Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

KALSİYUM KARBÜR GAZ BASINÇ ÖLÇÜMLERİNDE ORTAM SICAKLIĞI ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ASSESSMENT OF EFFECTS OF AMBIENT TEMPERATURE ON CALCIUM CARBIDE GAS PRESSURE MEASUREMENTS

Eda ÖZBERBER[1], Sami ARSOY[2]

ÖZET

Zeminin su içeriğinin doğru belirlenmesi, geoteknik mühendisliği hesaplarında kritik bir öneme sahiptir. Su içeriğinin hızlı tespiti konusunda arazi çalışmalarında kullanılabilen kalsiyum karbür gaz basınç yöntemi, su–kalsiyum karbür reaksiyonu sonucunda oluşan asetilen gazının kapalı bir haznede meydana getirdiği basınca dayanmaktadır. Oluşan gaz basıncı oda sıcaklığında geliştirilen kalibrasyon bağıntısıyla ilişkilendirilerek su içeriği değeri dolaylı olarak ölçülmektedir. Ancak bu yaklaşım ortam sıcaklığındaki değişimlerin ölçüm doğruluğu üzerindeki etkisini dikkate almamaktadır. Bu çalışma kapsamında ölçüm sistemi, ideal gaz yasasına dayalı basınç–hacim–sıcaklık ilişkileri açısından analitik yaklaşımla incelenmiştir. Bu bağlamda, reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan gaz miktarı sabit kabul edilerek sıcaklık değişiminin ölçüm hücresi hacmini değiştirerek ölçülen gaz basıncı üzerindeki etkisi analiz edilmektedir. Diğer bir deyişle reaksiyon sonucu oluşan gazın oluşturacağı hücre içi basıncın yanı sıra karpit hücresinde ısıl genleşme veya büzülme nedeniyle meydana gelen hacimce oluşacak olan değişimin gaz basıncı üzerindeki etki ilişkisi için bir modelleme yapılmıştır. Bu amaçla, hazne malzemesindeki ısıl genleşme parametreleri üzerinden hacim değişimi tanımlanmış ve bu değişim ideal gaz bağıntısına göre matematiksel olarak modellenmiştir. Sıcaklık etkisinin yalnızca gaz basıncına değil, aynı zamanda sistem hacminde değişimlere neden olduğu ve sistematik sapmalar oluşturduğu gösterilmiştir. Elde edilen model denklemlerinden ölçülen basıncın referans sıcaklık koşullarına indirgenmesini sağlayan bir düzeltme katsayısı ilişkisi önerilmiştir.
Anahtar Kelimeler: *Asetilen gazı, ideal gaz yasası, kalsiyum karbür yöntemi, sıcaklık etkisi.*

ABSTRACT

The accurate determination of soil water content is of critical importance for geotechnical engineering calculations. Calcium carbide gas pressure method is one of the methods usable in field investigations for fast measurements. It relies on the pressure generated within a closed chamber by acetylene gas formed from the water–calcium carbide reaction. However, instead of considering the effect of ambient temperature variations on measurement accuracy, the method is generally evaluated under the assumption of constant temperature. In this study, the measurement system was examined from an analytical perspective in terms of the pressure–volume–temperature relationships based on the ideal gas law. In this context, the amount of gas generated by the reaction was assumed to be constant, and the effect of temperature changes on pressure was analyzed. In addition to changes in the gas phase, volume variations in the carbide cell due to thermal expansion or contraction were incorporated into the model. For this purpose, volume changes were defined based on the thermal expansion parameters of the chamber material, and their effect on the ideal gas relationship was mathematically described. It was determined that temperature effects influence not only gas pressure but also system volume, leading to systematic deviations. From the derived model equations, a correction coefficient was proposed to adjust measured pressures to reference temperature conditions. Thus, the effect of temperature is analytically explained, and the behavior of the method under different environmental conditions is demonstrated.
Keywords: *Acetylene gas, ideal gas law, calcium carbide method, temperature effect.*

[1]Yüksek Lisans Öğrencisi, Kocaeli Üniversitesi, eda.ckmkk41@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr. , Kocaeli Üniversitesi, sarsoy@kocaeli.edu.tr

