4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

SİSMİK AKTİF TOPRAK BASINCININ ETKİSİNDEKİ 3 M YÜKSEKLİĞİNDEKİ HARÇLI MOLOZ TAŞ DUVARLARIN OPTİMİZASYONU

OPTIMIZATION OF 3 M HIGH MORTARED RUBBLE STONE RETAINING WALLS UNDER SEISMIC ACTIVE EARTH PRESSURE

Semanur GÜLER[1] , Erol ŞADOGLU [2]

ÖZET

Harçlı moloz taş dayanma duvarlarının deprem etkisi altındaki güvenli ve ekonomik tasarımı, sismik yüklerin tasarım sürecinde dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada, sismik aktif toprak basıncı etkisi altında 3 m yüksekliğindeki harçlı moloz taş dayanma duvarlarının optimum geometrisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sismik aktif toprak basıncı Mononobe–Okabe teorisi kullanılarak hesaplanmış ve MATLAB ortamında geliştirilen fmincon optimizasyon algoritması ile optimum tasarım gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon modelinde amaç fonksiyonu, duvarın toplam kesit alanının minimize edilmesi olarak tanımlanmış; devrilme, kayma, taşıma gücü, eksantrisite ve geometrik koşullar kısıt olarak dikkate alınmıştır. Analizlerde farklı zemin içsel sürtünme açıları ile yatay ve düşey deprem katsayılarının optimum duvar geometrisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, zemin içsel sürtünme açısındaki artışın optimum kesit alanını azalttığını, yatay deprem katsayısındaki artışın ise daha büyük duvar kesitlerinin oluşmasına neden olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, geliştirilen optimizasyon yaklaşımının sismik yükler altında güvenli ve ekonomik harçlı moloz taş dayanma duvarlarının tasarımında etkin bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Harçlı moloz taş dayanma duvarı, sismik aktif toprak basıncı, optimizasyon, MATLAB, Mononobe–Okabe.

ABSTRACT

The safe and economical design of mortared rubble stone retaining walls under seismic loading requires the consideration of seismic effects during the design process. In this study, the optimum geometry of a 3 m high mortared rubble stone retaining wall subjected to seismic active earth pressure was investigated. The seismic active earth pressure was calculated using the Mononobe–Okabe theory, and the optimum wall geometry was determined using the fmincon optimization algorithm implemented in MATLAB. In the optimization model, the objective function was defined as the minimization of the total cross-sectional area of the wall, while overturning, sliding, bearing capacity, eccentricity, and geometric requirements were incorporated as

[1]Semanur Güler**,** İnşaat Mühendisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Anabilim Dalı, Trabzon, Türkiye, (smanurgler@gmail.com) **(Sorumlu yazar)**
[2] Prof. Dr. Erol Şadoğlu, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı, Trabzon, Türkiye, e-posta: esadoglu@ktu.edu.tr

constraints. The effects of different soil internal friction angles as well as horizontal and vertical seismic coefficients on the optimum wall geometry were investigated. The results indicated that an increase in the soil internal friction angle reduced the optimum cross-sectional area, whereas an increase in the horizontal seismic coefficient resulted in larger wall sections. Overall, the developed optimization approach was found to be an effective method for achieving safe and economical designs of mortared rubble stone retaining walls under seismic loading.

Keywords: Mortared rubble stone retaining wall, seismic active earth pressure, optimization, MATLAB, Mononobe–Okabe.

