

ATIK CAM KATKILI BİR ZEMİN GEOPOLİMERİZASYONU SOIL GEOPOLIMERIZATION WITH WASTE GLASS ADDITIVE

Arif Tunahan UÇKAÇ¹, Esmâ RAHAT², Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ³

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, atık cam tozu kullanılarak gerçekleştirilen geopolimerizasyon işlemiyle bir zemin iyileştirilmesi alternatifini sunulması amaçlanmıştır. Killi kum, %0-50 oranlarında atık cam tozuyla karıştırılmıştır. Likit aktivatör sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikattan (Na_2SiO_3) oluşmaktadır. Sodyum hidroksit konsantrasyonu 8M olarak seçilmiştir. Bu çalışma ile atık cam tozlu katkı zemin geopolimer örneklerinin kompaksiyon parametreleri ve serbest basınç dayanımı gelişimleri belirlenmiştir. Atık cam tozlu katkı zemin geopolimer örneklerinde, optimum su içeriği azalırken, maksimum kuru birim hacim ağırlığı artmıştır. Farklı oranlarda karıştırılan sodyum hidroksit ve sodyum silikattan meydana gelen çeşitli likit aktivatörlerin, atık cam tozlu katkı zemin geopolimer örneklerinin mukavemetini önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. 7/28/90 gün küre tabii tutulan %30 atık cam tozu ve likit aktivatör olarak %90 sodyum silikat (Na_2SiO_3): %10 sodyum hidroksit (NaOH) içeren zemin geopolimer örneklerinin serbest basınç dayanımının en yüksek olduğu gözlenmiştir. Neticede, atık cam tozunun zemin geopolimer uygulamasında kullanılmasının zeminin dayanımını arttırmada etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Perlit, Atık Cam Tozu, Geopolimerizasyon, Atterberg limitleri, Kompaksiyon, Serbest Basınç Dayanımı

ABSTRACT

In this study, the aim is to present a ground improvement alternative using the geopolymerization process of soils with waste glass powder. Clayey sand was mixed with waste glass powder at rates between 0% and 50%. Sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3) were used to form the liquid activator. The sodium hydroxide concentration was 8 M. The compaction parameters and unconfined compressive strength developments of waste glass powder-added soil geopolymers were determined. In waste glass powder-added soil geopolymers, the optimum water content of the samples decreased while the maximum dry unit weight of the samples increased. It was found that liquid activators consisting of sodium hydroxide and sodium silicate, which were mixed in different proportions, significantly affected the strength of waste glass

¹ Lisans Öğrencisi, Ege Üniversitesi, ariftunahanuckac@gmail.com

² Y. Lisans Öğrencisi, Ege Üniversitesi, esma_rahata@hotmail.com (Sorumlu yazar)

³ Doç. Dr., Ege Üniversitesi, tugba.eskisara@ege.edu.tr



powder-added soil geopolymers. It was observed that the 7/28/90-day geopolymers containing 30% waste glass powder, 90% sodium silicate (Na_2SiO_3), and 10% sodium hydroxide (NaOH) as a liquid activator had the highest unconfined compressive strength. As a result, it was seen that the use of waste glass powder in soil-geopolymer applications is effective in increasing the strength of the soil.

Keywords: Perlite, Waste Glass Powder, Geopolymerization, Atterberg limits, Compaction, Unconfined Compressive Strength

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği, küresel çevre sorunlarının çözümünde önemli bir rol oynayabilir. Sahada gerçekleştirdikleri çevre dostu uygulamalarla, geoteknik mühendisleri çevresel etkileri minimize etme potansiyeline sahiptirler. Bu bağlamda, zemin iyileştirmesi çalışmaları, çevre dostu yaklaşımların geliştirilmesi için önemli bir fırsat sunar. Geopolimer teknolojisindeki ilerlemeler, özellikle yapı malzemeleri üretiminden kaynaklanan yüksek CO_2 salınımını azaltma ve çimento yerine geçebilecek alternatif ürünlerin geliştirilmesi konusunda umut verici sonuçlar ortaya koymuştur (Davidovits, 2008). Bu gelişmeler, doğa dostu çözümlerin üretilmesine önemli katkılarda bulunmaktadır (Uddin ve Saraswathy, 2018).

Çevre kirliliğine katkıda bulunan önemli atıklardan biri camdır. Dünya genelinde depolanan atık camın tahmini hacmi yılda yaklaşık 200 milyon tondur (Mirzahosseini ve Riding, 2015). Zemin iyileştirme çalışmalarında atık camın geri dönüştürülmesi, atık depolama sahalarına gönderilecek cam miktarını azaltarak karbon ayak izinin azaltılmasına yardımcı olabilir.

