



Cam tozu kullanılarak iyileştirilen zeminin üzerine tasarlanan esnek üst yapının tabaka kalınlığı ve maliyetinin araştırılması

Tacettin Geçkil^a, Talha Sarıcı^a ve Bahadır Karabaş^{a,*}

^a*İnönü Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, 44280, Türkiye*

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 3 Temmuz 2024
Düzeltilme 1 Ekim 2024
Kabul 10 Kasım 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Kil
Cam tozu
Zemin ıslahı
Esnek üst yapı
Ulaştırma geotekniği

ÖZET

Bu çalışmada, atık camların geri dönüşümünde elde edilen cam tozu (CT) ile kil bir zemini iyileştirmenin, üzerine tasarlanan esnek üst yapıya etkileri, tabaka ve ilk yapım maliyetleri esas alınarak araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk olarak zemin örneklerinin özelliklerinin belirlenmesine yönelik bazı deneyler yapılmıştır. Daha sonra zemine ağırlıkça %3, %6, %9, %12 CT ilave edilerek hazırlanmış deney numunelerine proktor deneyi uygulanmıştır. Ardından, hazırlanan serbest basınç deneyi örneklerine 28 gün kür süresi sonrası serbest basınç deneyi yapılmıştır. Serbest basınç deneyleri sonucunda, en yüksek dayanım %9 CT içeren karışımlardan elde edilmiştir. Son olarak, katkısız ve %9 CT katkılı numuneler üzerinde 28 gün kürün akabinde yapılan Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) deneyleri neticesinde, CBR değerinin %9 CT eklenmesiyle %142,7 arttığı belirlenmiştir. Elde edilen CBR değerleri esas alınarak, iyileştirilen ve iyileştirme yapılmamış zemin üzerine esnek yol üstyapı tasarımı yapılarak üstyapı tabaka kalınlıkları ve maliyetleri araştırılmıştır. Hesaplamalar incelendiğinde, %9 CT ile yapılan iyileştirmenin, üstyapı tabaka kalınlıklarını azalttığı ve maliyetlerini %1,3 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir.

Investigation of layer thickness and cost of flexible pavement designed on subgrade improved with glass powder

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 July 2024
Received in revised form 1 Sept 2024
Accepted 10 November 2024

Available online

Keywords:

Clay
Glass powder
Soil stabilization
Flexible pavement
Transportation geotechnics

ABSTRACT

In this study, the effects of improving a clayey soil with glass powder (GP) obtained from recycled waste glass on the flexible pavement designed over it were investigated, focusing on layer thickness and first construction costs. For this purpose, firstly, some tests were conducted to determine the properties of the soil samples. Subsequently, proctor tests were performed on specimens prepared by adding 3%, 6%, 9%, 12% GP by weight to the soil. Then, unconfined compression tests were performed on the prepared samples after a curing period of 28 days. The results of the unconfined compression tests showed that the highest strength was obtained from mixtures containing 9% GP. Lastly, following 28 days of curing, California bearing ratio (CBR) tests were conducted on both untreated and 9% GP treated samples, revealing that the CBR value increased by 142.7% with the addition of 9% GP. Based on the obtained CBR values, flexible pavement designs were made on both improved and unimproved soils, and the layer thicknesses and costs were investigated. The calculations indicated that the improvement with 9% GP reduced the pavement layer thicknesses reduced and the costs by 1.3 %.

I. GİRİŞ

Ulaşım ihtiyacının giderilmesi için belirlenen yol güzergâhları; ekonomik ve teknik analizler neticesinde, güvenlik ve çevresel etkiler göz önüne alınarak en düşük maliyetle en yüksek faydayı elde etmek esasına dayanarak belirlenmektedir. Güzergâhların tetkik edilmesinde önemli kriterlerin başında, tasarlanan karayolu üst

yapılarının ilgili standart ve güvenlik şartlarını sağlayarak, sorunsuz ve kesintisiz bir şekilde ulaşımın sağlaması yer almaktadır. Ancak, bu şartların sağlanmasında karayolunun tasarlandığı arazi koşulları ve zeminin teknik özellikleri büyük önem arz etmektedir. Özellikle tasarımlarda güvenlik ve maliyet kriterlerini zorlayacak hususların başında taşıma gücü düşük zeminler ve bunların ıslahı problemi yer almaktadır. Bu zeminlerin güvenli ve ekonomik olarak projelerde kullanılmasının sağlanmasında katkılı zemin stabilizasyonu önemli bir yer tutmaktadır [1-3]. Bu tarz stabilizasyon uygulamalarında çimento, kireç ve bitüm gibi malzemelerin [4] yanında, alternatif malzemeler kullanılmasına yönelik çalışmalar vasıtasıyla [5-10] tasarımların daha güvenli, ekonomik ve çevreye saygılı bir şekilde tasarlanmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Kumar vd. [11] yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve zemin karışımlarının kireç ve polyester fiber malzeme ile stabilizasyonunun zeminin mühendislik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, polyester fiber, kireç ve uçucu külün birlikte kullanımının zemin stabilizasyonu için uygun olduğunu belirlemişlerdir. Ansary vd. [12] tarafından yapılan araştırmada, Bangladeş'in Chittagong sahil bölgesinde bulunan Anwora ve Banshkali bölgelerinden elde edilen iki farklı zemin türüne uçucu kül ile stabilizasyon uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre, %12 ile %18 arasında uçucu kül ve %3 kireç ilavesi yapıldığında, hafif trafikli yolların temel ve alt temelleri için gerekli olan dayanım şartlarının karşılandığını belirlemişlerdir. Dompheou ve Eisazadeh [13] yaptıkları çalışmada pirinç kabuğu külü, hindistan cevizi lifi ve kireç ile stabilize edilmiş laterit zeminin dayanım özelliklerini araştırmışlardır. Laterit zemine farklı oranlarda pirinç kabuğu külü, hindistan cevizi lifi ve kireç karıştırılarak numuneler hazırlamışlar, ardından karışımlar üzerinde modifiye proktor testi, serbest basınç testi, likit limit ve plastik limit deneyleri uygulamışlardır. Optimum karışımın %20 pirinç kabuğu külü, %1 hindistan cevizi lifi, %8 kireç oranında olduğunu değerlendirmişlerdir. Çelik vd. [14], yüksek plastisiteli zeminin, çay fabrikası atıklarının piroliziyle elde edilen biyokömürün uçucu kül ile karıştırılmasıyla yapılan stabilizasyon neticesinde serbest basınç dayanımında %51-%163 arasında artış olduğu, en iyi sonuca 14,5 gün kür süresi, %11,5 katkı miktarı ve %23,6 su içeriğindeki karışımlarda görüldüğünü tespit etmişlerdir. Lakkimsetti ve Nayak [15], çalışmalarında yüksek fırın cürufunu killi zemin özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanmışlardır. Farklı oranlarda (%10 ile %45 arasında) yüksek fırın cürufunu kuru ağırlıkla zemine ekleyerek taşıma kapasitesi ve kayma mukavemeti değerlerini belirlemişlerdir. Deney sonuçlarına göre en optimal katkı oranının %10 ve üzerindeki karışımlarda olduğunu ve serbest basınç dayanımının 2.5 katına kadar arttığını belirlemişlerdir. Uysal vd. [16], çalışmalarında uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve cam tozu ile stabilize edilmiş ince taneli zeminin mühendislik özelliklerini belirlemeyi amaçlamışlardır. İnce taneli zemin, kuru ağırlığının %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında katkı malzemeleri kullanılarak stabilize edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüksek fırın cürufunun kayma mukavemetini artırmada en etkili katkı olduğu, artan silis dumanı oranı ve yüksek fırın cürufu ile cam tozu karışımının özellikleri iyileştirmede etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Günümüzde birçok alanda kullanılan camın atık hale gelmesi ile cam geri dönüşümünden elde edilen cam tozunun stabilizasyon malzemesi olarak çeşitli zemin tiplerinin iyileştirilmesine yönelik araştırmalarda [17-22] kullanıldığı ve kullanımının uygun görüldüğü belirlenmiştir. Babatunde vd. [17] cam tozunun zeminin mühendislik özelliklerine etkisini değerlendirmek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Ağırlıkça %0, %2, %4, %6 ve %8 gibi farklı yüzdelerde cam tozunu deneylerde kullanılmıştır. Cam tozunun %4 olduğu karışımlarda mukavemet değerinde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, %8 cam tozu ilaveli karışımda plastik limit değerinde düşüş belirlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, cam tozunun zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğini tavsiye etmişlerdir. Ogunairo vd. [18], kil bir zemini iyileştirmek maksadıyla polietilen tereftalat ve atık cam tozunun