1. GİRİŞ

Harçlı moloz taş dayanma duvarları, dayanıklılıkları, doğal malzeme kullanımı ve uzun hizmet ömürleri nedeniyle kara yolu, teraslama ve kırsal altyapı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Koçak, 1999; Nuhoğlu vd., 2021). Deprem etkisi altındaki bu yapıların güvenli tasarımı, sismik etkilerin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Deprem sırasında oluşan yatay ve düşey ivmeler aktif toprak basıncını artırarak devrilme, kayma ve taşıma gücü yetersizliği gibi göçme mekanizmalarının oluşma riskini yükseltmektedir. Bu nedenle sismik aktif toprak basıncının doğru belirlenmesi güvenli tasarım açısından önem taşımaktadır (Richards ve Elms, 1992; EN 1998-1:2005). Sismik aktif toprak basıncının hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan Mononobe–Okabe teorisi, Coulomb yaklaşımını deprem etkileriyle birleştirerek sismik koşullar altında oluşan aktif toprak basıncının hesaplanmasına olanak sağlamaktadır (Okabe, 1926; Veletsos ve Younan, 1997). Geleneksel tasarım yöntemleri çoğu zaman gereğinden büyük kesitlerin seçilmesine neden olurken, optimizasyon yöntemleri güvenlik koşullarını sağlayan en ekonomik kesit geometrisinin belirlenmesini mümkün kılmaktadır (Kayhan ve Demir, 2016; Temür ve Bekdaş, 2018; Kayabekir vd., 2020). Bu çalışmada 3 m yüksekliğindeki harçlı moloz taş dayanma duvarlarının sismik aktif toprak basıncı altındaki optimum geometrileri MATLAB ortamında geliştirilen optimizasyon modeli ile belirlenmiştir. Duvar kesit alanının en küçüklenmesi amaçlanmış; devrilme, kayma, taşıma gücü, eksantrisite ve geometrik koşullar optimizasyon kısıtları olarak tanımlanmıştır. Analizler farklı içsel sürtünme açıları ve yatay deprem katsayıları için gerçekleştirilmiş, elde edilen optimum kesitler güvenlik ve ekonomik tasarım açısından değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada, sismik aktif toprak basıncı etkisi altında bulunan 3 m yüksekliğindeki harçlı moloz taş dayanma duvarlarının optimum geometrisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Analizlerde toplam duvar yüksekliği ($H + D_f = 3$) m olan dayanma duvarları ele alınmıştır. Duvar arkasındaki dolgu zemininin yüzeyi yatay kabul edilmiş ve sürşarj yükü sabit tutulmuştur. Optimizasyon analizleri, farklı zemin özellikleri ve deprem yükleme koşulları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.Zemin koşullarının tasarım üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla içsel sürtünme açısı $\varphi = 30°$, 35° ve 40° olarak seçilmiş olarak seçilmiştir. Yatay deprem katsayısı (k_h) için ise (0.10), (0.20), (0.30) ve (0.40) değerleri kullanılmıştır. Düşey deprem katsayısı, yatay deprem katsayısının yarısı esas alınarak $k_v = \pm 0.5\ k_h$ kabul edilmiştir şeklinde tanımlanmış ve düşey deprem etkisinin her iki yönü ayrı yükleme durumu olarak değerlendirilmiştir. Böylece farklı içsel sürtünme açıları ve yatay

deprem katsayılarının yanı sıra düşey deprem etkisinin yönünün optimum duvar geometrisi üzerindeki etkisi de incelenmiştir.Sismik aktif toprak basınçları Mononobe–Okabe teorisi kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen deprem yükleri MATLAB ortamında geliştirilen optimizasyon modeline aktarılmıştır (Okabe, 1926; Veletsos ve Younan, 1997). Optimum tasarımın belirlenmesinde MATLAB ortamında bulunan fmincon algoritmasından yararlanılmıştır (Bozkurt ve Yazıcıoğlu, 2015). Optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu, güvenlik koşullarını sağlayan duvar toplam kesit alanının minimize edilmesi olarak tanımlanmıştır. Devrilme, kayma, taşıma gücü ve eksantrisite kontrolleri ile geometrik koşullar ise doğrusal olmayan kısıt fonksiyonları olarak modele dahil edilmiştir (EN 1997-1:2005; AFAD, 2007).Bu kapsamda, farklı zemin ve deprem parametreleri için güvenlik koşullarını sağlayan optimum duvar geometrileri belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar üzerinden sismik yüklerin tasarım değişkenleri ile kesit alanı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

2.2. Sismik Aktif Toprak Basıncı

Bu çalışmada deprem etkisi altında oluşan aktif toprak basınçlarının belirlenmesinde Mononobe–Okabe teorisi kullanılmıştır. Bu teori, Coulomb aktif toprak basıncı yaklaşımının deprem etkilerini de dikkate alan geliştirilmiş şekli olup, yatay ve düşey deprem ivmelerinin zemin kamasında oluşturduğu atalet kuvvetlerini hesaba katmaktadır. Böylece deprem sırasında dayanma duvarına etkiyen sismik aktif toprak basıncı belirlenebilmektedir (Okabe, 1926; Veletsos ve Younan, 1997).

Coulomb aktif toprak basıncı katsayısı Denklem (1)'de verilmiştir.

$$\mathrm{Ka} = \frac{\cos^2(\varphi-\theta)}{\cos^2(\theta)\ \cos^2(\theta+\delta)\left[\left(1+\sqrt{\frac{(\sin(\varphi+\delta)\sin(\varphi-\beta))/\cos(\theta+\delta)}{\cos(\theta-\beta)}}\right)\right]^2} \tag{1}$$

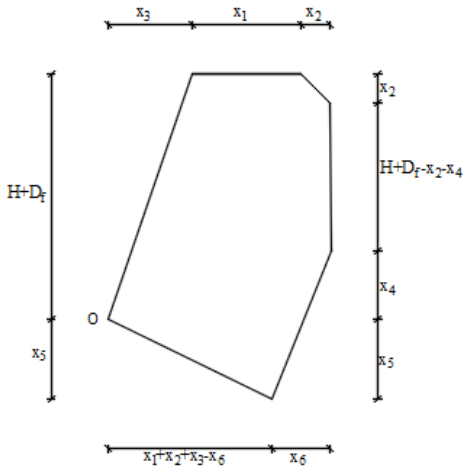
Coulomb aktif toprak basıncı kuvveti Denklem (2)'de verilmiştir.

