



## Biyokömür ile aktive edilmiş uçucu küllerin zemin stabilizasyonuna yönelik kullanılabilirliğinin incelenmesi

Muhammet Çelik<sup>a</sup>, Ahmet Kuvat<sup>a</sup>, Yavuz Abut<sup>b</sup>, Merve Ceyhan Erdoğan<sup>b,\*</sup> ve Berrin Saygı Yalçın<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Yalova, 77200, Türkiye.

<sup>b</sup>Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ulaştırma Mühendisliği, Yalova, 77200, Türkiye.

<sup>c</sup>Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği, Yalova, 77200, Türkiye.

### MAKALE BİLGİSİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 17 Ocak 2024

Düzeltilme 15 Mart 2024

Kabul 28 Mart 2024

Çevrimiçi mevcut

#### Anahtar Kelimeler:

Karayolları

Zemin stabilizasyonu

Geri dönüşüm

Yüzey tepki yöntemi

Serbest basınç mukavemeti

Biyokömür

### ÖZET

Yüksek plastisiteli zeminlerde düşük taşıma gücüne bağlı meydana gelen düzensiz oturmalar ve kaymalar sonucu deformasyonlar oluşmaktadır. Bu tür zeminleri güçlendirmek için en sık kullanılan metot, zeminin çimento veya kireç gibi geleneksel bağlayıcılarla stabilizasyonudur. Ancak bu malzemelerin üretiminde yüksek oranda karbon salınımı ortaya çıkmakta, bu da karbon ayak izini artırmaktadır. Bu çalışmada, düşük karbon ayak izi, ucuz ve sürdürülebilir geri dönüşüm malzemelerinden elde edilen katkının, Karayolları Teknik Şartnamesi(KTŞ) kriterlerine uymayan nitelikteki taban zeminlerinin güçlendirilmesindeki kullanım potansiyelleri araştırılmıştır. Bu amaçla, çay fabrikası atıklarının piroliziyle elde edilen biyokömürün uçucu kül ile karıştırılmasıyla yeni katkı malzemesi elde edilmiştir. Farklı katkı oranları %5, %10, %15 su içerikleri %15, %20, %25 ve kür sürelerinin 0,14,28 gün stabilizasyon üzerindeki etkisini belirlemek için Yüzey Tepki Yöntemi(YTY) kullanılmıştır. Numuneler serbest basınç mukavemeti(UCS) deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçlara göre stabilize edilmiş numunelerin, saf zemin numunelere göre UCS değerinde %51-163 arasında artış sağladığı, matematiksel modele göre en iyi sonucun 14,5 gün kür süresi %11,5 katkı %23,6 su içeriğindeki karışımla sağlanabileceği belirlenmiştir. Ayrıca Atterberg Limitleri deney sonuçlarında saf zeminin KTŞ değerlerini sağlamadığı ancak katkılı numunelerin bu limitleri de sağladığı görülmüştür.

## Investigation of the using biochar-activated fly ash for soil stabilization

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 17 Jan 2024

Received in revised form 15 March 2024

Accepted 28 March 2024

Available online

#### Keywords:

Highways

Soil stabilization

Recycle

Response surface methodology

Unconfined compressive strength

Biochar

### ABSTRACT

Unsteady settlements and shear deformations occur particularly on high-plasticity soils, resulting from low bearing capacity. The most common method for treatment of such soils is stabilization with traditional binders like cement or lime. However, the production of these materials contributes significantly to carbon emissions, thereby increasing the carbon footprint. This study explores the potential use of a low-carbon, low-cost, and sustainable additive derived from recycled materials in the treatment of the subgrade that does not meet the criteria of the Highway Technical Specification (HTS). In this study, a new additive was obtained by mixing biochar derived from pyrolysis of tea factory waste with fly ash. Different additive ratios of 5%, 10%, 15%, water contents of 15%, 20%, 25%, and curing periods of 0, 14, 28 days were investigated using Response Surface Methodology (RSM) to determine their effects on stabilization. The samples were subjected to Unconfined Compressive Strength (UCS) tests. According to the results, stabilized samples showed an increase in UCS values ranging from 51% to 163% compared to natural soil samples. For the mathematical model, the optimal result was achieved with a curing period of 14.5 days, 11.5% additive ratios, and 23.6% water content. Additionally, Atterberg Limits test results indicated that the natural soil did not meet the HTS criteria, whereas the additive- stabilized samples met these limits.

## I. GİRİŞ

Yüksek plastisiteli ince taneli zeminlerde şişme potansiyellerinin bulunması ve yüzeye yakın taşıma gücünün düşük oluşu o bölgede yapılacak inşaat mühendisliği projeleri için büyük risk oluşturmaktadır. Bu riski ortadan kaldırmak için geoteknik mühendisleri problemlili zeminlerin değiştirilmesi, problemlili alana drenaj, kompaksiyon uygulanması, problemlili zeminin kimyasal katkılarla iyileştirilmesi, enjeksiyon ve jetgrout uygulanması gibi birçok yöntem geliştirmiştir. Bunlar arasında katkılı stabilizasyon en yaygın olarak kullanılan yöntem olup zemine polimer, kireç, çimento gibi endüstriyel ürünler katılarak iyileştirme yapılır. Öte yandan araştırmalar endüstriyel yan ürünlerin ve atıkların da zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğini göstermiştir. Zeminlerin kimyasal stabilizasyonu için dönüştürülmüş malzemeler veya parçalanmış kauçuk, atık mermer tozu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. gibi çok çeşitli malzemeler kullanılır [1, 2].

Yapı türü olarak karayollarında da zemin ile ilgili problemlilerde, birkaç alternatifte çözüm önerisi bulunmaktadır. Özellikle zayıf zeminin bulunduğu bölge derin ve uzun değilse değiştirilmesi yerine kırma taş ile yüksek taşıma gücüne sahip malzemeler yerleştirilmesi bir alternatiftir. Ancak kilometrelerce yol boyunca uygulanmasının maliyetli olması ve inşa etmenin zorlukları nedeniyle tercih edilirken değerlendirilir [3]. İkinci alternatif ise kireç veya çimento ile karıştırılarak, zeminin taşıma gücü kapasitenin eşdeğer dingil yükü tekrür sayısına göre artırılmasıdır. Bu alternatif oldukça fazla uygulanan bir metottur. Ancak gerek çimentonun gerekse kireç üretiminde karbon salınımının yüksek olması dünyanın geleceği için endişe verici bir durum oluşturmaktadır. Karbonun atmosfere salınması sonucu, atmosferde birikmesi anlamına gelen karbon emisyonunun %10'luk kısmının çimento ve %2'lik kısmının ise kireç üretimi sırasında ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Yapılan çalışmalar 1 ton Portland çimentosunun üretimi için yaklaşık olarak 1 ton CO<sup>2</sup> atmosfere salındığını göstermektedir [4, 5]. Ayrıca enerji krizleri nedeniyle yüksek sıcaklıklarda üretilen çimento ve kirecin maliyetleri de artmaktadır. Bu noktada alternatif bağlayıcı malzemelerin geliştirilmesi ve geliştirilecek malzemelerin özellikle çevre dostu sürdürülebilir olması ile ilgili çalışmalar son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir [6, 7]. Geopolimerler bunlardan bir tanesidir ve üzerinde araştırmalar sürmektedir. Bu araştırmalardan bazılarında geopolimerlerin kısa sürede yüksek dayanıma ulaştığı, geçirimsizliğinin düşük olduğu, yüksek kimyasal ve yangın direnci gibi olumlu özellikleri olduğu tespit edilmiştir [8, 9]. Geopolimer oluşturabilecek malzeme çeşitliliği oldukça fazladır. Bu noktada kullanılacak yapı tipine göre seçilmesinin yanı sıra mümkünse düşük maliyetli, çevre dostu, istenilen dayanım ve dayanıklılık kriterlerini sağlayabilir ve imalat sırasında kolay ulaşılabilir geopolimerler geliştirilmelidir.

Geopolimerler alkali hidroksit ya da silikat solüsyonunun, alüminosilikat ile tepkimeye girerek polimer yapısı oluşturmasıyla elde edilmektedir [10]. Alüminosilikat kaynağı olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kaolinit gibi malzemeler kullanılmaktadır [11]. Yapılan çalışmalar kimyasal aktivatör olarak en iyi sonuçların Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH çözeltilerinden elde edildiği belirlenmiştir [12]. Ancak bu çözeltilerin çeşitli alternatifleri de bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında organik kökenli malzemelerin termokimyasal dönüşümü sonucu elde edilen piroliz malzemelerin alkali aktivatörü olarak kullanılması araştırılmıştır.

