



Siyah Karbon ile Stabilize Edilen Taban Zeminin Yol Esnek Üst Yapı Maliyetine Etkisi

Tacetin Geçkil¹, Talha Sarıcı², Bahadır Karabaş³

^{1*} İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-8070-6836), tacetin.geckil@inonu.edu.tr

² İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-8488-5851), talha.sarici@inonu.edu.tr

³ 2'nci Ordu Komutanlığı, Malatya, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-0416-9121), karabasbaha@gmail.com

(İlk Geliş Tarihi 16 Ocak 2021 ve Kabul Tarihi 20 Mart 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.862682)

ATIF/REFERENCE: Geçkil, T., Sarıcı, T. & Karabaş, B. (2021). Siyah Karbon ile Stabilize Edilen Taban Zeminin Yol Esnek Üst Yapı Maliyetine Etkisi. *European Journal of Science and Technology*, (23), 222-235.

Öz

Bu çalışmada, atık araç lastiklerden geri dönüşüm ürünü olarak elde edilen siyah karbonun, yol taban zemininin stabilizasyonunda kullanılmasının, esnek yol üst yapı tabaka kalınlıklarına ve maliyetine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk olarak zayıf zemin elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri ve piknometre deneylerine tabi tutularak özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra zemine ağırlıkça %2,5; %5, %10, %15, %20 oranlarında siyah karbon ilave edilerek stabilize karışım numuneleri hazırlanmıştır. Saf ve katkılı zemin numuneleri ASTM D698 standardına göre standart proktor deneyine tabi tutulduktan sonra numuneler, 1 ve 7 günlük kür süresi sonrasında ASTM D2166 standardına göre serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda en yüksek mukavemet değeri %10 siyah karbon katkılı karışımlardan elde edilmiştir. Hazırlanan saf ve %10 siyah karbon katkılı numuneler 1 ve 7 günlük kür sonrasında ASTM D1883 standardına göre Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyine tabi tutulmuştur. CBR değerinin; %10 siyah karbon katkısı ile, 1 günlük kür sonunda 1,28 kat arttırdığı ve 7 günlük kür sonunda 1,77 kat arttırdığı tespit edilmiştir. Bu CBR değerleri kullanılarak AASHTO 1993 yöntemine göre esnek yol üst yapı tabaka kalınlıkları tasarımı yapılmış ve üst yapı maliyetleri değerlendirilmiştir. Hesaplamalar neticesinde, siyah karbon ile stabilize edilen zeminlerin üst yapı maliyetlerinin, 1 günlük kür sonunda %5,13 oranında ve 7 günlük kür sonunda %14,37 oranında düşüş gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zayıf Zemin, Siyah Karbon, Stabilizasyon, CBR, AASHTO metodu.

The Effect of Subbase Stabilized by Carbon Black on the Cost of Road Flexible Superstructure

Abstract

In this study, the effects of using black carbon obtained as a recycling product from waste vehicle tires for stabilization of a road base floor on flexible road superstructure layer thickness and cost were investigated. Firstly, the properties of black carbon were determined by experimenting with weak soil sieve analysis, hydrometer consistency limits, and pycnometer test. Secondly, various mass ratios (2.5%, 5%, 10%, 15%, 20%) of black carbon were added to the mixture of stabilization samples. Pure and mixture samples were experimented with by using a proctor test according to the ASTM D698 standards. After 1 and 7 days curing period, they were experimented with under an unconfined compression test according to the ASTM D2166 standards. Experimental results showed that the highest strength values were obtained from the mass ratio of the 10% black carbon mixture sample. These samples were experimented with under a CBR test according to the ASTM D1883 standards after 1 and 7 days curing period. CBR value; It was determined that it increased 1.28 times at the end of 1 day of cure and 1.77 times after 7 days of cure. Using these CBR values, according to the AASHTO 1993 method; flexible road superstructure layer thicknesses were designed and their costs were evaluated. As a result of the calculations; It was determined that in case of improvement with 10% C by applying 1 and 7 days cure, the superstructure costs decreased by 5.13% and 14.37%, respectively.

Key words: Weak soil, Carbon Black, Stabilization, CBR, AASHTO method.

¹ Corresponding Author: karabasbaha@gmail.com

1. Giriş

Geçmişten günümüze; toplumların gelişmesi, yerleşim alanların büyümesi ve ticari faaliyetlerin yaygınlaşması ile birlikte karayolu ihtiyacı önemli ölçüde artmıştır. Bu ihtiyacı karşılanması maksadıyla karayollarının çeşitli iklim, arazi ve zemin şartlarında yapılması gerekebilmektedir. Yapılan etüt ve araştırmalar, tetkik edilen zeminlerin her zaman yol tasarımı için istenilen özelliklere sahip olmayabileceğini göstermektedir. Bu sebeple yapılacak yolun ekonomik ve güvenilir şekilde tasarlanması için yol altında kalan zeminin istenilen mühendislik özelliklerini sağlayacak şekilde stabilize edilerek güçlendirilmesi gerekir. Zemin stabilizasyonu için genellikle sönmüş kireç, bitüm ve çimento gibi malzemeler kullanılmaktadır. Ancak; son yıllarda atık ve geri dönüşüm ürünlerinin kullanılmasına yönelik çalışmalarda yapılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler kolay temini ve yapım maliyetlerini azaltmaları sebebiyle tercih edilmektedir. Bu kapsamda çeşitli atık malzemelerle stabilizasyon (iyileştirme) çalışmalarının yapıldığı görülmüştür. Bu tür ürünlerin değerlendirilmesinin ülke ekonomisi ve çevrenin korunmasına faydalı olacağı düşünülmektedir. Keskin (2004), yaptığı çalışmada farklı killi zeminleri kireç ile iyileştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada öncelikle zeminin kireç stabilizasyonuna uygun olup olmadığını laboratuvar çalışmalarıyla belirlemiş ve daha sonra arazi deneyleri gerçekleştirmiştir. Kireç ile yapılan iyileştirme sonucunda CBR deneylerinde yeşil kilde 16 kat, kahverengi kilde ise 21 kat artış olduğu sonucuna ulaşmıştır [1]. Basha ve diğ.(2005), çalışmasında pirinç kabuğu külü ve çimento kullanarak kil bir zeminin iyileştirilmeye çalışmışlardır. Pirinç kabuğu külü ve çimento ilavesinin maksimum kuru yoğunluğu azalttığı, optimum su muhtevası değerini de arttırdığı sonucunu elde etmişlerdir. CBR değerinin; %4 çimento ve %5 pirinç kabuğu külü kombinasyonu ile %60 kadar arttığını tespit etmişlerdir [2]. Akbulut ve diğ. (2007), %2 atık lastik lifi takviyeli killi zeminlerde yaptığı deneylerde, %2 atık lastik lifi takviyeli killi zeminlerin serbest basınç değerlerinin, killi zeminin 1,97 kat daha yüksek olduğunu tespit etmiştir [3]. Brooks (2009), yaptığı çalışmada uçucu kül ve pirinç kabuğu külünün zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Şişme potansiyeli olan kil zemine pirinç kabuğu külü ve uçucu kül ilave ederek, serbest basınç ve CBR deneyi yapmıştır. Uçucu kül oranının 0'dan %25 artması ile kayma gerilmesinin %105, şekil değiştirmenin ise %50 arttığını tespit etmiştir. Pirinç kabuğu külü oranının 0'dan %12'ye artması ile CBR değerinin %47, serbest basınç dayanımı değerinin %97 arttığını belirlemiştir [4]. Keskin ve Laman (2012), kötü derecelenmiş ince kumu (SP) atık lastik parçacıkları ile iyileştirmeye çalışmışlardır. Karışımlarda atık lastik oranının; %10 ve %15 olması ile kayma mukavemetinde %100 artış olduğunu, %20'den daha fazla olması ile kayma mukavemetinde düşüş olduğunu belirlemişlerdir [5]. Shabana ve diğ. (2014), siltli kum zeminin kırılmış Hindistan cevizi kabuğu ile iyileştirmeye çalışmışlardır. Yapılan çalışmada maksimum 1cm² yüzey alanına sahip %16 oranında kırılmış Hindistan cevizi kabuğu ile yapılan iyileştirmenin taşıma gücünü arttırdığı görülmüştür [6]. Yarbaşı (2016), yaptığı çalışmada kil bir zeminin değişik boyutlarda (1,18 mm; 2 mm; 3,15 mm) atık lastik ile iyileştirmeye çalışmıştır. Bu amaçla, 28 günlük kür sonunda yapılan serbest basınç deneyi sonucunda; %0,5 atık lastik (1,18 mm.) karışımında %35,3; %0,5 atık lastik (2.00 mm) karışımında %8,6 ve %2 atık lastik (3,15 mm.) karışımında ise %14,2 mukavemet artışı olduğu belirlemiştir [7]. Karaman ve Ecemiş (2017) atık lastik

