

BİR YÜKSEK DONATILI ZEMİN DUVARIN PERFORMANSI VE ANALİZİ

PERFORMANCE AND ANALYSIS OF A HIGH REINFORCED EARTH WALL

Akın ÖNALP¹, Ahmet Can MERT²

ÖZET

Dayanma duvarlarının betonarme konsol tipte yapılması yaklaşık 7 m yükseklikten sonra ekonomik olmamaktadır. Kocaeli bölgesinde yapılacak bir fabrika sahasında 23 m yükseklikte bir duvarın donatılı zemin olarak inşaatı gerçekleştirildikten bir süre sonra panellerde düzensiz hareketler belirmiş, yağışlı havalarda panel birleşme bölgelerinden malzeme çıkışı gözlemlenmiştir. Bu aşamada duvarın ötelenmeleri izlenmeye başlanmıştır. Hareketlerin artma eğilimi göstermesi nedeniyle duvarın stabilitesi analiz edilerek ötelenmelerin 300 mm' yi bulmuş olma olasılığı hesaplandığında, göçmenin önlenmesi için sistemin yatay ankraj uygulaması ile tutulmasına yönelik değerlendirme statik ve sismik koşullar için gerçekleştirilmiştir. Bu bildiriye duvar performansı değerlendirilerek bu düşük performansın geri dolgu özelliği, drenaj sorunları ve donatı türü'nden ne denli etkilenmiş olduğu değerlendirilecektir. Bunu izleyerek hareketlerin belirgin olduğu duvar kesiminde yatay ankraj ve zemin çivisi uygulaması analizi yapıldığında hareketlerin önlenip kama stabilitesi sağlandığı gibi, ankraj yükleri etkisiyle panellerde dolguya doğru 'kapanma' oluşabileceği hesaplanmıştır. Bu makalede, deformasyon analizleri ile toplam yüksekliğin yaklaşık %1,5 oranında yer değiştirmeye neden olan mekanizmanın tartışılması ve yatay zemin ankrajları veya zemin çivisi kullanımıyla devam eden yer değiştirmeleri önlenmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Donatılı Zemin Duvar, Kama Dengesi, Ankraj, Dinamik Sayısal Analiz

ABSTRACT

The use of retaining structures higher than about seven meters becomes uneconomical if cantilever walls are used. Support of a 23 m high fill in front of a factory building near Istanbul was attempted by the application of reinforced earth. Excessive movements estimated at 300 mm were observed about a year after the wall was commissioned. Irregular movement of facing panels as well as discharge of backfill material from among the panels after precipitation was detected. The erratic behaviour was attributed to poor

¹ Prof.Dr., Sakarya Üniversitesi (e.), onalpakin@gmail.com

² Dr.Öğr.Üyesi, Bahçeşehir Üniversitesi, ahmetcan.mert@bau.edu.tr (Sorumlu yazar)



quality backfill , improper drainage and use of synthetic reinforcing strips instead of galvanised iron. A stability analysis for the RF earth wall was carried out to confirm the observations. A solution to reduce the static and seismic vulnerability of the structure was attempted by applying horizontal ground anchors or soil nailing to the system. It was found that anchorage forces would result in appreciable inward movement of the panels as well as preventing wedge failure. This paper attempts to discuss the mechanisms that have led to about 1.5% displacement of the total height by deformation analyses and prevent the ongoing displacements through the use of horizontal soil anchorages or soil nailings.

Keywords: Reinforced Earth Wall, Wedge Stability, Anchors, Dynamic Numerical Analysis

