



Dane Çapı Dağılımının CBR (%) Değerlerine Etkisinin DeneySEL Olarak Araştırılması *Experimental Investigation of the Effect of Grain Size Distribution on CBR (%) Values*

Murat Gülen^{1*}, Suat Akbulut², Yaşar Kayan³

¹ Siirt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, murat.gulen@siirt.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4143-9266>

² Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, sakbulut@yildiz.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5266-0543>

³ Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, yasarkayan@siirt.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5106-6072>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 28 Ocak 2025
Revizyon 15 Nisan 2025
Kabul 13 Mayıs 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Dane çapı dağılımı,
CBR (%),
Şişme,
Likit limit,
Kil oranı

ÖZ

İnşaat mühendisliği uygulamalarında, farklı zemin türleri dolgu malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu malzemelerin fiziksel ve mühendislik özellikleri, kullanım amacını belirleyen başlıca parametrelerdir. Yapıların performansı ve stabilitesi, dolgu malzemesine ait tasarım parametrelerinin ve bu parametrelerin yapının hizmet süresi boyunca göstereceği değişimin doğru bir şekilde öngörülmesine bağlıdır. Bu çalışma, zeminlerin şişme miktarının, likit limitinin, ortalama dane çapının ve kil oranının California taşıma oranı (CBR %) üzerindeki etkilerini deneySEL olarak ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, ince daneli ve düşük plastisiteli bir kile, farklı oranlarda kum ve çakıl ilave edilerek, farklı dane çapı dağılımı ve kıvam özelliklerine sahip yedi zemin numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, optimum su muhtevası ve maksimum birim hacim ağırlıkta sıkıştırılarak hem kuru hem de 96 saat suda bekletilerek suya doymun hale getirildikten sonra CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Her iki koşulda elde edilen CBR (%) değerleri karşılaştırılmış ve Δ CBR (%) değişimleri hesaplanmıştır. DeneySEL veriler, CBR (%) değerlerindeki değişimin şişme miktarı, likit limit, ortalama dane çapı ve kil oranına bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle şişme miktarına bağlı olarak CBR (%) değerlerinde %25 ile %63 arasında azalma gözlemlenmiştir. Bu bulgular, zeminlerin şişme potansiyelinin CBR (%) üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 January 2025
Received in revised form 15 April 2025
Accepted 13 May 2025
Available online 30 Haziran 2025

Keywords:

Grain size distribution
CBR (%)
Swelling
Liquid limit
Clay content

ABSTRACT

Various types of soil are widely used as fill materials in civil engineering applications. The physical and engineering properties of these materials are the primary parameters that determine their suitability for specific purposes. The performance and stability of structures depend largely on the design parameters of the fill material and the accurate prediction of how these parameters may change over the life of the structure. This study aims to experimentally investigate the effects of swelling potential, liquid limit, mean grain size and clay content of soils on the California bearing ratio (CBR %). For this purpose, seven different soil samples were prepared by adding different proportions of sand and gravel to a fine-grained, low plasticity kaolinite clay, resulting in soils with different grain size distributions and consistency properties. The samples were compacted to their optimum moisture content and maximum dry unit weight and then subjected to CBR tests under both dry and water-saturated conditions (after 96 hours of soaking). The CBR (%) values obtained from both conditions were compared and the Δ CBR (%) changes were calculated. The experimental findings showed that the change in CBR (%) values was significantly influenced by the swelling amount, liquid limit, mean grain size, and clay content. In particular, swelling caused a decrease in CBR (%) values ranging from 25% to 63%. These results indicate that the swelling potential of soils has a significant effect on their CBR (%) performance.

DOI: 10.24012/dumf.1628662

* Sorumlu Yazar

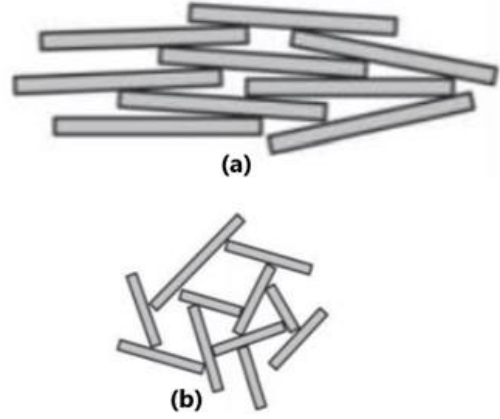
Giriş

Farklı mühendislik yapıları üzerinde inşa edildikleri zeminlerin özelliklerinden etkilenir [1], [2]. Dolgu malzemesi olarak kullanılan zeminler amaca uygun olarak farklı özelliklere ve düşük maliyetli olduğundan yol altyapı dolgusunda, baraj kil çekirdeklerinde, katı atık depolarında vb. uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu tür yapıların stabilitesini sağlamak ve hizmet ömürleri boyunca yapısal hasarı minimize etmek için zemin özelliklerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekir [3]-[7]. Zeminlerin kullanım amacına uygun olup olmadığına karar vermek için fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özellikleri dikkate alınır [8]-[13]. Amaca uygun zeminlerin kullanımı oturmaları, hacimsel değişimleri, taşıma kapasitesi kaybını ve stabilite sorunlarını önemli miktarda azaltır [14]. Özellikle dolgu malzemesi olarak kullanılan zeminlerin dane çapı dağılımı ve şişme özelliğine sahip ince dane oranı önemlidir [15]-[17]. Su ile temas ettiklerinde hacimlerinde artış gözlenen zeminler, şişen killer olarak tanımlanmaktadır. Bu hacim değişimi üstteki hafif yapılara ve kazı destek sistemlerine zarar vererek maddi kayıplara neden olur. Bu tür zeminler dünyanın farklı bölgelerinde olsa da yoğunlukla ABD, Çin, Hindistan, Güney Afrika, Türkiye, Avustralya vb. ülkelerde sıklıkla görülür [18]-[21]. Jones ve Holtz [22], ABD’de yaptıkları bir çalışmada şişen zeminlerin farklı mühendislik yapılarında yılda 9×10^9 dolar maddi kayıplara neden olduğunu rapor etmiştir.

Plakalı bir yapıya sahip olan killerin özellikleri, bu plakalı yapının genişlik, uzunluk ve kalınlıklarına göre farklılık göstermektedir. Özellikle killerin toplam yüzey alanı, killerin davranışını belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Bu zeminlerin su ile etkileşimi ve suyu yüzeylerinde tutma potansiyeli, hacminin artmasına neden olur. Bu durum şişme olarak adlandırılır. Kilin mineral yapısı, su muhtevası, plakalı yapının dizilimi ve boyutları şişme davranışına etki eden ana faktörlerdendir [23]. Killer genellikle kaolin, illit ve smektit grubu killer olmak üzere üç ana gruba incelenir [24], [25]. Bu gruplandırmada, şişme potansiyeli en düşük olan ve diğer iki gruba oranla daha kararlı bir davranış gösteren killer kaolin grubu killeri oluştururken; en kararsız kil grubu ise smektit grubu killerdir [23], [26]. Buna ek olarak killer şişme potansiyellerine göre likit limiti (LL%) < 50 olanlar az şişen killer, $50 < LL(\%) < 60$ olanlar orta şişen killer ve $LL(\%) > 60$ olan killer yüksek şişen killer olarak adlandırılır [27].

