

DÜŞÜK BASINÇLI KÜKÜRT ENJEKSİYONUNUN SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİNE ETKİSİ

Murat KARADENİZ^{1*}, Onur ÖZTÜRK², Zuhal Elif KARA¹, Mücahit OPAN²

¹Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli.

²Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.

Öz

Fosil yakıtların kullanımındaki artış ile birlikte petrol endüstrisinin yan ürünü olarak elde edilen kükürt miktarları da dünya çapında artış göstermiştir. Artan rezervler sonucu alternatif kullanım alanı olarak inşaat teknolojisinde kullanılan kükürtün, geoteknik uygulamalar içerisinde de geleneksel Portland çimentosu kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerine alternatif olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, geleneksel yöntemlerde bağlayıcı olarak kullanılan su-çimento karışımının yerine petrol endüstrisinden elde edilen kükürt, zemin enjeksiyonu yöntemi ile uygulanmıştır. Oda sıcaklığında katı halde olan kükürt, rölatif sıklıkları %25, %50, %75 ve %100 olarak hazırlanmış uniform kum (SP) sınıfı zemin numunelerine 130-135°C’de sıvı faza getirilerek düşük basınçlı kükürt enjeksiyonu şeklinde uygulanmıştır. Numuneler bu çalışma için özel olarak tasarlanan deney düzeneği kullanılarak sıcaklık ve basınç kontrollü olarak hazırlanmıştır. Enjeksiyon uygulanmış numuneler 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemeti deneylerine tabi tutulmuş ve rölatif sıklık, kür süresi ile enjeksiyon basıncı değişimlerinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımı 7 günlük numunede 20.16 MPa olarak elde edilmiş ve 1 saat sonunda bu değer yaklaşık %85’ine ulaşabildiği belirlenmiştir. Hızlı priz alma ve yüksek dayanım değerleri ile saf kükürtün zemin enjeksiyonunda çimento harçlarına alternatif olarak kullanılabileceği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Zemin enjeksiyonu, Kükürt, Serbest basınç mukavemeti, Rölatif sıklık

Sorumlu Yazar: Murat KARADENİZ, karadenizmurat61@gmail.com



EFFECT of LOW PRESSURE SULFUR INJECTION on UNCONFINED COMPRESIVE STRENGTH

Abstract

With the increase in the use of fossil fuels, the amount of sulfur obtained as a by-product of the petroleum industry has also increased worldwide. This study was carried out to examine the usability of sulfur, which is used in construction technology as an alternative area of use as a result of increasing reserves, as an alternative to soil improvement methods using traditional Portland cement in geotechnical applications. In this study, sulfur obtained from the petroleum industry was applied by the ground injection method instead of the water-cement mixture used as a binder in traditional methods. Sulfur, which is solid at room temperature, was brought to the liquid phase at 130-135°C and applied in the form of a low-pressure sulfur injection to uniform sand (SP) class soil samples prepared with the relative density of 25%, 50%, 75%, and 100%. The samples were prepared under temperature and pressure control using the experimental setup specially designed for this study. Injected samples were subjected to unconfined compressive strength tests at the end of 1, 7, and 28-day curing periods. The effects of relative density, curing time, and injection pressure changes on unconfined compressive strength were investigated. The highest unconfined compressive strength was obtained as 20.16 MPa in the 7-day sample and it was determined that it could reach 85% of this value after 1 hour. It was seen that pure sulfur could be used as an alternative to cement mortars in soil grouting with its fast setting and high strength values.

Keywords: Soil grouting, Sulfur, Unconfined Compressive Strength, Relative density

1. GİRİŞ

Dünya enerji ihtiyacı tüm kaynaklar içerisinde %86 gibi oldukça yüksek bir oranla petrol, doğal gaz ve kömür kaynaklarından temin edilmektedir. Petrol dünyada birincil enerji tüketimi içerisinde en büyük paya sahip kaynaktır [1]. Enerji kaynağı olan petrol, ham olarak temin edilmektedir ve farklı prosesler kullanılarak son ürün haline getirilip kullanıcıya ulaştırılmaktadır. Ham petrolün yapısında büyük oranda organik kükürt bileşikleri bulunmaktadır [2]. Ham petrolden kükürtün uzaklaştırılması bazı çevre koruma kanunları aracılığıyla zorunlu ve denetimli hale getirilmiştir. Günümüzde teknolojik gelişmeler ve çevre koruma kanunlarındaki iyileştirmeler ham petrolün

içerdiği kükürt yüzdelerinin oldukça küçük miktarlarla sınırlandırılmasına ve açığa çıkan kükürt miktarlarının yoğun bir şekilde artmasına neden olmuştur [3]. Dünya kükürt üretiminin 1992 ve 1997 yılları arasında sadece %24'ünün petrol endüstrisinden elde edilmiştir. Bu kükürt miktarı 2012 yılı itibariyle toplam üretimin %97'sine ulaşmıştır. Petrol endüstrisi, dünya enerji tüketimi içinde en büyük paya sahip olması nedeniyle enerji ihtiyacındaki artış ile bu rakamda da her geçen yıl hızlı bir artış olacağı bilinmektedir [4-5].

Petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edilen kükürt miktarlarında büyük artışların olması sonucunda petrol şirketleri desteğiyle kükürtün alternatif kullanım alanlarının oluşturulması konusunda araştırmalar yoğunlaştırılmıştır [2]. Kükürt, sahip olduğu fiziko-kimyasal yapısı ve üstün mekanik özellikleri sayesinde inşaat sektöründe alternatif yapı malzemesi olarak ilk olarak 1921 yılında kullanılmıştır. Bağlayıcısı geleneksel Portland çimentosu olan betonlara alternatif olarak yapmış oldukları %60 kum ve %40 sıvı faza getirilmiş kükürt karışımından asit direnci ve dayanımı yüksek olan bir malzeme elde etmişlerdir [6].

Bağlayıcısı kükürt olan betonların yüksek dayanımı [7-9], yüksek korozyon direnci [10-12], su geçirimsizlikleri [13], hızlı dayanım kazanma [7-8, 14] ve kısa priz süreleri [14-15], araştırmacıların bu konuya olan ilgilerini arttırmıştır. Kükürt ay yüzeyinde serbest element olarak bulunması nedeniyle ayda yapılacak olan inşaat uygulamalarında kullanılması düşünülen yapı malzemelerinin başında yer almaktadır [16-18]. Ayrıca kükürtün hızlı priz alma özelliği göz önünde bulundurularak son yıllarda yoğun olarak kullanılan 3D printer teknolojisinde kullanılabilirliği üzerine de alternatif araştırmalar yapılmıştır [19].