1. GİRİŞ

Sert topoğrafik yapısı nedeniyle dayanma yapıları Türkiye’de yoğun olarak kullanılırlar. Buna bağlı olarak duvar yüksekliklerinin 10m’yi aştığı projeler sıkça söz konusu olmaktadır. Genelde tercih edilen rijit tip dayanma yapılarının analizi öncelikle kayma ve devrilmeye göre yapıldığında bu düzeyde yükseklikler için ekonomik olmayan çözümler belirlemektedir. Öte yanda, depremde davranış dayanma yapılarında önemli bir diğer sorun teşkil etmektedir. TBYS,2018’de öngörülmuş hesap yaklaşımları da deprem bölgelerinde yapılacak dayanma duvarlarında stabilite sorunları göstermektedir. Donatılı zemin duvarların davranışı masif tiplerden farklı olduğundan yüksek duvarların bu tipte imali, stabilitenin daha kolay sağlanması yanında ekonomik olması nedeniyle öne çıkmaktadır. Bu bildiride alışılmış yüksekliklerin üstünde bir duvarın donatılı zemin olarak projelendirilmesi, gelişen hareketlerin ölçülmesi ve stabilitenin korunması için geliştirilen çözümler ele alınmaktadır.

2. DUVARIN ÖZELLİĞİ

Eğimli arazide inşaa edilecek bir endüstri yapısında açık sahasının genişletilmesi için gerekli dolgu yapımı 3-23m yükseklikte çevre duvarların imalini gerektirmiştir (Şekil 1). Bu yükseklikte betonarme duvar yapımı stabilite sorunları getirdiği gibi, kabul edilemeyecek yapım maliyetleri söz konusu olduğundan çözümün donatılı zemin (toprakarme) sistemi ile sağlanması olanağı araştırılmıştır.

3. TEMEL ZEMİNİNİN ÖZELLİĞİ

Duvarın en yüksek yerinde özağırlık ve dış yüklerden temel zeminine $q_0=700$ kPa dolayında bir eşdeğer yük geleceği hesaplanmıştır. Yapılmış zemin araştırmalarında parsel temel zemininin “killi kireçtaşı” olduğu, yapılan sismik ölçümlerde kayma dalgası hızı $V_s=620$ m/s ölçüldüğü bildirildiğinden temel ortamının TBYS,2018’e göre ZC Yerel Zemin Sınıfı’na girdiği anlaşılmıştır.

Laboratuvarda yapılan tek eksenli basınç deneylerinden duvarın oturacağı anakaya için basma dayanımı $\sigma_{ci}= 4.3$ MPa , elastisite modülü de $E_s=890$ MPa olarak ölçülmüştür. Temel taşıma gücü tasarım dayanımının da $q_t>1000$ kPa olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu değerlerden temel zemininin yüksek duvar imali için elverişli olduğu, oturmaların ihmal edilebilecek düzeyde kalacağı anlaşılmıştır.



4. GERİ DOLGUNUN ÖZELLİKLERİ

KGM Teknik Şartnamesi ve uluslararası standartlar donatılı zemin imalatında kullanılacak geri dolgunun dane dağılımını Tablo 1.'deki gibi göstermektedir. Ayrıca üniformluk katsayısı $C_u > 5$, plastisite indisi $I_p < 6$ koşulu bulunmaktadır. Tabloda gri ile gösterilen kil içeriği yüzdesi sadık kalındığı sürece sorun yaratmasa da sahada büyük hacimlerde yapılacak dolgularda denetimi zor bir kalem olduğu ve birçok projede bu yüzdenin kolayca aşıldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 1. Donatılı Zemin Geri Dolgusu Şartnamesi

Çap	125 mm	90 mm	10 mm	600 μ m	63 μ m	2 μ m
% Geçen, P	100	85-100	25-100	10-65	0-10	0-10

Duvarın yapılacağı bölgede çok sayıda taş ocağı bulunduğu ancak buralardan alınacak kireçtaşı dolgu gereçlerinin azımsanmayacak yüzdelerde kil içerdiği gözönüne alındığında yukarıdaki görüş sorgulanmağa değer bulunmuştur. Geçmiş donatılı zemin duvar göçme vakaları üzerinde yapılan kapsamlı bir çalışma dizisi, göçme gözlemlenen duvarların yaklaşık %70 kadarının silt ve kil içeriği yüksek dolgu kullanımından kaynaklandığını ortaya çıkarmıştır (Koerner ve Koerner, 2013; 2018).

