

Araştırma Makalesi - Research Article

Jel İçeren Sıvılaştırılabilir Zeminde Donma Direncinin İncelenmesi

An Investigation of the Freezing Resistance in Liquefiable Soil Containing Gel

Asker Alp Gültekin¹, Burak Evirgen^{2*}

Geliş / Received: 01/11/2021

Revize / Revised: 24/02/2022

Kabul / Accepted: 03/03/2022

ÖZ

Dinamik etkilere maruz kalan ince kumlu-siltli zeminlerde, düşük plastisiteli killerde ve hatta gelen ivmenin büyüklüğüne bağlı olarak çakıllı zeminlerde dahi sıvılaşma olayı meydana gelebilmektedir. Bu sorunu önlemek amacıyla mekanik veya kimyasal zemin iyileştirme teknikleri kullanılmaktadır. Yüksek su emme kapasitesine sahip sodyum poliakrilatın zemine karıştırılması veya enjeksiyonu da kimyasal zemin iyileştirme tekniklerindedir. Ortamdaki su ile etkileşime girdiğinde jel forma dönüşen bu malzemenin, dona maruz kalan bölgelerde zemin içerisinde donması durumundaki davranışı bilinmemektedir. Bu amaçla, referans numuneleriyle birlikte %5,00, %10,00, %15,00 ve %20,00 oranlarında sodyum poliakrilat jeli içeren kumlu zemin numuneleri -20°C'de dondurulmuş ve serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Ayrıca, kumlu numunelere ağırlıkça %5,00 oranında bentonit kili eklenerek deneyler tekrarlanmıştır. Jel içeriğiyle birlikte su muhtevasının artmasına bağlı olarak tüm numunelerin serbest basınç dayanımları artmasına rağmen, bentonit içeren numunelerde ortalama %14,00 daha düşük değerler elde edilmiştir. Diğer taraftan bentonit içermeyen donmuş numunelerde genel olarak birim şekil değiştirme değerleri artarken, bentonitli numunelerde azalmaktadır. Zemin içerisinde jel formda olan viskoz yapı, donma işlemi sırasında meydana gelen hacim artışı sönümleyerek donma kabarması sorununu engellemektedir. Ancak, sodyum poliakrilat ile iyileştirilen sıvılaşmaya karşı hassas kumlu zeminlerde yetersiz doygunluk durumunda taşıma kapasitesi kayıplarının dikkate alınması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler- *Donma Direnci, Serbest Basınç Dayanımı, Sıvılaşma, Bentonit, 3B Yazıcı*

ABSTRACT

The liquefaction phenomenon may originate in fine sandy - silty type of soils subjected to dynamic effects, low plasticity clays and even in soils with gravels based on the magnitude of applied acceleration. The mechanical or chemical soil improvement techniques have been used to prevent this problem. The mixing or grouting operations of sodium polyacrylate, which has a high-water absorption capacity, is one of the chemical soil improvement techniques. The frost behavior of this material, which turns into a gel form when react with the water in the environment, is not known in the permafrost areas. Within this purpose, sandy specimens including 5.00%, 10.00%, 15.00%, and 20.00% sodium polyacrylate gel as well as reference ones, were frozen at -20°C and unconfined compression tests were applied. Moreover, the tests were repeated for additional specimens containing 5.00% bentonite clay by weight. Although the unconfined compressive strength of all samples improved according to the increase in the amount of water with the gel content, about 14.00% lower values were obtained in specimens containing bentonite. On the other hand, the unit strain values of frozen samples without bentonite increased, while

¹İletişim: askeralpgultekin@eskisehir.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-8315-4598>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, 26555, Eskişehir, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişimi: burakevirgen@eskisehir.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-4202-5479>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, 26555, Eskişehir, Türkiye

reduction observed in samples with bentonite. The viscous structure, that is in gel form inside the soil, dissipates volume increase during the freezing process and prevents the frost heave problem. However, the loss of bearing capacity should be considered in case of insufficient saturation in liquefaction sensitive sandy soils improved with sodium polyacrylate.

