



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Geogrid donatılı istinat duvarı yapımında kullanılan dolgu malzemesinin mühendislik özelliklerinin güvenlik katsayıları üzerindeki etkisi

*The effect of engineering properties of the backfill material used in the construction of geogrid-reinforced retaining wall on factors of safety*

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa ÖZER<sup>1</sup>, Burak ÇELEBİ<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-6846-8441

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-9988-1845

**To cite to this article:** Özer M. ve Çelebi B., “Geogrid Donatılı İstinat Duvarı Yapımında Kullanılan Dolgu Malzemesinin Mühendislik Özelliklerinin Güvenlik Katsayıları Üzerindeki Etkisi”, *Journal of Polytechnic*, 27(5): 1681-1695, (2024).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Özer M. ve Çelebi B., “Geogrid Donatılı İstinat Duvarı Yapımında Kullanılan Dolgu Malzemesinin Mühendislik Özelliklerinin Güvenlik Katsayıları Üzerindeki Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 27(5): 1681-1695, (2024).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1252417

# Geogrid Donatılı İstinat Duvarı Yapımında Kullanılan Dolgu Malzemesinin Mühendislik Özelliklerinin Güvenlik Katsayıları Üzerindeki Etkisi

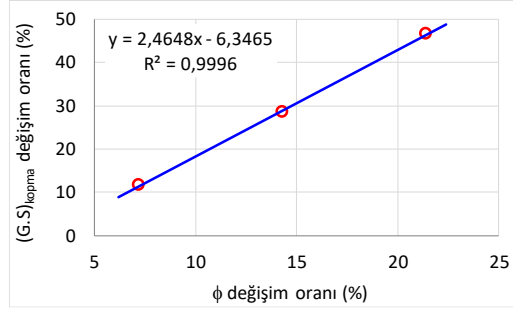
## The Effect of Engineering Properties of the Backfill Material Used in the Construction of Geogrid-Reinforced Retaining Wall on Factors of Safety

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Geogrid donatılı duvar tasarımında, tasarımı kontrol eden asıl faktör geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısıdır. / In the design of geogrid-reinforced retaining wall, the main factor controlling the design is the factor of safety of the geogrid against rupture.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Kopmaya karşı güvenlik katsayısındaki artış oranı, içsel sürtünme açısındaki artış oranının yaklaşık 2 katı kadardır. / The rate of increase in the factor of safety against rupture is approximately 2 times the rate of increase in the angle of internal friction.



Şekil. İçsel sürtünme açısı ile kopmaya karşı güvenlik katsayısı arasındaki ilişki / **Figure.** The relationship between the angle of internal friction and the factor of safety against rupture

### Amaç (Aim)

Dolgu malzemesinin mühendislik parametrelerinin geogrid donatılı duvar tasarımı üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. / It is to examine the effects of the engineering properties of the filling material on the design of the geogrid-reinforced retaining wall.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Analizlerde, yapımı tamamlanmış ve hizmete açılmış bir karayolu güzergâhında bulunan geogridle güçlendirilmiş bir istinat duvarına ait tasarım parametreleri kullanılmıştır. / The design parameters of a geogrid-reinforced retaining walls on a highway that was completed and put into service were used in the analyses.

### Özgünlük (Originality)

Literatürde konuyu bu bakımdan ele alan bir çalışma bulunmamaktadır. / There is no study in the literature that addresses the issue in this regard.

### Bulgular (Findings)

İçsel sürtünme açısı sıyrılmaya ve kopmaya karşı güvenlik katsayıları üzerinde oldukça etkilidir. / The angle of internal friction is very effective on the factor of safety against pullout and rupture.

### Sonuç (Conclusion)

Tasarımda, içsel sürtünme açısı için mümkün birkaç değer kullanılarak çözüm yapılması ve içlerinden en kritik olan çözümün dikkate alınması önerilir. / In the design, it is recommended to perform several analyzes using several possible values for the internal friction angle and to consider the most critical solution.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Geogrid Donatılı İstinat Duvarı Yapımında Kullanılan Dolgu Malzemesinin Mühendislik Özelliklerinin Güvenlik Katsayıları Üzerindeki Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mustafa ÖZER<sup>1\*</sup>, Burak ÇELEBİ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Teknoloji Fakültesi, İnş. Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Demce Yapı İnşaat San. ve Tic. A.Ş., Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 17.02.2023 ; Kabul/Accepted : 14.05.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 02.10.2023)

## ÖZ

Bu çalışmada, geogridle güçlendirilmiş istinat duvarı yapımında kullanılan dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısının ve birim hacim ağırlığının geogridin kopmaya ve sıyrılmaya karşı güvenlik katsayıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, yapımı tamamlanmış ve hizmete açılmış bir karayolu güzergâhında bulunan ve geogridle güçlendirilmiş bir istinat duvarına ait tasarım parametreleri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı arttığında geogridin kopmaya ve sıyrılmaya karşı güvenlik katsayılarında artış meydana geldiği ve sıyrılmaya karşı güvenlik katsayılarının kopmaya karşı güvenlik katsayılarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısının tasarımda daha kritik olduğu ve tasarımı kontrol eden asıl faktörün kopmaya karşı güvenlik katsayısı olduğu belirlenmiştir. Dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısındaki değişim oranıyla geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısındaki değişim oranı arasında hemen hemen doğrusal bir ilişki bulunduğu ve aralarında yaklaşık 2 kat fark olduğu görülmüştür. Örneğin, dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı %10 oranında arttığında geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısı yaklaşık %20 oranında artmaktadır. Bununla birlikte, dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısının geogridin sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısı üzerindeki etkisinin kopmaya karşı güvenlik katsayısı üzerindeki etkisine kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Örneğin, dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısında %15'lik bir artış, geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısında yaklaşık %30 oranında bir artış meydana getirirken, sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısında ise hesap yapılan derinliğe bağlı olarak %300 ile %60 arasında değişen oranda bir artış meydana getirmiştir. Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı arttıkça geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısının azaldığı (yaklaşık %3), sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısının ise arttığı (yaklaşık %10) görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Geogrid, istinat duvarı, geogrid donatılı duvar, toprakarme duvar, donatılı zemin.

## The Effect of Engineering Properties of the Backfill Material Used in the Construction of Geogrid-Reinforced Retaining Wall on Factors of Safety

### ABSTRACT

In this study, the effects of the parameters such as angle of internal friction and unit weight of the filling material, on the factor of safety of the geogrid against rupture and pullout were investigated by using the design parameters of a geogrid-reinforced retaining walls on a highway that was completed and put into service. As a result of the analysis, it was observed that when the angle of internal friction of the filling material increased, the factor of safety against rupture and pullout of the geogrid increased. In addition, it was found that the factor of safety against pullout of the geogrid were higher than the factor of safety against rupture. In this respect, it was concluded that the factor of safety against rupture of the geogrid is more critical in the design calculations and the main factor controlling the design is the factor of safety against rupture of the geogrid. It has been observed that there is an almost linear relationship between the rate of change in the angle of internal friction of the filling material and the rate of change in the factor of safety against rupture of the geogrid, and there is approximately a 2 times difference between them. For example, when the internal friction angle of the filling material increases by 10%, the safety coefficient of the geogrid against rupture increases by approximately 20%. However, it was observed that the factor of safety against pullout of the geogrid was more affected by the changes in the angle of internal friction of the filling materials compared to the factor of safety against rupture of the geogrid. For example, a 15% increase in the angle of internal friction results in an increase of approximately 30% in the factor of safety against rupture, whereas it resulted in an increase in the factor of safety against pullout, varying between 300% and 60%, depending on the calculated wall depth. It was observed that as the unit weight of the filling material increases, the factor of safety of the geogrid against rupture decreases (about 3%) and the factor of safety against pullout increases (about 10%).

**Keywords:** Geogrid, retaining wall, geogrid reinforced wall, reinforced earth wall, reinforced earth.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geosentetik, inşaat mühendisliği uygulamalarında zemin, kaya, toprak veya geoteknik mühendisliği ile ilgili

diğer malzemelerle birlikte kullanılan doğal veya yapay polimerik malzemelerden üretilmiş düzlemsel, şerit veya üç boyutlu ürünlere verilen genel bir isimdir [1, 2]. Geosentetiklerin; geogrid, geotekstil, geomembran,

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ozerm@gazi.edu.tr

geosel, geonet, geomat, geofom ve geosentetik kil örtü gibi birçok alt türü bulunmaktadır [1-3]. Ayrıca birkaç tane geosentetiğin birleşiminden meydana gelen geokompozitler de bulunmaktadır.

Bu ürünler; güçlendirme, ayırma, süzme (filtrasyon), drenaj, koruma, erozyon kontrolü ve sıvı/gaz geçişini önleme gibi çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmaktadır [3-5].

Geosentetik ürünler içerisinde en çok kullanılan ürünlerden birisi geogridlerdir. Geogridler, dikdörtgen açıklıklar meydana getirecek şekilde birbirine bağlı çekme elemanlarından oluşan, çekme elemanları birbirine ekstrüzyonla, yapıştırma veya geçmeyle tutturulmuş, göz açıklığının boyutları, çekme elemanlarının genişliğinden daha büyük, ağ şeklinde, düzlemsel, polimerik malzemelerdir [1-3, 6]. Geogridler, göz açıklığının içine giren daneli (granüler) malzemeleri mekanik olarak kenetlemek suretiyle yanal hareketini kısıtlayarak, zeminlerin yanal deformasyonlara karşı güçlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadırlar.

İlk geogrid, Dr Brian Mercer'ın (1927-1998) araştırmaları sonucunda 1970'lerin sonlarına doğru Netlon Ltd. tarafından Birleşik Krallık'ta üretilmiş olup 1982'de Tensar Corp tarafından Kuzey Amerika'ya getirilmiştir [4, 7].

Geogridlerin kenetleme özelliği sayesinde birbiriyle herhangi bir bağı olmayan agrega daneleri, geogridin gözleklerinden içeriye girerek geogrid şeritleri tarafından kuşatılmakta ve yanal hareketleri kısıtlanmaktadır. Böylece geogridler, düşey yüklerden kaynaklanan yatay çekme kuvvetlerini kendi üzerine almakta ve zeminin içinde adeta çekmeye çalışan bir donatı elemanı gibi görev yapmaktadırlar. Bu sayede geogridler, zemine çekme dayanımı kazandırarak zeminin kayma (makaslama) dayanımını arttırmaktadırlar. Bu özellikleri sayesinde geogridler istinat yapılarında, toprak dolgu şevlerinde, karayolu, demiryolu ve havalimanı alt yapılarında, asfalt yollarda, toprak yollarda ve makine temellerinde zemini güçlendirmek ve duraylılığını arttırmak amacıyla kullanılırlar.

Geogridlerin inşaat mühendisliği uygulamaları içinde birçok kullanım alanı olmasına karşın en çok kullanıldığı uygulamalardan birisi yol yapım çalışmalarında istinat duvarı yapımıdır. Günümüzde yol yapım çalışmalarında, dolgu yüksekliğinin fazla olduğu durumlarda, şevli imalat yapıldığında kamulaştırma sınırlarının çok fazla artması, taş duvar veya betonarme duvar yapıldığında ise maliyetlerin artması ve yapım süresinin uzaması gibi nedenlerle geogrid donatılı duvarlar yaygın olarak tercih edilmektedir.