Laboratuvarda dolgu gereci numuneleri üzerinde yapılan sınıflama deneylerinde şartnamenin 'limitte' sağlandığı görülmüştür. ASTM D2487'ye göre **GC** killi çakıl olarak sınıflanan gereçler, büyük boyutlu(35x35cm) kesme kutusunda $c'=5\text{kPa}$, $\phi'=38^\circ$ parametreleri göstermiştir. Beliren c değerinin deney hatası değil, kil içeriğinden kaynaklanmış olması olasılığı vardır. Nitekim yapılan kompaksiyon deneyinde $\text{CBR}=\%27$ veren $\rho_{k\text{max}}=17.35\text{kN/m}^3$, $w_{\text{opt}}=\%18$ değerlerinin bu kuşkuyla destekler mahiyette olduğu değerlendirilmiştir.

5. DONATILARIN ÖZELLİĞİ

Donatı tipinin seçimi bu tekniğin ilk uygulandığı ülkeler Fransa ve Büyük Britanya'da yaygın tartışmaya sahne olmuştu. Donatılı zeminin 'mimarı' olarak bilinen Vidal sistemin galvanizli demir donatılarla çözümünü öngörmüşse de (Vidal, 1966) 70'li yıllardan başlayarak plastik endüstrisindeki gelişmeler donatıların yapay malzemelerle de imalini sağlamıştı. Galvaniz çeliğin olumlu yanı donatı şeridinin çekme dayanımının alacağı olası yüklerin çok üstünde olması ve üzerindeki dişlerle geri dolgu ile etkin bir kilitleme oluşturmalarıdır. Ağırlığı ve taşımada sorunlar ve asidik ortamda ayrışma sorunu ise olumsuz yanları olarak gösterilmiştir.

Bu projede yapay liflerle donatılmış polimer esaslı donatıların kullanılması proje müellifince tercih edilmiştir. Eni tipik olarak 50mm, kalınlığı 3mm olan bu donatının deformasyon modülü 1.35GPa, çekme dayanımı 45.2kN, olarak verilmiştir. Ancak, bu yükte birim deformasyonu %9.5'e ulaşmaktadır.