Keywords- Freezing Resistance, Unconfined Compressive Strength, Liquefaction, Bentonite, 3D Printer

I. GİRİŞ

Saha incelemesi geoteknik mühendisleri için önemli süreçlerden biridir. Zeminin özelliklerinin incelendiği bu süreçte, zemin parametrelerinin yetersiz olması durumunda çoğu zaman uygun yöntemle iyileştirme yapılmaktadır. Fiziksel, mekanik ya da kimyasal yöntemlerle gerçekleştirilen zemin stabilizasyonu, doğal zemin özelliklerinin mevcut duruma göre iyileştirildiği teknikleri kapsamaktadır. Mekanik ve fiziksel stabilizasyonda zeminin mukavemeti ve stabilitesi genellikle harici yük veya titreşim oluşturan mekanik yöntemlerle artırılabilir. Bu yöntemler sayesinde zeminin boşluk oranı ve dolayısıyla geçirgenliği azalırken, yoğunluğu ve mukavemeti artmaktadır. Kimyasal stabilizasyon ise farklı formlarda eklenen katkıların, zemin daneleri veya ortamdaki su ile meydana getirdiği reaksiyonlar ile gerçekleşmektedir. Zemin özelliklerinin bağlayıcı malzeme veya kimyasal bağlar ile artırıldığı bu yöntemlerde; çimento, kireç, uçucu kül gibi ekonomik ve yan ürün niteliğindeki katkılara ek olarak özel kimyasallar da tercih edilebilmektedir. Genellikle soruna özgü çözüm olanağı sunan bu özel kimyasallardan birisi de su emdiğinde jel forma dönüşen poliakrilat türevleridir. Diğer taraftan, zeminin dinamik etkilere maruz kalması sonucunda uygun koşullarda boşluk suyu basıncı artmakta, efektif gerilme ise azalmaktadır. Buna bağlı olarak sıvılaşma meydana gelmekte, zeminin kayma mukavemeti azalmakta ve zemin üzerinde bulunan yapılarda ciddi mertebelerde hasarlar oluşturmaktadır. Süregelen klasik jet enjeksiyonu ve derin karıştırma uygulamalarında zemine enjekte edilen çimento türevleri taşıma kapasitesi artışı sağlarken sıvılaşma potansiyelinin azaltılmasına da dolaylı açıdan imkan tanımaktadır. Çalışma kapsamında donmaya karşı etkisi değerlendirilen sodyum poliakrilat (SPA) ise zemindeki su fazını jel forma dönüştürdüğü için viskoziteyi artırıp, boşluk suyu basıncını azaltarak doğrudan sıvılaşma problemine çözüm sunmaktadır [1,2].

Donmuş zeminler; Rusya, Grönland, İzlanda, Kanada, Finlandiya gibi yıl boyunca hava sıcaklığının aşırı seviyelerde düştüğü bölgelerdeki zeminlerin yüzeye yakın tabakalarında doğal olarak oluşmaktadır. Dona maruz kalan zeminde yaşanan hacim artışı nedeniyle zemin daneleri birbirinden uzaklaşmakta ve temas alanları azalmaktadır. Dolayısıyla içsel sürtünme açısı azalırken, buzun kazandırdığı rijitlik nedeniyle geçici basınç dayanımı artışı gözlenmektedir. Donmuş zeminlerin mekanik etkilerinin araştırıldığı çalışmalar genellikle deneysel uygulamalar ve arazi gözlemlerini içermektedir. Evirgen vd. [3] tarafından yapılan çalışmada zemin tipinin ve donma süresinin, suya doymuş donmuş granüler zeminlerdeki serbest basınç dayanımına ve geçirgenliğe etkisi incelenmiştir. Kötü derecelendirilmiş kum ve kötü derecelendirilmiş çakıl tipindeki zeminler deneylerde kullanılmıştır. İnce danelere sahip olan kötü derecelendirilmiş kum tipi zeminin daha yüksek serbest basınç dayanımına ve birim şekil değiştirme değerlerine ulaştığı belirtilmiştir. Ayrıca zeminlerin donma süresindeki artış ile serbest basınç dayanımlarında da artış gözlenmiştir. Zhao vd. [4] tarafından yapılan çalışmada dondurulmuş killi zeminin ısı eğimindeki değişiminin serbest basınç dayanımına ve deformasyona etkisi araştırılmıştır. Isıl eğim düştükçe zeminin serbest basınç dayanımı ve pekleşme davranışında artış meydana gelmektedir. Kimyasal stabilizasyonunun donmuş zeminlere etkisinin değerlendirildiği diğer bir çalışmada ise iyonik polimer zemin stabilizatörünün donmuş zemine etkileri incelenmiştir [5]. Li vd. [6] farklı oranlarda iyileştirilmiş numunelere serbest basınç deneyi ve kesme kutusu deneyi uygulamışlardır. Stabilizatörün zeminin plastik indeksini ve donma sıcaklığını düşürücü yönde etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Stabilizatörün %1,00 oranını geçmesiyle, donmuş zeminin mekanik dayanımının arttığı anlaşılmıştır. Keskin vd. [7] tarafından yapılan çalışmada ise %5,00-%10,00 oranlarında mermer tozu, ponza tozu ve kireç tozu içeren ince daneli zeminlerin donma-çözülme etkisi altındaki serbest basınç dayanımları incelenerek, katkısız duruma kıyasla değişimleri sunulmuştur. Donma-çözülme çevrimleri sonunda ise katkı tipine göre serbest basınç dayanımlarında %37,00 ile %73,00 arasında değişen oranlarda azalma gözlenmiştir.

