



Geotekstil Donatılı Kum Zeminlerin Ara Yüzey Kayma Dayanımını Etkileyen Faktörler

Factors Affecting The Interface Shear Strength of Geotextile Reinforced Sand Soils

Utku Sarıyar *^{ORCID}, Selim Altun ^{ORCID}

Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE
 Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: 91210000792@ogrenci.ege.edu.tr

Öz

Geotekstiller istinat duvarı, yol, zemin drenajı ve benzeri yapılarda malzemenin ayırıcı, stabilite, güçlendirme ve koruma özelliklerinden faydalanmak için kullanılmaktadır. Farklı türdeki geotekstiller zemin kayma dayanımına etki eden faktörlerin farklı yollarla iyileşmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada 4 farklı tipte geotekstilin 3 adet kötü derecelenmiş ve 1 adet iyi derecelenmiş kum zeminde donatı olarak kullanıldığında kayma dayanım parametreleri üzerinde oluşturduğu etkileri incelemek için laboratuvar da kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilere göre donatılı zeminlerin hepsinde pik dayanım sonrasında kayma dayanımında donatısız zeminlere kıyasla daha az düşüş olduğu görülmüştür. Geotekstillerin en etkili olduğu durumlar dane boyutlarına ve türüne göre değişiklik göstermiştir. Gevşek sıklıkta numunelerde ara yüzey sürtünme açısı oranı sıkı numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Geotekstil donatılı zeminlerin ara yüzey sürtünme açısının normal gerilme arttıkça donatısız zeminlere kıyasla daha fazla azaldığı görülmüştür. Ayrıca, normal gerilme değerleri arttıkça ara yüzey sürtünme açıları geotekstil türüne göre farklı miktarlarda azalmıştır. Bu sonuçların başlıca sebeplerinin kullanılan geotekstilin sertliği, temas yüzey alanı, dokusu ve kesme kutusuna yerleştirme şekli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kesme Kutusu Deneyi, Kum Zemin, Geotekstil, Geokompozit, Ara yüzey Sürtünme Açısı

Abstract

Geotextiles are used in many applications like retaining walls, roads, and ground drainage systems due to their functions such as separation, stability, reinforcement, and protection. Different types of geotextiles improve soil shear strength in various ways. In this study, shear box tests were carried out in the laboratory to examine the effects of 4 different geotextiles on the shear strength parameters when used as reinforcement in 3 poorly graded and 1 well-graded sands. According to the test results, the shear strength after peak stress was less reduced in all reinforced soils compared to unreinforced soils. The effectiveness of the geotextiles varied depending on the grain size and type of sand. The interface friction angles ratio was higher in loose soils than in dense soils. Also, the interface friction angle of geotextile reinforced soils decreased more significantly with compared to unreinforced soils when normal stress increased. As the normal stress increased, the interface friction angles decreased in different amounts depending on the type of geotextile used. The main reasons for these results were found to be the geotextile's hardness, contact surface area, texture, and placement within the shear box.

Keywords: Shear Box Test, Sand Soil, Geotextile, Geocomposite, Interface Friction Angle

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Geotextiles are increasingly used in civil engineering to improve the mechanical properties of soil. They have been the subject of literature because they provide solutions to many problems with their reinforcement, separation and protection functions in retaining walls and asphalt roads. In order to find out which factors affect the shear strength, shear box tests were carried out in the laboratory to examine the effects of 4 different geotextiles on the shear strength parameters when used as reinforcement in 4 different sands.

The main factors affecting the shear strength of soils are the relative density, grain shape and grain size distribution of the soil.

When these geotextiles are used with soils, the number of factors naturally increases. For example, shear stress can occur along the geosynthetic-soil interface as a result of one or more combinations of mechanisms such as sliding, adhesion, embedding of particles in the geosynthetic surface, rolling of soil particles and interlocking of particles [1]. According to the shear box test results, it was stated that the shear strength in sand consists of two factors; the first factor is the friction between the rolling and sliding soil particles and the second factor is interlocking [4].

Materials and Methods

The geotextiles used in the study are defined as WG, PP 1500, PP 3000 and GC 150. WG is a woven geotextile with a smooth surface produced by polyester. PP 1500 and PP 3000 are nonwoven geotextiles produced by needle punching of fine polypropylene fibers. GC150 material is a geocomposite formed by sewing a geogrid and a nonwoven geotextile made of polypropylene fibers. In the experiments, natural sand found in the Gediz River in the Izmir Province was used. As a result of visual examinations, it was seen that the grain structure was angular. All of the well graded sand (İDK), very coarse sand (ÇİK), coarse sand (İK) and medium sand (OK) samples used in the experiments were made from the same sand. The experiments were carried out in a 10×10 cm shear test device. The shear box tests were performed according to the ASTM D5321-08 [18] standards. The relative density values were 30% and 70% for the sand samples. The experiments were repeated at normal stress values of 20, 40, 79, 157, 236 and 393 kPa.

Results and Discussion

The results have shown that, the interface friction angle increased with relative density in all test results (Figure 8). However, the friction angle ratios were generally higher in loose soils (Figure 9). Because, when the relative density decreases, the total surface area of the grains on the shear plane of unreinforced samples decreases significantly. On the other hand, in reinforced samples, the surface area of the geosynthetic on the shear plane does not change, only the total surface area of the grains on the other side of the shear plane decreases slightly. Therefore, geotextiles seem to have improved shear strength values of loose soils better. In addition, the fact that the sand grains in the lower half did not stick the back surface of the geosynthetic during the shearing movement supports this hypothesis (Figure 10).

In Figure 14, it was aimed to determine the effect of grain size by comparing the friction angle ratios of ÇİK, İK and OK samples. Accordingly, as the grain size of WG reinforced samples increased, the friction angle ratios and interface friction angles increased. Especially in WG reinforced samples, the friction angle ratio of ÇİK soil was greater than one, while it was less than one in OK and İK soils. Because, WG has a smooth texture, OK and İK soils slid on WG. The friction angle changes of PP 1500 and PP 3000 were similar. As the grain size increased, the interface friction angles of nonwoven geotextiles increased. But the friction angle ratio was the biggest in İK sand. Because the nonwoven geotextiles reduced the interlocking effect of the large angular particles of ÇİK soil. The friction angle ratios of GC 150 decreased as the grain size increased. Because GC 150 has a larger surface area thanks to its indented surface. When this feature was combined with OK soil which has a larger surface area, the friction angle ratio got higher compared to other sands.

Some geotextiles may not show the same mechanical properties in the machine direction (MD) and in the counter machine direction (CMD). Interface friction angles of the GC 150 subjected to shearing action in the CMD direction were higher (Figure 17).

Because when the shear box moves in the CMD direction, the particles move by rubbing against a larger surface area.

The friction angle ratios of nonwoven geotextiles were greater than one in all soils due to their rough texture. Also, Şekercioğlu [19] stated that the interface friction angles of nonwoven geotextiles are generally higher than those of woven geotextiles. In Figure 13, friction angle ratios of PP 1500 is always lower than that of PP 3000 and GC 150. The texture and mechanical properties of the nonwoven geotextile in the lower part of GC 150 are almost the same as that of PP 1500 but yarns on the GC150 increase the surface area (Figure 2).

PP 3000 is a thick geotextile that can be compressed to a high extent. Therefore, under high pressures, the interface friction angles of PP 3000 decreased more than PP 1500 (Figure 20). The CMD oriented GC 150 showed a greater decrease in the friction angle ratio than the MD oriented GC 150. It was observed that under high pressure these yarns were sunk in the nonwoven geotextiles in the lower layer.

Conclusion

In this study, shear box tests were carried out in the laboratory to examine the effects of 4 different geotextiles on the shear strength parameters when used as reinforcement in 3 poorly graded and 1 well-graded sands.

- As the relative density increased, the interface friction angles of the reinforced and unreinforced sand soils increased. However, the friction angle ratio was generally higher in loose soils. The reason of this, when the relative density decreased, the contact areas of the particles in unreinforced soils decreased more than the contact area at the interface of reinforced soils.
- When GC 150 was placed in the shear box in the CMD direction, the shear strengths were higher. Because the 4-row thick yarns on it behaved more rigidly compared to the other yarns. In addition, the grains sliding in the CMD direction rubbed against a larger surface area and encountered a greater friction resistance.
- When rigid and thick geotextiles were used, the volume change of the sand soils in the lower half was prevented, so the reinforced dense soils made less volumetric increase. Only thin geotextiles sometimes limited the volume increase.
- As the grain size and the number of angular grains increased, the friction angles ratio of WG increased. On the other hand, the friction angle ratio of GC 150 increased as the grain size decreased. Because, GC 150 makes more contact with small sand grains due to its large surface.
- The interface friction angles of nonwoven geotextiles with rough texture are generally higher than those of woven geotextiles with smooth texture.
- The friction angle ratios of thick and soft geotextiles whose structure changes under high pressure decrease more as the normal stress increases.

1. Giriş

Geosentetik malzemeler sentetik polimerlerden üretilen ve birçok geoteknik tasarımda ve uygulamalarında kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler inşaat mühendisliğinde zeminin mekanik özelliklerini iyileştirmek için giderek daha sık bir şekilde kullanılmaktadır. İstinat duvarı, asfalt yol ve demiryollarında güçlendirme, ayırma ve koruma fonksiyonlarıyla birçok soruna çözüm getirmesinden dolayı literatürde kullanıldığı görülmüştür.

