



Usability of Kayseri volcanic slags as filling material on flexible paved roads

Mehmet Cemal Acar*

Department of Construction of Vocational College of Technical Sciences, Kayseri University, 38280, Kayseri, Turkey

Highlights:

- Volcanic Slag will significantly reduce the need for crushed stone.
- An improved soil base layer is obtained for roads.
- Volcanic Slag could be used in every layer of the roads.

Keywords:

- Volcanic Slag,
- Highways
- CBR
- Stabilization
- Kayseri

Article Info:

Research Article
Received: 29.01.2021
Accepted: 26.07.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.870466

Acknowledgement:

The author thanks the referees and editors for their comments and contributions.

Correspondence:

Author: Mehmet Cemal Acar
e-mail: acar@kayseri.edu.tr
phone: +90 533 381 3541

Graphical/Tabular Abstract

In order to investigate the use of volcanic slag in the base layer of roads, uniaxial compressive strength (UCS) and CBR tests were performed by stabilizing with 3% and 5% cement. As the best result, with 5% cement mixture by weight, 7 and 28 days UCS strength of 3.1 MPa and 4.97 MPa were obtained, respectively, and CBR strength was obtained at 108.4% and 148.6%, respectively. These values meet the minimum strength requirement specified in the standards for the base layer. CBR and UCS test results clearly show that the strength of VC stabilized with cement has a consistent increase trend with both the increase in cement and the curing time (Figure A)..

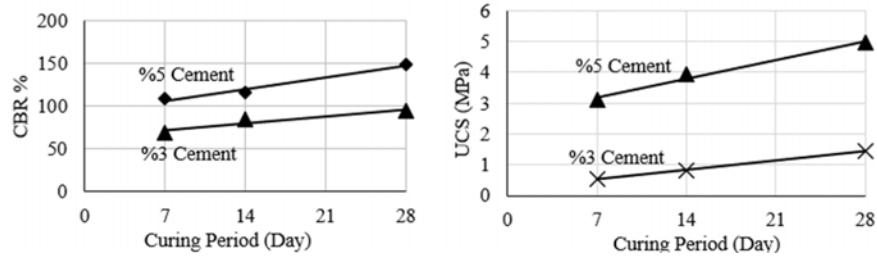


Figure A. Relationship of VC with CBR and UCS test results and curing time
a) CBR-Curing Period b) UCS-Curing Period

Purpose: The purpose of this study is to investigate the potential use of volcanic slags, which are found naturally in Kayseri, as a construction material in large volume filling projects and in the base, subbase and various fillings of flexible paved roads, either directly or after being improved with cement.

Theory and Methods:

In this research, it was aimed to investigate the potential use of volcanic slags, as a construction material in large volume filling projects such as airports and in flexible paved highways, either directly or after improvement with cement.

Results:

Based on the results obtained, it was concluded that VC is convenient for use in sub-surface and sub-base layers, but it is not suitable and cannot be used in the base layer without improving the soil properties due to its low CBR value. In order to investigate the use of VC in the base layer of roads, uniaxial compressive strength (UCS) and CBR tests were performed by stabilizing with 3% and 5% cement. These values meet the minimum strength requirement specified in the standards for the base layer of roads.

Conclusion:

Using VC in road construction, it will significantly reduce the need for crushed stone, reduce costs, and remove the negative environmental effects caused by crushed stone production. With this study, it will be possible to replace the scarce standard road construction materials (Crushed Stone) partially or fully with non-standard materials (Volcanic Slag). As a result, it has been revealed that the geotechnical properties of volcanic slags, which are readily available in nature, can be improved after stabilizing with 5% cement and can be used as construction material in in base, subbase and various fillings in flexible pavement



Esnek Kaplamalı yollarda Kayseri volkanik cürüflarının dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği

Mehmet Cemal Acar*^{ID}

Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü, Kayseri Üniversitesi, 38280, Kayseri, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Volkanik Cüruf, kırma taş ihtiyacını önemli ölçüde azaltacaktır
- Yollar için iyileştirilmiş zemin temel tabakası elde edilir
- Volkanik Cüruf, yolların her katmanında kullanılabilir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.01.2021

Kabul: 26.07.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.870466

Anahtar Kelimeler:

Volkanik cüruf,
CBR,
stabilizasyon,
karayolları,
Kayseri

ÖZ

Kayseri Volkanik cürufu (VC), patlayıcı volkanik aktivite sonucu oluşan zemin ebatlarında ponza, kaya kırıntıları, puzolanik mineraller ve volkanik kül içeren doğal malzemelerdir. Volkanik cüruf, konik cüruf tepeleri şeklinde doğada hazır agrega olarak bulunmakta veya yapı temel kazılarında atık olarak çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Kayseri'de doğal olarak bol miktarda bulunan volkanik cüruf agregaların, kaynakların sınırlı olduğu bölgelerde yol veya havaalanı kaplamalarının yapımında doğrudan veya çimento ile stabilize edildikten sonra kullanılabilirliğini ortaya koymak ve dolgu malzemelerinin çeşitlendirilmesini teşvik etmektir. Elde edilen sonuçlar, VC'nin yol dolgu ve alttemel tabakası için uygun olduğu ancak yol temel tabakalarında kullanılması için, yeterli dayanıma sahip olmadığı ve zemin iyileştirme yapılmadan temel dolgusunda kullanılmayacağını göstermiştir. VC'nin karayollarının temel tabakasında kullanımını araştırmak için, %3 ve %5 çimento ile stabilize edilerek dayanım deneyleri yapılmıştır. En iyi sonuç olarak, %5 çimento karışımıyla 7 ve 28 günlük UCS dayanımı sırasıyla 3,1 MPa ve 4,97 MPa ve CBR dayanımı sırasıyla %108,4 ve %148,6 elde edilmiştir. Bu değerler, karayollarında temel tabakası için standartlarda belirtilen dayanım gereksinimini karşılamıştır. Sonuç olarak, volkanik cürüfların çimento ile stabilize edilmesiyle geoteknik özelliklerinin iyileştirilebileceği ve esnek kaplamalı yolların taban dolgu, alttemel ve temel tabakalarında ve her türlü dolgularda inşaat malzemesi olarak kullanılabileceği ortaya koyulmuştur.