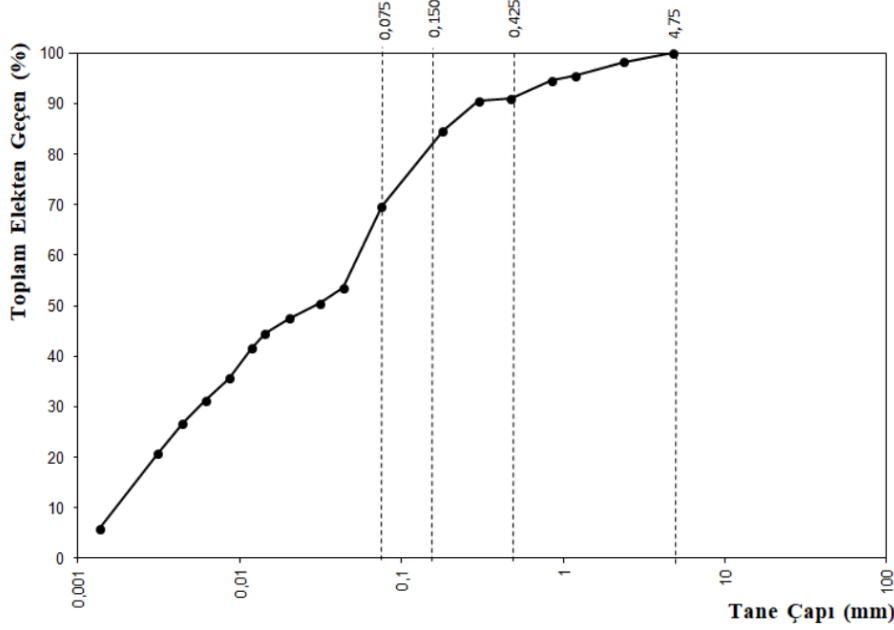
stabilizatör olarak kullanıldığı durumdaki etkinliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları deneyler neticesinde %5 polietilen tereftalat, %5-20 arasında atık cam tozu ve 2 molar sodyum hidroksit çözeltisi ile aktive edilerek elde edilen karışımlarda serbest basınç dayanımında dikkate değer bir artış olduğunu belirlemişlerdir. Bosco vd. [19], AASHTO zemin sınıfına göre A-6 (5) sınıflandırılan düşük plastisiteli killi zeminin iyileştirilmesine yönelik olarak atık cam tozunun (WGP) kullanımına yönelik çalışmalar yapmışlardır. Zemine %3, 5, 7 ve 9 WGP ilave edilerek hazırlanan karışımlar neticesinde, WGP eklenmesinin karışımları güçlendirdiği ve hacim değişimine olan duyarlılığını azalttığını tespit etmişlerdir. En yüksek basınç dayanımının, %7 WGP ile elde edildiğini belirlemişlerdir. Perera vd. [20], genişleyen kil zemine farklı yüzdelerde (kil kuru ağırlığının %0, %5, %10, %15 ve %20'si) kırılmış cam eklemişler bir dizi mekanik ve mikro yapısal analizler yürütülmüşlerdir. Yapılan deneyler neticesinde %10-15 oranında kırılmış cam eklenmesinin, mekanik özellikleri (serbest basınç dayanımı, Kaliforniya taşıma oranı ve esneklik modülü) önemli ölçüde iyileştirdiğini, şişme ve büzülme potansiyellerini azalttığını, ayrıca kilin su tutma özelliklerini iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Olufowobi vd. [21] cam tozunun killi zemin üzerindeki stabilize edici etkisini araştırmışlardır. Zemin örneğine ağırlığına göre %1, %2, %5, %10 ve %15 gibi değişen oranlarda cam tozu ve %15 çimento oranında çimento eklenerek deneyler yapmışlardır. AASHTO sınıflandırma sistemi kullanılarak A-6 tespit edilen zemine özgül ağırlık, elek analizi ve atterberg limit testleri yapılmıştır. Daha sonra yapılan neticesinde killi zemin özellikleri açısından en iyi sonuçlar %5 ila %10 arasında cam tozu ilave edilen numunelerde tespit etmişlerdir. Perera vd. [22], düşük plastisiteli kilin kırılmış cam (CG) ile özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Uygulanan malzeme özellikleri, mikro yapısal özellikler ve mekanik mukavemet özelliklerinin belirlenmesine yönelik testler neticesinde CG'nin %15'lik optimum eklenmesi ile düşük plastisiteli kilin özelliklerinin iyileştiğini belirlemişlerdir.

Son yıllarda, literatürde çeşitli katkı maddeleri ile zeminin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmaların oldukça popüler olduğu görülmüştür. Bu araştırma kapsamında yapılan literatür incelemesi neticesinde, çalışmamızın killi bir yol tabanının cam tozu kullanılarak stabilize edilmesinin esnek üst yapı tasarımına etkilerini, tabaka kalınlığı ve ilk yapım maliyeti bakımından inceleyen nadir çalışmalardan biri olacağı değerlendirilmektedir. Bu amaçla öncelikle zeminin özellikleri, elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri ve piknometre gibi deney yöntemleriyle belirlenmiştir. Ardından, zemine ve zeminin ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 oranında cam tozu katılarak stabilize karışımlar hazırlanmıştır. Katkisiz ve katkılı zemin örneklerine standart proktor deneyi, serbest basınç deneyi ve Kaliforniya taşıma gücü oranı deneyleri uygulanmıştır. Son olarak, saf (iyileştirilmemiş) ve optimum katkı oranı kadar cam tozu katılarak iyileştirilmiş kil zemini üzerinde esnek yol üst yapı tasarımı yapılmıştır. Esnek yol üst yapı tasarımı AASHTO'nun 1993 yılında önerdiği yöntemle gerçekleştirilmiş, tasarım tabaka kalınlıkları ve ilk yapım maliyetleri hesaplanmıştır.

II. DENEYSEL METOT

2.1 Malzemeler

Çalışma kapsamında, İnönü Üniversitesi Kampüsünün Güney bölümünden killi zemin örneği temin edilmiştir. Zemin örneğinin özelliklerini belirlemek için elek analizi ile hidrometre deneyi ASTM C136/C136M ve ASTM D422-63'göre yapılmış ve zeminin tane çapı dağılımı tespit edilmiştir. Zeminin tane çapı dağılım grafiği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tane çapı dağılımı eğrisi

Ardından, zemin örneğinin ASTM D4318'e göre kıvam limitleri belirlenmiştir. Özgül ağırlığın tespiti için ASTM D824 standardına göre piknometre deneyi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, zeminin maksimum kuru yoğunluğu (ρ_{kmax}) ve optimum su içeriği (ω_{opt}) standart proktor deneyi ile ASTM D698 esaslarına uyularak belirlenmiştir. İncelenen zeminin düşük plastisiteli kil (CL) ve AASHTO sınıflandırma yöntemine göre (A-6) zemin sınıfına ait olduğu tespit edilmiştir. Tablo 1'de deneyler ile belirlenen zemin özellikleri sunulmuştur.

Tablo 1. Zemin numunesinin belirlenen özellikleri

Değişken Adı	Simge	Değeri	Birim	Standart
Plastisite İndisi	PI	11,88	%	ASTM D4318
Likit limit	ω_L	30,58	%	ASTM D4318
Plastik limit	ω_p	18,70	%	ASTM D4318
Optimum su içeriği	ω_{opt}	18,10	%	ASTM D698
Maksimum kuru yoğunluk	ρ_{kmax}	1,752	g/cm ³	ASTM D698
Tane yoğunluğu	ρ_s	2,720	g/cm ³	ASTM D824
Efektif Çap	D ₁₀	0,00238	mm	ASTM D2487
%30 Geçen Çap	D ₃₀	0,00584	mm	ASTM D2487
%60 Geçen Çap	D ₆₀	0,05730	mm	ASTM D2487
No:4 Elekten Geçen	-	99,71	%	ASTM D2487
No:200 Elekten Geçen	-	69,63	%	ASTM D2487
Sınıflandırma	-	CL	-	ASTM D2487

Çalışmamızda incelenen CL (A-6) zemini literatürde [3, 23-25] kireç ve çimento ile stabilizasyonu tavsiye edilen zemin sınıfları arasında yer almaktadır. Ayrıca A-6 zeminin AASHTO zemin sınıfına ait sınıflandırma tablosunda, siltli killi zeminler bölümünde A-4, A-5, A-6, A-7 zemin tiplerinin bulunduğu kısımda ortadan

kötüye olarak sınıflandırma bölümünde yer aldığı ve A-6 zemininde içinde bulunduğu “siltli-killi” zeminlerin, taban zeminini olarak yetersiz kalacağına literatürde [26] ifade edildiği görülmektedir. Bu durumda literatürdeki CL (A-6) zeminine ait tavsiyeler dikkate alınarak, geleneksel çimento ve kireç gibi stabilizasyon malzemelerinin yerine cam tozu ile yapılacak stabilizasyonun, esnek üstyapı ilk yapım maliyetinin azaltılabileceği hususunun ispatlanmasına yönelik araştırmamızda, İnönü Üniversitesi Kampüsünün Güney bölümünden alınan killi zeminin kullanılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Cam, yapısını meydana getiren temel hammaddelerinin (SiO_2 , Na_2O , CaO vd.) yüksek sıcaklıkta eritilmesinin ardından ani olarak soğutması neticesinde oluşan bir malzemedir. Cam ani soğutulmuş oksitlerle meydana gelmesinin yanında ana maddesi silisyumdur (SiO_2). Üretim sırasında hızlı soğuma nedeniyle kristal yapı yerine amorf yapısını koruyarak katılaştır. Bu yapı cama mukavemet özelliğini kazandırmaktadır [27]. Günümüzde birçok alanda kullanılan cam, kullanıldıktan sonraki atık hali ile doğada uzun süre yok olmaz, yüzlerce yıl boyunca aynı kalmaktadır. Bu nedenle, cam atıklarının doğru bir şekilde bertaraf edilmesi ve geri dönüştürülmesi, doğal kaynakların korunması için önemlidir. Ayrıca, cam geri dönüşümü, enerji tasarrufu sağlamak ve çevre kirliliğini azaltmaktadır [28]. Çalışmamızda kullanılan cam tozu ise, atık camların cam kumbaraları ve fabrikalardan toplanarak geri dönüşümünden elde edilmiştir. Bu süreç cam atıklarının toplanması, ayrıştırılması ve eleme işlemlerinden sonra öğütülmesi ile tamamlanmaktadır. Çalışma kapsamında, 1-50 mikron aralığında cam tozu kullanılmıştır. Cam tozunun kimyasal özellikleri Tablo 2’de sunulmuştur. Zemin ve cam tozu numunesinin görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Cam tozunun kimyasal özellikleri

