3) Kötü Derecelenmiş Kum ve Çakıl (Orta Sıkı)	3.5	4.0	0.5
4	(4) Kötü Derecelenmiş Kum ve Çakıl (Orta Sıkı)	4.0	5.8	1.8
5	(5) Kumlu Silt (Orta Sıkı)	5.8	8.5	2.7
6	(6) Siltli Kum (Orta Sıkı)	8.5	13.0	4.5
7	(7) Kılı Kum (Orta Sıkı)	13.0	14.0	1.0
8	(8) Kılı Kum ve Çakıl (Orta Sıkı)	14.0	21.5	7.5
9	(9) Kılı Kum ve Çakıl (Sıkı)	21.5	25.0	3.5
10	(10) Kılı Kum ve Çakıl (Sıkı)	25.0	30.0	5.0
11	(11) Kılı Kum ve Çakıl (Sıkı)	30.0	50.0	20.0
12	(12) Kılı Kum ve Çakıl (Sıkı)	50.0	85.0	35.0
13	(13) Kılı Kum ve Çakıl (Sıkı)	85.0	120.0	35.0
14	(14) Kılı Kum ve Çakıl (Sıkı)	120.0	150.0	30.0

(Tablo 1 Devamı)

Tabaka No	Doğal Doygun Birim Hacim Ağrlık (kN/m^3)	Ortalama (V_{s-ort}) (m/s)	G_{maks} (kN/m^2)
1	15.5	115.0	20895.8
2	15.7	196.5	61598.5
3	15.8	274.0	120841.0
4	16.7	277.5	130934.2
5	18.2	282.5	148141.9
6	19.0	288.0	160645.9
7	19.0	291.5	164574.2
8	20.0	293.0	175023.4
9	21.0	294.5	185661.1
10	21.0	307.5	202414.0
11	21.0	347.5	258499.6
12	21.5	412.5	372921.4
13	22	550.0	678389.4
14	22.5	700.0	1123853.2



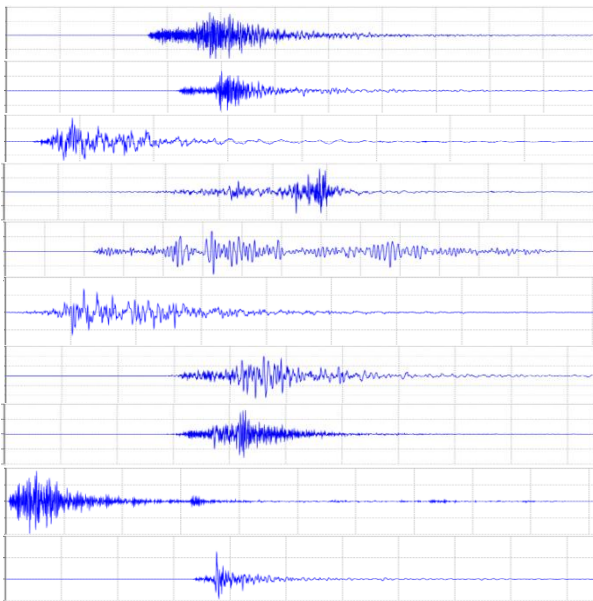
Şekil 3. Zemin tabakaları için oluşturulan Kayma Modülü Azalım Eğrişleri (G/G_0) [9,10].

B. Deprem ivme Kayıtları

Çalışma sahası yukarıda Şekil 1 ile verildiği gibi Manisa il merkezinde yer almaktadır. Analizlerde gidi hareketi olarak Manisa ve civarının tektonizma özelliklerine uygun olarak seçilen 12 adet deprem ve özellikleri Tablo 2 ile aşağıda verilmiştir. Deprem ivme kayıtları Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) ve Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi (TADAS)'dan temin edilmiştir. Elde edilen ham ivme kayıtlarına Seismosignal programında başlangıç noktası ve filtre düzeltmeleri yapılmıştır. Ayrıca taban kayasında girdi hareketi olarak deprem ivme kayıtların düşey bileşenleri kullanılmamış olup yatay bileşenleri dikkate alınmıştır.