Sentetik ürünler kullanılarak istinat duvarı yapımı ilk kez 1960'lı yılların başlarında Fransız mühendis ve mimar Henri Vidal tarafından çelik şeritler kullanılarak gerçekleştirilmiştir [8]. Sonraki yıllarda ise polimerik sentetik ürünlerin geliştirilmesiyle birlikte istinat duvarlarının yapımında geotekstiller kullanılmaya başlanmıştır.

Zeminin geosentetik ürünler (geotekstil veya geogrid) kullanılarak güçlendirilmesiyle inşa edilmiş istinat duvarlarına, "geosentetik güçlendirilmiş istinat duvarı", "toprakarme duvar", donatılı zemin duvar", "geogrid donatılı istinat duvarı" veya "geoduvar" adı verilmektedir. İngilizce kaynaklarda ise bu yapılar "mechanically stabilized earth wall" olarak adlandırılmakta ve kısaca "MSE wall" olarak ifade edilmektedir. Ülkemizde "geogrid donatılı istinat duvarı" terimi yaygın olarak kullanıldığından bu çalışmada da bu terim benimsenmiştir.

Geotekstille güçlendirilmiş ilk istinat duvarı 1971 yılında Fransa'da inşa edilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise geotekstille güçlendirilmiş ilk istinat duvarı 1974 yılında inşa edilmiştir [8]. Ülkemizde ise ilk geosentetik güçlendirilmiş istinat duvarı 1997 yılında Altunizade'de Limak İnşaat tarafından yapılmakta olan Altunizade-Ümraniye bağlantı yolu kapsamında inşa edilmiştir [9, 10]. 1980'li yıllardan sonra ise dünya genelinde, geotekstil kullanılarak istinat duvarı yapımında önemli bir artış meydana gelmiştir [8]. Ancak, 1980'li yıllarda geogridlerin ticari bir ürün olarak geliştirilmesinin ardından geosentetik donatılı duvar yapımında geotekstillerin yerini yavaş yavaş geogridler almaya başlamıştır. Geogridle güçlendirilmiş ilk istinat duvarı yapımı 1981'de gerçekleştirilmiştir [8]. Günümüzde artık geosentetik güçlendirilmiş istinat duvarlarının yapımında yaygın olarak geogrid kullanılmaktadır [11].

Dünyadaki gelişmelere paralel olarak Ülkemizde de geogrid donatılı istinat duvarlarının yapımında hızla artış meydana gelmektedir. Bununla birlikte, geogrid donatılı istinat duvarlarına yönelik saha çalışmalarını kapsayan akademik çalışmalarda da artış görülmektedir (Ör. Kaba ve Türköz, 2019; Yumurtaş vd., 2022) [12, 13].

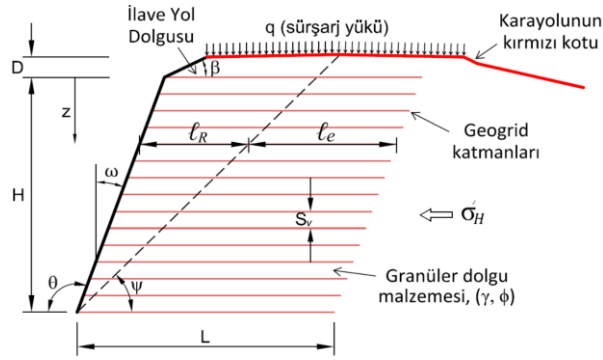
Geogrid donatılı istinat duvarlarının tasarımında iç duraylılık analizleri ve dış duraylılık analizleri olmak üzere iki tür analiz yapılmaktadır. Dış duraylılık analizleri klasik istinat duvarlarında olduğu gibi yapılır. Bu analizlerde geogrid donatılı zemin kütlesi rijit bir kütle olarak kabul edilir ve geogrid donatılı istinat duvarının devrilme (dışmerkezlik), ötelenme (kayma), taşıma gücü tahkikleri ve duvarın arkasından (derinden) geçen kayma düzlemleri için şev duraylılık (toptan göçme) analizleri yapılır. İç duraylılık analizlerinde ise geogrid donatılı yatay yüklere karşı kopma ve sıyrıma tahkikleri yapılır [8, 11].

Geogrid donatılı istinat duvarı tasarımında kullanılan bazı kavramlar şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. İç duraylılık analizlerinde, herhangi bir derinlikte geogridi kopartmaya veya sıyırmaya çalışan yatay çekme kuvvetleri Eş. 1 ile hesaplanır.

$$T = \sigma'_H S_H S_v \quad (1)$$

İstinat duvarı gibi uzun yapılarda 1 metrelik genişlik için hesap yapıldığından, hesaplamalarda  $S_H$  uzunluğu genellikle 1 m olarak alınmaktadır. Bu durumda, geogride etkiyen yatay çekme kuvvetleri Eş. 2'de verilen bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$T = \sigma'_H S_v \quad (2)$$



**Şekil 1.** Geogrid donatılı istinat duvarı tasarımında kullanılan bazı karakteristik kavramlar (Some characteristic notation used in geogrid reinforced retaining wall design)

$$K_a = \frac{\sin^2(\theta + \phi)}{\sin^3\theta \left[1 + \frac{\sin\phi}{\sin\theta}\right]^2} \quad (9)$$

Bunlar; kopma ve sıyrılmadır. Başka bir ifadeyle, yatay kuvvetler geogridi hem çekip kopartmaya hem de çekip sıyırmaya çalışırlar. Bu nedenle, duvarın göçmemesi için geogridin kopma ve sıyrılmaya karşı belli bir güvenlik katsayısı ile karşı koymasına gerekmektedir. Bu durumda, tasarım hesaplarında geogridin kopmaya ve sıyrılmaya karşı güvenlik katsayılarının yeterli olup olmadığı tahkik edilmektedir. Kopmaya ve sıyrılmaya karşı güvenlik katsayıları (G.S.) sırasıyla Eş. 11 ve Eş. 12 ile hesaplanmaktadır.

$$\tan(\psi - \phi) = \frac{-\tan(\phi - \beta) + \sqrt{\tan(\phi - \beta)[\tan(\phi - \beta) + \cot(\phi + \theta - 90)][1 + \tan(\delta + 90 - \theta)\cot(\phi + \theta - 90)]}}{1 + \tan(\delta + 90 - \theta)[\tan(\phi - \beta) + \cot(\phi + \theta - 90)]} \quad (10)$$

Geogrid donatılarına etkiyen toplam yanal zemin basıncı ( $\sigma'_H$ ), dolgunun kendi ağırlığından, sürşarj yükünden ve hareketli yüklerden (noktasal veya şerit yük) kaynaklanan yatay gerilmelerin toplamından meydana gelir ve Eş. 3 ile hesaplanır.

$$\sigma'_H = \sigma'_{hs} + \sigma'_{hq} + \sigma'_{hl} \quad (3)$$

Dolgunun kendi ağırlığından ve sürşarj yükünden kaynaklanan yanal zemin basınçları sırasıyla Eş. 4 ve 5 ile hesaplanabilir. Noktasal ve şerit yüklerden kaynaklanan yatay zemin basınçları ise literatürde yer alan çeşitli bağıntılarla hesaplanabilmektedir [4, 14, 15].

$$\sigma'_{hs} = \sigma'_v K_a \quad (4)$$

$$\sigma'_{hq} = q K_a \quad (5)$$

Dolgunun kendi ağırlığından kaynaklanan düşey efektif gerilme ( $\sigma'_v$ ) Eş. 6 ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_v = \gamma z \quad (6)$$

Duvarın ön yüzünün yatayla saat yönünde yaptığı açı ( $\theta$ ) yaklaşık  $90^\circ$ , duvarın üzerindeki geri dolgunun yatayla yaptığı açı ( $\beta$ ) ise yaklaşık sıfır derece olduğunda, aktif toprak basınç katsayısı ( $K_a$ ), Eş. 7'de verilen Rankine bağıntısı ile, potansiyel yenilme düzleminin yatayla yaptığı açı ( $\psi$ ) ise Eş. 8'de verilen bağıntıyla hesaplanabilmektedir.

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (7)$$

$$\psi = 45 + \frac{\phi}{2} \quad (8)$$

Ancak, duvarın ön yüzünün düşeyden sapma açısı  $10^\circ$  veya daha fazla olduğunda ( $\omega \geq 10^\circ$ ), aktif toprak basınç katsayısı ( $K_a$ ) Coulomb denkleminin basitleştirilmiş biçimi olan Eş. 9, potansiyel yenilme düzleminin yatayla yaptığı açı ( $\psi$ ) ise Eş. 10'da verilen bağıntıyla hesaplanabilmektedir [8, 11, 16]. Eşitlik 10'da  $\delta = \beta$  olarak alınmaktadır. Yatay kuvvetler geogrid üzerinde iki farklı zorlama meydana getirir.

$$(G.S.)_{kop} = \frac{T_a}{T} = \frac{T_a}{\sigma'_H S_v} \quad (11)$$

$$(G.S.)_{sly} = \frac{F_R}{T} = \frac{2 \sigma'_v \ell_e P}{\sigma'_H S_v} \quad (12)$$

Eşitlik 12'deki  $P$ 'nin çekme (pullout) deneyi yapılarak bulunması gerekmektedir. Ancak deney yapılamadığı durumlarda  $P$  katsayısı güvenli tarafta kalacak şekilde Eş. 13 ile hesaplanabilmektedir [8, 11, 16]. Eş. 13'te görülen  $\alpha$  katsayısı, boyut etkisini dikkate alan bir katsayı olup çekme (pullout) deneyi ile bulunabilmektedir. Ancak deney verisi bulunmadığı durumlarda geogridler için  $\alpha = 0,8$  alınabilmektedir [16].

$$P = \left(\frac{2}{3} \tan \phi\right) \alpha \quad (13)$$

Geogrid donatılı duvar tasarımında kopmaya ve sıyrılmaya karşı güvenlik katsayıları için genellikle 1,5 değeri yeterli olmaktadır [8, 11].