İnşaat teknolojileri içerisinde kendisine birçok alternatif kullanım alanı bulan kükürt, geoteknik uygulama alanları içerisinde kendisine çok kullanım alanı bulamadığı görülmektedir. Yapılan literatür araştırmalarında zemin iyileştirme teknikleri açısından 2014 yılında gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmada zemin stabilizasyonunda kükürtün kullanılabilirliğinin araştırıldığı görülmüştür. Mohammadi ve diğ. yaptıkları çalışmada kumlu zeminlerin stabilizasyonunu arttırmak için katkı malzemesi olarak modifiye kükürt kullanmışlardır. Zeminin geoteknik özelliklerini yapılan kesme kutusu deneyi ve serbest basınç deneyleri ile araştırmışlardır. Zemine katılan kükürt miktarı ve numunelerin kür süresine bağlı olarak zeminin mekanik özelliklerinin doğrusal olarak arttığını göstermişlerdir. Elde edilen bulgularda modifiye edilmiş kükürtün zemine

katılarak zeminin fiziksel özellikleri üzerinde önemli etkisi olduğunu belirlemişlerdir [20]. Zemin enjeksiyonu yöntemi de zemin iyileştirme yöntemlerinden stabilizasyon kadar yaygın olarak kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem ile kayaların çatlaklarını veya kum, çakıl gibi granüler zeminlerin boşluklarını doldurarak zemin daha yoğun ve sıkı hale getirilmesi amaçlanmaktadır [21]. Bu çalışmada kullanılan yöntem olan permeasyon enjeksiyonu düşük viskoziteye sahip harcın zemin danelerinin arasındaki boşluklara zemin yapısını bozmayacak düşük basınç ile enjekte edilmesidir. Permeasyon enjeksiyonunda, daneler yer değiştirmeden veya boşluk hacmi değişmeden harç zemine enjekte edilir. Enjeksiyon sırasında zeminin boşluklarındaki su, zemin yapısını bozmadan, enjeksiyon harcı ile yer değiştirir. Bu tip enjeksiyonun ana amacı gevşek zemin içerisindeki boşlukları harç ile doldurup zeminin mukavemetini ve geçirimsizliğini arttırmaktır [22-23]. Zemin enjeksiyonunda en çok tercih edilen harç malzemesi Portland çimentosudur. Dünyadaki toplam karbondioksit (CO₂) emisyonunun %5'inden fazlası çimento üretim sürecinde meydana gelmektedir ve çimento yerine petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edilen kükürtün kullanılmasının çimento üretim miktarlarının ve çevresel etkilerinin azalmasına neden olacağı açıkça görülmektedir [24]. Kükürtün priz süresinin çimento harçlarına göre daha kısa olması, erimiş saf kükürtün viskozitesinin çimento harcına göre daha düşük olması dolayısıyla enjeksiyon kolaylığı sağlanması ve su muhtevası yüksek zeminlerde çimento harçlarının dayanım kazanmalarının kükürte göre daha zor olması, yani kükürtün dayanım kazanma mekanizmasının sudan daha az etkilenmesinin sonucu olarak zemin enjeksiyonunda çimento harcı yerine kükürt kullanılması, saha uygulamalarında büyük avantaj sağlayacağı açıkça görülmektedir [8, 14].

Bu çalışmanın amacı, artan rezerv miktarları göz önünde bulundurulduğunda kükürtün yapı malzemesi olarak kullanılmasının yanında zemin iyileştirme uygulamalarında alternatif kullanım alanı oluşturulması ve bu uygulamalarda kullanılan çimento yerini alarak CO₂ emisyonu miktarının azaltılmasıdır. Deneysel çalışmada zemin iyileştirme yöntemi olarak permeasyon enjeksiyonu yöntemi seçilmesinin en önemli nedeni literatürde bu alanda yapılmış olan çalışmaların oldukça yetersiz olmasıdır. Bu çalışmada geleneksel enjeksiyon yönteminde bağlayıcı olan su-çimento karışımının yerine saf kükürt kullanılmıştır. Bu amaçla ilk olarak laboratuvar ortamında saf kükürtü numunelere enjekte etmek için deney düzeneği kurulmuştur. Daha sonra



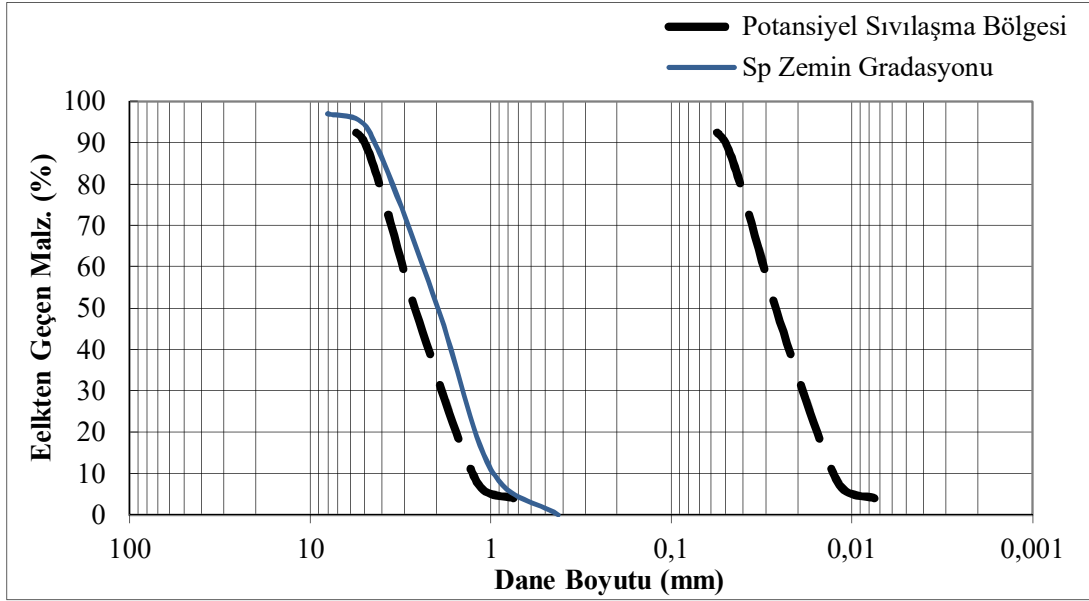
%25, %50, %75 ve %100 rölâtif sıklıkta hazırlanmış numunelere kükürt enjekte edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyi sonucunda numunelerin serbest basınç mukavemeti, birim deformasyonları ve elastisite modüllerindeki değişimler incelenerek kükürtün enjeksiyon yönteminde kullanımının uygulugu araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Bu deneysel çalışmada saf kükürtün zemin enjeksiyonunda kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada rölâtif sıklık, kür süresi ve enjeksiyon basıncı değişken parametre olarak kullanılmış ve bu parametreler göz önünde bulundurularak numuneler hazırlanmıştır.