Amorf yapıya sahip camlar, yüksek silis içeriğine sahiptirler. Kimyasal bileşimlerinde alüminyum olmamasına rağmen, öğütülmüş cam tozunun alkalilerle etkileşime girebileceği bilinmektedir (Jin, 2001; Cyr, 2012). Jin (2001) ve Cyr (2012), camın alkali aktivasyonu sonrasında diğer geopolimerler gibi yüksek dayanımlara ulaşabileceğini göstermiştir.

Bilondi vd. (2018a), killi zeminlerin mekanik davranışını iyileştirmek amacıyla geri dönüştürülmüş cam tozu katkılı bir geopolimerin uygunluğunu araştırmışlardır. Geri dönüştürülmüş cam tozu içeriğinin etkisi, çözeltinin molar konsantrasyonu, kür süresi ve kür sıcaklığı gibi parametrelerin etkileri üzerinde çalışmışlardır. Likit aktivatör (NaOH) ve cam tozu (%0 ila %25 oranlarında) kullanılmıştır. Kür sıcaklığı 25 ila 70°C arasında değişmiş ve kür süresi 7, 28 ve 91 gün olarak belirlenmiştir. Numunelerin mekanik davranışını belirlemek için serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geopolimer kullanılarak stabilize edilen numunelerin serbest basınç dayanımlarının stabilize edilmemiş numunelere kıyasla arttığını göstermiştir.

Javed vd. (2020), atık cam tozu kullanarak üretim maliyetini azaltmayı ve çevre dostu bir zemin stabilizasyonu sağlamayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada, kohezyonlu bir zeminde cam tozunun etkisi farklı indeks özellikleri ve geoteknik mühendislik deneyleri ile



incelenmiş ve ana zeminle karşılaştırılmıştır. Optimum cam tozu yüzdesini belirlemek için, zemin numunelerine farklı oranlarda (%2, %4, %6, %8 ve %10) cam tozu eklenmiştir. Likit Limit (LL), Plastik Limit (PL) ve Plastisite İndeksi (PI) cam tozu içeriği arttıkça sürekli olarak azalmıştır. Örneklerde %8 cam tozu katkısı en yüksek mukavemet değerini gösterirken cam tozu içeriği arttıkça mukavemet değerinin azaldığını saptamışlardır.

Eskisar ve Aksu (2020), kil, killi kum ve kum zeminler üzerinde yaptıkları araştırmalarında farklı likit aktivatörlerle zemin türüne ve geopolimerizasyon metoduna göre elde edilecek zemin parametrelerinin önemli ölçüde değişebildiğini göstermişlerdir. Geopolimerizasyonu tetiklemek için iki metot düşünmüşlerdir. Bunlardan birincisinde örnekler kür süreleri boyunca özel tasarlanmış 38°C sıcaklıkta bir odada bekletilmiştir. İkinci yaklaşımda ise örnekler 1 gün boyunca 80°C sıcaklıkta bir etüvde bekletilerek ardından 20°C sıcaklıktaki kür odasında küre bırakılmıştır. Sonuçta, kum ve killi kum örneklerinde, optimum su içeriğine kadar likit aktivatör kullanılması iyileştirme sağlarken, kil zeminlerde optimum su içeriğinin yaklaşık iki katı kadar likit aktivatör kullanılması mukavemette artış oluşturmuştur.

Ramezani vd. (2023) çalışmalarında, şeker kamışı küspesi külü, cam tozu ve silis dumanı esaslı geopolimerlerin kötü derecelenmiş kumlu zeminlerin mekanik ve mikro yapı özelliklerini incelemeyi hedeflemişlerdir. Geopolimerizasyonun etkisini değerlendirmek için farklı likit aktivatörlerle (NaOH ve KOH) hazırlanan geopolimer numunelerini 7, 28 ve 91 gün boyunca küre tabi tutmuşlardır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için serbest basınç dayanımı deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, cam tozu ve silis dumanının ilavesinin, şeker kamışı küspesi külü bazlı geopolimer örneklerinin serbest basınç dayanımını artırdığını göstermiştir.

Bu çalışmada, atık cam tozunun farklı yüzde oranlarıyla zeminlere katılması ile ortaya çıkan indeks ve mekanik özelliklerindeki değişimleri gözlemlenmek amaçlanmıştır. Öncelikle değişen cam tozu oranlarıyla kil zeminlerin Atterberg limitleri ve kompaksiyon parametrelerinin nasıl bir değişim gösterdiği incelenmiştir. Daha sonra atık cam tozu katkılı geopolimer zeminlerin dayanım gelişimini belirlemek için 7/28/90 günlük örnekler üzerinde serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar detayları ile ele alınarak atık cam tozu ilavesinin olumlu yönde katkıları olduğu gösterilmiştir.

