



Makale / Research Paper

Siyah Karbon Stabilizasyonlu Zeminin Rijit Kaplama Kalınlığı ve Maliyetine Etkileri

Tacettin GEÇKİL^a, Talha SARICI^b, Bahadır KARABAŞ^{c*}

^{a,b}İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya/TÜRKİYE

^c2'nci Ordu Komutanlığı, Malatya/TÜRKİYE

karabasbaha@gmail.com

Received/Geliş: 09.03.2021

Accepted/Kabul: 27.07.2021

Öz: Bu çalışmada, siyah karbon kullanılarak stabilize edilen bir yol taban zemininin rijit yol kaplama kalınlığı ve maliyetine etkileri araştırılmıştır. Bu maksatla, katkısız zemin elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri ve piknometre deneylerine tabi tutularak mühendislik özellikleri tespit edilmiştir. Akabinde, zemine ağırlıkça beş farklı oranda (%2,5, 5, 10, 15 ve 20) siyah karbon katılarak stabilize karışım numuneleri hazırlanmıştır. Katkısız ve stabilize numuneler, standart proktor deneyine tabi tutularak maksimum kuru birim ağırlıkları ve optimum su muhtevaları tespit edilmiştir. Hazırlanan karışım numuneleri, 28 günlük kür süresi sonrası serbest basınç ve CBR deneylerine maruz bırakılmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak AASHTO metoduna göre rijit yol kaplama kalınlığı ve maliyeti analiz edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, en yüksek basınç dayanımının %10 siyah karbon katkılı karışımdan elde edildiği ve bu orandaki karışımın CBR değerinin katkısız zemine kıyasla 2,87 kat arttığı görülmüştür. Sonuç olarak, %10 siyah karbon ile yapılan zemin stabilizasyonu sayesinde, kaplama kalınlığını 3 cm ve rijit üstyapı maliyetini %9,68 oranında azalttığı belirlenmiştir.

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

Effects of Carbon Black Stabilized Soil on Rigid Pavement Thickness and Cost

Abstract: In this study, the effects of a road subgrade stabilized using black carbon on the rigid road pavement thickness and cost were investigated. For this purpose, pure soil was subjected to sieve analysis, hydrometer, consistency limits and pycnometer tests to determine its engineering properties. Afterwards, stabilized mixture samples were prepared by adding black carbon in five different ratios (2.5, 5, 10, 15 and 20%) to the soil. Pure and stabilized samples were subjected to the standard proctor test, maximum dry unit weights and optimum water contents were determined. Mixture samples prepared were subjected to unconfined compression and CBR tests after 28 days of curing period. Rigid road pavement thickness and cost were analyzed according to the AASHTO method using the data obtained. According to the test results, it was observed that the highest compressive strength was obtained from the mixture with 10% black carbon and the CBR value of the mixture at this ratio increased by 2.87 times compared to the pure soil. As a result, thanks to the soil stabilization using 10% black carbon, it was determined that the pavement thickness reduced by 3 cm and the rigid pavement cost by 9.68%.

Keywords: Weak soil, Carbon Black Stabilization, CBR, AASHTO method, Rigid Pavement.

1. Giriş

İnşaat mühendisliğinin esas konusu olan bütün yapılar, çeşitli mühendislik özelliklerine sahip zeminler üzerine inşa edilmektedir. Bu yapıların tasarımı esnasında birçok parametrenin yanında, zemin özelliklerinin de detaylı olarak bilinmesi gerekmektedir [1]. Tasarım esnasında yeteri kadar

Bu makaleye atf yapmak için

Geçkil, T., Sarıcı, T., Karabaş, B., "Siyah Karbon Stabilizasyonlu Zeminin Rijit Kaplama Kalınlığı ve Maliyetine Etkileri" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8 (2); 1372-1384.

How to cite this article

Geçkil, T., Sarıcı, T., Karabaş, B., "Effects of Carbon Black Stabilized Soil on Rigid Pavement Thickness and Cost" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8 (3); 1372-1384.

ORCID ID: *0000-0001-8070-6836; ^b0000-0001-8488-5851; ^c0000-0003-0416-9121

etüt edilmeyen zeminler üzerine inşa edilen yapıların bozulması veya yıkılması nedeniyle zaman, emek ve ekonomik kayıpların yanında can kayıpları da meydana gelebilmektedir. Bu sebeple, yapılan etütler neticesinde mukavemet, geçirgenlik, sıkışabilirlik gibi özellikleri yetersiz görülen zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesi gerekebilmektedir [2].

Bu kapsamda, toplumların ulaşım ihtiyacını karşılayan karayolu tasarımının yapılacağı mahallerdeki yol taban zeminlerinin de iyileştirilmesine ihtiyaç duyulabilmektedir. Özellikle taşıma gücü zayıf yol taban zeminlerin iyileştirilerek, yol tabanının sağlam bir zemin üzerine oturmasının sağlanması, hem emniyet hem de yol üstyapı maliyetinin daha ekonomik olması bakımından önem arz etmektedir [3].