2.1 Zemin Numunesinin Özellikleri

Laboratuvarda yapılacak olan enjeksiyon uygulamaları için numuneler hazırlanırken Japonya İnşaat Mühendisleri Odası (JSCE) ve Ishihara ve diğ. tarafından önerilen sıvılaşma riski bulunan ve literatürde kabul görmüş dane dağılım sınırlarında kalan ve Şekil 1’de verilmiş olan zemin kullanılmıştır [25-26]. Şekilde verilmiş olan sınırların kullanılmasının nedeni sıvılaşma riskinin azaltılması değil bilinen standart dane dağılımına sahip zeminler üzerinde enjeksiyon uygulanmasının gerçekleştirilmesidir.



Şekil 1. Numunelerde Kullanılan Zeminin Gradasyonu

Numuneler %25, %50, %75 ve %100 rölatif sıklıkta hazırlanmıştır. Kullanılan zemin numunesinin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Elde edilen zemin birleştirilmiş zemin sınıfına göre kötü derecelendirilmiş kum (SP) sınıfına girmektedir.

Tablo 1. SP Sınıfı Zeminin Özellikleri

Numune	γ_{mak} (kN/m ³)	γ_{min} (kN/m ³)	e_{max}	e_{min}	G_s	c_u	c_c	D ₁₀ mm	D ₃₀ mm	D ₆₀ mm
SP	17.3	15.5	0.69	0.53	2.63	2.69	1.02	1.10	1.85	3.0

2.2 Kükürtün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

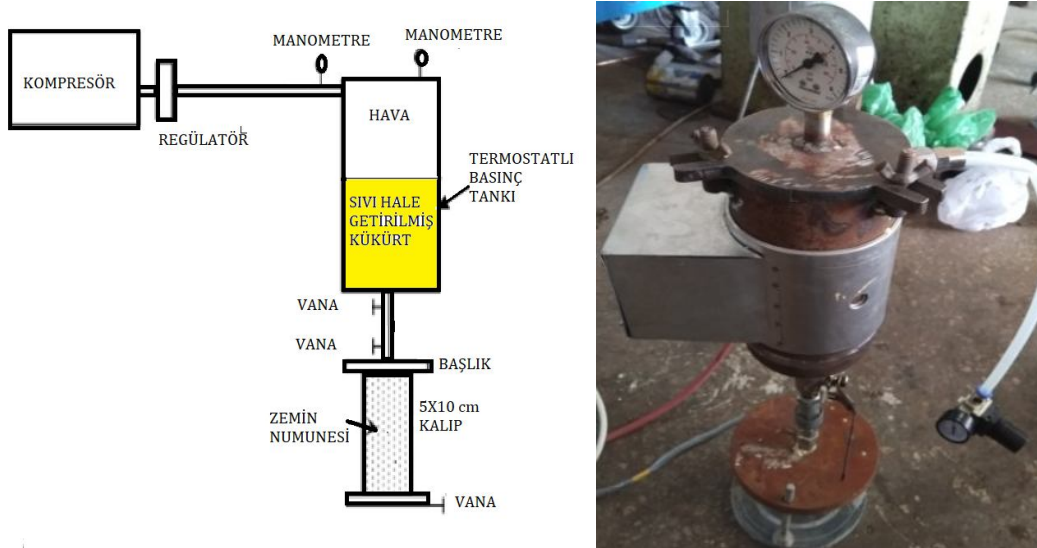
Bu çalışmada Tüpraş-İzmit rafinerisinden elde edilen, petrol işleme sonucunda açığa çıkan saf kükürt kullanılmıştır. Rafineriden temin edilen kükürtün saflık oranı %99.8’dir. Üretici firmadan temin edilen kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kükürtün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

	Birim	Değer	Test Methodu
Görünüm	-	Katı Parçaçıklı	Gözle Muayene
Safılık	Wt%	99.8	TS2839
Koku	-	Kokusuz(Saf Kükürt)	-
Erime Noktası/ Donma Noktası	°C	119	ASTM D 97
Kaynama Noktası	°C	445	ASTM D 86
Bağıl Yoğunluk (15 C°)	Kg/L	2.1	ASTM D 1298
Alev Alma Sıcaklığı	°C	206	ASTM D 93

2.3 Deney Düzenegi

Kükürtün zemine enjekte edilebilmesi için Şekil 2’de verilen deney düzenegi tasarlanmıştır.

**Şekil 2.** Laboratuvarda Kurulan Deney Düzenegi

Düzenekte sabit basınç uygulanması için kompresör kullanılmıştır. Basınç tankı 2 lt hacminde 4 mm kalınlığında olup 8 MPa sabit basınçla test edilmiştir. Enjeksiyon sırasında istenilen basıncı ayarlamak için tankın girişinde regülatör kullanılmıştır. Basınç tankının üst kısmında bulunan kapağının içinde ısıya dayanıklı teflon conta kullanılmıştır. Tankın içindeki basıncı ölçmek için tankın kapağına manometre yerleştirilmiştir. Tankı ısıtmak ve içine konulan kükürtün sıvı hale gelmesi için tankın etrafına kelepçe rezistans takılmıştır. Kükürt termoplastik bir malzeme olduğundan sıcaklığın sabit kalması için termostat takılmıştır. Basınç tankının alt kısmında ısıya ve basınca dayanıklı çıkış vanası bulunmaktadır. Basınç tankı ile kalıp arasında basınca dayanıklı

hidrolik çelik boru yardımıyla bağlantı sağlanmıştır. Kalıp ile başlıklar arasında sızdırmazlık sağlanması amacıyla conta kullanılmıştır.

2.4 Numunelerin Hazırlanması

Laboratuvarda deney numuneleri hazırlanırken çapı 5cm ve yüksekliği 10 cm olan çelik kalıplar kullanılmıştır. Zemin kalıplara %25, %50, %75 ve %100 gibi farklı rölatif sıklıkta yerleştirilmiştir. Rölatif sıklıkların hesaplanmasında Denklem (1) kullanılmıştır. Denklem (1), numunenin maksimum ve minimum birim hacim ağırlıkları, kalıbın hacmi ve istenilen rölatif sıklıklar bilindiği için Denklem (2) şeklinde düzenlenmiştir. Zeminin ağırlığı Denklem (2) kullanılarak belirlenmiş olup kalıplara uygun şekilde yerleştirilmiştir.

$$D_r = \frac{\gamma - \gamma_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \times \frac{\gamma_{max}}{\gamma} \quad (1)$$

$$W = \frac{V \cdot \gamma_{d \max} \cdot \gamma_{d \min}}{\gamma_{d \max} - D_r \cdot (\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min})} \quad (2)$$

Burada; D_r rölatif sıklık, $\gamma_{d \max}$ maksimum kuru birim hacim ağırlık (BHA), $\gamma_{d \min}$ minimum kuru BHA, V kalıbın hacmi ve W ise kalıba koyulacak zeminin ağırlığını göstermektedir.