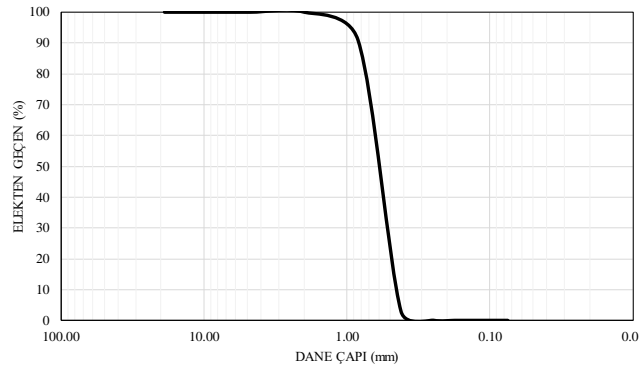
Donmuş zeminlerde kayma mukavemetini azaltan boşluk suyu basıncı bulunmadığından sıvılaşma problemi yaşanmazken, çözülme etkisi ile bu problem tekrar ortaya çıkmaktadır. Termal yalıtım ve şev yüksekliğinin artırılması gibi yaklaşımlarla şevlerin çözülme kaynaklı sorunlardan korunması amaçlanmaktadır. Şevlerde donmaya karşı izolasyonun sağlanması için kaba daneli kayalar yerine ince daneli kayaların kullanımı önerilirken, alt yapı projelerinde ise çözülmeye bağlı sıvılaşma potansiyelinin göz ardı edilmemesi gerektiği belirtilmektedir [8,9].

Bu çalışmada ise sıvılaşma riskine karşı SPA jeli kullanılarak iyileştirilen yüzeye yakın kumlu zeminin donmaya maruz kalması durumunda serbest basınç dayanımındaki değişim araştırılmıştır. Ayrıca donmuş zeminde SPA ile birlikte bentonit kili bulunması durumu da incelenmiştir. Kuru ağırlığının 1/4'ü oranında çimento içeren sodyum poliakrilat jeli, silis kumuna %5,00, %10,00, %15,00 ve %20,00 oranlarında karıştırılarak kalıplar içerisinde -20°C'de dondurulmuştur. Aynı oranlar %5,00 bentonit + %95,00 silis kumu karışımına da eklenerek deneyler tekrarlanmıştır. Her bir durum için en az 3 adet üretilen donmuş numuneler serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur. Sonuçta elde edilen yük – birim şekil değiştirme grafikleri poliakrilat jeli içermeyen referans numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

II. MALZEME VE YÖNTEM

A. Zemin Özellikleri

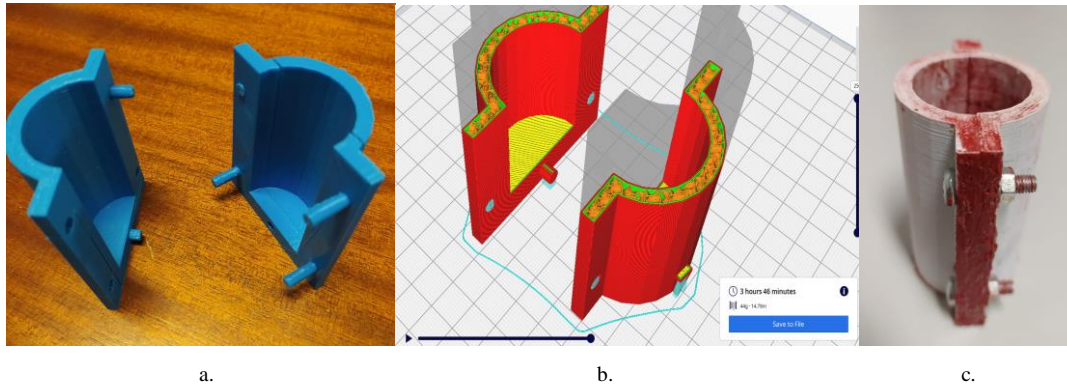
Çalışmada kullanılan silis kumuna geoteknik deneyler uygulanarak zemin özellikleri belirlenmiştir. Elek analizi sonucunda elde edilen sıvılaşma potansiyeline sahip zemine ait gradasyon eğrisi Şekil 1'de verilmiştir [10]. Özgül ağırlığı 2,65 olan zeminin sınıfı kötü derecelendirilmiş kum (SP) niteliğindedir [11]. Maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 14,35 kN/m³ ve 13,56 kN/m³'tür. Kohezyon içeriğini arttırmak amacıyla karışımlara ağırlıkça %5,00 oranında eklenen sodyum bentonit kili ise %640,00 likit limit, %28,00 plastik limit, %48,00 optimum su muhtevası ve 2,69 özgül ağırlık değerine sahiptir.