Farklı türdeki her geosentetik malzeme zeminin dayanımına etki eden faktörleri farklı şekillerde etkilemektedir. Bu çalışmada da konunun araştırılması için kesme kutusu deneyleri yapılmak suretiyle değişik geotekstillerin zemin kayma dayanım değerleri üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Dört farklı geotekstille yapılan deneylerde hangi faktörlerin kayma dayanımını etkilediğini belirlemek için aynı kumdan üretilen farklı özelliklerdeki 4 zemin numunesinde deneysel olarak belirlenen kayma dayanımları birbiriyle kıyaslanmıştır.

1.1. Geotekstil-zemin ara yüzey davranışı

Zeminlerin kayma dayanımı ile normal gerilme arasındaki ara yüzey ilişkisi doğrusal bir Mohr-Coulomb kırılma zarfıyla açıklanabilir [1]. Birçok araştırmacı bu yaklaşımı geosentetik donatılı zeminler için de kullanmışlardır. Geosentetiğin ne kadar etkili olduğunu görmek için dayanım oranlarını ve etkileşim katsayılarını incelemişlerdir. Örneğin, Tatlısoz ve arkadaşları [2] ile Bağcı [3] tarafından yapılan çalışmalarda geosentetikler ile kohezyonsuz zeminler arasındaki ara yüzey dayanımını incelemek için Denklem 1'deki etkileşim katsayısı parametresi kullanılmıştır.

$$c = \tan\delta / \tan\phi \quad (1)$$

Burada;

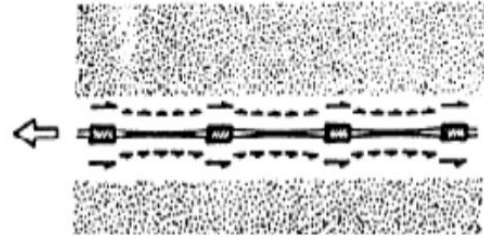
c : Etkileşim katsayısı, δ : Ara yüzey sürtünme açısı, ϕ : Zeminin içsel sürtünme açısı değerini göstermektedir. Kum zeminlerin kayma dayanımını etkileyen başlıca faktörlerin zeminin rölatif sıklığı, dane şekli, kumun mineralojik yapısı ve zeminin dane çapı dağılımı olduğu bilinmektedir. Kum zeminler geotekstil ile birlikte kullanıldığında doğal olarak bu faktörlerin sayısı artmaktadır. Örneğin, kayma, adhezyon, danelerin geosentetik yüzeyine gömülmesi, zemin danelerin yuvarlanması ve daneler ile geosentetik yüzeyinin birbirine kenetlenme mekanizmalarının bir veya birden fazla kombinasyonu sonucunda geosentetik-zemin ara yüzeyi boyunca kayma dayanımının geliştiği anlaşılmıştır [1].

Köşeli danelere sahip zeminler, pürüzsüz danelere sahip zeminlere göre daha büyük bir içsel sürtünme açısı değerine sahiptirler [4]. Ayrıca köşeli danelerin daha fazla yüzey alanına sahip olmasının yanında daneler arası kenetlenme daha fazla oluşmaktadır. Taylor [4] kesme kutusu verilerini gözden geçirdiğinde kum zeminlerdeki kayma mukavemetinin iki faktörün etkisinde olduğunu; ilk faktörün yuvarlanan ve kayan daneler arasındaki sürtünme direnci olduğunu, ikinci faktörünse iç kilitleme davranışı olduğunu belirlemiştir. İç kilitleme faktörü kayma hareketi sırasında kilitlenmeyi aşmak için hacim artışında harcanan enerji olarak ifade edilebilir [4]. Ayrıca bu faktörün kum zeminlerin kayma mukavemetine büyük oranda katkıda bulunduğu, fakat bu durumun çok gevşek kum zeminlerde gerçekleşmediği bilinmektedir [4].

Küçük boyutlu kum daneleri ise genellikle daha büyük yüzey alanına sahiptirler. Bundan dolayı bu daneler birbirlerine temas etikleri yüzey alanı fazla olduğundan içsel sürtünme açılarının daha büyük olması beklenebilir. Büyük daneler daha az yüzey alanına sahiptirler ama büyük daneler kendi aralarında daha fazla mekanik kilitleme oluşturur. Örneğin, Kara ve diğerleri [5] farklı boyutlardaki kötü derecelenmiş kum zeminlerin kesme kutusu deney verilerini incelemiş, dane boyutu ile içsel sürtünme açısı arasında doğrudan bir ilişki olduğunu bulmuşlardır. Fakat dane boyutunun az miktarda artışlarında bazen içsel sürtünme açısında düşüşler olduğu da görülmüştür.

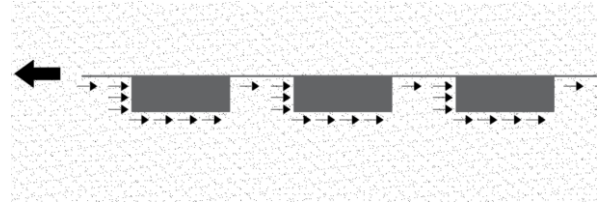
Geosentetik malzemelerin göz açıklığının kayma dayanımını nasıl etkilediğine dair çalışmalar yapılmıştır. Fakat çoğunlukla bu özelliğin dayanım üzerindeki etkisi hususunda net ilişki kurulamamıştır çünkü geosentetiğin diğer fiziksel özellikleri değiştiğinde göz açıklığı da birlikte değişir. Geotekstillerin göz açıklığı kum ve çakıl gibi iri daneli zeminleri daha az etkilemektedir. Örneğin, Tuna [6] Sunjut geotekstilleri kesme kutusu deneylerinde kullanarak, çekme mukavemeti ve göz açıklığının ara yüzey sürtünme açısı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Geotekstil-kum ara yüzey sürtünme açısının değişiminde geotekstile ait göz açıklığı ya da çekme dayanımının tek başına etkili olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca geotekstilin

çekme dayanımının kesme kutusu deneylerinde zemin ara yüzey kayma dayanımları üzerinde çok etkili bir özellik olmadığı görülmüştür. Bu durum, kesme kutusu deney düzeneğinde geotekstilin yerinde sabitlenmiş olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 1. Zemin ile geotekstil arasındaki etkileşim [7].

Figure 1. Interaction between soil and geotextile.

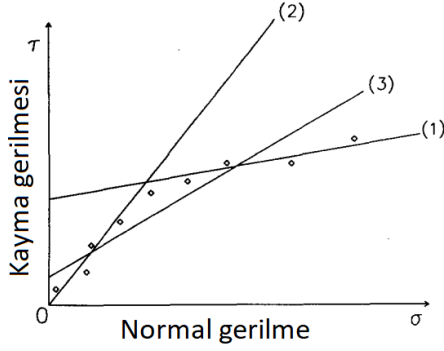


Şekil 2. Zemin ile geokompozit arasındaki etkileşim.

Figure 2. Interaction between soil and geocomposite.

Geotekstillere ile zemin arasındaki kayma dayanımına etki eden en önemli faktörlerden biri geosentetiğin yüzeyi ile zemin danelerin temas alanıdır. Geotekstillere gibi iki boyutlu yapıya sahip malzemeler genellikle düzlemsel sürtünme davranışı sergilerler (Şekil 1). Düz yüzeyli geotekstillere temas alanları sınırlıdır ve bundan dolayı kayma dayanımları belli bir değere kadar artmaktadır. Ancak geokompozitlerin yüzeyindeki çıkıntılar ve çukurlar ara yüzey temas alanını ve etkileşimi artırarak kayma dayanımların daha büyük olmasını sağlamaktadır (Şekil 2).

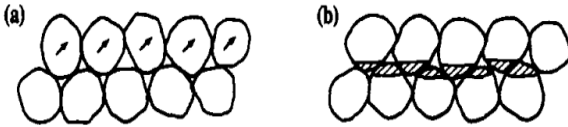
Çoğu araştırmacı kayma dayanımlarının doğrusal düzlem şeklinde arttığını varsaymaktadır. Ama gerçekte geniş aralıkta kayma gerilmesi ile basınç gerilmesi çizildiğinde veriler doğrusal düzlem yerine hiperbolik eğriyi anımsatır. Birçok araştırmada kayma dayanımı için doğrusal yaklaşım kullanılmasına rağmen bazı araştırmacılar ise bu yöntemin hatalı olduğunu ve tasarım sorunlarına sebep olabileceğini savunmaktadır. Örneğin, Giroud ve diğerleri [8] ince zemin tabakalarıyla kaplı geosentetik gibi sistemlerde normal gerilmelerin potansiyel kırılma yüzeyi boyunca önemli ölçüde değiştiği durumlarda doğrusal bir ilişki kullanılmasının şevlerin kaymaya karşı güvenlik faktöründe önemli hatalara yol açabileceğini ve bundan dolayı kesme kutusu testlerinde elde edilen ara yüzey kayma dayanımı değerleriyle tutarlı doğrusal olmayan bir ilişkiyi temsil etmek için denklem önerdiği görülmüştür.



Şekil 3. Doğrusal yaklaşım yöntemi 1) yüksek normal gerilme, 2) düşük normal gerilme 3) bütün deney verileri [8].

Figure 3. Linear approximation method 1) high normal stress, 2) low normal stress 3) all experimental data.