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında zeminin su içeriğinin (nem miktarının) doğru ve hızlı bir şekilde belirlenmesi; tasarım güvenliği, zemin stabilizasyonu ve sıkıştırma (kompaksiyon) kalite kontrolü süreçleri açısından hayati önem taşımaktadır. Özellikle yol yapımı, dolgu inşaatları ve heyelan risk analizi gibi arazi çalışmalarında zeminin su içeriğinin optimize edilmesi, mühendislik yapılarının performansı üzerinde doğrudan etki gösterir. Literatürde nem içeriğinin belirlenmesinde en güvenilir referans olarak kabul edilen geleneksel etüvde kurutma yöntemi (Darr yöntemi), sonuçların alınması için yaklaşık 24 saatlik bir süre gerektirdiğinden, anlık karar verilmesi gereken saha operasyonlarında zaman açısından verimli bulunmamaktadır.

Saha koşullarındaki bu pratik ihtiyaca yönelik olarak geliştirilen kalsiyum karbür gaz basınç yöntemi (CCGP), taşınabilirliği ve elektrik gerektirmemesi sayesinde yaygın olarak kullanılan hızlı bir alternatif yöntemdir. Yöntemin temel çalışma prensibi, kalsiyum karbürün (CaC_2) zemin içindeki serbest su (H_2O) ile reaksiyona girmesine dayanır. Bu ekzotermik reaksiyon sonucunda asetilen gazı (C_2H_2) ve katı kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$)) açığa çıkmaktadır. Oluşan reaksiyonun ifadesi Denklem (1) ' de verilmiştir.

$$CaC_2+2H_2O \rightarrow C_2H_2+Ca(OH)_2+Enerji \quad (1)$$

Kapalı bir çelik veya alüminyum haznede gerçekleşen bu reaksiyon sonucu biriken asetilen gazının oluşturduğu basınç artışı, numunenin nem içeriği ile doğrudan ilişkilidir. Fiziksel olarak ideal gaz yasası (P V=n R T) tarafından yönetilen bu sistemde, ticari ölçüm cihazları ve dönüştürme tabloları genellikle oda sıcaklığı (20°C) referans alınarak kalibre edilmektedir. Dolayısıyla, ortam sıcaklığındaki sapmaların ölçüm doğruluğu üzerinde sistematik hatalara neden olduğu bilinmektedir. Örneğin literatürde, 15°C'de yapılan bir ölçümün, 20°C referans değerine kıyasla yaklaşık %1,7 daha düşük bir basınç okuması verebileceği not edilmiştir. Güncel literatürde sıcaklık etkisini gidermek amacıyla genellikle sadece gazın basınç değerine odaklanan basit düzeltme katsayıları önerilmektedir. Ancak sıcaklık değişimi, yalnızca gazın kinetik enerjisini ve basıncını etkilemekle kalmayıp, aynı zamanda hazne malzemesinin ısıl genleşme veya büzülme özelliklerine bağlı olarak sistemin toplam hacmini (V) de değiştirebilir. Ölçüm sistemindeki başlangıç hazne hacminin veya bilye setindeki eksikliklerin hatalı sonuçlara yol açtığı bilinse de hazne malzemesinin sıcaklığa bağlı boyutsal değişimlerinin basınç okumaları üzerindeki kümülatif etkisi yeterince araştırılmamıştır. Hassas hacim ölçümü yapan laboratuvar cam malzemelerinin dahi belirli kalibrasyon sıcaklıklarında kullanılması gerekliliği, kapalı sistem gaz basıncı ölçümlerinde hazne genleşmesinin de hesaba katılması gerektiğini doğrulamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, kalsiyum karbür gaz basıncı ölçüm sistemi, ideal gaz yasası çerçevesinde basınç-hacim-sıcaklık ilişkileri açısından analitik olarak incelenmiştir. Mevcut yaklaşımlardan farklı olarak, reaksiyon sonucu oluşan gaz miktarının sabit olduğu varsayımı altında, sıcaklık değişiminin hem gaz basıncı hem de karpit hücresinde meydana gelen hacimsel değişimler üzerindeki birleşik (kombine) etkisi modellenmiştir. Hazne malzemesinin ısıl genleşme parametreleri üzerinden tanımlanan bu matematiksel modelleme aracılığıyla, ölçülen basınç değerlerinin referans sıcaklık koşullarına daha yüksek doğrulukla indirgenmesini sağlayan yeni bir düzeltme katsayısı ilişkisi önerilmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Geoteknik ve hidrolojik analizlerde zemin su içeriğinin doğru belirlenmesinin önemini vurgulayan birçok çalışma, geleneksel etüvde kurutma yönteminin (ASTM D2216, 2019; ASTM D4944-18, 2018) yüksek doğruluğuna rağmen pratik saha uygulamalarındaki zaman kısıtlamalarına dikkat çekmiştir (Arsoy vd., 2013; Liu vd., 2026). Referans kabul edilen kurutma yöntemlerinin dahi zemin mineralojisine bağlı olarak kendi içinde sistematik hatalar barındırabileceği bilinmektedir. Lang vd. (2017), kalsiyumca zengin bentonit zeminlerde standart kurutma sıcaklıklarının kristal arası suyu tamamen uzaklaştıramadığını, bunun da su içeriğinin gerçek değerinden %2,1 ila %3,1 oranında daha düşük hesaplanmasına yol açtığını deneysel olarak göstermiştir.