Kükürt oda sıcaklığında katı fazda olduğu için bağlayıcılık özelliği kazanması ve işlenebilir olması için $130 \pm 5^\circ\text{C}$ kadar ısıtılıp sıvı hale getirilmiştir. Kükürtün kristalize olmasında ani sıcaklık değişimlerinin önemli bir etken olmasından dolayı deneylerde kullanılan kalıplar ve ekipmanlar deneyden 2 saat önce $130 \pm 5^\circ\text{C}$ 'deki etüv içinde 2 saat süre ile ön ısıtmaya tabi tutulmuşlardır. Oda sıcaklığında kalıp kullanılması sonucunda kükürtün ani soğuması ile numunelerde soğuk derz olmasının engellenmesi amacıyla bu işlem her numune hazırlığında tekrarlanmıştır [13]. Zemin numunesi ısıtılmış olan kalıpların içine seçilmiş olan farklı rölatif sıklıklarda yerleştirilerek, kükürt enjeksiyonun yapılması için hazırlanmış olan deney düzeneğine sabitlenmiştir. Daha sonra sıvı faza getirilen ve deney düzeneğinde sabit sıcaklık değerinde tutulan kükürt kalıp içindeki zemin numunesine enjekte edilmesi için deney düzeneğinde bulunan tanka koyulup sabit basınç altında kompresör yardımıyla zemine enjekte edilmiştir. Kükürt çimento gibi daneli yapıda olmadığından dolayı kükürt enjeksiyonunda herhangi bir sorun yaşanmamıştır. Kükürt enjekte

edilmiş numuneler kalıplardan zemine hasar vermeden çıkarılması amacıyla hidrolik kriko yardımıyla çıkarılmıştır. Hazırlanan numunelere ait görüntü Şekil 3'te gösterildiği gibidir. Serbest basınç deneyinden önce tüm numunelere, yerel gerilme yığılmalarının önlenmesi amacıyla kükürt başlık yapılmıştır.



Şekil 3. Kükürt Enjekte Edilmiş Zemin Numunesi

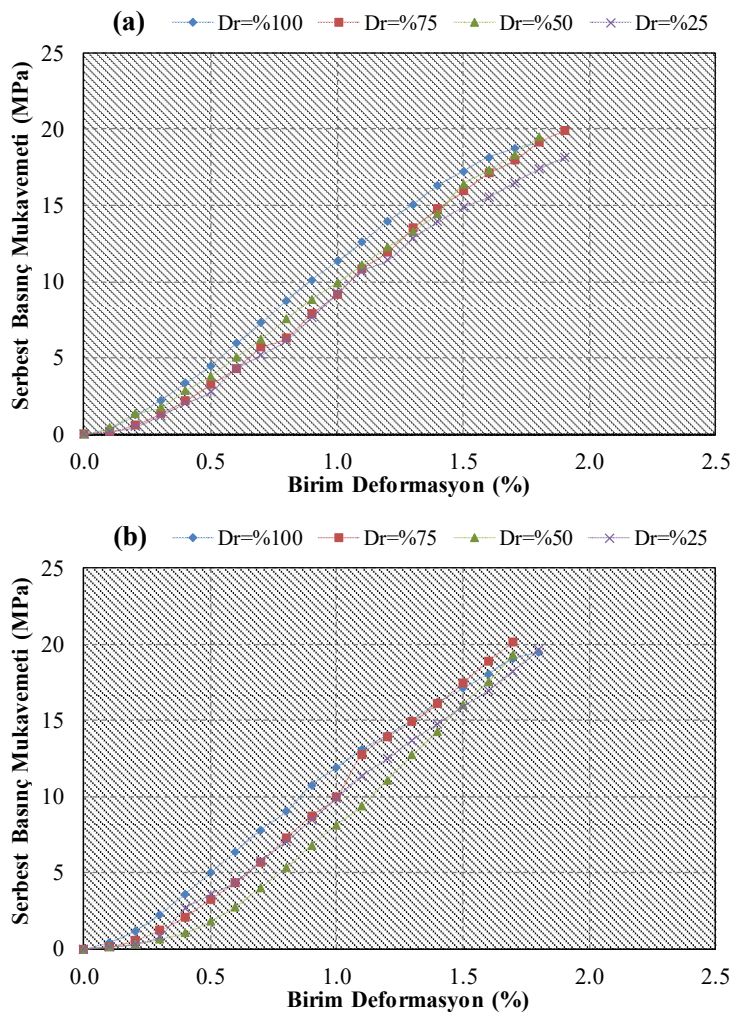
3. BULGULAR

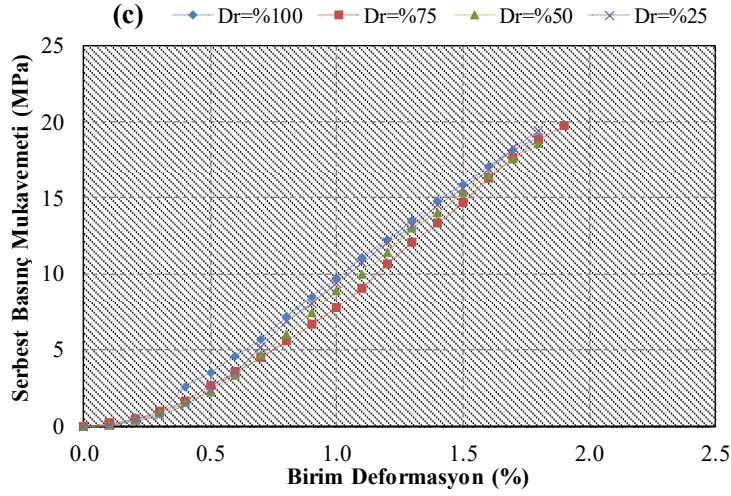
Deneyisel çalışmada bütün rölatif sıklık durumları için 200 kPa sabit basınç altında 9'ar adet numune olmak üzere toplam 36 adet zemin numunesi hazırlanmıştır. Çalışmada kalıplardan çıkarılan numuneler 1, 7 ve 28 gün oda sıcaklığında kürlendikten sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç mukavemeti olarak 3 numuneden elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Serbest basınç deneyi 0.5 mm/dk hızla yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Kükürt Enjekte Edilmiş Numunelerin Ortalama Serbest Basınç Mukavemetleri

D _r (%)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)		
	1 Gün	7 Gün	28 Gün
100	19.12	19.46	18.94
75	19.91	20.16	19.72
50	19.04	19.31	18.57
25	19.43	19.61	19.37

Çimento harcı kullanılarak yapılan enjeksiyon uygulamalarının yer aldığı deneysel çalışmalar incelendiğinde, çimento priz süresi göz önünde bulundurularak en erken 7 günlük deney sonuçları alınabilirken kükürtün ilk 1 gün içinde 28 günlük basınç değerine yaklaşık bir değere ulaşabilmesi nedeniyle bu deneysel çalışmada 1 günlük deneysel sonuçlara da yer verilebilmiştir. Farklı rölatif sıklık değerlerine sahip numunelerin 1, 7 ve 28 gün kür süresi sonunda gerçekleştirilen serbest basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramları Şekil 4'te verilmiştir.