Farklı araştırmacılar, killerdeki şişme miktarlarının LL(%), plastik limit (PL), plastisite indisi (PI), kil oranı (KO), kation değişim kapasitesine ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak hesaplanabileceğini gösteren farklı ampirik eşitlikler önermişlerdir [28]-[31].

Özellikle şişme davranışı gösteren killerin yatay tabakalanma yapısı (flokül yapı) bozulur ve dağınık bir yapı (dispersed) ortaya çıkar. Bu durum kilin hacminde bir artışa neden olur. Hacminde meydana gelen bu artış, zemin iskelet yapısını bozarak zeminlerin fiziksel ve mühendislik özellikleri önemli derece değiştirir (Şekil 1).



Şekil 1. Killerin dizilimi ve yapısı a) tabakalı b) dağınık [35]

İçerisinde belirli bir oranda şişen kil içeren zeminlerin geçirgenliği, mukavemeti ve sıkışabilirliği şişme davranışından önemli derece etkilenir [32]-[34]. Gülen vd. [36], farklı dane çapı dağılımlarına ve farklı oranlarda kil içeren 12 zemin numunesinin CBR(%) değerini belirlemişlerdir. Bu çalışmalarda zeminlerdeki şişme miktarının LL (%) artışı ile arttığını; ortalama dane çapı (D_{50}) artışına bağlı olarak azaldığını ifade edilmiştir. Yıldırım [23], kıvam limitleri ve dane çapı dağılımlarını dikkate alarak regresyon analizi ile CBR(%) değerini hesaplanabilirliğini araştırmıştır. Optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde hazırlanan numuneler için CBR(%) değerleri korelasyon katsayı (R^2) 0.95 doğrulukta tahmin edilmiştir. Şeker [37], CBR(%) değerinin zemin özelliklerine bağlı olduğunu ifade ederek farklı dane çapı dağılımlarının CBR(%) değerine etkisini incelemiştir. Dane boyutunun ve kuru birim hacim ağırlık değerinin artışı CBR(%) değerlerinin artmasına neden olurken, su muhtevasındaki artış CBR(%) değerinin azalmasına neden olduğu rapor edilmiştir. Taşkıran [38], ince taneli zeminlerin CBR(%) değerini etkileyen parametreleri yapay sinir ağlarını kullanarak araştırmıştır. Çalışmalarında, CBR(%) değerlerini etkileyen en önemli parametrenin zeminin kuru birim hacim ağırlığı olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca plastisite indisi, optimum su muhtevası ve iri dane oranının da CBR(%) değerini etkileyen diğer parametreler olduğunu belirtmiştir. Ramasubbarao ve Sivasankar [39], CBR(%) değerlerine etki eden parametreleri regresyon analizleri ile incelemişlerdir. Analizler sonucunda CBR(%) değerini etkileyen en önemli parametrenin kuru birim hacim ağırlık olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca plastik limit, likit limit, ince dane oranı ve optimum su muhtevasının da CBR(%) değerlerini etkileyen diğer parametreler olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışma, şişme davranışı ile bazı indeks özelliklerinin CBR(%) üzerindeki etkisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, ince daneli ve düşük plastisiteli kaolin grubu bir kile, farklı oranlarda kum ve çakıl ilave edilerek, farklı dane çapı dağılımlarına sahip yedi zemin numunesi hazırlanmıştır. Kuru ve suya doygun olarak hazırlanan bu numuneler CBR deneylerine tabi tutulmuş ve CBR(%) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen deneysel veriler doğrultusunda, şişme miktarının, D_{50} 'nin ve LL(%)'nin $\Delta CBR(\%)$ değerlerine etkisi araştırılmıştır.

Deneysel Çalışmalar

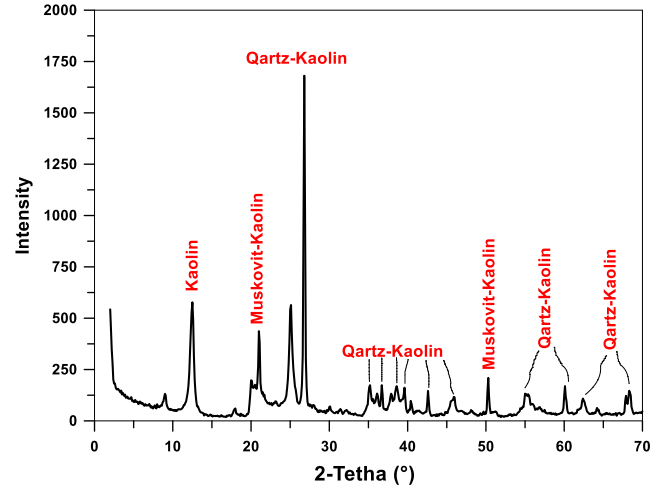
Zeminlerin fiziksel özellikleri

Bu çalışmada kapsamında ince daneli, kohezyonlu ve düşük plastisiteli bir kile farklı oranlarda kum ve çakıl eklenerek farklı dane çapı dağılımlarına sahip yedi farklı zemin numunesi elde edilmiştir. Bu zeminlerin isimlendirilmesinde, kil oranı en yüksek ve %100 ince daneli olan numune S1 olarak adlandırılmıştır. Kile farklı oranlarda iri daneli malzeme eklenmesiyle ince dane oranı kademeli olarak azaltılarak elde edilen diğer karışımlar ise sırasıyla S2, S3, S4, S5, S6 ve S7 şeklinde tanımlanmıştır. Bu zeminlerin dane çapı dağılımını belirlemek için özgül ağırlık (Gs), hidrometre, elek analizi; kıvam limitlerini belirlemek için LL(%) ve plastik limit (PL); optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) değerlerini belirlemek için modifiye kompaksiyon deneyleri Yıldız Teknik Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



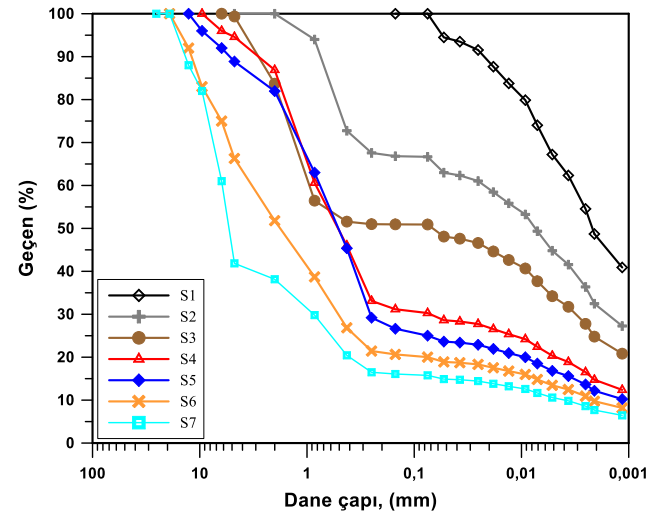
Şekil 2. Deneysel çalışmalara ait görseller

