Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

BİTLİS RAHVA DÜZLÜĞÜNDEKİ ATIK TÜFLERİN KARAYOLU DOLGUSUNDA KULLANILABİLİRLİĞİ

USABILITY OF WASTE TUFFS FROM THE BITLIS RAHVA PLAIN AS HIGHWAY FILL

Burak DERELİ[1], Halil İbrahim GÜNAYDIN[2], Ömür ÇİMEN[3]

ÖZET

Bitlis Rahva düzlüğünde yoğunlaşan yapılaşma ve altyapı faaliyetleriyle, Nemrut Volkanı kaynaklı piroklastik çökellerin (ignimbirit) kazılmasından önemli miktarda atık açığa çıkmakta ve bu malzemenin kontrolsüz biçimde depolanması çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu çalışmada, atık ignimbiritin karayolu dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Numuneler üzerinde elek analizi, Atterberg kıvam limitleri, standart Proktor, yaş Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve doğrudan kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiş; malzemenin mineralojik ve kimyasal bileşimi XRD ve ICP-OES analizleriyle incelenmiştir. Plastik olmayan ve SM sınıfındaki malzemede maksimum kuru birim hacim ağırlık 14.65 kN/m³, optimum su muhtevası %18.6, yaş CBR değeri %46, şişme yüzdesi %0, kohezyon 57.0 kPa ve içsel sürtünme açısı 34.3° olarak belirlenmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesi kriterlerinin tamamını sağlayan malzeme ile teşkil edilen farklı yükseklikteki dolgu kesitlerinin şev stabilitesi PLAXIS 2D sonlu elemanlar yazılımıyla analiz edilmiş; tüm kesitlerde güvenlik katsayısı (ΣMsf) yeterlilik sınırının üzerinde tespit edilmiştir. Sonuç olarak, incelenen atık ignimbiritin karayolu dolgularında değerlendirilmesiyle hem çevresel kirliliğin azalacağı hem de doğal agrega kaynaklarının korunacağı düşünülmektedir.
Anahtar Kelimeler: *Atık ignimbirit, karayolu dolgusu, CBR, şev stabilitesi, Bitlis*

ABSTRACT

Intensive construction and infrastructure activities in the Bitlis Rahva Plain generate considerable amounts of waste from the excavation of Nemrut Volcano-derived pyroclastic deposits (ignimbrite), and the uncontrolled stockpiling of this material causes environmental problems. In this study, the usability of waste ignimbrite as a highway embankment material was investigated. Sieve analysis, Atterberg consistency limits, standard Proctor, soaked California Bearing Ratio (CBR), and direct shear box tests were carried out on the samples; the mineralogical and chemical composition of the material was examined by XRD and ICP-OES analyses. For the non-plastic material classified as SM, the maximum dry unit weight, optimum moisture content, soaked CBR value, swelling percentage, cohesion, and internal friction angle were determined as 14.65 kN/m³, 18.6%, 46%, 0%, 57.0 kPa, and 34.3°, respectively. The slope stability of embankment sections of different heights constructed with the material, which satisfies all criteria of the Turkish Highway Technical Specification, was analysed using the finite element software PLAXIS 2D; the factor of safety (ΣMsf) was obtained well above the sufficiency limit in all sections In conclusion, it is considered that utilizing the investigated waste ignimbrite in highway embankments will both reduce environmental pollution and preserve natural aggregate resources.
Keywords: *Waste ignimbrite, highway embankment, CBR, slope stability, Bitlis*

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Bitlis Eren Üniversitesi, bdereli@beu.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Öğr. Gör. Dr., Akdeniz Üniversitesi, hgunaydin@akdeniz.edu.tr
[3] Doç. Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi, omurcimen@sdu.edu.tr

1. GİRİŞ

Türkiye'de hızla artan kentleşme ve altyapı yatırımları, inşaat faaliyetleri sırasında ortaya çıkan kazı ve atık malzemelerin yönetimini önemli bir mühendislik ve çevre sorunu hâline getirmiştir. Bu malzemelerin döküm sahalarında kontrolsüz biçimde depolanması, arazi kaybının yanı sıra görsel ve çevresel kirliliğe de yol açmaktadır. Buna karşılık, uygun mühendislik özelliklerine sahip atıkların dolgu işlerinde yeniden kullanılması, doğal agrega kaynakları üzerindeki baskıyı azaltan sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır (Bamigboye vd., 2021). Karayolu dolguları, proje başına çok yüksek hacimlerde malzeme gerektirdiğinden, uygun nitelikteki atıkların büyük miktarlarda değerlendirilebileceği başlıca uygulama alanlarından biridir (Zhang vd., 2019). Bu doğrultuda, son yıllarda farklı kökenlere sahip atık malzemelerin geoteknik özellikleri incelenmiş ve bu malzemelerin yol dolguları ile üstyapı katmanlarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deniz dibi tarama malzemeleri (Karadoğan vd., 2020), geri dönüştürülmüş beton ve asfalt agregaları ile çelik cürufları (Korkmaz vd., 2023; Özsoy vd., 2023), volkanik cüruf (Acar, 2022) ve yüksek plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan inşaat atıkları (Çimen vd., 2017), bu kapsamda değerlendirilen başlıca malzemeler arasındadır. Farklı çalışmalardan elde edilen bulgular; uygun endeks, kompaksiyon ve kayma mukavemeti özelliklerine sahip atıkların doğal malzemelere benzer dolgu performansı gösterebildiğine işaret etmektedir.

