Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

DONMA–ÇÖZÜLME KOŞULLARINDA KUMUN CBR PERFORMANSI VE İNCE DANE ETKİSİ

CBR PERFORMANCE OF SAND UNDER FREEZE-THAW CONDITIONS AND THE EFFECT OF FINES CONTENT

Mete ÇITAK[1], Zeynep ÖZKUL BİRGÖREN[2], Mehmet Ali ALKAN[3], Şenol ÇÖMEZ[4], H. Özen NAVRUZ[5], Nilgün NAYIR[6], Aykan MERT[7]

ÖZET

Kumlu zeminlerde farklı mineralojiye sahip ince daneli zeminlerin (kohezyonlu kaolin /kohezyonsuz filler) ve artan ince dane miktarının Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değerleri üzerine etkileri donma–çözülme (D-Ç) öncesi ve sonrası araştırılmıştır. SP–SM ile SP–SC/SC sınıfında, ince dane oranı yaklaşık %5–20 arasında değişen toplam 8 adet zemin karışımı için, D-Ç öncesi CBR (kuru / yaş) 16 ve sonrası 32 test yapılmıştır. İki D-Ç döngüsü, açık su beslemeli, özel tasarım kabin içinde -12/+12ºC de gerçekleşmiştir. Filler içeren karışımlarda yaş CBR değerleri yaklaşık %16 ince dane içeriğine kadar artış daha yüksek oranlarda düşüş göstermiştir. Kaolin içeren karışımlarda tüm yaş CBR değerleri ince dane oranı arttıkça azalmıştır. D-Ç sonrası CBR değerleri %5'in üstünde kaolin içeren karışımlar için 20'nin altına düşmekte ve 4'e kadar azalmaktadır. Filler içeren karışımlarda D-Ç sonrası CBR değerleri, %20 ince dane oranında dahi, 22'nin üstünde kalmaktadır. Bulgular, D–Ç sonrasında tüm değerlerde azalmaların görülmesi, yalnızca ince dane oranının değil, ince danelerin mineralojik özelliklerinin CBR değerleri üzerinde önemli bir etken olduğunu göstermektedir. Mevsimsel don görülen bölgelerde yol alttemel tasarımında yaş CBR değerlerinin yanında açık sistem D-Ç testlerinin faydalı olacağı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *CBR, Donma Çözülme, Filler, Kaolin, İnce Dane Oranı*

ABSTRACT

The effects of increasing fines content and varying mineralogy (cohesive kaolin/ non-cohesive filler) on the California Bearing Ratio (CBR) of a sand were investigated for conditions prior-to and post-freeze–thaw (F-T) cycles. Eight mixtures classifying as SP–SM and SP–SC/SC with fines contents varying between 5% to 20% were tested. Sixteen pre-F-T CBR (soaked/unsoaked) and 32 post-F-T CBR tests were performed (with F-T cycling in purpose-designed cabin with open-water-supply and two -12/+12°C cycles). In Filler mixtures, soaked CBR values showed increase up to a fines content of approximately 16%, followed by decreases at higher fines contents. In Kaolin mixtures, all soaked CBR values decreased as the fines content increased. Post-F-T CBR values dropped below 20 at fines contents exceeding 5% and reached values as low as 4. In Filler mixtures, post-F-T CBR values remained above 22 even at fines contents as high as 20%. CBR values show a decrease with F-T cycles for all mixtures, indicating that the fines content as well as the mineralogical properties of the fines are significant factors affecting CBR values. It is observed that in regions with seasonal freezing, open-system F-T tests are a useful complement to soaked CBR values in subgrade design.