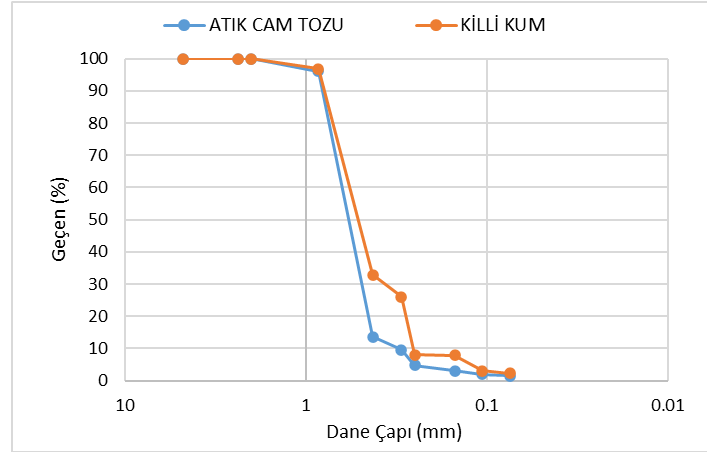
2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Malzemeler

%10 perlit- %90 kaolin kili içeren ana zemine ağırlıkça farklı oranlarda (%0-%50) cam tozu eklenerek oluşan zemin örnekleri ile çalışılmıştır. İlk olarak zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Zeminin gradasyon eğrisine göre sembolünün "SC", zemin türünün killi kum olduğu belirlenmiştir (ASTM D6913, 2017).



Atık cam tozu İzmir-Bornova'da bir cam-ayna geri dönüşüm tesisinden temin edilmiştir. Atık cam tozunun elek analizi ASTM D6913 (2017) standardına uygun olarak yapılmıştır. Killi kum ve atık cam tozuna ait gradasyon eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Killi kum ve atık cam tozunun dane çapı dağılım eğrisi

Likit aktivatör olarak NaOH (sodyum hidroksit) ve Na₂SiO₃ (sodyum silikat) kullanılmıştır. Sodyum hidroksit boncuk formda temin edilmiş olup beyaz renkte ve suda kolaylıkla çözünebilecek şekildedir; saflığı %99'dan fazladır.

2.2 Yöntemler

Saf zeminin ve çeşitli zemin-cam tozu karışımlarının likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır (ASTM D4318, 2017). Saf zeminin ve çeşitli zemin-atık cam tozu karışımlarının kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Zeminlerin kompaksiyon parametrelerinin belirlenmesinde standart Proktor enerjisi ile çalışılmıştır. Zemin-atık cam tozu karışımlarının ve likit aktivatörlü zemin-atık cam tozu karışımlarının optimum su veya optimum NaOH:NaSi₂O₃ içerikleri ve buna karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Çalışma kapsamında, deney numuneleri optimum su veya optimum NaOH:NaSi₂O₃ içeriğinde hazırlanmıştır (ASTM D698-12, 2021).

Serbest basınç dayanımı deneyleri için standart Proktor sıklığında, 5 cm çaplı ve 10 cm yüksekliğinde silindirik örnekler hazırlanmıştır. Zemin örnekleri hazırlanırken, deney programında belirlenen oranlar dikkate alınarak zemin ve atık cam tozu kuru şekilde eklenmiş, üzerine su veya likit aktivatör (NaOH:NaSi₂O₃) eklenerek homojen bir karışım elde edilmiştir. Hazırlanan zemin örneklerinin boyu ve çapı deney öncesinde kontrol edilmiştir.

Her örnek grubu 20 ve 40°C'de küre tabi tutulmak üzere 3'er adet hazırlanmıştır. Zemin örnekleri 7/28/90 gün kür süresi boyunca oda sıcaklığında (20°C) veya özel kür odasında (40°C) tutulmuştur. Örnekler, kür süresini tamamladıktan sonra serbest basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç dayanımı deneyleri ASTM D2166 (2016)

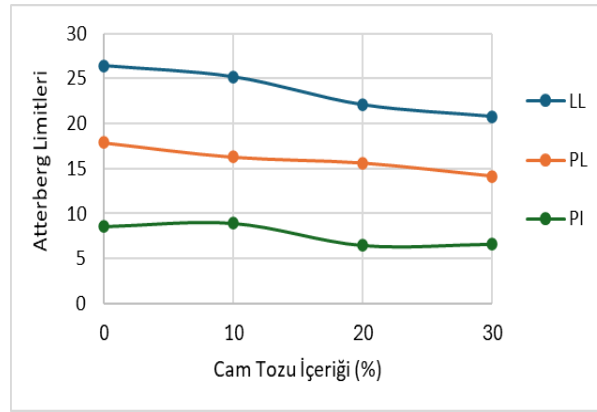


standardına göre yapılmıştır. Örnekler 1.42 mm/dk hızla yüklenmiştir. Deneyler %10 deformasyon seviyesine kadar sürdürülmüştür.