Bitlis ili, topoğrafyanın büyük ölçüde dağlık karakter gösterdiği ve yerleşimin sınırlı düzlüklere yoğunlaştığı bir bölgede yer almaktadır. İl merkezinin kuzeyindeki, Bitlis ile Tatvan kentleri arasında uzanan ve yaklaşık 85 km²'lik bir yüzölçümüne sahip Rahva düzlüğü, metamorfik Bitlis Masifi ile Nemrut Volkanı arasında kalan bir eşik sahası olup yüzeye yakın bölümleri büyük ölçüde volkanik formasyonlardan oluşmaktadır (Arınç, 2011). Bu düzlükte en geniş yayılıma sahip tüf, ignimbirit türü piroklastik çökeller ve bazaltik volkanik kayaçlar, Van Gölü'nün batısında yer alan ve Kuvaterner döneminde yaklaşık 1 milyon yıldır etkinliğini sürdüren Nemrut Stratovolkanı'nın ürünlerini oluşturmaktadır (Çubukçu vd., 2012; Güneş, 2025). Bu birimler arasında düzlükte en geniş yayılıma sahip olan ignimbiritler, renk, kaynaklanma derecesi ve dokusal özelliklerindeki farklılıklara bağlı olarak değişen kalınlıklardaki taban, orta ve üst seviyeler şeklinde istiflenmiştir (Karaoğlu vd., 2005; Koralay vd., 2011). Üniversite kampüsü, toplu konut ve karayolu projelerinin bu düzlükte yoğunlaşması, temel ve altyapı kazıları sonucunda önemli miktarda atık ignimbirit malzemesinin oluşmasına neden olmakta; söz konusu malzeme çoğunlukla denetimsiz döküm alanlarında depolanmaktadır.

Volkanik tüflerin ve piroklastik malzemelerin inşaat sektöründe değerlendirilmesine yönelik literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bölgede tüf ve ignimbiritler geçmişten bu yana geleneksel olarak yapılarda kullanılmış; bu kapsamda fiziksel-mekanik özellikleri, su emme ve bozunma davranışları ile taşıyıcı olmayan duvar ve kaplama uygulamalarındaki potansiyelleri araştırılmıştır (Şimşek ve Erdal, 2004; Dinçer vd., 2012; Bozkurt ve Mutlu, 2025). Bu malzemeler ayrıca öğütülerek beton ve harçlarda çimento ikame malzemesi (taş unu) olarak da değerlendirilmiştir (Erdal ve Şimşek, 2011; Bozkurt ve Karaca, 2023). Geoteknik alanda ise tüf kesim atıkları öğütülerek, kireçle stabilize edilmiş kil zeminlerde puzolanik katkı olarak kullanılmış ve malzemenin dayanımını artırdığı belirlenmiştir (Dereli vd., 2026). Ancak bu çalışmalar tüf ve piroklastik malzemeleri işlenmiş yapı taşı ya da öğütülmüş toz/katkı formunda ele almaktadır. Buna karşın, Rahva düzlüğü kazılarından iri granüler formda açığa çıkan atık ignimbiritin

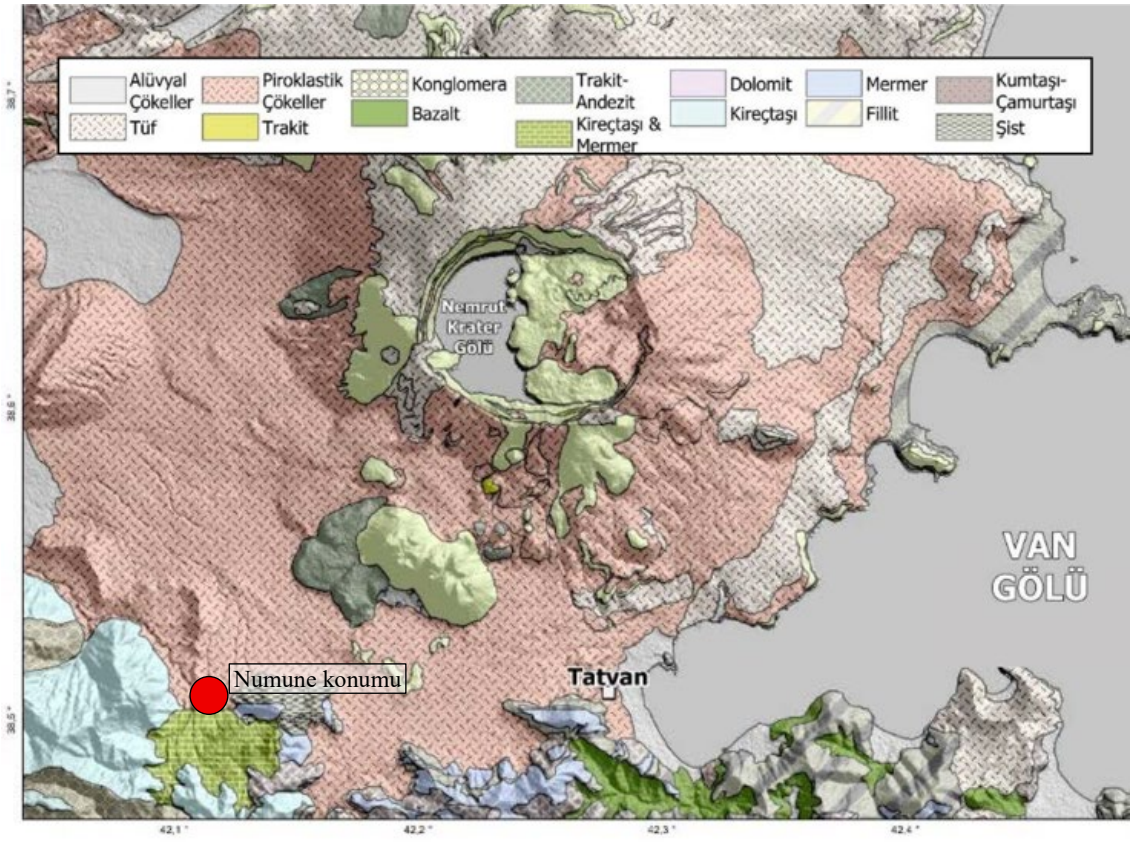
herhangi bir işlem uygulanmaksızın doğrudan karayolu dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğini; mineralojik ve kimyasal bileşimi ile endeks, kompaksiyon, taşıma gücü ve kayma mukavemeti özelliklerini bütüncül olarak ele alan ve dolgu şev stabilitesini sayısal modelleme ile doğrulayan çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmanın amacı, Bitlis Rahva düzlüğünde yapılaşma faaliyetleri sonucu açığa çıkan atık ignimbirit malzemesinin Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) kriterlerine göre karayolu dolgusu olarak uygunluğunun belirlenmesidir. Bu kapsamda malzemenin endeks özellikleri, mineralojik ve kimyasal bileşimi ile kompaksiyon, taşıma gücü ve kayma mukavemeti davranışı laboratuvar deneyleriyle belirlenmiş; elde edilen parametrelerle Karayolu Tasarım El Kitabı'nda öngörülen tip kesitlere sahip dolguların şev stabilitesi PLAXIS 2D ile analiz edilmiştir. Çalışmanın, hem Rahva düzlüğünde düzensiz biçimde biriken kazı atıklarının değerlendirilerek bölgesel bir çevre sorununun azaltılmasına hem de doğal agrega kaynaklarının korunmasına katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Malzeme Özellikleri