Usability of Kayseri volcanic slags as filling material on flexible paved roads

H I G H L I G H T S

- Volcanic Slag will significantly reduce the need for crushed stone
- An improved soil base layer is obtained for roads
- Volcanic Slag could be used in every layer of the roads

Article Info

Research Article

Received: 29.01.2021

Accepted: 26.07.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.870466

Keywords:

Volcanic slag,
CBR,
stabilization,
highways,
Kayseri

ABSTRACT

Kayseri Volcanic slag (VC) is a natural material containing soil-sized rock fragments, pozzolanic minerals and volcanic ash formed as a result of explosive volcanic activity. Volcanic slag exists as ready aggregate in nature in the form of conical slag hills or as waste from building foundation excavations. The purpose of this study is to demonstrate the usability of the volcanic slag aggregates, which are naturally abundant in Kayseri, and after stabilization with cement in the construction of road or airport pavements and to encourage the diversification of filling materials in regions where resources are limited. The results have shown that VC is suitable for road fill and subbase layer, but it does not have sufficient strength to be used in road base layers and cannot be used in fill of base layer of highways without soil improvement. In order to investigate the use of VC in the base layer of highways, strength tests were conducted by stabilizing it with 3% and 5% cement. As the best result, with 5% cement mixture by weight, 7 and 28 days UCS strength of 3.1 MPa and 4.97 MPa were obtained, respectively, and CBR strength was obtained at 108.4% and 148.6%, respectively. These values meet the strength requirement specified in the standards for the base layer of the highways. As a result, it has been demonstrated that the geotechnical properties of volcanic slags can be improved by stabilizing them with cement, and can be used as a construction material in base fill, subbase and base layers of flexible paved roads and in all kinds of fillings.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğal olarak oluşmuş volkanik cürüfler (VC), volkanizma sırasında çıkan kül ve gözenekli kum, çakıl boyutlarındaki volkanik kırıntılar, kristaller ve cam parçaları içeren taneli malzemelerdir [1]. Bu cürüfler, bazaltik-andezitik kompozisyona sahip, gözenekli, camsı ve kırıntılı bir piroklastik kayaç türüdür. "Piroklastik" terimi kayacın doğrudan patlamalı bir püskürme sonucu parçalanmış kayaçlara ait kırıntıları tanımlamaktadır. Bunlar püskürme biçimi ve tanelerin kökeninden bağımsız olarak volkanik bacalardan dışarı atılan kırıntılardır [2].

Bu çalışmada, Kayseri'de şehir merkezi yakınlarında taş ocağından alınmış volkanik cürüfler (VC) kullanılmıştır. Volkanik olaylar sonucu oluşmuş, gözenekli bir yapıya sahip olan bu cüruf oluşumları, volkanik faaliyetlerin olduğu dünyanın birçok bölgesinde bulunur. Ülkemizde ise bu oluşumlar geniş alanları kaplar. Kayseri ve çevresinde (Kapadokya olarak isimlendirilen, Erciyes, Hasan ve Melendiz dağlarını içine alan geniş bir bölgede) volkanik cürüflere, konik cüruf tepeleri formunda doğada rastlanmaktadır. Uydu haritalarına bakıldığında sayılarının yüzlerce olduğu görülmektedir. Bunun yanında, inşaat öncesinde arazinin hazırlanması aşamasında yapılan kazı ve benzeri faaliyetler sonucunda da VC atık olarak çıkmaktadır. Bilindiği üzere karayolları, baraj, havaalanları vb. mühendislik yapılarına ait altyapı ve üst yapı projelerinde kullanılan agregalar, çoğunlukla taş ocaklarından kırılarak elde edilmektedir. Ülkemizde ise, inşaat malzeme talepleri yüksek olan, Kayseri gibi kentsel alanlarda yol dolgularında kullanılacak Kırmı Taş Agregasına (KT) olan ihtiyaç oldukça fazladır. Kırmı-eleme işlemi pahalı, ülke kaynakları açısından verimsiz ve çevresel etki (toz, gürültü, yer sarsıntısı ve baca gazı) açısından olumsuz durumlara yol açmaktadır. Kayseri'de, geleneksel agrega kaynağındaki azalmalar, taş ocaklarında kayaların patlatılıp parçalanarak kırmıtaş üretimi sonucu açığa çıkan CO₂ salınımı ve harcanan enerjinin pahalılığı gibi etkenler doğada hazır olarak bulunan bu cürüflerin kullanımını gündeme getirmiştir. Doğal volkanik cüruf agregaları, volkanların püskürme tipine, farklı yapısına ve kökenine göre değişmekte hatta aynı taş ocağı veya doğal yatak içinde bile heterojen yapıya sahiptir [3, 4]. Bununla birlikte, Volkanik cüruf agregalarının gözeneklilik, CBR (Kaliforniya taşıma oranı) ve UCS (Tek eksenli basınç dayanımı) değerlerinin düşüklüğü gibi uluslararası spesifikasyonlara göre yetersizliği nedeniyle doğrudan yol projelerinde kullanılması tercih edilmemektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, kaynakların sınırlı olduğu bölgelerde volkanik cüruf agregalarının yol veya havaalanı kaplamalarının yapımında doğrudan veya çimento ile stabilize edildikten sonra kullanılabilirliğini ortaya koymak ve dolgu malzemelerinin çeşitlendirilmesini teşvik etmektir. VC'nin bu dolgu tabakalarında kullanılmasıyla, çevreye ve ekonomiye katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Volkanik cürufun kaynağını ve cinsini bilmek, bu malzemenin karayolu dolgusunda kullanabilmek için yeterli değildir. Volkanik cürüfler belirli standartlarda oluşmadığı için özellikleri çok değişkendir. Bu nedenle, atık olarak veya

doğaya zarar vermeden elde edilen volkanik cürüflerin, karayollarında dolgu, alttemel ve temel tabakalarında kullanılabilirliği geoteknik yöntemlerle test edilmesi gerekir. Literatürde, volkanik cürüflerin, volkanolojik ve jeokimyasal özellikleriyle ilgili çok sayıda çalışma olmasına karşın, geoteknik özelliklerinin araştırılmasıyla ilgili yayınlar nispeten daha az sayıda rastlanılmıştır. Literatürde, geri dönüşümlü beton agregaların, dolgularda kullanımını ve çimento ile stabilize edildikten sonra yollardaki performansı konusunda araştırmalar vardır [5-7]. Bu çalışmalar, geri dönüşümlü beton agregaların, karayollarının dolgu, alttemel ve temel tabakalarında kullanılabilirliğini göstermektedir. Volkanik agrega türü ponzaların yolların alttemelinde stabilizasyon malzemesi olarak kullanımı da araştırılmıştır. Isparta-Karakaya bölgesindeki hafif agrega olarak sınıflandırılan ponzaların her türlü yol yapımında alttemel olarak doğrudan kullanılabilirliğini ve stabilizasyon malzemesi olarak kullanılması durumunda, karıştırıldığı zeminin mukavemetini artırıcı etki yaptığı ortaya koyulmuştur [4]. Bazı araştırmacılar ise volkan küllerini, killerin şişme özelliklerini azaltmak amaçlı kullanmış ve sonuçta yörede bulunan volkanik küllerin, şişebilen killere katılmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su içeriği, kayma mukavemeti ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) gibi zemin değerlerinin arttığını göstermişlerdir [8, 9]. Bunun yanında, çeşitli Volkanik Kül (<50 Mikron) malzemelerin alt temel ve dolgu malzemesi olarak kullanımına yönelik araştırmalar ise her geçen gün artmaktadır [10-12]. Benzer olarak, yüksek fırın cürüflerinin yol dolgularında başarılı olarak kullanıldığı gösteren oldukça fazla çalışma literatürde vardır [13, 14]. Yollarda dolgu, alttemel ve temel malzemesi olarak volkanik cüruf çakılının performansını iyileştirmek için birçok stabilizasyon tekniği kullanarak araştırmalar yapılmıştır [15-17]. Araştırmacılar, Etiyopya'nın birçok bölgesinde bol miktarda bulunan çok gözenekli volkanik cüruf malzemeyi, mekanik harmanlama ve çimento ile kimyasal stabilizasyon yoluyla mühendislik özelliklerini iyileştirerek karayollarında alttemel ve temel malzemesi olarak kullanılabilirliğini gösterilmiştir [15]. Düşük hacimli yollarda VC ile dolgu kullanılması yapılmış olan Hearn ve diğerleri [16], elde ettikleri sonuçları kırmı taş agregası ile karşılaştırmışlardır. Çimento stabilizasyonu yoluyla malzemenin arazideki performansı ölçülmüş ve yol yapımında kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Luo ve diğerleri, Volkanik cüruf agregalarını yerel siltli kumlarla karıştırarak bir deneme demiryolu kesiminin arazide sıkıştırma performansını değerlendirilmişler ve stabilize edilmiş malzemenin mühendislik özellikleri, şartname gereksinimlerini karşılamıştır [17]. Benzer şekilde Japonya'daki Unzen dağı ile Filipinler'deki Pinatubo dağının kül ve cürüflerinin karayollarında kullanımı için geoteknik özellikleri araştırılmıştır [18]. Okogbue, ve Aghamelu yaptıkları çalışmada, Abakaliki piroklastik agregaların, yol yapımı için doğrudan kullanıldığı durumlarda muhtemelen uzun vadeli zayıf saha performansı gösterdiği ve iyileştirme yapılmadan kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varmıştır. Bu agregaların yüksek sıkışabilirlik ve yüksek sıvılaşma mukavemetine sahip olduğu gösterilmiş ve belli şartlar altında dolguda kullanılabilirliği kanıtlanmıştır [20]. Bazı araştırmacılar, gözenekli volkanik cüruf agregalarının