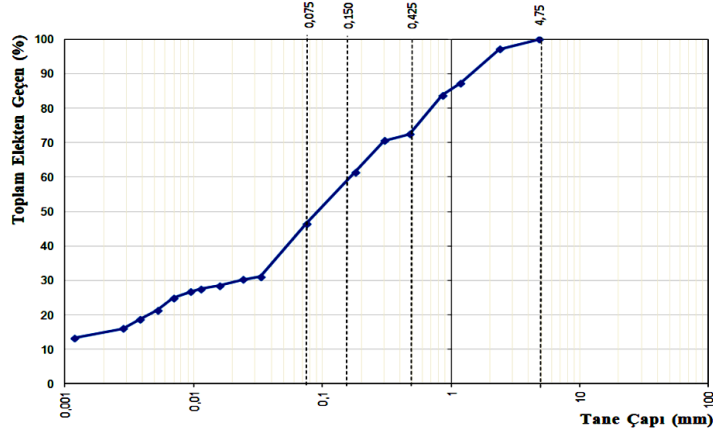
kırıntılarını ince kum (SP) ile karıştırarak hazırladığı numuneler ile sarsma tablası deneyleri yapmıştır. Karışımının sıvılaşma direncinin, temiz kumun sıvılaşma direncinden fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumun lastik kırıntılarının suyu drene etmesinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır [8]. Işık ve Akbulut (2018) killi zemine ağırlıkça %1, %3, %5 ve %10 oranında siyah karbon katarak, likit limit ve plastik limit deneyleri yapmıştır. Siyah karbon malzemesi arttıkça likit limit ve plastik limitin azaldığını tespit etmiştir [9]. Kumar S.N ve diğ. (2019), kum zemine Hindistan'ın Andhra Pradesh eyaleti, Bobbili, Vizianagaram Dist. tesisinden temin edilen siyah karbon malzemesi karıştırarak karışımlar hazırlamışlardır. Siyah karbon oranının arttıkça optimum su muhteviyatı değerinin arttığı, maksimum kuru birim ağırlığı değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca; yapılan CBR deneyinde optimum karışımın %6 olduğu ve CBR değerini 1,2-1,5 kat arttırdığını tespit etmişlerdir [10]. Zemin stabilizasyonunda atık ve geri dönüşüm ürünlerinin kullanılması kapsamında; yılda yaklaşık 17 milyon ton kadar oluşan atık araç lastiklerinin bir geri dönüşüm malzemesi olarak birçok alanda kullanılmasına rağmen [11], yapılan literatür incelemesi neticesinde; atık araç lastiklerden elde edilen siyah karbonun zayıf zeminin stabilizasyonu için kullanılması durumunda, esnek yol üst yapısı kalınlık ve maliyetine etkilerinin araştırılmadığı görülmüştür.

Bu çalışmada, siyah karbon ile dayanımı artırılan zayıf zeminin, esnek yol üst yapısı kalınlık ve maliyetine etkileri, yapılan deneysel çalışmalar ve hesaplamalar ile araştırılmıştır. Bu amaçla, saf zemin numunesine elek analizi, hidrometre deneyi, kıvam limitleri deneyleri, piknometre ve proktor deneyi yapılmıştır. Siyah karbonun %2,5; %5, %10, %15, %20 oranlarında katılarak güçlendirilen zemin karışımlarına proktor, serbest basınç, CBR deneyleri uygulanmış, AASHTO 1993 tasarım yöntemi yardımıyla esnek yol üst yapı kalınlığı tasarımı yapılmış ve üst yapı maliyetleri hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Kullanılan Zemin

Çalışmada yol taban zeminini olarak kullanılan zemin malzemesi, İnönü Üniversitesi Yerleşkesi içerisinde bulunan bir sahadan temin edilmiştir. Deneylerde kullanılacak zemin örneğinin özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla ASTM C136 / C136M uygun elek analizi ve ASTM D422-63'e göre hidrometre deneyi yapılarak, zemin içindeki tane boyutlarının dağılımı tespit edilmiştir. Tespit edilen granülometri eğrisi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Granulometri Eğrisi

Akabinde, zemin numunesinin kıvam limitleri (likit limit ve plastik limit) ASTM D4318 uygun tespit edilmiş ve özgül ağırlığının belirlenmesi amacıyla ASTM D824 uygun olarak piknometre deneyi yapılmıştır. Daha sonra ASTM D698 standart proktor deneyi yardımıyla zeminin maksimum kuru birim hacim

ağırlığı ve optimum su muhteiyatı belirlenmiştir. Zemin örneğinin killi kum (SC) olduğu ve AASHTO sınıflandırma sistemine göre de zemin tipinin (A-6) olduğu tespit edilmiştir. Deneyler sonucu elde edilen zemin özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Zeminin Özellikleri

Değişken Adı	Simge	Birim	Değeri
Dane birim hacim ağırlığı	γ_s	g/cm ³	2,714
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı	γ_{kmax}	g/cm ³	1,948
Optimum su içeriği	W_{opt}	%	14,1
Likit limit	W_L	%	25,87
Plastik limit	W_p	%	14,56
Plastisite İndisi	PI	%	11,31
Sınıflandırma (Birleştirilmiş Zemin Sınıfı)	-	-	SC
AASHTO Sınıflandırması	-	-	A-6

2.2 Siyah Karbon

Bu çalışmada katkı olarak, atık araç lastiklerinden elde edilen ve geri dönüşüm ürünlerinden biri olan siyah karbon kullanılmıştır. Siyah Karbon, karbon esaslı, siyah renkli, ince

parçacıklardan oluşan, bir malzemedir. Bu malzeme, kullanım ömrünü tamamlamış araç lastiklerinden piroliz yöntemi ile elde edilen bir geri dönüşüm ürünüdür [12]. Tablo 2'de çalışmada kullanılan siyah karbon özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada Kullanılan Siyah Karbon Özellikleri [12]

Değişken Adı	Birim	Değeri
Görünüm	-	Toz
Renk	-	Siyah
Suda Çözünürlüğü (20 °C)	-	Çözülmez
Koku	-	Kokusuz
Erime noktası	°C	> 3000
Kaynama noktası	°C	> 3000
Dane birim hacim ağırlığı (γ_s)	g/cm ³	1,7-1,9
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	°C	> 140
Element Analizi	%	C % 56,73
		H %2,09
		S %2,11
		O %39,07

2.3. Standart Proktor Deneyi

Zeminin numunesindeki maksimum kuru birim hacim ağırlığının ve optimum su muhteiyatının belirlenmesi

maksadıyla, zemin numunesindeki havanın, su ve mekanik araçlar vasıtasıyla dışarı atılması esasına dayanan standart proktor deneyi ASTM D698 uygun yapılır. Deneyde kullanılacak kalıbın ebatları (çap 105 mm ve h=115,5 mm)

ölçülür ve tartılarak ağırlığı kaydedilir. Daha sonra zemin numunesi etüvde kurutularak (105 °C'de 24 saat) karar verilen oranlarda su eklenerek yoğrulur. Yoğrulan numuneler proktor kalıbına serilir ve sonra 2,5 kg ağırlığında tokmak ile 25 kez vurulup sıkıştırılır. Serilme işlemi 3 kademede gerçekleştirilir, son tabaka serildikten sonra üst kısmı düzeltilir ve tartılır. Farklı su içeriklerinde bu işlem 5 defa tekrarlanır, her defasında su muhteviyatı ve kuru birim hacim ağırlığı hesaplanır. Hesaplanan değerler esas alınarak göre doygunluk eğrisi çizilir, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhteviyatı değerleri belirlenir [13].

2.4. Serbest Basınç Deneyi

Kohezyonlu zeminlerde kayma mukavemetinin belirlenmesi amacıyla uygulanan serbest basınç deneyi, ASTM D2166 standardına uygun yapılıdır. Deneyde aksel gerilmenin en büyük değeri serbest basınç dayanımını (q_u), drenajsız kayma mukavemeti ise; $\tau = c_u = q_u/2$ bağıntısına göre hesaplanır. Deney uygulamasında, zemin numunesi etüvde kurutularak (105 °C'de 24 saat) karar verilen oranlarda su eklenerek yoğrulur. Yoğrulan numuneler serbest basınç kalıbına serilir ve sonra tokmak ile 10 kez vurulup sıkıştırılır. Serilme işlemi 4 kademede gerçekleştirilir ve son tabaka serildikten sonra kalıptan çıkarılır. Daha önceden belirlenen kür süresi için muhafaza edilir ve kür süresini tamamlayan numunelere deney uygulanır. Deney ekipmanındaki presin 100 kN dayanıma kadar yükleme yapması, deneyde dakikada %0,5-2 arası birim boy kısalmasının olması, yapılan deneyin 10 dakikayı geçmemesi gerekir. Deney sonrasında deformasyon ve şekil değiştirmeler esas alınarak dayanım değerleri tespit edilir [13]. Şekil 2'de serbest basınç deneyi seti gösterilmiştir.