Çalışmada kullanılan atık ignimbirit numuneleri, Bitlis Eren Üniversitesi Rahva Yerleşkesi'ndeki bir yurt binası inşaatının temel kazısı sırasında açığa çıkan kazı malzemesinden alınmıştır. Numune alım noktası, Nemrut Volkanı çevresinin jeolojisini gösteren Şekil 1'de işaretlenmiş olup, bölgenin piroklastik çökeller biriminde yer almaktadır.



Şekil 1. Numune alım noktası ve bölgenin jeoloji haritası (Güneş, 2025'ten değiştirilerek)

Şekil 2a'da kazının genel görünümü verilmiş ve Şekil 2b'de de ortalama 50 cm kalınlığındaki bitkisel toprak örtüsü ile altında yer alan ignimbirit biriminin geçişi açıkça görülmektedir. Nemrut Volkanı'nın piroklastik akıntı çökellerinin çimentolaşmasıyla oluşan bu birim, koyu gri renkli veya yer yer kırmızımsı tonlar içeren gözenekli bir yapıya sahiptir (Şekil 2b). Nemrut ignimbiritinin siyahtan açık kahverengiye değişebilen bu renk özellikleri literatürde de tanımlanmıştır (Ulusoy vd., 2012). Sahadan alınan malzeme iri daneler içerdiğinden, numuneler ilgili standartların öngördüğü maksimum dane boyutu koşulunu sağlayacak şekilde elenmiş ve her bir deney bu numuneler üzerinde yürütülmüştür.



Şekil 2. (a) Numune alınan temel kazısının genel görünümü, (b) Bitkisel örtü ve ignimbirit biriminin geçişini gösteren kazı aynası

Numunelerin endeks özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi (TS EN ISO 17892-4) ve Atterberg kıvam limiti deneyleri (TS EN ISO 17892-12) yapılmıştır. Elek analizi sonuçlarına göre malzeme %20.1 çakıl, %66.3 kum ve %13.6 ince dane (No.200 elekten geçen silt+kil) içermektedir. Atterberg deneylerinde numunenin likit ve plastik limitlerinin belirlenemediği, yani plastik özellik taşımadığı görülmüştür. Bu endeks özelliklerine göre atık ignimbirit, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre siltli kum (SM), AASHTO sınıflandırma sistemine göre A-1-b sınıfında yer almaktadır. Piknometre deneyi ile dane özgül ağırlığı Gs=2.62 olarak bulunmuştur. Malzemenin endeks ve kompaksiyon özellikleri ile zemin sınıfları Tablo 1'de topluca sunulmuştur.

Tablo 1. Atık ignimbiritin endeks özellikleri

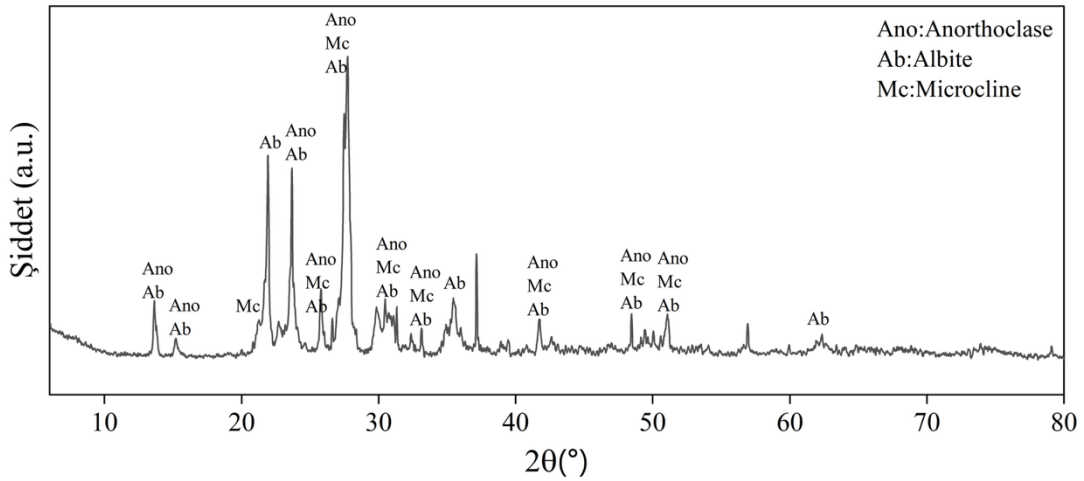
Çakıl (%)	Kum (%)	Silt+Kil (%)	w_L (%)	w_P (%)	Gs	γk_{maks} (kN/m³)	w_{opt} (%)	USCS	AASHTO
20.1	66.3	13.6	NP	NP	2.62	14.65	18.6	SM	A-1-b

Atık ignimbiritin ana oksit bileşimi ICP-OES yöntemiyle belirlenmiş ve Tablo 2'de sunulmuştur. Tablodan görüldüğü üzere malzeme ağırlıkça %65.1 SiO_2 ve %14.9 Al_2O_3 içermekte olup, toplam alkali oksit (Na_2O + K_2O) oranı %9.6 gibi yüksek bir değere ulaşmaktadır. Buna karşılık CaO (%1.2) ve MgO (%0.3) içeriklerinin düşük kalması, malzemenin silis ve alkali açısından zengin, ortaç-felsik bileşimli bir volkanik kaynaktan türediğini göstermektedir. Bu bileşim, Nemrut Volkanı kaynaklı Bitlis ignimbiritlerinin toplam alkali-silika sınıflamasına göre trakit bileşiminde olduğunu ve alkalin-subalkalin sınırında yer aldığını ortaya koyan literatürle uyumludur (Koralay vd., 2011; Çubukçu vd., 2012).