Piroliz, organik malzemelerin, oksijensiz hale getirilmiş ortamda yüksek sıcaklığa (500-1000 °C) maruz bırakılmasıyla termal olarak organik yapısının bozulmasıdır. Oksijensiz ortamda belirli basınç ve sıcaklığa maruz bırakılan organik kökenli atıklardan bozulma süreçlerine bağlı olarak farklı ürünler ortaya çıkmaktadır. Bu ürünler; gaz, pirolitik yağ ve biyokömürdür [13, 14]. Bitkisel kökenli malzemelerin piroliz edilmesiyle elde edilen

hammadeler oldukça geniş alanlarda kullanılmaktadır [15, 16]. Piroliz işlemi sonucu elde edilen bir ürün olan biyokömürün alkali aktivatörü olarak yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi puzolanik özellik gösteren atık malzemelere katılması bu malzemelerin bağlayıcılık özelliğini arttırmaktadır [17].

Piroliz ile elde edilen malzemenin alkali aktivatörü olarak kullanılması ile ilgili literatürde şu çalışmalara ulaşılmıştır; Geçkil vd. [18], lastik atıklarının granül halde piroliz edilmesinden elde edilen biyokömürü belirli oranlarla zemine katmış ve zeminde mukavemet değerlerinin değişimini incelemiştir, elde edilen bulgulara göre en iyi sonucu biyokömürün kütlece %10 katıldığı numunede elde etmişlerdir. Aynı çalışmada 1 ve 7 günlük CBR değerleri incelendiğinde araştırmacılar CBR sonuçlarına göre üstyapı maliyetlerindeki sırasıyla %5,13 ve %14,37 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Basha vd. [19], yaptıkları çalışmada, pirinç kabuğundan piroliz ile elde edilen biyokömür ile çimentoyu belirli oranlarda karıştırmış, elde edilen malzemenin (%4 çimento ve %5 pirinç kabuğu) CBR değerlerini %60 oranında arttırdığını tespit etmiştir. Yapılan bir başka çalışmada arıtma çamurundan elde edilen biyokömürün, alkali aktivite sağlayan ajan olarak kullanılması araştırılmıştır [17]. Biyokömür ve kül 0,5/0,5 ve 0,67/0,33 oranlarında karıştırılmış, elde edilen bu yeni malzeme stabilize edilecek zemine %7,5 ve %10 oranında katılmış ve 56 gün boyunca kür alması beklenmiştir. Elde edilen kür numuneleri çimento ile karıştırılmış ve referans numuneler ile karşılaştırılmıştır. Numunelere optimum su içeriği tayini, pH, mikro ve makro yapı analizi, mineraloji ve basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde atık çamur biyokömürünün iyi bir alkali aktivatörü olduğu, 28 günlük dayanımlarda Avrupa standardını yakaladığı ve özellikle %10 dozajda 0,67/0,33 oranlı karışımın 1243 kPa üzeri basınç dayanımlarına ulaştığı tespit edilmiştir [17]. Wang vd. [15], yaptıkları çalışmada ise çimentolu kompozitlere ilave edilen biyokömürlerin nem ve CO<sup>2</sup> kücü sayesinde, ek çimento hidratlarını oluşturduğu görülmüştür. Spesifik olarak, ağırlıkça %1 biyokömür ilavesi, çimentolu kompozitlerde basınç dayanımını %8,9 arttırmıştır. Bununla birlikte, ağırlıkça %5 ve daha fazla biyokömürün eklenmesi, biyokömürün gözenekli ve kırılğan yapısından dolayı basınç dayanımını düşürmüştür öte yandan CO<sup>2</sup> kücü ise bu olumsuz etkiyi azaltmıştır.

Bu çalışmada ise, çevre dostu malzeme kullanımı hakkında araştırma yapılmış ve iki temel problem üzerinde ortak çözüm elde edilmesi amaçlanmıştır. Buna göre, birinci problem olarak çay bitkisinin lif ve saplarından oluşan atıkları ile Yalova ilinde bulunan Aksa Akirlik fabrikasından çıkan uçucu kül malzemelerinin depolanması belirlenmiş, bertaraf edebilmek için sürdürülebilirlik ilkesi gereği tekrar kullanımı sağlanmaya çalışılmıştır. İkinci problem ise çimento kireç gibi malzemelerin zemin stabilizasyonunda sıklıkla kullanılması ve bu malzemelerin üretiminde yüksek karbon salınımının ortaya çıkması sebebiyle karbon ayak izinin artmasıdır. Bunun yerine ikame ham maddeler kullanılmasının karayolu zeminlerin taşıma gücünü artırılmasında yeterli teknik özelliklere sahip olup olmayacağı araştırılmıştır. Buna göre çalışmada pirolize edilmiş çay lifi atıklarının uçucu külü aktive ederek elde edilecek bağlayıcının yüksek plastisiteli killi zeminlerde stabilizasyon etkisi araştırılması amaçlanmıştır. Araştırma karakterizasyon ve serbest basınç mukavemetlerinin optimizasyonunun bir cevap yüzeyi yöntemi (CYY) olan Box-Behnken tasarım ile belirlenmesi şeklinde iki aşamadan oluşmaktadır.

Çalışmada öncelikle Yalova İlinde bulunan yüksek plastisiteli kil özelliği gösterilen bölgelerden numuneler alınmıştır. Alınan numuneler karayolu olarak kullanılan veya kullanılacak bölgelerden seçilmiştir. Öncelikle araziden getirilen doğal zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiş ardından proktor deneyine geçilmiştir. Proktor deneyi önce saf zemine uygulanmış ardından uçucu kül ve piroliz malzemesi belirli oranlarda eklenerek tekrar edilmiştir. Buna göre malzeme değişimine göre en iyi sıkışma sonuçlarını veren optimum su seviyesi tespit

edilmiştir. Ardından çalışmanın ikinci aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada farklı değişkenlere sahip deney tasarımı yapılmıştır buna göre birinci değişken olarak 0-14-28 gün kür süreleri seçilmiş, ikinci değişken olarak %5-10 ve 15 oranlarda katkı malzemesi katılması belirlenmiş son olarak da %15-20 ve 25 su muhtevalarına sahip üçüncü değişken belirlenmiştir. Bu değişkenlere göre deney prosedürü matematiksel modele dökülmüş uygulanmıştır. Standart özelliklere sahip kalıplarda üretilen numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar üzerinden optimum tasarım kriterleri belirlenmiştir.

## II. DENEYSEL METOT

Çalışmanın yöntemi iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısmında Yalova İlinde bulunan şehir merkezine yakın ve ileride karayolu üstyapısı yapılacak kil malzemenin ağırlıklı olduğu ham yol tespit edilmiştir. Tespit edilen ham yoldan malzeme tedarik edilmiş ve öncelikle bu malzemenin karakterizasyonu yapılmıştır. İkinci aşamada ise karakterizasyonu yapılan killi malzemenin içerisine %67-%33 oranlarında piroliz malzemesi ve uçucu kül eklenerek, dayanım özellikleri serbest basınç deneyi ile tespit edilmiştir. İkinci aşamada optimum deney parametrelerini belirlemek amacıyla. Design Expert 11.0.5.0 yazılımı ile üç deneysel faktörün (su içeriği, kür süresi ve katkı oranı (uçucu kül/piroliz malzemesi)) serbest basınç üzerindeki etkilerini belirlemek için bir cevap yüzeyi yöntemi (CY) olan Box-Behnken dizayn kullanılmıştır (Stat-Ease, Inc., ABD).

Bu çalışmada Box-Behnken tasarım yöntemi ile serbest basınç denemeleri temsilen yapılması gereken deney sayısı 3 parametre ve 3 seviyeli bir deney tasarımı için 17 olarak belirlenmiş olup bu on yedi deneyin 5 tanesi her bir seviyenin merkez noktasında tekrar denemeler şeklinde yapılmıştır. Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi için kullanılan parametreler (bağımsız değişkenler), bu parametrelerin kodlanmış ve gerçek seviyeleri, Tablo 1'de verilmiştir. Denemelerde kullanılan bağımsız değişkenler sırasıyla su içeriği (%), Kür süresi (gün) ve Katkı oranıdır. Katkı malzemesinde piroliz edilmiş çay çöpü %67 oranında uçucu kül ise %33 oranında katılmıştır [17].