Ayrıca kilin kimyasal yapısını belirlemek için X-ışını kırınımı (X-ray Diffraction, XRD) analizi yaptırılmış ve sonuçları Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. X-ışını kırınımı analiz sonucu

Modifiye kompaksiyon ve CBR deneyleri için sıkıştırma aşamaları ASTM D698 uygun olarak maksimum dane çapı 19,1 mm dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan zeminlere ait dane çapı dağılımları Şekil 4'te; ilgili standartlarla belirlenen fiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre söz konusu zeminlerden S1, S2 ve S3 CL; S4, S5 ve S6 SC ve S7 ise GC zemin sınıfında yer almaktadır. Amerikan Eyalet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği (AASHTO) sınıflandırmasına göre ise S1, S2 ve S3 A-6; S4, S5 ve S6 A-2-6 ve S7 A-2-4 sınıfında değerlendirilmektedir.



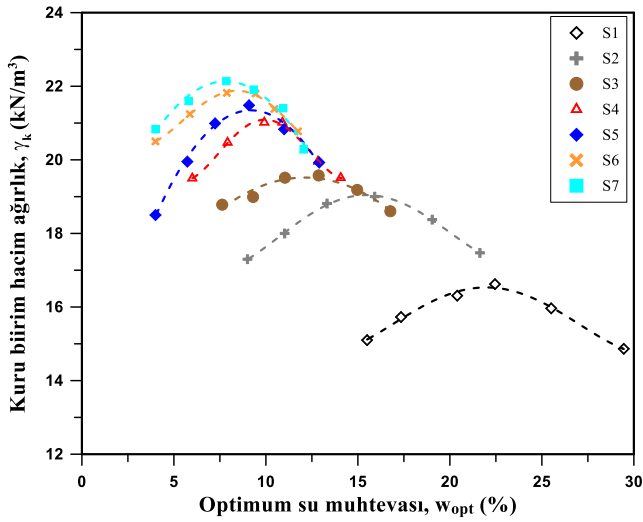
Şekil 4. Zeminler için dane çapı dağılımları

Tablo 1. Zeminlerin fiziksel özellikleri

Özellikler	Numuneler						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Özgül ağırlık, Gs	2,65	2,72	2,75	2,76	2,78	2,78	2,79
D ₅₀ (mm)	0,002	0,007	0,06	0,50	0,50	1,70	5,20
Çakıl oranı, (%)	-	-	-	5,5	11,1	33,7	58,2
Kum oranı, (%)	-	33,40	49,10	64,20	63,9	46,3	25,8
Silt oranı, (%)	51,00	34,60	26,90	16,30	13,0	10,5	8,0

Kil oranı, (%)	49,00	32,00	24,00	14,00	12,0	9,5	7,0
LL(%)	40,00	37,00	34,70	30,50	28,5	27,5	25,0
PL(%)	25,00	23,00	21,20	17,50	16,5	16,0	15,0
PI(%)	15,00	14,00	13,50	13,00	12,00	11,50	10
Zemin sınıfı (USCS)	CL	CL	CL	SC	SC	SC	GC
Zemin sınıfı (AASHTO)	A-6	A-6	A-6	A-2-6	A-2-6	A-2-6	A-2-4

Maksimum dane çapı 19,1 mm'den küçük olan zeminler için gerçekleştirilen modifiye Proctor deneyine ait kompaksiyon eğrileri Şekil 5'te sunulmuştur. Zeminlerin dane çapı dağılımları ve D_{50} değerleri dikkate alındığında, kil ve silt oranındaki artış ile kum ve çakıl oranındaki azalma, optimum su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlık üzerinde belirgin etkiler meydana getirdiği açıkça görülmektedir. Dane boyutu küçüldükçe, spesifik yüzey alanındaki artış ve ince daneli zeminlerin su tutma kapasitesinin yükselmesi, optimum su muhtevasının artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte,

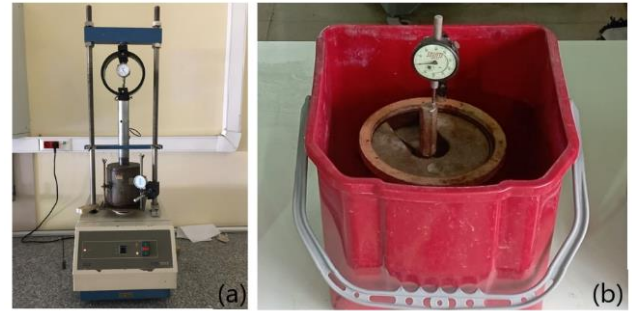


Şekil 5. Zeminler için modifiye kompaksiyon eğrileri

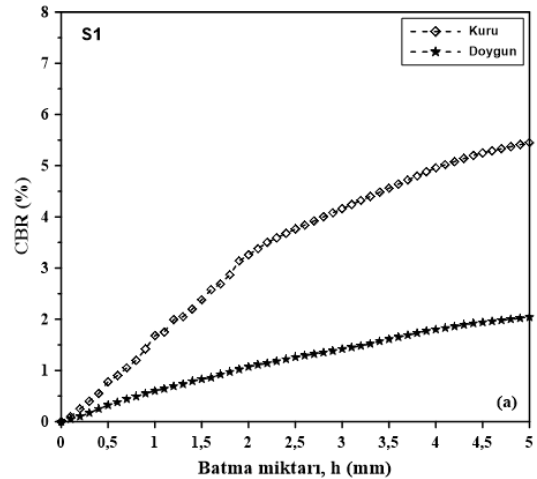
CBR deneyleri için Şekil 5'teki optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri dikkate alınarak hazırlanmıştır. CBR kalıbında sıkıştırılan numuneler 4,5 kg'lık bir yük altında 96 saat suda bekletilmeden eksenel yüklemeye tabi tutulmuştur (Şekil 6a). Bu deneylerden elde edilen CBR(%) değerleri kuru durum olarak ifade edilmiştir. Aynı deney prosedüründe optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan numuneler ASTM D1883-21'e göre 4,5 kg'lık bir yük altında 96 saat boyunca su içerisinde bekletilerek meydana gelen oturma ve şişme miktarları ölçülmüştür (6b). Suya doymuş numuneler bu süre sonunda sudan çıkartılarak eksenel yüklemeye tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen yük-batma eğrileri dikkate alınarak CBR (%) değerleri hesaplanmıştır. Her bir numune, hem üst hem de alt yüzeylerinden eksenel yüklemeye tabi tutulmuş ve bu yüzeylere ait yük-batma eğrileri elde edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda, alt yüzeye ait CBR (%) değerlerinin genellikle üst yüzeye göre yaklaşık %20 daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu farklılık, 96 saat suda