Giroud ve diğerleri [8] kesme kutusu test sonuçlarının analizinde, arayüz kayma dayanımı ile normal gerilme arasındaki ilişkinin zemin-geosentetik veya geosentetik-geosentetik arayüzlerinin birçok durumu için doğrusal olmadığını belirtmiştir. Şekil 3'te görüldüğü üzere düşük normal gerilme değerlerinde çizilen düzlemin sürtünme açısı fazla iken yüksek normal gerilme değerlerinde çizilen düzlemin sürtünme açısı daha azdır. Bu bulgu özellikle geotekstil donatılı deneylerde daha da belirgin hale gelmektedir. Ayrıca, Koutsourais ve diğerleri [9] yaptıkları kesme kutusu deneylerinde geosentetik ve/veya zemin katmanları arasındaki ara yüzey sürtünme açısının normal gerilme değerlerine bağlı olarak değiştiğini ve düşük normal basınçlar altında sıkı kohezyonsuz zeminlerdeki geosentetiklerin ara yüzey sürtünme açısının yüksek normal basınçlara kıyasla daha büyük olduğunu görmüşlerdir.



Şekil 4. Kum danelerin davranış modelleri a) düşük basınçta genişleme; b) yüksek basınçta danelerin kırılması [10].

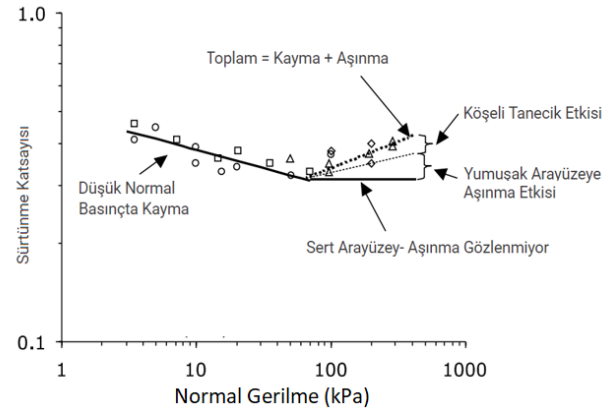
Figure 4. Behavior models of sand grains a) expansion at low pressure; b) breakage of grains at high pressure.

Zemin danelerin kırılması, zeminlerin kayma dayanımı ve hacimsel davranışına etki eden kalıcı deformasyonlardır. Basınç seviyesinin artmasıyla genişleme ortadan kalkar ve ezilmenin basit kaymaya ek olarak deformasyona dahil olmasından dolayı kumun içsel sürtünme açısı azalır [10]. Şekil 4'te yüksek basınç altındaki sıkı kum daneleri kayma hareketi sırasında danelerin kenetlenmesini aşmak için danelerde kırılma meydana gelmekte olup herhangi bir genişleme gözlenmemektedir [10].

Genişleme veya hacim değişimi iç kilitlemenin geometrik bir sonucudur ve sönümlenme fonksiyonunda açıkça yer alması gerekmez [11]. Sezen [12] bir zeminin minimum enerji hali, sabit hacim ve sabit gerilme altında serbestçe akabildiği kritik durum hali olup zemin yapısında bu gerilme durumuna ulaşıldığında

genel bir akma gözlenmiyorsa yapıda içsel kilitleme etkisinin devreye girmiş olduğu ve genişlemenin başladığı belirtmiştir.

Dove ve Frost [13] geosentetik donatılı kumlu zeminlerde normal gerilmenin, geosentetik dokusunun ve sertliğinin kayma dayanımları üzerinde nasıl etkisi olduğunu araştırmışlardır. Donatılı zeminlerde normal gerilme arttıkça ara yüzey kayma dayanımının genellikle azaldığını göstermişlerdir. Fakat kritik basınç değeri geçildikten sonra basınçtaki artış dane ile geotekstilin temas yüzeyine doğrudan aktarıldığı belirtilmiştir. Ayrıca, Şekil 5'te kritik normal gerilme değeri aşıldığında geosentetiğin dokusuna bağlı olarak aşınma ve kayma yaparak ara yüzey sürtünme açısının yeniden artacağını açıklamışlardır. Bu aşındırma hareketi genellikle daha yumuşak, elastik dokuya sahip malzemelerde görülür.



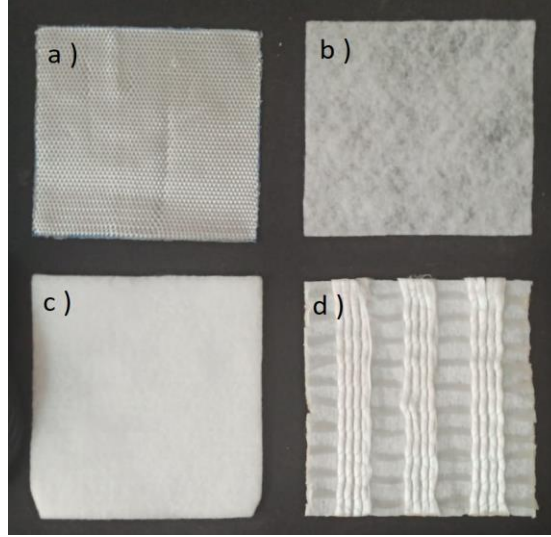
Şekil 5. Donatılı zeminlerin normal gerilme ile sürtünme katsayısı ilişkisi [14]

Figure 5. Relationship between normal pressure and friction coefficient for reinforced soils..

2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan geotekstiller

Çalışmada kullanılan geotekstiller sırasıyla WG, PP 1500, PP 3000 ve GC 150 olarak tanımlanmıştır. WG kısaltmasıyla temsil edilen örgülü geotekstili yüksek dayanımlı polyester ipliklerin dokunmasıyla üretilen kaygan yüzeye sahip malzemedir. PP 1500 ve PP 3000 ince saf polipropilen elyafların iğnelenme yöntemiyle üretilen örgüsüz geotekstillerdir ve başlıca kullanım amaçları filtre, ayırma ve korumadır. GC150 malzemesi polyester ipliklerden oluşan geogrid ile polipropilen elyaflardan oluşan örgüsüz geotekstilin dikilerek bir araya gelmiş halindeki geokompozittir. GC150'de kullanılan örgüsüz geotekstilin özellikleri PP1500 malzemesine oldukça yakın olduğundan dolayı GC150 ile PP1500 aynı fonksiyonlara sahiptirler. Sadece GC150 fazladan geogrid ipliklere sahip olduğundan çekme dayanımı gibi özellikleri daha fazladır. Fakat GC150 makine yönündeki (MD) ve makine yönüne dik yönündeki (CMD) geogrid iplik oranı farklı olduğundan çekme yönüne göre dayanım değerleri farklı çıkmaktadır. Deneylerde kullanılan geotekstillerin görselleri Şekil 6'da, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 6. Testlerde kullanılan geosentetikler a) WG b) PP 1500 c) PP 3000 d) GC 150.

Figure 6. Geosynthetics used in the tests a) WG b) PP 1500 c) PP 3000 d) GC 150.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan geosentetiklerin özellikleri (Üreticiden temin edilen katalog verileri).

Table 1. Properties of geosynthetics used in the experiments (Catalog data from manufacturer).

Özellikleri	Birim	WG	PP 1500	PP 3000	GC150(Geotekstil-Geogrid)
Ağırlık	g/m ²	330	150	340	170
Kalınlık (2kPa' da)	mm	0,3	1,3	2,9	2-0,4
Çekme Dayanımı (MD/CMD)	kN/m	160/55	7	20	9,5 -150 / 50
Kopma Uzaması (MD/CMD)	%	≥10	≥50	≥50	≥50- ≥10
Statik Delinme	N	9500	1300	3300	1700
Dinamik Delinme	mm	16	28	6	9
Görünür Göz Açıklığı, O90	mm	-	0,13	0,084	-

2.2. Kullanılan zeminler

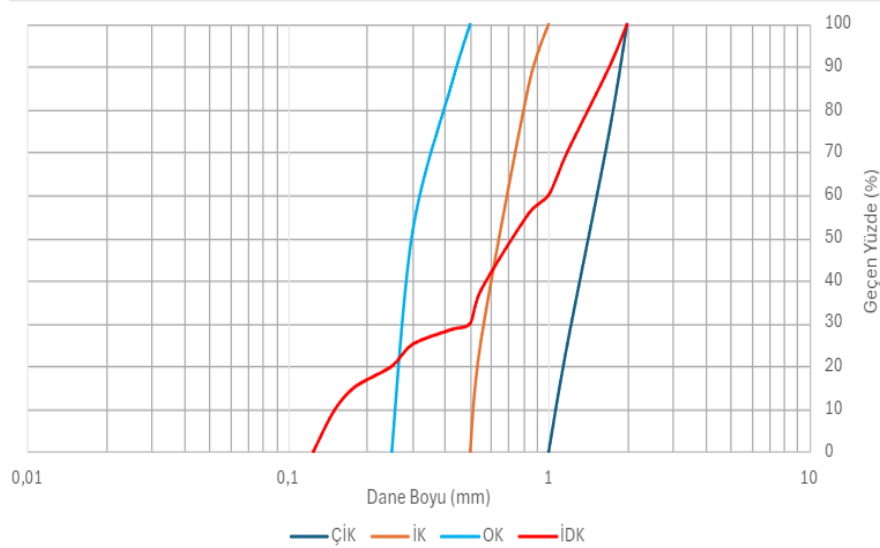
Deneylerde İzmir İli sınırları içerisinde Gediz Nehri'nin yatağından alanının doğal kum kullanılmıştır. Elle ve gözle yapılan incelemeler sonucu 1 mm'den büyük kumların dane yapısı düz ve köşeli olduğu görülmüştür. Ayrıca, yüksek miktarda iğne uçlu daneler de içerdiği gözlenmiştir. 1 mm'den küçük kumlar ise biraz daha yuvarlak ve köşeli dane yapısına sahiptirler. ASTM D854-02 [15] standardına göre yapılan

piknometre deney sonucunda kumun özgül ağırlığı 2,79 olarak elde edilmiştir. Maksimum ve minimum boşluk oranları deneyleri ASTM D-4253-00 [16] ve ASTM D-4254-00 [17] standartlarına göre yapılmıştır. Deneylerde kullanılan iyi derecelenmiş kum (İDK), çok iri kum (ÇİK), iri kum (İK) ve orta kum (OK) numunelerin hepsi aynı kumdan farklı boyuttaki eleklerle oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılan kumların fiziksel özellikleri Tablo 2'de, dane dağılım eğrileri ise Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 2. Deneylerde kullanılan zeminlerin özellikleri

Table 2. Properties of the soils used in the experiments

Zemin	e _{min}	e _{max}	D10	D30	D60	Cu	Cc
İDK	0,59	0,80	0,15	0,50	1,00	6,56	1,64
ÇİK	0,74	0,93	1,07	1,23	1,55	1,45	0,91
İK	0,78	1,00	0,52	0,57	0,71	1,38	0,87
OK	0,81	1,06	0,26	0,22	0,33	1,28	0,56



Şekil 7. Dane çapı dağılımı eğrisi.