**Tablo 1.** Box-Bhenken Deneysel Tasarım yöntemi için kullanılan parametreler

Bağımsız Değişkenler	Sembol	Seviyeler		
		-1	0	1
Su içeriği (w%)	A	15	20	25
Kür süresi (gün)	B	0	14	28
Katkı Oranı (w%)	C	5	10	15

### 2.1 Malzeme temini ve özellikleri

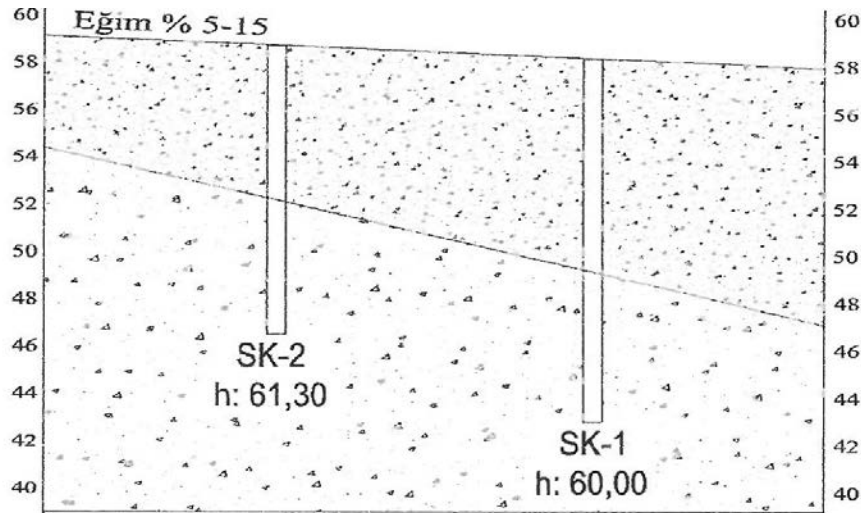
Numuneler Şekil 1(a) kısmında görülen ham yoldan temin edilmiştir. Şehir merkezine Şekil 1(b) kısmında görüldüğü gibi şehir merkezine oldukça yakın bir bölgedeki bu ham yol gözlemsel incelemeler neticesinde yoğun kil tabakasına sahip olduğu tespit edildiğinden tercih edilmiştir. Bölgede yapılaşma hızla artmakta olup yakın çevresinde tamamlanmış müstakil konutlar da bulunmaktadır. Bu durumda yakında bu ham yolun taşıma gücü artırılıp üzerine kaplama yapılması muhtemeldir.



Şekil 1. (a) Numune alınan ham yol, (b) Yalova merkezin ve numune alınan ham yolun Uydu görüntüsü (Google Maps)

Yalova ilinde faaliyet gösteren Aksa Akrilik sanayi tesisinde üretim sırasında ortaya çıkan uçucu kül deneylerde kullanılmak üzere firmadan temin edilmiştir.

Numune alınan ham yolun yakınında bulunan Şekil 1'de beyaz renkli görülen eve ait zemin etüt raporuna ulaşılmış ve bu rapor incelendiğinde aşağıda Şekil 2'de görülen detaylar tespit edilmiştir buna göre; Yapılan sondajlara göre arazi zemin modeli ve yer altı suyu durumlarına bakıldığı zaman yüzde 5-15 eğime sahip arazide 2 ayrı tabaka görülmektedir. 1. Tabaka ortalama kalınlığı 7 metre olan sert kıvamlılığa sahip yüksek plastisiteli kilden (Yalakdere formasyonu) oluşmaktadır. 2. Tabaka 6-9 metre aralığında başlayıp 16 metre derinliğe kadar devam eden sert kilden (Yalakdere formasyonu) oluşmaktadır [20].



Şekil 2. Numune alınan ham yolun yanındaki parsel için zemin etüdü sonucu

Getirilen yüksek plastisiteli kil numuneler Şekil 3'te görüldüğü gibi kurutma işlemine tabi tutulmuştur ardından da elek analiz ve hidrometre deneyi uygulanmış böylelikle zeminin granülometrisi çıkartılmıştır.



Şekil 3. Zeminin granülometrisi çıkartılma işlemleri

Zeminin sınıfının belirlenebilmesi için Şekil 4'te görülen Atterberg Limit deneyleri araziden ham yoldan temin edilen killi zemine uygulanmıştır. Ayrıca Atterberg Limit deneyi %10 olarak katkı malzemesinin katılmasına göre tekrar edilmiştir. %10 katkı malzemesi de kendi içinde Tablo 2'de görüldüğü gibi 3 farklı oranda uygulanmıştır.

Tablo 2. Atterberg Limiti deneylerinin uygulandığı karışım içerikleri

Deney numunelerinin karışım oranları	Simge
%100 zemin	z
%90 zemin ve %10 katkı (%33 biyokömür+%67 uçucu kül)	z-BK33
%90 zemin ve %10 katkı (%50 biyokömür+%50 uçucu kül)	z-BK50
%90 zemin ve %10 katkı (%67 biyokömür+%33 uçucu kül)	z-BK67



Şekil 4. Zeminin sınıfının belirlenmesi için uygulanan atterberg limit deneyleri (a) likit limit (b) plastik limit

Malzeme özelliklerinin belirlenmesi amaçlı son deney olarak Şekil 5'te görülen proktor deneyi uygulanmıştır. Proktor deneyi sadece saf zemine değil, zemine katılacak olan uçucu kül ve piroliz malzemesi katkılarına göre de tekrar edilmiştir. Tablo 3'te görüldüğü gibi saf zemin dışında 3 farklı oranda da katkı malzemesi katılmasının optimum sıkışmayı verecek su muhtevasının ne kadar değiştireceği takip edilmiştir.

**Tablo 3.** Proktor Deneinin yapıldığı numunelerin içerikleri

Deneye tabi tutulan karışım	Uçucu kül	Piroliz
1600 gr. Saf Zemin	0	0
1440 gr Saf Zemin 160 gr Katkı	%50	%50
1440 gr Saf Zemin 160 gr Katkı	%33	%67
1440 gr Saf Zemin 160 gr Katkı	%67	%33



Şekil 5. Proktor deneyi uygulaması

## 2.2 Serbest Basınç Deneyi

Yapılan çalışmalarda ikinci kısmı serbest basınç deneyi oluşturmaktadır. Daha önceki çalışmalarda saf zemin yapılan katkı oranlarında %67 piroliz edilmiş organik malzeme, %33 uçucu kül oranının iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir [17]. Bu nedenle bu oran sabit tutulmuş ancak katkı oranı %5,10 ve 15 olacak şekilde 3 farklı oranda eklenmiştir. Su muhtevası da değişken tutulmuş %15,20 ve 25 oranlarında katılarak deneyler uygulanmıştır. Su muhtevasının değiştirilmesindeki ana hedef proktor sonuçları ile kür süresi nedeniyle su muhtevasında ayrıca ihtiyaç gerekip gerekmeyeceği bilgisine ulaşılmasıdır. Son olarak kür sürelerinin dayanıma etkisinin de belirlenebilmesi için 0,14 ve 28 gün için farklı deneyler yapılmıştır. Deney setlerinde her bir set için 3'er numune üretilmiştir. Deneyde matematiksel model kullanılarak deney set adetleri azaltılmıştır. Buna göre Tablo 8'de verilmiş deney setleri uygulanmıştır. Her bir numune mekanik karıştırıcıda yaklaşık 10 dakika karıştırıldıktan sonra sıkıştırmaya tabi tutulmuştur. Numuneler iç çapı 50mm yüksekliği 100 mm olan yarılabılır çelik kalıp içerisine 3 tabaka halinde yerleştirilerek sıkıştırılmıştır. Şekil 6'da görülen aparat ve standart Proktor tokmağı ile her bir tabakaya 6 vuruş yapılarak standart Proktor enerjisi olan  $600 \text{ kNm/m}^3$  enerji uygulanarak mekanik sıkıştırma yapılmıştır [21]. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra numunelerin alt ve üst yüzeyleri düzgün bir şekilde kesilerek deneylere hazır hale getirilmiştir. Numuneler streç film ile sarıldıktan sonra desikatöre yerleştirilerek yaklaşık %95 nem ve  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ortamında kür süreleri bekletilmiştir. Kür süresi bitirilen numunelerin tamamı serbest basınç deneyine (UCS), ASTM-D2166-66'ya (ASTM, 2007) uygun olarak, tabi tutulmuştur [22]. Serbest basınç deneylerinde aksel yüklenme hızı 1mm/dakika olarak uygulanmış olup, numunelerde göçme oluşuncaya veya maksimum %20 aksel deformasyon gerçekleşene kadar yüklenme devam ettirilmiştir. Şekil 7a, b ve c'de sırasıyla numunelerin kürlenmesi, serbest basınç deney aleti ve numunelerin deney sonrası görüntüleri sırasıyla görülmektedir.