Tablo 2. Atık ignimbiritin ana oksit bileşimi (ICP-OES)

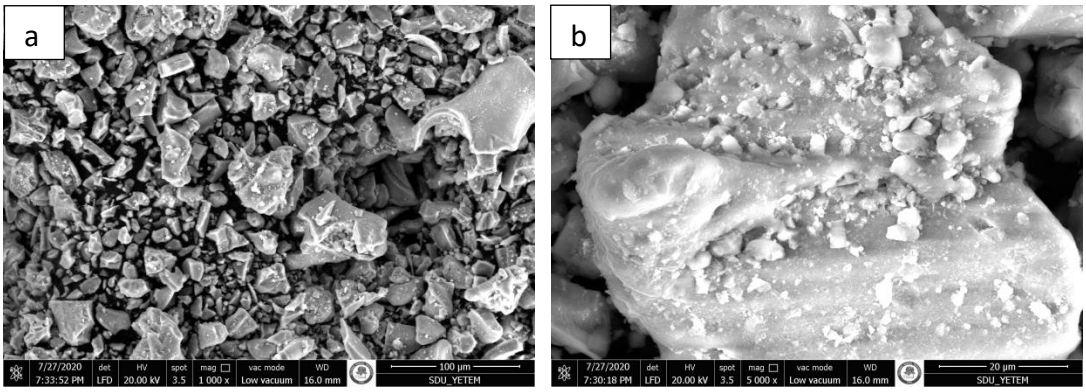
Oksitler	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	K_2O
Ağırlık (%)	65.12	14.91	4.78	1.23	5.11	0.27	4.45

CuKα radyasyonu (λ = 1.5406 Å) ile gerçekleştirilen X-ışını kırınımı (XRD) analizine ait difraktogramda (Şekil 3) baskın piklerin feldispat grubu minerallerine ait olduğu görülmekte olup, yarı-kantitatif değerlendirmede albit (%35.3), anortoklas (%31.5), mikroklin (%19.4) ve kalsiyumlu albit (%13.8) fazları belirlenmiştir. Baskın fazlardan biri olan anortoklasın bulunması, bu mineralin Nemrut volkanitlerinin ve bunların ürünü olan Bitlis ignimbiritlerinin karakteristik fenokristali olmasıyla tutarlıdır (Koralay vd., 2011; Çubukçu vd., 2012). Difraktogramda genleşen kil minerallerine (ör. smektit) ait karakteristik piklerin ve düşük açı bölgesinde belirgin bir tepenin gözlenmemesi, malzemenin geoteknik davranışı açısından belirleyicidir. Feldispat baskın ve kil içermeyen bu mineralojik yapı, Atterberg deneylerinde elde edilen plastik olmayan (NP) davranışı ve yaş CBR deneyinde ölçülen sıfır şişme (%0) sonucunu doğrudan desteklemektedir; zira zeminlerde plastisite ve şişme davranışı, büyük ölçüde smektit/montmorillonit gibi genleşebilen kil minerallerinin varlığıyla kontrol edilmektedir (Seed vd., 1964).



Şekil 3. Atık ignimbiritin XRD difraktogramı

Malzemenin dane morfolojisi ve yüzey dokusu, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir (Şekil 4) (Keleş, 2020). Şekil 4a'da 1000× büyütmede görülen genel görünümde, danelerin büyük ölçüde keskin kenarlı, köşeli ve prizmatik bir morfolojiye sahip olduğu; yuvarlaklaşmış danelerin ise oldukça sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu köşeli yapı, malzemenin kazı ve parçalanma sonucu açığa çıkan, aşınmaya maruz kalmamış taze bir granüler atık olmasıyla tutarlıdır. Şekil 4b'de 5000× büyütmede ise dane yüzeylerinin pürüzlü ve engebeli bir dokuya sahip olduğu, iri daneler üzerinde daha ince partiküllerin tutunduğu görülmektedir. XRD analizinde baskın faz olarak belirlenen feldispat minerallerinin köşeli kırılma özelliği, gözlenen bu köşeli ve pürüzlü morfoloji ile uyumludur.



Şekil 4. Atık ignimbiritin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri: (a) 1000× büyütmede genel dane morfolojisi, (b) 5000× büyütmede dane yüzey dokusu (Keleş, 2020)

2.2. Metot

Malzemenin KTŞ (2013) dolgu kriterlerine göre değerlendirilmesi amacıyla numuneler üzerinde standart Proktor (AASHTO T 99) ve yaş Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri (AASHTO T 193) gerçekleştirilmiştir. CBR deneyinde standart sıkıştırma enerjisiyle hazırlanan numuneler sürşarj yükü altında 4 gün süreyle su içerisinde bekletilmiş, bu süre boyunca şişme miktarları kaydedilmiş ve suya doygun numuneler üzerinde penetrasyon deneyi yapılmıştır.

Sıkıştırılmış malzemenin kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek amacıyla, standart Proktor sıkılığında ve optimum su muhtevasında hazırlanan 60×60×20 mm boyutlu numuneler üzerinde 25, 50 ve 100 kPa düşey gerilmeleri altında doğrudan kesme kutusu deneyleri (ASTM D3080) yapılmıştır. Elde edilen kayma mukavemeti parametreleri kullanılarak, Karayolu Tasarım El Kitabı'nda (2022) öngörülen yüksekliğe bağlı tip kesit şev eğimlerine sahip dolguların şev stabilitesi, iki boyutlu sonlu elemanlar yazılımı PLAXIS 2D ile mukavemet azaltma yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca, kohezyonun azaldığı bir senaryo için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneysel Bulguların KTŞ Kriterleri Açısından Değerlendirilmesi