Parametre	Değer
Renk	Beyaz
SiO_2	%73
CaO	%10
Al_2O_3	%1
MgO	%4
Na_2O	%12



Şekil 2. Zemin ve cam tozu numunesinin görüntüsü

2.2. Elek Analizi ve Hidrometre, Standart Proktor, Serbest Basınç ve Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deneyleri

Zemin örneklerinin özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla ASTM C136 / C136M uygun elek analizi ve ASTM D422-63'e göre hidrometre deneyi yapılarak, zemin içindeki tane boyutlarının dağılımı ait tane çapı dağılım eğrisi hazırlanmaktadır. Elek analizi ve hidrometre deneyi uygulamasında, yaklaşık 200-500 g zemin numunesi etüvde 105 °C'de 24 saat tutularak kurutulur. Ardından elekler ve tava tartılır. En büyük elek açıklığı olan elek en üstte olmak üzere elekler sıralanır. En üst eleğe hazırlanan zemin numunesi konularak cihaz çalıştırılır, 15 dk sarma işlemi tamamlandıktan sonra, elekler üstünde ve tavada kalan numune miktarları tartılır ve elekten geçen numune miktarı yüzde olarak hesaplanır, toplam geçen yüzde (%) numune miktarı ve tane çapının bulunduğu tane çapı dağılım eğrisi çizilir. Elek analizinin tamamlanmasından sonra No:200 (0,075 mm) elekten geçen malzeme miktarının %10'dan fazla olduğu durum için ASTM D422-63'e göre, 0,075 mm elek altında kalan malzemenin tane boyutunun belirlenmesi maksadıyla hidrometre deneyi yapılır. Söz konusu deney Stokes Yasasına dayanır. Bu analizde zemin daneleri özel solüsyonlu (sodyum metafosfatlı) cam çöktürme silindirinin içerisinde kendi ağırlığı ve yerçekimi etkisi ile çökerken hidrometre adı verilen cam alet ile tane çökme mesafesi ve zemin-su yoğunluğu ölçülmekte, ölçümler 10, 15, 30, 60, 120, 240, 1440 dakikada sıcaklıkta dikkate alınarak yapılmaktadır. Yapılan ölçüm hesaplamalar ile tane çapı ve yüzdesi hesaplanmaktadır [29].

Standart proktor deneyi, su ile mekanik gereçler kullanılmasıyla havanın zemin ve su karışımından atılmasına dayanır. Söz konusu deney ASTM D698 standardına uygun olarak gerçekleştirilir. Zemin numunesinin ρ_{kmax} ve ω_{opt} belirlenmesi maksadıyla yapılır. Deneye ait kalıp boyutları yaklaşık olarak 105 mm çapında 115,5 mm yüksekliğindedir. Deneyde 105 °C'de 24 saat kurutulmuş örnek kullanılmalıdır. İstenen su oranlarıyla yoğrulan örnekler kalıba yerleştirilir. 2,5 kg ağırlığındaki tokmak ile vurularak (25 defa) sıkıştırılma işlemi gerçekleştirilir. Serilme süreci 3 aşamada yapılır, son katmandan sonra üstü düzeltilir ve ağırlığı belirlenir. Bu süreç, değişik oranlarda su içeriklerinde 5 kez tekrarlanır ve her birinde su içeriği ile kuru yoğunluğu hesaplanır. Belirlenen veriler doğrultusunda doygunluk eğrisi oluşturulur ve ρ_{kmax} ile ω_{opt} belirlenir [29]. Şekil 3'te standart proktor deneyi aşamaları görülmektedir.



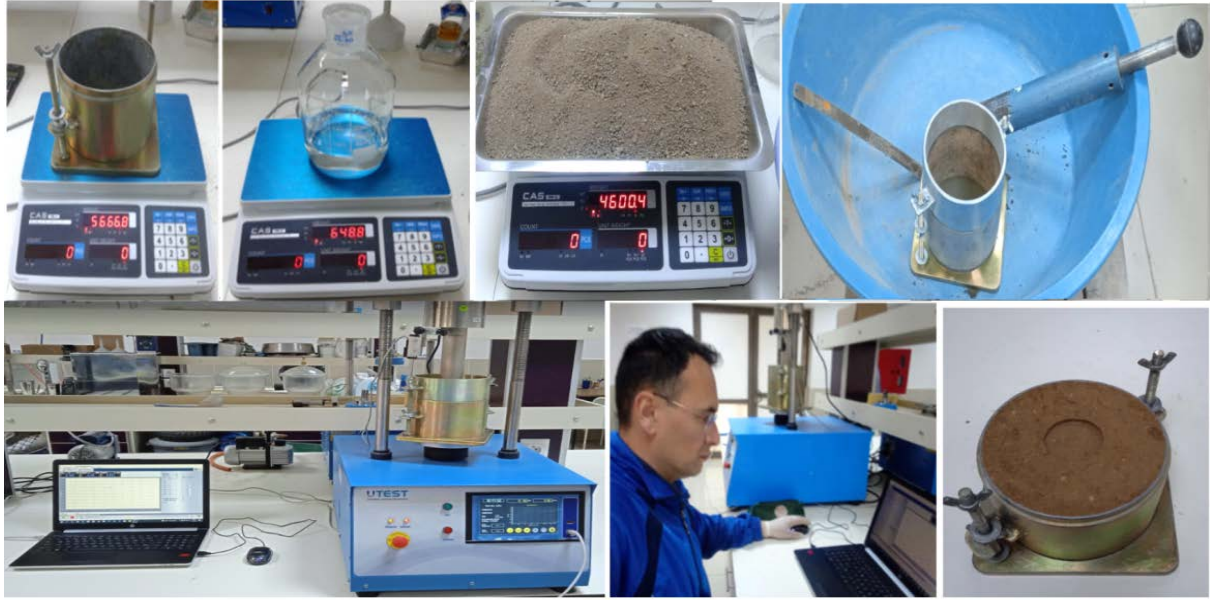
Şekil 3. Standart proktor deneyi aşamaları

Serbest basınç deneyi, ASTM D2166 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere belirli kür sürelerinin ardından dayanımlarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilir. Uygulama sırasında, zemin numunesi etüvde 24 saat boyunca 105 °C'de kurutulur. Kullanılacak kalıbın boyutları (çap 38 mm ve boy 76 mm) deney başlamadan önce ölçülerek kontrol edilir. Önceden hesaplanan miktarlarda su ilave edilerek hazırlanan örnekler, kalıba 4 aşamada serilir. Her tabakadan sonra tokmakla 10 defa vurularak sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra numune kalıptan çıkarılır. Belirlenen kür süresince oda sıcaklığında bekletilir ve beklenen kür süresi sonrası örnekler cihaza yerleştirilir. Birim boy kısalması %0,5 ve %2 arasında (dakikada) olmalıdır. Deney süresi 10 dakikayı geçmemelidir. Deney sonrasında şekil değişimleri ve deformasyonlar gözlemlenerek numunelerin dayanım değerleri belirlenir [30]. Bu çalışmada, serbest basınç deneyi, zemin ve karışım numunelerine ASTM D2166 standardına uygun olarak, 28 günlük kür süresinin ardından gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te serbest basınç deneyi seti ve oluşan deformasyon gösterilmektedir.