Tablo 2. Analizlerde gidi hareketi olarak kullanılan deprem ivme kayıtları ve özellikleri.

No	Deprem Adı	İstasyon	Yer/Tarih	Büyüklik	PGA
D01	Seferhisar	akh04_og	İzmir, 2020, Türkiye	6.6	0,015
D02	Seferhisar	akh08_og	İzmir, 2020, Türkiye	6.6	0.03
D03	L'Aquila	aquil_og	Abruzzo, 2009, İtalya	6.3	0.34
D04	Chichi	chichi_og	Chichi, 1999, Tayvan	7.62	0.31
D05	Düzce	duzce_og	Düzce, 1999, Türkiye	7.14	0.77
D06	Hector Mine	hec_og	Kaliforniya, 1999, ABD	7.13	0.02
D07	Seferhisar	izm19_og	İzmir, 2020, Türkiye	6.6	0.1
D08	Seferhisar	izm28_og	İzmir, 2020, Türkiye	6.6	0.15
D09	San Fernando	psl80_og	Pasadena, 1971, ABD	6.61	0.09
D10	Seferhisar	srh08_og	İzmir, 2020, Türkiye	6.6	0.06
D11	Tabas	tbs_og	Tabas, 1978, İran	7.35	0.82
D12	Tottori	totto_og	Tottori, 2000, Japonya	6.61	0.15



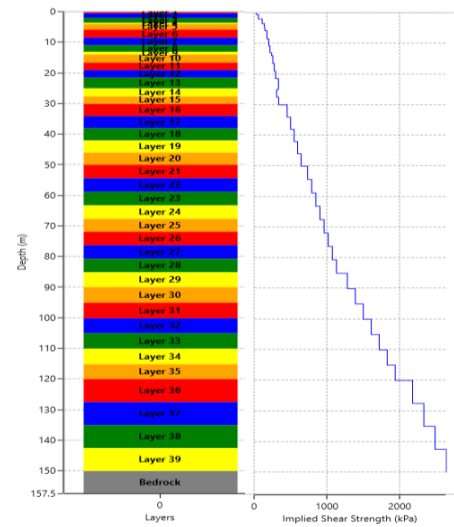
Şekil 4. Seçilen depremlere ait ivme kayıtları

III. YÖNTEM

Analizlerde hesaplama yöntemi olarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan bir boyutlu dinamik zemin tepki analizleri yapılmıştır. Analizlerde literatürde genel kabul görmüş Deepsoil yazılımı kullanılmıştır. Deprem girdi hareketleri kayma dalgası hızının (V_s) 700 – 750 m/s civarlarında olduğu seviyeden etkilenmiştir. Zemin profili boyunca zemin tabakaları genel olarak kum ağırlıklı olmasından dolayı boşluksuyu basıncı gelişimlerinin hesaplanması için Vucetic ve Dobry Kum [11] modeli seçilmiştir. G/G_0 ve sönüm eğrilerinin matematiksel olarak tanımlanması ise Darendeli (2001)'e [12] göre yapılmıştır. Zemin profili boyunca tabakalar için seçilen hesap model ve yöntemleri özet olarak Tablo 3 ile verilmiştir. Malzeme modellerine uygun olarak belirlenen Kayma dayanımı (Implied Shear Strength) değerlerinin derinlik ile değişimi Şekil 4 ile takdim edilmiştir.