Şekil 1. Silis kumuna ait gradasyon eğrisi

B. Kalıpların Üretimi

Standart çelik kalıpların su ile temasından kaynaklı paslanma problemi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle zemini dondurmak için kullanılacak kalıpların üretiminde üç boyutlu yazıcı teknolojilerinden yararlanılmıştır. Hammaddede olarak üç boyutlu yazıcılarda sıklıkla tercih edilen, doğal içeriğe sahip ve suya-dona maruz kalması durumunda herhangi bir sıkıntı yaşanmayan PLA (polilaktik asit) filamentleri kullanılmıştır. Üretilen kalıpların tasarımı Sketch Up programında yapılmıştır. Parçaların karşılıklı eşleşeceği çıkıntılar ile ilgili boşluklar bulunan ilk tasarımda kalıbı birleştirme ve donma sonrası ayırmada sorunlar yaşanmıştır (Şekil 2a). İkinci tasarımda ise bağlantı desteği sağlaması amacıyla sadece kalıbın alt tarafında yer alan çıkıntı ve civatalar kullanılarak kalıbın kolay ve düzgün bir şekilde birleşmesi sağlanmıştır. Kalıpların iç bölümünün çapı 3,50 cm ve yüksekliği 7,00 cm olmakla birlikte numune yerleştirilen net hacim 67,35 cm³'tür.



Şekil 2. Numune kalıpları; a. İlk tasarım, b. Modelleme süreci ve c. Sızdırmaz kalıp çıktısı

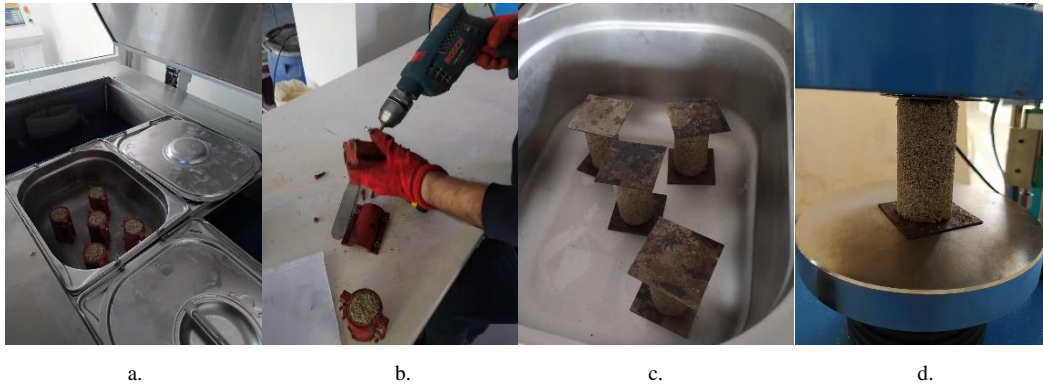
Üç boyutlu yazıcılarda basım ayarları önem arz etmektedir. Basım sürecinde açık kaynak kodlu Cura yazılımı kullanılmıştır. Çıktı kalitesini etkileyen en önemli özellik katman yüksekliğidir. Katman yüksekliği azaldıkça basım kalitesi artmakla birlikte basım süresi de artmaktadır. Önceki basımlarda elde edilen tecrübe doğrultusunda katman yüksekliği 0,20 mm, dolgu oranı %20,00 ve dolgu tipi ise “gyroid” seçilmiştir (Şekil 2b). Basım ayarları yapıldıktan sonra “gcode” formatına çevrilen tasarımlar, üç boyutlu yazıcıya aktarılarak toplam 20 adet kalıp çıktısı başarıyla tamamlanmıştır. Eriyik yığma prensibi (FDM) ile çalışan bu tip yazıcılarda; x ve y koordinatlarında hareket eden başlık ile filamentler gerekli yerlere aktılırken, katmanların oluşmasını sağlayan z eksenindeki hareketi ise tabla yapmaktadır. Çark sistemi sayesinde filament aşağıda yer alan ekstrüde kısma doğru itilmektedir. Bu bölümde filament yüksek sıcaklıklarda eritilerek yazılımda belirlenen koordinatlara katmanlar halinde aktılmaktadır. Kalıp parçaları vida ve civata kullanılarak birleştirilmiş, sıvı conta sayesinde de sızdırmazlık sağlanmıştır (Şekil 2c).