Geogridin laboratuvar ortamında çekme deneyi ile belirlenen nihai kopma dayanımı ( $T_u$ ) doğrudan hesaplamalarda kullanılamaz. Geogrid, fabrikadan çıktıktan sonra yerine serilip kullanıma hazır hale gelinceye kadar ve kullanım ömrü boyunca bazı etkenler nedeniyle dayanım kaybına uğrar. Bu nedenle geogridin kullanıma sunulduğu andaki kopma dayanımı deneyle belirlenen kopma dayanımından daha düşük bir değere sahip olur. Bu nedenle, laboratuvarda deneyle belirlenen kopma dayanımının bazı düzeltme katsayıları ile azaltılması gerekmektedir [8, 11, 17]. Düzeltme katsayıları uygulandıktan sonra elde edilen dayanıma "izin verilen kopma dayanımı" veya "tasarım kopma dayanımı" denir ve " $T_a$ " ile gösterilir. İzin verilen kopma dayanımı ( $T_a$ ) Eş. 14 ile bulunur.

$$T_a = \frac{T_u}{(K_{yr})(K_{sn})(K_{yp})} \quad (14)$$

Geogridin, yenilme düzleminin dışında kalan ve sıyrılmaya karşı koyan uzunluğu ( $\ell_e$ ), Eş. 12'nin yeniden düzenlenmesiyle elde edilen Eş. 15 ile hesaplanabilir.

$$\ell_e \geq \frac{\sigma'_H S_v (G \cdot S)_{sty}}{2 \sigma'_v P} \quad (15)$$

Geogridin, yenilme düzleminin içinde kalan uzunluğu ( $\ell_R$ ), duvarın ön yüzü yaklaşık dik olduğunda ( $\theta \cong 90^\circ$ ) geometri kurallarından yararlanılarak elde edilen Eş. 16 ile hesaplanabilir [4, 5]. Duvarın ön yüz eğim açısı  $10^\circ$  dereceden fazla olduğunda ise ( $\omega \geq 10^\circ$ ) yine geometri kurallarından yararlanılarak bu çalışmada geliştirilen Eş. 17 ile hesaplanabilir. Geogridin toplam uzunluğu ( $L$ ) ise Eş. 18 ile hesaplanır.

$$\ell_R = \frac{H - z}{\tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)} \quad (16)$$

$$\ell_R = \frac{H - z}{\tan \psi} - (H - z) \tan \omega \quad (17)$$

$$L = \ell_e + \ell_R \quad (18)$$

Düşey gerilmeler derinlikle birlikte artacağından geogride etki eden yatay çekme kuvvetleri de derinlikle birlikte artmaktadır. Yatay gerilmeler geogridi çekip kopartmaya çalışırken, düşey gerilmeler ise geogridi sıkıştırarak sıyırılmasını önlemeye çalışır. Bu nedenle duvarın alt kısımlarında kopmaya, üst kısmında ise sıyırılmaya karşı güvenlik katsayıları daha düşük olur. Güvenlik katsayılarının derinlik boyunca değişken olması nedeniyle, geogrid donatılı istinat duvarı tasarım hesaplarında duvarın üstünden başlanarak yukarıdan aşağıya doğru belli aralıklarla (örneğin  $S_v = 0,5$  m) önce düşey gerilmeler, daha sonra yatay kuvvetler hesaplanır ve buna göre kopmaya ve sıyırılmaya karşı güvenlik katsayıları tahkik edilir.

Geogrid donatılı istinat duvarlarının imalatında dolgu malzemesi olarak, organik madde veya başka herhangi bir zararlı madde içermeyen ve Çizelge 1'de verilen gradasyon sınırlarını sağlayan kohezyonsuz, iri daneli, granüler malzemeler tercih edilmektedir [8, 11].

Çizelge 1'den görülebileceği gibi dolguda kullanılacak malzemenin maksimum dane boyutu 19,0 mm olarak önerilmektedir. Ancak, yerleştirme hasarından dolayı meydana gelebilecek dayanım azaltma katsayısının deney yapılarak bulunması koşuluyla dolguda kullanılacak malzemenin maksimum dane boyutu 100 mm'ye kadar arttırılabilmektedir [11]. Bununla birlikte, geogridin kenetleme özelliğinin etkili olabilmesi için olguda kullanılan agreganın dane çapı ile geogridin göz açıklığı arasında belli bir oranın bulunması gerektiğine dair çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin son yapılan bir çalışmada, kare göz açıklıklı geogridler için  $d_A/d_{90}$  oranının optimum değeri 1,3 olarak bulunmuştur [18].

**Çizelge 1.** Geri dolgu malzemesi için istenen gradasyon sınırları (Required gradation limits for backfill material) [11]

Elek	Toplam geçen dane yüzdesi (%)
3/4 inç (19,0 mm)	100
No.4 (4,75 mm)	0 – 60
No.200 (0,075 mm)	0 – 15

Geogrid donatılı istinat duvarı yapımında geogrid ile birlikte kullanılacak dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısının kesme kutusu veya üç eksenli basınç deneyi yapılarak bulunması gerekmektedir. Ancak dolgu malzemesi iri daneler (~19 mm) içerdiği için zemin mekaniği deneylerinde kullanılan standart ölçülerdeki kesme kutusu veya üç eksenli basınç deney cihazları bu malzemelerin içsel sürtünme açısının bulunması için yeterli değildir. Bunun için genellikle 30x30 cm ebatlarında büyük kesme kutusu deney cihazı kullanılmaktadır. Ancak bu cihaz, pahalı ve zor bulunan bir cihaz olduğundan, granüler dolgu malzemenin içsel sürtünme açısının deney yapılarak bulunamadığı durumlar olabilmektedir. Böyle durumlarda granüler dolgu malzemenin içsel sürtünme açısı, güvenli tarafta kalacak şekilde tahmine dayalı olarak alınabilmektedir. Projeye özgü deney yapılmadığı durumlarda, içsel sürtünme açısı için kabul edilebilir alt sınır değer  $28^\circ$ , üst sınır değer ise  $34^\circ$  olarak uygulanabilmektedir [8, 11, 16]. Projeye özgü deney yapıldığında ise, dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısının  $40^\circ$  üstünde bulunması durumunda, tasarım hesaplamalarında  $40^\circ$  olarak, kohezyon değerinin ise her durumda sıfır olarak alınması önerilmektedir [16]. Bu durumda, tahmine dayalı olarak seçilen içsel sürtünme açısının güvenlik katsayılarını ne ölçüde etkilediğinin bilinmesi önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, dolgu malzemesinin tahmine dayalı olarak seçilen içsel sürtünme açısındaki ve birim hacim ağırlığındaki değişimlerin geogridin kopmaya ve sıyırılmaya karşı güvenlik katsayıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. İncelemeye esas duvar modeli olarak, yapımı tamamlanmış ve hizmete açılmış bir karayolu güzergâhında bulunan geogridle güçlendirilmiş bir istinat duvarına ait tasarım parametreleri kullanılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Çalışma sahası, kullanılan malzemeler ve hesap yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

### 2.1. Çalışma Sahası (Study Area)

Çalışma sahası, Karadeniz Ereğli-Devrek karayolu üzerinde olup yolun 32+500 ile 56+721 kilometreleri arasındadır. Proje, Çaylıoğlu köyünden başlayıp Yazıcılar ve Güzelyurt köyü girişine kadar uzanan bir yol güzergâhını kapsamaktadır. Ağır taşıtların mevcut yolu sürekli olarak kullanması ve yolun bu trafiği karşılayacak kapasiteye sahip olmaması nedeniyle proje kapsamında yolun bazı kısımlarının genişletilmesine, bazı kısımlarının ıslah edilmesine, bazı kısımlarında ise yeni yol güzergâhı açılmasına ihtiyaç duyulmuştur.

Proje kapsamında toprak tesviye işleri, sanat yapıları ve üst yapı işleri bulunmaktadır. Yeni yapılan yol, çift şeritli ve tek platformlu olacak şekilde tasarlanmıştır. Yolun genişliği toplam 14 m olup, ikişer metrelik kısımları sağlı sollu hendeklere ayrılmıştır. Gidiş geliş istikametindeki

yol şeritlerinin genişliği 5 m'dir. Çalışma sahasının yer bulduru haritası Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışma sahasının yer bulduru haritası (Location map of the study area)

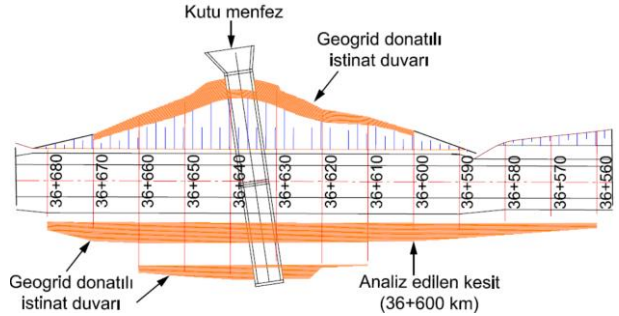
Karayolu güzergâhında, iki farklı lokasyonda geosentetik donatılı istinat duvarı imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu lokasyonların yerleri Şekil 3'teki uydu görüntüsünde verilmiştir. Bu çalışma kapsamında, Ova köyü civarında bulunan ve Lokasyon 2 olarak adlandırılan bölgedeki geogrid donatılı istinat duvarları incelenmiştir. İncelenen bölge, yolun 36+560 ile 36+680 kilometreleri arasında bulunmaktadır.

İncelenen güzergâhta, yeni yapılacak olan bir yol kesimi bulunmakta olup, yolun geçeceği güzergâhta yol eksenine dik doğrultuda bir dere yatağı bulunmaktadır (Şekil 4). Bu dere yatağında ilkbahar aylarında yüksek debiyle akan bir dere bulunmaktadır. Dere akışını mümkün kılmak amacıyla yolun altından 5x5 m en kesit ölçülerine sahip bir kutu menfez yapılmıştır. Bu lokasyonda dolgu yüksekliği yaklaşık 19 m'ye kadar çıkmaktadır. Bu yükseklikteki bir dolgunun şevli bir şekilde inşa edilmesi durumunda hem kamulaştırma sınırları hem de yolun altından geçen kutu menfezin uzunluğu artacaktır. Bunun yanında; şevli imalat yerine taş duvar veya betonarme duvar tercih edildiğinde ise maliyetler artacağından, kutu menfez geçişinin olduğu bu lokasyonda menfezin her iki tarafındaki zemini tutmak ve yol dolgusunun stabilitesini sağlamak amacıyla geogrid donatılı istinat duvarı yapılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4. Geogrid donatılı duvar yapılan yerin inşaat öncesi doğal durumu (Natural condition of the place before construction where the geogrid-reinforced wall was constructed)