Günümüzde, zayıf taşıma gücüne sahip yol taban zeminlerinin iyileştirilmesi için çoğunlukla sönmüş kireç, çimento ve bitüm gibi etkinliği kanıtlanmış malzemeler kullanılmaktadır. Bununla birlikte, son yıllardaki çalışmalarda yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü gibi atık ve geri dönüşüm ürünü katkılar da zemin iyileştirme maksadıyla kullanılmaya başlanmıştır [4-5]. Bu amaçla, düşük plastisiteli kil bir zeminin iyileştirilmesi için yüksek fırın cürufu ve kireç kullanılan bir çalışmada, zeminin serbest basınç dayanımı %3,3 cüruf kullanımı ile 3,4 kat, %5 kireç kullanımı ile 9,7 kat artış göstermiştir. Katkılar, zemine aynı oranlarda birlikte katıldıklarında bu artışın 14,3 kata çıktığı ve zemindeki birim şekil değiştirmenin %15'den %2'ye düştüğü görülmüştür [6]. Kil bir zeminin iyileştirilmesi amacıyla %2 kireç ve %20 pirinç kabuğu külünün birlikte kullanılmasıyla, zemin CBR değerinin %80 arttığı ve şişme potansiyelinin %70 kadar azaldığı tespit edilmiştir [7]. Siltli bir kil zemini iyileştirmek için yapılan benzer bir çalışmada, %6 kireç ve %12,5 oranındaki pirinç kabuğu külünün, zeminlerin CBR değerini %3'ten %16,3'e çıkararak taşıma gücünü iyileştirdiği görülmüştür [8]. Çimento kullanılarak (%2-8) iyileştirilen laterit türü bir zemine, ayrıca pirinç kabuğu külü ilave edilmesiyle (%4-6), zeminin optimum su muhtevasında artış, maksimum birim hacim ağırlığında ise azalma meydana geldiği ve zemin basınç dayanımı ile taşıma gücünün arttığı belirlenmiştir [9]. Yine benzer bir zemine %10 oranında pirinç kabuğu külü eklenmesiyle zeminin CBR değerinin önemli artış gösterdiği tespit edilmiştir [10]. Başka bir çalışmada, hindistan cevizi kabuğu kullanılarak iyileştirilen siltli kum zeminin taşıma gücünde artış meydana geldiği görülmüştür [11]. Pirinç kabuğu külü ve çimento kullanarak kil bir zeminin iyileştirilmesine yönelik bir çalışmada, pirinç kabuğu külü ve çimento ilavesinin maksimum kuru yoğunluğu azalttığı, optimum su muhtevası değerini de arttırdığı sonucunu elde edilmiş, CBR değerinin; %4 çimento ve %5 pirinç kabuğu külü kombinasyonu ile %60 kadar arttığı tespit edilmiştir [12]. Killi bir zemine %2 atık lastik lifi katılmasıyla killi zeminlerin serbest basınç değerlerinin, 1,97 kat arttığı görülmüştür [13]. Şişme potansiyeli olan kil zemine pirinç kabuğu külü %12 oranında ilave edilerek, CBR değerinin %47, serbest basınç dayanımı değerinin %97 arttığı belirlenmiştir [14]. Atık lastik kırıntılarını ince kum (SP) ile karıştırarak hazırladığı numuneler ile sarsma tablası deneyleri sonucunda, karışımının sıvılaşma direncinin, temiz kumun sıvılaşma direncinden fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun lastik kırıntılarının suyu drene etmesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır [15]. Kötu derecelenmiş ince kumu (SP) atık lastik parçacıkları ile iyileştirmeye çalışılan diğer bir çalışmada atık lastik oranının; %10 ve %15 olması ile kayma mukavemetinde %100 artış olduğunu, %20'den daha fazla olması ile kayma mukavemetinde düşüş olduğunu belirlenmiştir [16].

Dünyada, yaklaşık 17 milyon ton kadar oluşan atık araç lastikleri geri dönüşüm malzemesi olarak birçok alanda değerlendirilmesine rağmen, bunlardan bir geri dönüşüm ürünü olarak elde edilen siyah karbonun, yol taban zeminlerinin iyileştirilmesinde ve bunun rijit yol üstyapısı tabaka kalınlığına ve maliyetine etkilerinin araştırılmadığı görülmüştür [17]. Killi bir zemine ağırlıkça %1, %3, %5 ve %10 oranında siyah karbon katarak, likit limit ve plastik limit deneyleri yapmış, siyah karbon malzemesi artıkça likit limit ve plastik limitin azaldığını tespit edilmiştir [18]. Gerçekleştirilen bir çalışmada ise siyah karbon ile iyileştirilen zayıf bir zeminde, zeminin optimum su muhtevasının arttığı ve maksimum kuru birim ağırlığının azaldığı görülmüştür. Ayrıca, elde edilen optimum %6 siyah karbon içeriğindeki zeminin CBR taşıma değerinin 1,5 kat artış gösterdiği tespit edilmiştir [19]. Ögütülmüş atık lastik ve gaz beton atığı kullanılarak gerçekleştirilen diğer bir çalışmada ise %5 gaz beton atığı

ve %2 atık lastik içeren zeminlerin serbest basınç değerlerinde %19,30; CBR değerlerinde de %27,61 oranında artış meydana geldiği görülmüştür [20]. 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 başka bir çalışmada araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan CBR deneyleri neticesinde, %10 siyah karbon katkısı ile CBR değerinin, 1 ve 7 günlük kür sonunda 1,28 kat ve 1,77 kat arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, AASHTO 1993 yöntemine göre esnek üst yapı maliyetlerinin, 1 ve 7 günlük kür sonunda %5,13 ve %14,37 oranında düşüş gösterdiği tespit edilmiştir [21]. Benzer şekilde, F sınıfı uçucu kül (UK) ile iyileştirilen killi bir yol taban zemininin karayolu üstyapı kalınlığına ve maliyetine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, %10UK ile iyileştirilen zemin üzerine inşa edilecek yolda, esnek ve rijit üstyapı maliyetlerinin sırasıyla %37,45 ve %28,92 oranında azaldığı belirlenmiştir [22].

Bu çalışmada ise, atık lastiklerden elde edilen ve önceki çalışmalarda hemen hemen hiç değerlendirilmemiş olan atık siyah karbon kullanılarak iyileştirilen bir yol taban zemininin rijit kaplama kalınlığına ve maliyetine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, katkısız zemine ağırlıkça %2,5, %5, %10, %15, %20 oranlarında siyah karbon katılarak hazırlanan karışımlara proktor, serbest basınç, CBR deneyleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar ışığında, rijit yol üstyapı tasarımı yapılarak maliyeti analiz edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan zemin örneği, İnönü Üniversitesi Yerleşkesi içerisinde bulunan bir sahadan temin edilmiştir. Zemin özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla ASTM C136/C136M, ASTM D422-63, ASTM D4318, ASTM D4318 ve ASTM D698 standartlarına uygun olarak sırasıyla elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri, piknometre ve standart proktor deneyleri yapılmış ve zemin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Zemin Özellikleri

Özellik	Standart	Değeri
Dane birim hacim ağırlığı, γ_s (g/cm ³)	ASTM D824	2,714
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, γ_{kmax} (g/cm ³)	ASTM D698	1,948
Optimum su içeriği, W_{opt} (%)	ASTM D698	14,1
Likit limit, W_L (%)	ASTM D4318	25,87
Plastik limit, W_p (%)	ASTM D4318	14,56
Plastisite İndisi, PI (%)	ASTM D4318	11,31
Sınıflandırma (Birleştirilmiş Zemin Sınıfı)	ASTM D2487	SC
AASHTO Sınıflandırması	ASTM M-145	A-6

Katkı malzemesi olarak kullanılan ve Era Çevre Teknolojileri A.Ş.’den temin edilen siyah karbonun özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Siyah karbon, kullanım ömrünü tamamlamış araç lastiklerinden piroliz yöntemi ile elde edilen ve çok ince parçacıklardan (0,15-3,5 mikron) oluşan bir geri dönüşüm ürünüdür [23].