$$\mathrm{Pa} = \gamma\frac{H^2}{2}Ka \tag{2}$$

2.3. Optimizasyon Modeli

Optimizasyon problemi, güvenlik koşullarını sağlayan minimum kesit alanına sahip dayanma duvarının belirlenmesi amacıyla doğrusal olmayan kısıtlı optimizasyon problemi olarak tanımlanmıştır. Optimizasyonda kullanılan tasarım değişkenleri Denklem (3)'te verilen vektör ile ifade edilmiştir.

$$x = [x_1\ \ x_2\ \ x_3\ \ x_4\ \ x_5\ \ x_6] \tag{3}$$



Şekil 1. Tasarım Değişkenleri Tanımlanması

Duvar geometrisi, Denklem (3)'te verilen tasarım değişkenleri kullanılarak tanımlanmıştır. Optimizasyon sürecinde bu değişkenler, devrilme, kayma, taşıma gücü, eksantrisite ve geometrik kısıtlar altında duvar kesit alanını minimum yapacak şekilde belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu olarak duvarın toplam kesit alanının minimum yapılması seçilmiş olup, amaç fonksiyonu Denklem (4)'de verilmiştir.

$$f(x) = (H_arka)\cdot(x_1 + x_2 + x_3) - 0.5\cdot(\, x_3\cdot H_Df + x_5\cdot(x_1 + x_2 + x_3 - x_6) + x_6\cdot(x_4 + x_5) + x_2^2) \quad (4)$$

2.4. Tasarım Kısıtları

Optimizasyon modelinde devrilme, kayma, taşıma gücü ve eksantrisite kontrolleri doğrusal olmayan kısıt fonksiyonları olarak tanımlanmıştır Devrilmeye karşı $FS_{(dev)} \geq 1.30$**,** kaymaya karşı ise $FS_{(kayma)} \geq 1.10$ koşulları sağlanmış; taşıma gücü ve eksantrisite kontrollerinde ilgili güvenlik ve geometrik koşullar kısıtlar aracılığıyla tanımlanmıştır (EN 1997-1, 2005; AFAD, 2007).

Tanımlanan kısıtların tamamının sağlanması, optimizasyon problemindeki uygulanabilir çözüm bölgesini oluşturmaktadır. Optimum tasarım ise bu uygulanabilir çözüm bölgesi içerisinde, amaç fonksiyonu olarak tanımlanan duvar toplam kesit alanının minimum olduğu tasarım değişkenlerinin belirlenmesiyle elde edilmiştir. Böylece yalnızca güvenlik koşullarını sağlayan bir çözüm değil, söz konusu koşullar altında en uygun tasarım kriterini sağlayan çözüm optimum çözüm olarak belirlenmiştir.

2.5. MATLAB ile Optimizasyon Süreci

Optimizasyon analizleri MATLAB ortamında geliştirilen program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çözüm sürecinde fmincon algoritması tercih edilmiş ve her deprem seviyesi için bağımsız optimizasyon işlemleri yürütülmüştür. Başlangıç tasarım değişkenleri

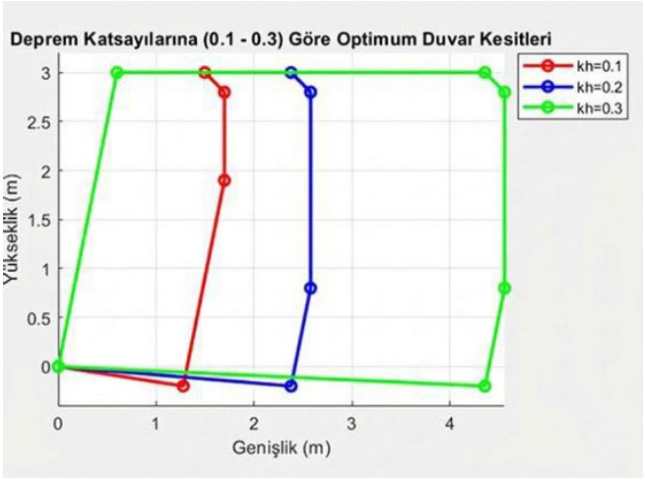
tanımlandıktan sonra doğrusal ve doğrusal olmayan kısıtlar modele uygulanmış, algoritma her iterasyonda amaç fonksiyonunu minimize ederek güvenlik koşullarını sağlayan optimum kesit boyutlarını belirlemiştir. Analizler sonucunda her kayma mukavemeti açısı ve deprem katsayısı için optimum tasarım değişkenleri elde edilmiş, bu değişkenler kullanılarak dayanma duvarlarının kesit alanları ve geometrik özellikleri değerlendirilmiştir. (Hayalioğlu ve Gönden, 2010; Kaymaz, 2006)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı zemin koşullarının dayanma duvarlarının optimum kesit geometrisi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla içsel sürtünme açısı kullanılan φ = 30°, 35° ve 40° olarak dikkate alınmıştır. Duvar yüksekliği ve diğer zemin ile duvar özellikleri sabit tutularak, içsel sürtünme açısındaki değişimin optimum tasarım üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu çalışmada farklı duvar yükseklikleri için bu içsel sürtünme açılarında optimum kesitler belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.1. φ = 30° İçin Optimum Sonuçlar (1 + k_v)