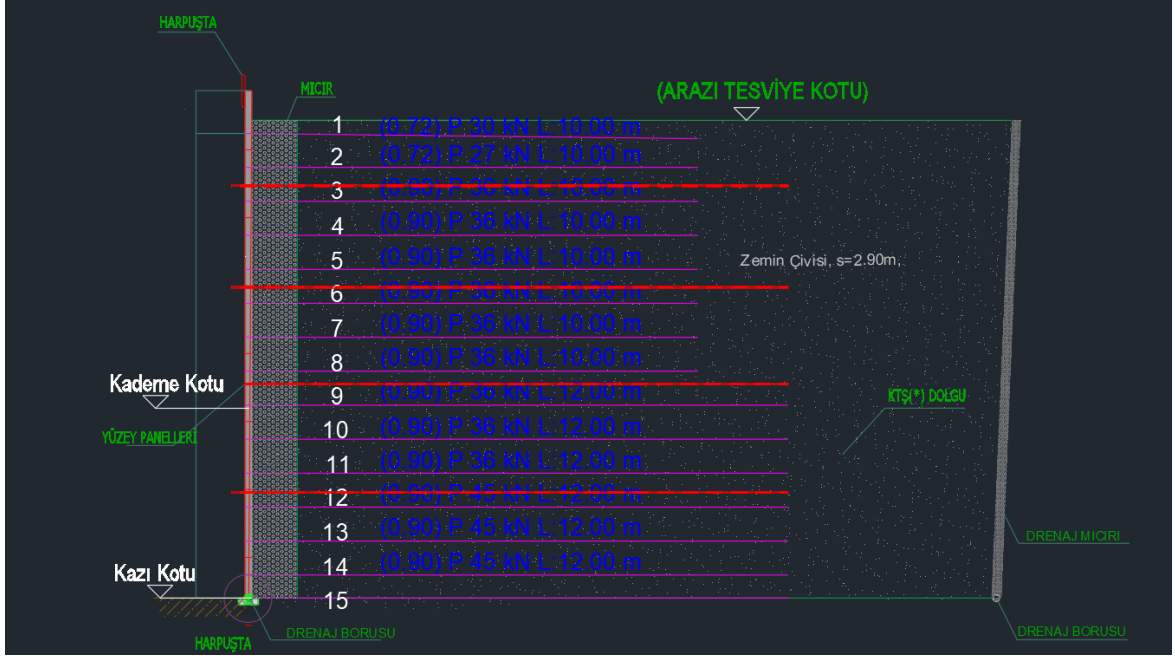
6. PROJELENDİRME VE PERFORMANS

Proje konusu duvar maksimumda 23.8m yükseklik ve $q=200\text{kPa}$ dış yükleme için BS 8006-1:2010 güvenlik sayıları ile boyutlandırılmış ve iç stabilite tahkiki şekil 1.'de gösterildiği



0.90m düşey aralıkla 15 sıra donatıyla gerçekleştirilmiştir. Üst 8 sıra 10m, alt 7 sıra 12m uzunlukta tasarlanmış, yüz kaplama panelleri 1.50x1.80m seçilmiştir.

Şekil 2. Duvarın imalattan sonraki görünümünü vermektedir. Projenin tamamlanmasından yaklaşık bir yıl sonra yüz panellerinde ötelenmeler, duvar tepesindeki beton kaplamalar ve küpeştelerde ise yaygın çatlaklar belirdiğinde sorunun nedenleri araştırılmaya, ötelenmeler geodetik yöntemle ölçülmeğe başlanmıştır.



Şekil 1. H=23.80m Yükseklikte Duvar için Kesit



Şekil 2. Duvarın Bitmiş Görüntüsü (ön yüz)

Yapımdan bu güne kadar (~4.5yıl) donatılı zeminin yenilme modları olan donatı kopması, sıyrılma ve kama kayması gibi iç stabilitenin kaybını gösteren hareketlere ilişkin bilgi ve gözlem bulunmamaktadır. Şekil 3a. duvarın batı yüzünden bir görünümü yansıtmaktadır. 2022'de yağışlı geçen bir dönemde bu yer değiştirmiş panellerin arasından yoğun malzeme

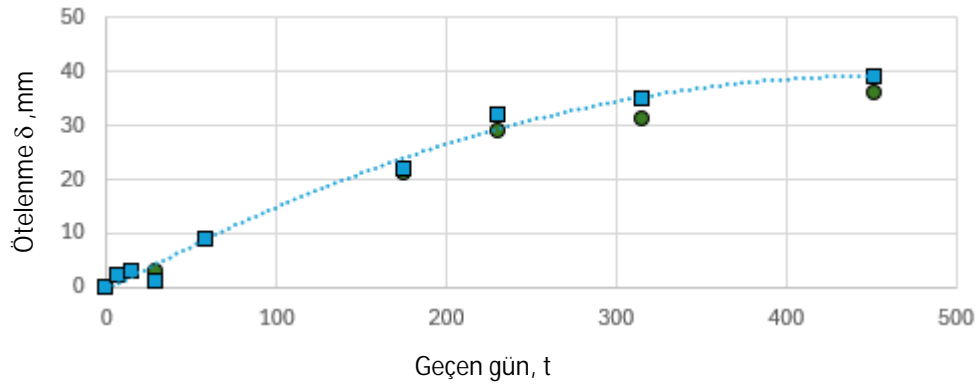


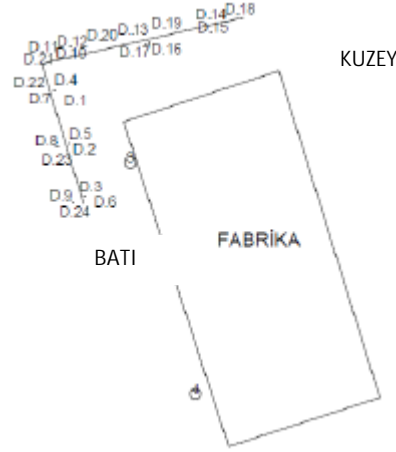
boşalması gözlemlendiğinde (Şekil 3b.) yüzeyden su girişinin tam önlenemediği de ayrıca tesbit edilmiştir.