Tablo 3. Zemin tabakaları için seçilen hesap model ve yöntemleri

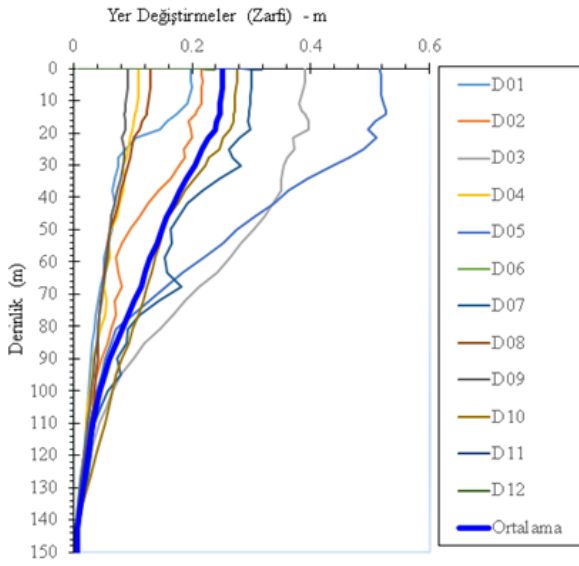
Tabaka No	$\tau_{target, implied} = c_v + \sigma'_v \tan(\phi)$ $c_v = \rho + V_s^2 \cdot 0.8 + 0.1\%$ (Tabaka üst ve alt sınırları) (kN/m ²)	Reduction Factor Formulation	PWP Model
1	15.29 – 21.02	MRDF-Darendeli	Clay - Matasovic
2	23.44 – 130.82	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
3	131.78 – 135.15	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
4	137.79 – 149.05	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
5	162.97 – 182.23	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
6	190.98 – 225.38	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
7	236.84 – 244.98	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
8	248.65 – 309.01	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
9	323.73 – 356.06	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
10	298.49 – 357.13	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
11	439.53 – 692.78	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
12	731.54 – 1208.42	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
13	1278.55 – 2085.26	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry
14	2198.48 – 2849.59	MRDF-Darendeli	Sand- Vucatic / Dobry



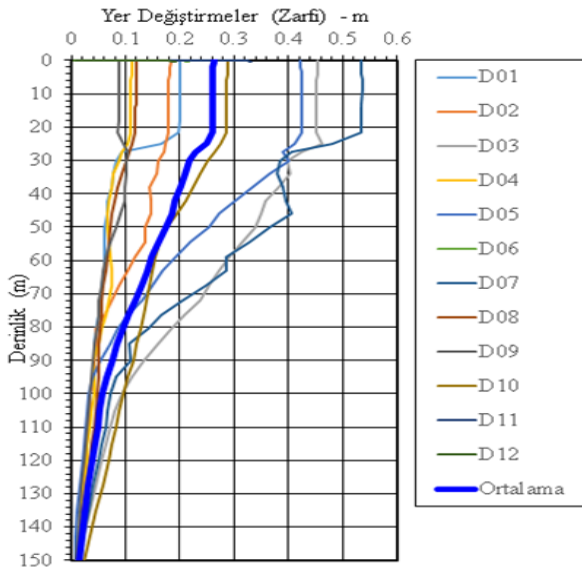
Şekil 4. Derinlik – Kayma Dayanımı değişimi.

IV. ANALİZ SONUÇLARI VE BULGULAR

İyileştirme öncesi için yapılan analizler ile en üst seviyedeki 15 metrelik zemin kısmı için uygulanan iyileştirme sonrası zemin özellikleri dikkate alınarak iki farklı durum için dinamik zemin tepki analizleri yapılmış ve sonuçları elde edilmiştir. İyileştirme sonrası zemin özellikleri yukarıda da belirtildiği gibi alan yer değiştirme oranına [8] göre belirlenmiştir. İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zemin profillerine ait yer değiştirmelerin derinlik ile değişimi Şekil 5 ve Şekil 6 ile verilmiştir.