ϕ=30∘ için (1+k_v) yükleme durumu altında gerçekleştirilen optimizasyon analizlerinden elde edilen sonuçlar, yatay deprem ivme katsayısı k_h'nin artmasının optimum tasarım üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Analizlerde k_h=0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 değerleri dikkate alınmıştır.k_h=0.10 için optimizasyon sonucunda amaç fonksiyonu değeri f_{val}=3.7407 olarak elde edilmiştir. k_h=0.20 için f_{val}=6.6343, k_h=0.30 için f_{val}=12.461 bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, yatay deprem ivme katsayısındaki artışla birlikte amaç fonksiyonu değerinin düzenli olarak arttığını göstermektedir. Kısıt fonksiyonları incelendiğinde, her bir k_h değeri için devrilme, kayma, taşıma gücü ve eksantrisite koşullarının optimizasyon sürecinde birlikte değerlendirildiği görülmektedir. Deprem katsayısının artmasıyla birlikte özellikle kayma koşulunun tasarım üzerindeki etkisinin belirginleştiği, bununla birlikte diğer dış stabilite koşullarının da optimum çözümün belirlenmesinde etkili olduğu görülmüştür.



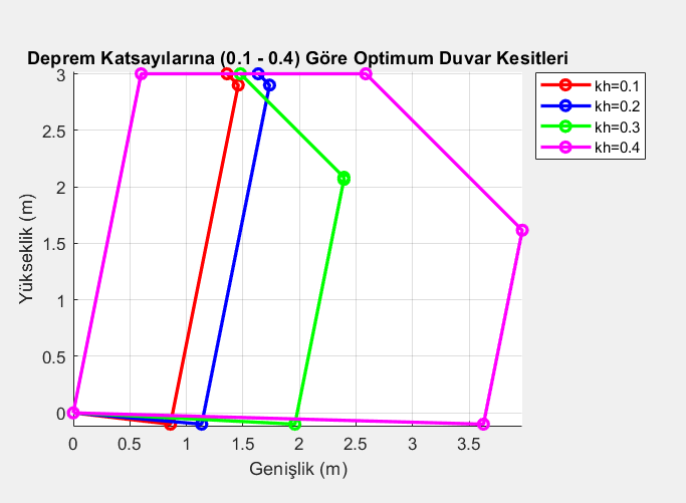
Şekil 2. φ = 30° için k_h – alan değişimi (1 + k_v)

Geometrik tasarım değişkenleri değerlendirildiğinde, kh değerindeki artışa bağlı olarak özellikle taban genişliğini temsil eden tasarım değişkenlerinde değişimler meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum, yatay deprem etkisinin artmasının optimum duvar geometrisinin belirlenmesinde önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Genel olarak elde edilen sonuçlar, deprem yükündeki artışın optimum tasarımın daha büyük geometrik boyutlara yönelmesine neden olduğunu ortaya koymaktadır.

3.2. φ = 35° için Optimum Sonuçlar (1 + kv)

ϕ=35° için (1−k_v) yükleme durumu altında gerçekleştirilen optimizasyon analizlerinde, yatay deprem ivme katsayısı k_h'nin optimum tasarım üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizlerde k_h=0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 değerleri dikkate alınmış ve düşey deprem katsayısı k_v=0.5kh bağıntısı kullanılarak belirlenmiştir.kh=0.10 için optimizasyon sonucunda f_{val}=2.6747 elde edilmiştir. k_h=0.20 için f_{val}=3.5179, k_h=0.30 için f_{val}=5.5330 ve k_h=0.40 için f_{val}=9.9748 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, yatay deprem ivme katsayısındaki artışla birlikte amaç fonksiyonu değerinin belirgin biçimde yükseldiğini göstermektedir.

Kısıt fonksiyonları incelendiğinde, tüm deprem seviyelerinde tanımlanan güvenlik koşullarının optimizasyon sürecinde dikkate alındığı görülmektedir. k_h=0.10 durumunda taşıma gücü kontrolünün, k_h=0.20 durumunda ise farklı taşıma gücü kontrollerinin tasarım üzerinde etkili olduğu; k_h=0.30 ve 0.40 seviyelerinde ise kayma koşulunun daha kritik hâle geldiği belirlenmiştir. Bu durum, yatay deprem etkisinin artmasıyla birlikte dış stabilite koşullarının optimum tasarım üzerindeki belirleyiciliğinin arttığını göstermektedir.kh değerindeki artışla birlikte optimum tasarım değişkenlerinde de belirgin değişimler meydana gelmiştir.