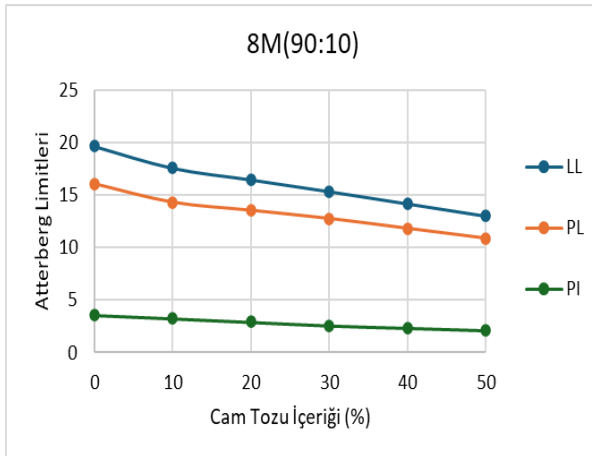
Geopolimerizasyona tabi tutulan numunelerin isimlendirmesi şu şekildedir: 8M(90:10): %10 8M NaOH çözeltisi + %90 Na_2SiO_3 içeren numune, 8M(70:30): %30 8M NaOH çözeltisi + %70 Na_2SiO_3 içeren numune olarak belirtilmiştir.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

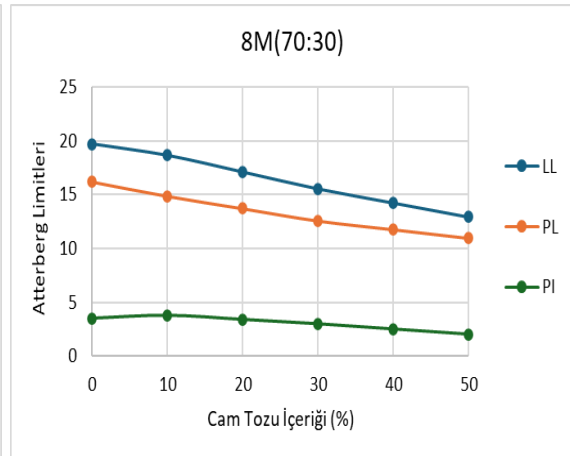
Zemine kuru zemin ağırlığının %10, %20, %30, %40 ve %50'si kadar cam tozu ilave edilmiştir. Zemin-atık cam tozu ve atık cam tozu katkılı geopolimer 8M(90:10) ve 8M(70:30) numunelere ait likit limit (LL), plastik limit (PL) ve plastisite indisi (PI) değişimi Şekil 2 a, b ve c'de gösterilmiştir. Eklenen cam tozu ile likit ve plastik limite azalma olduğu her grup için görülmüştür. Likit limit ve plastik limite azalma olduğu için plastisite indisi de azalmıştır.



(a)



(b)



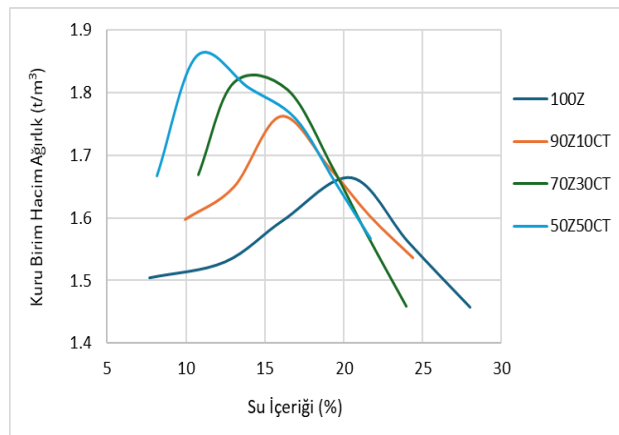
(c)

Şekil 2. a Zeminin b. 8M %90 NaSi_2O_3 :%10 NaOH c. 8M %70 NaSi_2O_3 :%30 NaOH içeren örneklerin Atterberg limitleri