Şekil 4. Farklı Rölatif Sıkılıktaki Numunelerin Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri (a) 1, (b) 7 ve (c) 28 gün

Deney sonucunda tüm numunelere ait serbest basınç mukavemetlerinin 18.57 ile 20.16 MPa aralığında oldukça yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımı %75 rölatif sıklıkta hazırlanan 7 günlük numunede 20.16 MPa olarak elde edilmiştir. Göçmenin gevrek olması nedeniyle kırılma maksimum gerilme değerinde ani gerçekleşmiş ve daha sonra okuma alınamamıştır. Yıldız ve Soğancı tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada, granüler pomza içeren zeminlerde gerçekleştirilen deneysel çalışmada çimento harcı enjekte edilmesi sonucunda %85 rölatif sıklıktaki zemin numunesine ait 28 günlük ortalama serbest basınç dayımı değeri 8.14 MPa olarak bulunmuştur [27]. Mutman tarafından 2007 yılında uniform kum (SP) zeminlerde çimento enjeksiyonu etkisinin araştırıldığı deneysel çalışmada, çimento harcı enjeksiyonu sonucunda %75 rölatif sıklıktaki zemin numunesine ait 28 günlük ortalama serbest basınç dayımı değeri ise 7.53 MPa olarak bulunduğu görülmüştür [28]. Bu deneysel çalışmada benzer şartlar altında, kükürt enjekte edilen %75 rölatif sıklıktaki zemin numunesine ait 28 günlük ortalama serbest basınç dayımı değeri 20.16 MPa olarak belirlenmiştir. Saf kükürt enjeksiyonu sonucunda uniform kum zeminlerde çimento enjeksiyonundan elde edilen serbest basınç değerine göre yaklaşık olarak 2.7 kat artış elde edildiği belirlenmiştir.

1, 7 ve 28 günlük numunelerde göçmenin gevrek kırılma sonucunda olduğu deneyler sırasında gözlemlenmiştir. Numunelerin hepsinde gözlenen genel kırılma paternine ait görüntü Şekil 5'te

verilmiştir. Enjeksiyon uygulanan numunelerde birim deformasyon %1.7-1.9 aralığında gerçekleşmiştir. Numuneler gevrekleştikçe birim deformasyon azalmıştır.



Şekil 5. Serbest Basınç Deneyi Zemin Numunesi Kırılma Paterni

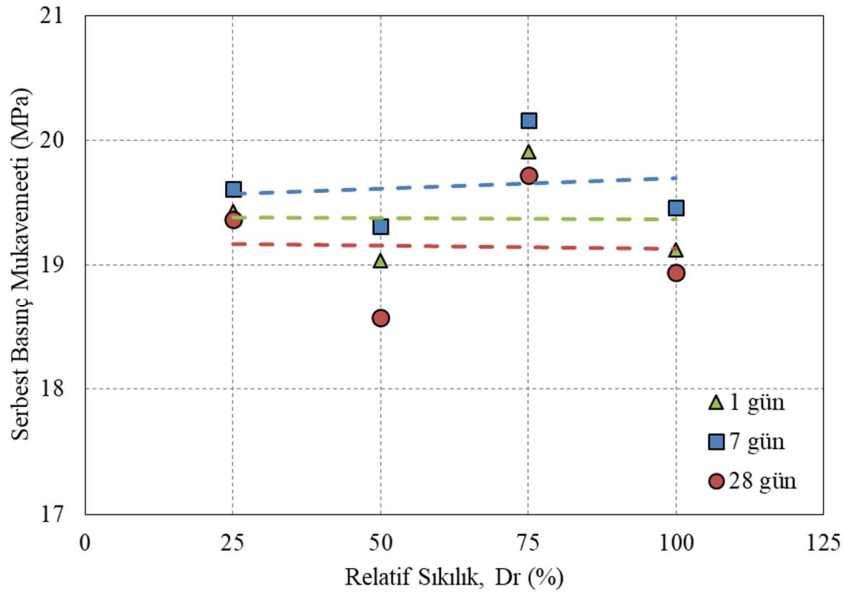
Numunelerin serbest basınç mukavemetleri ve gerilme şekil değiştirme eğrileri kullanılarak elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Numunelerin elastisite modülü (E) hesaplanırken serbest basınç mukavemetinin %50 değerine kadar olan gerilme-şekil değiştirme grafiği kullanılmıştır. Kükürt enjekte edilerek hazırlanmış numunelerde elastisite modülü değerleri 853-1193 MPa aralığında hesaplanmıştır. En yüksek değer %100 rölatif sıklıkta hazırlanan ve 7 gün kür edilen numunede 1193 MPa olduğu belirlenmiştir. En düşük değer ise %50 rölatif sıklıkta hazırlanan ve 7 gün bekletilen numunede 853 MPa olduğu görülmüştür. Tablo 4'te hesaplanmış olan tüm elastisite modülü değerleri özetlenmiştir.

Tablo 4. Kükürt Enjekte Edilmiş Numunelerin Elastisite Modülü Değeri

D _r (%)	Elastisite Modülü (MPa)		
	1 Gün	7 Gün	28 Gün
100	1075	1193	967
75	995	996	885
50	987	886	853
25	917	989	939

3.1. Rölatif Sıklığın Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi

Farklı kür sürelerinde rölatif sıklık-serbest basınç mukavemeti değişimine ait grafik Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Serbest Basınç Mukavemeti-Rölatif Sıklık İlişkisi