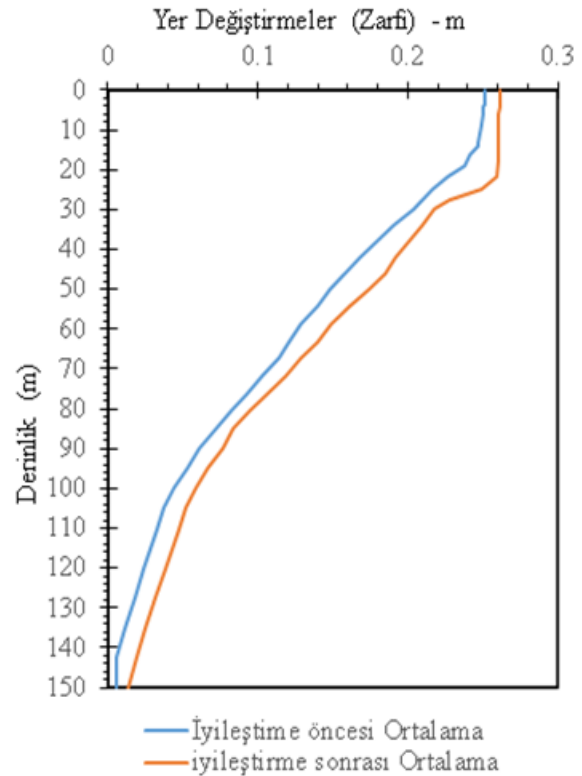
Şekil 5. İyileştirme uygulanmamış zemin profili ve 12 farklı deprem kaydı için analizler sonucunda derinlik boyunca elde edilen yer değiştirmeler.



Şekil 6. İyileştirme sonrası zemin profili ve 12 farklı deprem kaydı için analizler sonucunda derinlik boyunca elde edilen yer değiştirmeler.

İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zeminlere ait elde edilen analiz sonuçlarının daha iyi anlaşılması için derinlik boyunca yer değiştirmeler karşılaştırmalı olarak Şekil 7 ile verilmiştir. Karşılaştırmanın daha anlaşılır olması ve karmaşıklığın önlenmesi amacı ile 12 deprem girdi hareketine ait derinlik boyunca yer değiştirmelerin ortalamaları verilmiştir.

Şekil 7 incelendiğinde üst seviyede yapılan iyileştirme sonrası, bu bölgedeki (iyileştirme yapılan bölge) yer değiştirme hareketleri derinlik boyunca 0,26 m civarında sabit kalmıştır. Üst kesimde jet-grout iyileştirmesi uygulanan bölgenin rijit bir blok gibi yer değiştirme yaptığı görülmektedir. İyileştirme uygulanmamış zemin profilinde ise en üst seviyede yer değiştirmeler yaklaşık olarak 0,25 m olarak gerçekleşmiş ve üst bölge iyileştirilmiş zemin profiline nazaran daha fazla değişim göstermiştir. Yine Şekil 7 incelendiğinde iyileştirme sonrası yer değiştirmelerin tüm zemin profili için derinlik boyunca küçüğe olsa bir miktar arttığı görülmektedir.



Şekil 7. İyileştirme uygulanmamış ve üst bölgede jet-grout uygulaması yapılmış zemin profillerine 12 deprem hareketine ait yatay yer değiştirmelerin karşılaştırılması

V. TARTIŞMA

Bir önceki bölümde takdim edilen bulgular incelendiğinde jet-grout uygulaması sonrası üst seviyelerdeki yer değiştirmelerin daha az değişken olup yaklaşık 0.26 m civarında gerçekleştiği ve belirli bir derinliğe kadar (yaklaşık 20 m civarına kadar) pek bir değişime uğramadığı görülmektedir. Üst bölgede yapılan jet-grout uygulaması o bölgede etrafındaki zeminlere nazaran daha rijit kolonlar oluşturmaktadır. İlaveten yüksek basınçlı çimento enjeksiyonu ile teşkil edilen jet-gout kolonlarına yakın kesimlerde zemin malzemesinin yatay yer değiştirmesinden dolayı zemin boşluk oranında azalmalar meydana gelebilmektedir. Bunların neticesinde -5 m ile -20 m aralığında yapılan jet -grout uygulaması -20 m derinlik seviyesine kadar olan bölgedeki zemin rijitliğini artırması ile beklenen bir davranış olarak açıklanabilir.