Tablo 2. Siyah Karbon Özellikleri [23]

Özellik	Değeri
Görünüm	Toz
Renk	Siyah
Suda Çözünürlüğü (20 °C’de)	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

2.2 Karışım Numunelerinin Hazırlanması

Karışım numuneleri hazırlamak amacıyla öncelikle katkısız zemin ve siyah karbon 105 °C sıcaklığa sahip bir etüvde 24 saat kurutulmuştur. Daha sonra, katkısız zemine ağırlıkça %2,5, %5, %10, %15, %20 oranlarında siyah karbon katılarak katkılı karışım numuneleri hazırlanmış ve deneylere tabi tutulmuştur.

Çalışmada, katkısız ve siyah karbon katkılı zemin numuneleri sırasıyla K ve %2,5C, %5C, %10C, %15C, %20C olarak isimlendirilmiştir.

2.3 Standart Proktor Deneyi

Deney, zemin numunesindeki havanın, su ve mekanik araçlar yardımıyla dışarı atılarak maksimum kuru birim hacim ağırlığının ve optimum su muhtevasının belirlenmesi esasına dayanır. Bu deney ASTM D698 uygun yapılıdır. Standart proktor deneyi uygulamasında, etüvde 105 °C’de 24 saat kurutulmuş numune belirli oranda su eklenerek yoğrulur, 3 kademe olarak ve her kademededen sonra 2,5 kg ağırlığındaki tokmak ile 25 kez vurularak sıkıştırılır. Bu işlem farklı su içeriklerinde 5 defa tekrarlanır. Her işlemden sonra numune tartılarak su muhtevası tespit edilir ve kuru birim hacim ağırlığı hesaplanır. Tespit edilen değerlere göre doyumluk eğrisi çizilerek, numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ($\gamma_{k \text{ maks}}$) ve optimum su muhtevası (W_{opt}) değerleri belirlenir [24].

2.4 Serbest Basınç Deneyi (Tek Eksenli)

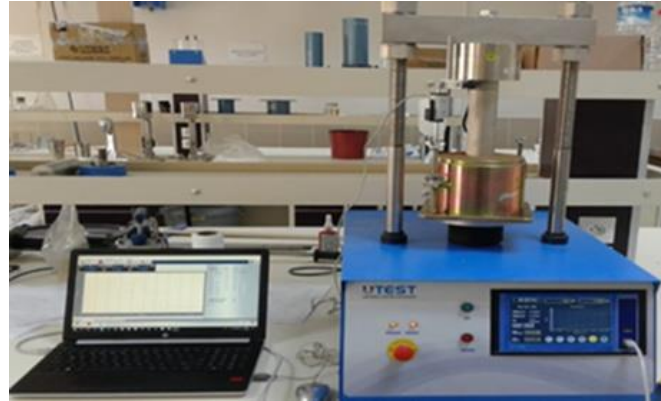
Tek eksenli serbest basınç deneyi, kohezyonlu zeminlerin kayma direncini belirlemek amacıyla ASTM D2166 standardına uygun yapılan bir deneydir. Deney sonunda tespit edilen Mohr dairesi yardımıyla zemine ait kayma direnci hesaplanabilmektedir. Deneyde, zemin numunesi etüvde 105°C’de 24 saat kurutulduktan sonra, daha önce belirlenen orandaki su (W_{opt}) eklenerek yoğrulur ve serbest basınç kabına 4 tabaka halinde serilir. Her tabakadan sonra tokmak ile 10 kez vurulup sıkıştırılır. En son tabaka serildikten sonra numune kalıptan çıkarılarak planlanan kür süresi boyunca oda sıcaklığında muhafaza edilir. Deney sonrasında numunede oluşan deformasyon ve şekil değiştirmeler esas alınarak dayanım değerleri tespit edilir [24]. Şekil 1’de serbest basınç deneyi seti ve deney sonucunda oluşan deformasyon görülmektedir.



Şekil 1. Serbest Basınç Deneyi Seti

2.5 CBR Deneyi

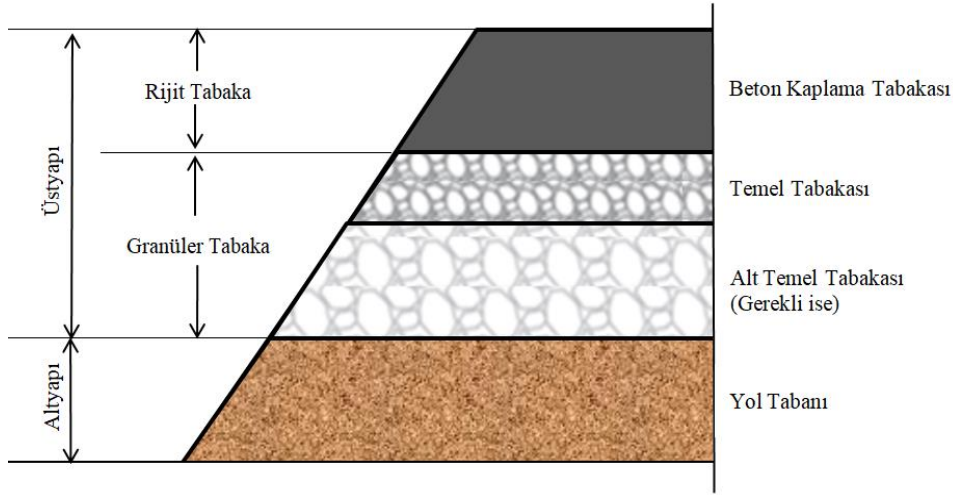
Zeminlerin taşıma gücünü belirlemek için gerçekleştirilen CBR deneyi, ASTM D1883-13 standardına uygun olarak yapılmaktadır. Deney, daha önceden hazırlanan ve belirli bir kür süresini tamamlayan zemin numunesine, kesit alanı 1935 mm^2 olan (çapı 50 mm) bir pistonun 1,27 mm/dakika hızla itilmesi ile belirlenen yük-penetrasyon bağıntısı vasıtasıyla taşıma gücünün hesaplanması esasına dayanmaktadır. CBR değeri, pistonun zemine 2,5 mm ve 5 mm penetrasyon yapması için uygulanan yük değerinin, pistonun aynı derinlikte standart kırma taş numunesine batması için uygulanan yük değerine bölünmesi ile bulunan sonucun yüzde ifadesidir. Bu değerlerden büyük olanı CBR değeri olarak alınmaktadır. Deneyde, etüvde 105°C 'de 24 saat kurutulmuş zemine belirlenen miktardaki su (W_{opt}) eklenerek yoğrulur ve CBR kalıbına 3 kademe serilir. Her tabaka serildikten sonra 2,5 kg ağırlığındaki tokmak ile 56 kez vurulup sıkıştırılır. Numune, planlanan kür süresini tamamlaması için muhafaza edildikten sonra deney setine yerleştirilir. Deney sonucunda 2,5 mm ve 5 mm penetrasyon için CBR değerleri belirlenir [24]. Şekil 2'de CBR deneyi seti gösterilmiştir.