Şekil 6. Serbest Basınç Deneyi için numune oluşturma kabı ve tokmağı



Şekil 7. Serbest Basınç Deneyleri, (a) serbest basınç deney aleti, (b) numunelere uygulanan desikatör kürü, (c) deney sonrası numuneleri görünümü

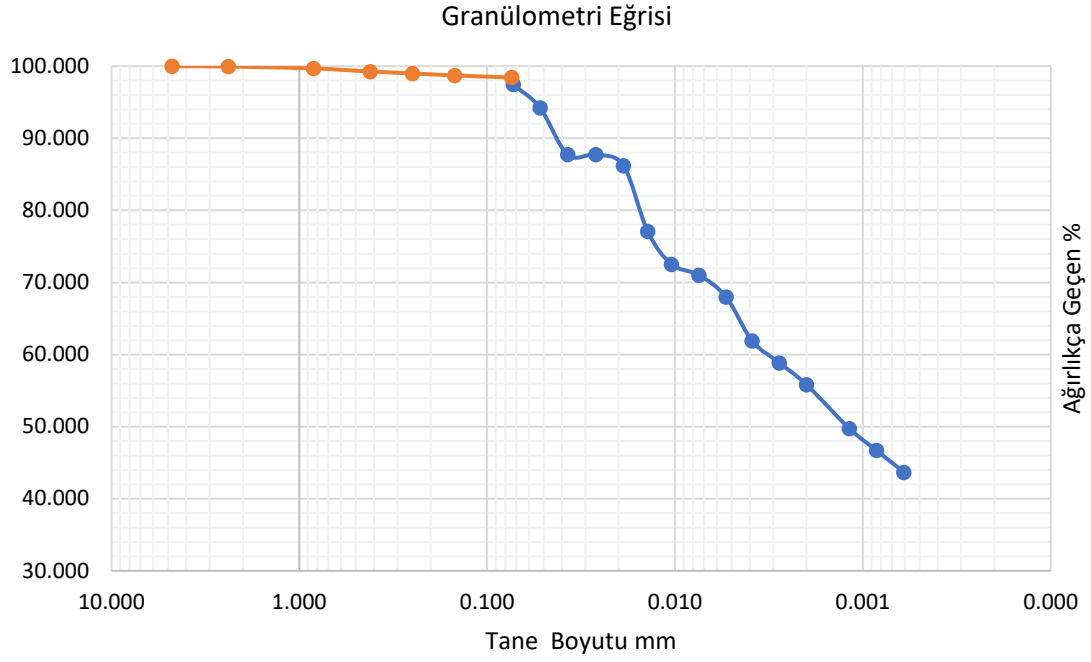
### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Buna göre önce zeminin tanımlanması ve optimum su muhtevası bilgisi için proktor deneylerinin sonucu ardından da ideal karışım kür ve su oranlarının belirlenebilmesi için serbest basınç deneyinin sonucu verilmiştir.

#### 3.1 Zemin sınıfının belirlenmesi

Laboratuvara getirilen doğal zemin numunesi üzerinde yapılan elek ve ıslak analiz sonucu elde edilen granülometri eğrisi Şekil 8’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 4’te saf zeminin fiziksel özelliklerini ve kıvam limit değerleri de verilmiştir.



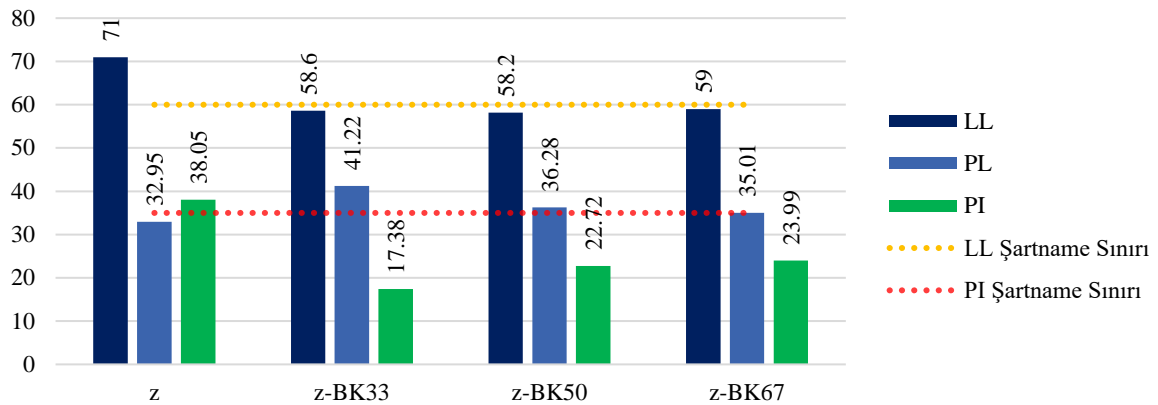


Şekil 8. Zeminin granülometrik dağılımı

Saf zemin ve %10 katkı içeriğine sahip numuneler üzerinde yapılan Atterberg limiti deney sonuçları Şekil 9'da verilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi için Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) dolgu malzemeleri için belirlenmiş standart özellikleri de Tablo 5'te verilmiştir [23].

**Tablo 4.** Kullanılan zemin numunesinin fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlık (Gs)	2,84
Likit Limit (LL), %	71,0
Plastik Limit (PL), %	33,0
Plastisite İndeksi (PI), %	38,1
Zemin Sınıfı (USCS)	CH



Şekil 9. Kıvam limiti sonuçları ve şartname limitleri ile kıyaslamalı gösterimi

**Tablo 5.** KTŞ dolgu malzemesi özellikleri

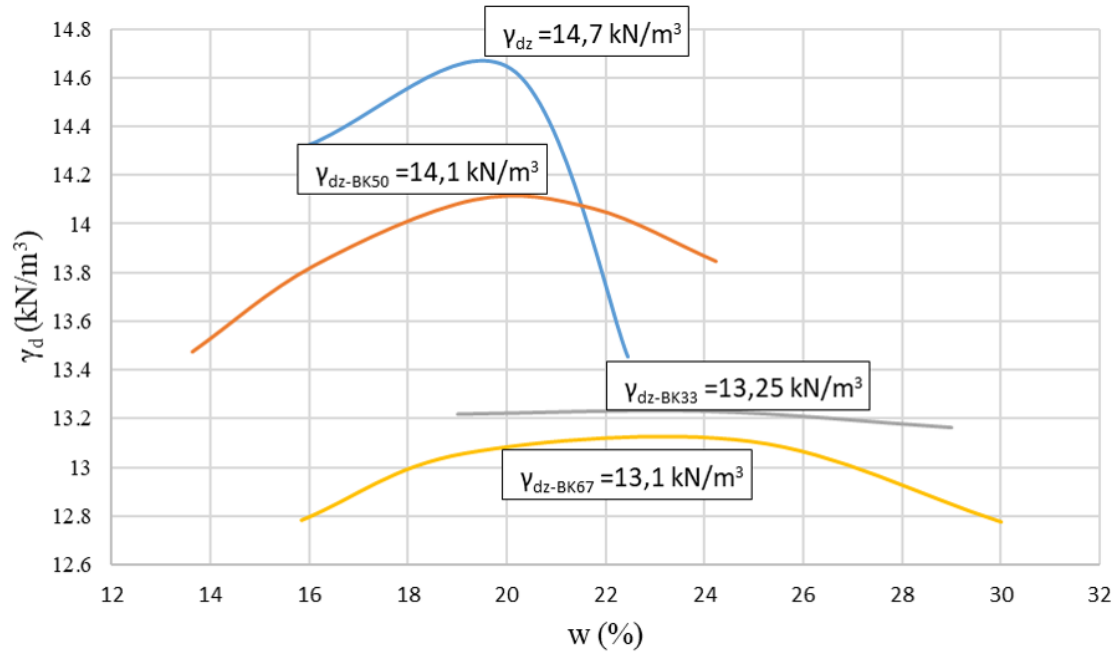
Deney	Şartname Limiti
Likit Limit (LL), %	≤ 60
Plastisite İndeksi (PI), %	≤ 35
Maksimum Kuru Yoğunluk (Standart Proktor)	≥ 1,450 t/m <sup>3</sup>