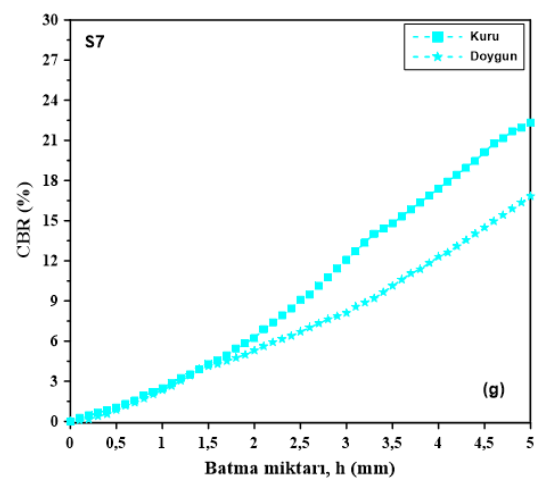
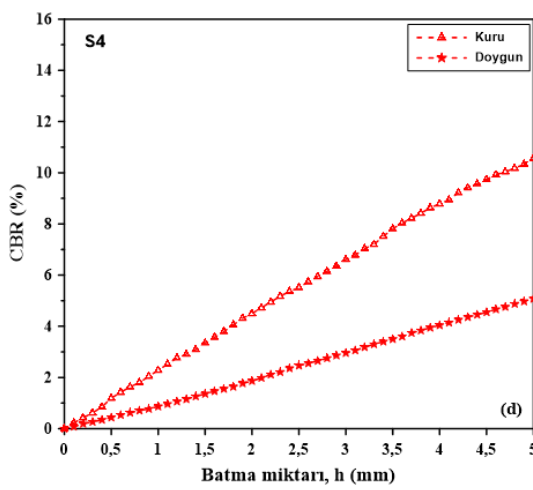
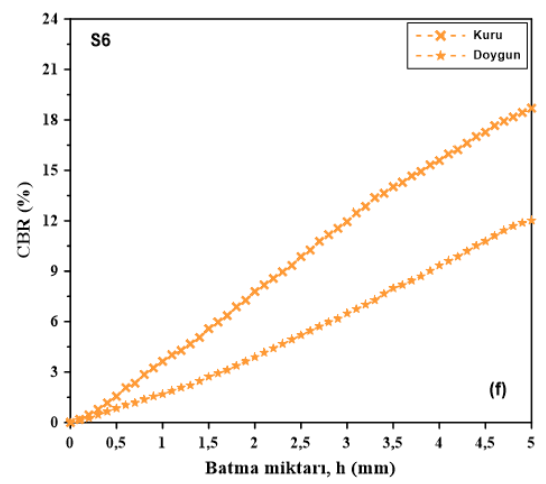
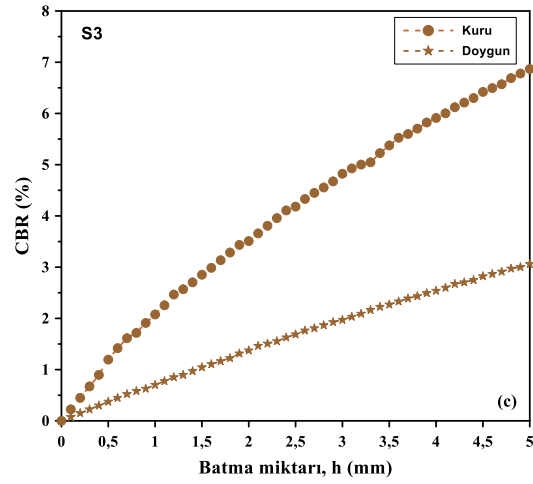
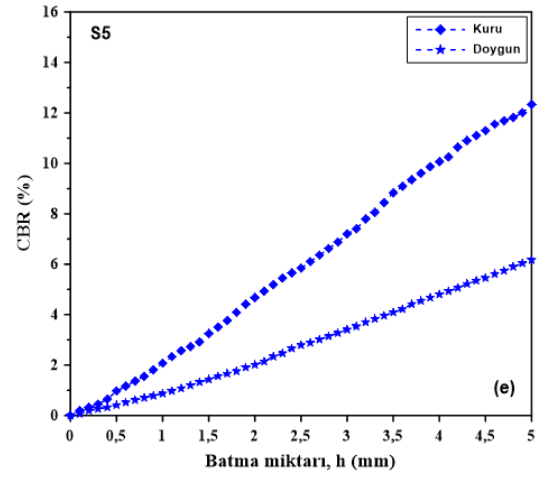
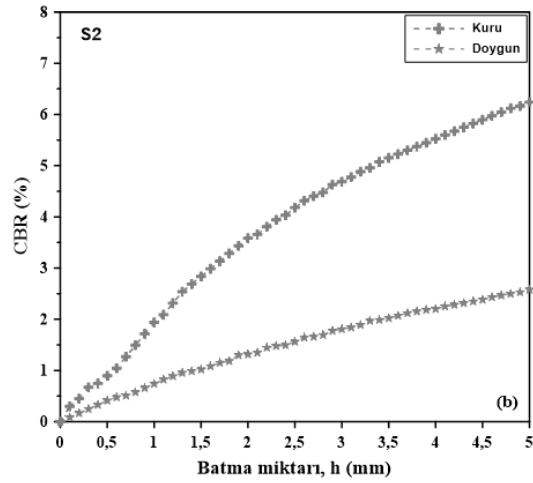
dane boyutunun küçülmesi boşluk oranını artırmakta ve bu durum, kuru birim hacim ağırlığın azalmasına yol açmaktadır. Ancak kum ve çakıl oranı yüksek olan S5, S6 ve S7 numunelerine, ağırlıkça %15–25 oranında ince daneli zemin ilave edilmesi, boşluk hacmini minimize ederek daha etkin bir sıkışma sağlamıştır. Bu durum, kuru birim hacim ağırlığın artmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, ince ve iri taneli zeminlerin dengeli oranlarda karıştırılması, sıkışabilirlik ve mühendislik özellikleri üzerinde olumlu etkiler yaratabilmektedir.

bekletilen numunelerde alt yüzeyin şişme yönünden kısıtlanması nedeniyle, bu bölgede meydana gelen şişme kaynaklı zemin yapısındaki değişimlerinin üst yüzeye kıyasla daha sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır. Her bir numuneye ait nihai CBR (%) değeri ise, alt ve üst yüzeylerden elde edilen CBR değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, yükleme koşullarındaki olası asimetrisi dengeleyerek daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 6. CBR deneylerine ait detaylar a) eksenel yüklemeye b) suya doyurma aşaması