Figure 7. Grain size distribution curve.

2.3. Deneysel Yöntemler

Deneyler Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan 10×10 cm'lik kesme deney aletinde yapılmıştır. Kesme kutusu deneyleri ASTM D5321-08 [18] standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak kesme kutusuna yerleştirilecek olan geotekstiller 98×112 mm boyutlarında dikdörtgen şeklinde makas veya keskin uçlu araçlarla kesilmiştir. Genişlikte kısa tutulan 2 mm'lik boşluk geotekstilin basınç altında kenarlara taşmasını engellemek için bırakılmıştır. Kesilen geotekstilin uzun kenarından 12 mm uzunluğunda bir kenarı kör uçlu metal plaka ile baskı uygulayarak 90 derecelik açı yapacak şekilde kıvrılıp ucuna iki tane delik açılmıştır. Bu iki delikten geçen çiviler ile geotekstilin kesme kutusunda sabit kalması sağlanır. Alt yarıya konan kum geotekstil ile örtüldükten sonra geotekstilin üzerine üst tabaka kum yerleştirilmiştir. Donatılı numunelerde alt yarıya konulacak kum miktarı geotekstilin kalınlığı dikkate alınarak ayarlanmıştır. Sonrasında istenilen sıklığı elde için numuneler ahşap tokmakla belli oranda sıkıştırılmıştır. Ardından numunenin üstüne poroz taşı yerleştirilip normal gerilmeyi uygulayacak ağırlıklar sayesinde konsolidasyon aşamasına geçilmiştir. Numunenin kum zemin olması nedeniyle konsolidasyon aşaması kısa sürede tamamlanmaktadır. Bundan sonra yükleme aşamasında yatay deplasman hızı dakikada 1 mm olacak şekilde en fazla 1cm'lik

deplasman yapıcaya kadar kayma gerilmesi uygulanır. Deneylerdeki çoğu numuneler %70 rölatif sıklıkta hazırlanmış olup sadece gevşek numuneler için %30 rölatif sıklık değeri kullanılmıştır. Deneyler 20, 40 ve 79 kPa normal gerilme değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Sadece kayma dayanımlarının yüksek basınçlar altında nasıl değiştiğini incelemek için 157, 236 ve 393 kPa normal gerilme değerleri kullanılmıştır. Sonrasında elde edilen ara yüzey sürtünme açıları Denklem 2'de kullanılmıştır.

$$E_{\phi} = \delta / \phi \quad (2)$$

Burada;

E_{ϕ} : Sürtünme açısı oranı, δ : Ara yüzey sürtünme açısı, ϕ : Zeminin içsel sürtünme açısı değerini göstermektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Kumlu zeminlerde ara yüzeyde değişik türde geotekstiller kullanılarak farklı kum türü, dane dağılımı ve sıklıklarında çok sayıda kesme deney yapılarak bu değişikliklerin zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Tüm kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen kohezyon (c), ara yüzey sürtünme açısı (δ) ve sürtünme açısı oranı (E_{ϕ}) değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. kesme kutusu deney sonuçları.

Table 3. Shear box test results.

Zemin/Basınç/ Rölatif Sıklık	Geosentetik	c (kPa)	ϕ (°)	E_{ϕ}
ÇİK/Düşük/Sıkı	Donatısız	5,79	37,9	-
ÇİK/Düşük/Sıkı	WG	0,73	39,1	1,03
ÇİK/Düşük/Sıkı	PP 1500	5,42	38,2	1,01
ÇİK/Düşük/Sıkı	PP 3000	7,72	40,3	1,06
ÇİK/Düşük/Sıkı	GC 150	5,04	39,6	1,04
İK/Düşük/Sıkı	Donatısız	4,08	34,9	-
İK/Düşük/Sıkı	WG	6,31	33,5	0,96
İK/Düşük/Sıkı	PP 1500	9,78	36,4	1,04
İK/Düşük/Sıkı	PP 3000	2,90	41,3	1,18
İK/Düşük/Sıkı	GC 150	4,81	37,4	1,07
İK/Düşük/Sıkı	GC 150 (CMD)	1,02	40,0	1,15
OK/Düşük/Sıkı	Donatısız	2,22	35,5	-
OK/Düşük/Sıkı	WG	2,94	32,1	0,91
OK/Düşük/Sıkı	PP 1500	3,41	36,4	1,03
OK/Düşük/Sıkı	PP 3000	2,98	37,2	1,05

Tablo 3. (Devam)

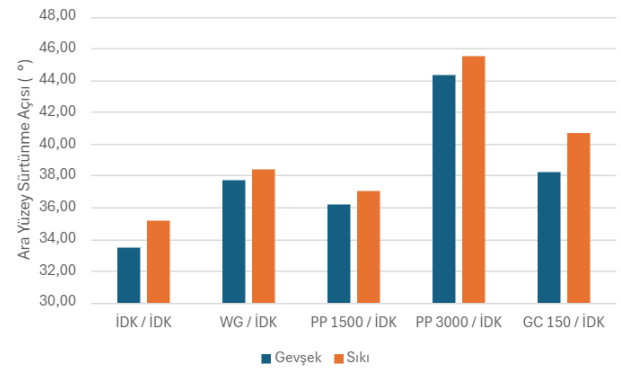
Zemin/Basınç/ Rölatif Sıklık	Geosentetik	c (kPa)	ϕ (°)	E ϕ
OK/Düşük/Sıkı	GC 150	1,68	39,1	1,10
İDK/Düşük/Sıkı	Donatısız	12,61	35,2	-
İDK/Düşük/Sıkı	WG	2,13	38,4	1,09
İDK/Düşük/Sıkı	PP 1500	9,07	37,0	1,05
İDK/Düşük/Sıkı	PP 3000	4,36	45,5	1,29
İDK/Düşük/Sıkı	GC 150	6,11	40,7	1,16
İDK/Düşük/Sıkı	GC 150 (CMD)	2,58	43,8	1,25
İDK/Düşük/Gevşek	Donatısız	3,74	33,5	-
İDK/Düşük/Gevşek	WG	0,93	37,7	1,13
İDK/Düşük/Gevşek	PP 1500	6,75	36,2	1,08
İDK/Düşük/Gevşek	PP 3000	2,39	44,3	1,33
İDK/Düşük/Gevşek	GC 150	2,54	38,2	1,14
İDK/Yüksek/Sıkı	Donatısız	14,23	34,5	-
İDK/Yüksek/Sıkı	WG	0,53	36,2	1,05
İDK/Yüksek/Sıkı	PP 1500	14,84	36,0	1,04
İDK/Yüksek/Sıkı	PP 3000	24,97	40,2	1,17
İDK/Yüksek/Sıkı	GC 150	21,10	36,8	1,07
İDK/Yüksek/Sıkı	GC 150 (CMD)	22,48	37,0	1,07

3.1. Rölatif sıklığın ara yüzey davranışlarına etkisi

Birçok çalışma rölatif sıklığı (D_r) fazla olan zeminlerin sürtünme açısı değerlerinin daha yüksek olduğu göstermektedir çünkü sıkı zeminlerde daneler arasında kenetlenme ve kontak alanı daha fazladır. Örneğin, Şekercioğlu [19] tez çalışmasında geotekstil donatılı kum zeminlerin kayma dayanımlarını kesme kutusu deneyleri ile incelemiştir. Deneylerinde %30 ve %60 rölatif sıklıkta kum zeminler ve 6 adet geotekstil kullanmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre rölatif sıklığı fazla olan donatılı zeminlerde ara yüzey sürtünme açısının daha büyük olduğu belirlenmiştir.

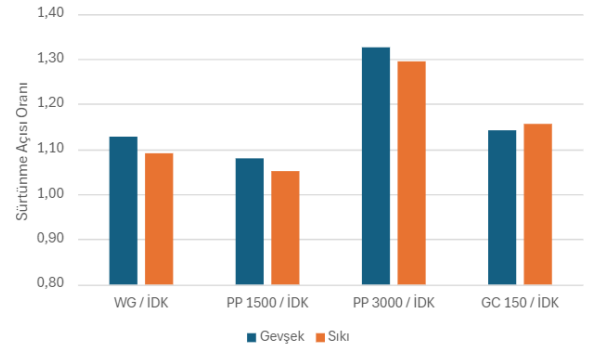
Şekil 8'de görüldüğü ve beklenildiği üzere tüm deney sonuçlarında rölatif sıklık arttıkça ara yüzey sürtünme açısı da artmıştır. Sürtünme açısı oranlarının ise genellikle gevşek donatılı zeminlerde daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9). Çünkü, rölatif sıklık azaldığında donatısız numunelerin kayma düzlemindeki danelerin toplam yüzey alanları büyük oranda azalmıştır. Diğer yandan donatılı numunelerde kayma düzlemindeki geotekstilin yüzey alanı değişmeyip sadece kayma düzleminin diğer tarafında bulunan danelerin toplam yüzey alanları küçük oranda azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 10.a'da alt yarıdaki kum danelerinin kayma hareketi sırasında geotekstilin arka yüzeyi ile yeterince etkileşime girmemesi bu durumu desteklemektedir. Kohezyon değerleri de sıkı zeminlerde daha yüksek çıkmıştır. Fakat, kohezyon değerlerinde gözlenen artış yanıltıcı olabilir. Çünkü, Şekercioğlu'na [19] göre kum zeminlerin deney sonuçlarında belirlenen kohezyon değerleri "yalancı" kohezyondur ve bilindiği üzere kumlar, kuru veya doymun halde kohezyonsuzlardır.