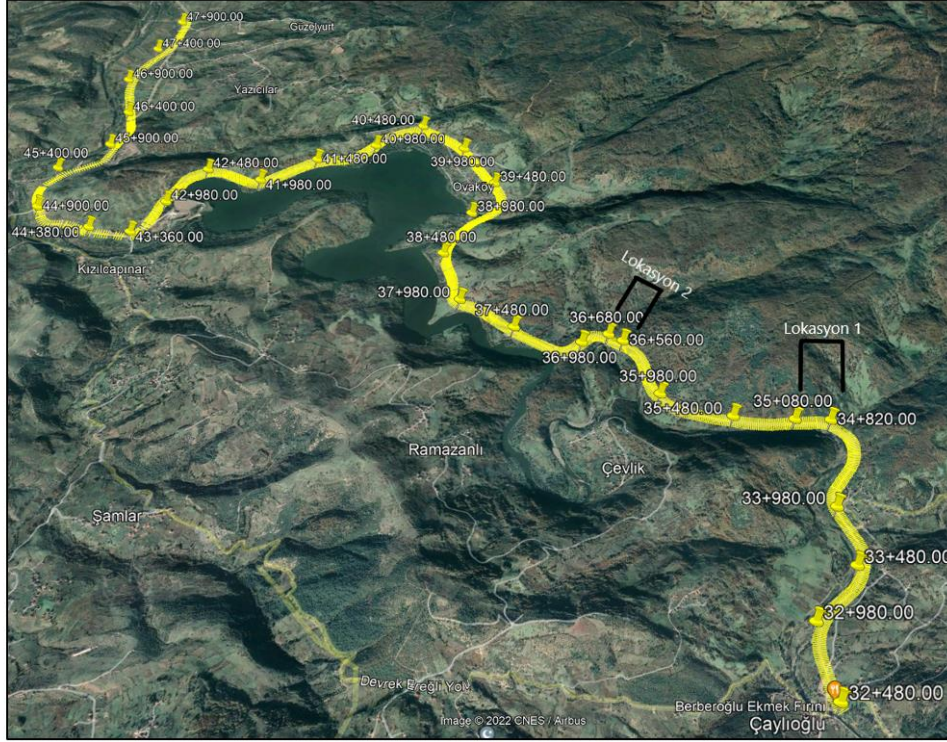
Bu lokasyonda inşa edilen geogrid donatılı duvarın toplam uzunluğu 120 m olup, duvarın inşa edildiği bölgenin topografyasından dolayı duvar yüksekliği yer yer değişkenlik göstermekte ve en yüksek noktada 18,40 m'ye kadar ulaşmaktadır. Duvar yüksekliği değiştiğçe geostatik gerilmeler de değişeceği için, buna bağlı olarak geogride etkiyen yatay kuvvetler de değişecektir. Bu şartlar altında optimum tasarım yapabilmek için duvar yüksekliği değiştiğçe, duvar tasarım hesaplarının da yenilenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, duvar yüksekliğinin önemli ölçüde değiştiği noktalarda enine kesitler çıkartılarak bu kesitler üzerinde tasarım hesapları yapılmıştır. Bu çalışmada, yolun 36+600'üncü kilometresinden çıkartılan kesit analiz edilmiştir. Yolun, geogrid donatılı duvar uygulanan kesiminin plan görüntüsü ve bu çalışmada incelenen enine kesitin yeri Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Geogrid donatılı duvarın uygulama planı ve bu çalışmada incelenen kesit (The application plan of the geogrid-reinforced wall and the sectioned point investigated in this study)

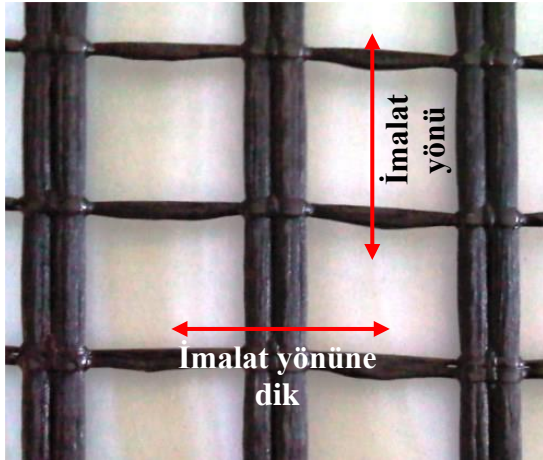
## 2.2. Çalışmada Kullanılan Geogridler (Geogrids Used in the Study)

Çalışmada, polyesterden (PET) imal edilmiş ve polivinil klorür (PVC) ile kaplanmış, kare göz açıklıklı, farklı çekme dayanımlarına sahip 4 tip geogrid kullanılmıştır.



Şekil 3. Geogrid donatılı duvarların inşa edildiği lokasyonlar (Locations where geogrid-reinforced walls are construct)

Çalışmada kullanılan geogridlere ait tipik bir görünüm Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Çalışmada kullanılan geogridlere ait tipik bir görünüm (A typical view of the geogrids used in the study)

Kullanılan geogridlerin imalat yönündeki kopma dayanımları, imalat yönüne dik yöndeki kopma dayanımlarından daha yüksek olup, imalat yönündeki kopma dayanımları küçükten büyüğe doğru sıralanarak sırasıyla G1, G2, G3 ve G4 olarak isimlendirilmiştir. Bu geogridlerin bazı mühendislik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çalışmada kullanılan tüm geogridlerin imalat yönüne dik yöndeki nihai kopma dayanımları 20 kN/m, maksimum yükteki uzama değerleri ise her iki yönde de %12 olarak imalatçı firma tarafından beyan edilmiştir.

### 2.3. Çalışmada Kullanılan Geri Dolgu Malzemesi (Backfilling Material Used in the Study)

Proje kapsamında kullanılan granüler dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) ve birim hacim ağırlığı ( $\gamma$ ) gibi fiziksel ve mekanik özellikleri proje firmasından veya yüklenici firmadan temin edilememiştir. Ancak çalışmanın amacı, geri dolgu

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan geogridlerin bazı mühendislik özellikleri (Some engineering properties of the geogrids used in the study)

Geogrid tipi	Geogrid göz açıklığı boyutları (mm)	Nihai kopma dayanımı (imalat yönünde), $T_u$ (kN/m)	Dayanım azaltma katsayıları			İzin verilen (tasarım) kopma dayanımı, $T_a$ (kN/m)
			Sünmeye karşı ( $K_{sn}$ )	Yerleştirme hasarına karşı ( $K_{yr}$ )	Yıpranmaya karşı ( $K_{yp}$ )	
G1	25×25	35	1,42	1,11	1,15	19,3
G2	25×25	55	1,42	1,11	1,15	30,3
G3	25×25	80	1,42	1,11	1,15	44,1
G4	25×25	110	1,42	1,11	1,15	60,7



malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimin geogridin güvenlik katsayıları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi olduğundan bu değerler tahmine dayalı olarak seçilmiştir. Bu amaçla, saha gözlemlerine dayanılarak ve literatürde önerilen değerler dikkate alınarak olabildiğince gerçekçi bir şekilde altı farklı parametre seti seçilmiştir (Çizelge 3).

Dolguda iri daneli granüler bir malzeme kullanıldığı için hesaplamalarda kohezyon değeri sıfır olarak alınmıştır.

**Çizelge 3.** Dolgu malzemesi için tahmine dayalı olarak seçilen parametreler (Estimated parameters for the backfill material)

Geri dolgu malzemesi	İçsel sürtünme açısı, $\phi$ (°)	Birim hacim ağırlık, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
M1	28	19,0
M2	30	19,0
M3	32	19,0
M4	34	19,0
M5	30	18,0
M6	30	17,0

#### 2.4. Geogrid Donatılı İstinat Duvarının İmalat Aşamaları (Construction Stages of the Geogrid-Reinforced Retaining Wall)

İlk olarak geogrid donatılı istinat duvarı temelini inşası için dere yatağında bulunan su, pompalar yardımıyla uzaklaştırılmıştır. Daha sonra, kutu menfezin inşa edileceği zemin düzeltilmiş ve üzerine grobeton dökülmüştür (Şekil 7). Grobetonun dökülmesinin ardından kutu menfezin imalatına geçilmiştir (Şekil 8).



Şekil 7. Kutu menfezin inşa edileceği zeminin düzeltilmesi (Leveling the ground on which the box culvert will be constructed)



Şekil 8. Kutu menfezin kısmen tamamlanmış görüntüsü (A view of the partially completed box culvert)

Kutu menfezin imalatı tamamlandıktan sonra geogrid donatılı istinat duvarının imalatına başlanmıştır. Geogrid donatılı istinat duvarının başlangıç aşaması, ileri bir aşaması ve tamamlanmış haline ait fotoğraflar Şekil 9-11'de verilmiştir.



Şekil 9. Geogrid donatılı istinat duvarının başlangıç aşaması (Initial stage of geogrid-reinforced retaining wall)



Şekil 10. Geogrid donatılı istinat duvar imalatının ileri bir aşaması (An onward construction stage of the geogrid reinforced retaining wall)



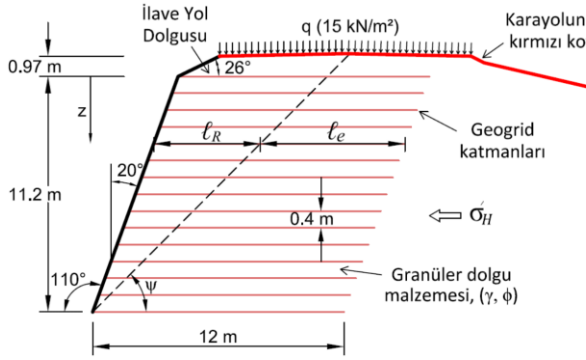
Şekil 11. Geogrid donatılı istinat duvarının tamamlanmış halinden bir görünüm (A view of the completed stage of the geogrid reinforced retaining wall)

### 3. TASARIM HESAPLAMALARI (DESIGN CALCULATIONS)

Geogrid donatılı duvar hesaplamaları için yolun 36+600'üncü kilometresinden çıkartılan kesit ve sahadaki imalata uygun olarak hazırlanmış ön tasarım çizimi Şekil 12'de sunulmuştur.

Hesaplamaların, yerinde gerçekleştirilen imalata uygun olması için geogrid düşey aralığı  $S_v = 0,40$  m, geogrid uzunluğu ise  $L = 12$  m olarak alınmıştır. Dayanım azaltma katsayıları için imalatçı firma tarafından beyan edilen ve Çizelge 2'de sunulan katsayılar dikkate

alınmıştır. Geogridin kopmaya ve sıyrılmaya karşı güvenlik katsayıları için literatürde [8, 11] önerilen ve genel kabul görmüş olan  $G.S=1,5$  değeri kullanılmıştır.



Şekil 12. Geogrid donatılı duvara ait ön tasarım çizimi (Preliminary design drawing of the geogrid-reinforced wall)

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

##### 4.1. İçsel Sürtünme Açısının Kopmaya Karşı Güvenlik Katsayısı Üzerindeki Etkisi (The Effect of the Angle of Internal Friction on the Factor of Safety Against Rupture)

İçsel sürtünme açısının geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayıları üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, G1, G2, G3 ve G4 geogridleriyle  $\phi = 28, 30, 32$  ve  $34^\circ$  için kopmaya karşı güvenlik katsayıları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4-5'te ve Şekil 13-15'te sunulmuştur. Bu hesaplamalarda  $\gamma = 19$   $\text{kN/m}^3$  olarak alınmıştır. Hesaplamalar 0,4 m aralıklarla yapılmış olup, metinde fazla yer kaplamaması için Çizelge 4 ve 5'te seyreltilerek (0,8 m aralıklarla) sunulmuştur.