Şekil 4a yapımından üç yıl sonra yaklaşık 20 panel üzerinde yapılmış olan ötelenme okumalarından örnekler göstermektedir. Önce batı duvarda gelişen okumalar daha sonra yavaşlarken son aylarda kuzey tarafta hız kazanmıştır (Şekil 4b). Ortalama hareket hızı $0.1 \text{ mm/gün} \approx 2.5 \text{ mm/ay}$ olarak görünmektedir.



Şekil 3. (a) Duvarda Hareketler ve (b) Sistem Dışına Taşınmış Dolgu Gerci

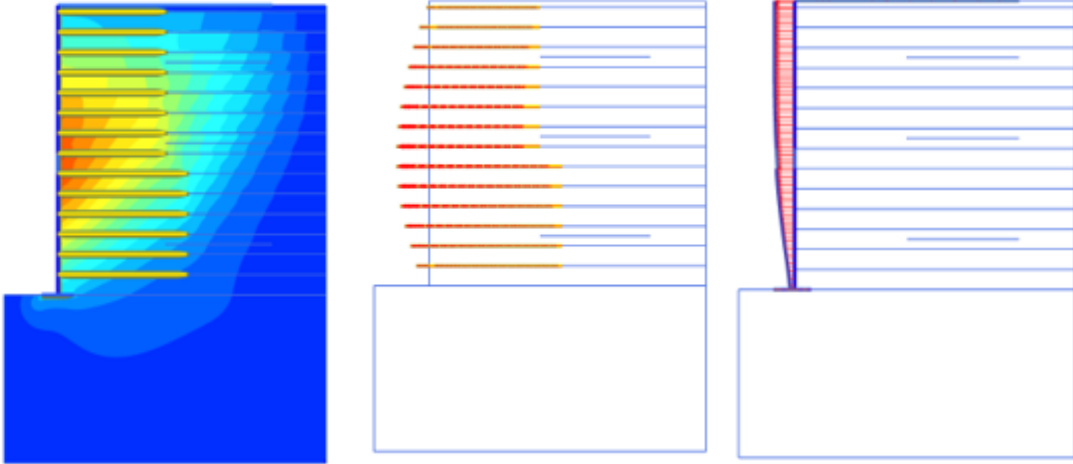




Şekil 4. (a) Ötelenme-zaman ölçüm sonuçları, (b) duvarların fabrikaya göre planda konumu

7. ANALİZ

Gelişen ötelenmelerin nedenine yönelik olarak duvarın en yüksek kesimi için iki boyutlu gerilme analizi sonlu elemanlar kullanımı ile yapılmıştır. Şekil 5. Analiz sonunda temelden yaklaşık 10m yukarıda hareketlerin panellerde 35, geri dolguda 30cm'lik hareket ettiği bulunmuştur (Şekil 5.). Bu bulgu duvar tepesindeki beton kaplamanın sağlam zemin üzerinde oturan fabrika binasından en az 10cm ayrıldığı gözlemi ile yaklaşık örtüşmüştür. Bu hesaplamada donatılara gelmesi beklenen çekme kuvveti de $T=166 \text{ kN/m}$ olarak bulunmuştur. Uygulamada beher metreye çekme dayanımı 45.2 olan 4 donatı geldiğinden $T= 185\text{kN/m'lik}$ direnç yeterli olsa da donatıları zorlandığı ve bunun yaklaşık 15mm'lik uzamaya karşılık olacağı hesaplanmıştır.



Şekil 5. Duvarda Hareketler (a)Yer Değiştirme Konturları (b)Donatılar (c)Duvar Yüzü
Toplanan bilgiler değerlendirildiğinde şu görüşler belirmiştir