Şekil 4. Serbest basınç deneyi seti ve deney sonucu oluşan deformasyon

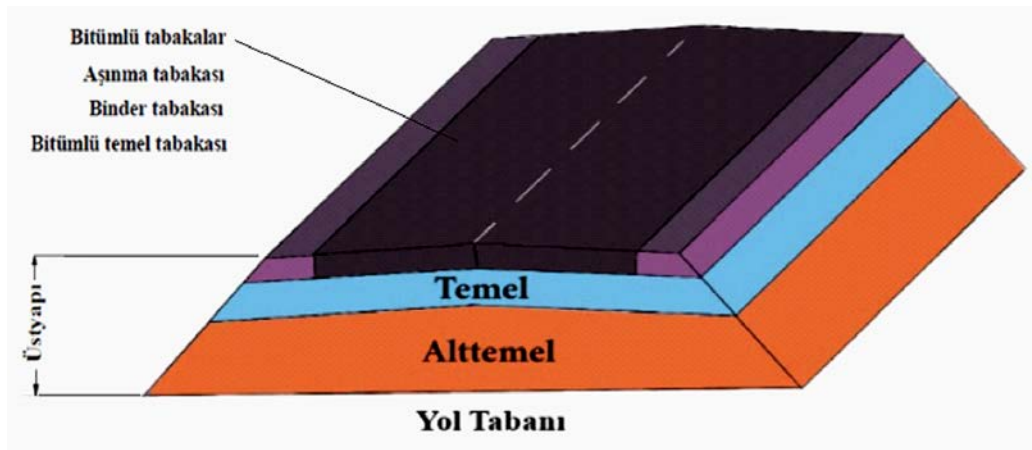
Kaliforniya taşıma gücü oranı deneyi, önceden tespit edilen ρ_{kmax} ile ω_{opt} verilerine göre hazırlanan numunelere, belirlenen kür süresinin ardından, 1,27 mm/dk hızla yaklaşık 1935 mm² alanlı pistonun zemine itilmesi ile taşıma kapasitesinin belirlenmesine dayanır. ASTM D1883-13'e göre gerçekleştirilir. CBR değeri, zeminin belirli penetrasyon (2,5 mm ile 5 mm) değerlerinde tatbik edilen yükün kırma taş örneğine, aynı miktarda batması için tatbik edilen yüke orantılanmasıyla hesaplanır. Deneyin uygulanmasında, kullanılacak kalıbın boyutları ölçülür ve kaydedilir. Ardından, zemin örneği 24 saat 105 °C'de bırakılır. ρ_{kmax} ile ω_{opt} değerinde numune hazırlanır. Karışım CBR kalıbına (Çap 152 mm, h=127 mm) 3 aşamada ve her tabakada tokmakla 56 defa vurularak sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi tamamlanınca numune bulunan kalıp tartılır. Numuneler belirlenen kür süresinde (28 gün) oda sıcaklığında ve dış ortamdan etkilenmeyecek muhafazalı ortamda tutulmuştur. Tamamlanan kür süresinin ardından kuru CBR deneyi uygulanmıştır. Deney neticesinde CBR değerleri penetrasyonun 2,5 ile 5 mm değerleri için belirlenir [29]. Şekil 5'te CBR deney aşamaları görülmektedir.



Şekil 5. Kaliforniya taşıma gücü oranı deneyi uygulama aşamaları

2.3 Esnek Üst Yapı Tasarımı

Esnek üst yapı tasarımı, asfalt çimentosunun bağlayıcı olarak kullanılma esasına göre yapılmaktadır. Asfalt betonu kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşan bir yapıya sahiptir. Tasarım aşamasında, tasarım ömrü, tabaka kalınlıkları, trafik yoğunluğu, yöresel faktörler, ekonomik ve zemin koşulları gibi çeşitli unsurlar dikkate alınır [31]. Şekil 6'da esnek üstyapıdaki tabakaları göstermektedir.



Şekil 6. Esnek üstyapı kesit görünümü [1]

Tabaka kalınlıkları hesabı Denklem (1) kullanılarak AASHTO 1993 esaslarına göre yapılmaktadır [31].

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

Burada;

$T_{8,2}$: Proje trafiğinin eşdeğer standart tek dingil yükü tekerrür sayısı (8,2ton),

SN: Üstyapı sayısı (üstyapı kalınlığını için),

Z_R : Standart sapma,

M_R : Taban zemini için etkili elastisite modülü (psi),

P_0 : Başlangıç hizmet kabiliyeti indeksi,

S_0 : Performans ve trafik tahmininin bileşik standart hatası,

Δ PSI: Toplam hizmet kabiliyeti kaybı

P_t : Nihai hizmet yeteneği indeksini gösterir.

Denklem 1 kullanılarak SN değeri belirlendikten sonra, tabaka katsayıları Tablo 3'ten alınarak tabaka kalınlıkları Denklem 2 ile hesaplanır [31].

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

Burada, a_1 , a_2 , a_3 ise kaplama, temel ile alttemel tabakaları izafi mukavemet katsayılarını; D_1 , D_2 , D_3 kaplama, temel ile alttemel tabaka kalınlıklarını ifade eder. M_2 ve M_3 ise temel ve alttemel tabakalarının drenaj katsayılarını belirtir. Tablo 3'te tabaka katsayıları sunulmuştur.

Tabaka kalınlıklarının hesaplanmasının ardından, temel üzerine ihtiyaç duyulan üstyapı kalınlığı (SN_1), alttemel üzerine ihtiyaç duyulan (SN_2), taban üzerine ihtiyaç duyulan (SN_3) tabaka kalınlıkları kontrolü yapılır [31].

Tablo 3. Tasarım katsayıları [32]

Tabaka Adı	CBR (%)	İzafi Mukavemet Katsayısı (a)	
Kaplama Tabakası	Aşınma	-	0,42
	Binder	-	0,40
Temel Tabakası	Bitümlü Temel	-	0,36
	Plentmiks Temel	≥ 120	0,15
	Granüler Temel	≥ 100	0,14
Alttemel Tabakası	Kırmataş Alttemel	≥ 50	0,13
	Kum-Çakıl Alttemel	≥ 30	0,11

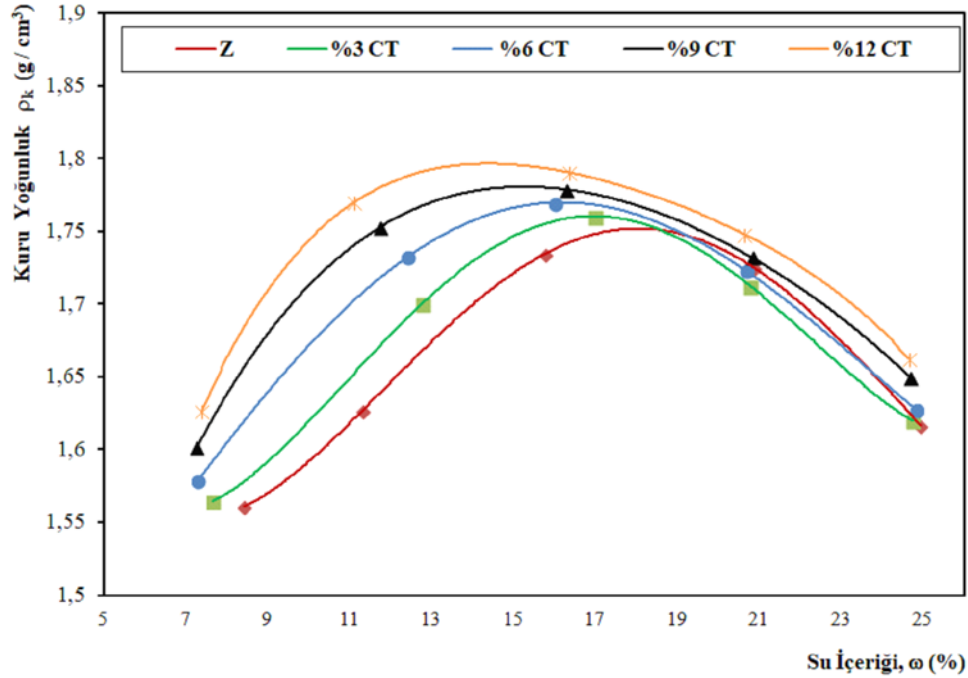
III. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME

Cam tozu kullanılarak iyileştirilen zemininin üzerine tasarlanan esnek üst yapının tabaka kalınlığı ve ilk yapım maliyetinin araştırıldığı bu çalışmada, uygulanan deneylerin ve tasarımların sonuçları bölümler halinde sunulmuştur.