C. Numunelerin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan SPA jeli; su, çimento ve sodyum poliakrilat karışımından oluşmaktadır [2]. 1,00 gram sodyum poliakrilat yaklaşık 125,00 gram su emerek jel forma dönüşmektedir. Dolayısıyla numunelere sodyum poliakrilat miktarının ağırlıkça 125 katı kadar su eklenmiştir. Sodyum poliakrilat jelinin suyu salmaması amacıyla kullanılan kuru kimyasalın %25,00’i kadar eser miktarda çimento eklenmiştir. Silis kumuna %5,00 %10,00, %15,00 ve %20,00 oranlarında SPA jeli eklenerek numuneler kalıplanmıştır. İnce malzeme etkisini incelemek amacıyla genel karışımda %5,00 oranında bentonit içeren numuneler de ayrıca hazırlanmıştır (Tablo 1). Numunelere kalıplarıyla birlikte CDF/CIF donma cihazında 24 saat -20°C’de ön dondurma işlemi uygulanmıştır. Bu süreçte, kalıplar yan ve alt yüzeylerde sargı basıncı oluşturduğu için donmamış numuneler sadece tepe bölgesinde serbest bırakılmış ve tek doğrultulu hacim değişimi sağlanmıştır. Ön dondurma sonunda kalıplar hızla sökülüş ve alt - üst yüzeylerine metal plakalar yerleştirilerek 24 saat daha -20°C’de dondurma işlemine maruz bırakılmıştır (Şekil 3a-b-c). Bu süreçte ise kalıplardan çıkarılan numune yüzeylerindeki olası kısmi çözümlerin tekrar dondurulması, tesviyenin sağlanması ve basınç deneyleri sırasında numunelerle cihaz başlıkları arasındaki direkt temasın önlenmesi hedeflenmiştir. Donmuş numunelerin çözülmesine izin verilmeden oda sıcaklığında 1,00 mm/dk yükleme hızıyla serbest basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 3d).

Tablo 1. Numunelerde kullanılan malzeme miktarları

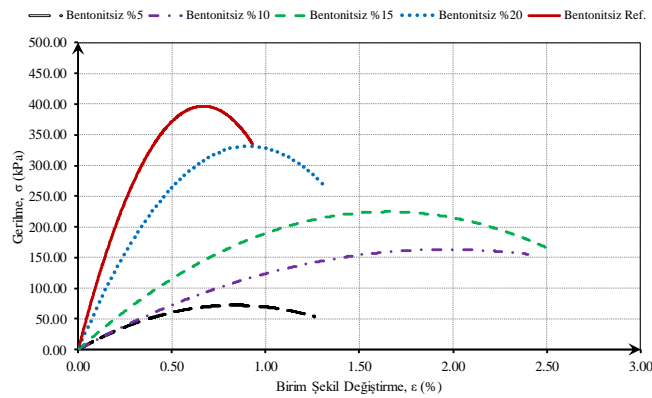
Bileşen	Bentonitsiz				Bentonitli			
	%5,00	%10,00	%15,00	%20,00	%5,00	%10,00	%15,00	%20,00
Sodyum Poliakrilat (gr)	0,04	0,09	0,13	0,19	0,04	0,09	0,13	0,19
Su (gr)	5,00	10,74	16,20	23,47	5,00	10,74	16,20	23,47
Çimento (gr)	0,01	0,02	0,03	0,05	0,01	0,02	0,03	0,05
Jel (gr)	5,05	10,84	16,37	23,71	5,05	10,84	16,37	23,71
Silis kumu (gr)	95,97	97,59	92,74	94,83	91,17	92,71	88,10	90,08
Bentonit (gr)	-	-	-	-	9,85	15,72	21,00	28,45
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,50	1,61	1,62	1,76	1,50	1,61	1,62	1,76



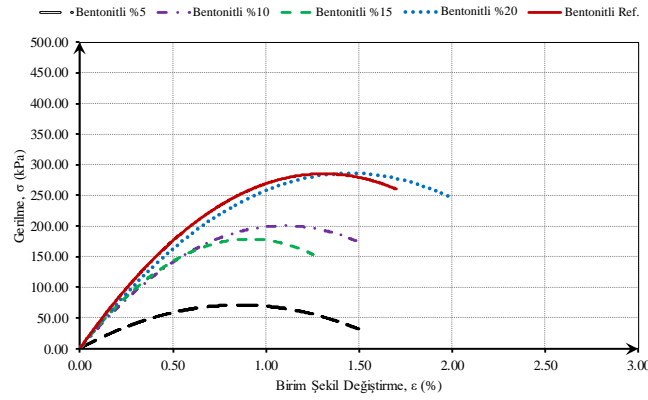
Şekil 3. a. Ön dondurma işlemi, b. Kalıpların sökülmesi, c. İkinci dondurma süreci ve d. Serbest basınç deneyi