Çizelge 4. G1 geogridle ( $T_u = 35$   $\text{kN/m}$ ) hesaplanan kopmaya karşı güvenlik katsayılarının içsel sürtünme açısı ile birlikte değişimi ve değişim oranları (Variation and the rate of change of the factor of safety against rupture calculated with the G1 geogrid ( $T_u = 35$   $\text{kN/m}$ ) together with the angle of internal friction)

z (m)	Kopmaya Karşı Güvenlik Katsayısı				Değişim Oranları		
	$\phi = 28^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 32^\circ$	$\phi = 34^\circ$	$\phi = 28^\circ-30^\circ$ arasında (%7,2)	$\phi = 28^\circ-32^\circ$ arasında (%14,3)	$\phi = 28^\circ-34^\circ$ arasında (%21,4)
0,40	4,9	5,5	6,3	7,2	11,6	28,5	46,6
1,20	3,6	4,0	4,6	5,2	11,6	28,5	46,6
2,00	2,8	3,2	3,6	4,1	11,6	28,5	46,6
2,80	2,3	2,6	3,0	3,4	11,6	28,5	46,6
3,60	2,0	2,2	2,5	2,9	11,6	28,5	46,6
4,40	1,7	1,9	2,2	2,5	11,6	28,5	46,6
5,20	1,5	1,7	2,0	2,2	11,6	28,5	46,6
6,00	1,4	1,5	1,8	2,0	11,6	28,5	46,6
6,80	1,2	1,4	1,6	1,8	11,6	28,5	46,6
7,60	1,1	1,3	1,5	1,7	11,6	28,5	46,6
8,40	1,0	1,2	1,3	1,5	11,6	28,5	46,6
9,20	1,0	1,1	1,2	1,4	11,6	28,5	46,6
10,00	0,9	1,0	1,2	1,3	11,6	28,5	46,6
10,80	0,8	1,0	1,1	1,2	11,6	28,5	46,6

Duvarın ön yüz eğim açısı  $10$  dereceden büyük ( $\omega > 10^\circ$ ) olduğu için aktif zemin basınç katsayısı ( $K_a$ ) Eş. 9, potansiyel yenilme düzleminin yatayla yaptığı açı ( $\psi$ ) ise Eş. 10 ile hesaplanmıştır.

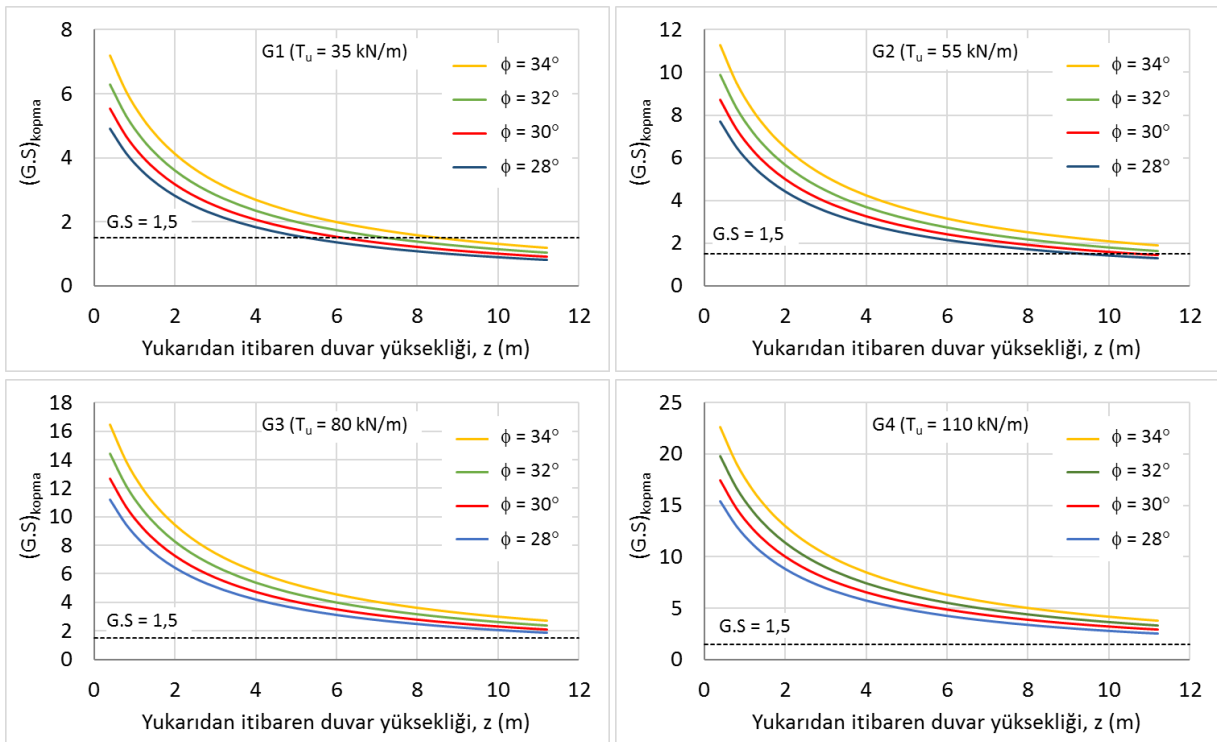
Duvarı meydana getiren dolgunun kendi ağırlığından kaynaklanan düşey gerilmeler ( $\sigma_v$ ) hesaplanırken, duvarın üstündeki ilave dolgunun yüksekliği ( $D$ ),  $z$  mesafesine eklenerek bu dolgunun oluşturacağı düşey geostatik gerilmeler de hesaba katılmıştır. Diğer bilgiler ve ölçüler Şekil 12'de verildiği gibi alınmıştır.

Kopmaya karşı güvenlik katsayısındaki değişim oranları G1 geogrid için Çizelge 4'te sunulmuş, G2, G3 ve G4 geogridlerde de aynı değişim oranları elde edildiği için Çizelge 5'te bu oranlar tekrar sunulmamıştır.

Duvar yüksekliği boyunca yukarıdan aşağıya doğru hesap derinliği ( $z$  mesafesi) arttıkça düşey efektif gerilmeler ve dolayısıyla geogride etki eden yatay çekme kuvvetleri de artmakta ve bunun bir sonucu olarak geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayıları derinlik boyunca azalmaktadır (Çizelge 4-5, Şekil 13). Ancak, kopmaya karşı güvenlik katsayıları derinlikle birlikte azalsa da içsel sürtünme açısının güvenlik katsayısı üzerindeki etkisinin derinlikle birlikte değişmediği

**Çizelge 5.** G2, G3 ve G4 geogridlerle hesaplanan kopmaya karşı güvenlik katsayılarının içsel sürtünme açısı ile birlikte değişimi (Variation of the factor of safety against rupture calculated with G2, G3 and G4 geogrids with angle internal friction)

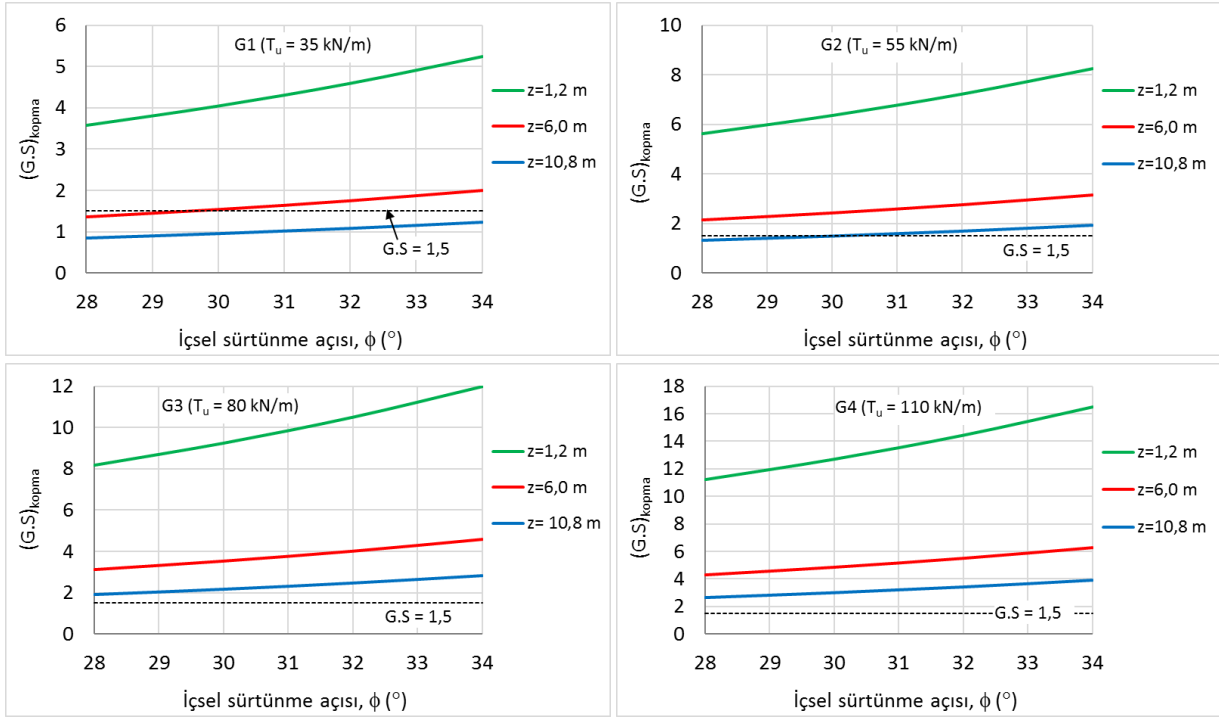
z (m)	Kopmaya Karşı Güvenlik Katsayısı											
	$T_u = 55 \text{ kN/m}$ (G2) ve $\phi =$				$T_u = 80 \text{ kN/m}$ (G3) ve $\phi =$				$T_u = 110 \text{ kN/m}$ (G4) ve $\phi =$			
	28°	30°	32°	34°	28°	30°	32°	34°	28°	30°	32°	34°
0,40	7,7	8,7	9,9	11,3	11,2	12,7	14,4	16,4	15,4	17,4	19,8	22,6
1,20	5,6	6,4	7,2	8,2	8,2	9,3	10,5	12,0	11,2	12,7	14,4	16,5
2,00	4,4	5,0	5,7	6,5	6,4	7,3	8,3	9,4	8,9	10,0	11,4	13,0
2,80	3,6	4,1	4,7	5,4	5,3	6,0	6,8	7,8	7,3	8,3	9,4	10,7
3,60	3,1	3,5	4,0	4,6	4,5	5,1	5,8	6,6	6,2	7,0	8,0	9,1
4,40	2,7	3,1	3,5	4,0	3,9	4,4	5,0	5,8	5,4	6,1	6,9	7,9
5,20	2,4	2,7	3,1	3,5	3,5	3,9	4,5	5,1	4,8	5,4	6,1	7,0
6,00	2,1	2,4	2,8	3,1	3,1	3,5	4,0	4,6	4,3	4,9	5,5	6,3
6,80	1,9	2,2	2,5	2,9	2,8	3,2	3,6	4,1	3,9	4,4	5,0	5,7
7,60	1,8	2,0	2,3	2,6	2,6	2,9	3,3	3,8	3,6	4,0	4,6	5,2
8,40	1,6	1,9	2,1	2,4	2,4	2,7	3,1	3,5	3,3	3,7	4,2	4,8
9,20	1,5	1,7	2,0	2,2	2,2	2,5	2,8	3,2	3,0	3,4	3,9	4,5
10,0	1,4	1,6	1,8	2,1	2,1	2,3	2,6	3,0	2,8	3,2	3,6	4,1
10,8	1,3	1,5	1,7	1,9	1,9	2,2	2,5	2,8	2,6	3,0	3,4	3,9