Şekil 7. CBR(%) sonuçları a)S1 b)S2 c)S3 d)S4 e)S5 f)S6 g)S7

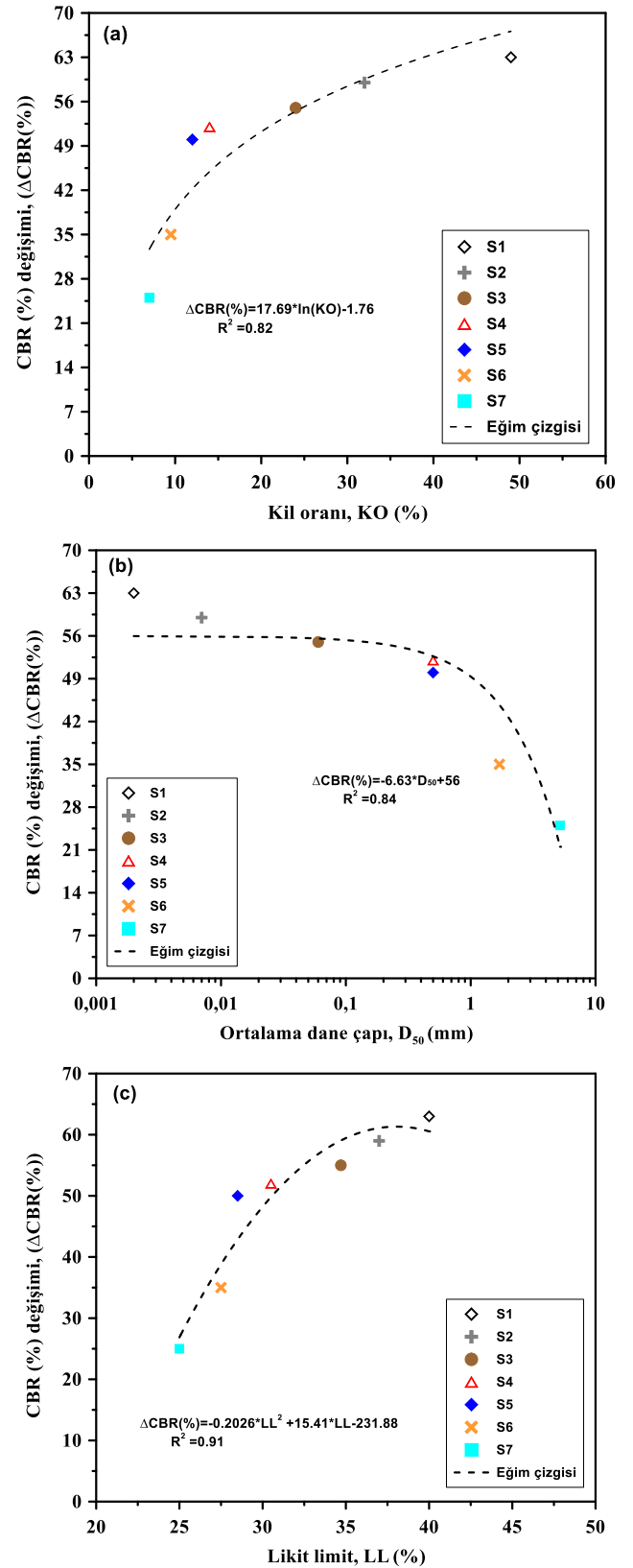
Bulgular ve Tartışma

Zeminlerin CBR(%) değerlerini etkileyen fiziksel ve indeks özellikler üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Gülen vd. [36], farklı dane çapı dağılımlarına ve mineralojik bileşimlere sahip zeminlerde donma-çözülme etkisinin CBR değerlerine etkisini araştırarak, bu değişkenlerin zemin davranışında önemli rol oynadığını göstermiştir. Şeker [37], indeks özelliklerin CBR(%) değerine etkisini ampirik modellerle değerlendirmiş ve LL (%), PI(%) gibi özelliklerin anlamlı sonuçlar verdiğini ifade etmiştir. Taşkiran [38] ile Ramasubbarao ve Sivasankar [39] yapay zeka ve regresyon modelleri kullanarak CBR(%) değerlerinin tahminine odaklanmıştır. Ancak bu çalışmaların önemli bir kısmı, şişme potansiyeline sahip zeminlerin CBR (%) değerleri üzerindeki etkisini doğrudan incelememiş; zeminlerin şişme davranışı ile taşıma kapasitesi arasında kurulabilecek nedensel ilişkilere yeterince odaklanmamış ya da bu etkileşimi yalnızca dolaylı parametreler üzerinden değerlendirmekle sınırlı kalmıştır.

Dane çapı dağılımının ve LL(%)'nin Δ CBR(%) değişimine etkisi

Zeminlerin dane çapı dağılımı ve LL(%) değerleri, Δ CBR (%) üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Granüler zemin oranı yüksek ve düşük LL(%) değerlerine sahip zeminlerde, suya duyarlılığın azalması CBR(%) değerlerinin artmasını sağlamaktadır. Buna karşılık, kil oranı ve LL(%) değeri yüksek olan zeminlerde, su ile etkileşim sonucunda ortaya çıkan şişme davranışı, zemin yapısının bozulmasına ve dolayısıyla dayanım kaybına neden olmaktadır.

Suya doymun zeminlerin yaş CBR(%) değerleri, zeminin taşıma gücünün en düşük olduğu durumu ifade eder ve tasarımlarda güvenli tarafta kalabilmek için bu değer dikkate alınır [40]. Aynı şartlarda hazırlanan numuneler kuru ve suya doymun su muhtevalarında CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Bu numuneler için hesaplanan CBR(%) değerleri arasında ciddi farklılıklar gözlemlenmiştir. Şekil 8'de her bir numune için kuru ve doymun durum için hesaplanan CBR(%) değerlerindeki değişim (Δ CBR) KO, D_{50} ve LL (%)'ye bağlı olarak sunulmuştur. Veriler incelendiğinde maksimum azalma kil oranı en yüksek olan S1 numunesinde %63; minimum azalma ise kil oranı en düşük olan S7 numunesinde %25'tir. Δ CBR(%) değerlerindeki %25–%63 aralığındaki değişim, Microsoft Excel yazılımı kullanılarak lineer, logaritmik, üssel ve polinomsal tekli regresyon analizleri ile incelenmiş ve en yüksek determinasyon katsayısını (R^2) sağlayan regresyon denklemi ise ilgili şekil üzerinde sunulmuştur. Buna ek olarak çoklu regression analizleri ile CBR (%) değişiminin KO(%), D_{50} ve LL(%)'ye bağlı değişimi hesaplanmış ve Eşitlik 1'de ifade edilmiştir. Bu analizde R^2 değeri 0.95 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar literatürde bu konuda yapılan çalışmalarla uyumludur [37]-[39].



