DEPREM YÜKLERİ ALTINDA İKİNCİL DONATIYA SAHİP GEOSENTETİK DONATILI İSTİNAT DUVARI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF GEOSYNTHETIC REINFORCED EARTH WALLS WITH SECONDARY REINFORCEMENT UNDER EARTHQUAKE LOADING

Murat Mert DEMİR[1], Eren BALABAN[2]

ÖZET

Geosentetik donatılı istinat duvarları hafif olmaları, hızlı ve ekonomik bir şekilde inşa edilmeleri sebebiyle günümüzde daha çok inşa edilmektedirler. Günümüzde donatılı istinat duvarlarında meydana gelen yatay deplasmanları daha da azaltmak amacıyla uzunlukları birincil donatıdan daha az olan ikincil donatılar kullanılmaktadır. İkincil donatı uzunluğu ve rijitliğinin, donatılı istinat duvarlarının deprem yükleri altındaki davranışına olan etkileri bu çalışma ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında sonlu elemanlar metodu kullanılarak üç farklı ikincil donatı uzunluğu (0.1H, 0.2H ve 0.3H), üç farklı ikincil donatı rijitliği (250 kN/m, 500 kN/m ve 1000 kN/m)'nin donatılı istinat duvarının deprem etkisi altındaki davranışına olan etkileri belirlenmiştir. İkincil donatı etkisi, birincil ve ikincil donatılarda meydana gelen maksimum çekme gerilmeleri, donatılı istinat duvarında meydana gelen yatay deformasyonlar dikkate alınarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Donatılı istinat duvarı, ikincil donatı, deprem, yatay deplasman*

ABSTRACT

Geosynhetic reinforced earth walls are more widely constructed since they are lightweight, economically more feasable and can be constructed fastly. Secondary reinforcements are used to lower lateral displacements nowadays. Length and rigidity of secondary reinforcements are investigated in this study under earthquake loads. Effect of three different secondary reinforcement length (0.1H, 0.2H and 0.3H) and three different secondary reinforcement rigidity (250 kN/m, 500 kN/m and 1000 kN/m) are determined using finite

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, SSR Mining, mettdemirr0101@gmail.com
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, erenb@eskisehir.edu.tr (Sorumlu yazar)

element method. The effect of secondary reinforcement is investigated considering maximum tensile forces acting over primary and secondary reinforcements and lateral displacement of reinforced earth wall.
Keywords: *Reinforced earth walls, secondary reinforcement, earthquake, lateral displacement*

1. GİRİŞ

Eğimli arazilerde zemini tabi şev açısından daha yüksek açılarda tutarak şev stabilitesi sağlamak amacıyla istinat duvarları inşa edilmektedir. Son yıllarda ise hafif olması, daha yüksek deplasmanları tolere edebilmesi nedeniyle geosentetik donatılı istinat duvarları klasik istinat duvarlarına göre daha fazla tercih edilmektedir (Huali vd., 2025). Uzunlukları daha kısa olan geosentetik donatılar yatay deplasmanları sınırlandırmak amacıyla, ana donatılar ile birlikte kullanılabilmektedir. Bu şekilde kullanılan, boyları yönetmelikte belirtilen minimum uzunluktan daha düşük olan donatılara ikincil donatılar denmektedir. İkincil donatıların kullanımı, ana donatıların bağlantı yüklerini azaltmak amacıyla Leshchinsky ve Vulova (2001) tarafından önerilmiştir. Geosentetik donatılı istinat duvarlarında ikincil donatı kullanılmasının, duvarın iç stabilitesini arttırdığı ve yenilme mekanizmasını değiştirdiği de yine aynı çalışmada görülmüştür. Jiang vd. (2015) ve Yan vd. (2016) yaptıkları çalışmalarda ikincil donatı kullanıldığı zaman, birincil donatılarda meydana gelen bağlantı ve maksimum çekme gerilmelerinin azaldığını, maksimum yatay deplasmanlarda da düşüş meydana geldiğini belirtmişlerdir. İkincil donatıların kullanılmayasıyla statik ve dinamik yükler altında meydana gelen yatay deplasmanlar azalmaktadır. (C. H. Liu ve Hung, 2020). İkincil donatının uzunluğu, rijitliği, aralarındaki mesafe ve yerlerinin donatılı istinat duvarının davranışını etkiledi bilinmektedir (Liv d., 2024). Jiang vd. (2020) yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar metodunu kullanarak ikincil donatının uzunluğu, rijitliği, bağlantı şekli ve ikincil donatı yerleşiminin donatılı istinat duvarında meydana gelen yatay deplasmanlara olan etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre daha uzun veya eksenel rijitliği daha yüksek bir ikincil donatı kullanıldığı zaman duvar yüzeyinde ölçülen yatay deplasmanların ve birincil donatı üzerinde meydana gelen gerilmelerin azaldığı görülmüştür. İkincil donatıların istinat duvarı davranışını olumlu yönde etkilediği Kaya vd. (2025) tarafından da ortaya konmuştur.