III. DENEY SONUÇLARI

Donmuş numuneler üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç deneylerine ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4'te sunulurken, ortalama nihai yük değerleri ve bu değerlere karşılık gelen ortalama birim şekil değiştirme sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Her tip için en az 5 adet numune üretilip deneyler yapılarak eşdeğer eğilim çizgileri oluşturulmuştur. Donma olayı su muhtevası ile doğrudan ilişkili olduğu için kıyaslama yapmak amacıyla katkısız referans numunelerine, jel içeren numunelerdeki en yüksek su içeriği kadar ağırlıkça %20,00 oranında su eklenerek dondurulmuştur. Jel içermeyen diğer su içeriği değerlerinde ise boşluklar yeterince su ile dolmadığı için homojen dağılım ve yeterli donma seviyesi sağlanamamış, öngörülen donmuş numune boyuna ulaşamamıştır. Bu yüzden, referans sonuçları kumlu numunelerdeki %20,00 su içeriğini yansıtmaktadır. Bentonit içeriğinden bağımsız olarak %5,00, %10,00 ve %15,00 oranlarında jel içeren donmuş numunelerin serbest basınç dayanımları referans numunelerine kıyasla azalmaktadır. %20,00 jel oranında ise bentonitsiz durumda referans değerine göre %16,41 gibi bir fark gözlenirken, bentonitli durumda referans değerine ulaşılmaktadır. En yüksek serbest basınç mukavemetine 400,00 kPa civarında bentonitsiz referans numunesinde erişilmiştir. Hem bentonitli hem de bentonitsiz numunelerde SPA jeli miktarındaki artış ile birlikte donmuş serbest basınç mukavemetinde artış görülmektedir. Sadece, %15,00 oranında SPA içeren bentonitli numunelerde genel eğilime oranla kısmi bir azalma meydana gelmiştir. Diğer taraftan, Özbakan [1] tarafından aynı zemin tipi ve SPA katkılarıyla bentonitli donmamış numunelerde yapılan serbest basınç deneyi sonuçları da Tablo 2'de verilmiştir. Yeterli miktarda kohezyon içermemesinden dolayı SPA + silis kumlu donmamış numunelerde serbest basınç deneyleri yapılamamıştır. Dolayısıyla, donmuş tüm numunelerde donmamış numunelere göre 18 kata varan mukavemet artışı elde edilmiştir. Nihai serbest basınç dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirme davranışları açısından tutarlı sonuçlar gözlenmemekle birlikte, bentonitsiz ve bentonitli donmuş numunelerde sırasıyla %10,00 ve %20,00 SPA jel içeriğinde %1,97 ile %1,45 seviyelerinde en yüksek seviyelere ulaşılmıştır.



a.



b.

Şekil 4. Serbest basınç deneyi sonuçları; a. Bentonitsiz numuneler ve b. Bentonitli numuneler

Tablo 1. Serbest basınç deneyinde elde edilen nihai gerilme - birim şekil değiştirme değerleri.

SPA Katkı Oranı (%)	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)			Birim Şekil Değişirme (%)		
	Bentonitsiz	Bentonitli	Bentonitli (Donmamış) [1]	Bentonitsiz	Bentonitli	Bentonitli (Donmamış)[1]
5,00	72,04	71,06	15,69	0,84	0,86	23,15
10,00	163,12	200,51	22,88	1,97	1,10	11,80
15,00	224,50	178,75	23,21	1,65	0,91	22,92
20,00	331,56	285,97	18,63	0,91	1,45	23,08
Referans	396,69	285,34	21,57	0,67	1,31	18,60