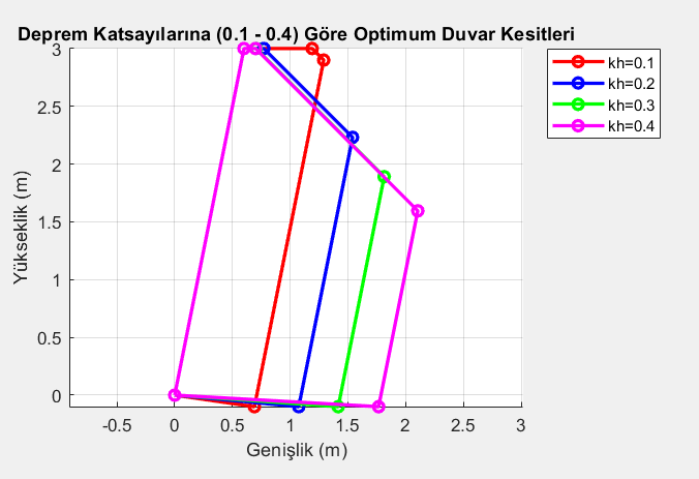


Şekil 3. φ = 35° için k_h – alan değişimi (1 + k_v)

Özellikle artan deprem etkisinin duvar geometrisinin belirlenmesinde daha etkin hâle geldiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, (1−k_v) yükleme durumunda yatay deprem katsayısındaki artışın optimum tasarım üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. ϕ=30∘ için (1−k_v) yükleme durumunda elde edilen optimum duvar kesitleri Şekil 2'de verilmiştir.

3.3. φ = 40° için Optimum Sonuçlar (1 + k_v)

ϕ=40° kayma mukavemeti açısına sahip zemin koşullarında (1+k_v) yükleme durumu için gerçekleştirilen optimizasyon analizlerinde, yatay deprem ivme katsayısı k_h'nin optimum tasarım üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizlerde k_h=0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 değerleri dikkate alınmıştır.kh=0.10 için optimizasyon sonucunda f_{val}=2.1602 elde edilmiştir. k_h=0.20 için f_{val}=2.9826, k_h=0.30 için f_{val}=3.6407 ve k_h=0.40 için f_{val}=4.263 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, yatay deprem ivme katsayısındaki artışla birlikte amaç fonksiyonu değerinin arttığını göstermektedir. Bu durum, artan sismik etkiler altında güvenlik koşullarının sağlanabilmesi için optimum duvar geometrisinin değiştiğini ortaya koymaktadır. Kısıt fonksiyonları incelendiğinde, tüm deprem seviyelerinde güvenlik koşullarının sağlandığı ve optimum çözümlerin elde edildiği görülmektedir. k_h=0.10–0.40 aralığında taşıma gücü (g12) kısıtının kritik sınıra ulaştığı, diğer kısıt fonksiyonlarının ise güvenli bölgede kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç, taşıma gücü koşulunun söz konusu yükleme durumunda optimum tasarımın belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir.



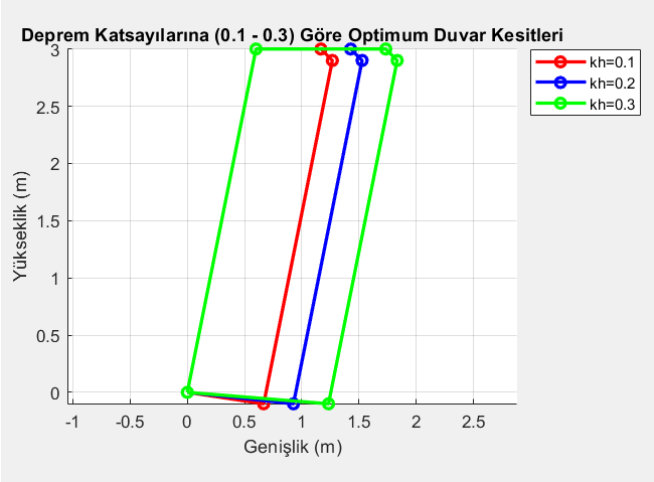
Şekil 4. φ = 40° için k_h – alan değişimi (1 + k_v)

Elde edilen sonuçlar, ϕ=40° kayma mukavemeti açısına sahip zeminlerde yatay deprem katsayısındaki artışın optimum duvar geometrisi üzerindeki etkisinin belirgin olduğunu göstermektedir. Geometrik tasarım değişkenleri incelendiğinde, deprem yükünün artmasına bağlı olarak özellikle taban genişliğinde değişimler meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca, daha yüksek kayma mukavemeti açısının sismik aktif toprak basıncını azaltması nedeniyle optimum tasarımın daha elverişli geometrik koşullarda elde edildiği değerlendirilmiştir. ϕ=40° için (1+k_v) yükleme durumunda elde edilen optimum duvar kesitleri Şekil 4'te verilmiştir.