Plastik olmayan atık ignimbirit, KTŞ'de uygun nitelikli kazı malzemesi için aranan $w_L \leq$ %60 ve $I_P \leq$ %35 koşullarını doğrudan sağlamaktadır. Standart Proktor deneyinde optimum su muhtevası wopt = %18.6, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise γkmaks = 1.493 t/m³ (14.65 kN/m³) olarak belirlenmiştir (Tablo 1). Bu değer, KTŞ'de aranan minimum 1.450 t/m^3 koşulunu sağlamakla birlikte sınıra yakındır. Bunun temel nedeni, ignimbiritin volkanik kökenli gözenekli (vesiküler) dane yapısıdır: Gs=2.62 alındığında sıkıştırılmış malzemenin boşluk oranı e ≈ 0.75 gibi görece yüksek bir değere karşılık gelmektedir. Nitekim aynı bölgedeki Bitlis ignimbiritleri üzerinde yapılan çalışmalarda, gözeneklilik arttıkça kuru birim hacim ağırlığının belirgin biçimde azaldığı ve malzemenin "çok düşük birim ağırlıklı" kaya sınıfında yer aldığı ortaya konmuştur (Koralay vd., 2011). Ayrıca KTŞ'nin dolgu malzemesi özelliklerini tanımlayan Tablo 206-1'i uyarınca, $I_P \leq 6$ ve CBR > 10 koşullarını sağlayan doğal cüruf ve tüflerde minimum kuru birim hacim ağırlığı şartı aranmamaktadır (KTŞ, 2013); incelenen malzeme her iki koşulu da sağladığından bu hüküm kapsamında da değerlendirilebilir.

Yaş CBR deneyinde numunelerin su içerisinde bekletilme süresince hiç şişmediği (şişme yüzdesi %0) belirlenmiş olup KTŞ'de dolgu zeminleri için istenen maksimum %3 şişme koşulu rahatlıkla sağlanmaktadır; bu sonuç malzemenin plastik olmayan yapısıyla tutarlıdır. Yaş CBR değeri %46 olarak bulunmuştur. KTŞ'de esnek üstyapılar için minimum yaş CBR ≥ %8 koşulu istenmektedir (KTŞ, 2013); incelenen malzeme bu koşulu yaklaşık 5.7 kat aşmaktadır. Sınırda kalan kuru birim hacim ağırlığına karşın elde edilen yüksek CBR değeri, malzemenin köşeli ve pürüzlü yüzeyli dane yapısıyla ilişkilidir. Şekil 4'de görülen bu yapı, sıkıştırma sonrası daneler arasında güçlü bir kenetlenme oluşturarak yüksek taşıma kapasitesini açıklamaktadır. Benzer biçimde, atık malzemelerin yol dolgusu olarak değerlendirildiği çalışmalarda da köşeli ve pürüzlü danelerin yüksek CBR değerleri verdiği belirtilmiştir (Korkmaz vd., 2023). Bu bulgular bir arada değerlendirildiğinde, atık ignimbiritin düşük birim ağırlıklı ancak yüksek taşıma kapasiteli bir dolgu malzemesi karakteri sergilediği görülmektedir (Tablo 3).

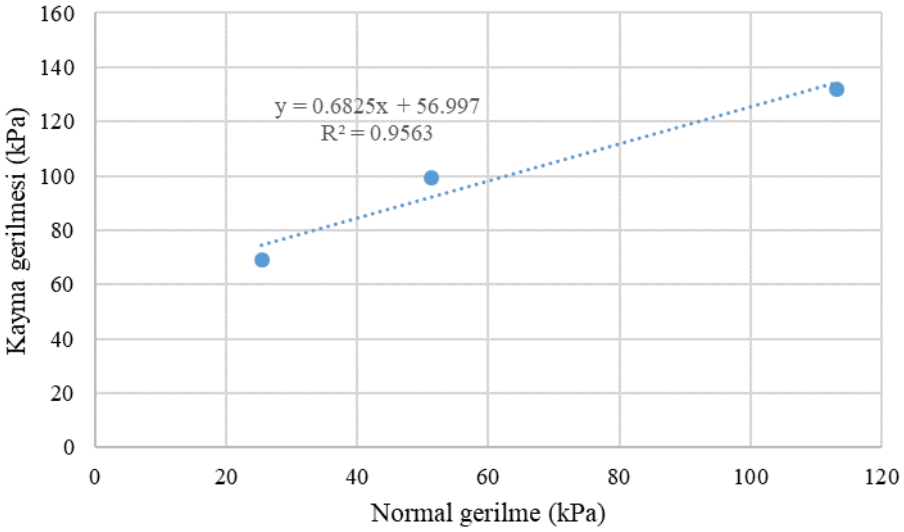
Tablo 3. Deney sonuçlarının KTŞ (2013) kriterlerine göre değerlendirilmesi

Özellik	KTŞ kriteri	Bulunan değer	Durum
Likit limit, w_L (%)	≤ 60	NP	Sağlıyor
Plastisite indeksi, I_P (%)	≤ 35	NP	Sağlıyor
γkmaks (t/m³)	≥ 1.450	1.493	Sağlıyor
Yaş CBR şişme (%)	≤ 3	0	Sağlıyor
Yaş CBR (%) (esnek üstyapı)	≥ 8	46	Sağlıyor

Tüf ve ignimbirit gibi zayıf kayaçlar ıslanma-kuruma etkisiyle parçalanma ve dayanım kaybına duyarlı olup, bu kayıpta boşluklara yerleşen ayrışma ürünü kil minerallerinin etkin rol oynadığı belirtilmektedir (Korkanç, 2007). Dolgu malzemesinde bu tür bir bozunma, danelerin ufalanarak ince dane oranının artmasına ve buna bağlı olarak taşıma gücü kaybı ile oturmalara yol açabilir. İncelenen malzemede XRD analizinde kil minerallerine ait piklerin gözlenmemesi, malzemenin plastik olmaması ve 4 gün süreyle suya doygun bırakılan numunelerde şişme gözlenmeksizin yüksek CBR değerinin (%46) elde edilmesi, malzemenin su ile teması karşısında duraylı olabileceğine işaret etmektedir.