Sonuçlar incelendiğinde saf zeminin likit limit değerinin çok yüksek olduğu, zira kilin su emme kapasitesiyle doğru orantılı bu değer yüksek çıktığı hem likit limit hem de plastisite indeksinin teknik şartnamelerdeki değerlerden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Doğal veya stabilize edilmiş bir zeminin plastisite indeksinin yüksek olması zeminin su tutma kapasitesinin artması anlamına gelmektedir. Bu durumda bünyesinde fazla miktarda su bulunduran zeminin taşıma gücü parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısının azalmasına ayrıca dışarıdan gelebilecek yüklere karşı direncin azalmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla yüksek plastisiteli zeminler karayolu altında hem yüksek deformasyon potansiyeli hem de düşük taşıma gücü sahib olmaktadır. Öte yandan katkı katılmasıyla likit limit değerlerinde düşme olduğu, KTŞ’de öngörülen değerler seviyesine geldiği, plastisite indisinin de standardı sağlar hale geldiği görülmüştür. Bu şekilde stabilizasyonu yapılan karayolu altındaki tabakaların KTŞ’ye göre kıvam limitlerini sağladığı ve kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir. KTŞ kıvam limiti standartları açısından değerlendirildiğinde, kullanılan katkı malzemelerinin, yüksek plastisiteli kili KTŞ’de belirtilen seviyelere getirebildiği görülmüştür.

Proktor deneyleri sonucu saf ve katkılı numunelerin optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri Tablo 6 ve Şekil 10’da verilmiştir.

**Tablo 6.** Proktor deneyi sonuçları

Deneye tabi tutulan Karışım	Optimum Su muhtevası	$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )
Saf Zemin	% 19,53	14,7
%90 Kil %10 Katkı (%50 Piroiliz %50 Uçucu Kül)	% 20,20	14,12
%90 Kil %10 Katkı (%67 Piroiliz %33 Uçucu Kül)	%24,94	13,10
%90 Kil %10 Katkı (%33 Piroiliz %67 Uçucu Kül)	%23,22	13,25

**Şekil 10.** Saf zemin ve katkılı zemine ait proktor deneyi sonuçları

Katkı içeriğinin artışına bağlı olarak optimum su içeriklerinin arttığı maksimum kuru yoğunluklarının da azaldığı anlaşılmaktadır.

### 3.2 Zemin stabilizasyonu için serbest basınç denemeleri

Serbest basınç deneyleri öncelikle saf zeminde uygulanmış böylelikle su içeriğinin değişimi Tablo 7’de verilmiştir.

**Tablo 7.** Saf zeminde yapılan ve su içeriğinin değişken olduğu serbest basınç deneyi sonuçları

Su içeriği (%)	UCS değeri (kPa)
15	274,5
20	267,4
25	177,26

Zemin stabilizasyonu için gerçekleştirilen deney planı kapsamında farklı su içeriği, kür süresi ve katkı oranlarında 17 deneme yapılarak her bir deneme sonucunda elde edilen numuneye serbest basınç deneyi yapılmıştır. Serbest basınç denemeleri için kullanılan deney planı ve yapılan denemeler sonucunda elde edilen verilerin deneysel değerleri ve Design Expert programı ile hesaplanan değerleri Tablo 8’de verilmiştir.

**Tablo 8.** Zemin stabilizasyonu için serbest basınç deney için deney planı ve deneme verileri

Deney No	Değişkenlerin Kodlanmış Değerleri			Değişkenlerin Gerçek Değerleri			Cevap	
	A	B	C	Su içeriği, A (w%)	Kür süresi, B (gün)	Katkı Oranı (w%), C	Serbest Basınç Deneysel (KN/m <sup>2</sup> )	Serbest Basınç Hesaplanan (KN/m <sup>2</sup> )
1	-1	-1	0	15	0	10	330,27	328,34
2	+1	-1	0	25	0	10	<b>288,21</b>	291,16
3	-1	+1	0	15	28	10	338,09	335,14
4	+1	+1	0	25	28	10	460,33	462,26
5	-1	0	-1	15	14	5	384,43	388,93
6	+1	0	-1	25	14	5	432,28	431,90
7	-1	0	+1	15	14	15	414,53	414,91
8	+1	0	+1	25	14	15	466,37	461,87
9	0	-1	-1	20	0	5	292,23	289,66
10	0	+1	-1	20	28	5	379,89	378,34
11	0	-1	+1	20	0	15	315,8	317,35
12	0	+1	+1	20	28	15	404,02	406,59
13	0	0	0	20	14	10	465,81	469,55
14	0	0	0	20	14	10	<b>472,15</b>	469,55
15	0	0	0	20	14	10	470,71	469,55
16	0	0	0	20	14	10	469,77	469,55
17	0	0	0	20	14	10	469,29	469,55

Yapılan denemeler sonucunda serbest basınç değerlerinin 288,21 kN/m<sup>2</sup> ve 472,15 kN/m<sup>2</sup> arasında değiştiği belirlenmiştir. Tablo 8’de verilmiş olan verilerden de açıkça görüldüğü gibi en düşük serbest basınç değerine (288,21 kN/m<sup>2</sup>) 2 numaralı deneme sonucunda yani %25 su içeriği, 0 gün kür süresi ve w%10 katkı oranı kullanılması durumunda ulaşılmıştır. Bunun yanı sıra en yüksek serbest basınç değerine (472,15 kN/m<sup>2</sup>) 14 numaralı deneme sonucunda yani %20 su içeriği,14 gün kür süresi ve w %10 katkı oranı kullanılması durumunda ulaşılmıştır. Genellikle stabilizasyon çalışmaların kür süresinin artışına bağlı olarak serbest basınç mukavemetin de artması beklenilir ancak çalışmada uçucu külü aktive etmesi için kullanılan piroliz malzemesinin organik kökenli olması ve kür ortamında numune yüzeylerinde oluşan küflerin etkisiyle 28 günlük numunelerde serbest

basınç mukavemetlerinin 14 günlüklerden düşük çıktığı görülmüştür. Ayrıca kür sırasında oluşan tepkimelerin 14. güne kadar sürdüğü ardından daha ekstenel bir davranış gösterdiği, düşmediği ancak artmadığı da tespit edilmiştir.

### 3.3 Serbest basınç denemeleri için regrasyon analizi ve model denklikleri

Regrasyon analizi bağımsız değişkenler (su içeriği, kür süresi, katkı oranı) ve cevaplar (serbest basınç) arasındaki ilişkiyi belirlemek için yapılmıştır. Regresyon analizinde, lineer, kuadratik, kübik, logaritmik ve ters regresyon, modelleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu modellerin uyumu, uyum eksikliği testi (lack of fit), düzeltilmiş R-kare ve tahmini R-kare değerleri gibi üç faktörün sayısal değeri ile belirlenmiştir. Her bir cevap için Lineer, kuadratik, kübik, logaritmik ve ters regresyon modelleri için yapılan model uygunluk testi Tablo 9'da verilmiştir. Serbest basınç analizi için model belirleme analizine göre, lack of fit değerinin uyumsuz olmasından, düzeltilmiş R-kare ve tahmini R-kare değerlerinin yüksek olmasından ve aynı zamanda bu iki R-kare değerinin makul ölçüde birbirine yakın olmasından dolayı kuadratik (2. derece) modelin uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Düzeltilmiş R-kare ve tahmin edilen R-kare değeri arasındaki farkın 0,2'den az olması makul yakınlık için kabul edilen değerdir ve Tablo 9'da da açıkça görüldüğü gibi bu iki değer her bir cevap için en yüksek ve birbirine en yakın olduğu değer kuadratik modeldir. Bu modele göre serbest basınç denemeleri üzerinde ana parametrelerin yanı sıra ana parametrelerin sinerjik etkisinin önemli ölçüde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