geoteknik özelliklerini belirlemeye odaklanmışlardır [21, 22] Son yıllarda çeşitli volkanik cüruf agregaları veya katı atık maddelerin çimento ile stabilize edilerek geoteknik özellikleri iyileştirildikten sonra karayolları inşaat malzemeleri olarak kullanımı konusunda araştırmalar artmaktadır [23-25]. Çeşitli yüksek fırın cüruflarının, çimento, kireç, uçucu kül benzeri katkılarla stabilize edilerek yol temel/alt temel malzemesi olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar literatürde rastlanmaktadır [25-27]. Doğal kaynakların azalması ve kırma taş ocağında üretilen malzemelerin eksikliğinden dolayı volkanik cürufların veya çeşitli cüruf atıklarının yollarda dolgu malzemesi olarak kullanımı giderek daha popüler hale gelmektedir [28-30].

Gelişmekte olan ülkeler, sürekli olarak yeni yollar ve havaalanlarına ihtiyaç duymaktadır ve bu da büyük miktarda dolgularda kırmataş agregası kullanmayı gerektirir. Yetersiz yerel kaynaklar, tedarikçilerini, talep edilen agregaları uzun mesafelere taşımak için zorlar. Bu, daha yüksek genel giderler ve zaman kaybının yanı sıra yollarda aşınma ve yıpranmaya neden olur. Bu nedenle, yol yapımı için talep edilen standart özellikleri karşılayan ekonomik ve çevreci yeni agrega kaynaklarının bulunması ve bir bölgedeki olası yerel agrega kaynaklarının değerlendirilmesi önemlidir. Kayseri ile bağlantılı ilçeler ve şehirler arası yolların yapımı ve yol genişletme çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışma, doğada hazır olarak bulunan ve aynı zamanda temel kazılarında atık olarak ortaya çıkan Kayseri Volkanik cürufun (VC) dolgu malzemesi olarak doğrudan veya Portland çimentosuyla iyileştirdikten sonra kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Yol dolgularında kırmataşın yerine VC kullanılması, daha az enerji yoğun bir süreçtir ve teorik olarak sıfır CO₂ emisyonuna yakın olmasından dolayı yol dolgularında kullanılması ümit verici bir alternatif olarak düşünülmüştür.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bitümlü kaplama tabakaları ile oluşturulan üstyapılara “esnek kaplama” denir. Esnek üstyapı, tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini, kaplama, temel ve alttemel tabakalarına aktaran yolun taşıyıcı kısmını oluşturur. Alttemel ve temel tabakaları için kullanılacak malzemelerin dane çapları TS-9581 [31]’de ve karayolları teknik şartnamesi [32]’de belirtilmiştir. Tipik olarak esnek üstyapılı yollar, yapılış esasına göre bitümlü esnek kaplama, temel, alttemel, dolgu tabakaları ve tabii zemininden oluşmaktadır (Şekil 1). Bu tabakalı yapı, trafik yüklerini kaplama tabakasından alarak temel, alttemel ve dolgu tabakasına, en son olarak taban zeminine iletir. Trafik yükleri taban zeminine üstyapıdan itibaren yayılarak etki eder. Esnek üstyapılardaki bitümlü ve granüler tabakalar yükün taban zeminine geniş bir alanda etki etmesini sağlar. Yol gövdesinde özel önemi olan temel tabakasının başlıca görevi kaplamadan gelen trafik yükünü taban üzerine yaymak, bu arada trafiğin darbe tesirini yok etmektir. Temelaltı (Alttemel) tabakası ise tesviye yüzeyi üzerine serilen ve genellikle çakıl, kum, kırma taş agregası gibi daneli malzemelerden yapılan tabakadır. Kaplamadan gelen trafik yükünün taban üzerinde yayılmasında üzerinde

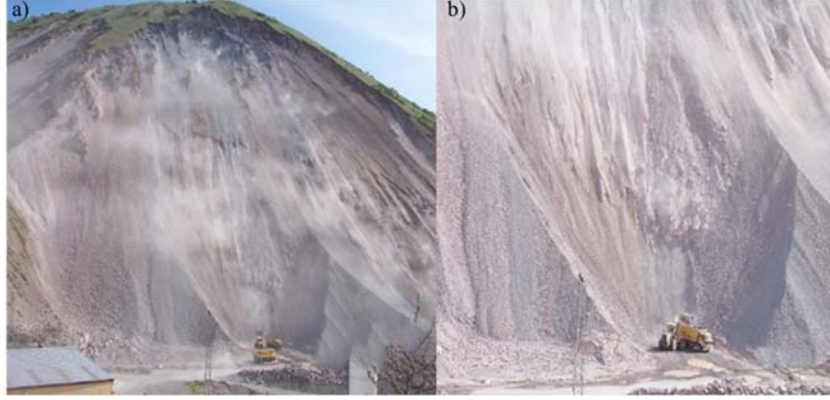
bulunan temel tabakasına olan yardımı yanında, su ve don tesirlerine karşı tampon bölgesi vazifesi de görür.