Keywords: *CBR, Freeze Thaw, Filler, Kaolin, Fine Grain Ratio*

[1]İnş. Yük. Müh., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, metecitak06@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2]Doç. Dr. Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, zhozkul.birgoren@aybu.edu.tr
[3] İnş. Yük. Müh., KGM, Ankara, Türkiye, malkan@kgm.gov.tr
[4] Jeoloji Yük. Müh., KGM, Ankara, Türkiye, scomez@kgm.gov.tr
[5] Jeoloji Yük. Müh., KGM, Ankara, Türkiye, onavruz@kgm.gov.tr
[6] Jeoloji Müh., KGM, Ankara, Türkiye, nilgun.nayir@kgm.gov.tr
[7] İnş. Müh., KGM, Ankara, Türkiye, amert@kgm.gov.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde artan ulaşım talebi ve ağır trafik yükleri, özellikle yol altyapı sistemlerinde daha yüksek performans beklentilerini beraberinde getirmiştir. Zemin özellikleri karayolları, baraj gibi yapıların tasarım özelliklerini etkilemektedir (Şenol & Şahinbay, 2025). Donma çözülme (D–Ç) döngüleri, zeminin mekanik davranışını olumsuz etkilemektedir. Yol alttemel uygulamalarında granüler zeminlerin Kaliforniya taşıma oranına (CBR) bağlı gösterdiği değişimler, zeminin üstünde bulunan yapının hizmet ömrünü etkilemektedir.

Ilıman ve soğuk iklim kuşaklarında yıl içerisinde tekrarlayan donma çözülme döngüleri, geoteknik mühendisliği için önemli sorunlardan biridir. Kış aylarında hava sıcaklığının düşmesi sonucu boşluk suyunun donması hacim artışına ve buz merceği oluşumuna neden olurken ısınmayla eriyen buz lensleri, boşluk suyunun artmasıyla efektif gerilmede azalmaya neden olmaktadır. Bu durum özellikle ince daneli ve silt içeriği yüksek zeminlerde daha belirgin olup kaba daneli zeminlerde daha sınırlı düzeydedir. Zeminin hızlı donması boşluk suyunu bulunduğu alanda dondurur ve hacmini artırıp şişer. Ancak yavaş donma süresinde su kılcallık etkisiyle yukarıya doğru hareket eder ve buz lenslerinin büyümesine neden olur (Holtz vd., 1981). Donma süresi boyunca zeminde su hareketi devam etmekte, çözülme döneminde ise boşluk suyu miktarında artış meydana gelmektedir. Drenajın yetersiz olduğu durumlarda efektif gerilmelerde azalma ve buna bağlı dayanım kaybı oluşabilmektedir (Bell, 2012).

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi, özellikle yol alttemel tasarımında yaygın olarak kullanılan bir parametre olup, çevresel etkiler altındaki dayanım değişiminin belirlenmesinde pratik bir gösterge sunmaktadır. Bununla birlikte, zeminin içerdiği ince danelerin mineralojik yapısı ve suya duyarlılığı, donma hassasiyetini belirleyen parametreler arasında yer almaktadır (Gülen vd., 2024). Donma çözülme sürecinde meydana gelen mikro yapısal değişimler, zeminin su tutma kapasitesini, boşluk dağılımını ve daneler arası bağları değiştirerek CBR değerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Zeminlerin CBR değerleri; ince dane miktarı, su muhtevası ve sıkışma derecesi gibi birçok parametreden etkilenmektedir (Pasand vd., 2022). Bu nedenle, donma çözülme sonucunda meydana gelen mikro yapısal değişimlerin CBR üzerindeki etkisinin incelenmesi, zemin davranışının daha doğru değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

D-Ç'nin zemine etkisi literatürde çoğunlukla CBR ve dayanım parametreleri üzerinden ele alınmıştır (Gülen vd., 2025; Işik vd., 2014; Keskin vd., 2017; Pasand vd., 2022). Işik vd. (2014) CH, CL ve SC sınıfından 14 farklı zemin üzerinde kuru, yaş ve D-Ç sonrası CBR testleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada, D-Ç döngüsü iki çevrim olarak (-12/+12ºC) uygulanmıştır. D-Ç döngüleri sonrasında suda bekletilmemiş numunelerin CBR değerlerinde yaklaşık %47 oranında bir azalma görülürken, suda bekletilen numunelerde bu kayıp yaklaşık %72'ye ulaşmıştır. Elde edilen bulgular, numunelerin suda bekletilmesi durumunda donma çözülme sonrası CBR değerlerindeki düşüş miktarının çok daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Pasand vd. (2022) İran'da farklı zemin özelliklerine sahip 400 farklı zemin numunesi üzerinde yapılan 4 gün suda bekletilerek gerçekleştirilen CBR deneylerinde ince malzeme oranı arttıkça CBR değerinin azaldığını, en yüksek değerlerin ise %10 ince dane içeren numunelerde elde edildiği ancak aynı ince malzeme oranına sahip farklı zemin numunelerinin arasında CBR değerlerinde %90'a varan farklılıklar gözlenmiştir (Pasand vd., 2022)