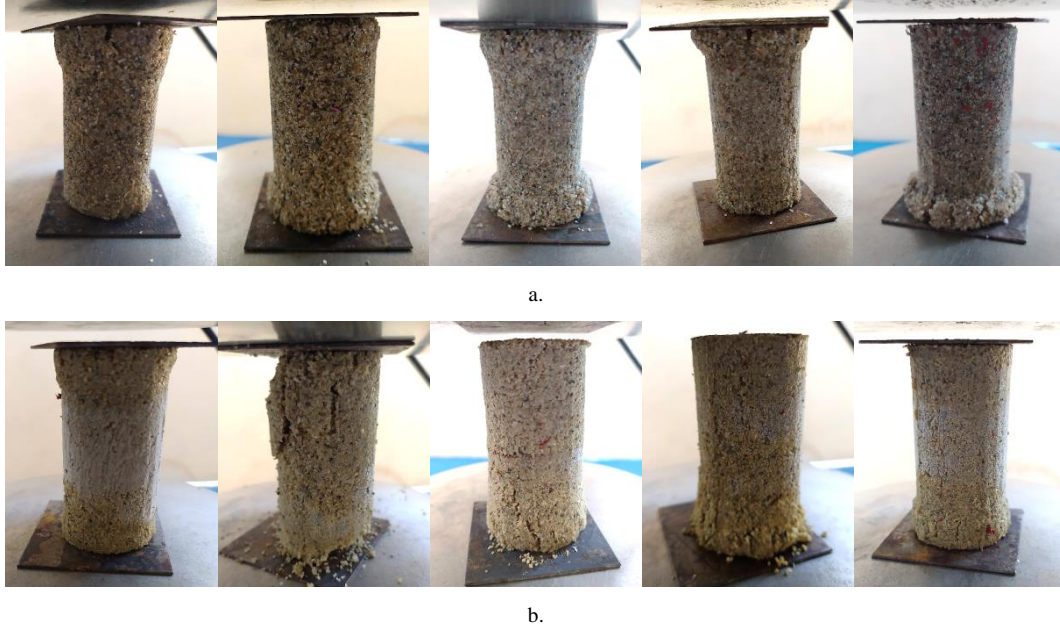
Tüm numunelerde SPA jel içeriğinin artışıyla birlikte doğru orantılı olarak artan su içeriği sebebiyle elastisite modüllerinin arttığı görülmüştür. Bu durum buzun rijit yapısının basınç dayanımını arttırıcı etkisi ile açıklanabilmektedir. Su miktarı arttıkça buz miktarı da artmakta ve serbest basınç dayanımı da artmaktadır. Ancak zemin içerisindeki su miktarındaki artış donma olaylarında gözlenen donma kabarması ve çözülme oturması seviyelerini arttırmaktadır. Bentonitsiz referans numunelerinin kalıp ile 1 gün dondurucu cihazda bekletilmesinin ardından yüzeyde oluşan buz katmanı donma kabarmasını göstermektedir (Şekil 5). Bu durum bentonitli referans numunesi ya da sodyum poliakrilat içeren diğer numunelerde gözlenmemiştir. Ayrıca bu numune tipi diğer numunelere kıyasla çok daha hızlı erimektedir.



Şekil 5. Bentonitsiz referans numunelerinde karşılaşılan donma kabarması problemi

Şekil 6'da tüm numunelerin deney sonu görselleri verilmiştir. Numunelere bentonit eklenmesi ve SPA jel içeriğiyle artan su muhtevası ile birlikte göçme sonrası daha stabil davranış elde edilmiştir. Bentonitsiz numunelerde alt veya üst bölgelerde hızlı dağılma meydana gelirken, bentonitli numunelerde kohezyon artışıyla birlikte 45°'ye yaklaşan çatlaklar oluşmuştur. %20'nin altındaki tüm jel içeriklerindeki su muhtevalarında

boşluklar yeterince su ile dolmadığı için rijit buz davranışı elde edilememekte ve hem serbest basınç dayanımı hem de göçme davranışları açısından katkısız duruma göre olumsuz sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan katkısız donmuş zeminlerde deney sonrası karşılaşılan hızlı erime davranışı [1], jel katkılı numunelerde gözlenmemiştir.



Şekil 6. Sırasıyla; referans, %5,00, %10,00, %15,00 ve %20,00 SPA jeli içeren numunelerin serbest basınç deneyi sonrası göçme modları, a. Bentonitsiz numuneler ve b. Bentonitli numuneler

IV. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, yeni bir zemin iyileştirme yöntemi olarak anılan sodyum poliakrilat (SPA) jelinin sıvılaştırılabilir kumlu zemine eklenmesi durumunda donma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Referans numunelerine ek olarak hem bentonitsiz hem de %5,00 oranında bentonit katkılı zemin numunelerine, %5,00 ile %20,00 arasında SPA jeli eklenerek numuneler dondurulmuş ve sonrasında serbest basınç deneylerine tabii tutulmuştur.