3.1 Standart Proktor Deneyi Bulguları

Katkısız zemin (Z) ile ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 cam tozu (CT) katkılı örneklere standart proktor deneyi

uygulanmıştır. Deney neticesinde belirlenen ω (su içeriği, %) ve ρ_k (kuru yoğunluk) sonuçlarına göre Şekil 7'de çizilen kompaksiyon eğrileri verilmiştir. Belirlenen ω_{opt} ile ρ_{kmax} sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 7. Standart proktor deneyine ait kompaksiyon eğrileri

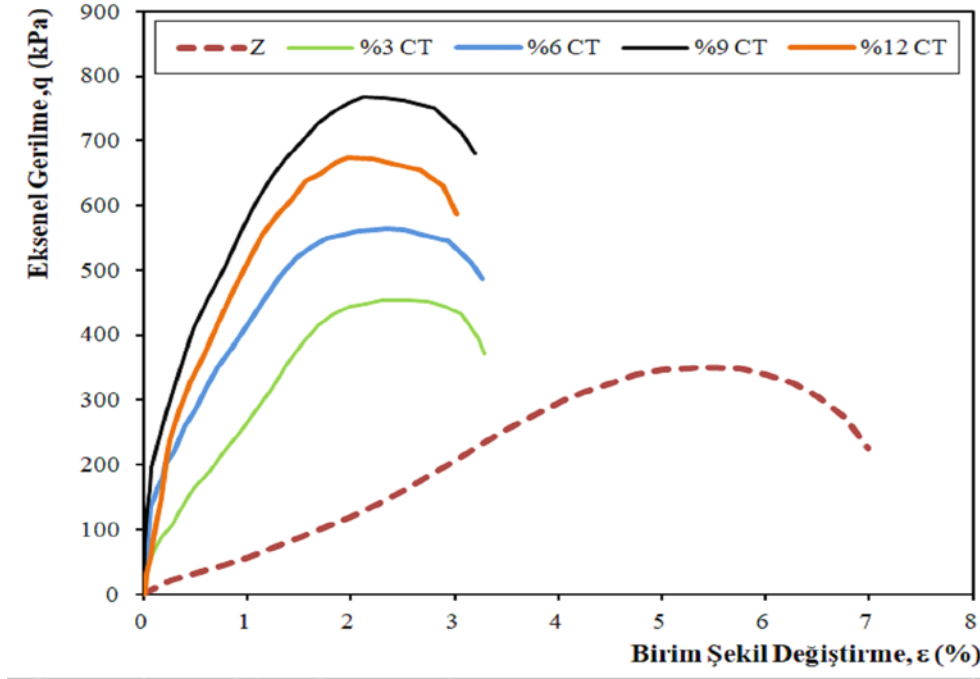
Tablo 4. Katkısız zemin ve cam tozu katkılı zeminin standart proktor deneyi sonuçları

Test Numunesi	ρ_{kmax} (g/cm ³)	ω_{opt} (%)
Z	1,752	18,10
%3 CT	1,762	16,85
%6 CT	1,770	16,09
%9 CT	1,781	15,20
%12 CT	1,797	14,38

Proktor deneyi sonuçlarında hazırlanan karışımlarda CT oranının artmasıyla ω_{opt} değerinin azaldığı, ρ_{kmax} değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulguların, literatürde [33-35] belirtilen çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durumun CT'nin zemin numunesinden daha az su emme kapasitesine sahip olması nedeniyle meydana geldiği bu sebeple ω_{opt} değerlerinin azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca, ρ_{kmax} değerinin artışında cam tozunun ince tane yapısı sayesinde karışımın boşluklarını doldurmasının etkili olduğu değerlendirilmektedir.

3.2 Serbest Basınç Deney Bulguları

Katkısız zemin (Z) ile ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 CT katkılı numuneler, tespit edilen ω_{opt} ile ρ_{kmax} değerleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Numuneler, oda sıcaklığındaki 28 günlük kür süresi sonrası serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Deneylerin 10 dakikayı aşmadığı gözlemlenmiştir. Katkısız zemin ve MK katkılı numunelerin; eksenel gerilme (q) ile birim şekil değiştirme (ϵ) sonuçları Şekil 8'de, serbest basınç mukavemeti (q_u) ve serbest basınç mukavemeti (ϵ_u) değerleri Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 8. 28 günlük kür sonrası katkısız ve cam tozu katkılı numunelerin q-ε grafiği

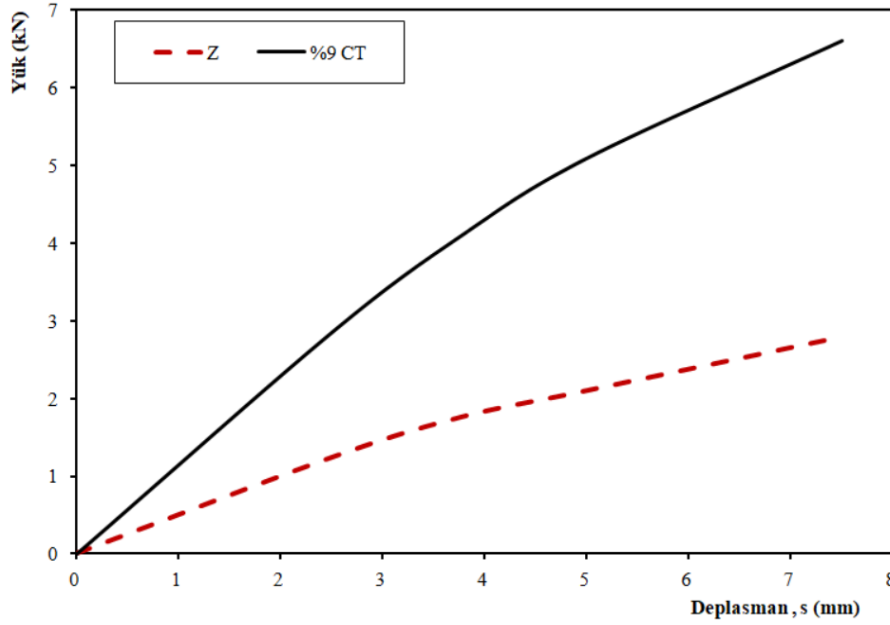
Tablo 5. 28 günlük kür sonrası katkısız ve cam tozu katkılı numunelerin q_u-ε_u verileri

Test Numunesi	q _u (kPa)	ε _u (%)
Z	350,63	5,37
%3 CT	455,27	2,58
%6 CT	564,67	2,35
%9 CT	767,43	2,11
%12 CT	674,07	1,97

Serbest basınç deneyi sonuçlarında, katkısız zeminin serbest basınç dayanımının CT'lı numunelerden daha az olduğu belirlenmiştir. CT katkısının zeminin dayanımını artırdığı ve bu sonuçların literatürle [33-35] uyumlu olduğu tespit edilmiştir. CT ilavesi yapılan tüm numunelerin serbest basınç dayanımlarının katkısız zemine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. %3, %6, %9 ve %12 oranlarında cam tozu ilavesiyle hazırlanan karışımlarda, mukavemet değerinde en iyi artış %9 CT oranında görülmüş ve bu artışın 2,19 kat olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, birim şekil değiştirmenin CT miktarının artmasıyla azaldığı ve bu durumun CT'nin numunelerin sertliğini artırması nedeniyle olduğu, elde edilen sonuçların literatürde [36] belirtilen sert zeminlerin birim şekil değiştirmesinin yumuşak zeminlerden daha az olması görüşüyle örtüştüğü belirlenmiştir.

3.3 Kaliforniya Taşıma Gücü Oranı Deney Bulguları

CBR deneyi kapsamında, katkısız zemin (Z) ve serbest basınç deneyleri neticesinde elde edilen optimum %9 CT oranı esas alınarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken ω_{opt} ve ρ_{kmax} değerleri kullanılmıştır. Numuneler belirlenen 28 günlük kür süresi boyunca oda sıcaklığında ve dış ortamdan etkilenmeyecek muhafazalı ortamda tutulmuştur. Tamamlanan kür süresinin ardından kuru CBR deneyi uygulanmıştır. Tespit edilen yük-deplasman grafiği Şekil 9'da ve CBR değerleri ise Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 9. 28 günlük kür ardından katkısız ve cam tozu katkılı numunelerin yük-deplasman ilişkisi

Tablo 6. 28 günlük kür ardından katkısız ve cam tozu katkılı numunelerinin test sonuçları

Test Numunesi	2,5 mm için CBR Değeri, (%)	5 mm için CBR Değeri, (%)
Z	9,34	10,52
%9 CT	21,54	25,53

CBR deneyi uygulanan numunelerde 28 günlük kür süresinin ardından, 2,5 ile 5 mm deplasman için elde edilen CBR değerleri katkısız zemin için sırasıyla %9,34 ve %10,52; %9 CT ilaveli zemin için ise sırasıyla %21,54 ve %25,53 olarak tespit edilmiştir. CBR değerinin, CT katkılı örneklerde 2,5 ile 5 mm penetrasyon için katkısız zemin numunelerine göre sırasıyla %130,6 ve %142,7 oranında arttığı belirlenmiştir. CT'li karışımların CBR değerinin katkısız numuneden daha yüksek olduğu bu durumun literatürde [17, 33, 35, 37] CT katkılı zeminlerin taşıma gücünü iyileştirdiği görüşü ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deneyler neticesinde yüksek olan CBR değerleri esas alınarak katkısız zemin için %10,52 ve %9 CT ilaveli karışım için %25,53 değerleri hesaplamalarda kullanılmıştır.