Şekil 2. CBR Deneyi Seti

2.6 Rijit Üstyapı Tasarımı (AASHTO Metodu ile)

Rijit üstyapı genel olarak taban zemini üzerine, çimento kullanılarak inşa edilen bir beton plaktan oluşur. Tasarım esnasında, öngörülen analiz süresinde kaplama üzerinden geçen trafiğin oluşturabileceği yüksek şiddetteki deformasyonlara dayanıklı beton plağın ve tabaka kalınlıklarının belirlenmesi esas alınır [25]. Şekil 3'de rijit üstyapıyı oluşturan tabakalar görülmektedir.



Şekil 3. Rijit Üstyapı Kesit Görünümü

Rijit üstyapı tabaka kalınlıkları, AASHTO (1993) tasarım rehberine göre Denklem (1) yardımı ile hesaplanmaktadır [26] .

$$\log_{10}(T_{8,2})=Z_R \cdot S_0+7,35 \cdot \log_{10}(d+1)-0,06+\frac{\log_{10}\left[\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5}\right]}{1+\frac{1,624 \cdot 10^7}{(d+1)^{8,46}}}+(4,22-0,32 \cdot P_t) \cdot \log_{10}\left[\frac{S'_c \cdot C_d(d^{0,75}-1,132)}{215,63 \cdot J\left[d^{0,75} \frac{18,42}{(E_c/k)^{0,25}}\right]}\right] \quad (1)$$

Burada;

- $T_{8,2}$: 8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekrür sayısı,
- Z_R : Standart normal sapma,
- S_0 : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası,
- d : Rijit üstyapı beton kaplama kalınlığı (inç),
- ΔPSI : P_0-P_t (Servis kabiliyetinde azalma miktarı),
- P_0 : Başlangıç servis kabiliyeti indeksi,
- P_t : Nihai servis kabiliyeti indeksi,
- S'_c : Betonun kopma modülü (Eğilmede çekme mukavemeti) (psi),
- J : Yük transfer katsayısı,
- C_d : Drenaj katsayısı,
- E_c : Betonun elastisite modülü (psi),
- k : Yatak katsayısı (pci) değerini göstermektedir.

Bu çalışmada, siyah karbon ile yapılan iyileştirmenin rijit üstyapı üzerindeki etkilerini belirlemek için en uygun dayanımı veren karışım oranı dikkate alınarak tasarım yapılmıştır.

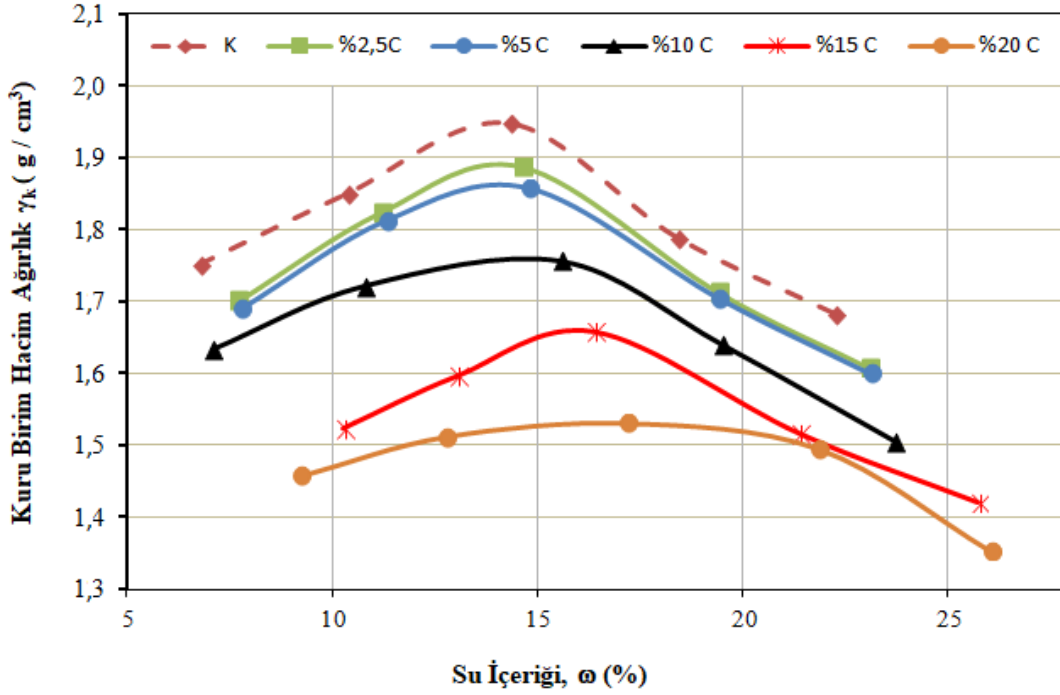
3. Bulgular ve Değerlendirme

Çalışmada, katkısız ve ağırlıkça %2,5, %5, %10, %15, %20 oranlarında siyah karbon içeren zemin karışım numuneleri, standart proktor deneyine tabi tutularak maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ($\gamma_{k \text{ maks}}$) ve optimum su içerikleri ($\%W_{\text{opt}}$) belirlenmiştir. Kendi optimum su içeriklerinde hazırlanan bütün numuneler 28 günlük kür süresine tabi tutulduktan sonra serbest basınç ve CBR deneylerine maruz bırakılmıştır. Deneyler sonucunda, katkısız zemin ve en yüksek CBR değeri elde edilen siyah karbon katkılı zemin için AASHTO 1993 tasarım yöntemine göre rijit kaplama tasarımı yapılmış ve üstyapı maliyetleri hesaplanmıştır.