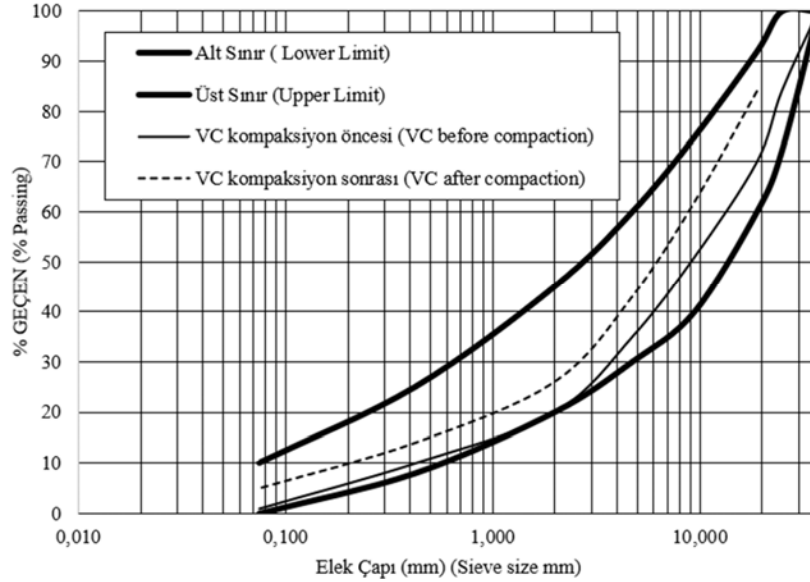
Şekil 1. Tipik esnek yol üstyapısı
(Typical flexible road pavement.)

2.1. VC'nin Özellikleri (Properties of VC)

Kayseri volkanik cürufunun (VC) geoteknik amaçlı kullanımı, ekonomik olarak göz ardı edilemeyecek boyutlardadır (Şekil 2). Bu çalışmada, Kayseri merkezine yakın (şehrin 6 km batısında) doğada hazır olarak bulunan bu cürufunun, havaalanı gibi geniş hacimli dolgu projelerinde ve esnek kaplamalı karayollarında temel, alttemel ve çeşitli dolgularda doğrudan veya çimento ile iyileştirildikten sonra inşaat malzemesi olarak kullanım potansiyelinin araştırılması amaçlanmıştır (Şekil 2). VC'nin Kimyasal bileşiminde SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ ağırlıklı olduğu görülmektedir (Tablo 1). Agregaların yüksek oranda SiO₂ içermesi, aşınmaya karşı dirençli olduğunu ve Al₂O₃ oranı ise ısıya dayanıklılığını göstermektedir. Aynı zamanda Kimyasal yapısında bulunan SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃oranı %70 den fazla olması bağlayıcılık açısından zemin stabilizasyonu için uygun malzeme özelliği taşıdığı düşünülmektedir. VC nin ve stabilizasyonda kullanılan çimentonun kimyasal bileşenleri karşılaştırmalı olarak Tablo 1’de verilmiştir. Bu çalışmada, Kayseri merkeze 6 km uzakta olan Yılanlı dağı Taş ocağına yakın 10 farklı bölgedeki stok yığınlarından numune alma kurallarına uygun (TS-EN-932-1), kepçe ile 1,5-2m derinliğinde araştırma çukurları açılmış, hava koşullarından etkilenmeyen doğal VC çakıl örnekleri incelenmiştir. Numuneler, laboratuvarında harmanlanarak yarılama işlemi uygulandıktan sonra, çeşitli testler için hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalar, Kayseri üniversitesi zemin mekaniği laboratuvarında yapılmıştır. VC için Modifiye proctor deney öncesi ve sonrasında derecelendirme spesifikasyon limitleri [29] ile elek analizi yapılmıştır (Şekil 3). Numunelerin cüruf partikülleri nispeten zayıf mukavemetlerinden dolayı sıkıştırma sırasında parçalandıkları gözlenmiştir (Şekil 3). Sıkıştırma işlemi sırasında ezilen daneler, ince dane miktarını arttırmıştır. Bunlar, iri daneler arasında kalan boşluğu doldurmuş daha iyi bir sıkıştırma gerçekleşmiştir. Modifiye Proctor sonrası yapılan elek analizinde dane dağılımı karayolları için istenen sınırlar [31, 32] içinde olmuştur ve zemin mukavemet özelliklerinin iyileşmesine yol açmıştır. VC, karayolları zemin sınıflandırma sistemine göre A-1-a ve GW (TS1500) olarak isimlendirilmiştir. Özgül ağırlık deneyi sonucunda



Şekil 2. VC'nin tepe formunda görüntüleri a) uzak mesafe görüntü ve b) daha ayrıntılı görüntü
VC Images in the form of Volcanic Slag Aggregate hills a) far away distance image and b) more detailed image



Şekil 3. VC agregası Elek Analizi (Modifiye Proctor Deneyi Öncesi ve Sonrası) ile TS 9581 alt-üst sınırlar
(Sieve analysis of VC (before and after modified proctor test) and Lower-upper limits of TS 9581)

ortalama ($G_{s_{ort}}$) 2,55 bulunmuştur. VC'nin fiziksel özellikleri Tablo 2 de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 1. Hammaddelerin kimyasal bileşimi (Ağırlıkça)
(Chemical Composition of row materials (By weight))

Bileşenler	Kayseri Volkanik Curuf (VC)	CEM I 42,5 Çimento
SiO ₂	65,9	20,7
TiO ₂	0,33	0,27
Al ₂ O ₃	13,6	5,71
Fe ₂ O ₃	2,98	3,51
MnO	0,12	-
MgO	1,7	2,65
CaO	5,2	63,74
Na ₂ O	3,4	0,3
K ₂ O	2,5	0,78
P ₂ O ₅	0,07	-
H ₂ O	4,1	-
SO ₃	-	2

3. DENEYSEL YÖNTEMLER (EXPERIMENTAL METHODS)

Deneyisel çalışmalarda öncelikle VC'nin karayollarında dolgu, alttemel ve temel tabakalarında kullanımı ve bu tabakalara gelen yüklere karşı yeterli dayanıma sahip olup olmadığı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre istenen mukavemet özelliklerini sağlaması için VC, çimento ile stabilize edilerek geoteknik özellikleri test edilmiştir.

3.1. VC'nin deneysel araştırması (Experimental investigation of VC)

Bu çalışmada ilk olarak, VC'nin karayollarında herhangi bir katkı olmadan karayollarında kullanımı araştırılmıştır. Öncelikle, elek analizi yapılarak dane dağılımı bulunmuştur. Modifiye (Ağır) Proctor koşullarında optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Cüruf tanecikleri nispeten zayıf mukavemeti nedeniyle kompaksiyon sırasında parçalanması sonucu numunelerin

ince dane oranı artmış ve daha iyi bir sıkışma sağlanmıştır. Kompaksiyon deneyi sonrasında elek analizi tekrar yapılmıştır (Şekil 2). Los Angeles Aşınma kaybı deneyi (TS-EN-1097-2), 11 bilye ile 500 devir sonucunda VC'nin aşınma kaybı %32 bulunmuştur. Su emme değeri sırasıyla No.4 elek üzerinde kalan iri kısmı için %4 ve No.4'ten küçük ince daneli kısım için %3 bulunmuştur. Sodyum sülfat ile agregaların dona karşı sağlamlığı testi (ASTMC131) sonucunda sodyum sülfat donma kaybı (K_d) %5 olmuştur. Yassılık endeksi deneyi, 80mm den geçen 4 mm üzerinde kalan numuneye uygulanmış (ASTM D4791) %5 bulunmuştur. Elde edilen deney sonuçları ve standartta istenen sınır değerler Tablo 3 de verilmiştir.