3.2. Kayma Mukavemeti Parametreleri

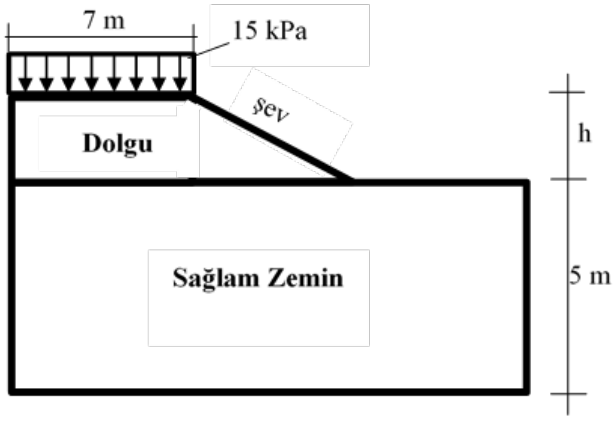
Doğrudan kesme deneylerinde 25, 50 ve 100 kPa nominal düşey gerilmeler altında pik kayma gerilmeleri sırasıyla 69.1 kPa, 99.4 kPa ve 132.1 kPa olarak ölçülmüştür. Pik noktalara karşılık gelen alan düzeltmeli normal gerilmeler kullanılarak çizilen Mohr-Coulomb kırılma zarfından kohezyon c = 57.0 kPa ve içsel sürtünme açısı φ = 34.3° elde edilmiştir (Şekil 5). Plastik olmayan bir malzeme için görece yüksek çıkan kohezyon değeri, optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kısmi doygun numunelerdeki emme (matrik süksiyon) katkısı ile Şekil 3'te görülen köşeli danelerin kenetlenmesinden kaynaklanan görünür kohezyondan ileri geldiği düşünülmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Lu ve Likos, 2013). Elde edilen içsel sürtünme açısı (φ = 34.3°), sıkıştırılmış granüler dolgu malzemeleri için literatürde raporlanan tipik değer aralığıyla (φ ≈ 28-29°) uyumludur (Karadoğan vd., 2020; Korkmaz vd., 2023).



Şekil 5. Mohr-Coulomb kırılma zarfı

3.3. Yol Dolgusunun Sayısal Modellenmesi

Karayolu Tasarım El Kitabı'nda (2022) dolgu şev eğimleri, 1.50 m'ye kadar olan dolgularda 4Y/1D, 1.50-5.00 m arası dolgularda 3Y/1D olarak öngörülmekte; 5.00 m'den yüksek dolgularda ise şev eğiminin malzeme cinsine göre belirlenmesi ve gerektiğinde stabilite analizleriyle doğrulanması istenmektedir. Bu kapsamda atık ignimbirit ile teşkil edilecek dolguların içsel stabilitesini denetlemek amacıyla, sağlam bir temel zemini üzerine oturan dört farklı kesit (1.5 m/4:1; 3.0 m/3:1; 5.0 m/3:1 ve 5 m üzeri durumu temsilen önerilen 6.0 m/3:2) iki boyutlu PLAXIS 2D yazılımı ile modellenmiştir. Tasarımda yol yüzeyine ağır trafik yüküne karşılık gelen q = 15 kPa düzgün yayılı yük etkitilmiş, yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden 1.5 m aşağıda alınmıştır. Modellemede kullanılan dolgu profili ve sınır koşulları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Sayısal modellemede kullanılan karayolu dolgu profili

Model parametreleri Tablo 4'te verilmiştir. Dolgu malzemesinin kayma mukavemeti parametreleri kesme kutusu deneylerinden alınmış; elastisite modülü ve Poisson oranı için benzer granüler dolgu malzemelerine yönelik literatürde önerilen değerler (E = 50 Mpa, ν = 0.30) seçilmiştir (Karadoğan vd., 2020). Mukavemet azaltma esaslı güvenlik katsayısının bu deformasyon parametrelerine duyarlılığı ihmal edilebilir düzeydedir.

Tablo 4. Sayısal modellemede tanımlanan malzeme parametreleri

Malzeme	E (MPa)	γ (kN/m³)	ν	c (kPa)	φ (°)	Ψ (°)
Dolgu (atık ignimbirit)	50	17.46	0.30	57.0 (10*)	34.3	4.3
Temel zemini	100	20	0.30	1	35	0

*Duyarlılık analizlerinde kullanılan kohezyon değeri

Modellemeler sonucunda her kesit için ΣMsf güvenlik katsayıları elde edilmiştir. ΣMsf güvenlik katsayısının 1.35'den büyük olması şev stabilitesi için yeterli kabul edilmektedir. Güvenlik katsayısı, kayma mukavemeti parametrelerinin kademeli olarak azaltılması esasına dayanmakta olup Eşitlik 1 ile tanımlanmaktadır.

$$c / c_r = \tan\varphi / \tan\varphi_r = \Sigma Msf \quad (1)$$

Analiz sonuçları Tablo 5'te özetlenmiştir. Ölçülen kayma mukavemeti parametreleriyle (c=57.0 kPa) güvenlik katsayıları 2.93-5.28 aralığında hesaplanmış olup en düşük değer 6.0 m yüksekliğindeki 3:2 şevli kesitte elde edilmiştir. Tüm kesitlerde ΣMsf ≥ 1.35 koşulu geniş bir marjla sağlanmaktadır. Kesitlerde hesaplanan maksimum toplam deplasmanların 4.0-12.6 mm aralığında kalması (en büyük değer 6.0 m'lik kesitte), seçilen elastisite modülünün gerçekçi mertebede oturma tahmini ürettiğini göstermektedir.

Görünür kohezyonun emmeden kaynaklanan bileşeninin büyük ölçüde kaybolduğu uç senaryoyu temsil eden duyarlılık analizlerinde (c = 10 kPa) güvenlik katsayıları 1.81-3.70 aralığında hesaplanmış; en kritik kesitte dahi ΣMsf=1.81>1.35 koşulu sağlanmıştır. Kohezyondaki %80'in üzerindeki azalmaya karşın tüm kesitlerin güvenli kalması, sonuçların dolgunun uzun süreli doygunlaşması ihtimaline karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir. Kohezyon değişiminin deplasmanlar üzerinde etkisi gözlenmemiş ve bu durum deplasmanların elastik parametrelerce kontrol edildiği beklentisiyle uyumludur.