Gülen vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada CL sınıf Kaolin kile fark miktarlarda kum ve çakıl ekleyerek oluşturduğu (CL, SC, GC) 7 farklı dane çapı dağılımına sahip zeminin kuru ve 4 gün suda bekletilmiş CBR şişme değerlerini karşılaştırmıştır. En fazla şişme %100 ince dane olan %49 kil miktarına sahip zeminde gözlemlenmiştir. Numunelerin içerisindeki kil miktarı azalıp, ortalama dane çapı miktarı arttıkça şişme miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Gülen vd. (2024) çalışmasında 12 farklı granülometri ve mineralojiye sahip zemininin D-Ç döngüsü sonrası CBR değerlerindeki değişimi incelemiştir. Araştırma sonucunda, D-Ç etkisiyle CBR değerlerinde %40 ila %70 arasında azalma gözlenmiştir. Kaba dane oranının artmasıyla beraber CBR değerleri artmıştır. Ancak numunelerin D-Ç öncesi ve sonrası dayanımlarında azalma gözlemlenmiştir. D-Ç sonrası Smektit kil içeren zeminler kaolinit kil içeren zeminlere göre taşıma gücünü daha olumsuz etkilemektedir.

Bu çalışmada, farklı mineralojiye ve farklı ince dane oranına sahip Filler ve Kaolin içeren kumlu zeminlerin kuru, yaş ve donma çözülme sonrası CBR davranışları incelenmiştir. Donma çözülme deneyleri, açık su beslemeli, özel tasarım kabin içinde (Özkul Birgören vd. 2025) -12/+12ºC de 2 döngü olarak gerçekleşmiştir. Tüm zemin numuneleri maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında, standart proctor enerjisi ile hazırlanmış olup CBR testleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, farklı ince dane türü ve içeriğinin donma çözülme döngülerinin CBR üzerindeki etkileri deneysel olarak belirlenmiştir.

2. MALZEME VE METOT

2.1 Deney Malzemeleri

Bu çalışmada kullanılan zemin numuneleri Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından temin edilmiştir. İri daneli kum ve ince daneli "Filler" malzeme kireçtaşı ocağından tedarik edilmiştir. Çalışmada kullanılan kum karışımları Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)'ne göre SP–SM, SM, SP-SC, SC olarak sınıflandırılmış olup Tablo 1 de gösterilmiştir. İnce dane oranı yaklaşık %5–20 aralığında değiştirilerek iki farklı mineralojiye sahip ince daneli karışımlar oluşturulmuştur. Kaolinin kıvam limitleri ASTM D4318 standardına göre belirlenmiş olup likit limit (LL) %50, ve plastisite indisi (PI) %19 olarak hesaplanmıştır. Filler malzeme plastisite göstermemiş ve non-plastik (NP) olarak değerlendirilmiştir. ASTM D698 standardına göre standart Proktor deneyi yapılıp Filler içeren zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1.973-2.034 g/cm^3 arasında, Kaolin içeren zeminlerin 1.900 ile 1.920 g/cm^3 arasında, Filler içeren zeminlerin optimum su muhtevaları %2.1-7.3 arasında, Kaolin içeren zeminlerin %2.7-7.1 değişmektedir.