3.4. φ = 30° için Optimum Sonuçlar (1 - k_v)

ϕ=30° kayma mukavemeti açısına sahip zemin koşullarında, (1−k_v) yükleme durumu için gerçekleştirilen optimizasyon analizlerinde yatay deprem ivme katsayısı k_h'nin optimum tasarım üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizlerde k_h=0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 değerleri dikkate alınmıştır.

k_h=0.10 için optimizasyon sonucunda f_{val}=3.9534 elde edilmiştir. k_h=0.20 için fv_{al}=8.0938, k_h=0.30 için ise f_{val}=19.263 olarak bulunmuştur. k_h=0.40 durumunda ise güvenlik koşullarını sağlayan bir optimum çözüm elde edilememiştir. Elde edilen sonuçlar, yatay deprem ivme katsayısındaki artışla birlikte amaç fonksiyonu değerinin belirgin biçimde yükseldiğini göstermektedir. Söz konusu yükleme durumunda optimum çözüm elde edilememesinin temel nedeni yalnızca optimizasyon algoritmasının yakınsamaması değildir. Bu yüksek sismik yükleme düzeyinde Mononobe–Okabe bağıntısının uygulanabilirlik koşulu ihlal edilmekte ve K_{ae} ifadesindeki kök içi terim fiziksel olarak geçersiz hâle gelmektedir. Dolayısıyla söz konusu kombinasyonda klasik Mononobe–Okabe yaklaşımı kapsamında geçerli bir aktif toprak basıncı katsayısı ve buna bağlı optimum tasarım elde edilememiştir. Kısıt fonksiyonları incelendiğinde, k_h=0.10–0.30 aralığında güvenlik koşullarını sağlayan optimum çözümlerin elde edildiği görülmektedir. Yatay deprem katsayısının artmasıyla birlikte özellikle kayma koşulunun tasarım üzerindeki etkisinin belirginleştiği ve yüksek deprem seviyelerinde optimum çözümün elde edilmesini zorlaştırdığı görülmüştür. Bu durum, düşük kayma mukavemeti açısına sahip zeminlerde deprem etkisinin artmasının dış stabilite koşulları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



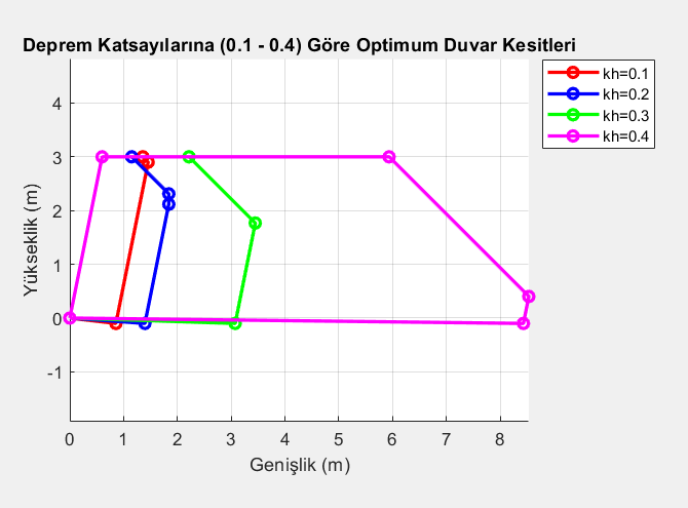
Şekil 5. ϕ = 30° için k_h – alan değişimi (1 - k_v)

Optimum tasarım değişkenleri değerlendirildiğinde, yatay deprem katsayısındaki artışa bağlı olarak duvar geometrisinde belirgin değişimler meydana geldiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, (1−k_v) yükleme durumunda deprem etkisinin artmasıyla birlikte güvenli bir tasarım elde edilmesinin zorlaştığını ortaya koymaktadır. ϕ=30° için (1−k_v) yükleme durumunda elde edilen optimum duvar kesitleri Şekil 5'te verilmiştir.

3.5. φ = 35° için Optimum Sonuçlar (1 − k_v)

ϕ=35∘ kayma mukavemeti açısına sahip zemin koşullarında, (1−k_v) yükleme durumu için gerçekleştirilen optimizasyon analizlerinde, yatay deprem ivme katsayısı kh'nin optimum tasarım üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizlerde k_h=0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 değerleri dikkate alınmıştır.kh=0.10 için optimizasyon sonucunda f_{val}=2.6662 elde edilmiştir. k_h=0.20 için f_{val}=4.0052, k_h=0.30 için f_{val}=8.5261 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, yatay deprem ivme katsayısındaki artışla birlikte amaç fonksiyonu değerinin düzenli olarak arttığını göstermektedir.

Kısıt fonksiyonları incelendiğinde, incelenen tüm deprem seviyelerinde güvenlik koşullarını sağlayan optimum çözümlerin elde edildiği görülmektedir. k_h=0.20–0.40 aralığında g11 kısıtının kritik sınıra ulaştığı, diğer kısıt fonksiyonlarının ise güvenli bölgede kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, yatay deprem etkisinin artmasıyla birlikte ilgili stabilite koşulunun optimum tasarım üzerinde daha belirleyici hâle geldiğini göstermektedir.