Tablo 3'teki açıklayıcı test sonuçları, Kayseri volkanik cüruf agregalarının nispeten zayıf yapıda olduğu, ancak Modifiye proctor sıkışma enerjisi ile sıkıştırılması sonrası oldukça stabil hale geldiği görülmüştür. Su emme oranının ise sıkışma sonrasında %3 olan sınır değerlerde olduğu belirlenmiştir.

VC'nin karayollarında dolgu ve alt temel tabakası malzemesi olarak doğrudan kullanılabilmesi için gereksinimleri

karşılıdığı ancak spesifikasyon sınırlarına oldukça yakın sonuçlar elde edildiği Tablo 3'te görülmektedir. Bunun yanında VC'nin doğrudan yol temel tabakalarında kullanılması için, yeterli dayanıma sahip olmadığı ve istenen mukavemet özelliklerini sağlamadığı görülmüştür. VC'nin yol temel tabakasında kullanılabilmesi için mutlaka dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, dolgu, alttemel ve temel tabakalarında kullanılacak VC'nin mukavemet ve dayanıklılık gereksinimlerini iyileştirmek için, etkili bir kimyasal olan Portland çimentosu (Tablo 1), stabilize malzeme olarak kullanılmıştır. Volkanik cüruf numuneleri, farklı miktarda çimento içeriği ile stabilize edilmiş, basınç dayanımı ve sıkışma davranışları incelenmiştir. Laboratuvar çalışmasının ikinci kısmında, çimento ile stabilize edilen VC'nin karayollarında kullanılması için gerekli UCS ile CBR değerlerini karşılayacak en uygun çimento oranı araştırılmıştır.

3.2. VC'nin Portland çimento ile iyileştirilmesi (Improvement of VC using Portland cement)

VC agregasının karayolları temel tabakasında kullanılması için zemin özelliklerinin çimento ile iyileştirilme yapılmıştır. Stabilizasyonunda Kayseri'deki yerel bir firmadan satın

Tablo 2. Kayseri volkanik cürufun (VC) fiziksel özellikleri (Physical properties of Kayseri volcanic slag (VC))

Fiziksel özellikleri (physical characteristics)	Değeri/Tanımı (Value / Description)	
Renk	Kırmızı-kahverengi ve gri-siyah arası renklerde	
Şekil	Düzensiz ve köşeli	
Dane çapı dağılımı	Proctor Öncesi	Proctor Sonrası
19 mm den Geçen %	70	84
9,5 mm den geçen %	51	62
2 mm den geçen %	20	26
0,075mm den geçen %	1	5
Uniformluk Katsayısı C_u (D_{60}/D_{10})	35	41
Eğrilik Katsayısı C_r ($D_{30}^2/(D_{10} \times D_{60})$)	3	3
Plastisite İndisi	NP-Plastik değil	NP-Plastik değil
Özgül Ağırlığı	2,55	
Zemin Sınıfı	GW -TS1500'e göre	A-1-a AASHTO'ya göre
	Düzensiz dane dağılımlı çakıl ve az kum	Çakıl ve Kum

Tablo 3. VC test sonuçları ve şartname limitleri (Volcanic Slag Test Results and Specification Limits)

Yapılan Deneyler	Volkanik Cüruf Agregası	İstenen Sınır Değerler [29]		
		Dolgu	AltTemel	Temel
Donma Kaybı (Na_2SO_4)	5	-	≤ 20	≤ 15
Los Angeles Aşınma, % (ortalama)	32	-	≤ 45	≤ 35
Su Emme Oranı, %	$\geq 4,75$ mm	$\leq 3,5$	$\leq 3,5$	≤ 3
	4,1			
Yassılık Endeksi, %	$\leq 4,75$ mm	$\leq 3,5$	$\leq 3,5$	≤ 3
	3,0			
Likit Limit, %	NP	≤ 60	≤ 25	NP
Plastik Limit, %	NP	≤ 35	≤ 6	NP
CBR Taşıma Oranı, %	55	≥ 10	≥ 30	≥ 100
Özgül Ağırlık	2,55	2,5-3,0	2,5-3,0	2,5-3,0
Modifiye Proctor Deneyi	$\gamma_{mak}=16,571$ kN/m ³ $\omega_{opt}=\%10,7$	$>14,5$ kN/m ³	$>14,5$ kN/m ³	$>14,5$ kN/m ³

alınan normal Portland çimentosu PÇ 42,5 (CEM I 42.5) kullanılmıştır (Tablo 1). Çimentonun özgül ağırlığı 3,13 ve özgül yüzeyi 3460 cm²/gr bulunmuştur. Normal Portland çimentosu, hidratlanan kalsiyum-silikatlar ve kalsiyum-alüminatlardan oluşmaktadır. VC kütlece %3 ve %5 oranında çimento ile karıştırılarak her çimento yüzdesi, için maksimum kuru yoğunluk ve optimum nem içeriği bulunmuştur. İlk önce %3 ve sonrasında %5 çimento içeren karışımlar, standart CBR kalıplarında Modifiye Proctor sıklığında önceden deneyle belirlenen optimum nem içeriğinde sıkıştırılmış ve tek eksenli basınç deneyleri yapmak üzere her çimento yüzdesinden 3'er numune hazırlanmıştır. Sıkıştırıldıktan sonra, kalıp içerisindeki numuneler plastik bir torbaya konulmuş, ıslak bezle örtülerek 48 saat sertleşmesi için nemli bir odada bekletilmiştir. Çimentonun hidratasyonu yaklaşık iki saat içinde oluşmuş, hızlı mukavemet kazanımı sağladığı görülmüştür. Örnekler daha sonra dikkatlice kalıptan çıkarılıp etiketlenmiş ve gerekli kürlenme periyodunda test edilene kadar nemli bir ortamda tutulmuştur. Numunelerin 7, 14 ve 28 gün kürlenme periyodunun sonunda örnekler dört saat suda ıslatılmış ve kür havuzundan çıkarıp bekletmeden standart (ASTM D1633-17) izlenerek tek eksenli basınç dayanımı (UCS) testleri yapılmıştır. Benzer şekilde %3 ve 5 çimento içeriği için her çimento yüzdesinden 3'er numune standart kalıplarda hazırlanmış (ASTM D 1883-87) ve numunelerin 7, 14 ve 28 gün kürlenme periyodunun sonunda CBR deneyleri yapılmıştır.

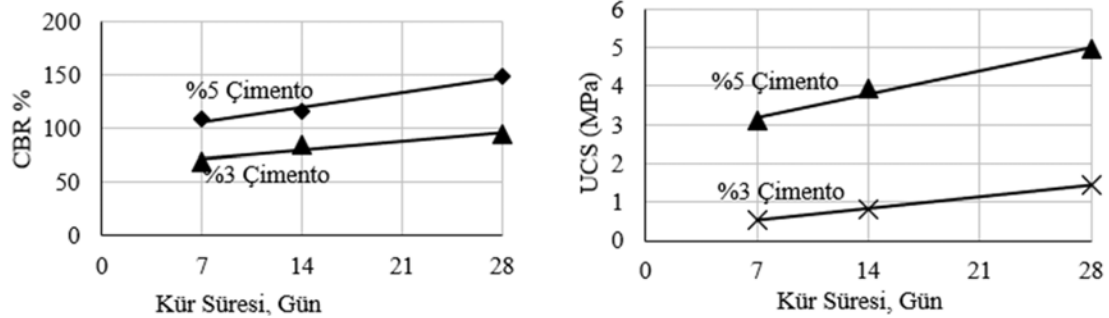
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Öncelikle, yerli bir malzeme olan Kayseri Volkanik Cüruf agregasının karayollarında direkt kullanımı araştırılmıştır.