Tablo 1. Zeminlerin Dane içerikleri

Karışımlar	USCS	Çakıl (%)	Kum (%)	İnce Dane (%)	KGM Don Hassasiyet sınıfı
F1	SP-SM	18,8	73,0	8,2	F2
F2	SM	14,1	73,7	12,2	F2
F3	SM	9,4	74,3	16,3	F4
F4	SM	4,7	75,0	20,3	F4
K1	SP-SC	18,0	76,8	5,2	F2
K2	SP-SC	18,0	72,6	9,4	F2
K3	SC	18,0	68,3	13,7	F2
K4	SC	18,0	64,0	18,0	F4

2.2 Test Metodu

Kaliforniya Taşıma Oranı deneyleri ASTM D1883 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numuneler, ASTM D698'e göre belirlenen maksimum kuru birim hacim ağırlık (MDD) ve optimum su muhtevasında (OWC), standart Proktor enerjisi ile CBR kalıplarına beş tabaka halinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. CBR ölçümleri, kuru, 3 gün suda bekletilmiş (yaş) ve donma çözülme (D–Ç) çevrimleri sonrasında yapılmış, don hassasiyeti USACE sınıflandırmasına göre F2 ve F4 sınıflarında yer almıştır.

Donma çözülme deneyleri, ASTM D5918'e göre özel tasarım kabin içinde açık sistem su beslemesi altında, numunenin üst yüzeyinden altına doğru tek eksenli dondurma koşullarında, iki donma (−12°C) ve iki çözülme (+12°C) olarak gerçekleştirilmiştir. Özel tasarım kabin, D-Ç deney sistemi Şekil 1 de gösterilmiştir.

Sekiz karışım için D-Ç öncesinde kuru ve 3 gün suda bekletilen numunelere birer CBR deneyi (16 numune), D-Ç sonrasında ise her karışım için dörder deney (32 numune) toplam 48 CBR deneyi gerçekleştirilmiştir.



(a) (b)

Şekil 1. Donma Çözülme Deney Sistemi (a) Tek Eksenli Dondurma (b) Özel Üretim Kabin

3. BULGULAR

Çalışmanın sonuçları Tablo 2 de verilmiştir. CBR değerleri, zeminlerin içerdiği ince danenin çeşidi ve miktarına bağlı olarak, D-Ç öncesi ve sonrasında değişmektedir.

Tablo 2. CBR Test Sonuçları

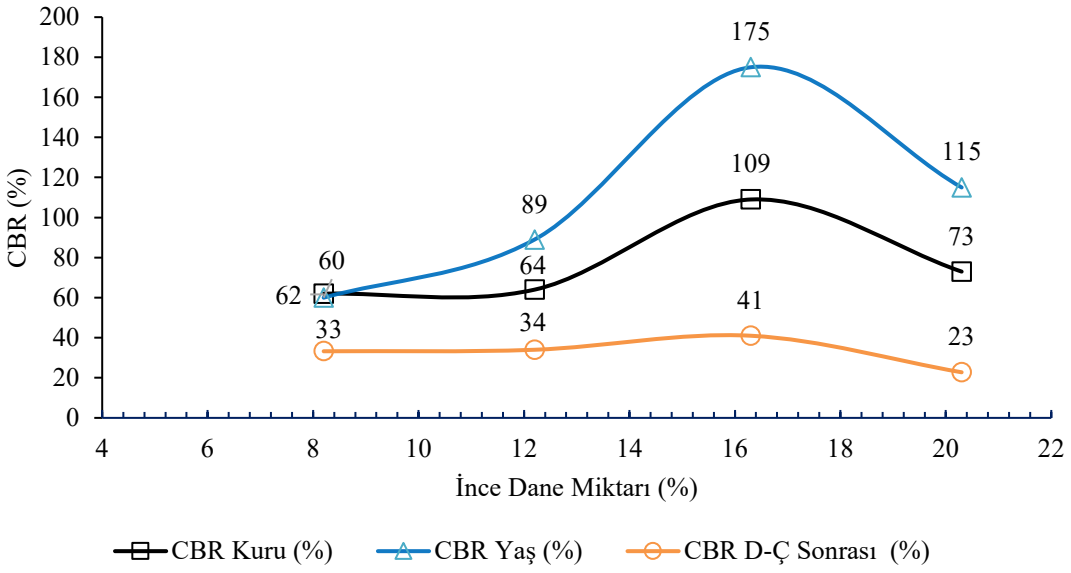
Karışımlar	CBR Kuru (%)	CBR Yaş (%)	CBR D-Ç Sonrası (%)			
F1	62	60	38	41	31	23
F2	64	89	32	47	36	21
F3	109	175	54	58	31	21
F4	73	115	12	27	22	30
K1	57	39	22	24	21	22
K2	55	28	10	8	10	8
K3	38	28	7	7	4	7
K4	43	26	7	3	3	3