3.1 Standart Proktor Deney Sonuçları

Hazırlanmış olan katkısız ve katkılı zemin karışım numunelerine farklı su içeriklerinde standart

proktor uygulanmıştır. Deneyde her bir katkı oranı için 5'er adet karışım numunesi hazırlanmıştır. Deney neticesinde, numunelerin su içeriklerine bağlı olarak elde edilen kompaksiyon eğrileri Şekil 4'de gösterilmiştir. Numunelerin tespit edilen optimum su içerikleri (W_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ($\gamma_{k maks}$) ise Tablo 3'de verilmiştir.



Şekil 4. Numunelerin Su İçeriğine bağlı Kompaksiyon Eğrisi

Tablo 3. Standart Proktor Deneyi Sonuçları

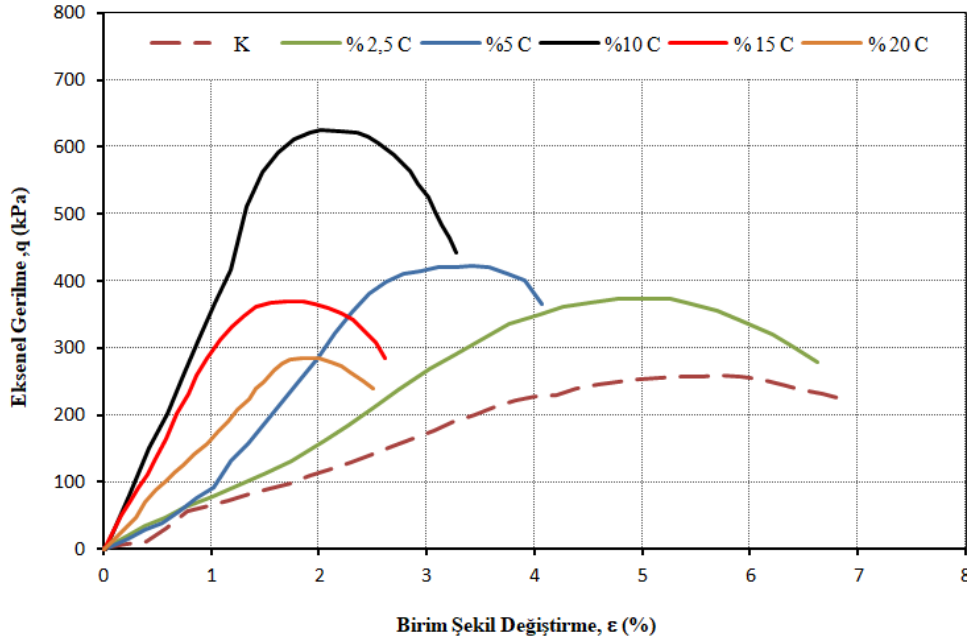
Numune Türü	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı, $\gamma_{k maks}$ (g/cm ³)	Optimum Su İçeriği, W_{opt} (%)
K	1,948	14,10
%2,5 C	1,893	14,14
%5 C	1,862	14,20
%10 C	1,762	14,90
%15 C	1,658	15,85
%20 C	1,530	16,60

Şekil 4 ve Tablo 3 incelendiğinde, katkı artışına bağlı olarak numunelerin maksimum kuru birim ağırlıklarının ($\gamma_{k maks}$) katkısız zemine kıyasla azaldığı ve optimum su içeriklerinin (W_{opt}) de artış gösterdiği görülmektedir. Bu sonuçların literatürle [19] benzerlik göstererek, siyah karbonun boşluklu ve tanecikli zincir yapıya sahip olması sebebiyle [27] karışımın absorbe kapasitesinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.2 Serbest Basınç Deney Sonuçları

Standart proktor deney sonuçlarına göre, karışımların tespit edilen W_{opt} ve $\gamma_{k maks}$ değerleri esas alınarak katkısız ve katkılı zemin numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler oda sıcaklığında 28 günlük küre tabi tutulduktan sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney, 100 kN kadar yük uygulayabilen bir cihaz ile her bir numuneye eksenel yük uygulanarak 10 dakika içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Deney sonucunda, numunelerin serbest basınç mukavemeti (q) ve birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki Şekil 5’de, elde edilen q ve ϵ değerleri ise Tablo 4’de verilmiştir.



Şekil 5. Numunelerin Serbest Basınç Mukavemeti (q) ve Birim Şekil Değişimi (ϵ) Arasındaki İlişki

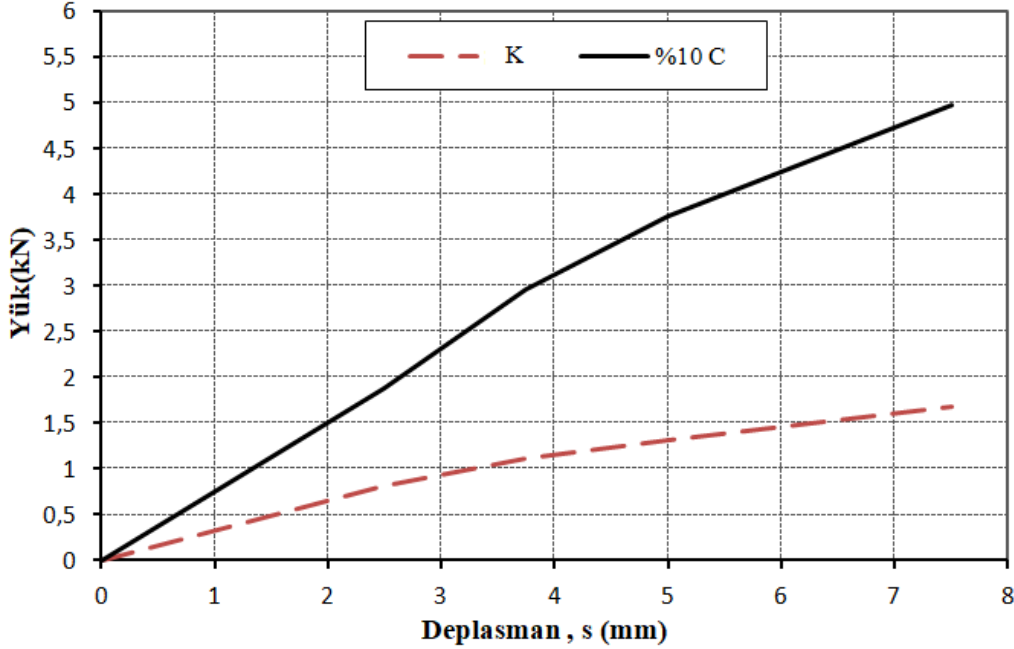
Tablo 4. Serbest Basınç Deneyinden Elde Edilen q - ϵ Değerleri