Daha sonra Portland çimentosu ile farklı miktarlarda karıştırılarak stabilize edildikten sonra mukavemet özellikleri incelenmiştir. UCS ve CBR deneyleri, VC'nin stabilize edildikten sonra mukavemet değişimini gözlemlemek için yapılmıştır. Volkanik cüruf agregaların çimento ile stabilize edilerek iyileştirildikten sonraki CBR ve UCS deney sonuçları Tablo 4 de verilmiştir. %3 çimento oranı için 28 günün sonunda CBR değeri %55 den %94,8'e çıkmıştır. %5 çimento oranı için 7 günün sonunda CBR %108,4 değerine ulaşmıştır. Bu bulgular, VC'nin çimento ile stabilizasyonu sonucunda CBR açısından karayollarında dolgu, alt temel ve temel tabakası için istenen şartları sağlayabileceğini göstermektedir. CBR değerleri yol yapımında başlıca tek kriter değildir. Bunun yanında, yol yapımında yaygın olarak kullanılan tek eksenli basınç dayanımı (UCS) değerlerine bakmak tasarım için uygun olacağı düşünülmüştür. Tablo 4'te %5 çimento oranı için 7 günün sonunda UCS değeri 3,1 MPa dan 28 günün sonunda 4,97 MPa değerine ulaşmıştır. Çimento ile stabilize edilmiş temel ve alt temel tabakaları için tek eksenli basınç dayanım kriterleri, çeşitli standartlara göre önemli ölçüde değişmektedir. Tipik olarak kabul edilebilir alt sınırlar NCHR (NCHRP)'e göre [19] esnek kaplamalı yollarda 7 günlük UCS değeri dolgu ve alt temel için en az 1,72 MPa, temel tabakası için ise en az 2,1 MPa ve en fazla 5,17 MPa UCS değerleri olmalıdır. Bu kriterler dikkate alındığında Kayseri VC agregaları %5 çimento ile stabilize edilerek iyileştirildikten sonra CBR ve UCS açısından minimum dayanım kriterlerini sağlamaktadır. CBR ve UCS test sonuçları, çimento ile stabilize edilmiş VC'nin mukavemetinin hem çimentodaki artış hem de kürlenme süresiyle tutarlı bir artış eğiliminde olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 4). Çimentonun hidrasyonu sırasında, çimentoda bulunan kalsiyum silikatlar (C₃S ve C₂S), su

Tablo 4. VC'nin çimento ile stabilize edildikten sonra CBR ve UCS deney sonuçları
(CBR and UCS test results after VC stabilized with cement)

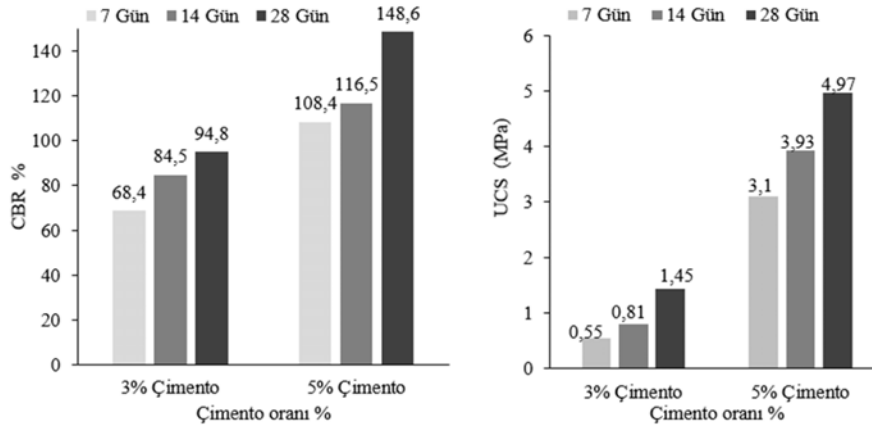
Çimento Katkı Oranı %	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Optimum Su İçeriği %	CBR %	UCS (MPa)	Kürleme Süresi (GÜN)
0	16,571	10,7	55	-	-
3	17,070	8,6	68,4	0,55	7
			84,5	0,81	14
			94,8	1,45	28
5	17,854	7,5	108,4	3,10	7
			116,5	3,93	14
			148,6	4,97	28



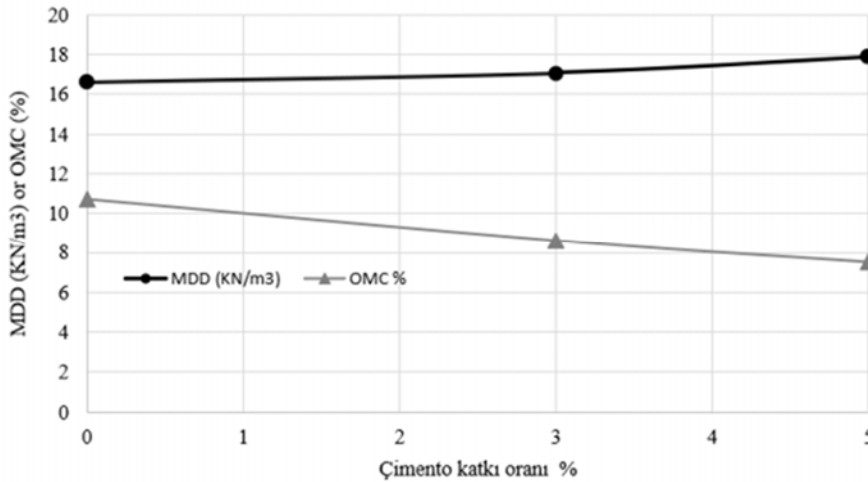
Şekil 4. VC'nin CBR ve UCS deney sonuçları ile kür süresi ilişkisi (Relationship of VC with CBR and UCS test results and cure time)

oluşturan kompleks kalsiyum silikat hidratlarla (C-S-H) reaksiyona girer. C-S-H jeli bu şekilde oluşur, boşluk alanını doldurur ve parçacıkları birbirine bağlayarak kütleye güç verir. VCA-Çimento karışımındaki çimento içeriğinin artmasıyla birlikte, partikülleri daha etkili bir şekilde bağlayan jel miktarı da artar. Sabit VCA içeriğinde çimento ilavesiyle mukavemette kayda değer bir artış olmuştur (Şekil 4). VCA, puzolan olarak bilinen ince bölünmüş bir formda oldukça reaktif silisli ve alüminli malzemeler de içerir (Tablo 1). Bu puzolanik malzemeler, su varlığında çimentonun hidrasyonu sırasında açığa çıkan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek çimentolama özelliklerine sahip bileşikler (C-S-H jel) oluştururlar. Bu, VCA'nın çimento ile stabilize edilmesiyle oluşan karışımların yol dolgularının mukavemetini arttırmada kesinlikle avantajlı olduğunu yapılan CBR ve UCS deneyleri göstermektedir. İkinci olarak, VCA ya çimento ilavesi, karışımın iyi derecelendirilmesini sağlamış, dolayısıyla sıkıştırılmış karışımın mekanik mukavemeti ve kuru birim hacim ağırlığı artmıştır. Sıkıştırılmış karışımın mukavemetinin kürlenme süresiyle arttığı da gözlemlenmiştir. Çimento içeriğine bağlı olarak stabilize edilmiş VC'nin CBR dayanımı Şekil 5a'da ve tek eksenli basınç dayanımı ise Şekil 5b'de