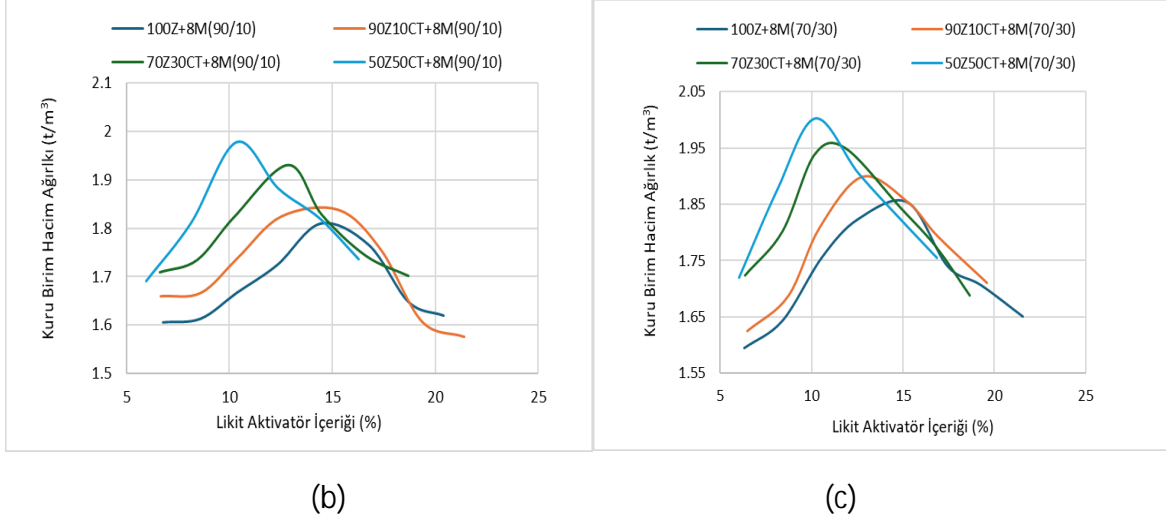
LL ve PL'deki bu azalma, zemin içine katılan non-plastik cam tozu parçacıklarının kısmi bir ikamesi olmasına atfedilebilir. Bu durum aynı zamanda kuru parçacıklar arasında kaymaya yardımcı olma eğiliminde olan geopolimer jel oluşumundan önce likit aktivatörde yer alan kimyasalların da bir etkisidir. Benzer sonuçlar Abdullah vd. (2017) tarafından ifade edilmiş, hatta yüksek plastisiteli kili düşük plastisiteli bir kil haline getirdiğini belirtmişlerdir.

Şekil 3 a'da zeminin ve %10-50 cam tozu içeren zemin örneklerinin optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları gösterilmiştir. Zeminlerde cam tozu ilavesiyle zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında artış görülmüştür. Maksimum kuru birim hacim ağırlık tüm gruplarda %50 cam tozu içeriğinde görülmüştür. Su ile hazırlanan 100Z örneklerinde optimum su içeriği %20 olarak bulunmuştur. 90Z10CT (%90zemin_%10camtozu) örneklerinde ise %16 olarak bulunmuştur. Bundan sonra cam tozu artışı ile optimum su içeriği azalmaya devam etmiştir. Atık cam tozu eklenmesiyle optimum su içeriğindeki azalma, örneklerde ince partiküllerin kaba partiküllerle değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır; bu da yüzey alanını küçülterek, daha küçük yüzey alanının kompaksiyon için daha az su ihtiyacı oluşturması ile neticelenmiştir (Mujtaba vd., 2020). 100Z (%100zemin) örneklerinde en düşük maksimum kuru birim hacim ağırlık yine su ile kompakte edilen örneklerde gözlemlenmiş ve 1.66 t/m^3 olarak bulunmuştur. Ibrahim vd. (2021) kil zemine %36'ya varan atık cam tozu eklendiğinde elde edilen kompaksiyon davranışında cam tozu miktarı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlığın arttığını göstermiştir. 90Z10CT örneklerinde ise 1.76 t/m^3 olarak saptanmıştır. Su içeren örneklerin kompaksiyon özelliklerinde en belirgin değişimin 100Z ile 90Z10CT arasında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3b ve c'de 8M(90:10) ve 8M(70:30) likit aktivatör içeren örneklerde 50Z50CT örneklerinde maksimum kuru birim hacim ağırlık sırasıyla 1.97 ve 2.00 t/m^3 olarak saptanmıştır. Su ile sıkıştırılan 50Z50CT maksimum kuru birim hacim ağırlık 1.86 t/m^3 olarak bulunmuştur. Likit aktivatörle hazırlanan örneklerin suyla hazırlananlara kıyasla daha yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Likit aktivatör numunelerinde ise örneklerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları 1.81 - 2.00 t/m^3 aralığında gözlemlenmiştir.