Literatürde [38-40], geri dönüşümden elde edilen CT'nin ana maddesi camın üretimi sırasında hızlı soğuması nedeniyle yapısının kristal yerine amorf olarak meydana geldiği ve bu yapının yüksek oranda silisyum ($\text{SiO}_2 > \%70$) içeriğine sahip olması nedeniyle puzolanik özellik gösterdiği belirtilmiştir. Özellikle tanecik boyutunun 0,075 mm'den daha az olduğu durumda bu yapının puzolanik özelliğinin arttığı bilgisi de yer almaktadır. Ayrıca, cam tane çaplarının azalmasının, daha büyük temas yüzeyleri meydana getirerek, cam tanelerinin daha fazla reaksiyona girmesini sağladığı ve ilaveten ince cam tozu tanelerinin zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurarak taşıma gücünü artırdığı bilgisine de yer verilmiştir. Çalışmamızda hazırlanan karışımlarda kullanılan CT'nin yapısı ve tane çapı da göz önüne alınarak puzolanik özellik gösterdiği, ilaveten CT'nin zemin boşluklarını doldurduğu bu durumun ρ_{kmax} değerlerinin artışının görülmesi ile desteklendiği, bu sayede karışımların mekanik özelliklerinin iyileştiği değerlendirilmiştir. Ancak, karışımlar ile yapılan deneyler neticesinde elde edilen optimum katkı oranının, karışımların dayanımlarına belirli bir oranın üzerinde CT katılmasının fayda sağlamayacağına işaret ettiği değerlendirilmektedir.

3.4 Esnek Üst Yapısı Tasarımı Yapılması

Üstyapı tasarımı için AASHTO 1993'te belirtilen şartlara uygun olarak, 28 günlük kür ardından belirlenen en yüksek CBR değerleri kullanılmıştır. Hesaplamalarda, CBR değerleri esas alınarak katkısız zemin için %10,52 ve %9 CT ilaveli karışım için %25,53 değerleri kullanılmıştır. Hesaplamalarda ilk adım olarak, yol taban zemininin esneklik modülü (M_R) belirlenmiştir. M_R hesaplanmasında, 2024 yılı ocak ayında AASHTO tarafından yayımlanan mekanik-ampirik teknik revizyonları içeren kaplama tasarım kılavuzu 3. baskısında (MEPDG-3) yer alan, zemine ait M_R (psi) = 2555 (CBR)^{0,64} korelasyonu [41] kullanılmıştır. Katkısız zemin için M_R değeri 11.521 psi (79453490 Pa) ve %9 CT'lı karışım için M_R değeri 20.319 psi (140131388 Pa) hesaplanmıştır. Tablo 7'deki veriler kullanılarak Bağıntı 1 ile taban üzerine gereken SN_3 katkısız zemin için 6,92 inç (17,58 cm) ve %9 CT ilaveli zeminler için 5,83 inç (14,81 cm) hesaplanmıştır. Esnek kaplama hesabında kullanılan parametreler Tablo 7'de sunulmuştur. Burada model alınan otoyol 4 (2 x 2) şeritli, 30 yıl proje analiz süresinin olduğu, günlük trafiğin ilk yıl için kamyon 495 adet, treyler 247 adet, minibüs 352 adet, otobüs 464 adet, otomobil 5400 adet olduğu, 50.000.000 olarak eşdeğer standart tek dingil yükü tekrar sayısı belirlenmiştir

Tablo 7. Tasarım parametreleri

Parametre	Tasarım Verileri
$T_{8,2}$, Eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı	50.000.000
P_0 , Yolun ilk servis yeteneği	4,2
S_0 , Toplam standart sapma	0,45
P_t , Yolun son servis yeteneği,	2,5
ΔPSI , Servis yeteneği indeksi,	1,7
Z_R , Güvenilirliğin standart normal sapması	-3,090

3.4.1 Tabaka kalınlıklarının hesaplanması

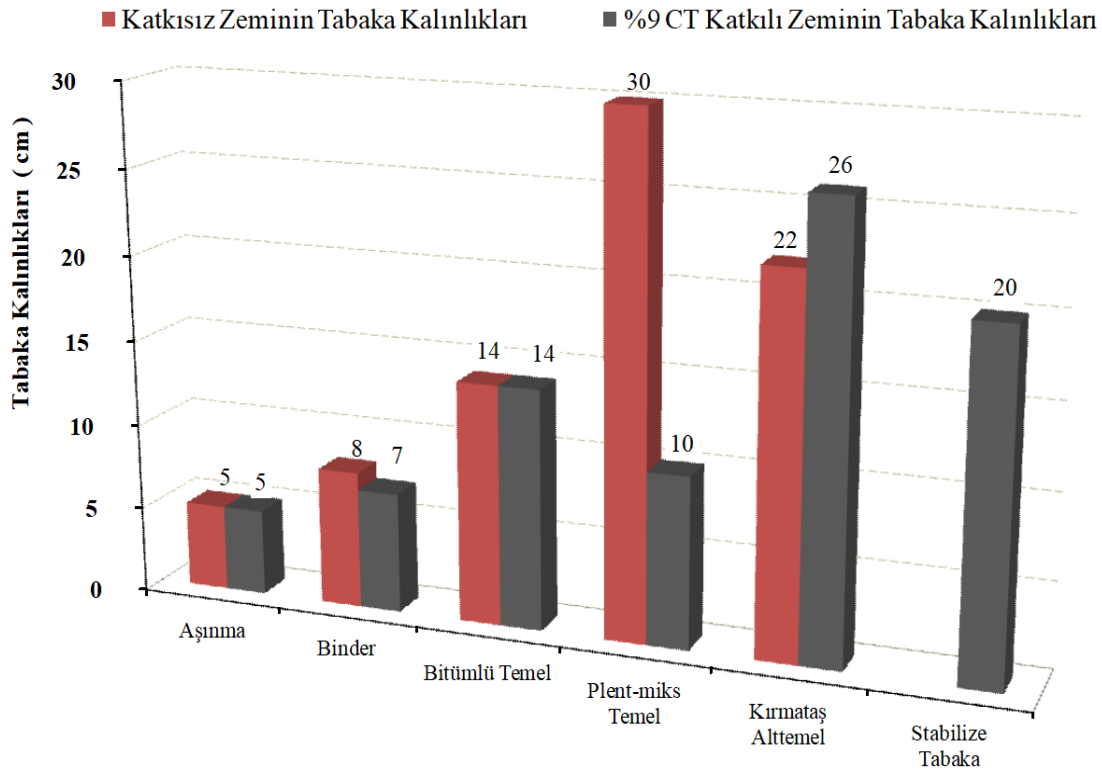
Bağıntı 1 kullanılarak SN_3 değerleri 28 günlük kür uygulanan katkısız zemin ve %9 CT katkılı zeminler için esnek üstyapı tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır. Tablo 8 ve 9'da seçilen tabaka kalınlıkları sırasıyla sunulmuştur. Tablolarda SN bağıntı (1) ile hesaplanan, SN^* kullanılan gerçek değerler ile bulunan değerdir. Ayrıca Şekil 10'da tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 8. Katkısız zemin için belirlenen tabaka kalınlık detayları

Tabaka İsmi	D_i (cm)	a_i	$SN^* = a_i \times D_i$	Açıklama
Aşınma	5	0,42	2,10	
Binder	8	0,40	3,20	$SN^* > SN$ (17,70 > 17,58)
Bitümlü Temel	14	0,36	5,04	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Plent-miks Temel	30	0,15	4,50	
Kırmataş Alttemel	22	0,13	2,86	

Tablo 9. %9 CT katkılı zemin için belirlenen tabaka kalınlık detayları

Tabaka İsmi	Di (cm)	ai	SN*= ai x Di	Açıklama
Aşınma	5	0,42	2,10	
Binder	7	0,40	2,80	SN* > SN (14,82>14,81)
Bitümlü Temel	14	0,36	5,04	Seçilen tabaka kalınlıkları uygundur.
Plent-miks Temel	10	0,15	1,5	
Kırmataş Alttemel	26	0,13	3,38	

**Şekil 10.** Katkısız Zemin ve %9 CT Katkılı Zemin için Seçilen Tabaka Kalınlıkları

Tabaka kalınlıklarının kontrolü amacıyla Tablo 3'ten plentmix kırmataş temeli için CBR=120 için ve kırmataş alt temeli için CBR=50 için esas alınmıştır. SN değerleri Bağıntı 1 kullanılarak plentmix kırmataş temeli $SN_1 = 3,62$ inç (9,19 cm), kırmataş alt temeli ise $SN_2 = 4,50$ inç (11,43 cm) olarak hesaplanmıştır. Bağıntı 2'de, kullanılarak yapılan kontrolde, katkısız zeminlerde, kırmataş temeli için $10,34 > 9,19$ ve kırmataş alt temeli için $14,84 > 11,43$ olduğu, %9 CT içeren zeminlerde kırmataş temeli için $9,94 > 9,19$ ve kırmataş alt temeli için $11,44 > 11,43$ olduğu belirlenmiştir, bu da esnek tabaka kalınlıklarının yeterli olduğunu göstermektedir.

Bağıntı 2'de, kullanılarak katkısız zemin için aşınma, binder ve bitümlü temel kalınlığının toplam 27 cm, plentmix kırmataş temel ve kırmataş alt temelin toplam 52 cm olduğu hesaplanmıştır. Aynı şekilde %9 CT katkılı zemin için aşınma, binder ve bitümlü temel kalınlığının toplam 26 cm, plentmix kırmataş temel ve kırmataş alt temelin toplam 36 cm olduğu hesaplanmıştır. %9 CT'lı zeminler için üstyapı kalınlığında katkısız zemine kıyasla aşınma, binder ve bitümlü temel kalınlığının 27 cm'den 26 cm'ye azaldığı, plentmix kırmataş temel ve kırmataş alt temelin toplamda 52 cm'den 36 cm'ye azaldığı görülmektedir.

