



Effect Of Fly Ash Additive And Freeze-Thaw Cycles On CBR Performance In Silty-Clayey Soils

Ahmet Şenol^{1,a,*}, Defne Şahinbay^{2,b}

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 20/06/2025

Accepted: 01/07/2025

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

Süreç

Geliş: 00/00/0000

Kabul: 00/00/0000

ABSTRACT

The soils in cold regions undergo changes in their structure, strength and permeability due to freeze-thaw cycles. The climate change experienced worldwide may threaten man-made infrastructures formed with soil fillings. This repeated freeze-thaw in cold climate regions will negatively affect many physical and mechanical properties of the soil. Therefore, considering the repeated freeze-thaw behaviors, there is a need to improve the soils in these regions that are sensitive to frost. The Sivas region is among our cities that are affected by this climate change and the very cold winter season. Therefore, how the clayey-silty soils frequently found in the Sivas region are affected by the freeze-thaw behavior as a result of their natural existence or use in road infrastructure and some foundation fillings was investigated with CBR experiments.

The main purpose of this study is to evaluate the effect of naturally occurring clayey-silty soils and freeze-thaw cycles with fly ash mixed in them on the California Bearing Ratio (% CBR). The effect of fly ash additive, which is also produced as a by-product in our thermal power plant, on clayey soil was examined by exposing it to different numbers of freeze-thaw cycles. For this purpose, mixtures made by adding fly ash to natural soil and soil at rates of 5-10-15% by weight were prepared in CBR test molds and after 96 hours of curing, they were exposed to freeze-thaw cycles in the form of 1-2-5 cycles and the volumetric changes after curing, freeze-thaw and CBR values were examined. The best result was obtained in the soil sample with 5% fly ash additive where there was no freeze-thaw. The soil sample formed by adding 5% fly ash additive to clayey soil provided benefit by increasing the CBR value by 228.94% compared to the soil sample formed from pure soil.

Keywords: CBR; freeze-thaw; fly ash; silty-clay

Uçucu Kül Katkı Maddesinin Ve Donma-Çözülme Döngülerinin Siltli-Killi Zeminlerde CBR Performansına Etkisi

Öz

Soğuk bölgelerdeki zeminler, donma-çözülme döngüleri nedeniyle yapılarında, mukavemetinde ve geçirgenlik özelliklerinde değişikliğe uğrarlar. Dünya genelinde yaşanan iklim değişikliği zemin dolguları ile oluşturulan insan yapımı altyapıları tehdit edebilir. Soğuk iklim bölgelerinde tekrar eden bu donma-çözülme, zeminin fiziksel ve mekanik birçok özelliğini olumsuz etkileyecektir. Bu yüzden tekrarlı donma-çözülme davranışları göz önüne alınarak bu bölgelerde bulunan ve donma karşı hassas zeminlerin iyileştirilmesine ihtiyaç vardır. Sivas yöresi, yaşanan bu iklim değişikliğinden ve kış mevsiminin oldukça soğuk geçmesinden etkilenen şehirlerimizin içerisinde bulunmaktadır. Bu nedenle Sivas bölgesinde sıklıkla bulunan killi-siltli zeminlerin yol alt yapısında ve kimi temel altı dolgularında, doğal olarak var olması veya kullanılması sonucunda donma-çözülme davranışından nasıl etkilendikleri CBR deneyleri ile araştırılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı, doğadan çıktığı haliyle killi-siltli zeminlerin ve uçucu kül karıştırılmış olarak donma-çözülme döngülerinin Kaliforniya Taşıma Oranı (% CBR) üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Killi zeminin içerisine yine yöremiz termik santralinde bir yan atık ürün olarak üretilen uçucu kül katkısının yaratabileceği etki farklı sayıdaki donma-çözülme döngülerine maruz bırakılarak incelenmiştir. Bunun için doğal zemine ve zeminin ağırlığının % 5-10-15 oranlarında uçucu kül katılarak yapılan karışımlar CBR deney kalıplarında hazırlanmış ve 96 saat kürlenme sonrası 1-2-5 döngü olacak şekilde donma-çözülme maruz bırakılarak kürlenme, donma-çözülme sonrası hacimsel değişimler ve CBR değerleri incelenmiştir. En iyi sonuç donma-çözülmenin olmadığı %5 uçucu kül katkılı zemin numunesinde meydana gelmiştir. Killi zemine %5 uçucu kül katkısı eklenerek oluşan zemin numunesi saf zeminden oluşan zemin numunesine göre CBR değerini % 228,94 oranında artırarak fayda sağlamıştır.

Keywords: CBR; donma-çözülme; silt-killi; uçucu kül

mail

ORCID

mail

ORCID

How to Cite: Şenol A, Şahinbay D (2025) Effect of Fly Ash Additive and Freeze-Thaw Cycles on CBR Performance in Silty-Clayey Soils, Journal of Engineering Faculty, 3(2): 146-159

Giriş

Taşıma gücü zayıf zeminlerin taşıma kapasitesini arttırmak, özellikle yol yapımında inşaat mühendisliği projelerinde her zaman en önemli konulardan biridir. Siltler, uygun malzemeyle değiştirilmesi veya sıkıştırma ve stabilizasyon gibi çeşitli iyileştirme yöntemleriyle iyileştirilmesi gereken sorunlu zeminlerden biridir. Sıfırın altındaki sıcaklıklardan mevsimsel olarak etkilenen zemin yapılarının tasarımı ve inşası, uygun termal koşullar altında yapı malzemelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesini gerektirir. Suya doymuş malzemeler, donmuş-donmamış zemin arayüzünde kısmen donmuş zemin bölgesi sergiler [1]. Soğuk iklimde sahip ülkelerde çalışmalar yürüten araştırmacılar, donma ve çözülme döngülerinin sayısındaki artışın zemin mukavemetini zayıflatırken zeminde yüksek gözeneklilik yarattığını belirtmişlerdir [2-7].

Permafrost (kalıcı don) ve mevsimsel olarak donmuş zeminler, Dünya yüzeyinin yaklaşık %24'ünü kaplar. Küresel iklim değişikliği daha derin aktif katmanlar ve permafrost bölgelerindeki çözülme kalınlığının artmasıyla bağlantılıdır [8-10].

İklim değişikliği, dünya çapında daha sık aşırı olaylara neden olarak öngörülmemeyen hava modellerine yol açmıştır. Mevsimsel donma yaşanan bölgelerde, alt zemin ve temel zeminleri tekrarlayan donma ve çözülme döngülerinden önemli ölçüde etkilenir, sıkıştırılmış zeminlerin geoteknik özelliklerini bozar ve potansiyel olarak yapısal arızalara neden olur [11-13].

Son yıllarda Türkiye'nin doğu kesimleri kış aylarında daha fazla yağış almaya başlamıştır. Aynı zamanda zemin donma derinliği de yıllara göre artmıştır. Sivas ilinde donma derinliği yaklaşık 1m'ye ulaşmıştır. Zemin yeraltı gözeneklerindeki su kışın donar ve ilkbaharda erimeye başlar. Donma ve çözülme ile zeminde meydana gelen değişimler, zemin fiziko-mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Don etkisine karşı savunmasız olan donmaya duyarlı zeminler; ince tane içeriği, özgül yüzey alanı ve mineraloji gibi faktörlerden etkilenen yüzey kabarması sergiler. % 6'dan fazla ince parçacık içeriğine sahip zeminler, don kabarmasına daha duyarlıdır [14-20].

Don etkisi; zemin tane boyutu dağılımı, özgül yüzey alanı, gözenek sıvılarının kimyasal özellikleri, sınırlayıcı basınç, su kaynağı ve sıcaklık değişimleri gibi iç ve dış faktörlerden etkilenir. Özellikle, azalan parçacık boyutu ile don kabarmasına karşı artan duyarlılık arasındaki ilişki yaygın olarak kabul edilmektedir [21-27].