3.1 Filler İçeren Karışımlar

Filler katkılı karışımlarda kuru/yaş CBR değerleri, ince dane miktarının artmasıyla artış trendi göstermiş ancak eşik değerden sonra azalma göstermiştir. Donma çözülmesi öncesi yaş CBR değerleri (Şekil 2'de mavi çizgi ile gösterilen eğri) ince dane oranına bağlı olarak 60 ile 175 arasında değişmiş, en yüksek değer yaklaşık %16 ince içeriğinde tespit edilmiş, daha fazla Filler eklenmesinde CBR değerleri düşüşe geçmiştir.

Donma çözülme döngüsü sonrasında tüm Filler içeren karışımlarda, D-Ç öncesi değerlerine göre dayanım kaybı görülmüştür (Şekil 2'de turuncu çizgi ile gösterilen eğri). Yaş CBR koşullara göre dayanım kaybı yaklaşık %45–80 aralığında değişmiş olup, en fazla düşüş %20 ince dane içeriğine sahip F4 karışımında gözlenmiştir. D–Ç sonrası mutlak CBR değerleri Filler içeren karışımlarda 22–41 aralığında tespit edilmiştir.

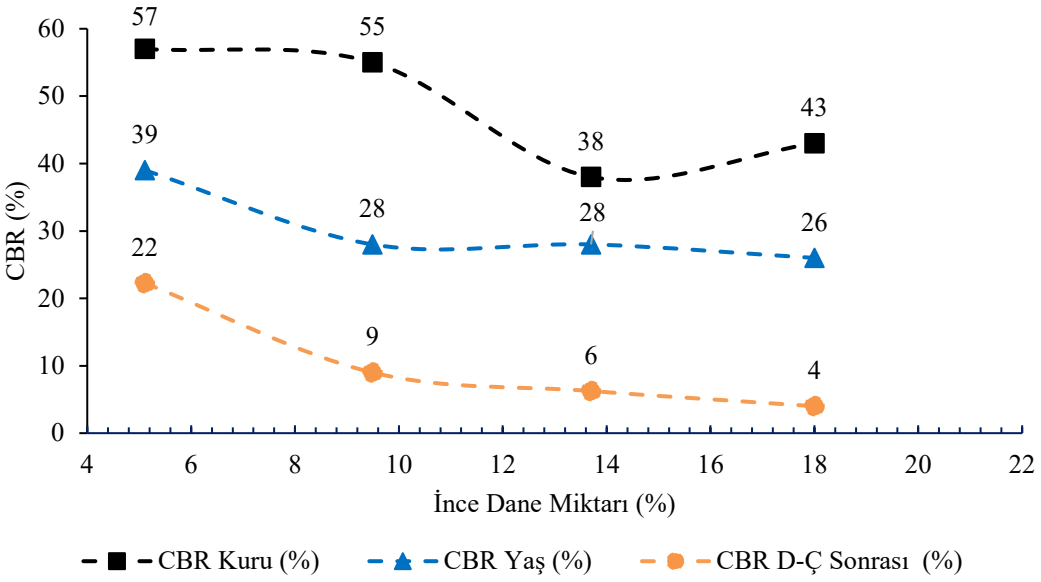
F serisinde kum miktarı yaklaşık olarak sabit (%73,0–%75,0) tutulmuş olup, ince dane içeriği artarken çakıl miktarı azalmıştır. K serisinde ise çakıl miktarı sabit (%18,0) tutulmuş, ince dane içeriği artarken kum miktarı azalmıştır. Bu durum, F serisindeki CBR değişiminin sadece ince dane artışına değil, çakıl oranındaki düşüşe de bağlı olduğunu göstermekte ve iki serinin karşılaştırılmasını kısıtlamaktadır.