Şekil 11'de verilen kayma dayanımı eğrileri incelendiğinde gevşek donatılı ve donatısız zeminlerde pik dayanımından sonra kayma dayanımında belirgin azalmanın oluşmadığı belirlenmiştir. Ama, Şekil 11.a'da görülebileceği gibi sıkı donatısız zeminlerde bu kayıp daha belirgindir. Fakat, geotekstiller gevşek ve sıkı zeminlerin kayma dayanımındaki düşüşü azaltmıştır. Benzer şekilde, Şekercioğlu [19] yaptığı çalışmada yüksek basınç altında sıkı olan zeminlerde pik dayanımın ardından rezidüel dayanıma doğru iniş izlenirken gevşek zeminlerde direkt olarak rezidüel dayanıma doğru gittiğini belirtmiştir.



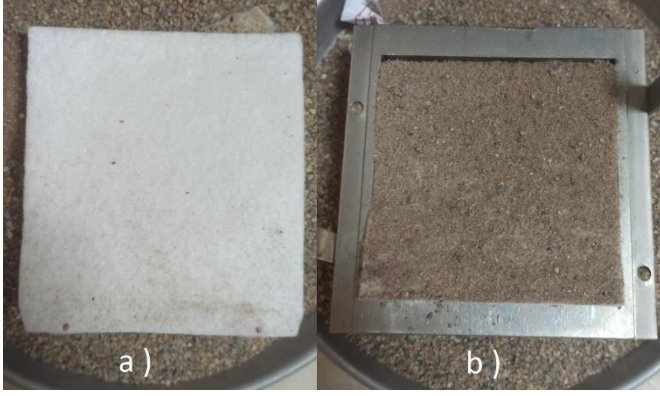
Şekil 8. Ara yüzey sürtünme açısı ile rölatif sıklığın ilişkisi.

Figure 8. Relationship between interface friction angle and relative density.



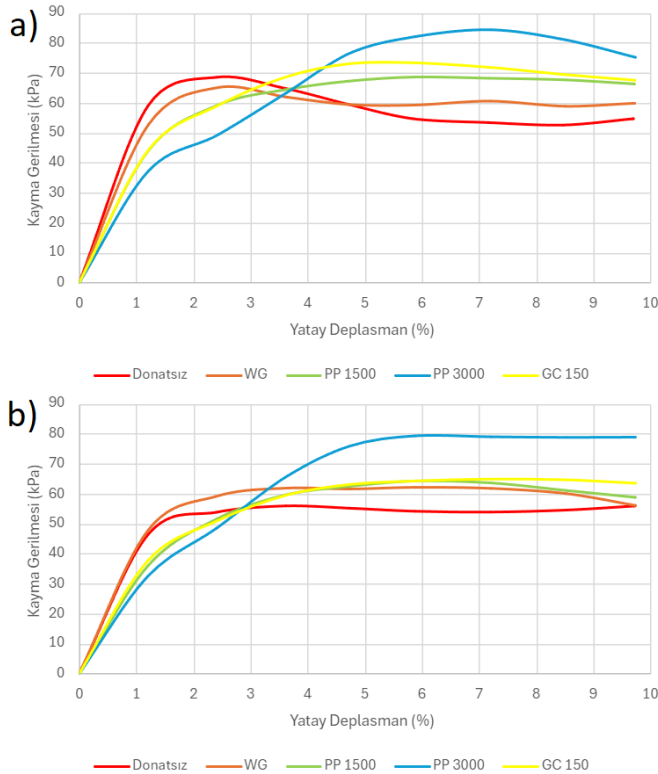
Şekil 9. Sürtünme açısı oranı ile rölatif sıklığın ilişkisi.

Figure 9. Relationship between friction angle ratio and relative density.



Şekil 10. Deney sonrası PP 3000'in yüzeyine takılan daneler a) arka yüzü b) ön yüzü.

Figure 10. Particles adhering to the surface of PP 3000 after the experiment a) back side b) front side.



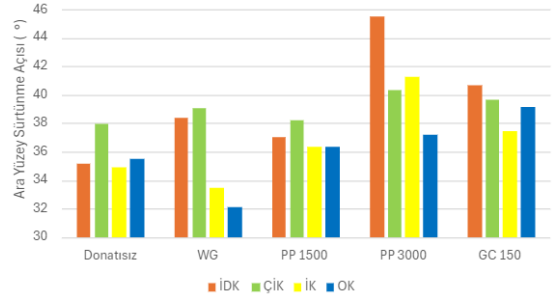
Şekil 11. $P = 79$ kPa'da farklı sıklıkta olan İDK zemininin kayma dayanımı eğrileri a) $D_r = \%70$ b) $D_r = \%30$.

Figure 11. Shear stress curves of İDK sand with different densities at $P = 79$ kPa a) $D_r = \%70$ b) $D_r = \%30$.

3.2. Zemin dane boyu dağılımının ara yüzey davranışlarına etkisi

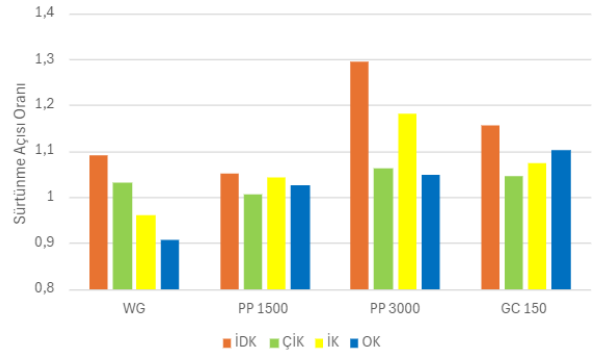
Donatılı zeminlerin ara yüzey sürtünme açıları karşılaştırıldığında İDK zemini ile yapılan deneylerde genellikle en yüksek değerler elde edilmiştir (Şekil 12). Ama, Şekil 13'te sürtünme açısı oranı geotekstil türü fark etmeksizin donatılı İDK zeminlerinde en büyük değerler belirlenmiştir. Bu sonuçlara benzer şekilde Erdoğan ve Altun [20] geotekstil tipinden bağımsız olarak, çoğunlukla iyi derecelenmiş kumların kötü derecelenmiş olanlara göre, sıkı kumların da gevşek olanlara göre daha yüksek ara yüzey sürtünme açıları verdiğini görmüşlerdir.

Fakat düşük normal gerilmelerde teorik olarak beklenen bu davranışa uymayan bazı deney sonuçları ile de karşılaşmışlardır. Bu davranışa uymayan deney sonuçlarının sebebinin geotekstil ve kumun düşük basınçlar altında birbirleriyle az miktarda etkileşime girmesi olabileceğini belirtmişlerdir [20].



Şekil 12. Sıkı kum zeminlerin ara yüzey sürtünme açıları.

Figure 12. Interface friction angles of dense sand soils.



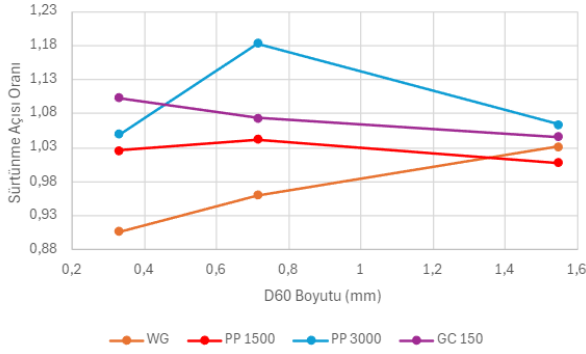
Şekil 13. Donatılı sıkı kum zeminlerin sürtünme açısı oranları.

Figure 13. Friction angle ratios of reinforced dense sand soils.