Donma-çözülmenin alt temel zeminlerinin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi özellikle bazı araştırmacılar tarafından araştırılmıştır. Donma-çözülmenin CBR (%) üzerindeki etkisi ve donma-çözülmenin havada kurutulmuş numunelerde bile CBR'yi (%) önemli ölçüde etkileyebileceği sonucuna varmıştır. Donma-çözülmeden sonra CBR (%) etkileyen faktörler arasında parçacık boyutu dağılımı, boşluk oranı ve su içeriğindeki değişiklikler yer almaktadır [28].

Benzer bir çalışmada CBR'de %21 ile %86 arasında bir azalma olduğunu, CBR'de ki (%) maksimum değişimin en yüksek sınırla karakterize edilen zeminde meydana geldiği belirtilmiştir [29]. Çeşitli çalışmalar donma-çözülme testleri yürütmüştür ve farklı araştırma koşullarında dikkate değer farklılıklar vardır. Bu koşullar; donma ve çözülme sıcaklıklarını, süreyi ve döngü sayısını içerir. Donma sıcaklığının küçük bir etkisi olsa da araştırmacılar çalışmalarında döngü sayısının kritik rolünü vurgulamaktadır. Zeminin belirli sayıda donma-çözülme döngüsüne kadar özellikleri önemli ölçüde değiştiği ve bundan sonra zemin özelliklerinin stabilize olduğu ileri sürülmektedir [30].

Bu çalışma, düşük plastisiteli siltli kilin 9,08 kg (zemin ince taneli olduğu için standart yükün 2 katı ağırlık tercih edilmiştir) sürşarj yükünde değişen donma-çözülme döngülerinin CBR (%) üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Alt temel zeminin donma hassasiyeti genellikle soğuk iklimler için dikkate alınırken dona duyarlı yerel malzemeler ılıman iklimlerde dikkate alınır. Özellikle büyük setlerin veya yolların altında da kullanılabilir. Ancak, iklim değişikliğinin öngörülmemeyen hava durumlarının neden olmasıyla ılıman iklimlerin bile önemli donma-çözülme etkileri yaşaması beklenmektedir. Bu, büyük şehirlerdeki kritik altyapı için bir risk oluşturur ve giderek daha sık görülen olumsuz hava olayları sırasında önemli hasara yol açar. Donma-çözülme döngüleri; soğuk iklim bölgelerinde inşa edilen karayolu, demiryolu ve baraj gibi mühendislik yapılarını etkileyen önemli unsurlardan biridir. Soğuk iklim bölgelerinde zeminler yılda en az bir donma-çözülme döngüsüne maruz kalırlar. Ayrıca, zeminler genellikle mühendislik altyapısının bir parçası olarak kullanıldığından uygun bir teknik çözümün belirlenmesi her zaman önemlidir. Bu amaçla, farklı sayıda donma-çözülme döngülerine maruz kalmış killi zeminlerin farklı sürşarj yükünde ve puzolonik bir malzeme olan uçucu kül katılması ile davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, Sivas bölgesinde sıklıkla bulunan CL türü siltli kil kullanılmıştır. Killi zemin malzemesi üniversite kampüsü içerisinde yapımı devam eden Tıp Fakültesi Araştırma Hastanesinin temel kazısından çıkan ve yurtlar bölgesinde dolgu olarak kullanılan zeminden alınmıştır. Doğal zemin için tane boyutu dağılımı test sonucu Şekil 1'de gösterilmiştir. Laboratuvar çalışmalarından; likit limit değeri %46,20, plastik limit %27,33, plastisite indeksi %18,86, maksimum kuru yoğunluk 1,66 gr/cm³, optimum su içeriği %20 olarak belirlenmiş ve Tablo 1'de sunulmuştur. Zemin numunesi, Birleştirilmiş Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre sınıfı düşük plastisiteli bir kil olan CL olarak belirlenmiştir.

Uçucu Kül

Uçucu kül, kömürle çalışan bir fırının baca gazlarından çıkarılan mineral madde olarak tanımlanır. Uçucu kül genellikle içi boş silikon, alüminyum ve demir oksit küllerinden ve oksitlenmiş karbondan oluşur. Şekil 2’de, kullanılan uçucu külün bir görseli verilmiştir. Uçucu kül, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi’ne göre plastik olmayan ince silt olarak kabul edilebilir. Uçucu külün bileşimi, yakılan kömürün doğasına ve santralin operasyonel özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişir [31]. Uçucu kül, silisli veya silisli-alüminli olarak tanımlanan puzolanik bir malzemedir ve bu nedenle zeminlerin mühendislik davranışı uçucu kül, çimento veya kireç eklenerek iyileştirilebilir.

Çalışmada, Türkiye’deki Kangal ilçesi termik santralinde üretilen endüstriyel bir atık olan uçucu kül, zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kimyasal katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Kangal uçucu külü bir linyit kömürünün pulverize edildikten sonra yakılması ile elde edilir ve bölgede yılda yaklaşık 4 milyon ton uçucu kül üretilmektedir. Bu çalışmada kullanılan Kangal uçucu külünün tane çapı dağılımı Şekil 1’de, fiziksel-kimyasal özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. ASTM’e göre, Kangal uçucu külü kimyasal bileşimi nedeniyle C Sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılır.

Tablo 2. Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Table 2. Physical and Chemical Properties of Fly Ash

Birleşim/içerik	Kangal Uçucu Kül	Birleşim/içerik	Kangal Uçucu Kül
Tip	Sınıf C yüksek kireçli uçucu kül	Ateşleme Kaybı	2,15
SiO_2 (S)	33,14	Serbest CaO	6,35
Al_2O_3 (A)	14,7	Reaktif silisli	28,85
Fe_2O_3	4,32	Reaktif CaO	25,6
S+A+F	52,16	Yoğunluk (g/cm^3)	2,24
CaO	35,18	Kuru gevşek birim ağırlık (g/cm^3)	0,81
MgO	1,18	90 μm elekte tutulan miktar (%)	28
SO_3	7,85	45 μm elekte tutulan miktar (%)	52
K_2O	0,92	Puzolanik aktivite (TS EN 450 1998)	
Na_2O	0,58	(%) 7D	72
Na_2O eş değer.	1,19	(%) 28D	78

Tablo 3. Numunelerin optimum su içerikleri

Table 3. Optimum water contents of the samples

Saf zeminden oluşan numunenin optimum su içeriği	%20
%5 uçucu kül katkılı zeminden oluşan numunenin optimum su içeriği	%20
%10 uçucu kül katkılı zemin den oluşan numunenin optimum su içeriği	%21
%15 uçucu kül katkılı zemin den oluşan numunenin optimum su içeriği	%25



Şekil 3. Hazırlanan numunelerin sıkıştırılması
Figure 3. Compression of prepared samples

Zemin Numunelerinin Hazırlanması

Siltli-killi zeminin ve uçucu kül ile stabilize edilmiş siltli-killi zeminden oluşan karışımların CBR (%) değerlerini değerlendirmek için öncelikle doğal zeminin ve sonrasında karışımların optimum su içeriği ASTM D 698'e göre Proctor deneyinden hesaplanmıştır. Numunelere ait optimum su içerik değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) testi, zeminin kayma direncini ve stabilitesini belirlemek amacıyla kontrollü nem ve hacim ağırlığı koşullarında ASTM D1883-2007 standardına uygun şekilde uygulanmıştır. Her numuneden üçer adet yapılmış, bulunan sonuçların ortalamaları alınmıştır. Fırında kurutulmuş zemin 4 numaralı elekten geçirilerek deneylerde kullanılmıştır. Her bir CBR kalıbı için 5 kg doğal zemin kullanılmış ve bu zemine; zeminin ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında

uçucu kül eklenerek optimum su içeriklerinde zemin karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımları homojen olarak hazırlamak için karışımlara eklenen su iki aşamada eklenmiştir. İlk aşamada, su katılmadan karıştırılan karışıma toplam su miktarının yarısı eklenmiş ve karışım 15 dakika boyunca elle karıştırılmıştır. Ardından, kalan su ilave edilerek 10 dakika daha karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler, laboratuvar tipi sıkıştırma cihazı ile her biri 56 darbe alacak şekilde üç tabaka halinde sıkıştırılmıştır Şekil 3'de bu işlemin görseli sunulmuştur.