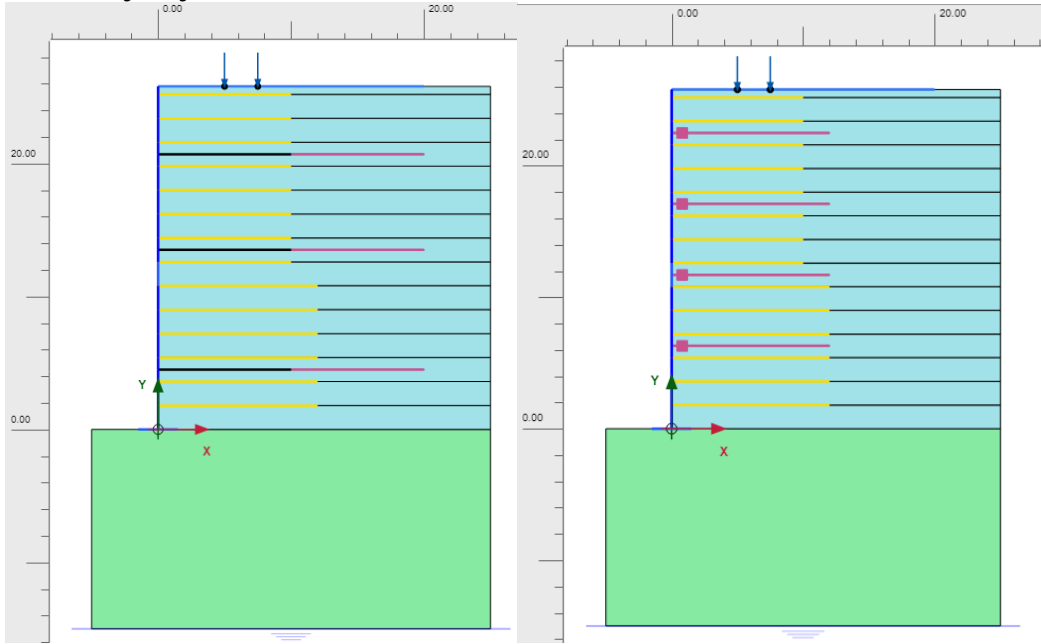
- 23.8m yükseklik için 10 ve 12m boylu donatıların kritik uzunlukta olması;
- Ötelenmeler sadece en yüksek bölgede belirdiği için donatıların zaman içinde uzaması(*creep*) olasılığı;
- Kullanılan geri dolguda kil içeriğinin yüksekliği nedeniyle dolgu donatı arayüzeyinde kayma(*slip*)



- İnşaat sırasında dolgu yüzeyinin tam yalıtılmamış olması nedeniyle suyun killi dolgu içine girip dolguyu sistem dışına taşıması

8. ÖNLEMLER VE ANALİZLER

Duvar da hareketlerin durmaması üzerine ilk önlem olarak yol kaplamasının onarımı ve yüzeyden su girişine imkan veren betonlanmamış bölgenin yalıtımı yapılmıştır. Duvar ötelenmelerinde bir yavaşlama olsa da bunların durmaması nedeniyle ek önlem alınması konusu duvarın kritik bölgelerine destek sağlanmasının gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Duvardaki panel ötelenmelerinin bariz olarak gözlemlendiği bölgelerin tüm duvara yayılmadığı göz önüne alındığında bu kritik bölgelerde yatay ankraj veya çivileme ile ek destek sağlanması düşünülmüştür. Nitekim geçmiş vakalar üzerinde yapılan inceleme ve çalışmalarda, duvarın kısmi iyileştirilmesi, eğer göçme tüm duvara yayılmamışsa, uygun bir çözüm olarak önerilmiştir (Paxon vd., 2004). Mevcut çalışmada ilk seçenek olarak, duvardaki ötelenmelerin önlenmesi amacıyla uygulanacak 3 sıra 20m uzunlukta (10m kök boyu) yatay ankrajlı çözüm irdelenmiştir (Şekil 7a). Ankrajlar 4, 8 ve 13. sıra geosentetik donatılar arasında kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Ankraj gergi yükleri o seviyedeki efektif gerilmeler göz önüne alınarak yukarıdan aşağı sırasıyla 100, 200 ve 300kN olarak tanımlanmıştır. İkinci seçenekte ise, 4 sıra 12m uzunlukta yatay zemin çivili çözüm irdelenmiştir (Şekil 7b). Çiviler 2-3, 5-6, 8-9 ve 11-12. sıra geosentetik donatılar arasında kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Çivi yatay aralıkları, her bir yüzey paneline gelecek şekilde yaklaşık 2.9m yatay aralıklı modellenmiştir.