3.3. Dane boyutunun ara yüzey davranışlarına etkisi

Şekil 14'te ÇİK, İK ve OK numunelerin sürtünme açısı oranlarını kıyaslayarak dane boyutunun nasıl bir etkisi olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre WG donatılı numunelerin dane boyutu arttıkça sürtünme açısı oranları ve ara yüzey sürtünme açıları artmıştır. Özellikle WG donatılı numunelerde ÇİK zeminin sürtünme açısı oranı birden büyük iken OK ve İK zeminlerinde birden küçük çıkmıştır. Çünkü, WG pürüzsüz kaygan bir dokuya sahip olduğundan OK ve İK zeminleri WG'nin üzerinde kaymıştır. PP 1500 ve PP 3000 örgüsüz geotekstillerin sürtünme açısı oranları ve ara yüzey sürtünme açıları benzer şekilde artmışlardır. Bu geotekstillerde dane boyu arttıkça ara yüzey sürtünme açısı da artmıştır. Ama, İK zemininde sürtünme açısı oranı en yüksek çıkmıştır. Çünkü örgüsüz geotekstiller ÇİK kumundaki iri köşeli danelerin kenetlenme etkisini azaltmıştır. İK ve OK zeminlerinde köşeli kenetlenen daneler kayma dayanımlarını bir miktar artırmaktadır. Fakat şekil faktörü ÇİK zemininin kayma dayanımı için iç kilitlenme etkisini artırması dolayısıyla çok daha önemlidir. GC 150'li numunelerin sürtünme açısı oranları dane boyu ile ters orantılı ilişki göstermiştir. GC 150'nin tabanı örgüsüz geotekstil olduğundan PP 1500 gibi iri köşeli danelerin kenetlenme etkisini azaltmıştır. Ayrıca GC 150 çıkıntılı yüzeyi sayesinde daha fazla yüzey alanına sahiptir. Bu özellik ayrıca yüzey alanı fazla olan OK zemini ile bir araya gelince sürtünme açısı oranı diğer zeminlere kıyasla daha fazla elde

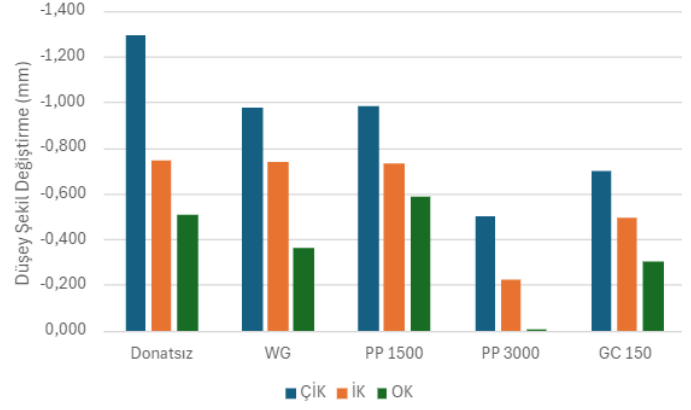
edilmiştir. Numunelerin hepsinde dane boyu arttıkça genleşme miktarı da artmıştır (Şekil 15). Çünkü, iri kenetlenen danelerin kayma hareketi sırasında yapısal bütünlük daha fazla bozulup hacimsel artış gelişmektedir.



Şekil 14. Sıkı kum zeminlerin dane boyutu ile sürtünme açısı oranının ilişkisi.

Figure 14. Relationship between grain size and friction angle ratio of dense sand soils.

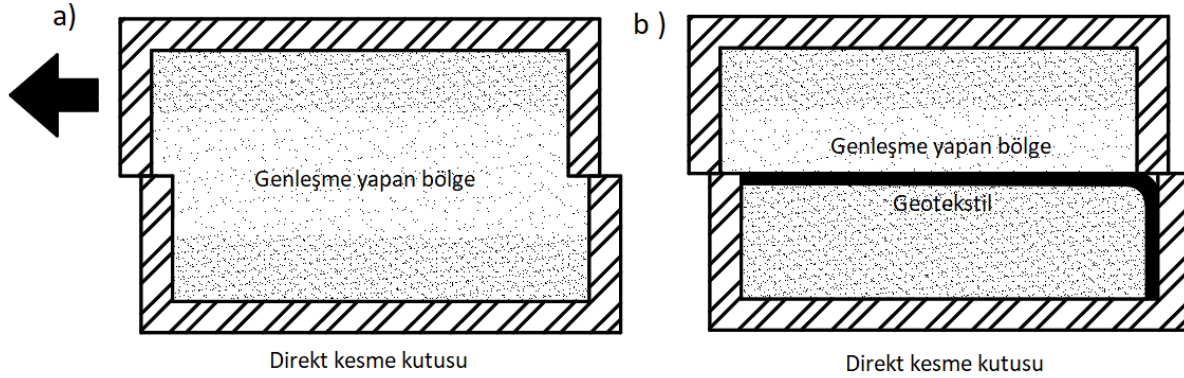
Zhang ve Thornton'a [21] göre genleşme davranışının kayma bölgesi boyunca en yüksek seviyede olduğu belirlenmiştir. Dahası üst ve alt plakalara yaklaştıkça genleşmenin düzgün bir şekilde nerdeyse sıfıra kadar azaldığını buna karşılık boşluk oranının kayma bölgesinde önemli ölçüde arttığını ifade etmişlerdir. Şekil 15'te görüleceği üzere kalın ve rijit geotekstiller



Şekil 15. Sıkı kum zeminlerin dane boyutu ile düşey şekil değiştirme ilişkisi.

Figure 15. Relationship between grain size and vertical deformation of dense sand soils.

(PP3000 ve GC150) kullanmak düşey şekil değiştirme değerlerini daha fazla azaltmıştır. Çünkü, Şekil 16.b'deki gibi geotekstillerin altında kalan kumların geometrik yapısı bozulmadığından hacimsel artış miktarları daha az çıkmıştır. Üstelik, geotekstilin altındaki yüzeye kum danelerinin yapışmaması bu durumu desteklemektedir (Şekil 10).

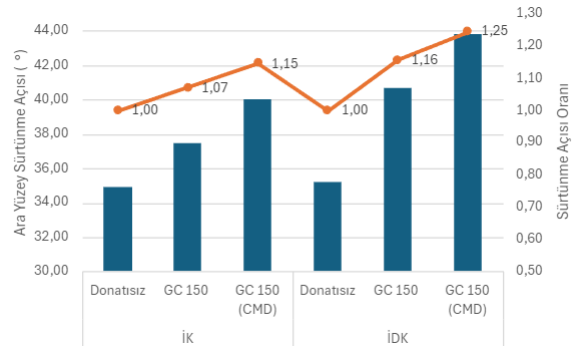


Şekil 16. Kesme kutusu deneyi sırasında geometrik yapısı bozulan daneler a) donatsız zemin b) donatılı zemin.

Figure 16. Grains whose geometric structure was distorted during the shear box test a) unreinforced soil b) reinforced soil.

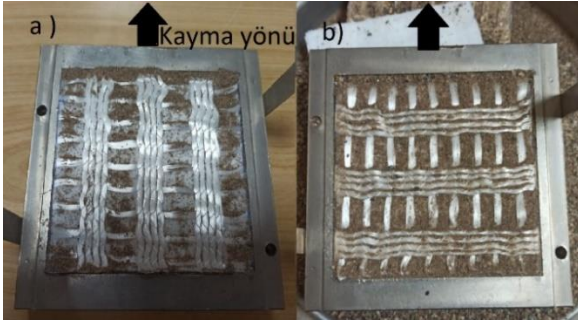
3.4. Geotekstilin yerleştirilme şeklinin ara yüzey davranışlarına etkisi

Geogrid ve örgülü geotekstil gibi geosentetikler makine yönünde (MD) ve makine yönüne dik yönde (CMD) aynı mekanik özellikleri göstermeyebilir. Bundan dolayı GC 150'nin ara yüzey sürtünme açısı kesme kutusuna yerleştirildiği yöne göre değişmektedir. Zemin türü fark etmeksizin CMD yönünde kayma hareketine maruz bırakılan numunelerin sürtünme açısı oranları ve ara yüzey sürtünme açıları daha yüksek çıkmıştır (Şekil 17). Bunların başlıca sebepleri GC 150'nin üzerindeki 4 sıralı ipliklerin kayma yönüne dik şekilde dururken diğer ipliklere kıyasla daha rijit davranması, 4 sıralı ipliklerin tek sıralı ipliklerden daha kalın olması ve Şekil 18.b'de görüldüğü gibi CMD yönünde yerleştirilen geotekstilin daha fazla kum danesini yüzeyinde tutması olarak sayılabilir.



Şekil 17. Sıkı kum zeminlerin ara yüzey sürtünme açısı ile donatın yerleştirilme şeklinin ilişkisi.

Figure 17. Relationship between the interfacial friction angle of dense sand soils and the placement of reinforcement.

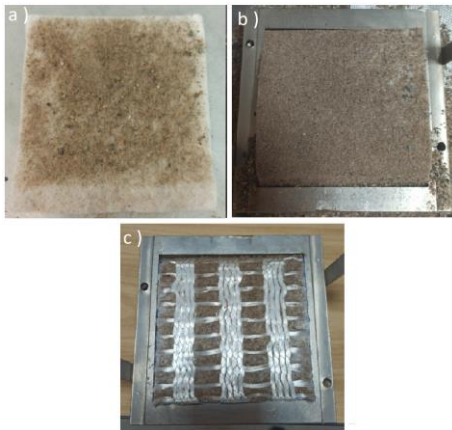


Şekil 18. GC 150'nin kesme kutusuna yerleştirilme şekilleri a) MD yönü b) CMD yönü.

Figure 18. Ways to place the GC 150 in the shear box a) MD direction b) CMD direction.