Geosentetik donatılı istinat duvarları deprem sırası ve sonrasında işlevselliklerini koruyabilmektedirler. Bu nedenle deprem olma riski taşıyan bölgelerde daha yaygın olarak tercih edilmektedirler (Huang, 2016; Kilic vd., 2021; Koseki, 2012; Kuwano vd., 2014; H. Liu ve Ling, 2012; Panah ve Eftekhari, 2021; Ren vd., 2022; Xu vd., 2020). Bu nedenle donatılı istinat duvarlarının deprem altındaki davranışlarının belirlenmesi önem taşımaktadır. Yapılan bu çalışmada, ikincil donatı uzunluğu ve rijitliğinin iki farklı deprem etkisi altında duvar yüzeyinde meydana gelen yatay deplasmanlara, birincil donatılarda oluşan çekme gerilmelerine ve duvar temelinde meydana gelen oturma miktarına olan etkisi araştırılmıştır.

2. METOT

Bu çalışmada elde edilen sonuçların gerçeğe en yakın olabilmesi amacıyla literatürde yer alan, kullanılan dolgu, geotekstil, duvar yüzeyi kaplaması gibi özellikleri ile inşa aşaması ve sonrası iyi bir şekilde izlenip raporlanmış olan Maree Michel geosentetik donatılı zemin-köprü sistemi Plaxis 2D sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmiştir

(Ardah vd., 2017; Ardah vd., 2018; Saghebfar vd., 2017). Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ile literatürdeki sonuçlar birbirlerine yeteri kadar yakınsadıktan sonra seçilen deprem ivmeleri kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır.

Maree Michel köprüsü, Amerika Birleşik Devletleri'nin Lousiana eyaletinde inşa edilmiştir. Köprü açıklığı 19.8 metre olup, 9.1 metre genişliğindedir. Köprü, geosentetik donatı ile iyileştirilmiş bir temel üzerine inşa edilen donatılı istinat duvarı üzerine oturmakta olup, temelden yol kaplamasının üst katına kadar toplamda 4.8 metrelik yüksekliğe sahiptir. Donatılı istinat duvarının yüksekliği ise 3.6 metredir. Donatılı istinat duvarının yapımı sırasında dolgu olarak granüler zemin kullanılırken, geosentetik olarak geotekstil tercih edilmiştir. Birincil donatılar arası düşey mesafe 0.2 m'dir. İkincil donatılar arası düşey mesafe 0.2 m'dir.

Sonlu elemanlar yazılımı olarak bu çalışmada Plaxis 2D v20 kullanılmıştır (Brinkgreve, 2002). Yapılan analizler sırasında 15 düğüm noktalı üçgensel elemanlar kullanılarak mesh yapısı oluşturulmuştur. Dolgu malzemesi olarak kullanılan granüler zemin pekleşen zemin (hardening soil), duvarın üzerine yapıldığı tabii zemin Mohr-Coulomb, duvar kaplaması ve geotekstil ise lineer elastik bünye modelleri kullanılarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar yazılımında kullanılan bünye modellerinin mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

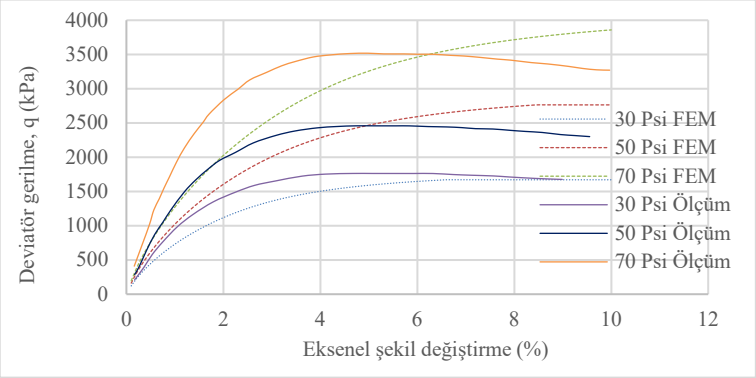
Tablo 1. Sonlu Elemanlar analizinde kullanılan zemin bünye modelleri ve özellikleri

Eleman Tipi	Tanım
Duvar Yüzeyi	Lineer Elastik Model; E = 30000 MPa; γ = 12.5 kN/m^3; Dimensions; 40.64*20.32*20.32 cm; υ = 0
Geotekstil	Lineer Elastik Tam Plastik Model; %2 Gerinimdeki Çekme Mukavemeti 13 * 17 kN/m; EA: 600 kN/m
Dolgu Malzemesi	Pekleşen Zemin Modeli; γ_d = 18 kN/m^3; γ = 19 kN/m^3; c = 20 kPa; φ = 51°; ψ = 21°; E_{50}^{ref} = 34 MPa; E_{ur}^{ref} = 103.2 MPa; E_{oed}^{ref} = 26400; υ = 0.2; m = 0.5
Tabii Zemin	Mohr- Coulomb Model; γ_d = 15.2 kN/m^3; γ = 18.65 kN/m^3; c = 17.7 kPa; φ = 27°; E = 30 MPa; υ = 0.2
Dolgu-Geotekstil Arayüzü	Lineer Elastik; c_a = 8.6 kPa; δ = 40.4^o
Duvar Yüzü ve Geotekstil Arayüzü	Lineer Elastik; c_a = 7 kPa; δ = 34°
Riprap	Lineer Elastik Model; E = 50 MPa; γ = 22 kN/m^3; υ = 0.25

Her bir geosentetik donatı katmanı bir adım olarak modellenmiştir. Statik modelleme toplamda 21 adımda yapılmıştır. Her bir adımda bir geosentetik katmanı ile çevresindeki zemin ve duvar yüzeyi aktive edilerek inşa simüle edilmiştir. Modüler blok özellikleri plaka elemanlara tanımlanmıştır. Her bir plaka elemanın yüksekliği modüler blok yüksekliğine eşit olarak modellenmiş ve birbirlerinden ayrı çalışmaları sağlanmıştır.