Numune Türü	Serbest Basınç Mukavemeti, q (kpa)	Birim Şekil Değişimi, ϵ (%)
K	258,71	5,72
%2,5 C	372,95	5,18
%5 C	422,87	3,42
%10 C	625,59	2,01
%15 C	369,48	1,86
%20 C	285,73	1,84

Şekil 5 ve Tablo 4 incelendiğinde, siyah karbon miktarındaki artış ile karışımların mukavemet değerlerinin katkısız zemine kıyasla büyük artış gösterdiği ve siyah karbonun zeminin mukavemet değerini arttırmada etkili olduğu görülmektedir. 28 günlük kürün ardından yapılan deneyde, en yüksek mukavemet artışının % 10C katkılı karışımdan elde edildiği ve bu artışın katkısız zemine kıyasla 2,42 kat yüksek olduğu tespit edilmiştir. Mukavemet değerindeki bu artışın, siyah karbonun zeminlerin kayma direnci ve kohezyon kuvveti üzerindeki etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, siyah karbon katılan malzemelerin sertliğinin arttığı ancak gerilme direncinin belirli bir miktardan sonra azaldığı [28-29], siyah karbon miktarının belirli bir limiti aşmaması gerektiği [28] görüşleri de dikkate alındığında en iyi güçlendirmenin %10C ile sınırlı kalması gerektiği değerlendirilmektedir. Deney sonucunda ayrıca, siyah karbon miktarının artması ile numunelerdeki birim şekil değiştirmenin azaldığı görülmektedir. Bu durumun, siyah karbonun zeminin sertliğini arttırması sebebiyle meydana geldiği düşünülmektedir. Çünkü serbest basınç deneyinde, sert kıvamlı zeminlerin birim şekil değiştirmesinin yumuşak zeminlerden daha az meydana geldiği [30] bilinmektedir.

3.3 CBR Deney Sonuçları

Serbest basınç deneyi sonucunda, katkısız zemine kıyasla en yüksek basınç mukavemeti değerini veren %10 siyah karbon oranı dikkate alınarak, bu oranda karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan katkısız ve %10C katkılı numuneler, 28 günlük kür süresi sonunda CBR deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda, numunelerin elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 6'da, tespit edilen CBR değerleri ise Tablo 5'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Numunelerin Yük-Deplasman İlişkisi

Tablo 5. Numunelerin CBR Değerleri

Numune Türü	2,5 mm için CBR Değeri, %	5 mm için CBR Değeri, %
K	6,12	6,56
%10C	14,18	18,81

CBR deney sonuçlarına göre, numunelerin 2,5 ve 5 mm'lik penetrasyonlara tekabül eden CBR verileri katkısız zemin için sırasıyla % 6,12 ve % 6,56; %10C katkı zemin için % 14,18 ve %18,81 olarak tespit edilmiştir. Siyah karbon katkı zeminin CBR değerleri, söz konusu penetrasyonlar için katkısız zemine kıyasla sırasıyla 2,32 ve 2,87 kat artış göstermiştir. Bu artışlar, zeminlerin taşıma gücü üzerinde siyah karbonun oldukça iyileştirici bir etkiye sahip olduğunu ve bu sonucun önceki çalışmalar ile [19, 21] uyumlu olduğunu göstermektedir.

3.4 Rijit Üstyapı Tasarımı

Rijit üstyapı tasarımı için, AASHTO tasarım rehberine (1993) göre, katkısız ve %10 siyah karbon içeren yol taban zemini esas alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Tasarımda, derzli donatısız rijit yol kaplama kalınlığı etüt edilmiştir. Bu etüt yapılırken yolun;

- 2 x 2 = 4 şeritli devlet yolu olduğu,
- Proje analiz süresinin 30 yıl olduğu,
- İlk sene için günlük trafiğin treyler 200 adet, kamyon 500 adet, otobüs 702 adet, minibüs 550

adet, otomobil 7000 adet olduğu varsayılarak, 8,2 ton eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı 60.000.000 olarak belirlenmiştir.

- Güvenilirlik katsayısı R% 95 olarak alınmıştır.
- İhtiyaç duyulan gerekli rijit üstyapı tabaka kalınlığı, temel veya alt temelin var olduğu düşünülerek hesaplanmıştır.

Ayrıca hesaplamalarda, 28 günlük kür süresi sonunda elde edilen en büyük CBR değerleri göz alınarak, katkısız zemin için %6,56 ve % 10C katkılı zemin için %18,81 değerleri esas alınmıştır. Hesaplamalar yapılırken Tablo 6'da verilen ortak parametreler kullanılmıştır.

Tablo 6. Rijit Üstyapı Hesabında Kullanılan Parametreler

Parametreler	Seçilen Değer
Eşdeğer standart dingil yükü tekerrür sayısı, T8,2	60.000.000
Yük transfer katsayısı, J	2,7
Drenaj katsayısı, Cd	1
Portland çimentolu betonun kopma modülü (psi)	660
Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası, S ₀	0,35
Yolun ilk servis kabiliyeti, P ₀	4,5
Yolun son servis kabiliyeti, Pt (Otoyollar, devlet yolları için 2,5)	2,5
Servis kabiliyeti indeksi, ΔPSI	2
Betonun elastisite modülü, Ec (C 35/45)	4.786.244
Güvenilirliğin standart normal sapması, ZR (Devlet yolu R=%95)	-1,645

Hesaplamalarda, öncelikle yol taban zeminlerinin esneklik modülü (M_R) ve yatak katsayısı (k) değerleri, $M_R=1500 \times CBR$ [31] ve $k = M_R / 19,4$ [32] bağıntıları ile hesaplanmıştır. Bu bağıntılar yardımı ile katkısız zeminin M_R ve k değerleri sırasıyla 9840 psi ve 507,22; %10C katkılı zeminin ise 28215 psi ve 1454,38 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler ve Tablo 6'daki parametreler kullanılarak denklem (1) yardımı ile katkısız zeminin plak kalınlığı C 35/45 beton sınıfı için (d) 12,20inç (31cm), %10C katkılı zemin için ise 11,06 inç (28cm) olarak belirlenmiştir.