gösterilmektedir. Stabilizasyon için kullanılan çimento yüzdelere artmasıyla, VC için CBR ve UCS dayanımları artmıştır. Kürlenme süresi ile basınç dayanımlarının arttığı rakamlardan ayrıca görülmektedir. Şekil 5a'da, yüzde 3 çimento ile stabilize edilmiş VC için 28 günlük CBR oranı %94,8 olduğu ve bu değer karayollarının temel tabakasında kullanılmak için istenilen %100 değerine yakın olduğu görülmektedir. Şekil 5b'de yine %3 çimento ile 28 günlük tek eksenli basınç dayanımının yüzde 1,45 MPa bulunmuş ancak temel tabakasında genel kabul olarak istenilen UCS 3 MPa değerini karşılayamamıştır. Bu nedenle çimento oranı %3'ten, %5'e çıkarılmış ve Şekil 5a'da 28 günlük kürlenme sonrasında CBR değeri %148,6 ve Şekil 5b'de tek eksenli basınç dayanımı, 4,97 MPa bulunmuştur ki bu neredeyse temel tabakası için istenilen UCS değerinin iki katı dayanımına eşittir. Bu çalışmada VC, %3 ve %5 çimento ile stabilize edilerek test edilmiştir ancak stabilizasyonda çimento oranını azaltmak amacıyla, daha az çimento içeriği için arazi deneyleri ile test edilmesi tavsiye edilir. Modifiye Proctor deneyinden elde edilen maksimum kuru yoğunluk (MDD) ve optimum su içeriği (OMC)'nin çimento içeriği ile değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Bu grafik, VC'ye çimento ilavesi edilmesiyle, MDD değerinde artış ve



Şekil 5. VC'nin CBR ve UCS değerleri ile Çimento Oranı ilişkisi (Relationship between VC's CBR and UCS values and Cement Ratio)



Şekil 6. Modifiye Proctor deneyi MDD ve OMC değerleri ile çimento oranı ilişkisi (Relationship between Modified Proctor test MDD and OMC values with cement ratio)

OMC değerinde azalma olduğunu göstermektedir. Çimentonun özgül ağırlığının VC'nin kinden fazla olmasından dolayı belirli bir oranda cürufun çimento ile yer değiştirmesi kuru birim hacim ağırlığını arttırmıştır. Buna ek olarak, sıkıştırılmış karışımdaki boşluklar, daneleri ince olan çimento ile dolduğu için OMC değeri azalmış ve karışımın MDD si artmıştır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS)

Öncelikle volkanik cürufların, karayollarında uygulanan yükü taşıyacak kadar yeterli dayanıma sahip olup olmadığını araştırmak için testler yapılmıştır. Kayseri volkanik cürufların, esnek üst yapı yollarda alternatif dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği mekanik ve çimento stabilizasyon teknikleri ile araştırılmıştır. VC'nin Elek analizi, endeks özellikleri, su emme yüzdesi, donma çözülme özelliği (donma kaybı %'sine), Los Angeles aşınması, CBR sonuçlarına bakarak karayolları standart ve teknik şartnamesinde belirtilen sınır değerlerle karşılaştırılmıştır. VC'nin nispeten zayıf mukavemetinden dolayı sıkıştırma sırasında parçalandığı ve ezilen danelerden dolayı ince dane oranını bir miktar arttırdığı gözlenmiştir. Bunlar, iri daneler arasında kalan boşluğu doldurmuş ve daha iyi bir sıkışma elde edilmesini sağlamıştır. Öncelikle, VC'nin karayollarında dolgu ve alt temel tabakası malzemesi olarak doğrudan kullanılabilmesi için gereksinimleri karşıladığı ancak spesifikasyon sınırlarına oldukça yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. İkinci olarak, VC'nin doğrudan yol temel tabakalarında kullanılması için, yeterli dayanıma sahip olmadığı ve istenen mukavemet özelliklerini temel tabakası için sağlamadığı görülmüştür. Bu çalışma sonucunda, Modifiye Proctor sıkışma enerjisiyle sıkıştırılmış VC'nin doğrudan yollarda dolgu ve alt temel tabakalarında kullanımı için uygun bir malzeme olduğu kanıtlanmış olsa da yollarda kullanılmadan önce mutlaka gerçek ölçekli bir yol kısmının arazide test yapılması önerilir.

Bunun yanında, VC'nin yol temel tabakasında da kullanılabilmesi için mutlaka dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, dolgu, alttemel ve temel tabakalarında kullanılacak VC'nin mukavemet ve dayanıklılık gereksinimlerini iyileştirmek amacıyla, etkili bir bağlayıcı kimyasal olan Portland çimentosu, stabilize malzeme olarak kullanılmıştır. VC'nin temel tabakasında kullanılabilmesi için standartlarda UCS en az 3MPa ve CBR en az 100 olması gerekir. Bunu sağlamak amacıyla Volkanik cüruf numuneleri, farklı miktarda çimento içeriği ile stabilize edilmiş, basınç dayanımı ve sıkışma davranışları incelenmiştir. Sonuç olarak, VC'nin otoyol ve her türlü yol yapımında kullanılabileceği görülmüş ve test edilmiştir. Yol dolgularında kırmataşın yerine VC'nin kullanımı, ekonomik ve çevresel faydalar sağlamanın yanında iyi bir alternatif dolgu malzemesi olduğunu göstermiştir. Böylece, bölgede kullanılacak dolgu malzemelerinin çeşitlendirilmesi sağlanmıştır. Çimento ile stabilize edilen VC'nin karayollarında kullanılması için gerekli mukavemet değerlerini karşılayacak en uygun çimento oranı da bulunmuştur.