Tablo 5. PLAXIS analizlerinde elde edilen güvenlik katsayıları (ΣMsf)

Dolgu yüksekliği (m)	Eğim (yatay/düşey)	ΣMsf (c = 57 kPa)	ΣMsf (c = 10 kPa)*
1.5	4:1	5.282	3.703
3.0	3:1	4.454	3.071
5.0	3:1	4.071	2.903
6.0	3:2	2.929	1.814

*Görünür kohezyonun emmeden kaynaklanan bileşeninin kaybolduğu uç senaryo (duyarlılık analizi)

4. SONUÇLAR

Bitlis Rahva düzlüğünde yapılaşma faaliyetleri sonucu açığa çıkan atık ignimbirit plastik olmayan SM (A-1-b) sınıfında granüler bir malzeme olup KTŞ'de uygun nitelikli kazı malzemesi için aranan likit limit, plastisite indeksi, minimum kuru birim hacim ağırlığı ve yaş CBR şişme kriterlerinin tamamını sağlamaktadır. Yaş CBR değeri (%46), esnek üstyapılar için aranan minimum koşulun oldukça üzerindedir. Malzemenin feldispat baskın, kil içermeyen mineralojik yapısı ile köşeli ve pürüzlü dane morfolojisi, sırasıyla plastik olmayan/şişmeyen davranışını ve yüksek taşıma kapasitesini açıklamaktadır.

Karayolu Tasarım El Kitabı'nda öngörülen tip kesit geometrileriyle yapılan sonlu elemanlar analizlerinde, ölçülen kayma mukavemeti parametreleriyle ΣMsf = 2.93-5.28,

kohezyonun 10 kPa'ya indirildiği duyarlılık senaryosunda ise ΣMsf = 1.81-3.70 elde edilmiştir. En kritik kesitte dahi ΣMsf ≥ 1.35 koşulunun geniş bir marjla sağlanması, incelenen atık ignimbiritin 6 m yüksekliğe kadarki dolgu kesitlerinde statik koşullar altında güvenle kullanılabileceğini ve sonuçların dolgunun uzun süreli doygunlaşması ihtimaline karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Atık ignimbiritin karayolu dolgularında değerlendirilmesi, hem düzensiz depolamadan kaynaklanan çevresel sorunların önüne geçilmesi hem de doğal agrega kaynaklarının korunması bakımından bölge için sürdürülebilir bir çözüm sunabilecektir. Bununla birlikte, deney sonuçları tek bir kazı sahasında yaklaşık 2 m derinlikten alınan, ignimbirit biriminin yüzeye yakın kesimini temsil eden numunelere dayanmaktadır. Bölgedeki ignimbiritlerin renk, kaynaklanma derecesi ve doku bakımından farklılaşan seviyeler hâlinde istiflendiği göz önüne alındığında, farklı konum ve derinliklerdeki kazılardan elde edilecek malzemenin dane dağılımı ve kompaksiyon özellikleri farklılık gösterebilir. Özellikle maksimum kuru birim hacim ağırlığının KTŞ sınır değerine yakın olması nedeniyle, malzemenin uygulamada kullanılacağı her kazı sahası için kontrol deneylerinin yapılması önerilmektedir.

Malzemenin uzun dönem performansının değerlendirilmesine yönelik olarak, Bitlis ignimbiritlerinin donma-çözülme etkisine duyarlı olduğu literatürde belirtildiğinden (Koralay vd., 2011), malzemenin Bitlis'in sert kış koşullarındaki dayanımının donma-çözülme deneyleriyle araştırılması önerilmektedir. Benzer şekilde, malzemenin tekrarlı ıslanma-kuruma çevrimleri altındaki davranışının kazı malzemesindeki iri parçalar üzerinde yapılacak suda dağılmaya karşı duraylılık deneyleri (ASTM D4644), suya doygunlaşma durumundaki çökme potansiyelinin ise ödometre deneyleri (ASTM D4546) ile belirlenmesi önerilmektedir. Bölgenin yüksek deprem tehlikesi göz önünde bulundurularak, dolgu kesitlerinin deprem etkisi altındaki stabilitesinin psödo-statik veya dinamik analizlerle değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, atık malzemenin dolgu olarak kullanımının çevresel açıdan güvenli olduğunun doğrulanması amacıyla sızıntı karakterizasyonunun yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Acar, M.C. (2022), "Esnek Kaplamalı yollarda Kayseri volkanik cüruflarının dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 37, Sayı 1, 47-56.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2021). *Standard method of test for moisture-density relations of soils using a 2.5-kg (5.5-lb) rammer and a 305-mm (12-in.) drop* (AASHTO T 99-21).

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *Standard method of test for the California Bearing Ratio* (AASHTO T 193-20).

Arınç, K. (2011), "Ulaşım Coğrafyası Bakımından Bir İnceleme: Rahva Düzlüğü ve Çevresi", Doğu Coğrafya Dergisi, Cilt 6, Sayı 3, 25-46.

ASTM International. (2004*). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions* (ASTM D3080-04).

ASTM International. (2014). *Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of soils* (ASTM D4546-14).

ASTM International. (2016). *Standard test method for slake durability of shales and other similar weak rocks* (ASTM D4644-16).

Bamigboye, G.O., Bassey, D.E., Olukanni, D.O., Ngene, B.U., Adegoke, D., Odetoyan, A.O., Kareem, M.A., Enabulele, D.O. ve Nworgu, A.T. (2021), "Waste Materials in Highway Applications: An Overview on Generation and Utilization Implications on Sustainability", Journal of Cleaner Production, Vol 283, 124581.

Bozkurt, N. ve Karaca, E.O. (2023), "Bitlis Yöresi İgnimbiritleri ile Oluşturulan Numunelerin Dayanım Sonuçlarının Tespitinde Bulanık Mantık Yönteminin Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 6, Sayı 3, 1834-1850.

Bozkurt, N. ve Mutlu, M. (2025), "Bitlis Yöresi (Ahlat ve Güroymak) İgnimbiritlerinin İnşaat Mühendisliği Açısından Karşılaştırmalı Analizi", Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi, Cilt 7, Sayı 2, 75-81.