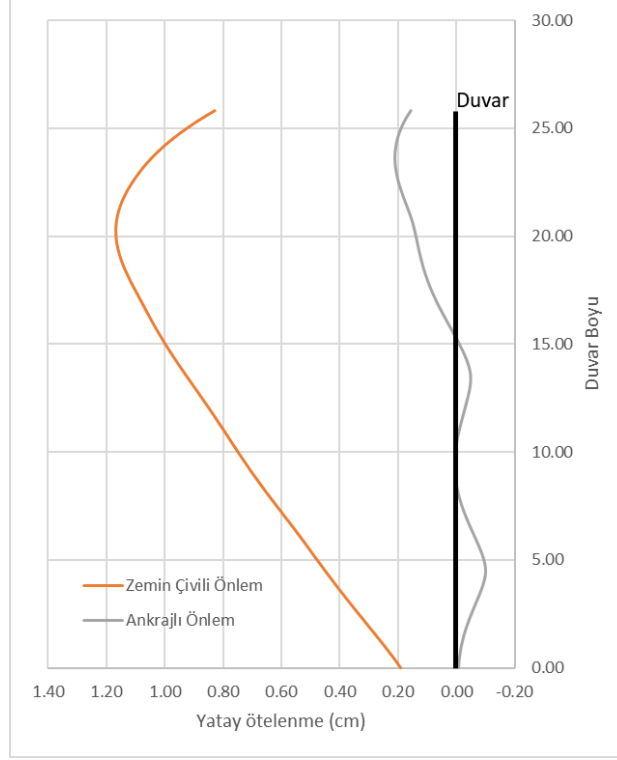


Şekil 7. (a) Ankrajlı önlem, (b) zemin çivili önlem

Statik analizlerden iki önlem sonrası duvar ön panellerinde elde edilen ötelenmeler Şekil 8' de özetlenmiştir. Buna göre, her iki çözüm de önlem sonrası duvar ek 1cm ötelenme ile güvenli tarafta kalmıştır. Gözlemlenen hareketin toptan göçme olmaması ve ankrajlı önleme göre daha düşük maliyeti sebebiyle zemin çivili çözümün imalatına karar verilmesi önerilmiştir (Paxon vd., 2004). Ayrıca önceki çalışmalar, donatılı zemin duvarların

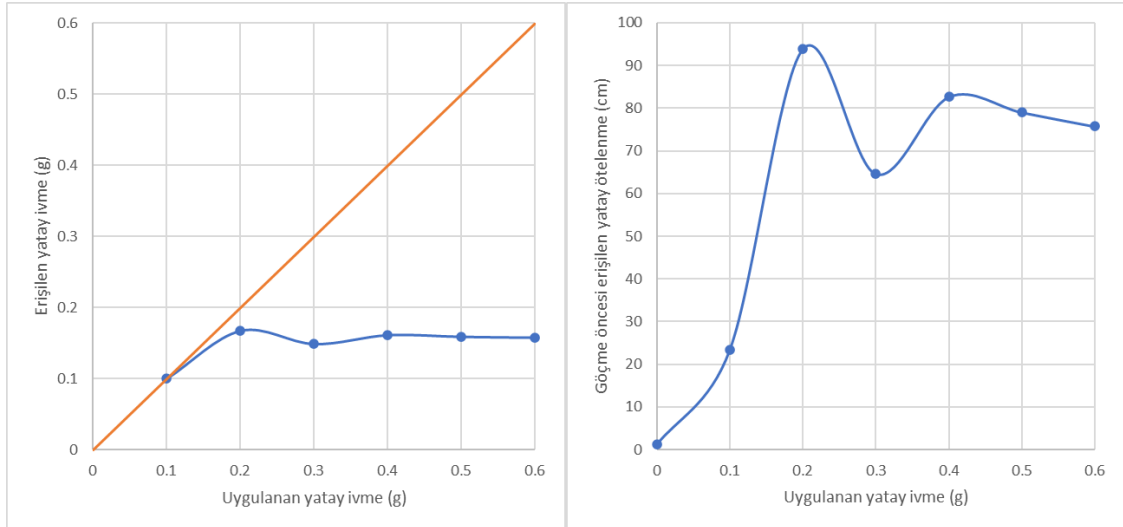


tedavisinde kullanılan zemin çivili önlem çözümünün de etkili olduğu göstermiştir (Long vd., 1984; Sivakumar Babu vd., 2011).