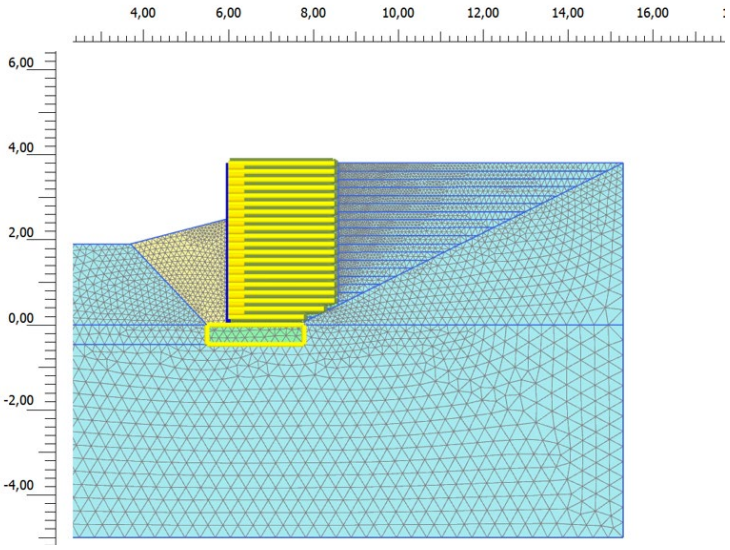
Model doğrulamasında kullanılan yatay deplasman değerleri, dinamik analiz aşamasına ait olmayıp istinat duvarı inşasının tamamlandığı aşamadan elde edilmiştir. Yatay deplasman tek bir noktadan alınmamış; duvarın ön yüzü boyunca farklı yüksekliklerdeki noktalardan elde edilen (U_x) değerleri kullanılarak yatay deplasman profili oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modelinden elde edilen bu profil, literatürde aynı yapım aşaması için raporlanan saha ölçümleriyle karşılaştırılmıştır.

Dinamik analizlere başlamadan önce, sonlu elemanlar modelinin gerçeğe yakın sonuçlar verdiği doğrulanmıştır. Bu amaçla Ardah vd. (2017) tarafından rapolanmış olan üç eksenli deney sonuçları ile sonlu elemanlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 1).

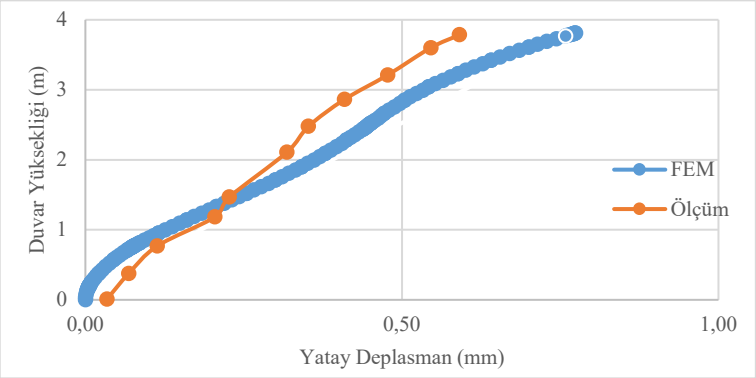


Şekil 1. Üç eksenli deney sonuçları ile sonlu elemanlar üç eksenli test sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil -1'den görülebileceği üzere düşük çevre basıncı altında sonlu elemanlar metodu ile elde edilen gerilme – şekil değiştirme grafiği deneysel veriyle kısmen uyumlu iken, çevre basıncının artmasıyla uyumsuzluk miktarı artmaktadır. Daha sonra ise duvar modeli oluşturulmuş (Şekil -1) ve duvar inşasından sonra elde edilen yatay deplasman değerleri ile sonlu elemanlar modelinden elde edilen yatay deplasmanlar karşılaştırılarak sonlu elemanlar modeli doğrulanmıştır (Şekil 3).



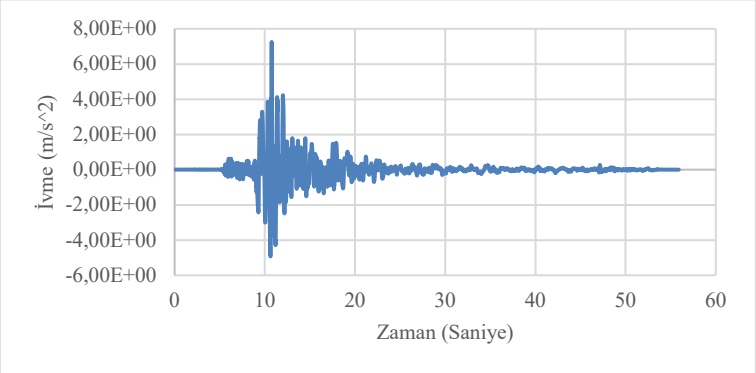
Şekil 2. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli



Şekil 3. Sonlu elemanlar ile ölçülen yatay deplasmanlar

Şekil 3'te görüldüğü üzere, sonlu elemanlar analizinden elde edilen yatay deplasman profili ile saha ölçümlerinden elde edilen yatay deplasman profili genel eğilim açısından uyum göstermektedir. Özellikle duvar yüksekliği boyunca yatay deplasmanın artış eğilimi sayısal model tarafından temsil edilebilmekte, üst bölgelerde ise ölçüm ve analiz sonuçları arasında sınırlı farklılıklar görülmektedir. Bu doğrultuda oluşturulan sonlu elemanlar modelinin duvarın yatay deformasyon davranışını yeterli düzeyde temsil ettiği değerlendirilmiştir.

Dinamik analizlerde 12 Kasım 1999 Düzce depremine ait ivme kaydı kullanılmıştır. Analizde kullanılan ivme-zaman kaydı Şekil 4'te sunulmuştur. Söz konusu ivme kaydı sonlu elemanlar modelinin alt sınırından yatay yönde uygulanmış; dinamik analizlerde oluşabilecek yapay sınır etkilerinin azaltılması amacıyla yan sınırlarda free field sınır koşulları ve model tabanında compliant base yaklaşımı kullanılmıştır.



Şekil 4. Düzce depremi ivme-zaman grafiği

Dinamik analizlerde Şekil 4'te verilen deprem ivme kaydı, model geometrisinin alt sınırından yatay yönde (X yönünde) prescribed acceleration olarak uygulanmış, düşey yöndeki deprem hareketi dikkate alınmamıştır. Dinamik yükleme sırasında model sınırlarından kaynaklanabilecek yapay dalga yansımalarının azaltılması amacıyla modelin yan sınırlarında free field sınır koşulları kullanılmıştır. Alt sınır ise compliant base olarak tanımlanmıştır. Sönümleyici yan sınırlar, model içerisinde yayılan ve sınırlara ulaşan gerilme dalgalarının önemli bir bölümünün absorbe edilmesini sağlayarak sınırdan geri yansıyan dalgaların analiz sonuçları üzerindeki etkisini sınırlandırmaktadır. Söz konusu sınır koşullarının kullanılmaması durumunda, sınırlardan geri yansıyan dalgalar model içerisinde ilave dinamik etkiler oluşturarak hesaplanan ivme ve deformasyonların olduğundan daha yüksek elde edilmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle dinamik

analizlerde kullanılan sınır koşulları, yapay sınır etkilerinin azaltılmasına yönelik olarak tanımlanmıştır.

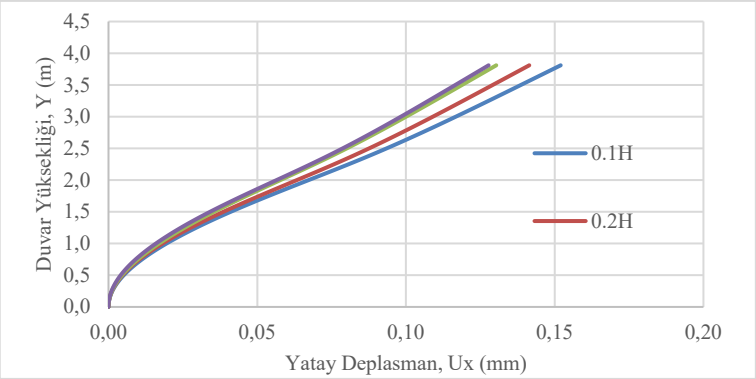
3. BULGULAR

İkincil donatı uzunluğu ve rijitliğinin deprem etkisi altındaki donatılı istinat duvarının davranışına olan etkisi bu bölümde değerlendirilmiştir. Donatılı istinat duvarının davranışı, yatay deplasman, birincil donatılarda oluşan toplam maksimum çekme kuvvetlerinde meydana gelen değişimler ile değerlendirilmiştir.

3.1. İkincil Donatı Uzunluğunun Etkisi

Bu bölümde ikincil donatı uzunluğunun duvar davranışı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla, duvar ön yüzü boyunca tabandan tepeye kadar farklı yüksekliklerde elde edilen yatay deplasman (U_x) değerleri değerlendirilmiştir. Bu değerler kullanılarak duvar yüksekliği boyunca yatay deplasman profilleri oluşturulmuş ve farklı ikincil donatı uzunlukları için karşılaştırılmıştır.

En yüksek yatay deplasman ikincil donatı boyu 0.1H olduğu zaman 0.14 mm olarak hesaplanmıştır. İkincil donatı boyu arttıkça meydana gelen yanal deplasmanlar azalmıştır. (Şekil 5)



Şekil 5. Farklı İkincil Donatı Boyları için hesaplanan yatay deplasman

Şekil 5'te ayrıca ikincil donatı boyu değişse de, duvar yüzeyinde meydana gelen deplasman davranışının tüm ikincil donatı boyu için aynı olduğu görülmüştür. Tüm donatı boyları için en yüksek yatay deformasyon miktarı duvarın üst kısmında hesaplanırken, hesaplanan yatay deplasmanlar duvar yüksekliği azaldıkça azalmıştır.