Saha koşullarında anlık veri akışı sağlamak amacıyla nükleer yoğunluk ölçerler (NDG), hafif ağırlıklı deflektometreler (LWD) ve dielektrik tabanlı sensörler (TDR, FDR) gibi alternatif teknolojiler geliştirilmiştir (He vd., 2021; Liu vd., 2026). Ancak bu yöntemlerin her biri kendine has operasyonel zorluklar barındırmaktadır. Sebesta vd. (2013), nükleer yöntemlerin hızlı sonuç vermesine karşın sıkı güvenlik protokolleri, ruhsatlandırma süreçleri ve yüksek işletme maliyetleri nedeniyle dezavantajlı olduğunu belirtmiştir. Dielektrik tabanlı (TDR/FDR) sensörler üzerinde yapılan incelemelerde ise, bu sistemlerin zeminin homojenliği, tuzluluk oranı ve ortam sıcaklığı gibi çevre şartlarına karşı aşırı hassas olduğu ve zemin türüne özgü karmaşık kalibrasyon eğrilerine ihtiyaç duyduğu rapor edilmiştir (Sebesta vd., 2013; He vd., 2023).

Bu alternatifler arasında yer alan kalsiyum karbür gaz basıncı (CCGP) yöntemi, operasyonel kolaylığı ve maliyet etkinliği ile öne çıkmaktadır. Yöntemin sahadaki güvenilirliği üzerine yapılan çalışmalarda, Strangfeld vd. (2022) beton hidrasyon süreçlerinde yöntemin düşük sıcaklıktaki etüv verileriyle tam bir uyum sergilediğini saptamıştır. Yöntemin hassasiyeti üzerine odaklanan Arsoy vd. (2013), geniş bir zemin yelpazesinde gerçekleştirdikleri laboratuvar testlerinde, CCGP ile etüv sonuçları arasında %1 göreceli hata bandı içinde güçlü bir korelasyon elde etmiştir. Araştırmacılar bir diğer çalışmalarında Arsoy (2014), numune kütlesinin azaltıldığı durumlarda bile (20 gramın altı) yöntemin %0,2 gibi oldukça düşük mutlak sapmalarla kararlı sonuçlar üretebildiğini kanıtlamıştır.

Buna karşın, CCGP sistemlerinin en zayıf yönünü çevre ve reaksiyon sıcaklığındaki değişimler oluşturmaktadır. İlk olarak Blystone (1961) ile sonrasında Radtke (2015) tarafından yapılan çalışmalarda, kimyasal reaksiyonun ekzotermik doğası gereği açığa çıkan ısının hazne içi basınç okumalarında dalgalanmalara ve sapmalara neden olduğu rapor edilmiştir. Radtke (2015), standart dönüştürme tablolarının dışındaki her 1°C'lik sapmanın manometre üzerinde yaklaşık 3 mbar'lık doğrudan bir hataya yol açacağını belirtmiştir. Gaz fazındaki bu sıcaklık-basınç etkisinin yanı sıra, Polat vd. (2023) genel laboratuvar mekaniği çerçevesinde, sıcaklık dalgalanmalarının test donanımlarının ısıl genleşme/büzülme özelliklerine bağlı olarak boyutsal değişimler yarattığını ve bunun hassas hacimsel ölçümlerde göz ardı edilmemesi gereken bir hata kaynağı olduğunu savunmuştur.