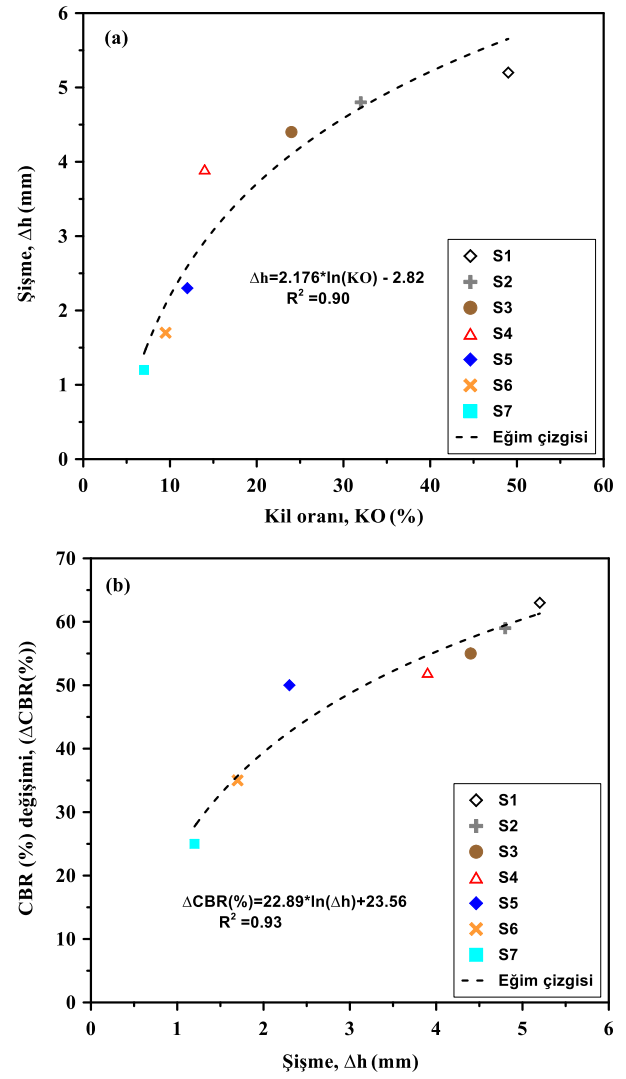
Şekil 8. Δ CBR(%) değişimi a) Δ CBR (%) ve KO(%) b) Δ CBR(%) ve D_{50} c) Δ CBR(%) ve LL(%)

$$\Delta$$
CBR (%) = -4,22 D_{50} + 0.0065KO(%) + 0,987LL(%) + 20,36 (1)

Şişmenin $\Delta CBR(\%)$ değişimine etkisi

Killi zeminlerde kil minarellerinin su ile etkileşimi sonucu meydana gelen şişme, zeminin hacmini artırarak iskelet yapısını bozar ve taşıma gücünü düşürür. Bu durum, özellikle dolgu malzemelerinde stabilite kaybına ve düşük $CBR(\%)$ değerlerine neden olur. Literatür çalışmaları incelendiğinde zeminlerin şişme potansiyellerinin $LL(\%)$ ve $PI(\%)$ bağlı olarak rapor edilmiştir [28], [41], [42]. 96 saat suda bekletilerek suya doygun duruma gelen numunelerde meydana gelen şişme davranışı zeminin iskelet yapısını bozar. Sıkıştırma aşamasında belirli bir dane dizilimine kavuşan danelerin yerleşim düzeni bozulur. Bu durum zeminin mukavemetini önemli bir miktarda değiştirir. $\Delta CBR(\%)$ değişimlerinin temel nedeni de meydana gelen bu şişme miktarlarıdır [36]. Şekil 9a'da şişmenin kil oranı bağlı değişimi; Şekil 9b'de $\Delta CBR(\%)$ 'deki azalmanın 96 saat sonundaki toplam şişmelere bağlı değişimi sunulmuştur.

$CBR(\%)$ değerleri dikkate alınarak dolgu amacıyla tercih edilebilecek zemin türlerinin kullanım alanlarına ilişkin özet bilgiler Tablo 2'de sunulmuştur. Nihai durumda deneysel çalışmalardan belirlenen $CBR(\%)$ değerlerinin literatür çalışmaları ile uyumlu olduğu görülmektedir. S1, S2 ve S3 numunelerinin kuru $CBR(\%)$ değerleri sırasıyla 5,45; 6,24 ve 6,87 olup, bu zeminler zayıf-orta düzeyde dolgu malzemesi olarak sınıflandırılmaktadır. Aynı numunelerin yaş $CBR(\%)$ değerleri 2,04; 2,57 ve 3,06 olup, çok zayıf nitelikte dolgu malzemesi sınıfında yer almaktadır. Benzer şekilde, S4 ve S5 numunelerinin kuru CBR değerleri 10,56 ve 12,00 ile orta sınıf dolgu malzemesi olarak değerlendirilirken; yaş CBR değerleri 5,06 ve 6,00 olup zayıf-orta sınıf olarak kabul edilmektedir. S6 numunesi, kuru CBR değeri 18,48 ve yaş CBR değeri 11,88 ile her iki durumda da orta sınıfta yer alırken; S7 numunesi, yaş CBR değeri 16,36 ile orta ve kuru CBR değeri 21,94 ile iyi sınıf dolgu malzemesi olarak sınıflandırılmaktadır [43], [44], [45].



Şekil 9. Şişme ve $\Delta CBR(\%)$ değerlerinin değişimi a) kil oranı ve şişme b) şişme ve $\Delta CBR(\%)$

Karayolları Teknik Şartnamesi (2020)'ne göre $CBR(\%)$ değeri 8'in altında olan zeminler, temel ve alt temel tabakalarında kullanıma uygun değildir. Karayolları yapım işlerinde $LL(\%) \leq 60$, $PI(\%) \leq 35$, standart Proctor deneyinden belirlenen $\gamma_{kmax} \geq 1,45 \text{ t/m}^3$ ve şişmesi (%) ≤ 3 olan zeminlerin dolgu malzemesi olarak kullanılabilir olduğunu rapor etmektedir. Buna ek olarak bir karayolu üst yapısı farklı tabakalardan meydana gelir. Bu tabakaların her birinde tercih edilecek dolgu malzemelerinin farklı $LL(\%)$, $PI(\%)$ ve dane dağılımlarına sahip olması gerekir [40].