Bu hesaplamalara göre, %10C içeren zeminler için tabaka kalınlığının katkısız zemine kıyasla 3cm eksilerek %9,68 oranında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

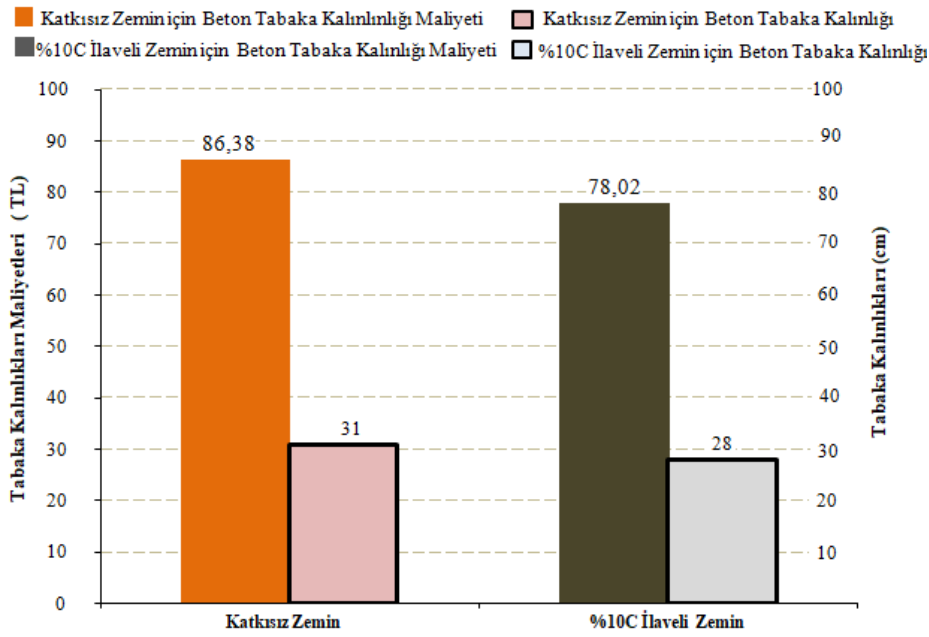
3.5 Rijit Üstyapının Ekonomik Analizi

Siyah karbon ile iyileştirilmiş zeminin karayolu rijit üstyapı maliyeti üzerindeki etkisi, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) kriterleri esas alınarak değerlendirilmiştir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) tarafından yayınlanmış olan 2020 yılı birim fiyat cetvellerinden [33], öncelikle C 35/45 basınç sınıfındaki beton için birim alan (m^2) maliyeti hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar ve maliyet analizlerine göre zeminler için rijit yol üstyapı kalınlığının m^2 cinsinden birim maliyetleri, katkısız zemin için 86,38 TL/ m^2 , %10C katkılı zemin için 78,02 TL/ m^2 olarak tespit edilmiş ve Tablo 7'de verilmiştir. Zeminler için hesaplanan tabaka kalınlıkları ve maliyetlerinin karşılaştırma grafiği ise Şekil 7'de görülmektedir.

Tablo 7. Katkısız ve %10C Katkılı Zeminler için Tabaka Birim Maliyetleri

Poz no	Tanım	Biri m	Birim Fiyat (TL)	m ² /cm Maliyet (TL)	Hesaplan Tab.Kal. (cm)	m ² Maliyet (TL)
151.501.007 (K)	Beton Santralinde Üretilen veya Satın Alınan ve Beton Pompasıyla Basılan, C 35/45 Basınç Dayanım Sınıfında Beton Dökülmesi (Beton Nakli Dâhil)	m ³	278,63	2,79	31	86,38
151.501.007 (%10C)	Beton Santralinde Üretilen veya Satın Alınan ve Beton Pompasıyla Basılan, C 35/45 Basınç Dayanım Sınıfında Beton Dökülmesi (Beton Nakli Dâhil)	m ³	278,63	2,79	28	78,02

**Şekil 7.** Katkısız ve %10C Katkılı Zeminler için Tabaka Kalınlıkları ve Maliyetler

Tabaka kalınlıklarının maliyetleri göz önüne alındığında %10C katkılı zemin için yapım maliyetinin %9,68 oranında azaldığı görülmektedir. Bu hesaplamalara göre, 1000 m uzunluğunda ve 20 m genişliğindeki bölünmüş bir yolda yol taban zemininin %10 oranında siyah karbon ile iyileştirilmesi durumunda 167.178,00 TL tasarruf sağlanmış olacaktır.

Sonuç olarak, binlerce kilometrelik yol ağı dikkate alındığında, rijit kaplama yapılması durumunda zemin iyileştirmesi sebebiyle ciddi bir kazanç elde edilebileceği görülmektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Siyah karbon kullanılarak iyileştirilen bir zeminin, rijit yol kaplama kalınlığına ve maliyetine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Standart proktor sonuçlarına göre, siyah karbon oranı arttıkça zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığı ve optimum su içeriklerinin arttığı görülmüştür. Bu durumun, siyah karbonun boşluklu yapısı sebebiyle karışımın absorbe kapasitesini arttırmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