3.5. Geotekstilin dokusunun ara yüzey davranışlarına etkisi

WG donatılı numunelerde pürüzsüz dokusu yüzünden sadece iri köşeli kumların bulunduğu zeminlerde sürtünme açısı oranı birden büyük çıkmıştır (Şekil 13). Öte yandan diğer geotekstillerde bu oran pürüzlü dokuları sayesinde tüm zeminlerde yine birden büyük çıkmıştır (Şekil 13). Benzer şekilde, Şekercioğlu [19] örgüsüz geotekstillerin örgülü geotekstillere göre ara yüzey sürtünme açılarının genel olarak daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Şekil 17'de PP 1500'nin ara yüzey sürtünme açısı her zaman PP 3000 ve GC 150'ye kıyasla düşük çıkmıştır. GC 150'nin alt yarısındaki örgüsüz geotekstilin dokusu ve mekanik özellikleri PP 1500 ile neredeyse aynıdır. Fakat GC 150'nin üzerindeki iplikler yüzey alanını artırdığı için GC 150'nin ara yüzey sürtünme açısı daha yüksektir (Şekil 2). PP 3000'in daha pürüzlü ve kalın olmasından dolayı kum daneleri ile geotekstil yüzeyi arasında bol miktarda etkileşim gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 19). Bundan dolayı PP 3000 kayma dayanımları PP 1500'den oldukça büyüktür. Benzer şekilde, Olcay [22] yaptığı düşük normal gerilmeli deneylerde donatı kalınlığının artmasının maksimum kayma dayanımını artırdığını tespit etmiştir. Sadece OK zemininde PP 3000'in sürtünme açısı oranı GC 150'den küçük çıkmıştır. Çünkü en fazla yüzey alanına sahip OK zemini ile yüzey alanı en fazla olan GC 150 bir araya geldiğinde PP 3000'den daha büyük ara yüzey sürtünme açısı değeri vermiştir.

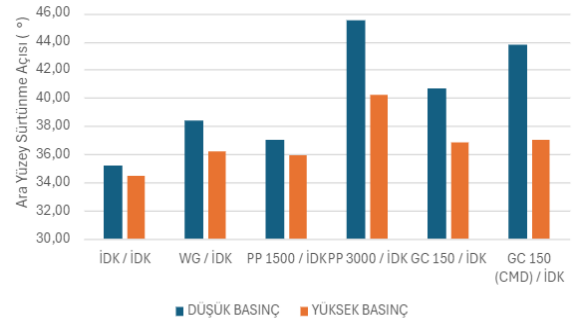


Şekil 19. İDK kumunun kesme kutusu deneyinden sonra geotekstillerin dokusuna tutunma şekilleri a) PP 1500 b) PP 3000 c) GC 150.

Figure 19. Adhesion patterns of İDK sand to the fabric of geotextiles after the shear box test a) PP 1500 b) PP 3000 c) GC 150.

3.6. Normal gerilmenin ara yüzey davranışlarına etkisi

Donatılı kohezyonsuz zeminlerin ara yüzey davranışı, tek bir parametreye bağlı olmayıp, birçok etken ile değişebilmektedir. Özellikle yüksek normal gerilmelerde diğer faktörlerin etkileri azalmaktadır [23]. Yapılan kesme kutusu deney sonuçları incelendiğinde donatılı ve donatısız numunelerde normal gerilme değerleri yükseldiğinde ara yüzey sürtünme açılarının azaldığı görülmüştür (Şekil 20). Ayrıca, geotekstil türüne göre bu azalma miktarı farklılık göstermektedir. Buna benzer şekilde, Erdoğan ve Altun [20] tarafından yapılan benzer deney sonuçlarında SW ve SP zeminlerine ait kayma dayanımı parametreleri incelendiğinde yüksek basınçlar altında elde edilen kayma mukavemeti açılarının düşük basınçlar altında elde edilenlerden bir miktar daha düşük olduğu açıklanmıştır. WG örgüsüz geotekstili yüksek basınç altında bile dokusu ve kalınlığı değişmediğinden WG donatılı zemininin sürtünme açısı oranının en az düşmesi beklenilir. Buna rağmen, PP 1500 kullanılan numunelerde kayma dayanımları daha az mertebede düşmüştür (Şekil 20). PP 1500 yüksek basınçta danelerin dokuyla etkileşmesine imkân veren ince ve sürtünebilen dokuya sahiptir. Bundan dolayı Şekil 5'te de görüleceği gibi yüksek normal gerilme değerleri kritik basınç değerini geçtiğinden kayma dayanımı biraz daha fazla artmıştır. Öte yandan PP 1500 ara yüzey sürtünme açısı WG geotekstilinden daha az düşmüştür. PP 3000 ara yüzeydeki oluşan normal gerilmeyi azaltabilen ve yüksek miktarda sıkışabilen kalın geotekstildir bundan dolayı PP 3000 donatılı zeminlerin ara yüzey sürtünme açıları PP 1500'den daha fazla azalmıştır. GC 150 geokompozitinin düşük basınçta farklı yönlerde farklı kayma dayanımları verdiği görülmüştür. Fakat, CMD yönlü numunenin sürtünme açısı oranı MD yönlü numuneden daha fazla azalmıştır. Hatta diğer geotekstillere kıyasla azalma miktarı daha fazla olmuştur. Çünkü, CMD ve MD yönlü GC 150'nin kayma dayanımlarını arttıran en önemli özelliği ipliklerin sağladığı fazladan yüzey alanı olmasıdır. Fakat yüksek basınç altında bu iplikler alt tabakadaki örgüsüz geotekstille gömüldüğü tespit edilmiştir. Bu nedenle geniş yüzey alanının sağladığı avantajı kaybetmişlerdir. Üstelik düşük basınçta ara yüzey açıları tamamen farklı olan PP 1500, GC 150 ve GC 150 (CMD) donatılı zeminlerin yüksek basınç altında ara yüzey sürtünme açısı değerleri birbirine çok yakındır (Şekil 20).



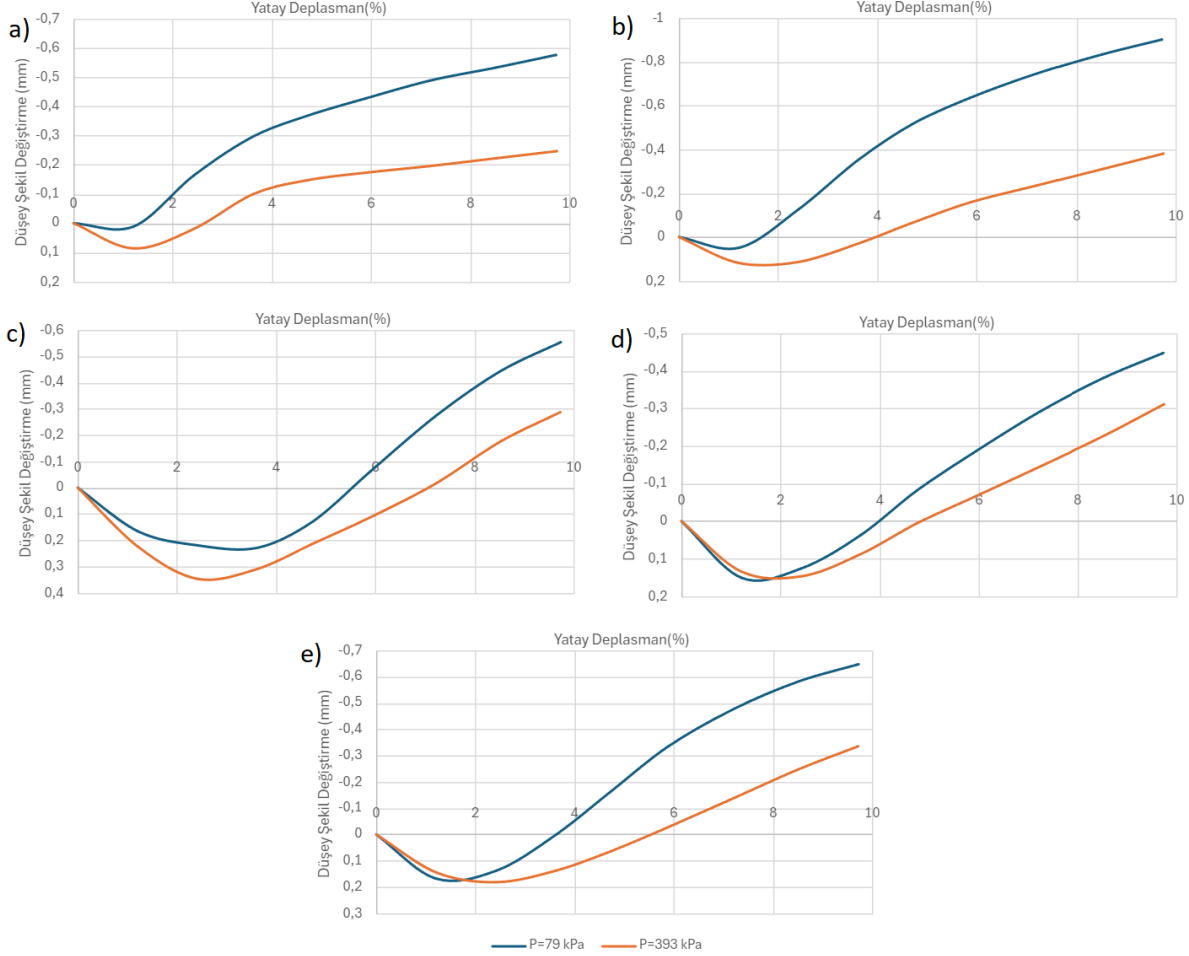
Şekil 20. Sıkı kum zeminlerin ara yüzey sürtünme açıları ile normal gerilme ilişkisi.

Figure 20. Relationship between interface friction angles and normal stress in dense sand soils.

Tüm zeminlerde normal gerilmenin artmasıyla genişleme miktarı azalmıştır (Şekil 21). Çünkü köşeli daneler yüksek basınçta kayma hareketi sırasında kırılıp kenetlenme özelliğini kaybedebilir. Ayrıca, yüksek basınç altında donatılı zeminler genellikle başlangıçta biraz daha fazla sıkışma göstermişlerdir (Şekil 21). Gözlenen hacimsel artışın azalmasının başlıca sebebinin deney sonrasında elekten geçen ince danelerin artmasından dolayı yüksek basınçta danelerin kırılması

olduğunu kanaatine varılmıştır. GC 150 kompozitleri yüksek basınçta başlangıçta fazladan sıkışma hareketi yapmamıştır (Şekil 21.d, Şekil 21.e). Bunun nedeninin, geotekstil yüzeyindeki

ipliklerin yüksek basınca karşı rijit bir şekilde davranması olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 21. Farklı normal gerilmelerde sıkı kum zeminlerin düşey şekil değiştirme eğrileri a) WG b) PP 1500 c) PP 3000 d) GC 150 e) GC 150 (CMD).