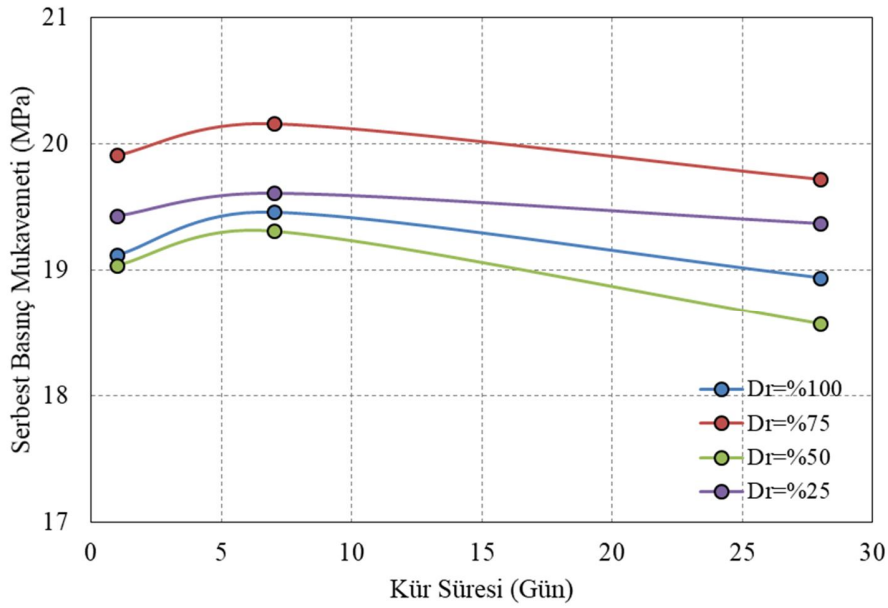
En düşük serbest basınç mukavemetleri %50 rölatif sıklık değerinde elde edilirken, en yüksek mukavemet değerlerine %75 rölatif sıklık değerinde ulaşıldığı belirlenmiştir. Farklı yaşlardaki zemin numunelerinde gerilme-rölatif sıklık ilişkisinin çok farklılık göstermeden birbirine yakın bir davranış sergilediği görülmektedir. Farklı rölatif sıklıktaki numunelerde kükürt miktarları değişmektedir. Numunelerin rölatif sıklığı azaldıkça numunelerdeki kükürt miktarı artmaktadır. Düşük miktarlarda (%2.5-%10) kükürt kullanılan numunelerde kükürt miktarı ile serbest basınç mukavemeti artmaktadır [20]. Ancak numune içerisine giren kükürt miktarının yüksek oranlarda (%30-%50) olması durumunda numunelerin serbest basınç mukavemetinde optimum değerden sonra azalma meydana gelmektedir [13-29]. Bu çalışmada numunelerin hazırlanmasında ağırlıkça %35-%44 aralığında kükürt kullanılmasından dolayı rölatif sıklık değerinin değişmesi ile yani numune içine giren kükürt miktarının artması ile serbest basınç mukavemeti üzerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmüş olup, sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Çimentonun daneli yapıda olması nedeniyle enjeksiyon yapılacak zemin yapısının sıklığından oldukça etkilenmektedir, ancak kükürt eritilerek kullanıldığı için daha düşük viskoziteli olması nedeniyle zeminin sıklığından daha bağımsız bir işlenebilirlik sergilemektedir. Bu nedenle kükürt enjekte edilen uniform kumlu zemin numunelerinde serbest basınç mukavemetinin, rölatif sıklık değerinin değişimden önemli ölçüde etkilenmediği belirlenmiştir.

3.2 Kür süresinin Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi

Farklı rölatif sıklık değerlerine sahip numunelerin-kür süresine bağlı olarak serbest basınç mukavemeti değişimi Şekil 7’de verilmiştir.

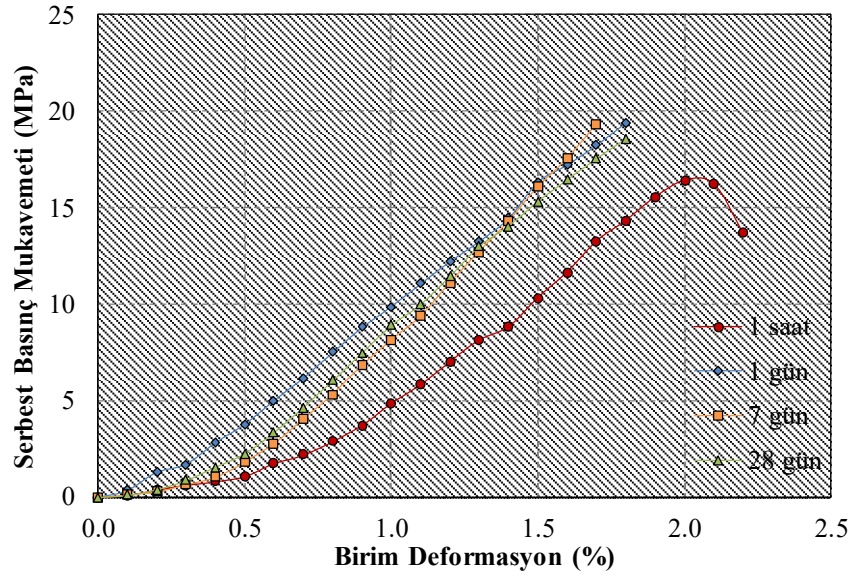
Kükürt enjekte edilmiş numunelerin nihai dayanıma 1 günde ulaştıkları görülmüştür. Numuneler 7 günde en yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerine ulaşmıştır. 28 gün bekletilen numunelerde ise 7 günlük mukavemet değerlerinden yaklaşık olarak %1-4 gibi dayanım kaybı olduğu görülmektedir. Saf kükürt soğumaya ile birlikte, sıvı fazdan ilk olarak 114°C’de %7 hacim azalması göstererek monoklinik kristali formunu almaktadır. Soğuma devam ettiğinde sıcaklık 95.4°C’nin altına indiğinde monoklinik kristaller ortorombik kristal formuna dönüşür ve bu form kükürtün oda sıcaklığında sabit formda bulunduğu kristal yapısıdır. Ortorombik kristal yapısı monoklinik kristal yapısına göre daha yoğundur, bu nedenle sertleşmiş kükürt içerisinde iç gerilmeler oluşur ve bunlar bağlayıcı içerisinde ciddi çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. İçyapıda oluşan gerilmeler ve bu gerilmelerin neden olduğu çatlaklar basınç dayanımında azalmalara neden olmaktadır. Bu deneysel çalışmada görülen 28 günlük serbest basınç mukavemeti değerlerindeki azalma literatürde yer alan çalışmalar ile paralellik göstermektedir [8, 14].



Şekil 7. Serbest Basınç Mukavemeti-Kür Süresi İlişkisi

Kükürtün inşaat teknolojilerinde kullanımının getirdiği en önemli avantajlardan biri soğuma ile birlikte çimentoya göre çok hızlı priz alabilmesidir [24]. Bu nedenle erken yaş davranışının da değerlendirilebilmesi için kükürt enjekte edilmiş zemin numunesine 1 saat sonunda serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Bu zemin numuneleri, en düşük mukavemet değerinin %50 rölatif sıklık değerinde elde edilmesi göz önünde bulundurularak bu sıklık değerinde hazırlanmıştır. 1 saatlik deney sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı aynı sıklıktaki 1, 7 ve 28 günlük numunelere ait sonuçlarla karşılaştırmalı olarak Şekil 8’de gösterilmiştir.