Şekil 2: Serbest Basınç Deneyi Seti

2.5 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

CBR deneyi, daha önceden tespit edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhteviyatı esas alınarak hazırlanan numunelere, belirlenen kür süresinin ardından, alanı 1935 mm² olan (çapı 50 mm) pistonun 1,27 mm/dk hızla zemine itilmesi ile bulunan yük - penetrasyon bağlantısı vasıtasıyla taşıma gücünün hesaplanması esasına dayanır. Deney ASTM D1883-13 standardına uygun yapılıdır. Deney sonucunda bulunan CBR değeri; deneyde pistonun zemine 2,5 mm ve 5 mm penetrasyon yapması için uygulanan yük değerinin, pistonun standart kırma taş numunesine aynı derinlikte batması için uygulanan yük değerine bölünmesi ile

Tabaka kalınlıkları AASHTO (1993) Tasarım Rehberine göre Denklem (1) ile hesaplanmaktadır [14].

$$\log(T_{8.2}) = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log(SN+1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log M_R - 8.07 \quad (1)$$

Burada;

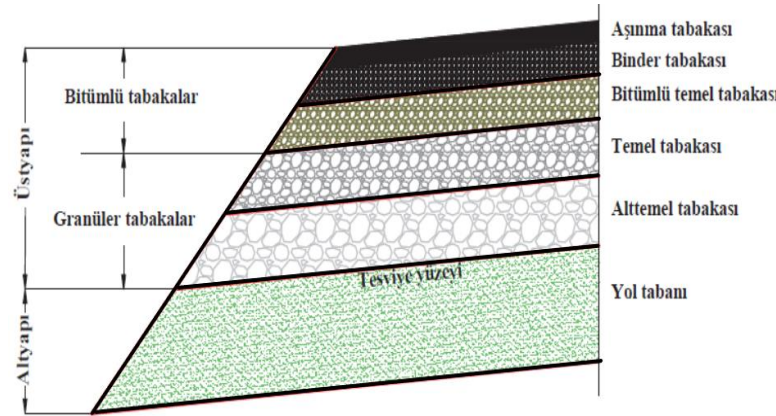
bulunan sonucun yüzde ifadesidir. CBR deneyinin uygulamasında, ilk önce kullanılacak kalıbın ebatları (çap 150 mm ve h=127,3 mm) kontrol edilir ve kaydedilir. Daha sonra, kullanılacak zemin numunesi etüvde 105 °C'de 24 saat kurutulur ve optimum su muhteviyatı esas alınarak zemin numunesi hazırlanır. Hazırlanan zemin numunesi CBR kalıbına 3 kademede serilir ve her tabaka serildikten sonra 2,5 kg ağırlığında tokmak ile 56 kez vurulup sıkıştırılır. Son tabaka serildikten kalıp ile numune birlikte tartılır. Planlanan kür süresini tamamlaması için muhafaza edilir ve kür süresini tamamlayan numuneler deney setine yerleştirilir. Deney sonucunda 2,5 mm ve 5 mm penetrasyon için CBR değerleri belirlenir [13]. Şekil 3'de CBR deney seti gösterilmiştir.



Şekil 3: CBR Deneyi Seti

2.6 AASHTO Metodu ile Esnek Üst Yapısı Tasarımı

Karayolu esnek üstyapısı tasarımında, bağlayıcı olarak asfalt çimentosu kullanılmaktadır. Genel olarak asfalt betonu kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşmaktadır. Tasarımda proje ömrü ve tabaka kalınlıkları belirlenirken; zemin durumu, trafik, bölgesel ve ekonomik faktörler göz önüne alınır [14]. Şekil 4'de esnek üstyapıyı oluşturan tabakalar gösterilmiştir.



Şekil 4: Esnek Üstyapı Kesit Görünümü [15]

$T_{8,2}$: 8,2 ton eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı (proje trafiği),

M_R : Taban zemini efektif elastisite modülü (psi),

S_0 : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası,

Z_R : Standart sapma,

SN: Üstyapı kalınlığını bulmak için gerekli üstyapı sayısı,

P_0 : Başlangıç servis kabiliyeti indeksi,

P_t : Nihai servis kabiliyeti indeksi,

ΔPSI : Toplam servis yeteneği kaybını göstermektedir.

SN değeri Denklem 1 ile tespit edilmekten sonra tabaka katsayıları Tablo 3'e göre alınarak esnek üstyapı tabaka kalınlıkları Denklem 2 ile hesaplanmaktadır [14] .

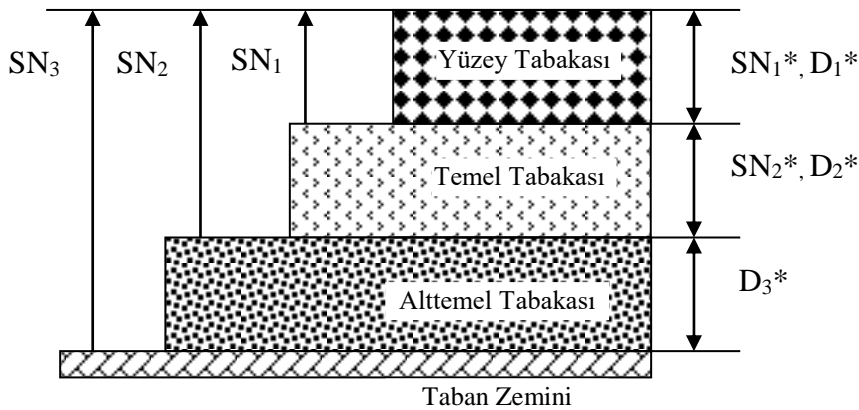
$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times M_2 + a_3 \times D_3 \times M_3 \dots \dots \dots a_i \times D_i \quad (2)$$

Bu denklemde; D_1, D_2, D_3 kaplama, temel, alttemel tabaka kalınlıkları, a_1, a_2, a_3 kaplama, temel ve alttemel tabakalarının izafi mukavemet katsayılarını; M_2, M_3 ise temel ve alttemel tabakası drenaj katsayılarını göstermektedir [14]. Tabaka katsayıları Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3: Esnek Üstyapı İçin Tabaka Katsayıları [14]

Tabaka Cinsi	Marshall Stabilitesi (kg)	CBR (%)	İzafi Mukavemet Katsayısı (a)
Kaplama Tabakası			
Aşınma	≥ 900	-	0,42
Binder	≥ 750	-	0,40
Bitümlü Temel	≥ 600	-	0,36
Temel Tabakası			
Granüler Temel	-	≥ 100	0,14
Plentmiks Temel	-	≥ 120	0,15
Alttemel Tabakası			
Kum-Çakıl Alttemel	-	≥ 30	0,11
Kırmaş Alttemel	-	≥ 50	0,13

Esnek üstyapı tabaka kalınlıkları tespit edildikten sonra kalınlıklarının kontrolü yapılır. Şekil 5'de verilen SN* değerleri hesaplanarak tabaka



Şekil 5: Esnek Üstyapıda Üstyapı Sayıları [16]

Şekilde;

SN₁: Temel tabakası üzerine gereken SN,

SN₂: Alttemel tabakası üzerine gereken SN,

SN₃: Taban üzerine gereken SN,

* : Kullanılan malzemeye göre mevcut değerleri göstermektedir [16].

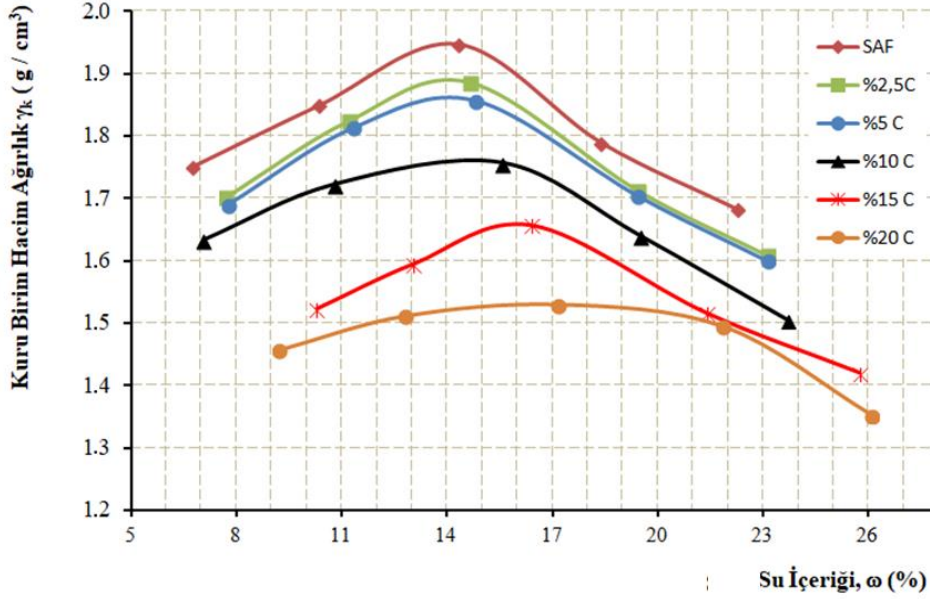
3. Bulgular ve Değerlendirme

Yol taban zemininin siyah karbon ile stabilizasyonunun esnek yol üst yapısı kalınlık ve maliyetine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, ilk olarak zemin numunesine elek analizi, hidrometre deneyi, kıvam limitleri deneyleri, piknometre deneyi yapılmıştır. Akabinde, saf zemin ve ağırlıkça %2,5; %5, %10, %15, %20 oranlarında siyah karbon ile güçlendirilen numunelere standart proktor deneyi, 1 ve 7 gün kür süresinin ardından serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Serbest basınç deneyi ile belirlenen optimum karışım oranına (%10C) göre 1 ve 7 gün kür süresinin ardından CBR deneyleri yapılmıştır. Bulunan CBR deneyleri sonuçlarına göre; saf zemin ve siyah