Jet-grout uygulaması yapılmayan -20 m seviyesinin altındaki zemin profilinde de az da olsa yer değiştirmelerde farklılıklar görülmektedir. Bu durum ise şu şekilde izah edilebilir; üst bölgede yapılan jet-grout uygulaması ile bu seviyedeki zeminlerin birim hacim ağırlıkları dolayısı ile bu bölgedeki zeminlerin kütlesi artırılmaktadır. Bunun neticesinde üst bölgede yer alan zeminlerin ataletleri az da olsa jet-grout uygulaması neticesinde artmaktadır. Alt seviyelerdeki zeminlerde herhangi bir dayanım ve rijitlik değişimi olmamaktadır. Bu durum şu analoji ile tarif edilebilir. Yüksek bir yapının rijitliği sabit kalmak kaydı ile en üst katının kütlesini arttırılması analojisi. Verilen analojiye benzer olarak üst seviyelerdeki zemin kütlesindeki ve dolayısı ile ataletindeki artış tüm derinlik boyunca yatay yer değiştirmelerde bir miktar artışa, diğer bir değiş ile yatay yer değiştirmelerin genliğinde bir artışa neden olmuştur.

VI. SONUÇLAR

Deprem hareketleri neticesinde ele alınan kalın alüvyon istifi için Jet-groutlu ve jet-groutsuz zemin profilleri için yatay yer değiştirmeler arasındaki fark merteye bakımından oldukça sınırlı ve 1 cm civarında kalmıştır. Bu durum burada analizleri gerçekleştirilen kalın alüvyon istifi olması durumları için geçerli olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. 150 m civarında oldukça kalın alüvyon istiflerinde üst seviyelerde alüvyon kalınlığına nazaran oldukça sınırlı kalınlıklarda (15 m gibi alüvyon kalınlığının yaklaşık %10'u gibi)

yapılacak iyileştirmelerin zeminlerin genel dinamik tepkileri bakımından etkilerinin oldukça düşük ve sınırlı kalabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Kramer, S.L. Geoteknik Deprem Mühendisliği. Ed.:Bill Stenquist, Irwin Zucker, Gazi Kitabevi, Ankara, Türkiye, 2003.
- [2] Aslan M, Sınırlı Alanda Yapılan Zemin İyileştirmelerin Genel Zemin Davranışlarına Etkisi. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Manisa, Türkiye, s: 181, 2023.
- [3] DSİ, Devlet Su İşleri 22. Şube Müdürlüğü Sondaj Raporları, 2003.
- [4] Egetemel Sondajcılık Ltd. Şti., Zemin İyileştirme Raporu, 2020.
- [5] Bayraktar Jeoteknik, Zemin Etüd Veri Raporu (İlgili Sahaya ait), 2004.
- [6] MCBU Geoteknik Raporu (İHL), 2020.
- [7] Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Uzel, B., Akyüz, H. S. Geological and palaeoseismological evidence for late Pleistocene– Holocene activity on the Manisa Fault Zone, Western Anatolia. Turkish journal of earth sciences. 20(4), 449-474, 2011.
- [8] Erol, A.O., Bayram, Z.Ç. Jet Enjeksiyon Yöntemi. Yüksel proje uluslararası A.Ş. Ankara, 2014.
- [9] Vucetic, M., Dobry, R. Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of geotechnical engineering. 117, 89–107, 1991.
- [10] Seed, H. B. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Reoprt, EERC-70., 1970.
- [11] [Vucetic, M., Dobry, R. Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of geotechnical engineering. 117, 89–107, 1991.
- [12] Darendeli, M. B. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. The university of Texas at Austin, Texas University, "PDCA12-70 data sheet," Opto Speed SA, Mezzovico, Switzerland, 2001.