Görüldüğü üzere literatür, sıcaklığın gazın kinetik davranışı üzerindeki etkisine odaklanmış; ancak kapalı ölçüm hücresinin termal genleşmesinden kaynaklanan hacim değişikliklerini ve bu durumun gaz basıncı üzerindeki kümülatif etkisini analitik olarak modellememiştir. Sunduğumuz bu çalışma, literatürdeki bu boşluğu doldurarak hem gazın

hem de hazne malzemesinin ısıl parametrelerini eş zamanlı olarak hesaba katan analitik bir yaklaşım geliştirmeyi amaçlamaktadır.

2. MALZEME

Kalsiyum karbür gaz basıncı (CCGP) ölçüm sisteminin sıcaklığa bağlı davranışının analitik olarak modellenmesi amacıyla, sistem bileşenleri ve bu bileşenlerin fiziksel/termal özellikleri bir bütün olarak ele alınmıştır. Modellemede esas alınan sistem, arazi çalışmalarında yaygın olarak kullanılan ticari hızlı nem tayin cihazlarının standart geometrik ve malzeme özelliklerini yansıtacak şekilde yapılandırılmıştır (Arsoy vd., 2013; Radtke, 2015). Analitik modelin kurulmasında kullanılan temel materyaller aşağıda özetlenmiştir:

Reaksiyon Hücresi (Hazne): Sistemde gaz birikiminin gerçekleştiği kapalı hazne; yüksek iç basınca dayanıklı, içi boş kesitli alüminyum alaşımı veya paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş silindirik bir gövdedir (Arsoy vd., 2014; Radtke, 2015). Analitik modelde, haznenin başlangıç sıcaklığındaki (T_o=20°C), iç hacmi (V_o) üretici tarafından belirlenen nominal hacim sınırları içerisinde referans parametre olarak tanımlanmıştır (Radtke, 2015). Hazne malzemesinin sıcaklık değişimlerine karşı boyutsal tepkisini karakterize etmek amacıyla, malzemeye ait doğrusal ısıl genleşme katsayısı (α) ve hacimsel ısıl genleşme katsayısı ($\beta=3\alpha$) modele yapısal girdi olarak entegre edilmiştir (Serway vd., 2018; Callister vd., 2018).

Reaktifler (Kalsiyum Karbür ve Zemin Suyu): Sistemde kimyasal reaksiyonu başlatan ve gaz fazını oluşturan bileşenlerdir. Model kapsamında, zemin numunesindeki serbest su kütlesi (m_w) ile hazneye eklenen teknik saflıktaki (%80-85) kalsiyum karbürün (CaC_2) tam reaksiyona girdiği ve üretilen asetilen gazının (C_2H_2) mol sayısının (n) reaksiyon süresince sabit kaldığı varsayılmıştır (Arsoy vd., 2013; Trubyanov vd., 2018). Açığa çıkan ekzotermik reaksiyon ısısının sistem sıcaklığı (T) üzerindeki etkisi, termodinamik dengenin bir parçası olarak modele yansıtılmıştır (Arsoy vd., 2013; Radtke, 2015).

Parçalayıcı Çelik Bilyeler: Zemin yapısını parçalamak, reaktif ampulünü kırmak ve reaksiyonu hızlandırmak amacıyla hazne içerisine yerleştirilen standart dörtlü çelik bilye setinin hacmi (V_b) toplam sistem hacminden düşülerek net gaz hacminin belirlenmesinde bir alt parametre olarak kullanılmıştır (Radtke, 2015; Strangfeld vd., 2022). Bilyelerin ısıl genleşmesi, hazne hacmine ve gaz fazına kıyasla ihmal edilebilir düzeyde olduğundan modelde sabit hacimli katı faz olarak kabul edilmiştir (Radtke, 2015).