Şekil 2. Filler İçeren Karışımlar

3.2 Kaolin İçeren Karışımlar

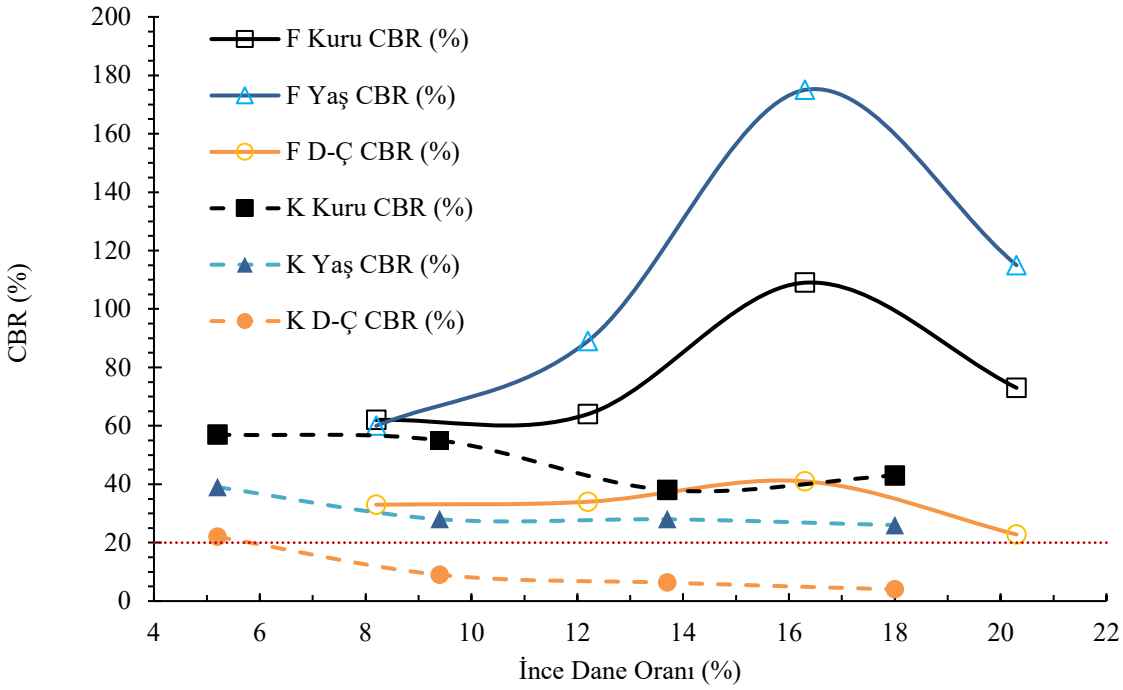
Kaolin içeren karışımlarda ince dane oranı arttıkça yaş CBR değerlerinde azalış gözlenmiştir. En yüksek yaş CBR değeri %5 ince dane oranına sahip K1 numunesinde 39, en düşük %18 ince dane oranına sahip K4 numunesinde 26 olarak ölçülmüştür (Şekil 3'te mavi çizgi ile gösterilen eğri). D–Ç sonrasında tüm karışımlarda dayanım kaybı yaşanmıştır. D-Ç CBR değerleri, Yaş CBR değerlerine kıyasla %43-85 oranında azaldığı görülmüştür. Yüksek ince daneli içeriklerde (> %13) D–Ç sonrası CBR değerleri 4–6 seviyelerine kadar düşmüştür.



Şekil 3. Kaolin İçeren Karışımlar

3.3 Filler ve Kaolin İçeriklerinin Karşılaştırılması

Farklı mineralojiye sahip ince dane türleri karşılaştırıldığında, Filler içeren karışımların kuru, yaş ve donma çözülme sonrası CBR değerleri Kaolinli karışımlara göre daha yüksektir. Şekil 4'de görüldüğü gibi donma çözülme döngüsü dayanım üzerinde önemli azalmaya neden olmuştur: Filler içeren karışımlarda D-Ç CBR değerleri Kuru değerlere göre %47-69 arasında azalırken, Kaolinli karışımlarda bu düşüş %61 ile %91 aralığında değişmektedir.