karbon katkılı zemin için AASHTO 1993 tasarım yöntemi esas alınarak esnek yol üst yapısı kalınlığı tasarımı yapılmış ve üst yapısı maliyetleri hesaplanmıştır

3.1 Standart Proktor Deneyi Bulguları

Saf zemin ve %2,5; %5, %10, %15 ve %20 siyah karbon (C) ilaveli numuneler, standart proktor deneyine tabi tutulmuştur. Deney neticesinde; optimum su içerikleri (%w) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmax}) tespit edilmiştir. Deney sonucunda hesaplanan değerlere göre çizilen kompaksiyon eğrileri Şekil 6'da ve Tablo 4'de deney sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 6: Standart Proktor Deneyi Kompaksiyon Eğrisi

Tablo 4: Standart Proktor Deneyi Sonuçları

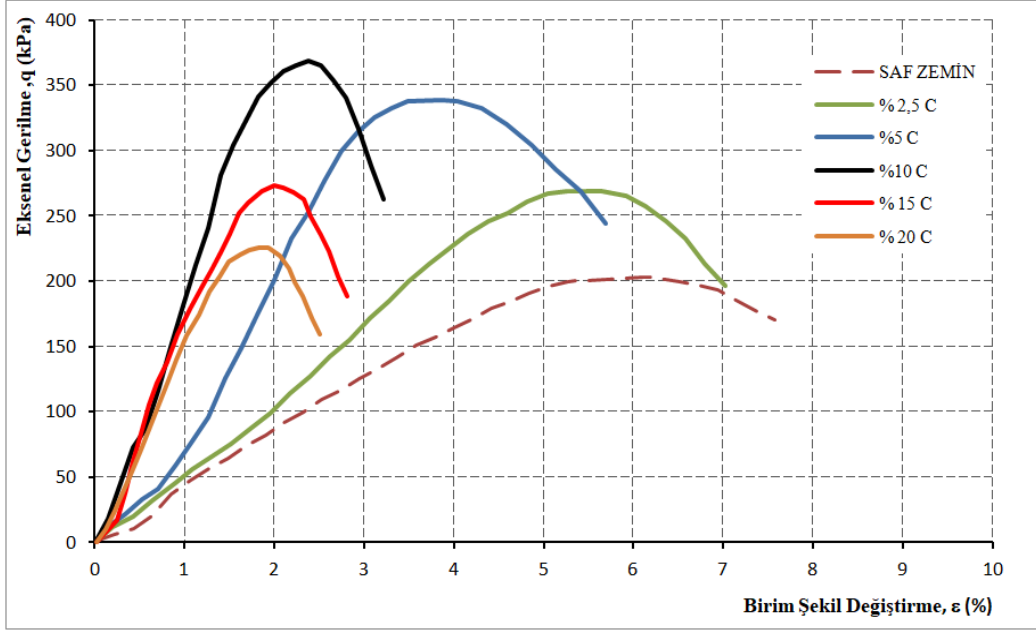
Test Numunesi	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı γ_k (g/cm³)	Optimum Su İçeriği %w
Saf Zemin	1,948	14,10
Saf Zemin+ %2,5 C	1,893	14,14
Saf Zemin+ %5 C	1,862	14,20
Saf Zemin+ %10 C	1,762	14,90
Saf Zemin+ %15 C	1,658	15,85
Saf Zemin+ %20 C	1,530	16,60

Katkı malzemesi olarak kullanılan siyah karbon, tanecikli ve boşluklu bir zincir yapısına sahiptir [17]. Deney sonucunda; siyah karbon oranı arttıkça %w değerinin arttığı, γ_k değerinin azaldığı görülmüştür, bu durumun siyah karbonun boşluklu yapısının karışımın absorbe kapasitesini artırması nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Bu sonucun literatür [10] ile farklılık göstermediği de tespit edilmiştir.

(ϵ) değerleri grafikleri Şekil 7 ve 8'de, elde edilen q- ϵ değerleri Tablo 5 ve 6'da verilmiştir.

3.2 Serbest Basınç Deney Bulguları

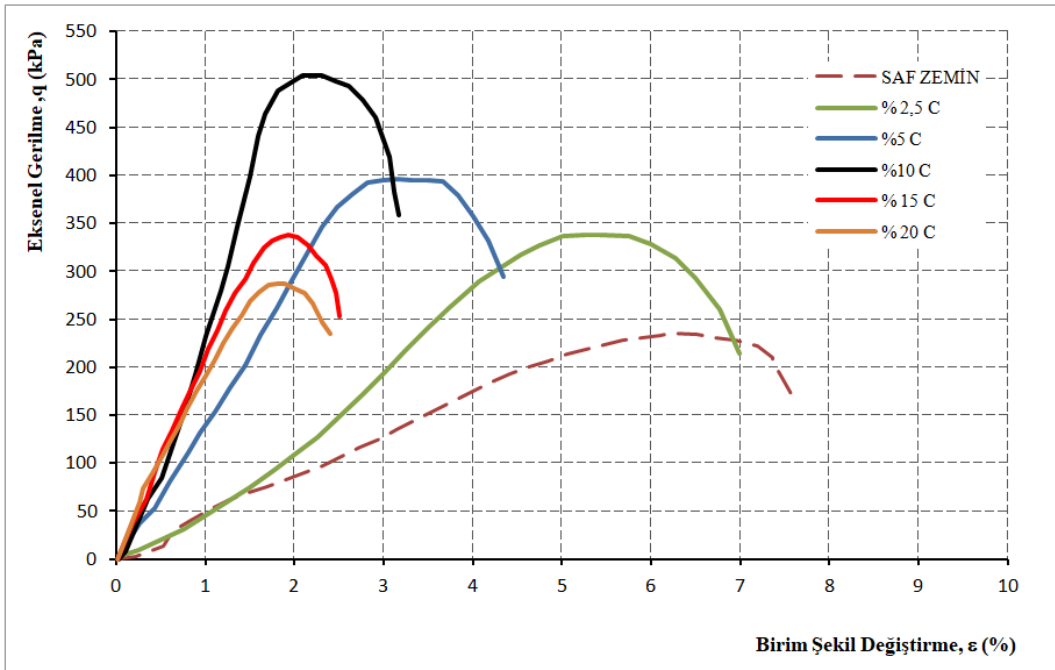
Serbest basınç deneyinde, saf zemin ve %2,5; %5, %10, %15 ve %20 siyah karbon ilaveli numuneler, standart proktor deneyinde tespit edilen %w ve γ_k değerleri esas alınarak hazırlanmıştır. Numuneler 1 ve 7 gün kür süresinin ardından serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin tespit edilen serbest basınç mukavemeti (q) ve birim şekil değiştirme



Şekil 7: 1 Günlük Kür Sonrası Serbest Basınç Deneyinden Elde Edilen q-ε Grafiği

Tablo 5: 1 Günlük Kür Sonrası Serbest Basınç Deneyinden Elde Edilen q-ε Değerleri

Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q(kpa)	Birim Şekil Değiştirme ε (%)
Saf Zemin	202,81	6,21
Saf Zemin+ %2,5 C	268,85	5,65
Saf Zemin+ %5 C	338,70	3,86
Saf Zemin+ %10 C	368,49	2,38
Saf Zemin+ %15 C	273,50	2,01
Saf Zemin+ %20 C	225,52	1,94



Şekil 8: 7 Günlük Kür Sonrası Serbest Basınç Deneyinden Elde Edilen q-ε Grafiği

Tablo 6: 7 Günlük Kür Sonrası Serbest Basınç Deneyinden Elde Edilen q - ε Değerleri