Manometre (Basınç Ölçer): Hazne kapağına entegre edilmiş, reaksiyon sonucu oluşan iç basınç artışını (ΔP) ölçen analog (Sınıf 1,0) veya dijital (Sınıf 0,1) göstergedir (Arsoy vd., 2014; Radtke, 2015). Manometreler genellikle 20°C referans sıcaklığına göre kalibre edilmektedir (Radtke, 2015). Modelde, manometrenin mekanik esnemelerinden kaynaklanabilecek hacimsel değişimler ihmal edilmiş; cihazın doğrudan hazne içi net gaz basıncını ideal gaz yasası prensiplerine göre okuduğu kabul edilmiştir (Atkins vd., 2006; (Radtke, 2015).

3. ANALİTİK MODELLEME VE YÖNTEM

Kalsiyum karbür gaz basıncı (CCGP) yönteminde, reaksiyon hücresi içerisinde sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen hacimsel değişimlerin ve gaz kinetiğinin ölçülen basınç

üzerindeki birleşik (kombine) etkisini belirlemek amacıyla bu çalışma kapsamında özgün bir analitik model türetilmiştir. Modelin teorik altyapısı kurulurken, reaksiyon sonucunda açığa çıkan asetilen gazının (C_2H_2) kapalı sistem içerisinde ideal gaz davranışına uyduğu varsayılmıştır (Atkins vd., 2006). Sistemin kalibrasyon referans koşullarındaki (T_o=20°C = 293,15 K) başlangıç durumu İdeal Gaz Yasası çerçevesinde Denklem (2)' de tanımlanmıştır (Radtke, 2015):

$$P_o \; V_o = n \; R \; T_o \tag{2}$$

Burada; P_o referans sıcaklıktaki düzeltilmiş (olması gereken) gaz basıncını, V_o sistemin referans sıcaklıktaki net gaz hacmini, n reaksiyon sonucu oluşan gazın mol sayısını, R evrensel gaz sabitini (0,082 L atm/mol K) ve T_o Kelvin cinsinden referans sıcaklığı (293,15 K) temsil etmektedir (Radtke, 2015). Ortam sıcaklığının veya ekzotermik reaksiyon ısısının etkisiyle sistem sıcaklığının T değerine ulaşması durumunda, hazne malzemesinin ısıl genleşme özelliğine bağlı olarak sistemin net gaz hacmi de değişmektedir (Radtke, 2015). Sıcaklık değişim miktarı $\Delta T = T - T_o$ olarak tanımlandığında, hazne malzemesinin hacimsel ısıl genleşme katsayısı (β), doğrusal ısıl genleşme katsayısının $\alpha = 12 \times 10^{-6}$ K^{-1} üç katı ($\beta = 3\alpha = 36 \times 10^{-6}$ K^{-1}) alınarak herhangi bir T sıcaklığındaki yeni hacim (V_t) Denklem (3) yardımıyla modellenmiştir (Serway vd., 2015).

$$V_t = V_o \; (1 + \beta \; \Delta T) \tag{3}$$

Sıcaklık artışıyla birlikte kap hacminin büyümesi, kapalı sistem içerisindeki gazın manometreye uygulayacağı basıncın azalmasına yol açmaktadır (Radtke, 2015). Sıcaklık (T) koşullarında manometreden okunan anlık basınç değeri (P) yeni hacim fonksiyonu ile birlikte İdeal Gaz Yasası'nda yerine konulduğunda sistemin son durumu Denklem 4 ile ifade edilir (Radtke, 2015):

$$P \; V_t = n \; R \; T \rightarrow P \; V_o \; (1 + \Delta T) = n \; R \; T \tag{4}$$

Kimyasal reaksiyon tamamlandığında sistemdeki gaz miktarı (mol sayısı, n) sabit kalacağından, referans durum (Denklem 2) ile sıcaklığa bağlı son durum (Denklem 4) birbirine oranlanmıştır. Bu oranlama sonucunda sabit olan n, R, V_o parametreleri sadeleşerek, sahada okunan anlık P basıncını, referans koşullardaki gerçek Po basıncına dönüştürecek olan boyutsuz düzeltme katsayısı (C_T) ilişkisi Denklem 5 ile elde edilmiştir.

$$C_T = P_o/P = T/ \; T_o \; (1 + \Delta T) \tag{5}$$

Burada sıcaklık terimleri (T ve T_o) mutlak sıcaklık (Kelvin) cinsinden işleme dâhil edilmektedir. Denklem (5) kullanılarak, T_o=20°C referans değerine göre 0°C ile 50°C sıcaklık aralığında 5°C adımlarla hesaplanan teorik düzeltme katsayıları ($C_T = P_o/P$) Tablo 1'de sunulmuştur.