2. Serbest basınç deney sonuçlarına göre, numunelerdeki en yüksek mukavemet değeri katkısız zemine kıyasla 2,42 kat artış gösteren %10C katkılı zeminlerden elde edilmiştir. Mukavemetteki bu önemli artış, siyah karbonun zeminlerin kohezyon kuvveti ve kayma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, katkı artışı ile numunelerdeki birim şekil değiştirmenin azaldığı, bunun ise siyah karbonun karışımların sertliğini arttırması nedeniyle meydana geldiği değerlendirilmektedir.
3. CBR deney sonuçları, %10 siyah karbon ilavesinin zeminlerin CBR değerini katkısız zemine kıyasla 2,86 kat kadar arttırarak zeminlerin taşıma gücünü oldukça iyileştirdiği tespit edilmiştir.
4. Rijit üstyapı tasarım ve analizlerine göre, katkısız zemine %10 siyah karbon ilave edilmesi durumunda rijit tabaka kalınlığınının 31cm'den 28 cm'e düştüğü ve bunun sonucu olarak üstyapı maliyetinin yaklaşık %9,68 oranında azaldığı görülmüştür. Ayrıca, 1000 m uzunluğunda ve 20 m genişliğindeki bölünmüş bir rijit yol tasarımından 167.178,00 TL tasarruf sağlanmış olacağı belirlenmiştir.
5. Sonraki çalışmalarda siyah karbon katkısının; konsolidasyon/şişme/don kabarması vb. uzun vadeli etkilerinin ve farklı zeminler üzerindeki etkisinin benzer ve ileri deneysel yöntemler kullanılarak araştırılması ve bunun yol üstyapılarına etkilerinin tam olarak açığa çıkarılmasının literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, siyah karbon malzemesinin zemin iyileştirilmesinde kullanılmasının rijit üstyapı tabaka kalınlığını ve maliyetini önemli ölçüde azaltacağı değerlendirilmektedir. Diğer taraftan, siyah karbonun ömrü tamamlamış araç lastiklerinden geri dönüşüm ürünü olarak elde edildiği düşünüldüğünde, bu ürünün zemin iyileştirme maksadıyla kullanılmasının, ülke ekonomisi ve çevre kirliliği bakımından olumlu katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Uzuner.B.A.,“Temel Mühendisliğine Giriş”, Derya Kitabevi Trabzon, (2016)
- [2]. Tunç, A.,“Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları”, Nobel Yayınevi, Ankara, (2002).
- [3]. Tunç, A.,“Yol Malzemeleri ve Uygulamaları”, Nobel Yayınevi, Ankara, (2007).
- [4]. Geçkil, T., Tanyıldızı,M.M.,Yıldırım E.S., “Yüksek Fırın Cürufu ile Stabilize Edilmiş Killi Bir Zeminin Esnek Üstyapı Tabaka Kalınlıklarına ve Maliyetlerine Etkileri”, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2020, 32 (2), 509-520.
- [5]. Çetin, A.Y, “Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [6]. Bilgen, G., Kavak, A., Çapar, Ö. F.,“Düşük plastisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane cürufunun kullanılması ve kireç ile etkileşiminin araştırılması”, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 2012, 2 (2), 30-38.
- [7]. Karatai, T.,R., Kaluli, J.W., Kabubo, C., Thiong G.,“ Soil Stabilization Using Rice Husk Ash and Natural Lime as an Alternative to Cutting and Filling in Road Construction”, Journal of Construction Engineering and Management, 2017, 143(5).
- [8]. Muntohar, A.S. and Hantoro, G., “Influence of rice husk ash and lime on engineering properties clayey subgrade”, Electronic Journal of Geotechnical Engineering(EJGE), 2000, 5.
- [9]. Alhassan, M. and Mustapha, A.M., “Effect of Rice Husk Ash on Cement Stabilized Laterite”, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2007, July-December, p. 4758.

- [10]. Okafor, F.O.and Okonkwo, U.N., “Effects of Rice Husk Ash on Some Geotechnical Properties of Lateritic Soil”, Nigerian Journal of Technology, 2009, 28 (1), 46-52.
- [11]. Shabana S., Anshi C., Shamseera P., Shyamili T. M., Sruthi V., Suhaira P., “Study on CBR values of soil with crushed coconut shells” International Journal of Advanced Engineering Technology 2014, 05,03, July-September, 55-58.
- [12]. Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., Muntohar, A. S., “Stabilization of Residual Soil with Rice Husk Ash and Cement”, Construction and Building Materials, 2005, 19, 448–453.
- [13]. Akbulut, S., Arasan, S., Ekrem Kalkan, E., “Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers”. Applied Clay Science, 2007, 38, 23–32.
- [14]. Brooks, R.M., “Soil Stabilization with Fly Ash and Rice Husk Ash”, International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 2009, 1, 3, 209-217.
- [15]. Karaman, M. ve Ecemiş, N. “Kum - lastik kırpıntı çapının ve karışım oranının sıvılaştırma potansiyeline etkisinin sarsma tablası deneyleri ile incelenmesi”, 7. Geoteknik Sempozyumu, 2017, İstanbul.
- [16]. Keskin, S. ve Laman, M., “Atık lastik - kum karışımlarının kayma mukavemetinin laboratuvar deneyleriyle incelenmesi.”, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2012, 27(2), 27-35.
- [17]. Eryılmaz H. ve Demirarslan K.O., “Ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) sıvılaştırılarak geri dönüşümünün araştırılması”, Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler, 2019, 2(1), 50-56.
- [18]. Işık, F. ve Akbulut R.K. (2018). Geri Dönüştürülmüş Karbon Karasının Killi Zeminlerin Kıvam Limitlerine Etkisi. / Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech. 8(2): 123-130, 2018.
- [19]. Kumar S.N, Reddy A. S. T., Kumar P.V., “Utilization Of Carbon Black Waste For Subgrades In Flexible Pavements” International Journal Of Scientific & Technology Research, 2019, 8, 12, 1817-1820
- [20]. Devlet H, “Killi zeminler üzerinde atık lastik ve gazbetonun etkilerinin değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [21]. Geçkil, T, Sarıcı, T, Karabaş, B., “Siyah Karbon ile Stabilize Edilen Taban Zeminin Yol Esnek Üst Yapı Maliyetine Etkisi”, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (23) , 222-235, 2021.
- [22]. Geçkil, T, Tanyıldızı, M, Yıldırım, E., “Yol Altındaki Killi Bir Zeminin Uçucu Kül ile İyileştirilmesinin Karayolu Üstyapısına ve Maliyetine Etkileri”, Savunma Bilimleri Dergisi, (38) , 1-21, 2020.
- [23]. Siyah Karbon Teknik Bilgi: https://eracevre.com/pdf/Carbon_Black_Brochure.pdf “Green Karbon Black” (Erişim Tarihi:25.09.2020)
- [24]. Yılmaz,I, Yıldırım M., Keskin İ, “Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler”, Seçkin Kitabevi Ankara, (2017).
- [25]. Karayolları Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi., T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müd., Ankara, 2019.
- [26]. AASHTO, “ Interim Guide For Design of Pavement Structures”, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.,1993.
- [27]. Milli Eğitim Bakanlığı, “Kimya Teknolojisi Karbon Karaları ve Testleri”, (524KI0246), Ankara, 2011.
- [28]. Kızıldaş, Ü., “Lastik Üretiminde Katkı Elemanlarının Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1999.
- [29]. Geçkil, T., “Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [30]. Uzuner.B.A., “Temel Zemin Mekaniği”, Derya Kitabevi Trabzon, (2014).
- [31]. Tunç, A., “Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları”, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, (2004).
- [32]. Tunç, A., “Yol Malzemeleri ve Uygulamaları”, Nobel Yayınevi, Ankara, (2007)
- [33]. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Birim Fiyatları: <http://www.birimfiyat.net>, (Erişim Tarihi:25.09.2020).