Sıkıştırma işleminin sonunda 9,08 kg sürşarj yükünde, numuneler 96 saat suya konulmuş ve su içerisinde dijital komparatör saati ile şişme miktarları kaydedilmiş, 96 saatin sonunda numuneler sudan çıkarılıp 15 dakika süzölmeye bırakılmıştır (Şekil 4) [33].



Şekil 4. CBR deneyi için hazırlanan numunelerin suda bekletilmesi ve süzülmesi
Figure 4. Soaking and filtering of samples prepared for the CBR test



Şekil 5. CBR deneyi için hazırlanan numunelerin styrafoam kutusuna yerleştirilmesi
Figure 5. Placing the samples prepared for the CBR test in the styrafoam box.



Şekil 6. İklimlendirme kabini, potansiyometrik cetvel ve veri kaydedici
Figure 6. Air conditioning chamber, potentiometric ruler and data logger



Şekil 7. TestLab Basic yazılımı, potansiyometrik cetvel ve veri kaydedici
Figure 7. TestLab Basic software, potentiometric ruler and data logger

Tablo 4. Deney Numunelerine Uygulanan Kademeli Sıcaklık-Zaman Değişimi
Table 4. Gradual Temperature-Time Change Applied to Test Samples

Aşama	Sıcaklık Aralığı (°C)	Süre (Saat)
1	20°C → 10°C	3
2	10°C → 0°C	3
3	0°C → -10°C	3
4	-10°C → -20°C	3
5	-20°C	12
6	-20°C → -10°C	3
7	-10°C → 0°C	3
8	0°C → 10°C	3
9	10°C → 20°C	3
10	20°C	12

(Deney başlangıç sıcaklığı 20 °C den 10°C ye değil de o anki oda sıcaklığının 10 °C ye düşmesiyle başlatılmış ve daha sonra döngü Tablo 4'e göre uygulanmaya devam etmiştir.)

Sudan çıkarılan numuneler donma-çözölmeye maruz bırakılmadan ve belli sayılarda donma-çözölmeye döngülerine maruz bırakılarak CBR yüklemeye cihazına yerleştirilmiştir ve CBR (%) değerlerine bakılmıştır.

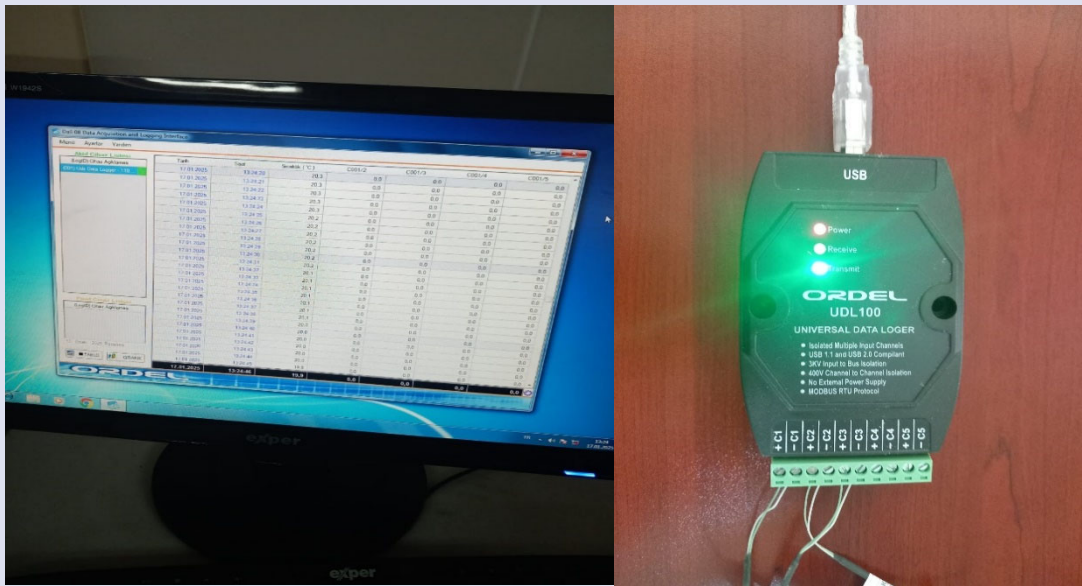
Donma-çözölmeye testi sonuçlarını etkileyen başlıca faktörler şunlardır: i) Zemin ile CBR kalıbı arasındaki yan sürtünmeler; ii) Donma yönü; iii) Donma sıcaklığı ve süresi; ve iv) Donma-çözölmeye çevrimlerinin sayısı. Yan sürtünme, dondurma testlerindeki başlıca sorunlardan biri gibi görünmektedir. Yan sürtünmeyi en aza indirmek için mevcut yöntemler arasında kalıp iç duvarına ince bir yağ tabakası uygulanması ve kalıp ile zemin arasında selüloz folyo, mumlu kağıt, polietilen film kullanılması yer alır [34]. Çok halkalı hücre veya konik silindirik dondurma hücresi kullanımı gibi daha gelişmiş tekniklerde geliştirilmiştir. Ancak, mevcut çalışma için, kalıbın iç duvarına ince bir yağ tabakasının uygulanmasının kalıp ile zemin arasındaki yan sürtünmeyi en aza indirmede pratik ve etkili olduğu bulunmuştur [35-36]. Yerinde dondurma genellikle üstten gerçekleştiğinden ve yanal dondurma ihmal edilebildiğinden dondurma ve çözme testleri sırasında üstten alta doğru tek yönlü dondurma hedeflenmiştir [37]. Bu koşul, CBR kalıbını 30x30x30 cm³ boyutlarındaki et kalınlığı 5cm olan strafor kutulara konularak, yanal yüz etrafına yalıtım uygulanarak ve sadece üst kısmın donmaya maruz bırakılmasıyla yapılmıştır. Donma-çözölmeye kurulumunun ayrıntıları Şekil 5’de gösterilmiştir. Hazırlanmış numunelerin programlanabilir donma-çözölmeye kabine yerleştirilmesi, potansiyometrik cetvel (LVDT) ve bağlantılı elemanları ile veri kaydedici (Testbox 1001) Şekil 6’da gösterilmiştir.