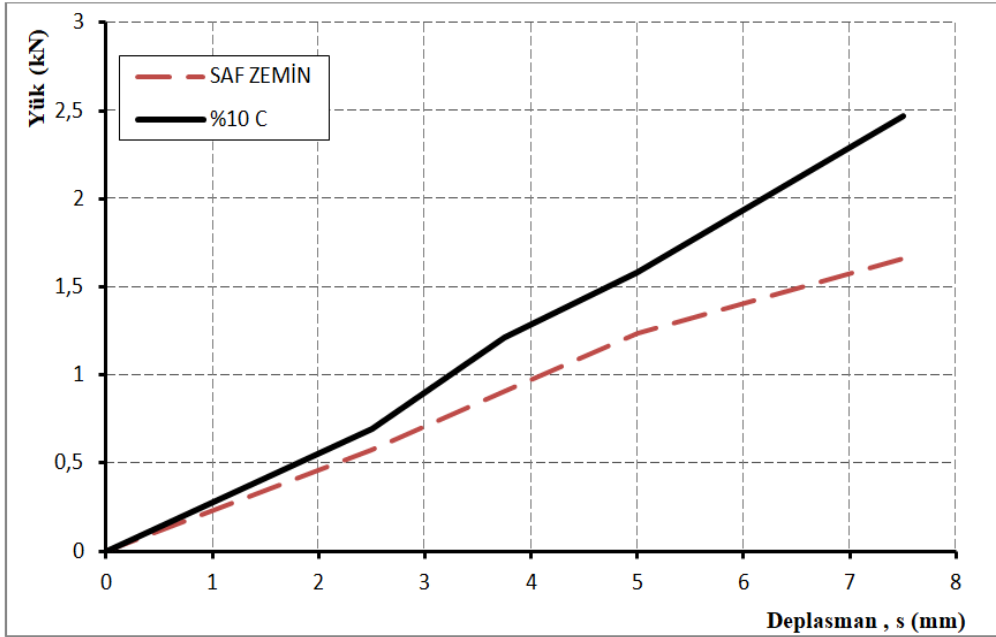
Test Numunesi	Serbest Basınç Mukavemeti q (kpa)	Birim Şekil Değişirme ε (%)
Saf Zemin	235,43	6,1
Saf Zemin+ %2,5 C	337,38	5,42
Saf Zemin+ %5 C	393,40	3,66
Saf Zemin+ %10 C	504,02	2,08
Saf Zemin+ %15 C	335,41	1,93
Saf Zemin+ %20 C	286,74	1,89

Serbest basınç deneyi sonuçları incelendiğinde; saf zeminin serbest basınç mukavemet değerinin, siyah karbon ile stabilize edilmesi ile arttırdığı görülmüştür. Siyah karbon ile güçlendirilen zeminlerde en büyük mukavemet değeri 1 ve 7 günlük kür sonunda %10 C ilaveli numunelerde tespit edilmiştir. Saf zemine göre mukavemet değerin 1 ve 7 günlük kür sonunda sırasıyla 1,82 ve 2,14 kat arttığı görülmüştür. Mukavemetteki bu önemli artış, siyah karbonun zeminlerin kohezyon kuvveti ve kayma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, optimum karışım miktarının %10C ile sınırlı kalmasının, literatürde [18-19]; siyah karbon katılan bileşimlerin sertliğinin artması sebebiyle, ilave edilen siyah karbon miktarının belirli bir limiti aşmaması gerektiği [18] ve malzeme sertliğinin siyah karbon ilavesiyle lineer olarak arttığı ancak, gerilme direncinin belirli bir

miktardan sonra azaldığı [19] görüşü ile örtüştüğü görülmektedir.

3.3 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyine ait Bulgular

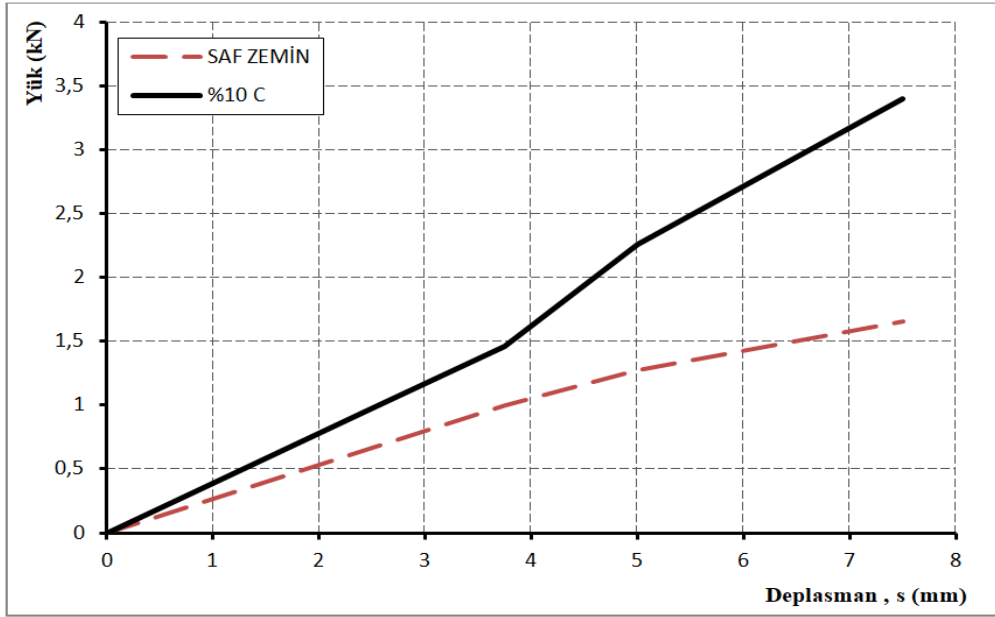
CBR deneyi için, serbest basınç deneyleri sonuçları incelenerek optimum siyah karbon miktarı %10 olarak tespit edilmiş, saf zemin ve %10 karbon ilaveli zemin numuneleri optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı göz önüne alınarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 1 ve 7 günlük kür sürecinin ardından CBR deneyi uygulanmıştır. CBR deneyi sonucu elde edilen yük-deplasman grafikleri 1 ve 7 günlük kür süreleri için sırasıyla Şekil 9 ve 10'da; tespit edilen CBR değerleri ise Tablo 7 ve 8'de gösterilmiştir.

**Şekil 9:** 1 Günlük Kür Sonrası CBR Deneyinden Elde Edilen Yük-Deplasman Verileri**Tablo 7:** 1 Günlük Kür Sonrası Elde Edilen CBR Değerleri

Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin	4,32	6,21
Saf Zemin+ %10C	5,24	7,92

Şekil 9 ve Tablo 7'deki CBR deneyi sonuçları incelendiğinde, 1 günlük kür süresi tabii tutulan numunelerde 2,5 ve 5 mm'lik deplasmanlara tekabül eden CBR verileri sırası ile katkısız zemin için %4,32 ve %6,21, %10 siyah karbon ilaveli zemin için %5,24 ve %7,92 olarak elde edilmiştir. CBR

değerinin, siyah karbon ilaveli numunelerde 2,5 mm - 5 mm penetrasyon için, saf numunelere kıyasla sırasıyla 1,21 ve 1,28 kat arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 10: 7 Günlük Kür Sonrası CBR Deneyinden Elde Edilen Yük-Deplasman Verileri

Tablo 8: 7 Günlük Kür Sonrası Elde Edilen CBR Değerleri

Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Saf Zemin	5,02	6,38
Saf Zemin+ %10C	7,40	11,32

Şekil 10 ve Tablo 8'deki CBR deneyi sonuçları incelendiğinde; 7 günlük kür süresi tabii tutulan numunelerde 2,5 ve 5 mm'lik deplasmanlara tekabül eden CBR değerleri saf zemin için %5,02 ve %6,38; %10 C ilaveli zemin için %7,40 ve %11,32 olarak elde edilmiştir. CBR değerinin, siyah karbon ilaveli numunelerde 2,5 mm - 5 mm penetrasyon için, saf numunelere kıyasla sırasıyla 1,47 ve 1,77 kat arttığı tespit edilmiştir. Literatürde [10], siyah karbonun ilave edildiği karışımların CBR değerinin, saf numunenin CBR değerinden fazla olduğu belirtilmiştir. 1 ve 7 günlük kür sonucu bulunan CBR değerlerinin literatürü desteklediği görülmektedir.

3.4 AASHTO Metodu ile Esnek Üst Yapısı Tasarımı Yapılması

AASHTO 1993 Tasarım Rehberi esas alınarak, 1 ve 7 günlük kür süresi sonunda elde edilen en büyük CBR değerleri kullanılarak üstyapı tasarımı yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda 1 günlük kür süresi sonunda belirlenen CBR değerlerinden; saf zemin için %6,21 ve %10C katkılı numune için %7,92 değerleri esas alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bunun için öncelikle yol taban zeminin esneklik modülü (M_R) hesaplanmıştır.