Kırma taşın yerine, doğada hazır bulunan veya temel kazılarında atık olarak ortaya çıkan VC'nin karayollarında stabilize edilerek kullanılması oldukça önemli bir tasarruf unsurudur ve çevreci bir uygulamadır. VC'nin kullanılması, kırmataş ihtiyacını azaltacak, maliyetleri düşürecek ve kırmataş üretiminden kaynaklanan olumsuz çevre etkilerine engel olacaktır. VC-çimento karışımının maliyeti, aynı koşullarda yerinde veya yakınlardaki kırma taşla yapılan yol kaplamasına kıyasla çok daha ekonomiktir. VC-çimento ile stabilize edilerek, Kayseri'ye nispeten yakın şehir ve ilçe yolları, şehirler arası otoyollar ve havaalanlarına kadar birçok dolgu projelerinde kullanım olanağına sahiptir. Bu çalışma ile, kıt olan standart yol yapım malzemelerini (Kırma Taş) kısmen standart olmayan malzemelerle (Volkanik cüruf) değiştirme imkânı bulunacak ve dolgu malzemelerinin çeşitliliğini arttıracaktır. Ancak, çimento ile stabilize edilmiş VC'nin fizibilitesi, VC'nin elde etme ve taşıma mesafesi ile ilgili masraflara karşı her proje için kontrol edilmelidir. Bununla birlikte, çimento ile stabilize edilmiş VC'nin performansı, arazi koşullarının neden olduğu gerilmelere bağlı olarak tam ölçekli bir yol deneyinde araştırılması yazar tarafından önerilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Fisher R.V., Proposed classification of volcaniclastic sediments and rocks, Geological Society of America Bulletin, 72, 409-414, 1961.
2. Schmid R., Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments, Geologische Rundschau, 70, 794-799, 1981.
3. Franesqui, M.A., Yepes, J., García-González, C., Improvement of moisture damage resistance and permanent deformation performance of asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates using crumb rubber modified bitumen, Constr Build Mater, 328-39, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.181>, 2019.
4. Saltan M, Fındık FS, Stabilization of subbase layer materials with waste pumice in flexible pavement, Building and Environment, 43, 415-421, 2008.
5. Nwakaire C.M., Yap S.P., Onn C.C., Yuen C.W., Ibrahim H.A., Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review, Construction and Building Materials, 235, 2020.
6. Yaowarat, T., Horpiulsuk, S., Arulrajah, A., Maghool, F., Mirzababaei, M., Rashid, A.S.A., Chinkulkijniwat, A., Cement stabilisation of recycled concrete aggregate modified with polyvinyl alcohol, International Journal of Pavement Engineering, 1-9, 2020.
7. Sanger, M., Natarajan, B. M., Wang, B., Edil, T., Ginder-Vogel, M., Recycled concrete aggregate in base course applications: Review of field and laboratory investigations of leachate pH., Journal of hazardous materials, 385, 121562, 2020.
8. Ene E, Okagbue C., Some basic geotechnical properties of expansive soil modified using pyroclastic dust, Engineering Geology, 107 (1-2), 61-65, 2009.

9. Kaya A., Durukan S., Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner, *Applied Clay Science*, 25 (1), 83-91, 2004.
10. Kordnaeij A., Moayed R.Z., Soleimani M., Shear wave velocity of zeolite-cement grouted sands, *Soil Dynamics*, 122, 196-210, 2019
11. Shi J.X., The applications of zeolite in sustainable binders for soil stabilization, *Applied Mechanics and Materials*, 112 (5), 256–259, 2013.
12. Chen Z., Wang Z., Research on pavement performance of volcanic ash mixture as road base and mechanism. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 4 (1), 18-23, 2009.
13. Tian X., Li C., Zhao F., Liu Z., Study on properties of steel slag-blast furnace slag-zeolite binder for solidification/stabilization of heavy metals, *Earth and Environmental Science*, 227 (5), 052-070, 2019.
14. Amini O., Ghasemi M., Laboratory study of the effects of using magnesium slag on the geotechnical properties of cement stabilized soil, *Construction and Building Materials*, 223, 409-420, 2019.
15. Seyfe M., Geremew A., Potential Use Of Cinder Gravel as an Alternative Base Course Material Through Blending With Crushed Stone Aggregate and Cement Treatment, *Journal of Civil Engineering, Science Technology*, 10 (2), 101-112, 2019.
16. Hearn G.J., Otto A., Greening P.A.K., Endale A.A., Etefa D.M., Engineering geology of cinder gravel in Ethiopia: prospecting, testing and application to low-volume roads, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78 (5), 3095-3110, 2019.
17. Luo, Q., Liang, D., Wang, T., Zhang, L., & Jiang, L., Application of High-Vesicularity Cinder Gravels to Railway Earth Structure in Ethiopia. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32 (11), 04020347, 2020.
18. Orense R.P., Zapanta A., Hata A., Towhata I., Geotechnical characteristics of volcanic soils taken from recent eruptions, *Geotechnical and Geological Engineering*, 24 (1), 129-161, 2006.
19. Little, D.N., Nair, S., NCHRP Web-Only Document 144: Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base material, Contractor's Final Task Report for NCHRP Project 20-07, Transportation Research Board of the National Academies., 2009.
20. Okogbue, C.O., Aghamelu, O.P., Performance of pyroclastic rocks from Abakaliki Metropolis (southeastern Nigeria) in road construction projects, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72 (3), 433-446 2013.
21. García-González, C., Yepes, J., Franesqui, M.A., Geomechanical characterization of volcanic aggregates for paving construction applications and correlation with the rock properties, *Transportation Geotechnics*, 24 (100383), 2020.
22. Gajewska, B., Kraszewski, C., Rafalski, L., Significance of cement-stabilised soil grain size distribution in determining the relationship between strength and resilient modulus, *Road Materials and Pavement Design*, 19 (7), 1692-1701, 2018.
23. Guo, R., Nian, T., Li, P., Fu, J., Guo, H., Anti-erosion performance of asphalt pavement with a sub-base of cement-treated mixtures, *Construction and Building Materials*, 223, 278-287, 2019.
24. Shalabi, F. I., Mazher, J., Khan, K., Alsuliman, M., Almustafa, I., Mahmoud, W., Alomran, N., Cement-stabilized waste sand as sustainable construction materials for foundations and highway roads, *Materials*, 12 (4), 600, 2019.
25. Firat, S., Dikmen, S., Yılmaz, G., Khatib, J. M., Characteristics of Engineered Waste Materials Used for Road Subbase Layers, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24 (9), 2643-2656, 2020.
26. Chen, M., Wen, P., Wang, C., Chai, Z., Gao, Z., Evaluation of particle size distribution and mechanical properties of mineral waste slag as filling material, *Construction and Building Materials*, 253, 119183, 2020.
27. Liu, J., Yu, B., Wang, Q., Application of steel slag in cement treated aggregate base course, *Journal of Cleaner Production*, 269, 121733, 2020.
28. Yaowarat, T., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Maghool, F., Mirzababaei, M., Rashid, A.S.A., Chinkulkijniwat, A., Cement stabilisation of recycled concrete aggregate modified with polyvinyl alcohol, *International Journal of Pavement Engineering*, 1-9, 2020.
29. Firat S., Cömert A., Curing time effects on CBR of stabilized kaoline with fly ash, lime and cement, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26 (4), 719-730. 2011.
30. Yiğit B., Salihoğlu G., Mardani-Aghabaglou A., Salihoğlu N.K., Özen S., Recycling of sewage sludge incineration ashes as construction material, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1647-1664, 2020.
31. Türk Standartları Enstitüsü, TS-9581 Şehiriçi Yollar-Esnek Üstyapılı Alttemel ve Temel Tabakaları Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü Ankara, Türkiye, 1991.
32. T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi, Bölüm 400: Yol Üst Yapısı, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 2013.
33. Akbulut, H., Gürer, C., Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements, *Building and Environment* 42 (5), 1921–1930.