İkincil donatı uzunluğu hem birincil donatıdaki toplam maksimum çekme gerilmesini hem de ikincil donatı üzerinde oluşan çekme gerilmesini etkilemektedir. İkincil donatı olmadığı zaman, deprem sırasında ölçülen toplam maksimum çekme kuvveti 1.60 kN/m iken; ikinci donatı ile birlikte birincil donatıdaki toplam maksimum çekme kuvveti 1.08 kN/m'ye kadar düşmektedir. İkincil donatı boyunun artmasıyla birincil donatı da meydana gelen toplam maksimum çekme kuvvetinin azalma eğiliminde olduğu görülmüştür (Tablo 2).

Tablo 2. İkincil donatı boy ve eksenel rijitliğinin birincil donatıda oluşan toplam maksimum çekme kuvvetine olan etkisi

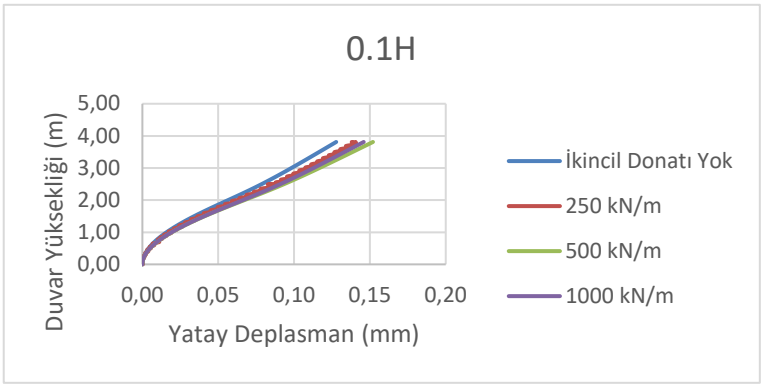
İkincil Donatı Uzunluğu	Eksenel Rijitlik	Birincil Donatıdaki Maksimum Toplam Çekme Kuvveti	İkincil Donatıdaki Maksimum Toplam Çekme Kuvveti
-	-	1.60	
0.1H	250	1.38	0.44
0.1H	500	1.34	0.56
0.1H	1000	1.19	0.73
0.2H	250	1.19	0.45
0.2H	500	1.22	0.50
0.2H	1000	1.08	0.70
0.3H	250	1.32	0.39
0.3H	500	1.13	0.52
0.3H	1000	1.13	0.63

İkincil donatı uzunluğunun aynı zamanda ikincil donatı üzerinde oluşan maksimum çekme kuvvetinin üzerinde de etkisi olduğu görülmektedir. İkincil donatı boyunun 0.1H'a eşit olduğu zaman en düşük maksimum çekme kuvvetinin oluştuğu görülmekle birlikte, donatı boyunun artmasıyla oluşan maksimum çekme kuvveti artmaktadır. İkincil donatılarda oluşan maksimum çekme kuvveti Tablo 2'de görülmektedir.

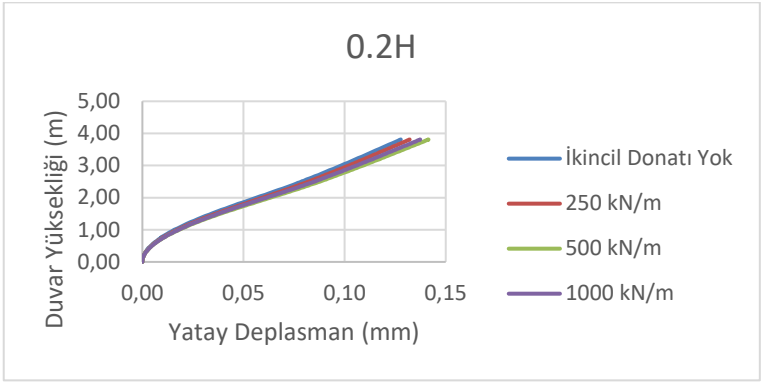
3.2. İkincil Donatı Rijitliğinin Etkisi

İkincil donatı rijitliğinin etkisinin belirlenebilmesi amacıyla tüm donatı boyları için 250 kN/m, 500 kN/m ve 1000 kN/m eksenel rijitliğe sahip donatılar için dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

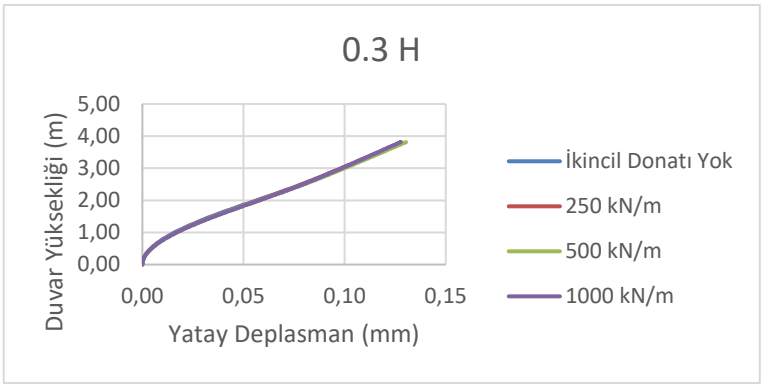
Yapılan analizler sonucunda ikincil donatı rijitliğinin duvar yüzeyinde meydana gele yatay deplasmanlara özellikle ikincil donatı boyunun düşük olduğu durumlarda etkili olduğu görüşmüştür (Şekil 6).