**Tablo 9.** Serbest basınç mukameti için model uygunluk testi

Kaynak	Sıralı p-değeri	Uyumsuzluk p-değeri	R <sup>2</sup>	Düzeltilmiş R <sup>2</sup>	Tahmini R <sup>2</sup>	Remarks
Serbest basınç kN/m <sup>2</sup>						
Lineer	0,2022	<0,0001	0,2901	0,1263	-0,1984	
2FI	0,6954	<0,0001	0,3815	0,0104	-0,9820	
Kuadratik	<0,0001	0,0765	0,9986	0,9967	0,9814	Önerilen
Kübik	0,0765	-	0,9997	0,9988	-	

Serbest basınç mukavemeti (UCS) cevaplarını tahmin etmek için kuadratik modele ait kodlanmış değişken ve gerçek değişken değerleri kullanılarak elde edilen regrasyon denklemleri Denklem (1) ve (2)'de verilmiştir. Her bir cevabın teorik değerleri (tahmin edilen değer veya model denklemleri kullanılarak matematiksel olarak hesaplanan cevap değeri) bu model denklemleri kullanılarak tahmin edilebilmektedir.

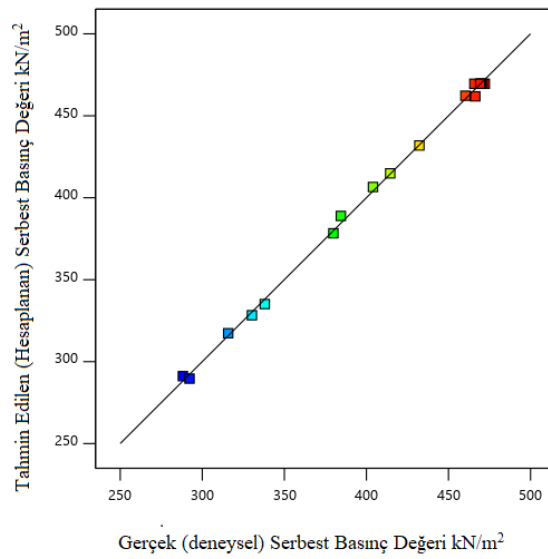
Kodlanmış değişkenlere göre model denklem;

$$UCS = +469,55 + 22,48A + 44,48B + 13,99C + 41,08AB + 0,9975AC + 0,1400BC - 19,45A^2 - 95,87B^2 + 25,69C^2 \quad (1)$$

Gerçek değişkenlere göre model denklem;

$$UCS = -30,143 + 27,006A + 5,117B + 22,525C + 0,587AB + 0,04AC + 0,002BC - 0,778A^2 - 0,489B^2 - 1,028C^2 \quad (2)$$

Denklem (1) ve (2)'de A, B ve C su içeriğini (%), kür süresini (gün), katkı oranını (%) temsil etmektedir. AB, AC ve BC gibi denklem terimleri iki bağımsız değişkenin etkileşimini sembolize etmektedir, örneğin AB, su içeriği ve kür süresinin etkileşimini ifade etmektedir. Diğer denklem terimleri, A<sup>2</sup>, B<sup>2</sup> ve C<sup>2</sup> bağımsız değişkenlerin kare etkisini sembolize etmektedir. Parametre katsayılarının negatif işareti bağımsız değişkenlerdeki artışla cevapta azalma olduğunu, pozitif işareti ise bağımsız değişkenlerdeki artışla cevapta artma olduğunu göstermektedir. Denklem (1) ve (2)'den açıkça görülebileceği gibi, serbest basınç üzerine sadece bağımsız değişkenlerin değil, bağımsız değişkenlerin hem etkileşimleri hem de kareleri önemli bir etkiye sahiptirler. Şekil 11, cevabın deneysel (gerçek) ve tahmin edilen değerlerini göstermektedir. Serbest basınç mukavemeti için cevabın gerçek ve tahmin edilen değerleri birbirine çok yakındır. Bu sonuç, yanıtların gerçek ve tahmin edilen değeri arasında güçlü bir ilişki olduğunu desteklemektedir ve belirlenen modelin doğruluğunu güçlendirmektedir.



Şekil 11. Tahmin edilen ve gerçek serbest basınç mukavemeti verileri

#### Serbest Basınç Mukavemetinin Anova Analizi:

Olasılık değerine (p-değeri) ve Fischer test değerine (F-değeri) dayalı model denklemleri için geliştirilen varyans analizi (ANOVA) genellikle deneysel sonuçları daha iyi tanımlamak için kullanılan bir yöntemdir. ANOVA analizinde, yüksek F değerine ve düşük p değerine sahip bir modelin anlamlı olduğu kabul edilirken, en düşük p değeri regresyon denklemindeki en etkili parametreyi göstermektedir. Bu çalışmada, cevap ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin araştırılması amacıyla Box-Bhenken tasarım yöntemi ile kuadratik model için ANOVA gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç mukavemet verileri için ANOVA sonucu Tablo 10'da özetlenmiştir. ANOVA tablosundan açıkça görülebileceği gibi, modelin p-değeri 0,0001'den küçüktür ve bu nedenle düşük p değeri modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca serbest basınç için modelin F-değeri, 542,21 olarak hesaplanmıştır. Dahası, serbest basınç için Tablo 9'da verilen modelin R-kare değeri 0,9986 olarak bulunmuştur. Serbest basınç için modeldeki çok düşük p değeri, nispeten yüksek F değeri ve R-kare değeri, kuadratik modelin anlamlı olduğunu ve cevap ile bağımsız değişkenler arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermektedir.

**Tablo 10.** Serbest Basınç Mukavemeti için ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	
<b>Model</b>	73783,87	9	8198,21	542,21	< 0.0001	anlamlı
A-su içeriği	4044,15	1	4044,15	267,47	< 0.0001	
B-kür süresi	15825,98	1	15825,98	1046,70	< 0.0001	
C-katkı oranı	1564,92	1	1564,92	103,50	< 0.0001	
AB	6748,62	1	6748,62	446,34	< 0.0001	
AC	3,98	1	3,98	0,2632	0,6237	
BC	0,0784	1	0,0784	0,0052	0,9446	
A <sup>2</sup>	1593,14	1	1593,14	105,37	< 0.0001	
B <sup>2</sup>	38698,58	1	38698,58	2559,44	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	2779,23	1	2779,23	183,81	< 0.0001	
<b>Kalan</b>	105,84	7	15,12			
Lack of Fit	83,63	3	27,88	5,02	0,0765	anlamsız
Saf Data	22,21	4	5,55			
<b>Kor Toplam</b>	73889,71	16				