Figure 21. Vertical strain curves of dense sand soils at different normal stresses a) WG b) PP 1500 c) PP 3000 d) GC 150 e) GC 150 (CMD).

4. Sonuç

Bu çalışmada farklı geotekstillerin etkisi, zeminin dane boyutu, sıklığı ve normal gerilme değerlerine bağlı olarak kesme kutusu deney verileri ile incelenmiştir. Geotekstil donatılı kum zeminlerin ara yüzey kayma dayanımları hakkında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Rölatif sıklık arttıkça donatılı ve donatısız kum zemin zeminlerin ara yüzey sürtünme açıları artmıştır. Fakat sürtünme açısı oranı düşük sıklıktaki numunelerde genellikle daha fazla elde edilmiştir. Bunun nedeninin, rölatif sıklık azalması durumunda donatısız zeminlerdeki danelerin temas alanlarının donatılı zemin durumundaki ara yüzey temas alanından daha fazla azalması olarak değerlendirilmiştir.
- GC 150 kesme kutusuna CMD yönünde yerleştirildiğinde kayma dayanımları daha yüksek çıkmıştır. Çünkü üzerindeki 4 sıralı kalın iplikler diğer ipliklere kıyasla daha rijit davranmışlardır. Ayrıca, CMD yönünde kayan daneler daha geniş yüzey alanına sürtünerek daha büyük bir sürtünme direnci ile karşılaşmaktadır.
- Rijit ve kalın geotekstiller kullanıldığında alt yarıdaki kumun hacim değişimi engellendiği için donatılı sıkı zeminler daha az

hacimsel artış yapmıştır. Sadece ince geotekstillerde bazen hacim artışı sınırlı kalmıştır.

- Donatılı ve donatısız numunelerin dane boyu arttıkça genleşme miktarı artmaktadır. Çünkü köşeli iri daneler kayma hareketi sırasında iç kitlenmeyi bozmak için daha fazla hacimsel artış yapmaktadırlar.
- WG donatılı numunelerin dane boyutu arttıkça sürtünme açısı oranları ve ara yüzey sürtünme açıları artmıştır. Çünkü sadece iri köşeli daneler geotekstilin pürüzsüz sert dokusuna tutunabilmişlerdir. Örgüsüz geotekstillerde ise sürtünme açısı belli noktadan sonra artmamıştır. Bunun nedeninin ise örgüsüz geotekstillere iri köşeli danelerin iç kitlenme etkisini zayıflatması olduğu düşünülmektedir. GC 150 geokompozitinde sürtünme açısı oranı ile dane boyutu ters orantılıdır. Çünkü GC 150'nin girintili geniş yüzey alanı ile küçük daneler daha fazla temas halindedir.
- İyi derecelenmiş kumların boşluk oranı en az olduğundan sürtünme açısı oranı geotekstil türüne fark etmeksizin diğer kumlara kıyasla daha büyük çıkmıştır.
- Pürüzlü dokuya sahip örgüsüz geotekstillere ara yüzey sürtünme açıları pürüzsüz dokuya sahip örgülü geotekstillere

kıyasla genelde daha yüksektir. Sadece iç kilitlenme faktörünün önemli olduğu iri köşeli kumlarda örgüsüz geotekstillere kayma dayanımları biraz daha düşük çıkabilmektedir.

- Tüm geotekstiller, zeminlerin pik dayanımların görüldüğü andaki yatay deplasman değerlerini arttırmaktadır. Özellikle, pürüzlü geotekstiller bu değeri daha fazla arttırmaktadır.

- Yüksek basınç altında yapısı değişen kalın ve yumuşak geotekstillere sürtünme açısı oranları normal gerilme artınca daha fazla azalmaktadır. Sadece PP 1500 gibi ince aşınabilen dokulu geotekstiller için kritik basınç değerini geçtikten sonra sürtünme açısı oranı daha az düşmektedir.

- Yüksek basınçta GC 150'nin iplikleri alt tabakadaki örgüsüz geotekstille gömüldüğünden sürtünme açısı oranı çok fazla azalmıştır. Hatta ipliklerin verdiği fazla çıkıntılı yüzey dokusu düzleştikten yüksek basınçta CMD ve MD yönlü numunelerin ara yüzey sürtünme açıları birbirlerine çok yakın olarak elde edilmiştir.

- Normal gerilme değerleri büyük miktarda artınca numunelerin kayma hareketi sırasındaki hacimsel artış miktarları azalmıştır. Bunun nedeninin ise yüksek basınç altında özellikle kum zeminlerdeki köşeli danelerin kırılması olarak değerlendirilmiştir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan geotekstil ürünlerinde temin edilmesinde İstanbul Teknik İnşaat ve Maccaferri firmalarına teşekkür ederim.

Yazar katkılarının beyanı

İlk yazar literatür taraması, deney düzeneklerini belirlenmesi, deneylerin yapılması ve deney verilerinin analizlerin gerçekleştirilmesi konularında görev almıştır. İkinci yazar ise deney malzemesinin temininde, fikir üretiminde ve eleştirel değerlendirme süreçlerinde katkı sağlamıştır.

Kaynaklar

- [1] Jogi, M. 2005. A method for measuring smooth geomembrane/soil interface shear behaviour under unsaturated conditions. Saskatchewan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 108s, Kanada.
- [2] Tatlısoz, N., Edil, T. B., Benson, C. H. 1998. Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Cilt. 124, s. 1109-1119. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:11(1109)
- [3] Bağcı, F. 2007. Geosentetiklerle projelendirme ve zemin-geosentetik ara yüzey sürtünme açılarının değişik geosentetik ve zemin türleri için araştırılması. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 368s, İzmir.
- [4] Taylor, D.W. 1948. Fundamentals of Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, 700s.
- [5] Kara, E. M., Meghachou, M., Aboubekr, N. 2013. Contribution of particles size ranges to sand friction: Engineering, Technology Applied Science Research, Cilt. 3, s. 497-501. DOI: 10.48084/etasr.361
- [6] Tuna, Ş. Ç. 2008. Geotekstil donatılı kum zeminlerde mekanik davranışın belirlenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 149s, İzmir.
- [7] Jewell, R. A., Milligan, G. W. E., Dubois, D. 1984. Interaction between soil and geogrids: In Polymer grid reinforcement, Thomas Telford Publishing, s. 18-30.
- [8] Giroud, J. P., Darrasse, J., Bachus, R. C. 1993. Hyperbolic expression for soil-geosynthetic or geosynthetic-geosynthetic interface shear strength: Geotextiles and Geomembranes, Cilt.12, s. 275-286. DOI:10.1016/0266-1144(93)90030-R
- [9] Koutsourais, M. M., Sprague, C. J., Pucetas, R. C. 1991. Interface friction study of cap and liner components for landfill design: Geotextiles and

- Geomembranes, Cilt. 10, s. 531-548. DOI:10.1016/0266-1144(91)90045-X
- [10] Simonini, P. 1996. Analysis of behavior of sand surrounding pile tips: Journal of geotechnical engineering, Cilt. 122, s. 897-905. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:11(897)
- [11] Schofield, A.N., 1993. Original Cam-Clay. International Conference on Soft Soil Engineering, 8-11 Kasım, GuangZhou.
- [12] Sezen, A. 2003. Kum Davranışının Mikromekanizmaya Dayalı Olarak Endokronik Teori Kapsamında Modellenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 151s.
- [13] Dove, J. E., Frost, J. D. 1999. Peak friction behavior of smooth geomembrane-particle interfaces: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Cilt. 125, s. 544-555. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:7(544)
- [14] Frost, J. D., DeJong, J. T., Recalde, M. 2002. Shear failure behavior of granular-continuum interfaces: Engineering Fracture Mechanics, Cilt.69, s. 2029-2048. DOI:10.1016/S0013-7944(02)00075-9
- [15] ASTM D854 – 02. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [16] ASTM D-4253-00. 2006. Standard Test Methods for Maksimum Indeks Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [17] ASTM D-4254-00. 2006. Standard Test Methods for Minimum Indeks Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [18] ASTM D5321-08. Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Shear Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [19] Şekercioğlu, S. 2015. Kum zeminlerin geotekstil kullanılarak geoteknik özelliklerinin araştırılması. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 134s, Balıkesir.
- [20] Erdoğan, D., Altun, S. (2008). Kum / geotekstil ara yüzey kayma dayanımının kesme kutusu deneyleri ile belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt. 23, s.1-12.
- [21] Zhang, L., Thornton, C. 2007. A numerical examination of the shear test: Geotechnique, Cilt. 57, s.343-354. DOI: 10.1680/geot.2007.57.4.343
- [22] Olcay, Ş.E. 2021.Farklı konstrüksiyonda polipropilen liflerden üretilen dokusuz yüzeylerin geosentetik uygulamalarda kullanım olanaklarının araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 136s, Kayseri.
- [23] Tuna, Ş. Ç., Karakan, E., Altun, S. 2015. Geotekstil donatılı kum zeminlerin mekanik davranışlarının irdelenmesi: Teknik not, Teknik Dergi, Cilt. 26, s. 7015-7022.