Bu çalışmada, dondurucu kabine yerleştirilen numunelerde meydana gelen kabarma ve oturma

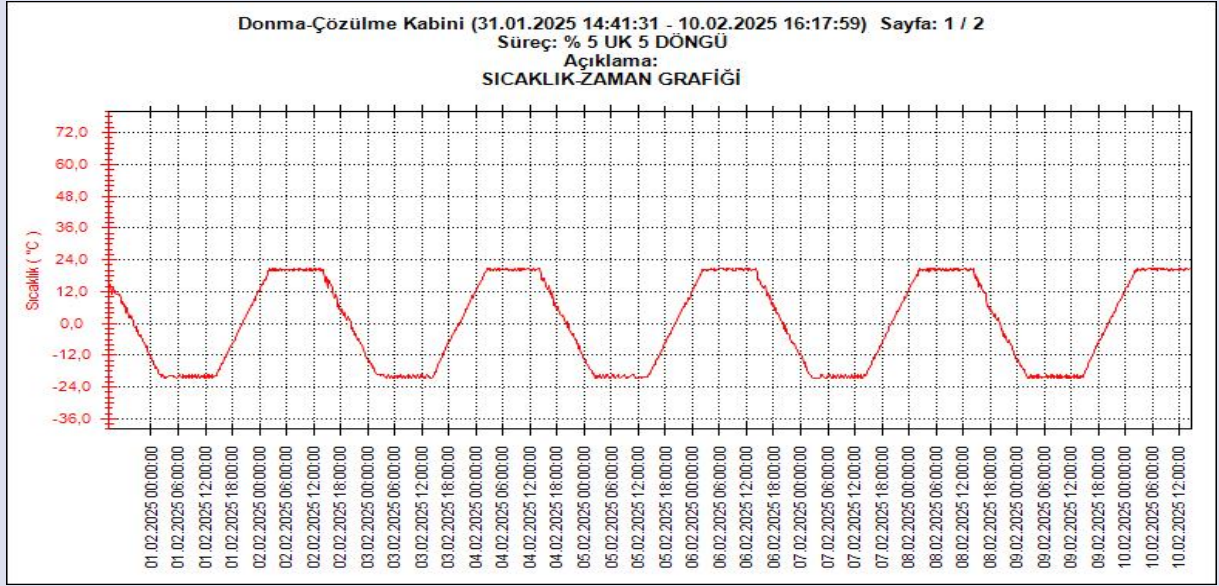
hareketleri, potansiyometrik cetvel kullanılarak zamana bağlı olarak izlenmiş ve elde edilen veriler dijital ortama aktarılmıştır. Veri analizinde TestLab Basic yazılımından yararlanılarak sıcaklık değişimlerinin zemin numuneleri üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir (Şekil 7). Yapılan ölçümler aracılığıyla, donma ve çözölmeye döngüleri süresince numunelerde gözlemlenen düşey deformasyonlar hem grafiksel hem de sayısal yöntemlerle değerlendirilmiştir. Bu yöntem sayesinde, test edilen zeminlerin termal döngüye karşı verdiği tepkiler bilimsel esaslara dayalı olarak analiz edilmiştir [38].

Donma-çözölmeye maruz bırakılan numunelere kademeli donma-çözölmeye ve kapalı sistem uygulanmıştır. Donma-çözölmeye testi ASTM D560’a göre gerçekleştirilmiştir. Numuneler, farklı sıcaklık dilimlerinde belirli sürelerle soğutulup ısıtılacak ve bu süreç, her bir sıcaklık dilimi için belirlenen süreler doğrultusunda tekrarlanacaktır. Bu kademeli döngü, numunelerin sıcaklık değişimlerine farklı zaman dilimlerinde maruz bırakılmasını sağlamak için sistematik bir şekilde düzenlenmiştir. Uygulanan kademeli sıcaklık değişimi değerleri Tablo 4’de verilmiştir.

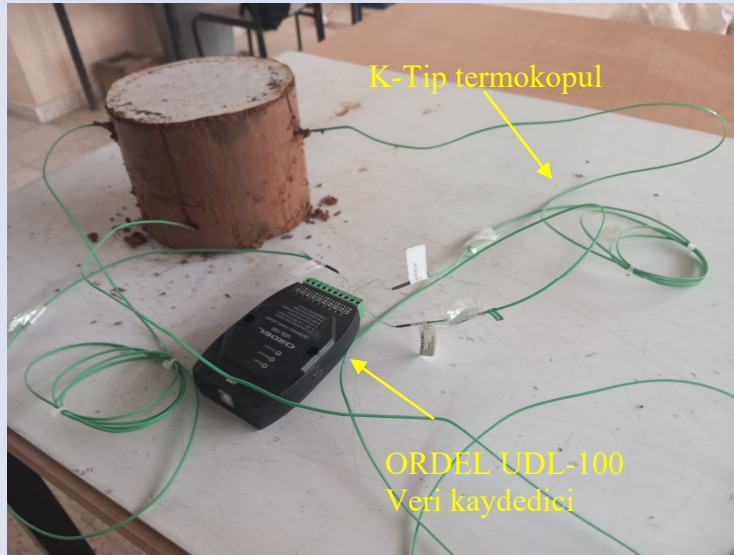
Kademeli sıcaklık değişimi uygulamasının amacı, deneydeki sıcaklık döngüsünün doğal çevre koşullarına benzemesini sağlamaktır. Türkiye’de ilkbahar ve sonbahar mevsimleri, sıcaklıkların ani değil, yavaş ve kademeli olarak değiştiği geçiş dönemleridir. Hava sıcaklığı gece-gündüz ve mevsimsel olarak donma noktasının altında ani düşüşler göstermez. Ani sıcaklık değişimleri zemin yapısını olumsuz etkileyebilir. Kademeli sıcaklık değişimi, numunelerin doğal donma-çözölmeye süreçlerinin daha sağlıklı gözlemlenmesini sağlayarak, daha güvenilir sonuçlar elde edilmesine yardımcı olur [39].



Şekil 8. DaLi 08 Data Acquisition and Logging Interface programı ve UDL 100 (Universal Data Logger 100) cihazı
Figure 8. DaLi 08 Data Acquisition and Logging Interface program and UDL 100 (Universal Data Logger 100) device



Şekil 9. 5 donma-çözülme döngüsü için sıcaklık-zaman grafiği
Figure 9. Temperature-time graph for 5 freeze-thaw cycles



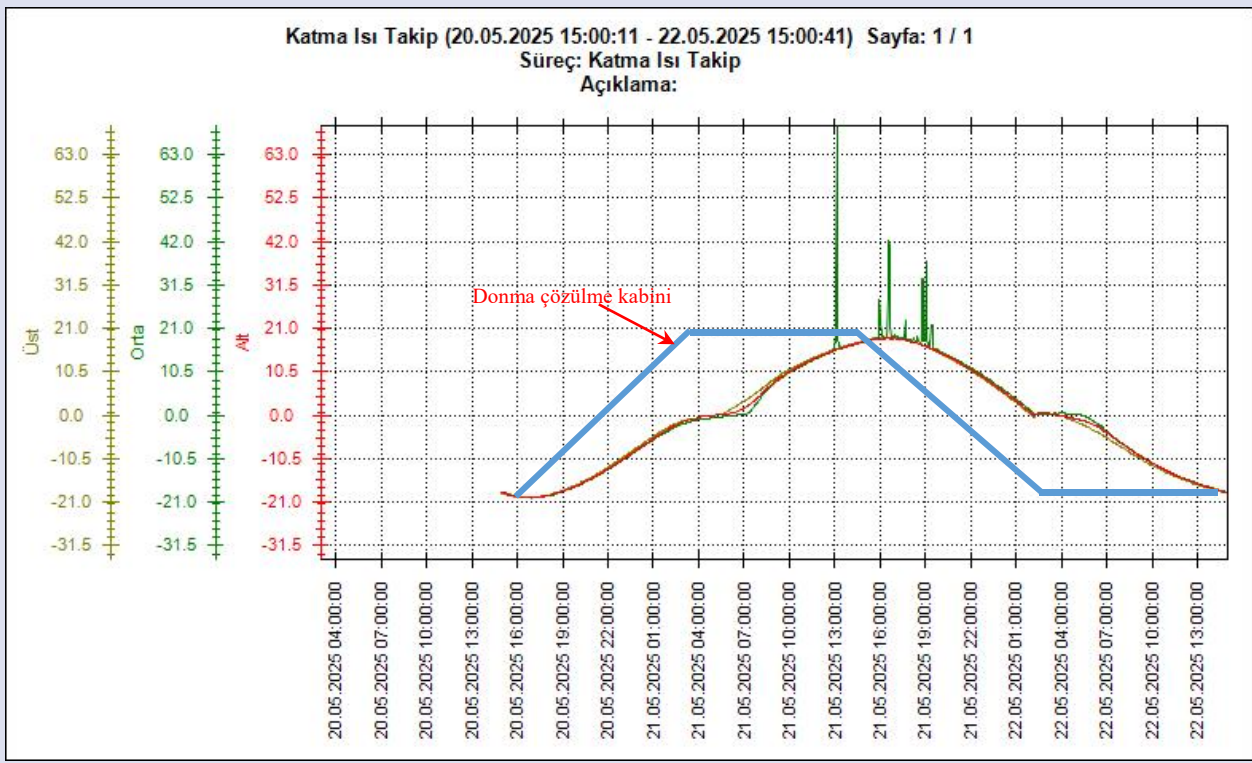
Şekil 10. ORDEL UDL-100 ve K-Tip termokopul
Figure 10. ORDEL UDL-100 and K-Type thermocouple