3.5 Esnek Üstyapı Tasarımının Ekonomik Analizi

Cam tozu kullanılarak iyileştirilen karayolu zemininin üzerine tasarlanan esnek üst yapının ilk yapım maliyetinin, ekonomik analizi Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) poz no'ları [42] kullanılarak yapılmıştır. Katkısız zemin ve %9 CT katkılı zeminlerin esnek yol üstyapı kalınlıklarının m² cinsinden birim maliyetleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 10 ve Tablo 11'de sunulmuştur. Ayrıca, %9 CT ile yol tabanının 20 cm kalınlığında stabilize edilmesindeki analizde; malzemenin taşınması, traktör riperi ile zeminin kabartılması, traktör buldozeri ile stabilizatör malzeme dağıtılması, greyder ile serme ve karıştırma, arazöz ile sulama, titreşimli silindirle ve lastik tekerlekli silindir ile sıkıştırma yapılması esas alınmıştır. CT'nin ton bazında şantiye mahalline teslim fiyatı göz önüne alınmıştır. Tablo 12'de stabilizasyonun m² birim maliyetleri verilmiştir. Ayrıca, katkısız zemin ile %9 CT katılarak iyileştirilen zeminler göz önüne alınarak Şekil 11'de tabaka maliyetleri karşılaştırma grafiği sunulmuştur.

Tablo 10. Katkısız zemin için tabaka kalınlıkların birim maliyetleri

Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ² /cm	Maliyet (TL) m ²
KGM/6405/S-M	5 cm aşınma tabakası yapımı	m ²	113,19	22,64	113,19
KGM/6308	8 cm binder tabakası yapımı	m ²	139,02	17,38	139,02
KGM/6214	14 cm bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	229,35	16,38	229,35
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması	ton	416,13	9,99	299,61
KGM/6000	Kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	378,99	3,79	83,38
Toplam Maliyet				864,55	

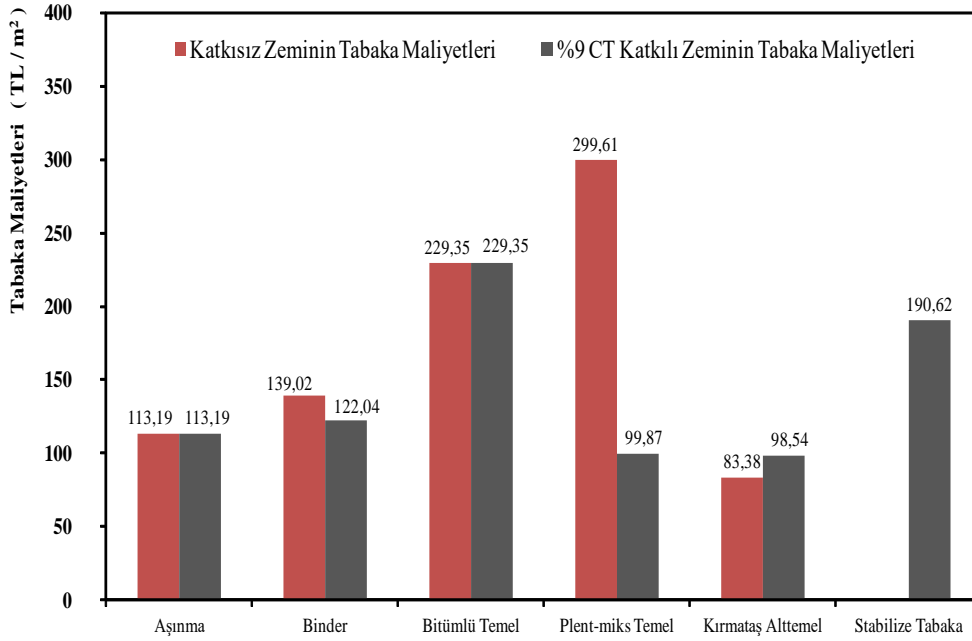
Tablo 11. %9 CT Katkılı zemin için tabaka kalınlıkların birim maliyetleri

Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ² /cm	Maliyet (TL) m ²
KGM/6405/S-M	5 cm aşınma tabakası yapımı	m ²	113,19	22,64	113,19
KGM/6307	7 cm binder tabakası yapımı	m ²	122,04	17,43	122,04
KGM/6214	14 cm bitümlü sıcak temel tabakası yapımı	m ²	229,35	16,38	229,35
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması	ton	416,13	9,99	99,87
KGM/6000	Kırılmış ve elenmiş malzeme ile alt temel yapılması	m ³	378,99	3,79	98,54
Toplam Maliyet				662,99	

Tablo 12. %9 CT katkılı zemin için stabilizasyon birim maliyetleri

Poz no	Açıklama	Birim	Birim Fiyat (TL)	Maliyet (TL) m ² /cm	Maliyet (TL) m ²
KGM 03.507	Traktör riperin bir saatlik ücreti	saat	2083,73	0,0208	0,42
KGM 03.511	Traktör Buldozerin 1 saatlik ücreti	saat	1946,93	0,0876	1,75
KGM/15.140	Makina ile serme ve karıştırma (Greyder kullanılarak)	m ³	13,95	0,1395	2,79
KGM/15.047	Arazöz ile sulama	ton	104,79	0,1048	2,10
KGM/15.052/3	Titreşimli silindirle sıkıştırma yapılması	saat	1221,53	0,1222	2,44
KGM/15.058/1	Lastik tekerlekli silindir ile sıkıştırma yapılması	saat	891,94	0,0892	1,78
Piyasa	%9 CT Temini Nakliye Dahil	kg	6,10	8,9670	179,34
Toplam Maliyet				190,62	

Katkısız zemin ve %9 CT ilaveli zemin için yol üstyapılarının maliyetleri sırasıyla 864,55 TL/m² ve 662,19 TL/m² olarak belirlenmiştir. Ayrıca, CT ilaveli stabilize zeminin maliyeti 190,62 TL/m² olarak hesaplanmıştır. Tabaka kalınlıklarının maliyetleri göz önüne alındığında, yapım maliyetinde %1,3 oranında bir azalma görülmüştür. Yapılan hesaplamalarda, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki bir yolda, %9 CT ile iyileştirilmiş bir yol tabanı ile 218.856,00 TL maliyet azaltılarak tasarruf sağlanacaktır.



Şekil 11. Katkısız zemin ve %9 CT ilaveli zemin için tabaka maliyetleri

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Cam tozu kullanılarak iyileştirilen karayolu zemininin üzerine tasarlanan esnek üst yapının tabaka kalınlığı ve ilk yapım maliyetinin araştırıldığı bu çalışmanın sonuçları aşağıda sunulmuştur.

1. Standart proktor deneyi sonuçlarında hazırlanan karışımlarda CT oranının artmasıyla ω_{opt} değerinin azaldığı, ρ_{kmax} değerinin arttığı, bu durumun CT'nin zemin numunesinden daha az su emme kapasitesine sahip olması ve zeminden daha küçük tanelere sahip cam tozunun zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurması nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir.
2. Serbest basınç deneyi %3, %6, %9 ve %12 oranlarında cam tozu ilavesiyle hazırlanan karışımlarda, mukavemet değerinde en iyi artış %9 CT oranında görülmüş ve bu artışın 2,19 kat olduğu hesaplanmıştır. Bu artışın, CT'nin karışımların kayma direnci ve kohezyon kuvveti üzerindeki olumlu etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.
3. Serbest basınç deneyi numunelerindeki kırılma anındaki birim şekil değiştirmelerin CT miktarının artmasıyla azaldığı ve bu durumun CT'nin numunelerin sertliğini artırması nedeniyle meydana geldiği düşünülmüştür.
4. CBR deneyi uygulanan numunelerde 28 günlük kür süresinin ardından, %9 CT katkılı örneklerde 2,5 ile 5 mm penetrasyon için CBR değerinin %130,6 ve %142,7 oranında arttığı belirlenmiştir. CT katkısının zeminin taşıma gücünü iyileştirdiği belirlenmiştir.
5. CBR ve serbest basınç deney sonuçlarından, cam tozunun yapısı ve tane çapı sayesinde puzolanik özellik gösterdiği ve hazırlanan karışımların boşluklarını doldurarak, karışımların dayanım özellikleri geliştirdiği görülmektedir.
6. Esnek üstyapı tasarım sonuçlarında ise, %9 CT içeren stabilize zeminler için tasarlanan üstyapı kalınlığında azalma olduğu, bu durumun CT'nin karışım dayanımlarına etkisinden kaynaklandığı

değerlendirilmektedir.