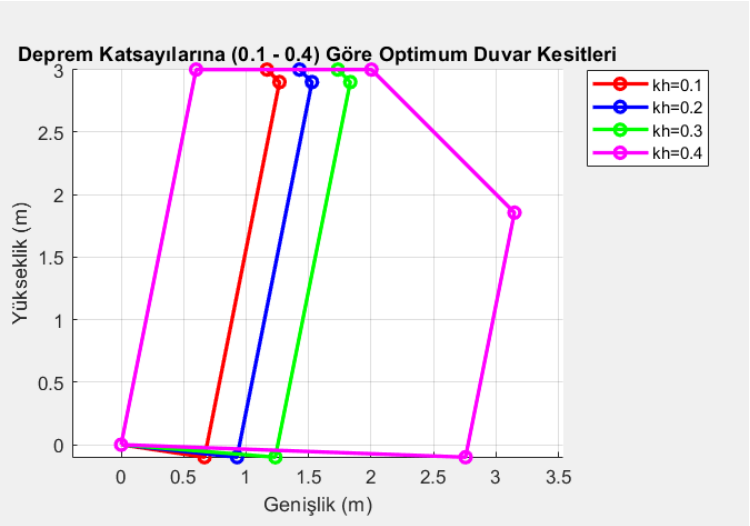
Şekil 6. φ = 35° için k_h – alan değişimi (1 - k_v)

Optimum tasarım değişkenleri değerlendirildiğinde, k_h değerindeki artışa bağlı olarak duvar geometrisinde belirgin değişimler meydana geldiği görülmüştür. Özellikle yüksek deprem katsayılarında optimum tasarımın daha büyük geometrik boyutlara yöneldiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, ϕ=35° kayma mukavemeti açısına sahip zeminlerde (1−k_v) yükleme durumunun optimum duvar geometrisi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. ϕ=35° için (1−k_v) yükleme durumunda elde edilen optimum duvar kesitleri Şekil 6'da verilmiştir.

3.6. φ = 40° için Optimum Sonuçlar (1 − k_v)

ϕ=40° kayma mukavemeti açısına sahip zemin koşullarında, (1−k_v) yükleme durumu için gerçekleştirilen optimizasyon analizlerinde yatay deprem ivme katsayısı k_h'nin optimum tasarım üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizlerde k_h=0.10, 0.20, 0.30 ve 0.40 değerleri dikkate alınmıştır.kh=0.10 için optimizasyon sonucunda f_{val}=2.0900 elde edilmiştir. k_h=0.20 için f_{val}=2.0898, k_h=0.30 için f_{val}=3.818 ve k_h=0.40 için f_{val}=7.682 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, yatay deprem ivme katsayısındaki artışla birlikte amaç fonksiyonu değerinin arttığını göstermektedir.

Kısıt fonksiyonları incelendiğinde, tüm deprem seviyelerinde güvenlik koşullarını sağlayan optimum çözümlerin elde edildiği görülmektedir. k_h=0.20 ve 0.30 durumlarında g12 kısıtının, k_h=0.10 ve 0.40 durumlarında ise g11 kısıtının kritik sınıra ulaştığı belirlenmiştir. Diğer kısıt fonksiyonlarının ise güvenli bölgede kaldığı görülmektedir.

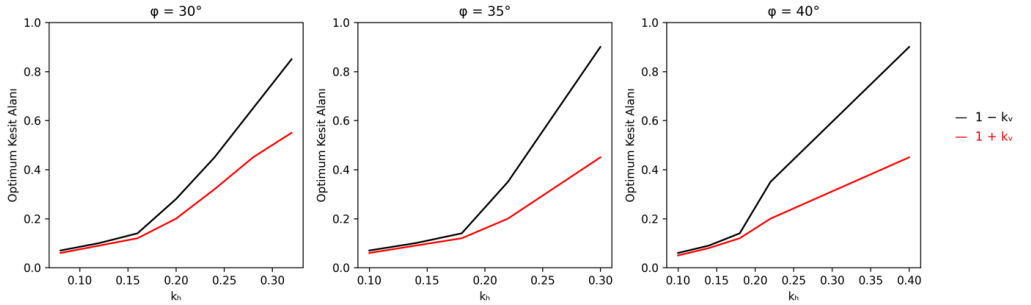


Şekil 7. ϕ = 40° için k_h – alan değişimi (1 - k_v)

Optimum tasarım değişkenleri değerlendirildiğinde, yatay deprem katsayısındaki artışa bağlı olarak duvar geometrisinde değişimler meydana geldiği ve özellikle taban genişliğinde kontrollü bir artış eğilimi oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca, ϕ=30° ve ϕ=35° durumlarıyla karşılaştırıldığında, daha yüksek kayma mukavemeti açısının sismik aktif toprak basıncını azaltıcı etkisi nedeniyle optimum tasarımın daha elverişli koşullarda elde edildiği görülmüştür. Bu sonuçlar, zemin kayma mukavemeti açısındaki artışın duvar tasarımında olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. ϕ=40° için (1−k_v) yükleme durumunda elde edilen optimum duvar kesitleri Şekil 7'de verilmiştir.