Şekil 4. Filler ve Kaolin İçeriklerinin Karşılaştırılması

Zeminin sağlaması gereken CBR = 20 değeri alt limit kabul edilirse (bakınız Şekil 4'de gösterilen kırmızı çizgi) test edilen Filler karışımların tamamı kriteri sağlarken Kaolinli karışımlardan sadece ilk karışım (F1) CBR = 20 kriterini sağlamaktadır. İnce dane yüzdesinin mineralojisi D-Ç sonrası elde edilecek CBR değerini ve dolayısıyla kabul edilebilir ince dane oranını belirgin bir şekilde etkilemektedir. Bu durum, ince daneli non-plastik malzemenin belirli bir miktara kadar boşluk doldurma etkisi ile dane temasını artırarak taşıma gücünü iyileştirdiğini düşündürmektedir.

Elde edilen bulgular, ince dane oranının CBR davranışını doğrusal biçimde etkilemediğini ve özellikle plastik olmayan Filler içeren zeminlerde optimum ince dane oranı bulunduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık kil minerali içeren sistemlerde ince dane oranındaki artış, taşıma kapasitesini kademeli olarak düşürmektedir. Dane boyu dağılımına dayalı don sınıflandırmasının (FS), CBR davranışıyla doğrudan bir ilişki göstermemiştir. Her iki seride don sınıfları F2 den F4 bölgesine geçiş yapsa da F serisinde yüksek CBR gösterirken, K serisinde düşüktür.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı ince dane oranına sahip Filler ve Kaolin içeren kumlu zeminlerin kuru, yaş ve donma çözülme sonrası CBR davranışları incelenmiştir. Filler ve Kaolin içeren serilerin CBR değerleri karşılaştırılarak, ince dane türü ve dane dağılımındaki değişimlerin CBR taşıma gücü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, donma çözülme sonrasında meydana gelen CBR değişimleri incelenerek, farklı ince dane içeriğine sahip kumlu zeminlerin donma çözülme koşullarındaki performansı karşılaştırılmıştır.

Filler içeren karışımlarda yaş CBR değerleri %8–20 ince dane aralığında 60–175 değerleri arasında değişmiş ve yaklaşık %16 ince dane içeriğinde maksimum değerine ulaşmış, ancak non-plastik malzeme oranının %20 seviyelerine çıkarılmasıyla CBR değerleri azalmıştır. Bu değişimin yalnızca ince dane içeriğine bağlanamayacağı, F serisinde ince dane artışıyla birlikte çakıl oranının da azalmasının CBR davranışını etkileyebileceği dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla, Filler içeren karışımlarda belirli bir ince dane içeriğine kadar gözlenen CBR artışı, malzemenin dane dağılımındaki değişimle birlikte değerlendirilmelidir.

Kaolin içeren karışımlarda yaş CBR değerleri 26–39 aralığında kalmış ve Kaolin miktarı arttıkça CBR değerlerinde azalma meydana gelmiştir. En yüksek CBR değeri (39) yaklaşık %5 ince dane içeriğinde elde edilmiştir. Bu durum, ince daneli Kaolin mineralinden oluşan malzemenin plastisite etkisi nedeniyle daneler arasındaki sürtünmeyi azaltarak zeminin taşıma gücünü arttırmak yerine azalttığını düşündürmektedir.

Filler içeren karışımlarda ince dane içeriğinin artmasıyla birlikte çakıl miktarın dada azalma gerçekleşmiştir, CBR davranışında ince dane içeriği ile dane dağılımının birlikte etkili olduğunu göstermektedir.

Donma çözülme çevrimi sonrasında her iki zemin grubunda da belirgin dayanım kayıpları gözlenmiştir. Filler içeren karışımlarda, D-Ç sonrası CBR değerleri, yaş CBR değerlerine göre yaklaşık %45–80 aralığında, Kaolin içeren karışımlarda bu oran %43–85 aralığında azalmıştır. En yüksek kayıp (yaklaşık %85), ince dane içeriği %18 (KGM Don Hassasiyet Sınıfı F4) Kaolinli karışımlarda bulunmuştur.