Zemine ait M_R ve CBR değerleri arasında $M_R=1500 \times CBR$ bağıntısı mevcut olup, zemine ait CBR değerinin bilinmesi durumunda M_R değeri yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir [20]. Yapılan hesaplamalara M_R değerlerine göre saf zemin için 9.315 psi (64241379 Pa) ve %10C katkılı numune için 11.880 psi (81931035Pa) olarak bulunmuştur. Tablo 9'daki ortak değerler kullanılarak Denklem 1 yardımı ile saf zemin ve %10 C ilaveli zeminler için taban üzerine gereken SN_3 (taban üzerine gereken SN) değerleri sırasıyla 5,67 inç (14,40 cm) ve 5,26 inç (13,36 cm) olarak hesaplanmıştır.

Aynı şekilde, 7 günlük kür süresi sonunda belirlenen CBR değerlerinden yapılan hesaplamalarda; saf zemin için %6,38 ve %10C ilave edilen numune için %11,32 CBR değerleri esas alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bunun için öncelikle yol taban zeminin esneklik modülü (M_R) hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalara M_R değerleri, saf zeminin için 9.570 psi (66000000 Pa) ve %10C ilave edilen numune için 16.980 psi (117103448 Pa) olarak bulunmuştur. Tablo 9'daki ortak değerler kullanılarak Denklem 1 yardımı ile saf zemin ve %10 C ilaveli zeminler için taban üzerine gereken SN_3 değerleri sırasıyla 5,63 inç (14,30 cm) ve 4,67 inç (11,86 cm) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 9: Esnek Kaplama Hesabında Kullanılan Parametreler

Parametreler	Seçilen Değerler
Eşdeğer standart dingil yükü tekerrür sayısı, $T_{8,2}$	30.000.000
Toplam standart sapma, S_0	0,45
Yolun ilk servis kabiliyeti, P_0	4,2
Yolun son servis kabiliyeti, P_t (Otoyollar, devlet yolları için 2,5)	2,5
Servis kabiliyeti indeksi, ΔPSI	1,7
Güvenilirliğin standart normal sapması, Z_R (R=%95)	-1,645

3.4.1 Esnek Üstyapı Tabaka Kalınlıklarının Belirlenmesi

Denklem 1 bağıntısı ile 1 günlük kür uygulanan saf ve %10C katkılı zeminler için SN_3 değerleri esas alınarak esnek

üstyapı tabaka kalınlıkları seçilmiş ve bu kalınlıklar sırasıyla Tablo 10 ve 11’de verilmiştir. Ayrıca, seçilen esnek üstyapı tabaka kalınlıkları Şekil 11’de gösterilmiştir.

Tablo 10: 1 Günlük Kür Uygulanan Saf Zemin için Seçilen Tabaka Kalınlıkları

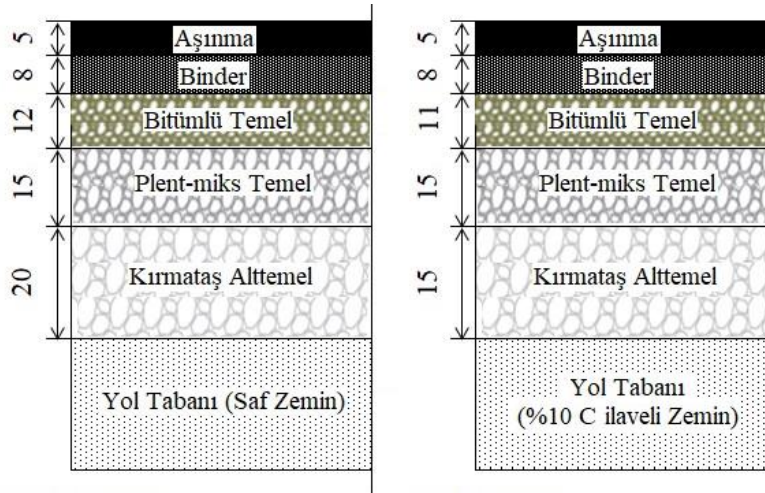
Tabaka Adı	Kalınlık (Di); (cm)	İzafi Mukavemet Katsayısı (ai)	$SN^* = a_i \times D_i$	Açıklamalar
Aşınma	5	0,42	2,1	$SN^* > SN$
Binder	8	0,4	3,2	(14,47 > 14,40)
Bitümlü Temel	12	0,36	4,32	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Plent-miks Temel	15	0,15	2,25	
Kırmataş Alttemel	20	0,13	2,6	

SN^* üst yapıda kullanılan gerçek değerler kullanılarak bulunan değer, SN bağıntı (1) hesaplanandır.

Tablo 11: 1 Günlük Kür Uygulanan %10C Katkılı Zemin için Seçilen Tabaka Kalınlıkları

Tabaka Adı	Kalınlık (Di); (cm)	İzafi Mukavemet Katsayısı (ai)	$SN^* = a_i \times D_i$	Açıklamalar
Aşınma	5	0,42	2,1	$SN^* > SN$
Binder	8	0,4	3,2	(13,46 > 13,36)
Bitümlü Temel	11	0,36	3,96	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Plent-miks Temel	15	0,15	2,25	
Kırmataş Alttemel	15	0,13	1,95	

SN^* üst yapıda kullanılan gerçek değerler kullanılarak bulunan değer, SN bağıntı (1) hesaplanandır.



Şekil 11: 1 Günlük Kür Uygulanan Saf ve %10C Katkılı Zemin için Seçilen Tabaka Kalınlıkları

Seçilen tabaka kalınlıklarının kontrolünün yapılabilmesi maksadıyla, Tablo 3’den plentmix kırmataş temel için $CBR=120$ ve kırmataş alt temel için $CBR=50$ seçilerek, plentmix kırmataş temel için $M_R=180.000$ psi ve alt temel için $M_R=75.000$ psi

olarak hesaplanır. M_R değeri hesaplandıktan sonra, bu tabakalar üstünde gerekli SN değerleri Denklem 1 bağıntı yardımı ile plentmix kırmataş temel için $SN_1 = 1,91$ inç (4,85 cm), kırmataş alt temel için $SN_2 = 2,69$ inç (6,83 cm) olarak hesaplanmıştır.

Denklemler 2’de, izafi mukavemet katsayıları ve tabaka kalınlıkları kullanılarak yapılan kontrolde, saf zeminlerde, kırmataş temel için $9,62 > 4,85$ ve kırmataş alttemel için $11,87 > 6,83$ olduğu, benzer şekilde %10C içeren zeminler kırmataş temel için $9,26 > 4,85$ ve kırmataş alttemel için $11,51 > 6,83$ olduğu için esnek tabaka kalınlıklarının yeterli olduğu görülmüştür.

Saf ve %10C katkılı zemin için belirlenen üstyapı tabaka kalınlıkları toplamı sırasıyla 60 cm ve 54 cm olarak

belirlenmiştir. Yapılan hesaplamada; %10C içeren zeminler için üstyapı kalınlığında saf zemine kıyasla %10 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir.

Denklemler 1 bağıntısı ile 7 günlük kür uygulanan saf ve %10C katkılı zeminler için SN_3 değerleri esas alınarak esnek üstyapı tabaka kalınlıkları seçilmiş ve bu kalınlıklar sırasıyla Tablo 12 ve 13’de verilmiştir. Ayrıca, seçilen esnek üstyapı tabaka kalınlıkları Şekil 12’de gösterilmiştir.

Tablo 12: 7 Günlük Kür Uygulanan Saf Zemin için Seçilen Tabaka Kalınlıkları

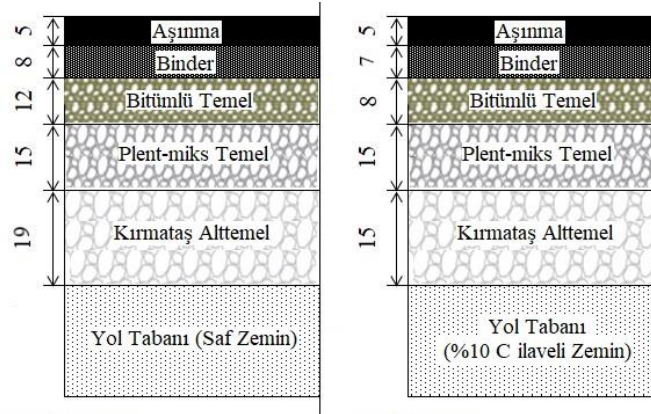
Tabaka Adı	Kalınlık (Di); (cm)	İzafi Mukavemet Katsayısı (ai)	$SN^* = ai \times Di$	Açıklamalar
Aşınma	5	0,42	2,1	$SN^* > SN$
Binder	8	0,4	3,2	$(14,34 > 14,30)$
Bitümlü Temel	12	0,36	4,32	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Plent-miks Temel	15	0,15	2,25	
Kırmataş Alttemel	19	0,13	2,47	

SN^* üst yapıda kullanılan gerçek değerler kullanılarak bulunan değer, SN bağıntısı (1) hesaplanmıştır.