3.7. (1 − k_v) Durumunun Genel Değerlendirmesi

(1+k_v) ve (1−k_v) yükleme durumlarının karşılaştırılması sonucunda, (1−k_v) durumunda daha ekonomik optimum kesitler elde edilmiştir. Yatay deprem katsayısının artması optimum kesit alanını artırırken, kayma mukavemeti açısının artması daha küçük kesitlerin oluşmasını sağlamıştır. Tüm analizlerde güvenlik koşulları sağlanmış, yüksek deprem seviyelerinde ise kayma güvenliği tasarımı belirleyen temel kriter olmuştur. Sonuçlar, sismik yüklerin optimizasyon tabanlı dayanma duvarı tasarımında dikkate alınmasının güvenli ve ekonomik tasarım açısından gerekli olduğunu göstermektedir. Optimum kesit alan grafiği Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Optimum kesit alanı grafiği (a) φ = 30°, b) φ = 35°, c) φ = 40°

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 3 m yüksekliğindeki harçlı moloz taş dayanma duvarlarının sismik aktif toprak basıncı etkisi altındaki optimum geometrileri MATLAB tabanlı optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yatay deprem ivme katsayısındaki artışın optimum kesit alanını artırdığını ve bu artışın özellikle taban genişliğinde belirgin hâle geldiğini göstermiştir. Kayma mukavemeti açısının artması ise sismik aktif toprak basıncını azaltarak daha küçük ve ekonomik optimum kesitlerin elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, $(1+k_v)$ yükleme durumunda $(1-k_v)$ yükleme durumuna kıyasla daha büyük optimum kesit alanları elde edilmiş ve düşey deprem bileşeninin tasarım üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Tüm analizlerde dış stabilite koşullarının sağlandığı belirlenmiş, yüksek deprem seviyelerinde ise kayma güvenliği kısıtı tasarımı belirleyen kritik koşul olarak değerlendirilmiştir. Bu bildiride sunulan bulgular, yüksek lisans çalışması kapsamında farklı duvar yükseklikleri için gerçekleştirilen optimizasyon analizlerinin bir bölümünü oluşturmakta ve harçlı moloz taş dayanma duvarlarının güvenli ve ekonomik tasarımına ilişkin önemli sonuçlar sunmaktadır.

KAYNAKLAR

AFAD (2007), *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

Das, B.M., Sivakugan, N. (2019), *Principles of Foundation Engineering*, 9th Edition, Cengage Learning.

EN 1997-1 (2005), *Eurocode 7: Geotechnical Design – Part 1: General Rules*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

EN 1998-5 (2004), *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 5: Foundations, Retaining Structures and Geotechnical Aspects*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

Hayalioğlu, M.S., Gönden, M. (2010), "Kaynaklı Kiriş ve Kafes Sistemlerin MATLAB Ortamında *fmincon* Fonksiyonu Kullanılarak Optimum Tasarımı", *Mühendislik Bilimleri Dergisi*.

Kaymaz, İ. (2006), *MATLAB ile Optimizasyon Problemlerinin Çözümü*, Yüksek Lisans Tezi.

Mononobe, N., Matsuo, H. (1929), "On the Determination of Earth Pressures During Earthquakes", *Proceedings of the World Engineering Congress*, Tokyo.

Okabe, S. (1926), "General Theory of Earth Pressure and Seismic Stability of Retaining Walls", *Journal of the Japanese Society of Civil Engineers*, Cilt 12(1), 123-134.

Richards, R., Elms, D.G. (1992), "Seismic Behavior of Gravity Retaining Walls", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Cilt 118(10), 1561-1573.

Salgado, R. (2022), *The Engineering of Foundations*, 3rd Edition, CRC Press.

Temür, R., Bekdaş, G. (2018), "MATLAB Ortamında Kısıtlı Optimizasyon Problemlerinin Çözümü", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.

Veletsos, A.S., Younan, A.H. (1997), "Dynamic Response of Cantilever Retaining Walls", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Cilt 123(2), 161-172.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
H	Duvar yüksekliği	Df	Temel gömme derinliği
H+Df	Toplam duvar yüksekliği	q	Sürşarj yükü
φ	Zemin kayma mukavemeti açısı	δ	Zemin–duvar sürtünme açısı
α	Duvar arka yüz eğim açısı	β	Zemin yüzeyi eğim açısı
γ	Zeminin birim hacim ağırlığı	γw	Duvarın birim hacim ağırlığı
k_h	Yatay deprem ivme katsayısı	k_v	Düşey deprem ivme katsayısı
Ka	Statik aktif toprak basıncı katsayısı	Kae	Sismik aktif toprak basıncı katsayısı
Pa	Statik aktif toprak basıncı	Pae	Sismik aktif toprak basıncı
ψ	Sismik itkinin yatayla yaptığı açı	FS	Güvenlik katsayısı
FSdev	Devrilmeye karşı güvenlik katsayısı	FSkayma	Kaymaya karşı güvenlik katsayısı
qmax	Maksimum taban gerilmesi	qemin	İzin verilebilir zemin taşıma gücü
x_1–x_6	Tasarım değişkenleri	A	Duvar kesit alanı
g_{10}–g_{14}	Doğrusal olmayan kısıt fonksiyonları	f(x)	Amaç fonksiyonu