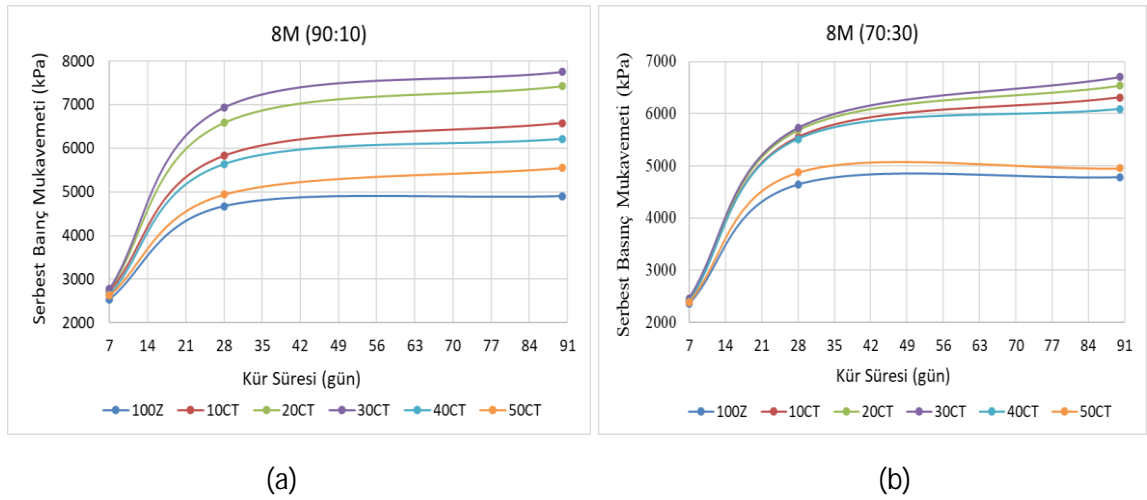
(a)





Şekil 3. a. Zeminin b. 8M NaOH içeren %90Na₂O₃:%10 NaOH c. 8M NaOH içeren %70Na₂O₃:%30 NaOH içeren örneklerin Kompaksiyon eğrileri

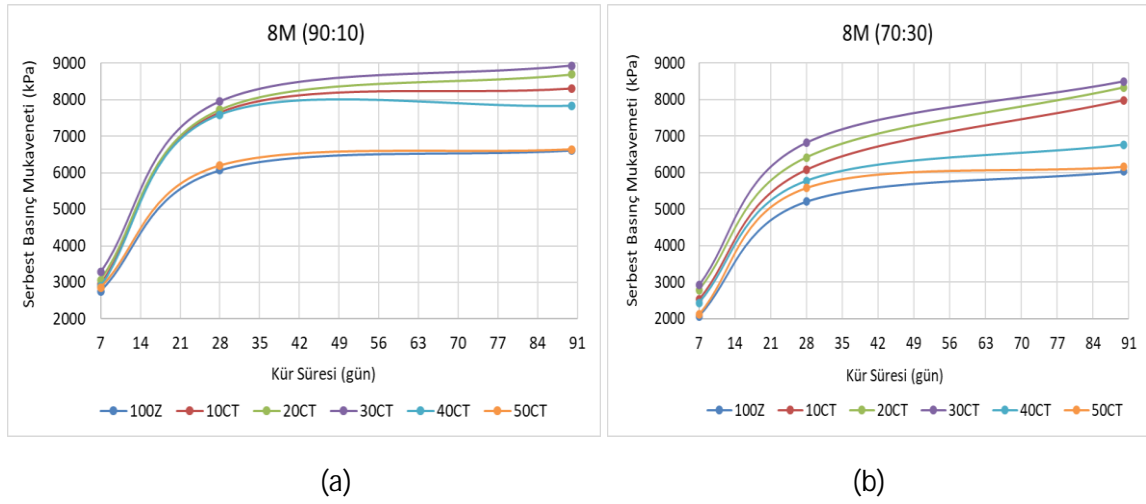
Şekil 4a ve b'de zemin içerisine eklenen likit aktivatörlerin 20°C'de (oda sıcaklığı) 8M(90:10) ve 8M(70:30) içeriklerinde ki serbest basınç dayanımları verilmiştir. 20°C'de küre bırakılan örneklerde dayanım artışlarının belirli bir zemin: atık cam tozu oranını takip ettiği görülmektedir. Fakat bu oran örneklerdeki Na₂SiO₃: NaOH molaritelerine göre de farklılık gösterebilmektedir. 8M(90:10) ve 8M(70:30) likit aktivatör içeren atık cam tozu katkılı geopolimer zeminlerde sıralama 70:30, 80:20, 90:10, 60:40 ve 50:50 şeklindedir. 8M(90:10) ve 8M(70:30) likit aktivatör içeriklerinde en yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri %70 zemin-%30 atık cam tozu içeren geopolimer zeminlerde sırasıyla 7749 kPa ve 6707 kPa olarak bulunmuştur. 8M(70:30) likit aktivatör içeriğinde %50 zemin+%50 cam tozu örneği 100Z örneğine benzer dayanım verdiği görülmüştür. Cam tozu içeriğinin %30'dan fazla olduğu deney örneklerinde dayanımın azaldığı görülmektedir.