Donma kabininde meydana gelen sıcaklık değişimlerini izlemek amacıyla, UDL 100 (Universal Data Logger 100) cihazı ile entegre çalışan DaLi 08 Veri Toplama ve Kayıt Arayüz Programı birlikte kullanılmıştır. Kabin içerisine yerleştirilen sıcaklık sensörlerinden elde edilen veriler, UDL veri kaydedici aracılığıyla toplanmış ve DaLi 08 yazılımı üzerinden belirli zaman aralıklarında otomatik olarak kayıt altına alınmıştır. Bu veriler, zaman eksenine göre grafiksel olarak sunulurken donma süreci boyunca sıcaklık değişimleri kesintisiz ve yüksek hassasiyetle izlenmiştir. Sistem sayesinde sıcaklık verilerinin anlık takibi ve detaylı analizi mümkün hale gelmiştir [40]. Uygulanan sisteme ait görseller Şekil 8'de verilmiştir.

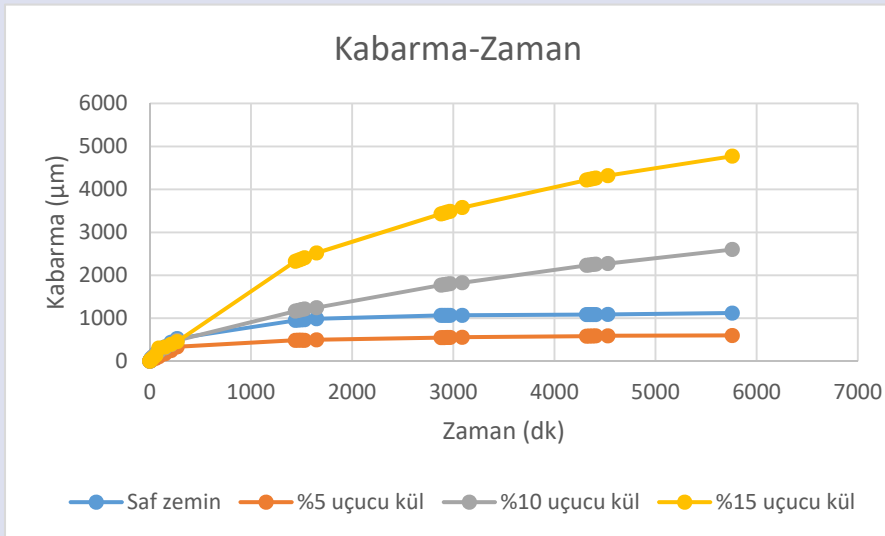
Altı saat, numunelerin yüksekliğindeki değişimin sabit hale geleceği orantılı bir süredir ancak çalışmamızda değişiklikleri göz ardı etmemek için 6 saat daha beklenerek toplam 12 saat beklenmiştir. Bu, donma aşamasındaki yükseklik artışının ve çözülme aşamasındaki yükseklik azalmasının durduğu anlamına gelir. Donma-çözülme döngüleri 1-2-5 döngüye kadar devam etmiştir. Bu döngü sayısı, zeminin mukavemetindeki azalmanın çoğunun birincil döngülerde gerçekleşmesine rağmen sonraki döngülerde değişime de bakılmıştır. Döngü sayıları numunelerde yeni bir denge koşulunun baskın hale gelmeyeceğini deneyimlemek için seçilmiştir. Beş döngü için sıcaklık-zaman grafiği Şekil 9'da verilmiştir.

Numuneler içinde katmanlar arasındaki sıcaklık değişimlerinin takibi için numune içerisine, üç tabaka ortasına denk gelecek şekilde K-Tip termokopullar yerleştirilerek sıcaklık değişimi takip edilmiştir (Şekil 10). Bu amaçla termokopullardan gelen veriler ORDEL UDL-100 veri okuyucu ile okunmuş ve kaydedici program ile

bilgisayar tarafından veriler kaydedilmiştir. Donma kabini ve numunedeki katmanlar arasındaki sıcaklık değişimleri Şekil 11’de gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre katmanlar arasındaki sıcaklık değişimlerinin hemen hemen aynı olduğu gözlemlenmiştir.



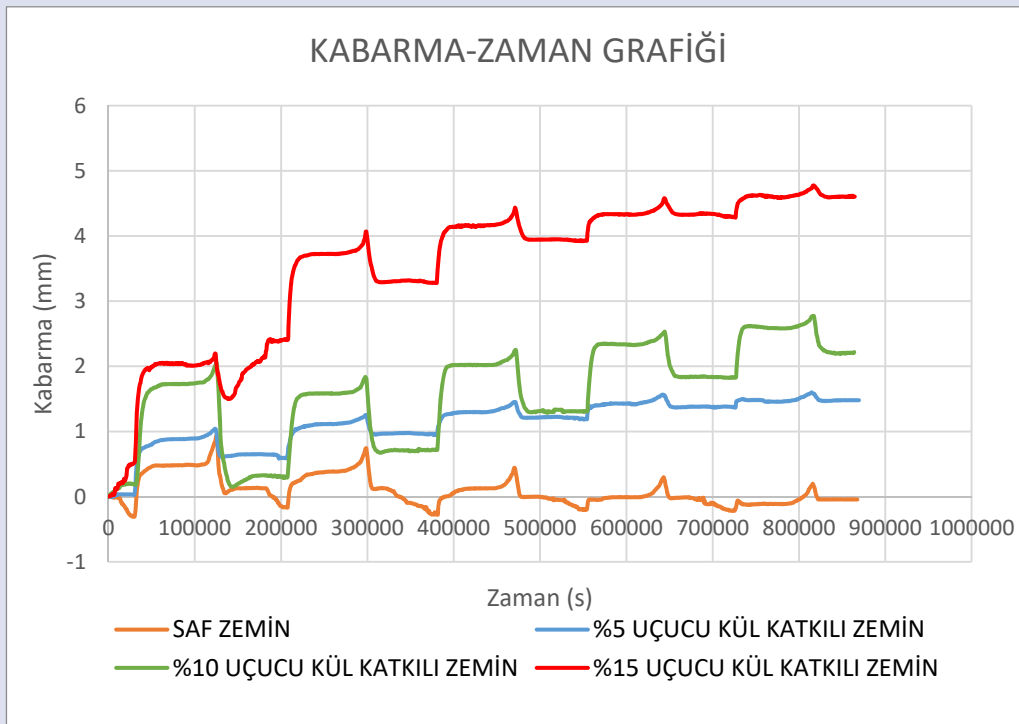
Şekil 11. Donma kabini ve katmanlar arasındaki sıcaklık-zaman grafiği
Figure 11. Freezing chamber and temperature-time graph between layers



Şekil 12. 96 saat suda bekletilen numunelerin kabarma miktarlarının karşılaştırılması
Figure 12. Comparison of the swelling amounts of samples kept in water for 96 hours.