Deney sonucunda 1 saatlik serbest basınç mukavemeti 16.45 MPa olarak bulunmuştur. 1 saatlik numunelerde şekil değiştirme miktarlarının daha fazla olduğu görülmüştür. 1, 7, 28 günlük numunelerin aksine daha sünek kırılma meydana gelmiştir ve maksimum değerden sonra da okuma alınabilmiştir. Kükürt enjekte edilmiş numunelerin kür süresi arttıkça daha gevrek kırılmalar meydana geldiği belirlenmiştir.

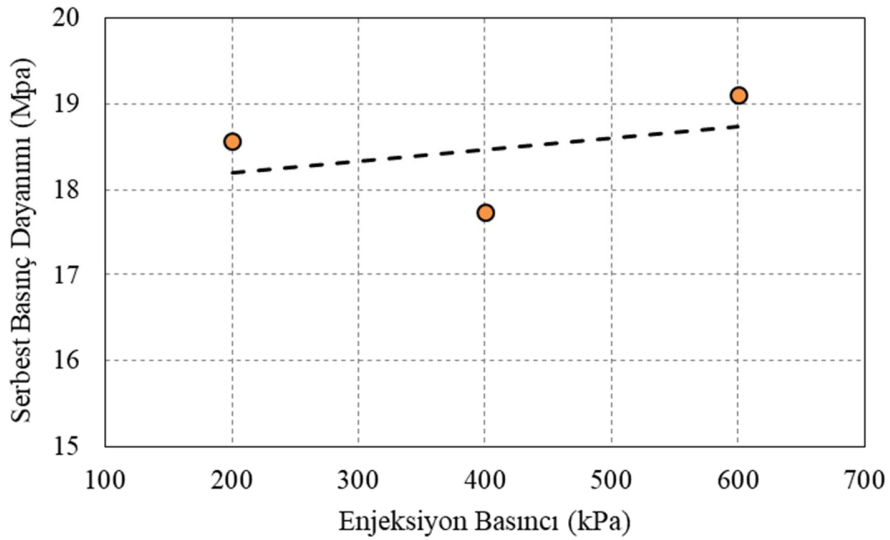


Şekil 8. D_r =%50 için Serbest Basınç Mukavemeti-Erken Yaş Kür Süresi İlişkisi

Kükürt enjekte edilmiş zemin numunesinin 1 saat sonunda 7 günlük maksimum dayanım değerinin yaklaşık %85'ine ulaşabildiği belirlenmiştir. Bu deney sonucu, özellikle acil önlem alınması gereken zeminlerde ve hızlı kullanıma açılması gereken iyileştirme sahalarında kükürt enjeksiyonu uygulamasının kullanılabilirliğini gösteren önemli bir parametredir. Çimentonun priz süresi ve dayanım kazanma hızı göz önünde bulundurulduğunda hızlı kullanıma açılması gereken sahalarda kükürt enjeksiyonun çimento enjeksiyonu uygulamasına göre önemli üstünlüklerinden birini ortaya koymaktadır.

3.3 Enjeksiyon Basıncının Serbest Basınç Mukavemeti Üzerinde Etkisi

Kükürtün enjeksiyon sırasında uygulanan enjeksiyon basıncı değerinin serbest basınç mukavemeti ile ilişkisinin belirlenmesi amacıyla 6 adet zemin numunesi daha hazırlanmıştır. Bu zemin numuneleri, en düşük mukavemet değerinin %50 rölatif sıklık değerinde elde edilmesi göz önünde bulundurularak bu sıklık değerinde hazırlanmıştır. 200 kPa basınç altında hazırlanmış olan numunelere ek olarak 3'er tane 400 kPa ve 600 kPa basınç altında sıvı saf kükürt enjekte edilerek hazırlanmıştır. Farklı enjeksiyon değerleri için deneylerden elde edilen serbest basınç değişimini gösteren grafik Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. $D_r=50$ için Serbest Basınç Mukavemeti-Enjeksiyon Basıncı İlişkisi

Enjeksiyon basıncının artmasına rağmen serbest basınç mukavemeti değerlerinin değişmediği belirlenmiştir. Daneli yapıya sahip çimento kullanılarak yapılan enjeksiyon uygulamalarında da artan enjeksiyon basıncı değerlerinin mukavemet değerleri üzerinde etkin olmadığı bilinmektedir [28]. Daha düşük viskoziteli sıvı kükürtün enjeksiyonunun çimentoya göre daha kolay olması beklendiğinden deneylerden elde edilen sonuçların literatür ile benzerlik gösterdiği görülmüştür. Enjeksiyon için yeterli basınç değerinden daha yüksek basınç değerlerinde uygulama yapıldığında serbest basınç mukavemetlerinde önemli ölçüde değişiklik olmadığı belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kükürtün zemin enjeksiyonu uygulamalarında çimento harcı yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Oda sıcaklığında katı formda olan ve petrol endüstrinden yan ürün olarak elde edilen saf kükürt 130 ± 5 °C'de eritilerek rölatif sıklığı %25, %50, %75 ve %100 olan uniform kum (SP) zemin numunelerine düşük basınçlı enjeksiyon şeklinde uygulanmıştır. Numuneler serbest basınç deneyine tabi tutularak rölatif sıklık, kür süresi ve enjeksiyon basıncı değişimlerinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Deneysel sonuçta tüm numunelere ait serbest basınç mukavemetlerinin 18.57 ile 20.16 MPa aralığında oldukça yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımı %75 rölatif sıklıkta hazırlanan 7 günlük numunede 20.16 MPa olarak elde edilmiştir. Saf kükürt enjeksiyonu sonucunda SP sınıfı zeminlerde çimento enjeksiyonundan elde edilen serbest basınç değerine göre yaklaşık olarak 2.7 kat artış elde edildiği belirlenmiştir.
- 1, 7 ve 28 günlük tüm numunelerde göçmenin gevrek kırılma sonucunda olduğu ve bundan dolayı ani kırılmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- En düşük serbest basınç mukavemetleri %50 rölatif sıklık değerinde elde edilirken, en yüksek değerlere %75 sıklıkta ulaşıldığı belirlenmiştir. Kükürt, enjeksiyon sırasında sıvı fazda olduğu için zeminin sıklığından bağımsız bir işlenebilirlik sergilemektedir. Bu nedenle kükürt enjekte edilen SP sınıfı zeminlerde serbest basınç mukavemetinin, rölatif sıklık değerinin değişimden önemli ölçüde etkilenmediği belirlenmiştir.
- Kükürt enjekte edilmiş numunelerin nihai dayanıma yaklaşık olarak 1 gün sonunda ulaştıkları görülmüştür. Numuneler 7 günde en yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerine ulaşmıştır. Kükürtün katılaşması ile kristal yapısında meydana gelen hacim değişiklikleri sonucunda oluşan iç gerilmeler ve ciddi çatlakların basınç dayanımında azalmaya neden olduğundan 28 gün bekletilen numunelerin mukavemetlerinde 7 günlük değerlere oranla yaklaşık olarak %1-4 gibi dayanım kaybı olduğu görülmektedir.
- Kükürt enjekte edilmiş SP sınıfı zemin numunesinin 1 saat sonunda 7 günlük maksimum dayanım değerinin yaklaşık %85'ine ulaşabildiği belirlenmiştir.
- Çimentonun priz süresi ve dayanım kazanma hızı göz önünde bulundurulduğunda kükürtün hızlı priz alma ve yüksek dayanım kazanma özelliği hızlı kullanıma açılması gereken sahalarda kükürt enjeksiyonunun çimento enjeksiyonu uygulamasına göre önemli üstünlüklerinden biri olarak gösterilebilir.
- Enjeksiyon basıncının artmasına rağmen serbest basınç mukavemeti değerlerinin değişmediği belirlenmiştir. Çimento harcı enjeksiyon uygulamalarında olduğu gibi kükürt enjeksiyonunda da enjeksiyon için yeterli basınç değerinden daha yüksek basınç