(a)



(b)

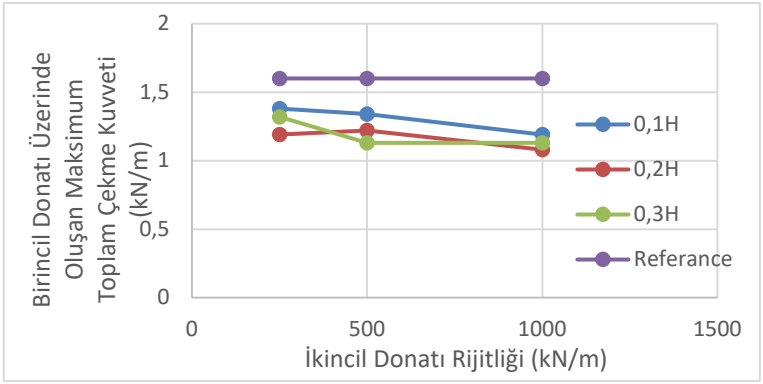


(c)

Şekil 6. Farklı ikincil donatı rijitlikleri için yatay deplasmanlar a) 0.1 H donatı boyu b) 0.2H donatı boyu c) 0.3H donatı boyu

Şekil 6'ten de görülebileceği üzerine donatı rijitliğinin artması duvar yüzeyinde meydana gelen deplasman miktarını azaltmaktadır. Ancak donatı boyu 0.2H'tan yüksek olduğu zaman donatı rijitliğinin etkisinin azaldığı Şekil 5 (c)'de görülmektedir. Ayrıca donatı rijitliğinin 500 kN/m'den 1000 kN/m'ye çıkması durumunda meydana gelen yatay deplasman miktarında artış görülmektedir.

Şekil 7'de, ikincil donatı boy ve rijitliğinin birincil donatı üzerinde oluşan çekme kuvvetlerine olan etkisi görülmektedir.

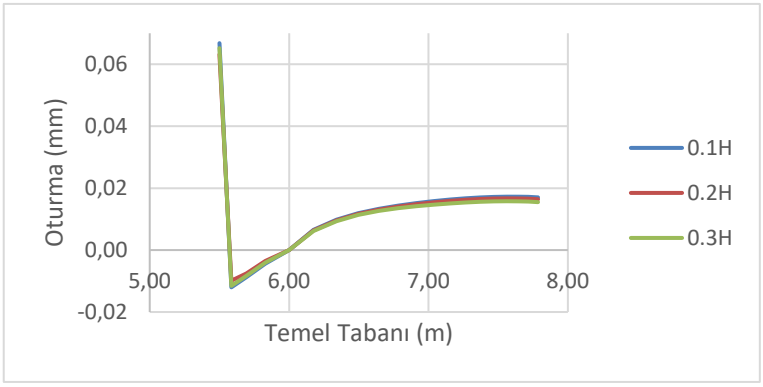


Şekil 7. İkincil donatı rijitliğine bağlı olarak birincil donatı maksimum toplam çekme kuvvetinde meydana gelen değişim a) 0.1H ikincil donatı uzunluğu b) 0.2H ikincil donatı uzunluğu c) 0.3H ikincil donatı uzunluğu

İkincil donatının rijitliğinin artması, birincil donatıda oluşan maksimum çekme kuvvetinde azalmaya neden olmaktadır. İkincil donatı uzunluğunun 0.1H, 0.2H ve 0.3H olması durumunda birincil donatıda oluşan en düşük toplam çekme kuvveti sırasıyla 1.19, 1.08 ve 1.13 kN/m olarak hesaplanmaktadır. Donatılı istinat duvarında ikincil donatı kullanılmadığı duruma göre; birincil donatıda meydana gelen çekme kuvvetinde en fazla %32.5'lik bir azalma meydana gelmektedir.

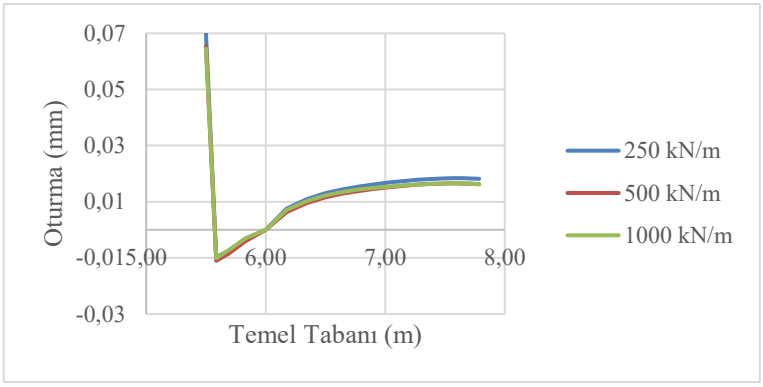
3.3. İkincil Donatının Meydana Gelen Oturmalara Olan Etkisi

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre kullanılan ikincil donatının boy ve rijitliğinin donatılı istinat duvarının uç ve topuk kısmında oluşan oturma ve kabarma miktarında etkili olduğu görülmüştür. Donatı uzunluğu arttıkça uç kısmında meydana gelen oturma miktarı azalırken, topuk kısmında meydana gelen kabarma miktarında da azalma olduğu görülmüştür (Şekil 8).