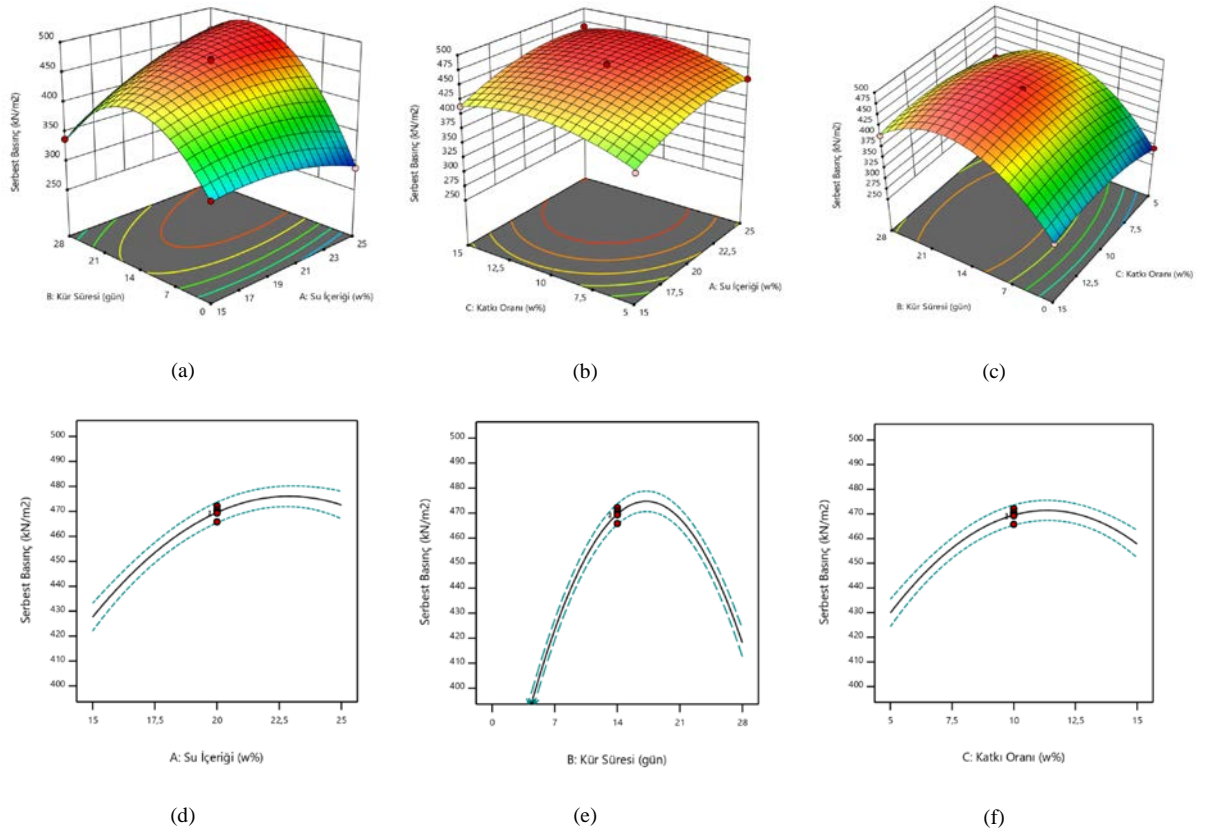
Bağımsız değişkenler ve cevap arasındaki ilişkinin araştırıldığı ANOVA analizine göre (Tablo 10), bağımsız değişkenler arasında serbest basınç mukavemeti için en yüksek F-değerine sahip olan değişken kür süresidir. Bu durum serbest basınç mukavemeti için en etkili bağımsız değişkenin kür süresi olduğunu göstermektedir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler açısından bakıldığında en yüksek F-değerine sahip parametrenin B2 yani kür süresinin üssel değişimin sahip olduğu görülmektedir ve bu B2'nin serbest basınç üzerinde diğer bağımsız değişkenlerden daha etkili olduğu sonucunu göstermektedir.

#### *Bağımsız Değişkenlerin Serbest Basınç mukavemeti Üzerine Etkisi (3B) Grafikler:*

Bağımsız değişkenlerin serbest basınç üzerindeki Şekil 12'de görülebileceği gibi etkisi Design Expert yazılımı ile CYY kullanılarak 3 boyutlu yüzey grafikleri ile araştırılmıştır. 3B grafiklerde, bir seferde cevap üzerine iki bağımsız değişkenin etkileri incelenmiştir. Kalan bir parametre sabit tutulmuştur çünkü ikiden fazla parametrenin etkisini aynı anda 3B grafiklerde göstermek mümkün değildir.

Şekil 12 bağımsız değişkenlerin serbest basınç mukavemeti üzerinde sinerjik etkisi için 3B cevap yüzeyi grafiklerini ve her bir bağımsız değişkenin serbest basınç üzerinde tek tek etkisini gösteren tek faktörlü grafiklerini temsil etmektedir. Şekillerden serbest basınç mukavemeti, su içeriği ve katkı oranının değişmesiyle ciddi bir farklılık göstermediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte serbest basıncın kür süresinin değişiminden ciddi miktarda etkilendiği, 16 gün kür süresinde maksimum değere ulaştığı ve 16 günden sonraki denemelerde ise düşüş trendi gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 12(a)'dan katkı oranı w%10'da sabit tutulup su içeriğinin %15'ten %23'e kür süresinin ise 0 günden 16 güne çıkarılması durumunda maksimum serbest basınç değerine ulaşıldığı ve bu noktadaki serbest basıncın yaklaşık 484 kN/m<sup>2</sup> olduğu açıkça görülmektedir. Katkı oranı w%10'da sabit tutularak kür süresi 0 gün ve su içeriği w%24'te yapılan denemede ise minimum serbest basınç değerine (yaklaşık 288 kN/m<sup>2</sup>) ulaşılmıştır. Katkı oranı sabit tutularak yapılan denemelerde su içeriğindeki %8'lik ve kür süresindeki 16 günlük artış ile serbest basınç değerinde yaklaşık olarak %68'lik bir artış gözlemlenmiştir. Şekil 12(b) kür süresinin 14 günde sabit tutulup diğer iki bağımsız değişkenin serbest basınç üzerinde etkilerini temsil etmektedir. Şekilden açıkça görüldüğü gibi sabit kür süresinde en yüksek serbest basınç değerine (476,4 kN/m<sup>2</sup>), w%11 katkı oranı ve w%23 su içeriği kullanılması durumunda, en düşük serbest basınç değerine (388,9 kN/m<sup>2</sup>) ise w%5 katkı oranı ve

w%15 su içeriği kullanılması durumunda ulaşılmıştır. Sabit kür süresinde serbest basınç değerinde yaklaşık %22'lik bir artış tespit edilmiştir. Şekil 12(c) sabit su içeriğinde (w%20) kür süresinde ve katkı oranındaki değişimlerin serbest basınç üzerindeki etkisini temsil etmektedir. w%20 su içeriğinde en yüksek serbest basınç değerine (472,5 kN/m<sup>2</sup>), yaklaşık olarak 15 gün kür süresinde ve w%13 katkı oranında kullanılması durumunda, en düşük serbest basınç değerine ise (290 kN/m<sup>2</sup>), 0 gün kür süresine ve %5 katkı oranı kullanılması durumunda ulaşılmıştır. Sabit su içeriğinde serbest basınçtaki artış yaklaşık olarak %62 olarak belirlenmiştir. Şekil 12 (d), (e) ve (f) kısımlarında serbest basınç mukavemeti değerlerinin değişiminin ayrı değişkenlere göre değişimi verilmiştir. Bu grafiklerin ortak sonucu Tablo 11'de optimum şartlar olarak verilmiştir.



Şekil 12. Bağımsız değişkenlerin serbest basınç mukavemeti üzerine etkisini gösteren 3B grafikler

#### Optimum Şartların Belirlenmesi:

Tüm deneysel veriler göz önünde bulundurularak zemin stabilizasyonu için serbest basınç değerini maksimum yapacak optimum proses parametrelerini belirlemek amacıyla su içeriği, kür süresi ve katkı oranı çalışılan aralıkta tutularak Dizayn Expert 11 yazılımı kullanılarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon standartları ve elde edilen optimum proses parametreleri Tablo 11'de verilmiştir. Su içeriği, kür süresi ve katkı oranı için optimum proses değişkenlerinin sırasıyla yaklaşık olarak w %23,6, 14,5 gün ve w %11,5 olduğu tespit edilmiş ve bu proses şartlarında elde edilen serbest basınç mukavemeti değerinin yaklaşık olarak 480,4 kN/m<sup>2</sup> olduğu model tarafından tahmin edilmiştir. Bu işlem koşullarında Box-Bhenken tasarım için Design Expert (DOE) 11.0.5.0 yazılımı (stat-Ease Inc., ABD) tarafından hesaplanan arzu edilebilirliğin 1 olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 11.** Optimum proses şartları

<b>Optimizasyon Standartları</b>				
<b>İsim</b>	<b>Hedef</b>	<b>En Düşük Limit</b>	<b>En Yüksek Limit</b>	
A:Su İçeriği	Çalışma aralığında	15	25	
B:Kür Süresi	Çalışma aralığında	0	28	
C:Katkı Oranı	Çalışma aralığında	5	15	
Serbest Basınç	maximize	288,21	472,15	
<b>Optimum Şartlar</b>				
<b>Su İçeriği</b>	<b>Kür Süresi</b>	<b>Katkı Maddesi</b>	<b>Serbest Basınç</b>	<b>Arzu Edirlik</b>
(w%)	(gün)	(w%)	(kN/m <sup>2</sup> )	
23,6	14,5	11,5	480,4	1

#### IV. SONUÇLAR

Doğal zeminin kıvam limitleri incelendiğinde karayolu teknik şartnamesinde istenilen sınır değerleri sağlamadığı ancak %10 katkı eklendiğinde şartname sınırlarının sağlandığı görülmüştür. Katkı oranı içeriğinin ise %67 Piroliz malzemesi %33 Uçucu kül olması durumunda şartname sınır değerlerini en iyi ulaşıldığı kombinasyon olarak belirlenmiştir.