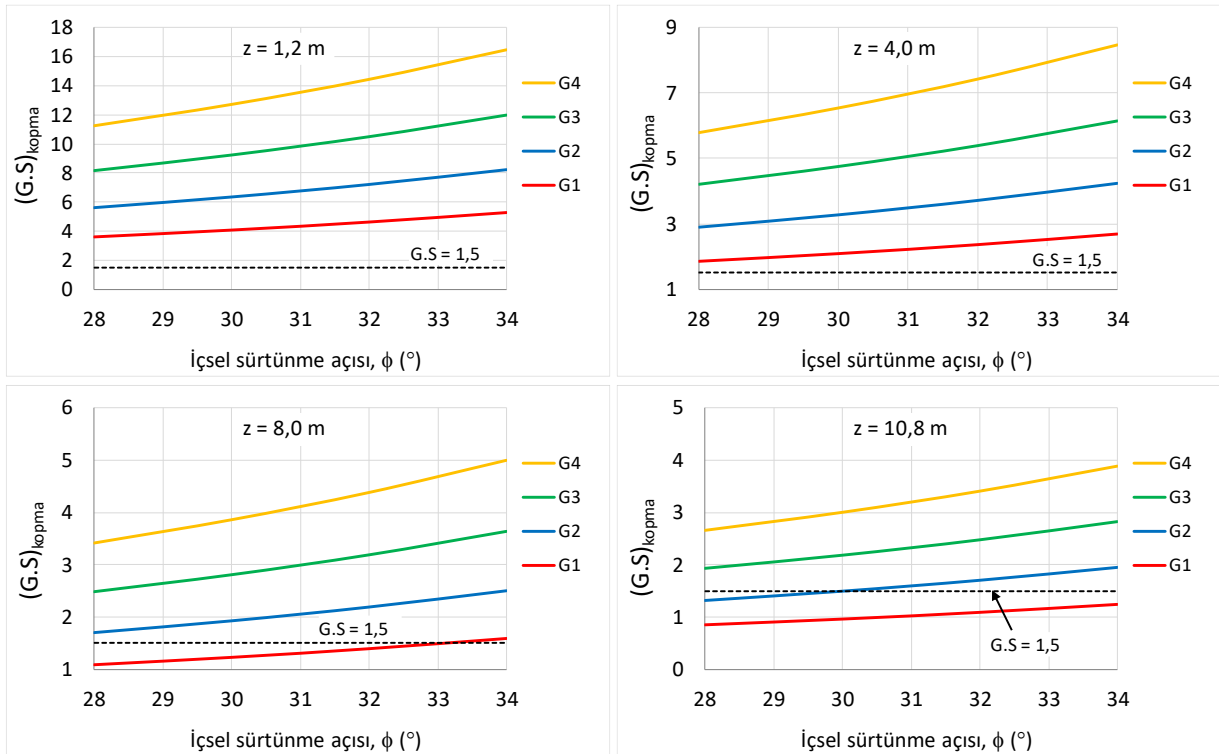
**Şekil 13.** Kopmaya karşı güvenlik katsayısının duvar yüksekliğine ve içsel sürtünme açısına bağlı değişimi (Variation of the factor of safety against rupture depending on the wall height and the angle of internal friction)

görülmüştür (Çizelge 4). Örneğin, G1 ( $T_u=35 \text{ kN/m}$ ) geogrid için yapılan hesaplamalar dikkate alındığında,  $z = 1,2 \text{ m}$ 'de içsel sürtünme açısı 28 dereceden 34 dereceye çıktığında (%21,4'lük bir artış) kopmaya karşı güvenlik katsayısı 3,6'dan 5,2'ye yükselmiştir (artış oranı %46,6). Aynı geogrid için  $z = 10,8 \text{ m}$ 'de içsel sürtünme açısı

%21,4 oranında ( $28^\circ$ 'den  $34^\circ$ 'ye) arttığında, kopmaya karşı güvenlik katsayısı yine %46,6 oranında artarak 0,8'den 1,2'ye yükselmiştir (Çizelge 4). Diğer derinlikler için hesap yapıldığında, içsel sürtünme açısındaki %21,4'lük artış için güvenlik katsayısındaki artış oranının yine %46,6 olduğu görülmüştür. İçsel



**Şekil 14.** Bazı z derinlikleri için kopmaya karşı güvenlik katsayısının içsel sürtünme açısına bağlı değişimi (Variation of the factor of safety against rupture for some depths  $z$  depending on the angle of internal friction)

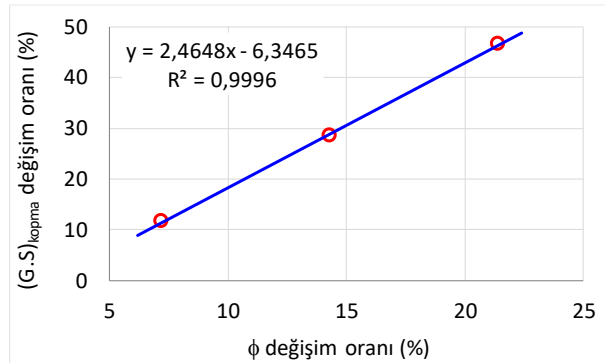


**Şekil 15.** Geogrid dayanımına göre kopmaya karşı güvenlik katsayısının içsel sürtünme açısına bağlı değişimi (The variation of the factor of safety against rupture with respect to the geogrid strength depending on the angle of internal friction)

sürtünme açısının %7,2 ve %14,3 oranında artması ise kopmaya karşı güvenlik katsayılarında sırasıyla %11,6 ve %28,5'lik bir artışa neden olduğu görülmüştür (Çizelge 4).

Çizelge 4'de görülen artış oranlarının, çekme dayanımları farklı diğer geogridler için de geçerli olduğu görülmüştür. Bu veriler kullanılarak, içsel sürtünme açısındaki değişim oranıyla kopmaya karşı güvenlik

katsayısındaki değişim oranı arasındaki ilişki grafik halinde Şekil 16'da sunulmuştur.



**Şekil 16.** İçsel sürtünme açısındaki değişim oranıyla geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısındaki değişim oranı arasındaki ilişki (The relationship between the rate of change in the angle of internal friction and the rate of change in the geogrid's factor of safety against rupture)

Şekil 16'dan da görüleceği gibi,  $\phi=28-34$  gibi dar bir aralıkta, içsel sürtünme açısındaki değişim oranıyla geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısındaki değişim oranı arasında hemen hemen doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişkinin, hesap yapılan derinlik (z) ve tasarımda kullanılan geogridin nihai kopma dayanımından ( $T_u$ ) bağımsız olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, kopmaya karşı güvenlik katsayısındaki artış oranı içsel sürtünme açısındaki artış oranının yaklaşık 2 katı kadardır. Örneğin içsel sürtünme açısı %15 oranında arttığında kopmaya karşı güvenlik katsayısı %30 oranında artmaktadır (Şekil 16).

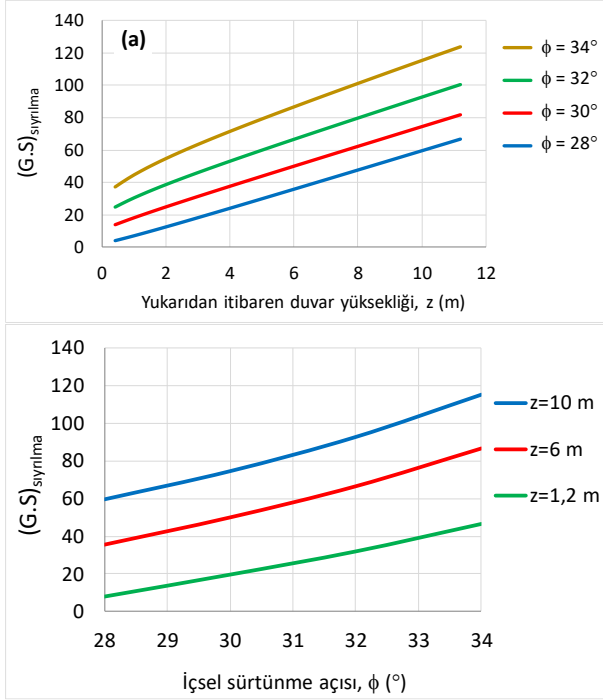
**Çizelge 6.** Sıyırılmaya karşı güvenlik katsayılarının içsel sürtünme açısı ile birlikte değişimi ve değişim oranı (Variation and the rate of change of the factor of safety against pullout together with the angle of internal friction)

z (m)	Sıyırılmaya Karşı Güvenlik Katsayısı				Değişim Oranları		
	$\phi = 28^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 32^\circ$	$\phi = 34^\circ$	$\phi = 28^\circ-30^\circ$ arasında (%7,2)	$\phi = 28^\circ-32^\circ$ arasında (%14,3)	$\phi = 28^\circ-34^\circ$ arasında (%21,4)
0,40	4,0	14,1	24,6	37,0	254,1	518,9	831,4
1,20	8,1	19,8	32,2	46,8	144,2	296,6	477,3
2,00	12,5	25,1	38,6	54,7	100,7	208,7	337,2
2,80	17,1	30,3	44,6	61,8	77,5	161,5	262,1
3,60	21,7	35,3	50,3	68,3	62,9	132,2	215,3
4,40	26,3	40,3	55,9	74,6	53,0	112,1	183,4
5,20	31,0	45,2	61,3	80,7	45,8	97,5	160,2
6,00	35,7	50,2	66,6	86,7	40,4	86,5	142,5
6,80	40,5	55,1	71,9	92,5	36,1	77,8	128,7
7,60	45,2	59,9	77,2	98,3	32,6	70,8	117,5
8,40	49,9	64,8	82,4	104,1	29,8	65,0	108,4
9,20	54,7	69,7	87,6	109,8	27,4	60,2	100,7
10,00	59,4	74,5	92,8	115,4	25,3	56,1	94,1
10,80	64,2	79,4	98,0	121,1	23,6	52,6	88,5

#### 4.2. İçsel Sürtünme Açısının Sıyırılmaya Karşı Güvenlik Katsayısı Üzerindeki Etkisi (The Effect of the Angle of Internal Friction on the Factor of Safety Against Pullout)

İçsel sürtünme açısının sıyırılmaya karşı güvenlik katsayıları üzerindeki etkisini belirlemek için,  $\phi = 28, 30, 32$  ve  $34^\circ$  için hesaplanan güvenlik katsayıları Çizelge 6'da ve Şekil 17'de sunulmuştur. Bu hesaplamalarda  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$  olarak alınmıştır. Hesaplamalar 0,4 m aralıklarla yapılmış olup, metinde fazla yer kaplamaması için Çizelge 6'da seyreltilerek (0,8 m aralıklarla) sunulmuştur. Geogridin kopma dayanımının sıyırılmaya karşı güvenlik katsayısı üzerinde etkisi olmadığından Çizelge 6'da ve Şekil 17'de sunulan sonuçlar geogridin kopma dayanımından bağımsız olup, G1, G2, G3 ve G4 geogridlerin hepsi için geçerlidir.