Şekil 8. Donatı uzunluğunun oturma davranışına olan etkisi

Benzer şekilde, ikincil donatı rijitliğinde meydana gelen artışta, donatılı istinat duvarı temelinde oluşan oturma ve kabarmaları etkilemektedir (Şekil 9). Rijitlik arttıkça, meydana gelen oturma ve kabarma miktarında meydana gelen azalmalar Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. Donatı rijitliğinin oturma davranışına olan etkisi

Oturma davranışında meydana gelen değişimler, istinat duvarının yaptığı yatay deplasman miktarını etkidiği görülmektedir. Artan donatı boyu ve rijitliği, oluşan oturmaları azaltarak, istinat duvarı davranışını kayma yenilmesine doğru değiştirmiştir. Bu nedenle, oluşan yatay deplasmanlarda artış meydana gelmiştir.

4. TARTIŞMA

Şekil 5 incelendiğinde ikincil donatı uzunluğunun değişmesiyle duvar yüzeyinde elde edilen yatay deplasman profillerinin birbirine oldukça yakın olduğu, ancak maksimum deplasman değerlerinde sınırlı farklılıklar meydana geldiği görülmektedir. Bu davranışın yalnızca ikincil donatı uzunluğu ile açıklanması yeterli değildir. İncelenen GRS-IBS sisteminin yumuşak ve deformasyona açık kil temel üzerine oturması nedeniyle, temel zemininin deformasyonu da duvar yüzeyinde gelişen yatay deplasmanların oluşum mekanizmasına katkıda bulunmaktadır.

Yumuşak temel üzerine oturan donatılı zemin sistemlerinde donatılı bölgenin rijitliği, temel zemininin yatay yayılması, topuk bölgesindeki oturma ve sistemin dönme davranışı arasında karşılıklı bir etkileşim bulunduğu literatürde ortaya konmuştur. Alfaro vd. (1997), donatılı sistem rijitliğindeki artışın yumuşak temel üzerindeki yatay yayılmayı azaltmasına rağmen, topuk bölgesindeki oturma ve dönme mekanizmasının değişmesi nedeniyle duvar yüzündeki dışa doğru yatay deplasmanın her durumda azalmadığını göstermiştir. Skinner ve Rowe (2003) ile Rowe ve Skinner (2001) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar da temel zemininin rijitliği ve deformabilitesinin donatılı duvarın yatay ve düşey deformasyonları üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Huang ve Luo (2010) tarafından deformasyona açık temeller üzerinde gerçekleştirilen deneylerde ise maksimum yatay deplasmanın en büyük temel oturması durumunda oluşmadığı ve temel deformasyonu arttıkça duvarın hareket mekanizmasının değişebildiği belirlenmiştir. Bu bulgular, yumuşak temel koşullarında donatı geometrisi ile duvar yüzeyindeki yatay deplasman arasında tek yönlü ve monoton bir ilişkinin her durumda beklenemeyeceğini göstermektedir. Bu nedenle mevcut çalışmada elde edilen yatay deplasman sonuçları, ikincil donatı uzunluğunun tek başına etkisi olarak değil, ikincil donatı ile yumuşak temel zemininin birleşik deformasyon davranışı kapsamında değerlendirilmiştir.

Literatürde yumuşak ve deformasyona açık temel koşullarında, donatılı zemin sistemlerinin yatay deplasman davranışının yalnızca donatı uzunluğu veya rijitliği ile açıklanamayacağı; temel zemininin deformasyonu, oturma ve dönme mekanizmalarının da duvar davranışı üzerinde etkili olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle donatı parametrelerindeki artışın yatay deplasmanda her durumda monoton bir azalma oluşturmadığı görülmektedir. Benzer şekilde, bu çalışmada elde edilen sonuçlarda da ikincil donatı uzunluğu ile maksimum yatay deplasman arasında monoton bir ilişki gözlenmemiştir. Bu bulgu, yumuşak temel koşullarında duvar davranışının yalnızca donatı geometrisine bağlı olmadığını, temel–donatılı zemin etkileşiminin de deformasyon mekanizması üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada farklı boy ve uzunluklarda ikincil donatı kullanımının donatılı istinat duvarlarının deprem yükleri altındaki performansı incelenmiştir. Çalışma sırasında 199 yılında meydana gelen Düzce depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- İkincil donatı kullanılması ile birlikte meydana gelen yatay deplasmanlar azalmaktadır. İkincil donatı boyunun artması ile yatay deplasmanlar azalmaktadır.
- İkincil donatı kullanılması sonrasında, birincil donatıda oluşan maksimum toplam çekme kuvveti azalmaktadır.
- İkincil donatın boyunun artması duvar yüzeyinde oluşan yatay deplasmanları azaltmaktadır.
- Daha rijit bir ikincil donatı kullanılması durumunda, birincil donatı üzerinde oluşan maksimum toplam çekme kuvveti azalmaktadır.
- İkincil donatı, duvarda meydana gelen oturma ve kabarma miktarına etki ederek, donatılı istinat duvarının yenilme mekanizmasında değişiklere yol açmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 26LÖT025 numaralı bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar destekleri için Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunu teşekkürlerini iletmektedir.