Tablo 13: 7 Günlük Kür Uygulanan %10C İlaveli Zemin için Seçilen Tabaka Kalınlıkları

Tabaka Adı	Kalınlık (Di); (cm)	İzafi Mukavemet Katsayısı (ai)	$SN^* = ai \times Di$	Açıklamalar
Aşınma	5	0,42	2,1	$SN^* > SN$
Binder	7	0,4	2,8	$(11,98 > 11,86)$
Bitümlü Temel	8	0,36	2,88	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Plent-miks Temel	15	0,15	2,25	
Kırmataş Alttemel	15	0,13	1,95	

SN^* üst yapıda kullanılan gerçek değerler kullanılarak bulunan değer, SN bağıntısı (1) hesaplanmıştır.



Şekil 12: 7 Günlük Kür Uygulanan Saf ve %10C İlaveli Zemin için Seçilen Tabaka Kalınlıkları

Seçilen tabaka kalınlıklarının kontrolünün yapılabilmesi amacıyla, Tablo 3’den plentmix kırmataş temel için $CBR=120$ ve kırmataş alt temel için $CBR=50$ seçilerek, plentmix kırmataş temel için $M_R=180.000$ psi ve alt temel için $M_R=75.000$ psi olarak hesaplanır. M_R değeri hesaplandıktan sonra, bu tabakalar üstünde gerekli Denklem 1 bağıntı yardımı ile plentmix kırmataş temel için $SN_1 = 1,91$ inç (4,85 cm), kırmataş alt temel için $SN_2 = 2,69$ inç (6,83 cm) olarak hesaplanmıştır. Denklem 2’de, izafi mukavemet katsayıları ve tabaka kalınlıkları kullanılarak yapılan kontrolde, saf zeminlerde, kırmataş temel için $9,62 > 4,85$ ve kırmataş alttemel için $11,87 > 6,83$ olduğu, benzer şekilde %10C içeren zeminler kırmataş temel için $7,78 > 4,85$ ve kırmataş alttemel için $10,03 > 6,83$ olduğu için esnek tabaka kalınlıklarının yeterli olduğu görülmüştür. Saf ve %10C katkılı

zemin için belirlenen üstyapı tabaka kalınlıkları toplamı sırasıyla 59 cm ve 50 cm olarak belirlenmiştir. Yapılan hesaplamada; %10C içeren zeminler için üstyapı kalınlığında saf zemine kıyasla %15,25 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir.

3.5 Esnek Üstyapı Ekonomik Analizi

Siyah karbon ile stabilize edilmiş zeminin karayolu esnek üstyapı maliyetleri üzerindeki etkisi, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) verileri esas alınarak değerlendirilmiştir. KGM tarafından yayınlanmış olan birim fiyat cetvellerinde, alt temel ve temel tabakaları için birim ağırlık (ton) ve birim hacim (m^3) maliyetleri; bitümlü temel, binder ve aşınma tabakaları için birim alan (m^2) maliyetleri yayınlanmıştır. Çalışmada, karayolu

üstyapılarının ekonomik analizi için 2020 yılı KGM birim fiyatları kullanılmıştır.

Yapılan hesaplamalar ve maliyet analizine göre; 1 günlük kür uygulanan zemin numunelerinin esnek yol üstyapı

kalınlığının m² cinsinden birim maliyetleri Tablo 14 ve 15’de verilmiştir. Saf zemin ve %10 C ilave edilerek güçlendirilen zemin için tabaka kalınlıkları ve maliyetleri karşılaştırma grafiği Şekil 13’de görülmektedir.

Tablo 14: 1 Günlük Kür Uygulanan Saf Zemin için Tabaka Kalınlıkların Birim Maliyetleri

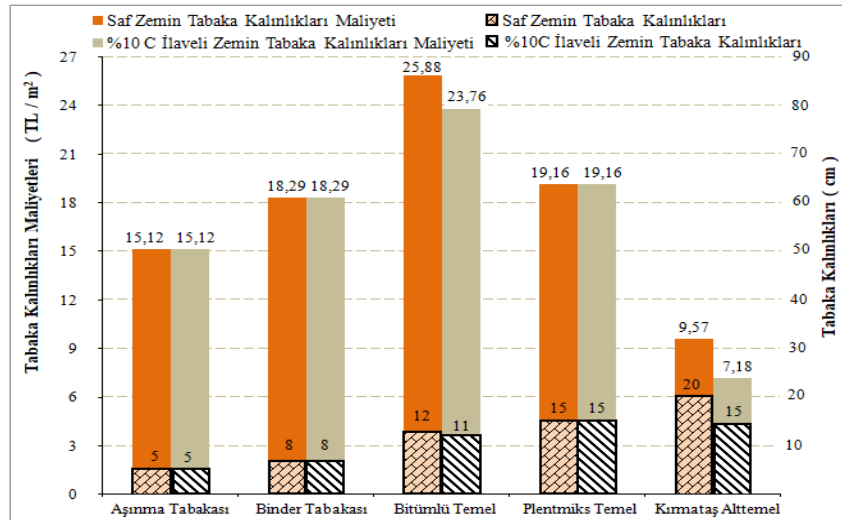
Poz no	Tanım	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ² /cm	m ²
KGM/6405/S-M	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapımı	m ²	15,12	3,02	15,12
KGM/6308	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapımı	m ²	18,29	2,29	18,29
KGM/6212	12 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	25,88	2,16	25,88
KGM/6100/3	plentmix temel yapılması (kaplama yoğ : 2,4 g / cm ³)	ton	53,21	1,28	19,16
KGM/6000	ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	47,88	0,48	9,57

Toplam: 88,02 TL

Tablo 15: 1 Günlük Kür Uygulanan % 10C İlaveli Zemin için Tabaka Kalınlıkların Birim Maliyetleri

Poz no	Tanım	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ² /cm	m ²
KGM/6405/S-M	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapımı	m ²	15,12	3,02	15,12
KGM/6308	8cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapımı	m ²	18,29	2,29	18,29
KGM/6211	11 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	23,76	2,16	23,76
KGM/6100/3	plentmix temel yapılması (kaplama yoğ : 2,4 g / cm ³)	ton	53,21	1,28	19,16
KGM/6000	ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	47,88	0,48	7,18

Toplam: 83,51 TL



Şekil 13: 1 Günlük Kür Uygulanan Saf ve %10C İlaveli Zemin için Tabaka Kalınlıkları ve Maliyetleri

Yol üstyapıları maliyetleri saf zemin için 88,02 TL/m², % 10 C ilaveli zemin için 83,51 TL/m² olarak tespit edilmiştir. Tabaka kalınlıklarının maliyetleri göz önüne alındığında %5,13 oranında yapım maliyetinin azaldığı görülmektedir. Bu hesaplamalara göre 1000 m uzunluğunda ve 20 m genişliğindeki bölünmüş bir yolda yol taban zemininin; %10 C ile iyileştirilme yapılması durumunda 147.009,45 TL tasarruf sağlanmış

olacaktır.

Benzer şekilde yapılan hesaplamalar ve maliyet analizine göre; 7 günlük kür uygulanan zemin numunelerinin esnek yol üstyapı kalınlığının m² cinsinden birim maliyetleri Tablo 16 ve 17’de verilmiştir. Saf zemin ve %10 C ilave edilerek güçlendirilen zemin için tabaka kalınlıkları ve maliyetleri

karşılaştırma grafiği Şekil 14’de görülmektedir

Tablo 16: 7 Günlük Kür Uygulanan Saf Zemin için Tabaka Kalınlıkların Birim Maliyetleri

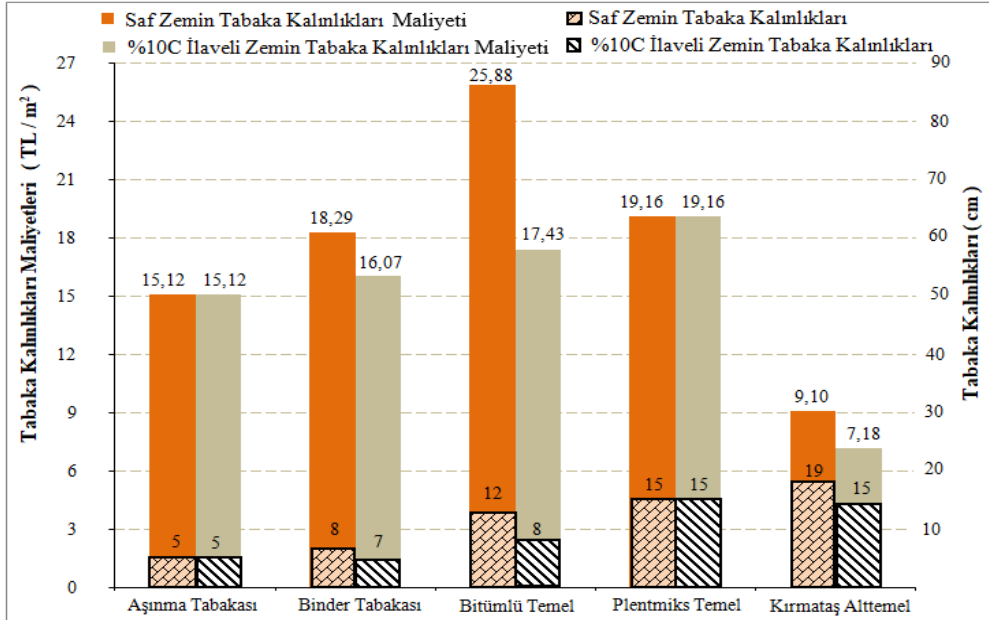
Poz no	Tanım	Birim	Birim Fiyat	Maliyet (TL)	
				m ² /cm	m ²
KGM/6405/S-M	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapımı	m ²	15,12	3,02	15,12
KGM/6308	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapımı	m ²	18,29	2,29	18,29
KGM/6212	12 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	25,88	2,16	25,88
KGM/6100/3	plentmix temel yapılması (kaplama yoğ : 2,4 g / cm ³)	ton	53,21	1,28	19,16
KGM/6000	ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	47,88	0,48	9,10