Tablo 5. Kürlenme sonrası şişme miktarları, donma-çözülme sırasındaki kabarma miktarları ve ortalama CBR değerleri
Table 5. Swelling amounts after curing, swelling amounts during freezing-thawing and average CBR values

Numune Durumu	Karışım	Kürlenme Şişmesi (%)	Donma-Çözülme Kabarması (%)			Ortalama CBR (%) Değerleri			
			1 Döngü	2 Döngü	5 Döngü	0 Döngü	1 Döngü	2 Döngü	5 Döngü
Kürlenmiş	Saf Zemin %5	0,973	0,458	0,188	1,102	4,25	4,73	4,59	4,68
Kürlenmiş	UK Katkılı Zemin %10	0,520	0,534	1,305	1,265	13,98	10,13	9,06	9,39
Kürlenmiş	UK Katkılı Zemin %15	2,262	0,700	0,457	2,422	9,23	6,96	6,33	5,83
Kürlenmiş	UK Katkılı Zemin	4,150	0,102	1,764	3,960	7,93	7,02	7,00	8,04



Şekil 13. 5 donma-çözülme döngüsüne ait kabarma-zaman grafiği
Figure 13. Swelling-time graph of 5 freeze-thaw cycles

Bulgular ve Tartışma

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyleri 96 saat kürlenmiş koşullar için gerçekleştirilmiştir. 96 saat boyunca suda bekletilen numunelerin dijital komparatör saati ile şişme miktarları takip edilmiştir. Elde edilen şişme miktarlarının değişim eğilimi Şekil 12’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek şişme miktarı %15 uçucu kül katkılı zemin numunesinde ölçülürken en düşük şişme miktarı ise %5 uçucu kül katkılı zemin numunelerinde meydana gelmiştir. Bu durum, uçucu kül miktarındaki artışın şişme miktarını her zaman azaltmak yerine belirli bir oranın üzerinde arttırabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla uçucu kül katkı

malzemesinin zemine uygun miktarda ilave edilmesi gerektiğini de göstermektedir.

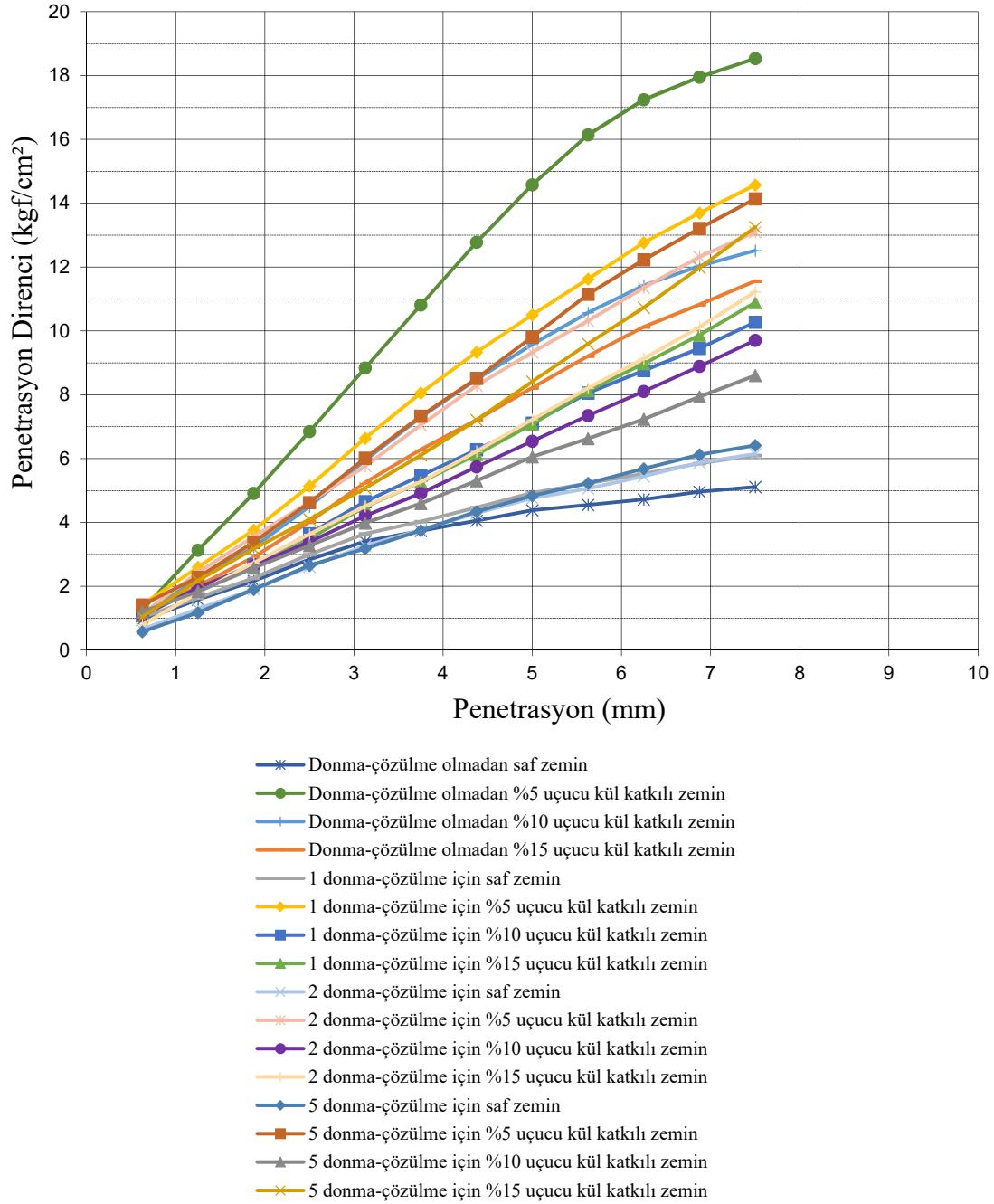
96 saat suda bekletilen numuneler daha sonra donma-çözülme olmadan ve belli sayılarda donma-çözülme döngülerine tabi tutulduktan sonra CBR değerlerine bakılmıştır. Donma ve çözülme performansının değerlendirilmesi için ASTM D, 1883-2007’ye göre belirlenen tasarım CBR değerleri (en büyük CBR 2,54 mm veya 5,08 mm) analiz edilmiştir. Kürlenme sonrası şişme miktarları, donma-çözülme sırasındaki kabarma miktarları ve ortalama CBR değerleri Tablo 5’de gösterilmiştir

Elde edilen verilere göre 5 donma-çözülme döngüsü sırasında numunelere ait kabarma-zaman grafikleri Şekil 13’te verilmiştir. Elde edilen sıcaklık-zaman grafiklerine göre

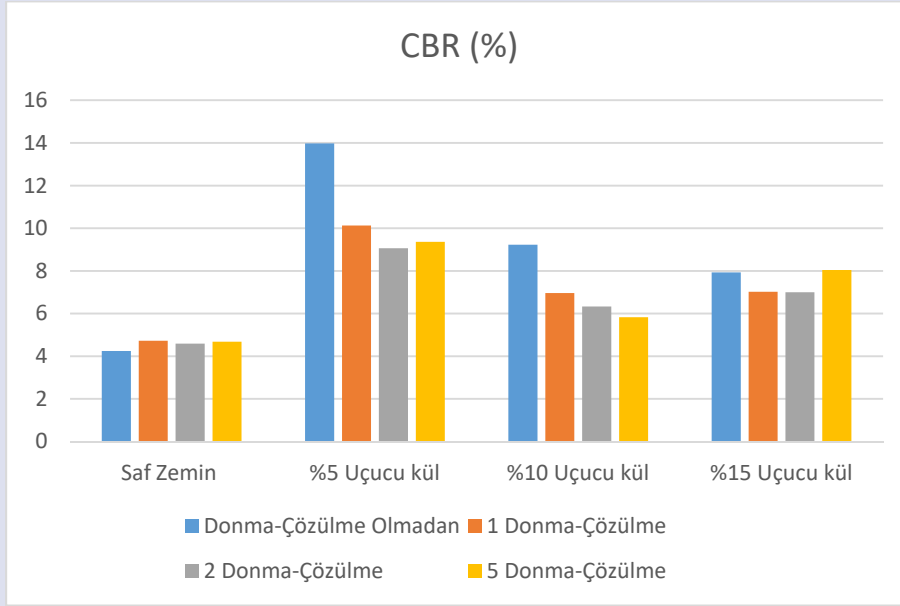
sıcaklık değişim döngüsünün zeminin kabarma döngüsüne yansıdığı ve ilk donmadan itibaren kabarmanın başladığı, çözünme aşamasında bu kabarmanın bir kısmının geri döndüğü grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Ayrıca, sıcaklık değişim döngüsüne bağlı olarak donma sırasındaki kabarmanın ve çözülme sırasındaki geri dönen kabarmaların azalarak devam ettiği görülmektedir.