7. Maliyet analizi sonuçlarında ise, %9 CT katkılı stabilize zeminlerin üstyapı maliyetlerinin, katkısız zemine kıyasla %1,3 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu hesaplamalar ışığında, 20 metre genişliğindeki ve 1000 metre uzunluğundaki bölünmüş bir yolda, %9 CT ile yol taban zemininin iyileştirilmesi durumunda üstyapı maliyetinde 218.856,00 TL maliyet azaltılarak tasarruf sağlanacaktır.
8. Bu çalışmada, cam tozunun stabilizasyon maksadıyla kullanılmasının serbest basınç mukavemetini ve CBR değerini arttırmasından ötürü, zeminin oturma potansiyelini, şişme ve büzülme davranışını, drenaj kapasitesini vb. azaltabileceği, kayma mukavemeti parametrelerini ise arttırabileceği öngörülmüştür. Bu ön görüşümüzün dayanağı olarak, güçlendirme etkisinin zemin boşluklarının cam tozu tarafından doldurulması ve bir miktar bağlayıcı reaksiyonu ile meydana gelmesinin olabileceği düşünülmüştür. Ancak bu durumu daha iyi yorumlayabilmek için deneysel yöntemler kullanılarak bu konuların araştırılmasının ve yol üstyapılarına etkilerinin açığa çıkarılmasının literatüre katkı sağlayacağı öngörülmüştür.

Sonuç olarak, günümüz Dünyasının önemli çevresel problemleri arasında yer alan atık bertarafının önemli bir parçası olan geri dönüşüm sistemi sayesinde, cam atıklardan elde edilen cam tozu kullanılarak iyileştirilen karayolu zemininin, taşıma kapasitesinin arttığı, esnek üst yapı tabaka kalınlığı ve ilk yapım maliyetinin azaldığı belirlenmiştir. Bu sayede doğada uzun süre yok olmayan cam atıklarının geri dönüştürülmesi ile doğal kaynakların korunmasının sağlanacağı, ayrıca esnek üst yapı yapımında kullanılan malzeme miktarının da azaltılması ile, bu malzemelerin üretimi, taşınması ve uygulanmasında meydana gelen CO₂ salımı başta olmak üzere çevreye verilen zararın azaltılacağı ve çevrenin korunmasına katkı sağlanacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, cam tozunun atık malzemeden elde edildiği düşünülerek CT temininin süreklilik arz ettiği ve karayolu projelerindeki tonajlı alımlar sayesinde proje maliyetlerinin daha da azaltılabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü'nün İÜ-BAP FDK-2023-3325 numaralı projesi tarafından desteklenmiştir. BAP Koordinasyon Birimi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Kök BV (2019) Karayolu Mühendisliği ve Tasarımı, Nobel Akademik Yayıncılık Ankara.
2. Uzuner BA (2016) Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi Trabzon
3. Tunç A (2002) Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Nobel Yayınevi, Ankara,
4. Tunç A (2007) Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayınevi, Ankara.
5. Demir A, Sarıcı T (2017) Bearing capacity of footing supported by geogrid encased stone columns on soft soil. *Geomechanics and Engineering* 12(3):417-439. <https://doi.org/10.12989/GAE.2017.12.3.417>
6. Sarıcı T, Ok B, Mert A, Çömez Ş (2023) The resilient modulus of hybrid construction and demolition wastes reinforced by a geogrid. *Acta Geotechnica Slovenica* 19(2022/2).
7. Ok B, Demir A, Sarıcı T, Ovalı M (2021) Geosentetiklerle güçlendirilmiş karayolu temellerinin plaka yükleme deneyleri ile değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 27(6):718-728.

8. Sarıcı T (2014) Geosentetik ile güçlendirilmiş taş kolonların taşıma kapasitesinin analizi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
9. Geçkil T, Sarıcı T, Karabaş B (2021) Siyah karbon ile stabilize edilen taban zeminin yol esnek üst yapı maliyetine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (23):222-235.
10. Geçkil T, Sarıcı T, Karabaş B (2021) Siyah karbon stabilizasyonlu zeminin rijit kaplama kalınlığı ve maliyetine etkileri, *ECJSE* 8(3):1372-1384.
11. Kumar A, Walia BS, Bajaj A (2007) Influence of fly ash, lime and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soils. *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(3):242-248.
12. Ansary MA, Noor MA, Islam M (2006) Effect of fly ash stabilization on geotechnical properties of chittagong coastal soil. *Geotechnical Symposium, March, Roma*, pp. 443-454.
13. Domphoeun R, Eisazadeh A (2024) Flexural and shear strength properties of laterite soil stabilized with rice husk ash, coir fiber, and lime. *Transp Infrastruct Geotech.* <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00364-5>
14. Çelik M, Kuvat A, Abut Y, Ceyhan Erdoğan M, Yalçın BS (2024) Biyokömür ile aktive edilmiş küllerin zemin stabilizasyonuna yönelik kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi* 4(2):354-371. <https://doi.org/10.61112/jiens.1421364>
15. Lakkimsetti B, Nayak S (2022) Experimental investigation and performance evaluation of lithomargic clay stabilized with granulated blast furnace slag and calcium chloride. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 8(1), 12.
16. Uysal F, Yılmaz V, Topçu HM (2020) Farklı atık malzemeler ile stabilize edilmiş ince daneli zeminin mühendislik özellikleri. *Çukurovaummfd* 35(1):19-26. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.764507>
17. Babatunde OA, Sani JE, Sambo AH (2019) Black cotton soil stabilization using glass powder. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology* 8(5):5208-5214.
18. Ogundairo T, Olukanni D, Akinwumi I (2024) Geopolymer production from waste polyethylene terephthalate and glass for clay subgrade stabilization. *The Journal of Solid Waste Technology and Management* 50(1):441-457.
19. Niyomukiza JB, Eisazadeh A, Akamumpa J, Kiwanuka M, Lukwago A, Tipoti P(2023) Use of waste glass powder in improving the properties of expansive clay soils. *Global NEST Journal*, 25:139-145.
20. Perera STAM, Saberian M, Zhu J, Roychand R, Li J (2022) Effect of crushed glass on the mechanical and microstructural behavior of highly expansive clay subgrade. *Case Studies in Construction Materials* 17, e01244.
21. Olufowobi J, Ogundoju A, Michael B, Aderinlewo O (2014) Clay Soil Stabilisation Using Powdered Glass. *Journal of Engineering Science and Technology* 9(5):541-558.
22. Perera STAM, Saberian M, Zhu J et al (2023) Improvement of Low Plasticity Clay with Crushed Glass: A Mechanical and Microstructural Study. *Int J Pavement Res Technol* 1-21.
23. National Concrete Pavement Technology Center (2020) Guide to Cement-Stabilized Subgrade Soils, Iowa State University, Institute for Transportation, USA.
24. National Cooperative Highway Research Program Web-Only Document 144 (2009). Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials, Texas Transportation Institute Texas A&M University College Station, Texas, USA.
25. AASHTO Designation: R Draft (2008) Standard Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials, Washington, D.C., USA.
26. KGM (2021) Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvar El Kitabı, ARGE Daire Başkanlığı Ankara.
27. Öbelik Y (2011) Cam Hammaddesi Mineralojisi ve Cam Teknolojisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi.
28. Türkiye Çevre Şehircilik İklim Değişikliği Bakanlığı Sıfır Atık Projesi. <https://sifiratik.gov.tr/cam-atik> (Erişim Tarihi:06.06.2024).
29. Yılmaz I, Yıldırım M, Keskin İ (2017) Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler, Seçkin Kitabevi Ankara.
30. Orhan M et al. (2013) Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri, Gazi Kitabevi Ankara.
31. AASHTO (1993) Interim Guide For Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
32. Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi (2008) T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
33. Blayia RA, Sherwania AFH, Ibrahim HH, Farajc RH, Daraeia A (2020) Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials* 13, e00427.
34. Ibrahim HH, Mawlood YI, Alshkane YM (2019) Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq. *Int J Geotech Eng* 1-8.
35. Javed SA, Chakraborty S (2020) Effects of waste glass powder on subgrade soil improvement. *World Scientific News* 144:30-42.
36. Uzuner BA (2014) Temel Zemin Mekaniği, Derya Kitabevi Trabzon.

37. Benny JR, Jolly JK, Sebastian JM, Thomas M (2017) Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)* 6(5):228-231.
38. Vijayakumar G, Vishaliny H, Govindarajulu D (2013) Studies on glass powder as partial replacement of cement in concrete production. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 3(2):153-157.
39. Borges AL, Soares SM, Freitas TOG, Oliveira Júnior A, Ferreira EB, Ferreira FGS (2021) Evaluation of the pozzolanic activity of glass powder in three maximum grain sizes. *Materials Research*, 24(4), e20200496. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0496>
40. Sheob M, Sajid M, Ansari MA, Rais I, Sadique MR, Ahmad A (2023) Using a blend of cement and waste glass powder to improve the properties of clayey soil. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.440>
41. AASHTO (2024) *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide, 3rd Edition (MEPDG-3)*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
42. Karayolları Genel Müdürlüğü Birim Fiyatları (2024). <http://www.kgm.gov.tr> (Erişim Tarihi:06.06.2024).