Tablo 2. Temel, alt temel ve alt dolgu malzemesi olarak zeminlerin değerlendirilmesi [43]

CBR(%)	Değerlendirme	Kullanım	Sınıflandırma Sistemi	
			USCS	AASHTO
0-3	Çok kötü	Alt temel	OH, CH, MH, OL	A-5, A-6, A-7
3-7	Zayıf-orta	Alt temel	OH, CH, MH, OL	A-4, A-5, A-6, A-7
7-20	Orta	Alt temel	OL, ML, CL, SC, SM, SP	A-2, A-4, A-6, A-7
20-50	İyi	Temel, alt temel	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A-2-5, A-3, A-2-6
>50	Mükemmel	Temel	GW-GM	A1a, A-2-4, A-3

Sonuçlar ve Öneriler

Mekanik enerji uygulanarak sıkıştırılan zeminlerin iskelet yapısındaki küçük değişimler zeminin mukavemeti önemli derece etkiler. Bu çalışma kapsamında zemindeki şişmelerin CBR(%) değerlerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada dikkate alınan zemin özellikleri için elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- 1) *Şişme davranışı*, zeminlerin taşıma kapasitesini doğrudan etkilemekte olup, suya doygunluk sonrası CBR(%) değerlerinde %25 ila %63 arasında azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, özellikle tamamı ince daneli olan ve kil oranı en yüksek numune olan S1’de maksimum düzeyde gerçekleşirken; kil oranı ve likit limit değeri en düşük olan S7 numunesinde minimum seviyede kalmıştır.
- 2) Su ile etkileşim sonucunda şişme eğilimi gösteren killi zeminlerin hacimlerinde artış meydana gelmekte, bu da zemin iskelet yapısının bozulmasına ve mukavemetin ciddi ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, mühendislik yapılarında kullanılan dolgu malzemeleri açısından kritik bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmelidir.
- 3) Yapılan regresyon analizlerine göre, şişme miktarı ile Δ CBR(%) değişimi arasında yüksek düzeyde korelasyon ($R^2 = 0,95$) tespit edilmiştir. Bu ilişki, likit limit, kil oranı ve ortalama dane çapının CBR(%) üzerinde ne derece etkili olduğunu ortaya koymaktadır.
- 4) D_{50} değerinin artması, zeminlerin şişme potansiyelini azaltmakta ve CBR(%) üzerindeki negatif etkileri sınırlamaktadır. Bu bağlamda, şişmeye bağlı taşıma gücü kayıplarını minimize için kil oranı ve likit limit değeri düşük, D_{50} değeri ise yüksek zeminlerin tercih edilmesi önerilmektedir.
- 5) Bu bulgular, CBR deneylerinin suya doygun koşullarda ve şişmenin artık stabil olduğu durumda gerçekleştirilmesi gerektiğini ve dolgu malzemesi seçiminde şişme potansiyelinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.
- 6) Literatür çalışmaları incelendiğinde, yeterli veriye sahip çalışmalarda yapay zekâ, derin öğrenme algoritmaları ve Python, MATLAB, SPSS gibi yazılımlar kullanılarak yüksek doğrulukta modellemelerin gerçekleştirildiği görülmektedir. Ancak mevcut çalışmada veri sayısının az olması, analizlerin Microsoft Excel regresyon analizleri ile sınırlandırılmasına neden olmuştur. Veri setinin genişletilmesi, daha kapsamlı analizlerin yapılmasına olanak sağlayarak daha güvenilir ve genellenebilir sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

Yazar katkıları

Yazar¹: Çalışma konsepti, deneysel çalışmalar, taslağın oluşturulması, verilerin analizi ve yorumlanmasında görev almıştır.

Yazar²: Çalışma konsepti, literatür çalışması, verilerin analizi ve yorumlanmasında görev almıştır.

Yazar³: Literatür çalışması, verilerin analizi ve yorumlanmasında görev almıştır.

Teşekkür

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde sağladığı katkılardan dolayı İnşaat Mühendisi Vedat Karakoç’a teşekkür ederiz.

Kısaltma ve Semboller

CBR(%) : California taşıma oranı

D_{50} : Ortalama dane çapı

Gs: Özgül ağırlık

PL(%): Plastik limit

PI(%): Plastisite limit

LL(%): Likit limit

KO: Kil oranı

XRD: X-ışını kırınımı (X-ray Diffraction)

w(%) : Su muhtevası

γ : Birim hacim ağırlık

USCS: Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi

AASHTO: Amerikan Karayolu ve Ulaştırma Birliği

Kaynakça

- [1] S. Roy and S. K. Bhalla, “Role of geotechnical properties of soil on civil engineering structures,” *Resour. Environ.*, vol. 7, no. 4, pp. 103–109, 2017, [doi: 10.5923/j.re.20170704.03](https://doi.org/10.5923/j.re.20170704.03)
- [2] A. Laskar and S. K. Pal, “Geotechnical characteristics of two different soils and their mixture and relationships between parameters,” *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 17, pp. 2821–2832, 2012 .
- [3] B. Bui, J.-C. Morel, V.-H. Tran, S. Hans, and M. Oggero, “How to use in-situ soils as building materials,” *Procedia Eng.*, vol. 145, pp. 1119–1126, 2016, [doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.145](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.145)
- [4] A. E. Oghenero, E. G. Akpokodje, and A. C. Tse, “Geotechnical properties of subsurface soils in Warri, Western Niger Delta, Nigeria,” *J. Earth Sci. Geotech. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 89–102, 2014.
- [5] P. O. Youdeowei and H. O. Nwankwoala, “Suitability of soils as bearing media at a freshwater swamp terrain in the Niger Delta,” *J. Geol. Min. Res.*, vol. 5, no. 3, pp. 58–64, 2013, [doi: 10.5897/JGMR11.046](https://doi.org/10.5897/JGMR11.046).
- [6] Y. Z. Beju and J. N. Mandal, “Experimental investigation of shear strength behaviors of stone dust–EPS geofoam interface,” *J. Hazard. Toxic Radioact. Waste*, vol. 22, no. 4, p. 04018033, 2018, [doi: 10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.000042](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.000042).
- [7] D. S. Al-Abri and Y. E. A. Mohamedzein, “Performance of plastic pipes installed in dune sand,” in *Proc. Pipelines 2010: Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability—Renew, Rehab, and Reinvest*, pp. 410–421, 2010, [doi: 10.1061/41138\(386\)40](https://doi.org/10.1061/41138(386)40).