Şekil 4. Farklı cam tozu içeriklerinde hazırlanan ve 20°C'de küre tabi tutulan a. 8M(90:10) likit aktivatörü b. 8M(70:30) likit aktivatörü örneklerin kür süresi-serbest basınç mukavemeti ilişkisi



Kür sıcaklığı geopolimerizasyon ve dayanım kazanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Düşük kür sıcaklıklarında, geopolimer jellerinin belirgin dayanıma ulaşabilmesi için daha uzun iyileştirme süreleri gereklidir. Bu nedenle, daha düşük poroziteye sahip yüksek kaliteli geopolimer zeminler oluşturulabilir (Yaghoubi vd., 2019). Bu çalışmada yüksek sıcaklıkta (40°C) en yüksek dayanımın %30 atık cam tozu içeriğinde elde edildiği görülmüştür. 8M(90:10) ve 8M(70:30) likit aktivatör içeren atık cam tozu katkılı geopolimer zeminlerde sıralama 70:30, 80:20, 90:10, 60:40 ve 50:50 şeklindedir.



Şekil 5. Farklı cam tozu içeriklerinde hazırlanan ve 40°C'de küre tabi tutulan a. 8M(90:10) likit aktivatörü b. 8M(70:30) likit aktivatörü örneklerin kür süresi-serbest basınç mukavemeti ilişkisi

8M(90:10) ve 8M(70:30) likit aktivatör içeriklerinde en yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri %70 zemin-%30 atık cam tozu içeren geopolimer zeminlerde sırasıyla 8923 kPa ve 8498 kPa olarak bulunmuştur (Şekil 5a ve b). 8M(70:30) likit aktivatör içeriğinde 70:30, 80:20 ve 90:10 yakın dayanım değerleri verirken 60:40 daha düşük değerde kaldığı görülebilmektedir. Her iki sıcaklık grubuna bakıldığında 8M(90:10) ve 8M(70:30) likit aktivatör içeriğinde hazırlanan zemin örneklerinde sıralamanın (zemin : cam tozu) 70:30, 80:20, 90:10, 60:40 ve 50:50 şeklinde olduğu ve %30 atık cam tozu içeriğinde en yüksek dayanım değeri elde edildiği görülmektedir. %30 atık cam tozundan sonra eklenen cam tozunun zeminin dayanımına katkısının olmadığı görülmektedir. Bilondi vd. (2018b) zeminlerde belirli bir miktara kadar cam tozunun geopolimer jelleri güçlendirici bir etki sağladığını belirtmiştir. Optimum cam tozu miktarı aşıldığında negatif etkileri ortaya çıkar, fazlaca bulunan cam tozu likit aktivatör ve partiküller arasında gerçekleşecek kimyasal reaksiyonları baskılar. Bu durumda likit aktivatör yeterince silika ve alüminayı cam tozundan çözecek güçte de olamaz, bu sebeplerle zeminin daha yüksek cam tozu içeriklerinde mukavemeti azalır.

Atık cam tozu katkılı geopolimer zeminlerde kür sıcaklığının artmasıyla zeminlerin serbest basınç dayanımları artmıştır. İşlem görmemiş zemin örneğinin serbest basınç dayanımı 160 kPa iken atık cam tozu katkılı geopolimer zemin karışımlarından 70Z30CT8M(90:10) (%70zemin_%30camtozu_8M NaOH içeren (%90Na₂SiO₃+%10NaOH)) örneği 40°C altında küre tabi tutuldukları takdirde 90 günün sonunda serbest basınç dayanımlarının 8923



kPa'a ulaştığı saptanmıştır. Yüksek sıcaklık tercih edildiğinde NaOH miktarı az olan cam suyu ile bir likit aktivatör tercih edilebileceği, hatta gerekli ise NaOH molaritesinin de düşük tutulabileceği ve halen yeterli mukavemetlerin sağlanabileceği görülmüştür.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada atık cam tozu katkılı geopolimer zeminlerin Atterberg limitleri, kompaksiyon özellikleri ve serbest basınç dayanımları incelenmiştir. Sonuçlar, atık cam tozu katkılı geopolimer zeminlerin indeks ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