Çimen, Ö., Günaydın, H.İ. ve Keskin, S.N. (2017), "Yüksek Plastisiteli Kil Zeminin Mühendislik Özelliklerine İnşaat Atıklarının Etkisi", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 23, Sayı 3, 250-253.

Çubukçu, H.E., Ulusoy, İ., Ersoy, O., Aydar, E., Şen, E., Gourgaud, A. ve Guillou, H. (2012), "Mt. Nemrut Volcano (Eastern Turkey): Temporal Petrological Evolution", Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol 209-210, 33-60.

Dereli, B., Günaydın, H.İ. ve Çimen, Ö. (2026), "Sustainable Stabilization of Kaolin Clay Using Lime and Ignimbritic Volcanic Tuff Waste: Mechanical and Microstructural Performance", Sustainability, Vol 18(13), 6438.

Dinçer, İ., Özvan, A., Akın, M., Tapan, M. ve Oyan, V. (2012), "İgnimbiritlerin Kapiler Su Emme Potansiyellerinin Değerlendirilmesi: Ahlat Taşı Örneği", Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 17, Sayı 2, 64-71.

Erdal, M. ve Şimşek, O. (2011), "Ahlat Taşı (İgnimbrit) Atıklarının Taş Unu Olarak Beton İçinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Politeknik Dergisi, Cilt 14, Sayı 3, 173-177.

Fredlund, D.G. ve Rahardjo, H. (1993), Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons, New York.

Güneş, C. (2025), "Nemrut Kalderası'nın Kuzey Krater Çeperinde (Tatvan, Bitlis) Landsat-8 Görüntüleri Üzerinden Tespit Edilen Kil ve Demirli Mineral Anomalilerinin Saha Araştırmaları", GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies, Vol 8(1), 157-165.

Karadoğan, Ü., Çevikbilen, G., ve Teymür, B. (2020), "Deniz Dibi Tarama Malzemelerinin Yol Dolgusu Olarak Kullanımı", Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 25, Sayı 2, 1059-1070.

Karaoğlu, Ö., Özdemir, Y., Tolluoğlu, A.Ü., Karabıyıkoğlu, M., Köse, O. ve Froger, J.L. (2005), "Stratigraphy of the Volcanic Products around Nemrut Caldera: Implications for Reconstruction of the Caldera Formation", Turkish Journal of Earth Sciences, Vol 14(2), 123-143.

Karayolları Teknik Şartnamesi (2013), Yol Altyapıları, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.

Karayolu Tasarım El Kitabı (2022), Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.

Keleş, E. (2020), Bitlis Pomzası, Bitlis Volkanik Tüfü, Afşin-Elbistan Uçucu Külü ve Kirecin Yüksek Plastisiteli Kile Olan Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Koralay, T., Özkul, M., Kumsar, H., Çelik, S.B. ve Pektaş, K. (2011), "The Effect of Welding Degree on Geotechnical Properties of an Ignimbrite Flow Unit: The Bitlis Castle Case (Eastern Turkey)", Environmental Earth Sciences, Vol 64(3), 869-881.

Korkanç, M. (2007), "İgnimbiritlerin Jeomekanik Özelliklerinin Yapı Taşı Olarak Kullanımına Etkisi: Nevşehir Taşı", Jeoloji Mühendisliği Dergisi, Cilt 31, Sayı 1, 49-60.

Korkmaz, B., Taştan, Ş., Dayıoğlu, A.Y. ve Hatipoğlu, M. (2023), "Geri Dönüştürülebilir Atık Malzemelerin Geoteknik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 39, Sayı 1, 1-12.

Lu, N. ve Likos, W.J. (2013), "Origin of Cohesion and Its Dependence on Saturation for Granular Media", Poromechanics V: Proceedings of the Fifth Biot Conference on Poromechanics, ASCE, Reston, VA, 1669-1675.

Özsoy, M., Fırat, S., Işık, N.S. ve Unutmaz, B. (2023), "Çelik Cürufu Kullanılan Yol Katmanlarında Geosentetik Tabaka Konumunun Etkisinin Belirlenmesi", Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi, Cilt 2, Sayı 2, 123-130.

Seed, H.B., Woodward, R.J. ve Lundgren, R. (1964), "Clay Mineralogical Aspects of the Atterberg Limits", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol 90(4), 107-131.

Şimşek, O. ve Erdal, M. (2004), "Ahlat Taşının (İgnimbrit) Bazı Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 17, Sayı 4, 71-78.

Türk Standartları Enstitüsü (TSE). (2016). *Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri -Bölüm 4: Tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi* (TS EN ISO 17892-4).

Türk Standartları Enstitüsü (TSE). (2017). *Geoteknik inceleme ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 12: Likit ve plastik limitlerin tayini* (TS EN ISO 17892-12).

Ulusoy, İ., Çubukçu, H.E., Aydar, E., Labazuy, P., Ersoy, O., Şen, E. ve Gourgaud, A. (2012), "Volcanological Evolution and Caldera Forming Eruptions of Mt. Nemrut (Eastern Turkey)", Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol 245-246, 21-39.

Zhang, J., Gu, F. ve Zhang, Y. (2019), "Use of Building-Related Construction and Demolition Wastes in Highway Embankment: Laboratory and Field Evaluations", Journal of Cleaner Production, Vol 230, 1051-1060.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
c	Kohezyon	wL	Likit limit
c_r	Azaltılmış kohezyon	wP	Plastik limit
CBR	Kaliforniya taşıma oranı	wopt	Optimum su muhtevası
E	Elastisite modülü	γ	Birim hacim ağırlık
e	Boşluk oranı	γkmaks	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
Gs	Dane özgül ağırlığı	ν	Poisson oranı
h	Dolgu yüksekliği	φ	İçsel sürtünme açısı
IP	Plastisite indeksi	φ_r	Azaltılmış içsel sürtünme açısı
q	Düzgün yayılı yük	Ψ	Dilatasyon açısı
		ΣMsf	Güvenlik katsayısı (PLAXIS)