- [8] B. Dereli, "Konsol istinat duvarlarında geri dolgu malzemesi olarak Bitlis pomza agregalı köpük betonların kullanılabilirliğinin araştırılması," Ph.D. dissertation, Süleyman Demirel Univ., 2024.
- [9] I. W. Croudace and R. G. Rothwell, *Micro-XRF studies of sediment cores*. Springer, 2015, [doi: 10.1007/978-94-017-9849-5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5).
- [10] I. Gratchev, *Rock mechanics through project-based learning*. CRC Press/Balkema, 2020, [doi: 10.1201/9780429278839](https://doi.org/10.1201/9780429278839).
- [11] B. Baradan, *İnşaat mühendisleri için malzeme bilgisi*, vol. 307. DEÜ Yayınları, 2020.
- [12] G. Vallejo and M. Ferrer, *Mühendislik jeolojisi*, K. Kayabalı, Trans. Ankara Üniversitesi Yayınları, 2014.
- [13] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mechanics of materials*. Cengage Learning, 2012.
- [14] R. D. Holtz, W. D. Kovacs, and T. C. Sheahan, *An introduction to geotechnical engineering*. Pearson Educ., 2023.
- [15] E. Balaban, A. Šmejda, and M. İ. Onur, "Farklı dolgu malzemesine sahip donatılı istinat duvarlarının performanslarının değerlendirilmesi," *Resilience*, pp. 117–128, 2020, [doi: 10.32569/resilience.632301](https://doi.org/10.32569/resilience.632301).
- [16] M. Riccio, M. Ehrlich, and D. Dias, "Field monitoring and analyses of the response of a block-faced geogrid wall using fine-grained tropical soils," *Geotext. Geomembr.*, vol. 42, no. 2, pp. 127–138, 2014, [doi: 10.1016/j.geotextmem.2014.01.006](https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2014.01.006).
- [17] G. Yang, H. Liu, P. Lv, and B. Zhang, "Geogrid-reinforced lime-treated cohesive soil retaining wall: Case study and implications," *Geotext. Geomembr.*, vol. 35, pp. 112–118, 2012, [doi: 10.1016/j.geotextmem.2012.09.001](https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2012.09.001).
- [18] F. H. Chen, *Foundations on expansive soils*. Elsevier Sci. Publ., 1988.
- [19] W. S. Abdullah, K. A. Alshhibli, and M. S. Al-Zou'bi, "Influence of pore water chemistry on the swelling behaviour of compacted clays," *Appl. Clay Sci.*, vol. 15, pp. 447–462, 1999, [doi: 10.1016/S0169-1317\(99\)00034-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(99)00034-4).
- [20] J. C. Parker, D. F. Amos, and D. L. Kaster, "An evaluation of several methods of estimating soil volume change," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 41, no. 6, pp. 1059–1064, 1977, [doi: 10.2136/sssaj1977.03615995004100060008x](https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100060008x).
- [21] Y. J. Du, S. L. Li, and S. Hayashi, "Swelling–shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China," *Eng. Geol.*, vol. 53, pp. 351–358, 1999, [doi: 10.1016/S0013-7952\(98\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00086-6).
- [22] D. G. Fredlund, "The prediction and performance of structures on expansive soils," in *Proc. Int. Symp. on Prediction and Performance in Geotechnical Engineering*, Calgary, pp. 51–60, Jun. 1987.
- [23] B. Yıldırım, "Kaliforniya taşıma oranının (CBR) regresyon analizleri ve yapay sinir ağları ile belirlenmesi," M.S. thesis, Niğde Univ., Inst. Sci. Tech., 2009.
- [24] R. E. Grim, "Physico-chemical properties of soils: Clay minerals," *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 85, no. 2, pp. 1–17, 1959.
- [25] F. Civan, *Reservoir formation damage: Fundamentals, modeling, assessment, and mitigation*. Gulf Prof. Publ., 2023.
- [26] A. T. Sudjianto, K. B. Suryolelono, A. Rifa'i, and I. B. Mochtar, "The effect of water content change and variation suction in behavior swelling of expansive soil," *Int. J. Civil Environ. Eng. IJCEE-IJENS*, vol. 11, no. 3, pp. 11–17, 2011.
- [27] Z. Kaya, "Kil zeminlerin şişme karakteristiklerinin belirlenmesi," M.S. thesis, İTÜ, Inst. Sci. Tech., 1997.
- [28] H. B. Seed, R. J. Woodward, and R. Lundgren, "Prediction of swelling potential for compacted clays," *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 88, no. 3, pp. 53–87, 1962, [doi: 10.1061/JSFEAQ.0000431](https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000431).
- [29] D. E. McCormack and L. P. Wilding, "Soil properties influencing swelling in Canfield and Geeburg soils," *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, vol. 39, pp. 496–502, 1975, [doi: 10.2136/sssaj1975.03615995003900030034x](https://doi.org/10.2136/sssaj1975.03615995003900030034x).
- [30] W. R. Gill and C. A. Reaves, "Relationships of Atterberg limits and cation-exchange capacity to some physical properties of soil," *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, vol. 21, pp. 491–494, 1957.
- [31] T. W. Lambe and R. V. Whitman, *Soil mechanics*. John Wiley & Sons, 1969.
- [32] B. Adeleke, J. Kinuthia, and J. Oti, "Strength and swell performance of high-sulphate kaolinite clay soil," *Sustainability*, vol. 12, no. 23, p. 10164, 2020, [doi: 10.3390/su122310164](https://doi.org/10.3390/su122310164).
- [33] I. Aksu, E. Bazilevskaya, and Z. T. Karpyn, "Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability," *GeoResJ*, vol. 7, pp. 1–13, 2015, [doi: 10.1016/j.grj.2015.02.003](https://doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.003).
- [34] A. A. Sabtan, "Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia," *J. Asian Earth Sci.*, vol. 25, no. 5, pp. 747–757, 2005, [doi: 10.1016/j.jseaes.2004.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.07.003).
- [35] F. Wagner, "Mechanical properties of clays and clay minerals," in *Dev. Clay Sci.*, 2013, [doi: 10.1016/B978-0-08-098258-8.00011-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00011-0).
- [36] M. Gülen, A. Aslan Fidan, A. S. Köşeli, and H. Kılıç, "Effect of freeze-thaw on CBR in soils with different gradation and mineralogy," *Turk. J. Civ. Eng.*, vol. 35, no. 4, 2024, [doi: 10.18400/tjce.1349440](https://doi.org/10.18400/tjce.1349440).

- [37] V. Şeker, "Sıkıştırılmış zeminlerin Kaliforniya taşıma oranının (CBR) basit indeks özellikler kullanarak tahmin edilmesi," M.S. thesis, Van Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [38] T. Taskiran, "Prediction of California Bearing Ratio (CBR) of fine-grained soils by AI methods," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 41, pp. 886–892, 2010, [doi: 10.1016/j.advengsoft.2010.01.003](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.01.003).
- [39] G. V. Ramasubbarao and Sivasankar, "Predicting soaked CBR value of fine-grained soils using index and compaction characteristics," *Jordan J. Civ. Eng.*, vol. 3, pp. 354–360, 2013.
- [40] Karayolları Genel Müdürlüğü, *Karayolu teknik şartnamesi (Yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üstyapı ve çeşitli işler)*. Ankara: KGM, 2020. [Online]. Available: <https://www.kgm.gov.tr>
- [41] W. G. Holtz and H. J. Gibbs, "Engineering properties of expansive clays," *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 121, no. 1, pp. 641–663, 1956, [doi: 10.1061/TACEAT.0007325](https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007325).
- [42] R. B. Peck, W. E. Hanson, and T. H. Thornburn, *Foundation engineering*. New York: John Wiley and Sons, 1974.
- [43] K. Hazirbaba and H. Gullu, "California bearing ratio improvement and freeze–thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 1–2, pp. 50–60, 2010, [doi: 10.1016/j.coldregions.2010.05.006](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.006).
- [44] E. Mina, R. Kusuma, and N. Ulfah, "Utilization of steel slag and fly ash in soil stabilization and their effect on California bearing ratio (CBR) value: Case study: Kp. Kadusentar road Medong village Mekarjaya subdistrict Pandeglang district," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 673, p. 012034, 2019, [doi: 10.1088/1757-899X/673/1/012034](https://doi.org/10.1088/1757-899X/673/1/012034).
- [45] J. E. Bowles, *Engineering properties of soils and their measurement*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1992.