Toplam: 87,54 TL

Tablo 17: 7 Günlük Kür Uygulanan % 10C İlaveli Zemin için Tabaka Kalınlıkların Birim Maliyetleri

Poz no	Tanım	Birim	Birim Fiyat	Maliyet (TL)	
				m ² /cm	m ²
KGM/6405/S-M	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapımı	m ²	15,12	3,02	15,12
KGM/6307	7cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapımı	m ²	16,07	2,30	16,07
KGM/6208	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	17,43	2,18	17,43
KGM/6100/3	plentmix temel yapılması (kaplama yoğ : 2,4 g / cm ³)	ton	53,21	1,28	19,16
KGM/6000	ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	47,88	0,48	7,18

Toplam: 74,96 TL



Şekil 14: 7 Günlük Kür Uygulanan Saf ve %10C İlaveli Zemin için Tabaka Kalınlıkları ve Maliyetleri

Yol üstyapıları maliyetleri saf zemin için 87,54 TL, % 10 C ilaveli zemin için 74,96 TL olarak tespit edilmiştir. Tabaka kalınlıklarının maliyetleri göz önüne alındığında %14,37 oranında yapım maliyetinin azaldığı görülmektedir. Bu

hesaplamalara göre 1000 m uzunluğunda ve 20 m genişliğindeki bölünmüş bir yolda yol taban zemininin; %10 C ile iyileştirilmesi durumunda 251.648,00 TL tasarruf sağlanmış olacaktır.

4. Sonuç ve Öneriler

Zayıf bir yol taban zemininin, atık araç lastiklerden elde edilen siyah karbon ile stabilizasyonu için kullanılması durumunda, esnek yol üst yapısı kalınlık ve maliyetine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda ifade edilmiştir.

1. Standart proktor deneyi sonucunda; siyah karbon oranı arttıkça optimum su içerikleri değerinin arttığı ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı değerinin azaldığı, bu sonuçların siyah karbonun boşluklu yapısının karışımın absorbe kapasitesini artırması nedeniyle meydana geldiği değerlendirilmektedir.

2. Siyah karbon miktarının artmasıyla numunelerde birim şekil değiştirmenin azaldığı, bunun siyah karbonun numunelerin sertliğini artırması sebebiyle meydana geldiği düşünülmektedir.

3. Serbest basınç deneyi sonuçlarında ise; siyah karbon ile güçlendirilen zeminlerde en büyük mukavemet değeri 1 ve 7 günlük kür sonunda %10 C ilaveli numunelerde tespit edilmiştir. Saf zemine göre mukavemet değerinin 1 ve 7 günlük kür sonunda sırasıyla 1,82 ve 2,14 kat arttığı görülmüştür. Mukavemet değerindeki bu önemli artış, siyah karbonun zeminlerin kohezyon kuvveti ve kayma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

3. CBR deney sonuçlarına göre; %10 katkılı zeminlerin 1 ve 7 günlük kür süreleri sonundaki CBR değerleri, saf zemine kıyasla sırasıyla 1,28 ve 1,77 kat artış göstermiştir. Bu artış siyah karbonun zeminlerin taşıma gücü üzerinde önemli bir artışa sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kür süresinin bu artışta önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

4. Yol üst yapısı tasarım sonuçlarına göre, %10 C katkılı zeminler için hesaplanan üstyapı kalınlığının saf zemine kıyasla, 1 ve 7 günlük kür süreleri için sırasıyla %10 ve %15,25 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalmanın siyah karbonun zeminin taşıma gücü üzerindeki olumlu etkisinden kaynaklandığı görülmüştür.

5. Maliyet analizi sonuçlarına göre, %10C katkılı zeminler üzerine inşa edilecek üstyapı maliyetlerinin saf zemine kıyasla özellikle 7 günlük kür süresi için %14,37 azaldığı tespit edilmiştir. Bu hesaplamalara göre 1000 m uzunluğunda ve 20 m genişliğindeki bölünmüş bir yolda yol taban zemininin, %10 C ile iyileştirilmesi durumunda üst yapı maliyetinde 251.648,00 TL tasarruf sağlanmış olacaktır.

Sonuç olarak, siyah karbonun yol taban zemininin stabilizasyonunda kullanılmasının zemin taşıma gücünü artırarak esnek üst yapı tabaka kalınlığını ve maliyetini azaltacağı, ayrıca çevrenin korunmasına ve ülke ekonomisine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Kaynakça

- [1] Keskin, (2004), Kireç Stabilizasyonu ve Yol Kesitine Etkileri, Kocaeli Üniversitesi, FBE, Yüksek Lisans Tezi.
- [2] Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., Muntohar, A. S., (2005), Stabilization of Residual Soil with Rice Husk Ash and Cement, Construction and Building Materials, 19, 448–453.
- [3] Akbulut, S., Arasan, S., Ekrem Kalkan, E. (2007). Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. Applied Clay Science, 38, 23–32.
- [4] Brooks, R.M., (2009), Soil Stabilization with Fly Ash and Rice Husk Ash, International Journal of Research and

Reviews in Applied Sciences, ISSN: 2076-734X, EISSN: 2076-7366 Volume 1, Issue 3 (December 2009), 209-217.

- [5] Keskin, S. ve Laman, M. (2012). Atık lastik - kum karışımlarının kayma mukavemetinin laboratuvar deneyleriyle incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(2), 27-35.
- [6] Shabana S., Anshi C., Shamseera P., Shyamili T. M., Sruthi V., Suhaira P. (2014) “Study on CBR values of soil with crushed coconut shells” International Journal of Advanced Engineering Technology Volume: 05 Issue: 03 | July-September 2014, Pages 55-58.
- [7] Yarbaşı, N. (2016). Atık lastik parçaları ile güçlendirilmiş killi zeminlerin donma-çözülme davranışı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(6), 559-562.
- [8] Karaman, M. ve Ecemiş, N. (2017, Kasım 22-24). Kum - lastik kırpıntı çapının ve karışım oranının sıvılaştırma potansiyeline etkisinin sarsma tablası deneyleri ile incelenmesi. 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul.
- [9] Işık, F. ve Akbulut R.K. (2018). Geri Dönüştürülmüş Karbon Karasının Killi Zeminlerin Kıvam Limitlerine Etkisi. / İğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech. 8(2): 123-130, 2018
- [10] Kumar S.N, Reddy A. S. T., A. Kumar P.V., (2019), “Utilization Of Carbon Black Waste For Subgrades In Flexible Pavements” International Journal Of Scientific & Technology Research volume 8, Issue 12, December 2019, Pages 1817-1820
- [11] Eryılmaz H. ve Demirarslan K.O. “Ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) sıvılaştırılarak geri dönüşümünün araştırılması”. Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi, 2(1): 50-56, (2019).
- [12] Anonim. (2020). https://eracevre.com/pdf/Carbon_Black_Brochure.pdf “Green Karbon Black” (Erişim Tarihi:25.09.2020)
- [13] Yılmaz, I., Yıldırım M., Keskin İ. (2017), Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler, Seçkin Kitabevi Ankara.
- [14] AASHTO (1993). Interim Guide For Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [15] Kök B.V. (2019), Karayolu Mühendisliği ve Tasarımı, Nobel Akademik Yayıncılık Ankara
- [16] Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi (2008). T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara
- [17] Karbon Karaları ve Testleri(2011). Kimya Teknolojisi, Milli Eğitim Bakanlığı (524KI0246), Ankara.
- [18] Kızıltaş, Ü., 1999, Lastik Üretiminde Katkı Elemanlarının Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 64s.
- [19] Geçkil, T., 2008, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [20] Tunç, A. 2004. Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları. Asil Yayın Dağıtım, Ankara.