CBR deneyine tabi tutulan numunelerin donma-çözülme miktarları ve uçucu kül miktarları dikkate alınarak elde edilen

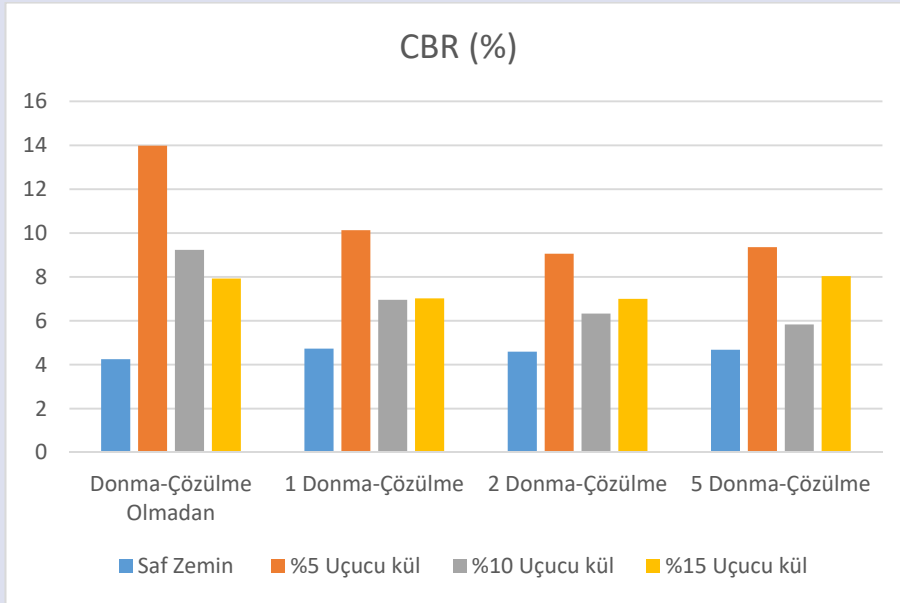
penetrasyon dirençleri Şekil 14' te gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre en yüksek penetrasyon direncini donma-çözülme olmadan %5 uçucu kül katkılı zemin gösterirken en düşük penetrasyon direncini ise yine donma-çözülme olmadan saf zemin göstermiştir. Uçucu kül miktarının doğal zeminin penetrasyon direncini arttırdığı ve uçucu kül miktarının penetrasyon direnci üzerinde önemli olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 14. Elde edilen numunelerin penetrasyon dirençleri
Figure 14. Penetration resistances of the obtained samples.



Şekil 15. Farklı sayıda donma-çözülme döngülerine maruz bırakılan numunelerin CBR değerleri
Figure 15. CBR values of samples exposed to different numbers of freeze-thaw cycles.



Şekil 16. Uçucu kül eklenen zeminlerin CBR değerlerinin karşılaştırılması
Figure 16. Comparison of CBR values of soils with fly ash added

Donma-çözülme sayılarına göre her zemin numunesinin kendi içerisinde CBR değerlerinin karşılaştırılması Şekil 15'te verilmiştir. Elde edilen grafiğe göre donma-çözülme sayısı fark etmeksizin en yüksek CBR değerini %5 uçucu kül katkıli zemin karışımı göstermiştir. En düşük CBR değerini ise uçucu kül katkısı olmayan saf zemin göstermiştir.

Uçucu kül eklenmeden ve uçucu kül eklenen zemin numunelerin her donma-çözülme döngüsü için bulunan CBR değerlerinin karşılaştırılması Şekil 16'da verilmiştir.

Elde edilen grafiğe göre her karışım için donma-çözülme sayısının CBR değeri üzerinde farklı sonuçları olduğu gözlemlenmiş ancak bir genelleme yapılacak olursa en iyi sonuç donma-çözülmenin olmadığı zemin numunelerinde olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuçlar ve Öneriler

Çalışma kapsamında, CL sınıfındaki doğal zemin ile bu doğal zemine ağırlıkça belirli oranlarda uçucu kül

eklenerek oluşturulan karışımlardan toplam 48 adet numune, ASTM D1883-2007 standardına uygun şekilde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Bu numunelerin bir kısmı donma-çözülme işlemine tabi tutulmayarak, bir kısmı ise donma-çözülme işlemine tabi tutularak CBR deneyi ile incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen verilere göre donma-çözülme döngülerinin numunelerin CBR değerlerinde %12-%35 oranında düşüşe neden olduğu tespit edilmiştir.

Uçucu kül katkısının ise zeminin saf haline göre CBR değerlerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. En yüksek CBR değerleri zeminin ağırlığının %5'i kadar uçucu kül eklenerek elde edilen karışımlarda ortaya çıkmıştır. %5'den daha fazla uçucu kül katkısı ise CBR değerlerinde %5'e göre daha az iyileştirme meydana getirmiştir. Bu sonucun uçucu külün içeriğindeki SO₃ miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir. SO₃'ün zemin içerisindeki bağlayıcı elemanları etkilediği sanılmaktadır.

Doğal zeminin donma-çözülme olmadan CBR değeri % 4,25, %5 uçucu kül katkılı zemin numunesinin ise CBR değeri %13,98'dir. Bu sonuçlara göre %5 uçucu kül katkısı doğal zemine göre CBR değerini % 228,94 oranında artırdığı hesaplanmıştır. Bu artış % 5 den daha fazla olan uçucu kül katkısında azalmaya başlamıştır.

Numunelerin 96 saat kürlenmesi sonucunda donma çözülme deneyine tabii tutulması sonuçlardan oluşabilecek beklentiyi düşürmektedir çünkü killi olan zemin kürlenme neticesinde içerisine bir miktar su alır ve şişer. Bu durum üst tabakalarda bir yumuşamaya-gevşemeye sebep olmaktadır ve donma çözülme performansını da büyük oranda etkilemektedir. Oysaki gerçekte hazırlanmış yol üst yapılarında ve yüklenmiş dolguların deney başlangıcında olduğu gibi su altında kalmışlık durumu yoktur. Dolayısıyla bu çalışmanın sonuçları optimum su muhtevasında sıkıştırılan ve kürlenmemiş zeminlerde yapılmış olsaydı değerlerin çok daha fazla çıkacağı bir durumu da göstermiştir.

Literatürde ince taneli zeminler üzerinde yapılan donma-çözülme deneyleri ile yapılan çalışma uyum göstermektedir. Zemine katılan puzolonik malzemeler zemin tanelerini çimentolar ve iç gözenekleri doldururken aynı zamanda birbirine bağlı ağ benzeri yapı oluşturur ve böylece sıkıştırılmış zeminin iç kararlılığını artırır. Bu kararlılığın sürekli olmasında ve bozulmasını önlemede üzerine gelen sürşarj yükünde etkisi vardır. Literatürde ince taneli zeminler üzerinde CBR deneyleri için standart yük 4.54 kg'nin yerine çalışmada 9.08 kg kullanılmıştır. Literatürde zemin üzerine gelen sürşarj yükü etkisinin olduğu donma-çözülme çalışmasına rastlanılmamıştır. Sürşarj yükü etkisinin değerlendirilmesi için yeni çalışmalar yapılabilir.