Karışımların tamamı %20 yaş CBR değerini karşılarken; donma çözülme sonrası %5 üstü Kaolin içerikli numunelerde yeterli CBR performansı korunamamıştır. Sonuçlar, ince dane oranının CBR davranışını doğrusal olarak etkilemediğini ve özellikle ince dane mineralojisinin D-Ç sonrası CBR değeri üzerinde büyük bir etkisi olduğunu işaret etmektedir. Non-plastik malzeme içeren zeminlerde optimum ince dane oranı bulunurken kil içeren karışımlarda ince dane oranındaki artış CBR değerlerini sürekli azaltmaktadır.

Yol alttemel tasarımında yalnızca yaş CBR değerlerinin dikkate alınması yeterli değildir. Donma çözülme etkisi altında performans kaybı ciddi boyutlara ulaşabilmektedir. Bu nedenle zemin seçiminde ince dane oranının yanı sıra ince dane türü de mutlaka dikkate alınmalıdır. Donma çözülme deneylerini kapalı sistem yerine, ince dane mineralojisinin etkisini daha belirgin gösteren su beslemeli açık sistemde yapılması önerilmektedir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı tarafından finanse edilmiştir. Bu makalede açıklanan CBR testleri, Toprak ve Stabilizasyon Şefliği laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, Karayolları Üstyapısı Açısından Zeminlerin ve Yol Malzemelerinin Don Hassasiyetinin Değerlendirilmesi ve İyileştirme Metotları" başlıklı KGM-ARGE/2021-2 projesinin bir parçasıdır.

6. KAYNAKLAR

ASTM D698-12. (2021). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN·m/m3)).

ASTM D1883. (2016). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils.

ASTM D2487. (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).

ASTM D4318. (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

ASTM D5918-06. (2013) Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils.

Bell, F. G. (2012). Mühendislik Jeolojisi ve İnşaat (K. Kayabalı, Çev.). Gazi Kitabevi.

Gülen, M., Akbulut, S., & Kayan, Y. (2025). Dane Çapı Dağılımının CBR (%) Değerlerine Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 16(2).

Gülen, M., Aslan Fidan, A., Köşeli, A. S., & Kiliç, H. (2024). Effect of Freeze-Thaw on CBR in Soils with Different Gradation and Mineralogy. Turkish Journal of Civil Engineering, 35(4).

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering. NJ: Prentice-hall.

Işik, A., Çevikbilen, G., Hatipoğlu, M., & İyisan, R. (2014, Ekim 16). Donma ve Çözülmenin Taşıma Gücüne Etkisi.

Keskin, S. N., Sungur, A., Akan, R., & Uzundurukan, S. (2017). İnce Daneli Zeminlerde Katkı Maddelerinin ve Donma-Çözülme Çevriminin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5(3).

Özkul Birgören, Z. H., Makttoof, K., Navruz, H. Ö., Çömez, Ş., Komut, M. and Nayır, N. (2025). "A Purpose-Built Frost Susceptibility Testing Device for Pavement Subgrade Materials", 7th International Symposium on Transportation Soil Engineering in Cold Regions, TRANSOILCOLD 2025, Sept 17-25, 2025, Incheon, Republic of Korea, Korean Geotechnical Society, 68-71.

Pasand, S. A., Nasrollahi, N., Asghari-Kaljahi, E., & Majidian, S. (2022). Effect of fine Material Content on The CBR of Iran Saturated Soils. Innovative Infrastructure Solutions, 7(6).

Şenol, A., & Şahinbay, D. (2025). Effect Of Fly Ash Additive And Freeze-Thaw Cycles On CBR Performance İn Silty-Clayey Soils. Içinde Journal of Engineering Faculty, 3(2).

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı	D-Ç	Donma Çözülme
LL	Likit Limit	PI	Plastisite İndisi
MDD	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık	OWC	Optimum Su Muhtevası
USCS	Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi	NP	Non-Plastik
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü	SC	Killi Kum
SP-SC	Kötü Derecelenmiş Kum - Killi Kum	SM	Siltli Kum
SP–SM	Kötü Derecelenmiş Kum - Siltli Kum	USACE	U.S. Army Corps of Engineers
FS	Don Hassasiyet Sınıfı		