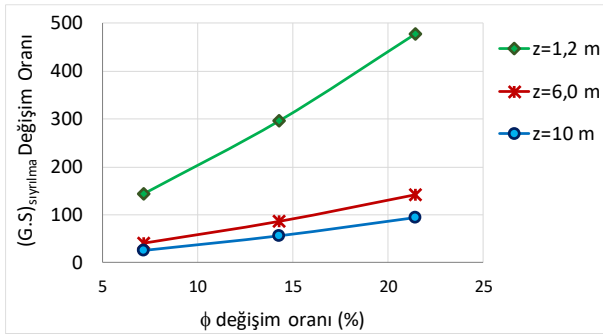
Yukarıdan aşağıya doğru hesap derinliği (z mesafesi) arttıkça geogridi sıkıştıran düşey gerilmeler de arttığı için buna bağlı olarak sıyırılmaya karşı güvenlik katsayılarının da arttığı ve duvar tabanına doğru yaklaştıkça çok yüksek mertebelere ulaştığı görülmektedir (Çizelge 6, Şekil 17a). Örneğin  $\phi = 28^\circ$  için yapılan hesaplarda, sıyırılmaya karşı güvenlik katsayısı duvarın en üst noktasında 4 olarak elde edilirken duvarın en alt noktasında ise 64,2 olarak elde edilmiştir (Çizelge 6).  $\phi = 30^\circ, 32^\circ$  ve  $34^\circ$  için elde edilen güvenlik katsayılarının daha da yüksek olduğu Çizelge 6'dan ve Şekil 17'den görülmektedir.



**Şekil 17.** Sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısının; **a)** duvar yüksekliğine, **b)** içsel sürtünme açısına bağlı değişimi (Variation of the factor of safety against pullout depending on the a) wall height and b) the angle of internal friction)

İçsel sürtünme açısının sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısı üzerindeki etkisini değerlendirmek için duvar yüksekliği boyunca seçilen bazı  $z$  mesafeleri için içsel sürtünme açısıyla sıyrılmaya karşı güvenlik katsayıları arasındaki ilişki Şekil 17b’de sunulmuştur.

İçsel sürtünme açısına bağlı olarak sıyrılmaya karşı güvenlik katsayılarındaki artış oranının derinlikle birlikte değiştiği de gözlenmiştir. Seçilen bazı derinlikler için, içsel sürtünme açısındaki değişim oranının sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısındaki değişim oranı üzerindeki etkisini gösteren grafikler Şekil 18’de sunulmuştur.



**Şekil 18.** İçsel sürtünme açısındaki değişim oranıyla geogridin sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısındaki değişim oranı arasındaki ilişki (The relationship between the rate of change in the angle of internal friction and the rate of change in the factor of safety against pullout of the geogrid)

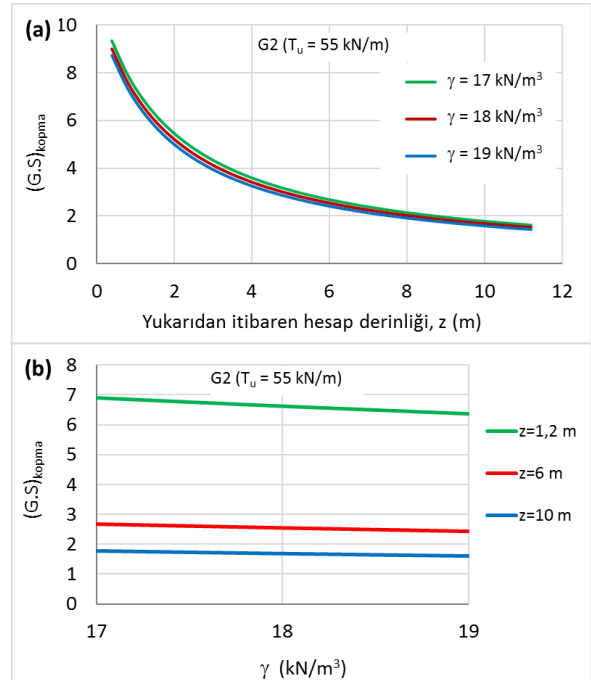
Şekil 18 incelendiğinde duvarın üst kısımlarında, sıyrılmaya karşı güvenlik katsayılarının içsel sürtünme

açısının değişim oranından daha fazla etkilendiği görülmektedir. Örneğin içsel sürtünme açısında %15’lik bir artış, sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısında,  $z=1,2$  m’de yaklaşık %310,  $z=10$  m’de ise yaklaşık %60’lık bir artış sağlamıştır (Şekil 18).

Yapılan analizler sonucunda sıyrılmaya karşı güvenlik katsayılarının kopmaya karşı güvenlik katsayılarına kıyasla daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu bakımdan tasarım hesaplarında, kopmaya karşı güvenlik katsayısının daha kritik olduğu ve tasarımı kontrol eden asıl faktörün kopmaya karşı güvenlik katsayısı olduğu sonucuna varılmıştır. O nedenle, her ne kadar içsel sürtünme açısındaki değişimlerin sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısı üzerindeki etkisi daha büyük olsa da, kopmaya karşı güvenlik katsayısı üzerindeki etkisinin daha kritik olduğu değerlendirilmiştir.

#### 4.3. Dolgunun Birim Hacim Ağırlığının Kopmaya ve Sıyrılmaya Karşı Güvenlik Katsayıları Üzerindeki Etkisi (Effect of the Angle of Internal Friction on the Factors of Safety Against Rupture and Pullout)

Dolgunun birim hacim ağırlığının kopmaya ve sıyrılmaya karşı güvenlik katsayıları üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla,  $T_u = 55$  kN/m ( $G_2$ ) ve  $\phi=30^\circ$  değerleri sabit tutularak  $\gamma = 17, 18$  ve  $19$  kN/m<sup>3</sup> için güvenlik katsayıları hesaplanmış ve sonuçları Çizelge 7’de ve Şekil 19-20’de sunulmuştur. Hesaplamalar 0,4 m aralıklarla yapılmış olup, metinde fazla yer kaplamaması için Çizelge 7’de seyreltilerek (0,8 m aralıklarla) sunulmuştur.



**Şekil 19.**  $G_2$  geogrid için hesaplanan kopmaya karşı güvenlik katsayısının; **a)** yukarıdan itibaren hesap derinliğine ve **b)** dolgunun birim hacim ağırlığına bağlı değişimi (Variation of the factor of safety against rupture calculated for the  $G_2$  geogrid depending on a) the calculation depth from above and b) the unit weight of the backfill material)

**Çizelge 7.** G2 geogrid ( $T_u = 55 \text{ kN/m}$ ) ve  $\phi=30^\circ$  için hesaplanan kopmaya ve sıyrılmaya karşı güvenlik katsayılarının birim hacim ağırlık ile birlikte değişimi (Variation of the factors of safety against rupture and pullout calculated for G2 geogrid ( $T_u = 55 \text{ kN/m}$ ) and  $\phi=30^\circ$  with unit weight)

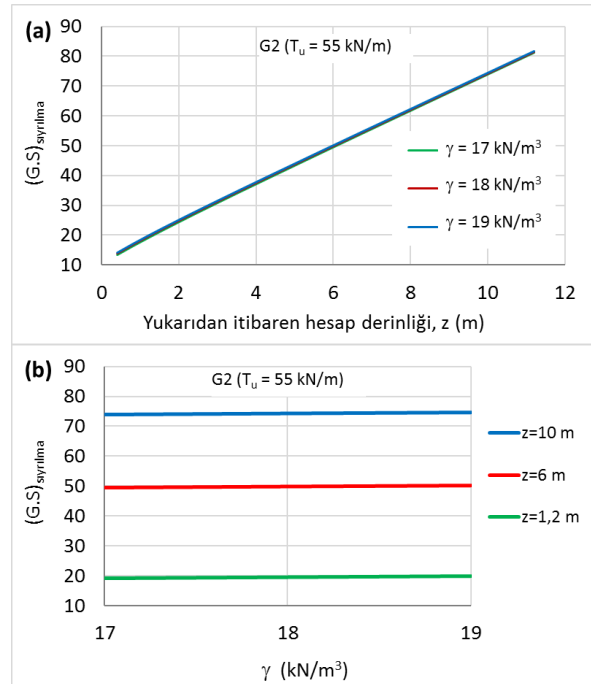
z (m)	Kopmaya Karşı Güvenlik Katsayısı			Sıyrılmaya Karşı Güvenlik Katsayısı		
	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
0,40	9,3	9,0	8,7	13,5	13,8	14,1
1,20	6,9	6,6	6,4	19,2	19,5	19,8
2,00	5,5	5,2	5,0	24,5	24,8	25,1
2,80	4,5	4,3	4,1	29,7	30,0	30,3
3,60	3,9	3,7	3,5	34,7	35,0	35,3
4,40	3,4	3,2	3,1	39,7	40,0	40,3
5,20	3,0	2,8	2,7	44,7	45,0	45,2
6,00	2,7	2,5	2,4	49,6	49,9	50,2
6,80	2,4	2,3	2,2	54,5	54,8	55,1
7,60	2,2	2,1	2,0	59,3	59,7	59,9
8,40	2,1	1,9	1,9	64,2	64,5	64,8
9,20	1,9	1,8	1,7	69,1	69,4	69,7
10,00	1,8	1,7	1,6	73,9	74,2	74,5
10,80	1,7	1,6	1,5	78,8	79,1	79,4

Çizelge 7 ve Şekil 19-20'de verilen sonuçlar incelendiğinde, dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığının sıyrılmaya ve kopmaya karşı güvenlik katsayıları üzerindeki etkisinin fazla olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte, birim hacim ağırlığın kopmaya ve sıyrılmaya karşı güvenlik katsayıları üzerindeki etkisinin derinlikle birlikte değiştiği ve dolgunun birim hacim ağırlığı arttıkça kopmaya karşı güvenlik katsayılarının az da olsa azaldığı, sıyrılmaya karşı güvenlik katsayılarının ise az da olsa arttığı görülmüştür (Şekil 19b ve 20b, Çizelge 7). Örneğin, dolgunun birim hacim ağırlık değerindeki  $1 \text{ kN/m}^3$ 'lük bir artış kopmaya karşı güvenlik katsayısında yaklaşık %4-5'lik bir azalmaya,  $2 \text{ kN/m}^3$ 'lük bir artış ise yaklaşık %8-11'lik bir azalmaya neden olmuştur (Çizelge 7).

Birim hacim ağırlık değerinin sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise, birim hacim ağırlık değerindeki  $1 \text{ kN/m}^3$ 'lük bir artışın sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısında yaklaşık % 0,4-%1,5'lik bir artışa,  $2 \text{ kN/m}^3$ 'lük bir artışın ise yaklaşık % 0,8-%3,5'lik bir artışa neden olduğu görülmüştür (Çizelge 7).

Elde edilen bu sonuçlara göre, dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığının kopmaya karşı güvenlik katsayısı üzerindeki etkisinin daha kritik olduğu görülmüştür.

Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığının yerinden alınan numuneler üzerinde laboratuvarında deney yapılarak bulunması ve tasarım hesaplarında güvenli tarafta kalmak için elde edilen sonuçlardan en yüksek olan değer kullanılması fayda sağlamıştır.



**Şekil 20.** G2 geogrid için hesaplanan sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısının; a) yukarıdan itibaren hesap derinliğine ve b) dolgunun birim hacim ağırlığına bağlı değişimi (Variation of the factor of safety against pullout calculated for the G2 geogrid depending on a) the calculation depth from above and b) the unit weight of the backfill material)

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada geogrid donatılı istinat duvarı yapımında kullanılan granüler dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısının ve birim hacim ağırlığının geogridin kopmaya ve sıyrılmaya karşı güvenlik katsayıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısındaki değişim oranıyla geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısındaki değişim oranı arasında hemen hemen doğrusal bir ilişki bulunduğu ve aralarında yaklaşık 2 kat fark olduğu görülmüştür. Örneğin, dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı %10 oranında arttığında geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısı yaklaşık %20 oranında artmaktadır. Bu ilişkinin, hesap yapılan derinlikten ve tasarımda kullanılan geogridin nihai kopma dayanımından bağımsız olduğu bulunmuştur.
- Dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısının geogridin sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısı üzerindeki etkisinin kopmaya karşı güvenlik katsayısı üzerindeki etkisine kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Örneğin, dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısında %15'lik bir artış, geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısında yaklaşık %30 oranında, sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısında ise duvarın üst kısımlarında yaklaşık %300, duvarın alt kısımlarında ise yaklaşık %60 oranında bir artış meydana getirmiştir.
- Kopmaya karşı güvenlik katsayılarının sıyrılmaya karşı güvenlik katsayılarına kıyasla daha düşük çıktığı görülmüştür. Bu bakımdan tasarım hesaplarında, kopmaya karşı güvenlik katsayısının daha kritik olduğu ve tasarımı kontrol eden asıl faktörün kopmaya karşı güvenlik katsayısı olduğu sonucuna varılmıştır.
- Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı arttıkça geogridin kopmaya karşı güvenlik katsayısının azaldığı (yaklaşık %3), sıyrılmaya karşı güvenlik katsayısının ise arttığı (yaklaşık %10) görülmüştür. Buna göre, dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığının kopmaya karşı güvenlik katsayısı üzerindeki etkisinin daha kritik olduğu değerlendirilmiştir.

Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığının yerinden alınan numuneler üzerinde laboratuvarında deney yapılarak bulunması ve tasarım hesaplarında güvenli tarafta kalmak için elde edilen sonuçlardan en yüksek olan değer kullanılması önerilir.

Ayrıca dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısının yerinden alınan numuneler üzerinde büyük kesme kutusu deney cihazı ile deney yapılarak bulunması, eğer bu mümkün değilse içsel sürtünme açısı için numuneyi temsil edecek birkaç değer kullanılarak çözüm yapılması ve içlerinden en kritik olan çözümün tasarımda dikkate alınması önerilir.

Elde edilen bu sonuçlar polimerik malzemelerden

üretmiş geogridler için geçerli olup, çelik şeritler için daha farklı sonuçlar elde edilebileceği göz ardı edilmemelidir.

## SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

- $D$  : Duvarın üstündeki ilave dolgunun yüksekliği (m)  
 $d_A$  : Kare gözlü geogridlerde göz açıklığının ölçüsü (mm)  
 $d_{90}$  : Geri dolgu malzemesinin %90'nının geçtiği elek göz açıklığı (mm)  
 $F_R$  : Geogridin sıyrılmaya karşı gösterdiği direnç kuvveti (kN/m)  
 $G.S.$  : Güvenlik katsayısı  
 $H$  : Geogrid donatılı duvarın toplam yüksekliği (m)  
 $K_a$  : Aktif toprak basınç katsayısı  
 $K_{sn}$  : Geogridin sünmesinden kaynaklanan dayanım azaltma katsayısı  
 $K_{yp}$  : Geogridin kimyasal ve biyolojik etkiler nedeniyle yıpranmasından (durabilite) kaynaklanan dayanım azaltma katsayısı  
 $K_{yr}$  : Geogridin yerine yerleştirilmesi esnasında meydana gelebilecek hasardan kaynaklanan dayanım azaltma katsayısı  
 $l_R$  : Geogridin, yenilme düzleminin içinde kalan uzunluğu (m)  
 $l_e$  : Geogridin, yenilme düzleminin dışında kalan ve sıyrılmaya karşı koyan uzunluğu (m)  
 $L$  : Geogrid donatısının toplam uzunluğu (m)  
 $P$  : Geogrid ile dolgu malzemesi arasındaki sıyrılmaya (pullout) direnci katsayısı  
 $q$  : Sürşarj yükü (sonsuz alana yayılı olduğu kabul edilen yük) (kN/m<sup>2</sup>)  
 $S_H$  : Geogrid şeridi tarafından tutulan (kuşatılan) kurgusal zemin bloğunun yatay uzunluğu (m)  
 $S_v$  : Geogrid şeridi tarafından tutulan (kuşatılan) kurgusal zemin bloğunun yüksekliği (m)  
 $T$  : Geogride etki eden yatay çekme kuvveti (kN)  
 $T_a$  : Geogridin izin verilen (tasarım) kopma dayanımı (kN/m)  
 $T_u$  : Geogridin deneyde bulunan, fabrika çıkışı nihai kopma dayanımı (kN/m)  
 $z$  : Duvarın üst yüzeyinden itibaren hesap yapılan derinlik (m)  
 $\sigma'_H$  : Geogrid donatılarına etki eden toplam yanal zemin basıncı (kN/m<sup>2</sup>)  
 $\sigma'_v$  : Dolgu malzemesini kendi ağırlığından kaynaklanan düşey efektif gerilme (kN/m<sup>2</sup>)  
 $\sigma'_{hs}$  : Dolgu malzemesinin kendi ağırlığından kaynaklanan yanal toprak basıncı (kN/m<sup>2</sup>)  
 $\sigma'_{hq}$  : Sürşarj yükünden kaynaklanan yanal toprak basıncı (kN/m<sup>2</sup>)



$\sigma'_{hl}$  : Hareketli veya canlı yüklerden kaynaklanan yanal toprak basıncı (kN/m<sup>2</sup>)  
 $\gamma$  : Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı (kN/m<sup>3</sup>)  
 $\phi$  : Dolgu malzemesini içsel sürtünme açısı (°)  
 $\theta$  : Duvarın ön yüzeyinin, duvarın önünden itibaren saat yönünde yatayla yaptığı açı (°)  
 $\omega$  : Duvarın ön yüzeyinin düşeyden sapma açısı (°)  
 $\beta$  : Duvarın üstündeki dolgunun ön yüzeyinin yatayla yaptığı açı (°)  
 $\psi$  : Potansiyel yenilme düzleminin yatayla yaptığı açı (°)  
 $\alpha$  : Geogrid ile dolgu malzemesi arasındaki sıyrılmaya (pullout) direncinin bulunmasında boyut etkisini dikkate alan bir katsayı

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Proje verilerini bizimle paylaşan YMN GRUP Mühendislik İnşaat Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. firmasına ve proje konusunda kıymetli vaktini ayıran Jeoloji Mühendisi Ali ALATAŞ'a teşekkür ederiz.

### ETİK STANDARTLARIN BEYANI

#### (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Mustafa ÖZER:** Tasarım hesaplarını kontrol etmiş, sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Burak ÇELEBİ:** Tasarım hesaplarını yapmıştır.

### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] TS EN ISO 10318, "Geosynthetics - Part 1: Terms and Definitions", *Türk Standardları Enstitüsü*, Bakanlıklar/ANKARA, (2015)
- [2] ASTM Standard D4439, "Standard Terminology for Geosynthetics", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2015, DOI: 10.1520/D4439-15, www.astm.org, (2015)
- [3] IGS (International Geosynthetics Society). "Recommended Descriptions of geosynthetics Functions, Geosynthetics Terminology, Mathematical and Graphical Symbols", South Carolina/ U.S.A., (2009)
- [4] Koerner, R.M., "Designing with Geosynthetics", Fifth Ed., *Prentice-Hall, Inc.*, New Jersey, U.S.A. (2005)
- [5] Shukla, S. K., and Yin, J-H., "Fundamentals of Geosynthetic Engineering", *Taylor & Francis Group*, London, UK. (2006).
- [6] Özer, M., "Jeosentetikler ve mühendislik uygulamalarında kullanımları", *Yer Mühendisliği*, Yıl 4, Sayı 8, s.16-23, Ocak-Nisan (2017)
- [7] Das, B. M., Atalar, C., "Developments in the Use of Geogrids in Railroad Beds and Ballast Construction-A Review", *5. Ulusal Geosentetikler Konferansı*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, s. 1-21, 24-25 Mayıs (2012)
- [8] Elias, V., Christopher, B.R. and Berg, R.R., "Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Design & Construction Guidelines", *FHWA-NHI-00-043*, National Highway Institute, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. 394 p. (2001)
- [9] Güler, E., "Geosentetik Donatılı İstinat Duvarı (Geoduvar) Bir Şartname Taslağı". *G2 İkinci Ulusal Geosentetikler Konferansı*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, s. 221-227, 16-17 Kasım (2006).
- [10] Güler, E., "Geoteknik Mühendisliğinde Yeni Bir Devir Başlatan Malzeme: Geosentetikler", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 15. Ulusal Kongresi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara. s.1-35, 16 - 17 Ekim (2014)
- [11] Holtz, R.D., Christopher, B.R., and Berg, R.R., "Geosynthetic Design and Construction Guidelines", *FHWA-NHI-07-092*, National Highway Institute, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. 592 p. (2008)
- [12] Kaba, E., Türköz, M., "Heyelan stabilizasyonunda rijit ve geosentetik donatılı duvarların karşılaştırmalı analizi ve bir uygulama", *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B- Teorik Bilimler*, 7(2), 146-158, (2019).
- [13] Yumurtaş, H.İ., Keskin, İ., Aydın, U., "Geosentetik Donatılı İstinat Duvarı ile Betonarme İstinat Duvarının Karşılaştırmalı Analizi: Kastamonu-Karabük Karayolu Örneği", *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 225-240, (2022).
- [14] Das, B.M., "Principles of Foundation Engineering", Seventy Edition, *Cengage Learning*, Stamford, USA, (2011).
- [15] Budhu, M., "Soil Mechanics and Foundations", 3rd ed., *John Wiley & Sons, Inc.*, USA, (2011)
- [16] Berg, R.R., Christopher, B.R., and Samtani, N.C., "Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I", *FHWA-NHI-10-024*, National Highway Institute, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. 306 p. (2009)
- [17] Koerner, R.M., Koerner, G.R., "Reduction Factors (RFs) Used in Geosynthetic Design", *GSI White Paper #4*, Geosynthetic Institute, USA, (2007)
- [18] Özer, M., "Determination of the relationship between geogrid aperture size and aggregate particle size", *Arabian Journal of Geosciences*, 14:3, (2021).