Şekil 8. Önlem seçeneklerinin ötelenme sonuçları

Önerilen zemin çivili tedavi için farklı yatay ivme değerlerinde (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6g) yarı-statik analizde sismik performans kısmen değerlendirilmiştir. Buna göre, sisteme verilen yatay ivmelerin analiz sonunda ortalama 0.15-0.2g değerlerine erişebildiği görülmüştür (Şekil 9a). Ötelenme bazlı yapılan değerlendirmeye göre ise analizde göçme öncesi duvarın erişebildiği maksimum yatay ötelenmeler, zemin çivili önlemin dinamik performansının da yeterli düzeyde kaldığını göstermiştir (Şekil 9b).



Şekil 9. Yarı-statik analiz çıktıları



Bu aşamada ankraj ve çivileme yöntemlerinin karşılaştırılması yapıldığında kapasitesi yüksek olan ankrajların kuyu delgisinin çapı nedeniyle donatılara zarar verebilme olasılığı ve de doğru gergi verilmemesi durumunda donatı yüklerinin boşalmasına neden olması nedeniyle daha zor imal edilebilmeleri başlıkları öne çıkmaktadır.

9. SONUÇ VE ÖNERİLERİ

Yüksek dayanma yapıları Türkiye’de şartnameyi sağlayan geri dolgu gerecinin hala kolayca bulunabilmesi nedeniyle donatılı zemin sistemi ile yapıldığında önemli mali kazanım söz konusu olmaktadır. Yüksek duvarlarda donatı yükleri aşırı düzeye çıkabildiğinden uzun vadede esneme gösterebilecek polimer esaslı donatı şeritleri yerine galvaniz demir kullanılması seçeneği değerlendirilmelidir. Duvarın aşırı ötelenme gösteren bölgelerinde sisteme zemin çivisi uygulaması ile müdahale olumlu sonuçlar sağlar.

Bu sistemle yapılmış duvarların 1999 depremlerinde oldukça iyi performans gösterdikleri bilinmektedir. Bu husus bu çalışma kapsamında yapılan analizle de görülmüştür.

KAYNAKLAR

- ASTM D2487 (2023), “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”, American Society of Testing Materials.
- BS 8006-1:2010 (2010), “Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills”, BSI British Standards.
- KGM Teknik Şartnamesi (2013), “Karayolu Teknik Şartnamesi (Yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üstyapı ve çeşitli işler)”, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Uzuner, B.A. (2007), “Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği”, Derya Kitabevi.
- Koerner, R.M. ve Koerner, G.R. (2013), “A data base, statistics and recommendations regarding 171 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls”, Journal, Geotextiles and Geomembranes, Vol 40, 20–27.
- Koerner, R.M. ve Koerner, G.R. (2018), “An extended data base and recommendations regarding 320 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls”, Journal Geotextiles and Geomembranes, Vol 46 (6), 904–912.
- Long, N.T., Livet, J., Boutonnet, M., Marchal, J. ve Olivier, G. (1984), “Repair of a Reinforced Earth Wall”, International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, 40.
- Sivakumar Babu, G.L., Murthy, B.R.S. ve Singh, V.P. (2011), “Soil Nailing for Rehabilitation of Reinforced Earth Wall Distress”, Proceedings of ICE-Ground Improvement, Vol 164, Issue GI4.
- Paxson, G., Cadden, A., Wargo, R. ve Gómez, J. (2004), “MSE Walls in Distress: Repair Them or Rebuild Them?”, International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, 15.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- TBDY (2018), “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği”, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.



Vidal, H., (1966), "La terre armée". Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics In: Série Matériaux 30, Supplement Nos. 223–239, July-August, 888–938.