- %10 atık cam tozu içeriğindeki zemin örneğinde en yüksek likit limit ve plastik limit değerlerinin elde edilmesi, bu yüzde değerinden sonra atık cam tozu ilavesinin likit limit ve plastik limit değerlerinin azalmasında etkili olmuştur.
- %30 atık cam tozu içeriğinden sonra zemin non-plastik özellik göstermiştir.
- Atık cam tozu karışımli zeminlerde, atık cam tozu oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık artarken ve optimum su içeriği azalmıştır.
- 8M(90:10) ve 8M(70:30) atık cam tozu katkılı geopolimer zeminlerde maksimum kuru birim hacim artarken, optimum likit aktivatör içeriğinde azalma olmuştur.
- Atık cam tozu katkılı geopolimer zeminlere ait serbest basınç dayanımlarında en yüksek değer 70Z30CT8M(90:10) örneklerinin yüksek sıcaklıkta (40°C) küre tabi tutulması ile elde edilmiştir.

Bu bulgular doğrultusunda çalışmanın devam eden kısmında atık cam tozu katkılı geopolimer zeminlerin içsel sürtünme açısı, kohezyonu, sıkışma indisi gibi kayma mukavemeti ve sıkışma özellikleri de araştırılacaktır. Bu çalışmanın çıktıları doğrultusunda atık cam tozu katkılı zeminlerin kullanımının ulaşılacak dayanım değerleri açısından başarılı sonuçlar vereceği öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A programı 1919B012322978 no.lu proje ile desteklenmektedir. Yazarlar, sağlanan destek için TÜBİTAK'a teşekkürü borç bilirlir.

KAYNAKLAR

Abdullah, H.H., Shahin, M.A., Sarker, P. (2017), "Stabilisation of clay with fly-ash geopolymer incorporating GGBFS", In Proceedings of the second proceedings of the second world congress on civil, structural and environmental engineering (CSEE'17), 1-8p.



- ASTM D698-12. (2021), "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166. (2016), "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6913. (2017), "Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318. (2017), "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bilondi, M.P., Toufigh, M.M., Toufigh, V. (2018a), "Experimental investigation of using a recycled glass powder- based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils", Construction and building Materials, 170, 302-313.
- Bilondi, M.P., Toufigh, M.M., Toufigh, V. (2018b), "Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder-clay geopolymer", Construction and Building Materials, 183, 417-428.
- Cyr, M., Idir, R., Poinot, T. (2012), "Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet", Journal of Materials Science, 47: 2782-2797.
- Davidovits, J. (2008), "Geopolymer Chemistry & Applications 2nd ed.", Institut Geopolymere, France, 0-587.
- Eskisar, T., ve Aksu, G., (2020), "Zeminlerde tek fazlı geopolimerizasyon uygulaması ve geopolimerizasyonun serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi", Konya Journal of Engineering Sciences, 8 (3), 466-478.
- Ibrahim, H.H., Mawlood, Y.I., Alshkane, Y.M. (2021), "Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq", International Journal of Geotechnical Engineering, 15(4), 496-503.
- Javed, S., Chakraborty, S. (2020), "Effects of waste glass powder on subgrade soil improvement", World Scientific News 144 (2020): 30-42.
- Jin, W. (2001), "Inorganic binders employing waste glass", US Patent, 6,296,699.
- Mirzahosseini, M., and Riding, K.A. (2015), "Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM)", Cement and Concrete Composites, 56, 95-105.
- Mujtaba, H., Khalid, U., Farooq, K., Elahi, M., Rehman, Z., Shahzad, H.M. (2020), "Sustainable utilization of powdered glass to improve the mechanical behavior of fat clay", KSCE Journal of Civil Engineering, 24(12), 3628-3639.
- Ramezani, S. J., Toufigh, M. M., and Toufigh, V. (2023), "Utilization of Glass Powder and Silica Fume in Sugarcane Bagasse Ash-Based Geopolymer for Soil Stabilization", Journal of Materials in Civil Engineering 35.4 (2023): 04023042.
- Uddin, M.N., and Saraswathy, V. (2018), "A comparative study on clay and red soil based geopolymer mortar", Civil Engineering and Architecture, Vol. 6, 34-39p.
- Yaghoubi, M., Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Darmawan, S., Wang, J. (2019), "Impact of field conditions on the strength development of a geopolymer stabilized marine clay", Applied Clay Science, 167, 33-42.