%10 katkı oranıyla yapılan proktor deney setleri incelendiğinde, katkı içeriğindeki piroliz malzemesinin oranının artışına bağlı olarak optimum su muhtevasının yükseldiği, maksimum kuru yoğunluk değerinin ise azaldığı gözlemlenmiştir. Kullanılan piroliz malzemesinin düşük tane yoğunluğa sahip olması nedeniyle kuru yoğunluğun azalmasına boşluklu yapısı nedeniyle de optimum su muhtevasının artmasına sebep olduğu değerlendirilmiştir.

Serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde aynı kür süresi ve katkı oranına sahip olan numunelerde artan su içeriğinin UCS değerinde %36'ya varan artışlara sebep olduğu görülmüştür. Ancak bu çıkarım kür süresinin sıfır olduğu durumda geçersizdir. Kür süresi sıfır olduğu durumda su miktarının artışı taneler arasında boşluklara neden olduğundan UCS değerlerini düşürmekte öte yandan kür süresinin en az 14 gün olduğu durumda ise suyun hidratasyon için kullanılıyor olması ve ortamda bulunması UCS oranına katkı olarak yansımıştır.

%25 su oranına sahip numunelerin UCS değerleri incelendiğinde; saf zemin numunesine göre 14 kür edilmiş %15 oranında katkı eklenmesinin UCS değerini %163 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Saf zeminde %25 oranında su optimum değer üstünde olup taneler arasında su dolu boşluklara neden olmakta ve UCS değerini düşürmektedir. Oysaki %15 katkıda aynı su oranı hidratasyona katkı sağlamakta ve UCS değerini %163 oranında artırmaktadır.

Benzer su içeriklerinde hazırlanan saf zemin ve katkılı numunelerinde UCS değeri artışının %51-163 aralığında olduğu görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde stabilize edilmiş numunelerdeki su içeriğindeki artış numunelerin serbest basınç mukavemet değerlerinin daha yüksek sonuç vermesine neden olduğu görülmüştür buna göre; %10 katkı oranı %20 su içeriği ve 14 gün kür %76 mertebelerindeyken, aynı katkı oranı ve kür süresinde %15 su içeriği için bu artış oranı %51, %25 su oranında ise bu artış %163 olarak belirlenmiştir.

Optimizasyon sonuçlarından elde edilen ideal katkı oranı, su içeriği ve kür süresi sırasıyla %11,5, %23,6 ve 14,5 gün olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar irdelendiğinde stabilize edilmiş numunelerin optimum su içeriği yaklaşık olarak proktor deneyi için optimum su içeriği sonuçları (%23,6 ile %24,94) ile örtüşmekte olduğu tespit edilmiştir.



**TEŞEKKÜR**

Bu makalenin oluşmasını sağlayan çalışma Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi olarak 2022/AP/0006 kodu ile desteklenmektedir. Ayrıca makaleyi oluşturan çalışmada piroliz edilmiş çay çöpü, Rize Belediyesi tarafından gönderilmiş olup, uçucu kül ise AKSA Akrilik Sanayi tarafından temin edilmiştir.

**KAYNAKLAR**

1. Zhang X, Presler W (2012) Use of H2Ri Wicking Fabric to Prevent Frost Boils in the Dalton Highway Beaver Slide Area, Alaska. The University of Alaska, Fairbanks. <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/7552> Erişim 7 Ekim 2023
2. Seferoğlu, A. G., Seferoğlu, M. T., & Akpınar, M. V. (2018). Experimental study on cement-treated and untreated RAP blended bases: Cyclic plate loading test. *Construction and building materials*, 182, 580-587.
3. Fenerci K, Ceyhan Erdoğan M, Abut Y (2023) The economic potentials of reclaimed asphalt pavements (RAP) in urban road infrastructure a case study of Yalova city. *J Innov Eng Nat Sci* 2-2:205–218. <https://doi.org/10.29228/jiens.70524>.
4. Habert G, d'Espinose de Lacaillerie J B, Roussel N (2011), An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *J Clean Prod* 19-11:1229–1238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>.
5. European Commission (EC) (2018) Competitiveness of the European cement and lime sectors. [https://www.wifo.ac.at/jart/prj3/wifo/resources/person\\_dokument/person\\_dokument.jart?publikationsid=61003&mime\\_type=application/pdf](https://www.wifo.ac.at/jart/prj3/wifo/resources/person_dokument/person_dokument.jart?publikationsid=61003&mime_type=application/pdf) Erişim 7 Ekim 2023
6. Keskin İ, Şentürk İ, Yumrutaş H İ, Totiç E, Ateş A (2023) An environmentally friendly approach to soil improvement with by-product of the manufacture of iron. *BioResources* 18-1:2045–2063. <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.2045-2063>.
7. Öztürk O, A. Öner A (2024) Parke taşı üretiminde kükürt polimer beton kullanımının araştırılması. *J Innov Eng Nat Sci* 4-1:67-77. <https://doi.org/10.61112/jiens.1349836>.
8. Eskisar T, Aksu G (2020) Zeminlerde tek fazlı geopolimerizasyon uygulaması ve geopolimerizasyonun serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi. *Konya J Eng Sci* 8-3:466–478. <https://doi.org/10.36306/konjes.611595>.
9. Abdullah M S, Ahmad F, Mustafa Al Bakri A M (2015) Geopolymer application in soil: a short review. *Appl Mech Mater* 754–755:378–381. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.754-755.378>.
10. Davidovits J (2015) *Geopolymer Chemistry and Applications*, 4th Edition. Saint-Quentin, France.
11. Çınar M, Erbaşı B (2022) Geoteknik uygulamalarda geopolimerlerin kullanılabilirliğinin incelenmesi, literatür çalışması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilim Derg* 25-4:774–789. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1110640>.
12. Canbaz M, Topçu İ B (2008) 69 Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçlarda Asit Etkisi. *J Sci Technol Dumlupınar Univ* 016:69–80.
13. Işık F, Akbulut R K (2018) Geri Dönüştürülmüş Karbon Karasının Killi Zeminlerin Kıvam Limitlerine Etkisi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü Derg* 8-2:123–130. <https://doi.org/10.21597/jist.428335>.
14. Saygı Yalçın B (2017) Türk linyit kömürlerinin organik katkı maddesi kullanılarak briketlenmesi. Tez, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
15. Wang L ve diğ (2020) Biochar as green additives in cement-based composites with carbon dioxide curing. *J Clean Prod* 258:120678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120678>.
16. Hacımustafaoğlu T, Kütük T, Bekem Kara İ (2023) Çay fabrikalarında açığa çıkan kömür küllerinin beton yollarda ince agrega olarak değerlendirilmesi. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilim Derg* 4-2:196–207. <https://doi.org/10.53501/rteufemud.1377449>.
17. Gonzalez J, Sargent P, Ennis C (2021) Sewage treatment sludge biochar activated blast furnace slag as a low carbon binder for soft soil stabilisation. *J Clean Prod* 311:127553. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127553>.
18. Geçkil T, Sarıcı T, Karabaş B (2021) Siyah karbon ile stabilize edilen taban zeminin yol esnek üst yapı maliyetine etkisi. *Eur J Sci Technol* 23:222-235. <https://doi.org/10.31590/ejosat.862682>.
19. Basha E A, Hashim R, Mahmud H B, Muntohar A S (2005) Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Constr Build Mater* 19-6:448–453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001>.
20. Uzamer Zemin Yapı Ltd Şti (2021) Yalova İli Samanlı Köyü 3088 ada 2 parsel jeolojik etüt raporu, Yalova.

21. Yilmaz F, Kuvat A, Kamilođlu H A (2023) Optimizing and investigating durability performance of sandy soils stabilized with alkali activated waste tuff-fly ash mixtures. *Sādhanā* 48-3:185. <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02250-9>.
22. Hussan Z A, Al-Janabi A T (2018) Studying some mechanical properties of soft soils treated by CaCo<sub>3</sub>-Nano Material. *Int J Civ Eng Technol* 9-11:870–877.
23. Karayolları Genel Müdürlüğü (2013) Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Yayınları Ankara, Türkiye.