Teşekkürler

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (CÜBAP, Proje Numarası: M-2021-810) tarafından desteklenmiştir.

Kaynak

- [1] Czurda KA, Hohmann M. Freezing effect on shear strength of clayey soils. *Appl Clay Sci* 1997;12(1-2):165-187. doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(97\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(97)00005-7)
- [2] Chen ZHY, Zhou JX, Wang HJ. *Soil Mechanics*. Qinghua University Press; 1994.
- [3] Thevanayagam S, Shenthana T, Mohan S, Liang J. Undrained fragility of clean sands, silty sands and sand silts. *J Geotech Geoenviron Eng* 2002;128(10):849-859.
- [4] Coop MR. The mechanics of uncemented carbonate sand. *Geotechnique* 1991;40(4):607-662.
- [5] Allmar MA, Atkinson JH. Mechanical properties of reconstituted bothkenner soils. *Geotechnique* 1992;42(2):289-301.
- [6] Georgiannou VN, Burland JB, Hight DW. The undrained behavior of clayey sands in triaxial compression and extension. *Geotechnique* 1990;40(3):431-449.
- [7] Jafari MK, Shafiee A. Mechanical behavior of composite clays. *Can Geotech J* 2004;41(6):1152-1167.
- [8] Sutherland Rolim Barbi P, Tavassoti P, Tighe SL. Climate change impacts on frost and thaw considerations: case study of airport pavement design in Canada. *Appl Sci* 2023;13(13):7801.
- [9] Anisimov OA, Shiklomanov NI, Nelson FE. Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models. *Glob Planet Change* 1997;15(3-4):61-77.
- [10] Venäläinen A, Tuomenvirta H, Heikinheimo M, Kellomäki S, Peltola H, Strandman H, Väisänen H. Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape. *Clim Res* 2001;17(1):63-72.
- [11] Zhang F, Jing R, Feng D, Lin B. Mechanical properties and an empirical model of compacted silty clay subjected to freeze-thaw cycles. In: *Innovative Materials and Design for Sustainable Transportation Infrastructure*; 2015.
- [12] Alkire B, Morrison J. Change in soil structure due to freeze-thaw and repeated loading. *Transp Res Rec* 1982;918:15-22.
- [13] Chamberlain E, Iskander I, Hunsiker S. Effect of freeze-thaw on the permeability and macrostructure of soils. In: *Proceedings of the International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agriculture, Range and Forest Lands*. Hanover, NH: CRREL; 1990. p. 145-155.
- [14] Henry KS. A review of the thermodynamics of frost heave. *CRREL Tech Rep* 2000;TR 00-16:25.
- [15] Arenson LU, Sego DC. A new hypothesis on ice lens formation in frost-susceptible soils. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost*; 2008. p. 59-64.
- [16] Hendry MT, Onwude LU, Sego DC. A laboratory investigation of the frost heave susceptibility of fine-grained soil generated from the abrasion of a diorite aggregate. *Cold Reg Sci Technol* 2016;123:91-98.
- [17] Liu X, Cheng H, Chen H, Guo L, Fang Y, Wang X. Theoretical study on freezing separation pressure of clay particles with surface charge action. *Crystals* 2022;12:1304.
- [18] Bilodeau JP, Dorée G, Pierre P. Gradation influence on frost susceptibility of base granular materials. *Int J Pavement Eng* 2008;9(6):397-411.
- [19] Konrad JM, Lemieux N. Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material. *Can Geotech J* 2005;42(2):515-527.
- [20] Zhang Y, Michalowski RL. Thermal-hydro-mechanical analysis of frost heave and thaw settlement. *J Geotech Geoenviron Eng* 2015;141(7):04015027.
- [21] Do J. Frost heaving and induced pressure of unsaturated interfacial zone between gravel ballast and subgrade. *Appl Sci* 2022;12:2811.

- [22] Haas RCG. Pavement Design and Management Guide. Waterloo, Ontario, Canada: Transportation Association of Canada; 1997.
- [23] Ji Y, Zhou G, Hall MR. Frost heave and frost heaving-induced pressure under various restraints and thermal gradients during the coupled thermal-hydro processes in freezing soil. Bull Eng Geol Environ 2019;78:3671-3683.
- [24] Wu D, Lai Y, Zhang M. Thermo-hydro-salt-mechanical coupled model for saturated porous media based on crystallization kinetics. Cold Reg Sci Technol 2017;133:94-107.
- [25] Liu Z, Liu J, Li X, Frang J. Experimental study on the volume and strength change of an unsaturated silty clay upon freezing. Cold Reg Sci Technol 2019;157:1-12.
- [26] Rieke R, Vinson TS, Mageau DW. The role of specific surface area and related index properties in the frost heave susceptibility of soils. In: Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost. Fairbanks, Alaska; 1983.
- [27] Tester R, Gaskin P. The effect of fines content on the frost susceptibility of a crushed limestone. Can Geotech J 1996;33(4):678-680.
- [28] Kawabata S, Ishikawa T, Kameyama S. Effects of freeze-thaw history on bearing capacity of granular base course materials. Procedia Eng 2016;143:828-835.
- [29] Işık A, Çevikbilen G, İyisan R. Freezing and thawing behaviour of compacted soils. In: Proceedings of the 11th International Congress on Advances in Civil Engineering. İstanbul, Turkey; 2014.
- [30] Gülen M, Aslan Fidan A, Köşeli AS, Kılıç H. Effect of freeze-thaw on CBR in soil with different gradation and mineralogy. TJCE 2024;35(4):27-47.
- [31] Cabrera JG, Woolley GR. Fly ash utilization in civil engineering. In: Environmental aspects of construction with waste materials, Studies in Environmental Science, vol.60. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science; 1994. p. 345-356.
- [32] Şenol A. Effect of fly ash polypropylene fibres content on the soft soils. Bull Eng Geol Environ 2011;71(3):379-387. doi: 10.1007/s10064-011-0391-6
- [33] Aytekin M. Deneysel Zemin Mekanığı. Genişletilmiş 2. ed. Ankara: Teknik Yayınevi Mühendislik & Mimarlık Yayınları; 2004.
- [34] Cook RD. Some effects of closed system freeze-thaw cycles on a compacted, highly plastic clay. MSc thesis. Edmonton, Canada: University of Alberta; 1963.
- [35] Brandl H. Influence of mineral composition on frost susceptibility of soils. In: Proceedings of the Second International Symposium on Ground Freezing. Trondheim, Norway: Norwegian Institute of Technology; 1980. p. 815-823.
- [36] Vlad N. The determination of frost susceptibility for soils using a direct testing method. In: Proceedings of the Second International Symposium on Ground Freezing. Trondheim, Norway: Norwegian Institute of Technology; 1980. p. 807-814.
- [37] Chamberlain EJ. Frost susceptibility of soil: review of index tests. Monograph 81-2. Hanover, New Hampshire, USA: US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory; 1981.
- [38] Aydın E. TestLab Basic Kullanım Kılavuzu (Sürüm 1.0). Erişim adresi: <https://silo.tips/download/testlab-basic-kullanim-kilavuzu> [Erişim tarihi: 31 Mayıs 2025]
- [39] Holtz RD, Kovacs WD, Sheahan TC. Geoteknik mühendisliğine giriş (A. Erken, çev.). Ankara: Nobel Yayınları; 2015.
- [40] ORDEL Ltd. Şti. UDL 100 Universal Data Logger Kullanım Kılavuzu. Erişim adresi: <https://ordel.com.tr/pdf/kilavuz/UDL100%20Kullan%C4%B1m%20K%C4%B1lavuzu.pdf> [Erişim tarihi: 31 Mayıs 2025]