- Bentonit içermeyen kötü derecelenmiş donmamış kumda serbest basınç deneyi yapılamazken, donmuş referans numunelerinin serbest basınç dayanımları yaklaşık 400,00 kPa seviyesine ulaşmaktadır. Donmamış bentonitli numunelerde SPA içeriğine bağlı olarak 15,69 kPa ile 23,21 kPa arasında değişen değerler gözlenirken, donmuş numunelerde ise 285,00 kPa mertebelerine ulaşılmıştır.
- Jel içeriği ile artan su muhtevası ile birlikte buz oranı da artmakta ve geneli itibariyle serbest basınç dayanımı artarken, bentonitsiz numunelerde birim şekil değiştirme değerleri artmakta, diğerlerinde azalmaktadır. Benzer şekilde zemine %5,00 bentonit eklenmesi durumunda serbest basınç dayanımı ortalama %14,00 oranında düşmektedir.
- SPA jeli içeren kumlu zeminin dona maruz kalması durumunda, çalışmada kullanılan zeminde tamamen doygunluğu sağlayan %20,00 su içeriğinde katkısız donmuş numunelere kıyasla %16,41 oranında kısmi bir azalma gözlenirken, aynı su muhtevasındaki bentonitli numunelerde referans dayanımına ulaşılmaktadır. Diğer tüm katkı oranlarında taşıma kapasitesinin ciddi seviyede azaldığı görülmüştür. Bu yüzden, söz konusu kimyasal iyileştirmenin yüzeye yakın ve kısmen doygun kumlu zeminlerde kullanılması durumunda donma sürecindeki taşıma kapasitesi kayıplarının göz önünde bulundurulması gerekmektedir.
- Sonuçta, SPA ve bentonit içeriğinden bağımsız olarak donmuş tüm numunelerde ciddi seviyede rijit yapı elde edilmiştir. Dolayısıyla sıvılaştırılabilir kumlu zemin içerisine sodyum poliakrilat enjeksiyonu ile iyileştirme yapıldığı takdirde gerek doğal donma sürecinde gerekse yapay zemin dondurma uygulamalarında serbest basınç dayanımı açısından olumsuz bir etki ile karşılaşılmamaktadır. Aynı su

muhtevasına sahip SPA katkılı ve katkısız numunelerde yakın sonuçlar gözlemlendiği için SPA oranından ziyade su içeriğinin baskın parametre olduğu belirtilebilir. Diğer taraftan, SPA ile iyileştirilmiş yüksek sıvılaştırma potansiyeline sahip kötü derecelenmiş kumda donma kabarması ve çözülme oturması problemleri engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından kabul edilen 219M397 numaralı 1001 projesi ve ilgili projedeki 2247-C STAR programı kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Özbakan, N. (2021). *Sodyum poliakrilat ve geçirimsiz tabaka uygulamalarının zemin sıvılaştırma potansiyeline etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [2] Güler, Ö. F., Özbakan, N., & Evirgen, B. (2021). Aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için sodyum poliakrilat uygulamalarının değerlendirilmesi. *6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 13-15 Ekim, Kocaeli.
- [3] Evirgen, B., Onur, M. I., Tuncan, M., & Tuncan, A. (2014). Determination of the freezing effect on unconfined compression strength and permeability of saturated granular soils. *Fourth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment*, 19-21 November, Brisbane, 300-304.
- [4] Zhao, X., Zhou, G., & Wang, J. (2013). Deformation and strength behaviors of frozen clay with thermal gradient under uniaxial compression. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 550-558.
- [5] Zhang, Z., Zhang, H., Zhang, J., & Chai, M. (2019). Effectiveness of Ionic Polymer Soil Stabilizers on Warm Frozen Soil. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 23, 2867-2876.
- [6] Li, F., Su, L., Wan, H., Niu, F., & Ling, X. (2021). Experimental investigation on dynamic characteristics of sandy gravel infrozen region. *Cold Regions Science and Technology*, 185,103251.
- [7] Keskin, S. N., Sungur, A., Akan, R., & Uzundurukan, S. (2017). İnce daneli zeminlerde katkı maddelerinin ve donma-çözülme çevriminin serbest basınç dayanımına etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5, 473-478.
- [8] Yu, W., Lai, Y., Zhang, X., Zhang, S., & Xiao, J. (2004). Laboratory investigation on cooling effect of coarse rock layer and fine rock layer in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*,38, 31-42.
- [9] Thornley, J. D., & Moran, N. (2017). Estimating liquefaction potential of thawing permafrost soils, an evaluation of frozen and recently thawed soils. *Congress on Technical Advancement 2017: Cold Regions Engineering*, 141-150.
- [10] TS 1900-1. (2006). İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Bakanlıklar, Ankara.
- [11] ASTM D2487-17e1. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), West Conshohocken, USA.