değerlerinde uygulama yapıldığında serbest basınç mukavemetlerinde önemli ölçüde değişiklik olmadığı görülmüştür.

DeneySEL çalışmadan elde edilen veriler değerlendirildiğinde hızlı priz alma ve yüksek dayanım değerleri ile zemin enjeksiyonunda petrol endüstrisinden yan ürün olarak elde edilen saf kükürtün çimento harçlarına alternatif olarak kullanılabilceği görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde ve şekillendirilmesinde emeği geçen merhum Doç. Dr. Utkan MUTMAN'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, 2017 Yılı Ham Petrol ve Doğalgaz Sektör Raporu, Türkiye Petrolleri Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, 4-7, 2018.
- [2] Vlahovic M.M., Martinovic S.P., Boljanac T.D., Jovanic P.B., Volkov-Husovic T.D., Durability of Sulfur Concrete in Various Aggressive Environments, Construction and Building Materials, 2011, 25, 3926-3934.
- [3] Wagenfeld J.G., Khalid A.A., Almheiri S., Slavens A.F., Calvet N., Sustainable Applications Utilizing Sulfur, A By-Product from Oil and Gas Industry: A State of the Art Review, Waste Management, 2019, 95, 78-89.
- [4] Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Devlet Planlama Teşkilatı, 57-105, 2001.
- [5] Harrison P., Global Sulphur Market Outlook, CRU Group, 2012.
- [6] Bacon R.F., Davis H.S., Recent Advances in the American Sulfur Industry, Chemical and Metallurgical Engineering, 1921, 24, 65-72.
- [7] Mohamed A.M.O., Gamal M.E., Sulfur Based Hazardous Waste Solidification, Environmental Geology, 2007, 53(1), 159-175.
- [8] Mohamed A.M.O., El Gamal M.M., Hydro-Mechanical Behavior of a Newly Developed Sulfur Polymer Concrete, Cement & Concrete Composites, 2009, 31, 186-194.
- [9] Öztürk, O., Öner, A., Investigation of Long Term Mechanical Properties of Sulphur Polymer Concrete and Comparison with Portland Cement Concrete, Erzincan University Journal of Science and Technology, 13(3), 1252-1262, 2020. DOI: 10.18185/erzifbed.784711.



- [10] McBee W.C., Sullivan T.A., Jong B.W., Industrial Evaluation of Sulfur Concrete in Corrosive Environments, U.S. Bureau of Mines, 1983, Report No: RI 8786, 15.
- [11] Al-Tayyib A.J., Khan M.S., Evaluation of Corrosion Resistance of Reinforced Steel in Sulfur Concrete, International Journal for Housing Science and Its Applications, 1988, 12(4).
- [12] Al-Tayyib A.J., Khan M.S., Electrical Resistivity of Sulfur Concrete and Its Relation to Corrosion of Embedded Steel, The Arabian Journal for Science and Engineering, 1989, 14(2), 271-281.
- [13] Öztürk O, Kükürt ve Kükürt Polimer Betonların Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2019.
- [14] Öztürk, O., Öner, A. Long-term Durability of Bitumen Modified Sulfur Polymer Concrete Under Freeze–Thaw Cycles, Int J Civ Eng, 20, 529–543 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00672-2>.
- [15] Al-Otaibi S., Al-Aibani A., Al-Bahar S., Abdulsalam M., Al-Fadala S., Potential for Producing Concrete Blocks Using Sulphur Polymeric Concrete in Kuwait, Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2018, DOI: 10.1016/j.jksues.2018.02.004.
- [16] Grugel R.N., Toutanji H.A., Sulfur “Concrete” for Lunar Applications–Sublimation Concerns, Advances in Space Research, 2008, 41, 103-112.
- [17] Toutanji H.A., Evans S., Grugel R.N., Performance of Sulfur Concrete in Lunar Environments, Construction and Building Materials, 2012, 29, 444-448.
- [18] Grugel R.N., Integrity of Sulfur Concrete Subjected to Simulated Lunar Temperature Cycles, Advances in Space Research, 2012, 50, 1294-1299.
- [19] Hager I., Golonka A., Putanowicz R., 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction, Procedia Engineering, 2016, 151, 292-299.
- [20] Mohammadi, A., Dehestani, M., Aff. M., Shooshpasha I., Asadollahi S., Mechanical Properties of Sandy Soil Stabilized with Modified Sulfur, American Society of Civil Engineers, 2014, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533 .0001059.
- [21] Çinicioğlu, F., Zemin Mekaniğinde Harç Enjeksiyonu, Birsen Yayınevi Ankara, 1997.
- [22] Andrus, R. D., Chung R. M., Ground Improvements Techniques for Liquefaction Redemination Near Existing Lifeliness, National Institute of Standarts and Technology, NISTIR 5714, 1995.
- [23] Akbulut S., Sağlamer A., Estimating the groutability of granular soils: A new approach. Tunneling and Undergroundspace Technology, 17:371-380, 2002.



- [24] Shin M., Kim K., Gwon S.W., Cha S., Durability of Sustainable Sulfur Concrete with Fly Ash and Recycled Aggregate Against Chemical and Weathering Environments, *Construction and Building Materials*, 2014, **69**, 167-176.
- [25] JSCE, Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structure, Earth Structure and Foundation in Japan, Japan Society of Civil Engineers, 1977.
- [26] Ishihara, K., Kokusho, T., Silver, M., L., Recent Developments in Evaluating Liquefaction Characteristics of Local Soils, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2719-2734, 1989.
- [27] Yıldız M., Soğancı A.S., Improvement of the strength of soils which comprises granular pumice by injection of cement under low pressure, *Scientia Iranica*, 2015, **22**(11), 81-91.
- [28] Mutman U, Düşük Basıncılı Çimento Enjeksiyonu ile Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2007.
- [29] Mohamed, A.M., Gamal, M.M., Sulfur Concrete for the Construction Industry, J. Ross Publishing, 2010.