KAYNAKLAR

Huali, Pan, Muhammad Akbar, Muhammad Usman Arshid, vd. "Seismic resilience of geogrid reinforced concrete earth-retaining wall of various incremental panels based on physical and numerical modelling". *Structures* 71 (2025): 107901.

Leshchinsky, D., & Vulova, C. (2001). Numerical Investigation of the Effects of Geosynthetic Spacing on Failure Mechanisms in MSE Block Walls. *Geosynthetics International*, *8*(4), 343–365.

Jiang, Yan, Jie Han, Robert L. Parsons, ve Hongyi Cai. "Field Monitoring of Mechanically Stabilized Earth Walls to Investigate Secondary Reinforcement Effects." Editör Environmental and Architectural Engineering University of Kansas. Dept. of Civil, sy KS-15-09 (01 Aralık 2015).

Yan, J., Jie, H., L, P. R., & J, B. J. (2016). Field Instrumentation and Evaluation of Modular-Block MSE Walls with Secondary Geogrid Layers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *142*(12), 05016002.

Liu, Chih Hsuan, ve Ching Hung. "Seismic responses of grs walls with secondary reinforcements subjected to earthquake loading". *Applied Sciences (Switzerland)* 10, sy 20 (Ekim 2020): 1-24.

Li, Fuxiu, Wenhao Guo, ve Yewei Zheng. "Influence of secondary reinforcements on the behavior of geosynthetic reinforced soil walls". *Geotextiles and Geomembranes* 52, sy 4 (Ağustos 2024): 828-40.

Xu, P., K. Hatami, ve G. Jiang. "Shaking table study of the influence of facing on reinforced soil wall connection loads". *Geosynthetics International* 27, sy 4 (2020): 364-78.

Kilic, I. E., C. Cengiz, A. Edincliler, ve E. Guler. “Seismic behavior of geosynthetic-reinforced retaining walls backfilled with cohesive soil”. *Geotextiles and Geomembranes* 49, sy 5 (2021): 1256-69.

Koseki, Junichi. “Use of geosynthetics to improve seismic performance of earth structures”. *Geotextiles and Geomembranes* 34 (2012): 51-68.

Kuwano, J., Y. Miyata, ve J. Koseki. “Performance of reinforced soil walls during the 2011 Tohoku earthquake”. *Geosynthetics International* 21, sy 3 (2014): 179-96.

Liu, Huabei, ve Hoe I. Ling. “Seismic Responses of Reinforced Soil Retaining Walls and the Strain Softening of Backfill Soils”. *International Journal of Geomechanics* 12, sy 4 (2012): 351-56.

Panah, Ali Komak, ve Zakieh Eftekhari. “Shaking table tests on polymeric-strip reinforced-soil walls adjacent to a rock slope”. *Geotextiles and Geomembranes* 49, sy 3 (2021): 737-56.

Ren, Feifan, Qiangqiang Huang, ve Jianfeng Chen. “Centrifuge modeling of geosynthetic-reinforced soil retaining walls subjected to the combined effect of earthquakes and rainfall”. *Geotextiles and Geomembranes* 50, sy 3 (2022): 470-79.

Xu, P., K. Hatami, ve G. Jiang. “Shaking table study of the influence of facing on reinforced soil wall connection loads”. *Geosynthetics International* 27, sy 4 (2020): 364-78.

Ardah, A., Abu-Farsakh, M., & Voyiadjis, G. (2017). Numerical evaluation of the performance of a Geosynthetic Reinforced Soil-Integrated Bridge System (GRS-IBS) under different loading conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, *45*(6), 558-569.

Ardah, A., Abu-Farsakh, M., & Voyiadjis, G. (2018). Numerical Evaluation of the Effect of Differential Settlement on the Performance of GRS-IBS. *Geosynthetics International*, *25*, 1-45.

Saghebfar, M., Abu-Farsakh, M., Ardah, A., Chen, Q., & Fernandez, B. A. (2017). Performance monitoring of Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System (GRS-IBS) in Louisiana. *Geotextiles and Geomembranes*, *45*(2), 34-47.

Alfaro, M. C., Hayashi, S., Miura, N., & Bergado, D. T. (1997). Deformation of reinforced soil wall-embankment system on soft clay foundation. Soils and Foundations, 37(4), 33–46.

Rowe, R. K., & Skinner, G. D. (2001). Numerical analysis of geosynthetic reinforced retaining wall constructed on a layered soil foundation. Geotextiles and Geomembranes, 19(7), 387–412.

Skinner, G. D., & Rowe, R. K. (2003). Design and behaviour of geosynthetic-reinforced soil walls constructed on yielding foundations. Geosynthetics International, 10(6), 200–214.

Huang, C. C., & Luo, W. M. (2010). Behavior of cantilever and geosynthetic-reinforced walls on deformable foundations. Geotextiles and Geomembranes, 28(5), 448–459.

Liu, H. (2012). Long-term lateral displacement of geosynthetic-reinforced soil segmental retaining walls. Geotextiles and Geomembranes, 32, 18–27.