Aşağıdaki Tablo 1'de görüleceği üzere, referans sıcaklığın üzerindeki ortamlarda (örneğin 40°C'de) yapılan ölçümlerde hazne genleşmesi nedeniyle manometrede okunan basınç değeri, olması gereken referans değerinden daha küçüktür (C_T=0,9368) (Radtke, 2015). Bu durum, cihazın su muhtevasını yapısal olarak daha düşük tahmin etmesine yol açar (Arsoy vd., 2014). Önerilen analitik model uyarınca, sahada okunan basınç değeri ilgili sıcaklıktaki C_T katsayısı ile çarpılarak ($P_o = P \; C_T$) hazne genleşmesinin yarattığı sistematik sapma tamamen ortadan kaldırılmaktadır.

Tablo 1. Sıcaklık değişimine göre analitik modelden elde edilen basınç düzeltme katsayıları (T_o=20°C)

T (°C)	ΔT	P_o/P
0	-20	1,0724
5	-15	1,0534
10	-10	1,0349
15	-5	1,0172
20	0	1,0000
25	5	0,9834
30	10	0,9674
35	15	0,9518
40	20	0,9368
45	25	0,9222
50	30	0,9081

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Önerilen analitik modelin geoteknik mühendisliği uygulamaları açısından doğurduğu pratik sonuçlar ve sistematik hatanın boyutu şu şekilde değerlendirilebilir:

Yüksek Sıcaklık Koşulları (Sıcak İklim / Yoğun Ekzotermik Reaksiyon): Sahada 40°C gibi yüksek bir sıcaklık altında çalışıldığı durumlarda gerçekleştirilen ölçümlerde, düzeltme katsayısı C_T=0,9368 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, hazne genleşmesi dikkate alınmadığında manometreden okunan anlık basınç değerinin, ölçümleme koşullarına göre yaklaşık %6,3 oranında sistematik olarak daha düşük ölçüleceğini göstermektedir. Ticari cihazlarının dönüştürme tabloları doğrusal basınç-su içeriği ilişkisine dayandığından, bu sapma zeminin su içeriğinin (nem miktarının) gerçek değerinden daha düşük tahmin edilmesine yol açacaktır.

Düşük Sıcaklık Koşulları (Soğuk İklim / Erken Sabah Ölçümleri**):** Ortam sıcaklığının 0°C'ye kadar yaklaştığı soğuk hava koşullarında yapılan arazi ölçümlerinde ise düzeltme katsayısı C_T=1,0724 değerine ulaşmaktadır. Bu durum, hazne büzülmesinden ötürü manometrede %7,2'ye varan oranlarda daha yüksek bir yapay basınç okunacağı anlamına gelmektedir. Düzeltme yapılmadığı takdirde, zemindeki nem miktarı gerçekte olduğundan daha yüksek tahmin edilecek ve bu durum su içeriği kriterlerinin yanlış yorumlanmasına sebebiyet verebilecektir.

Sonuç olarak, literatürde sıklıkla ihmal edilen veya yalnızca gaz fazındaki termal genleşmeye indirgenen sıcaklık etkisi; hazne malzemesinin (alüminyum/çelik) boyutsal değişimleri de hesaba katıldığında kümülatif bir hata kaynağına dönüşmektedir. Önerilen analitik model ve bu modelden türetilen P_o=P C_T düzeltme mimarisi, sahada hangi sıcaklıkta ölçüm yapılırsa yapılsın, ölçülen ham basınç değerini kalibrasyon referans sıcaklığına indirgeyerek cihaz dönüştürme tablolarının doğruluğuna katkıda bulunabilecektir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kalsiyum karbür gaz basıncı (CCGP) ölçüm sisteminin sıcaklığa bağlı davranışını, ideal gaz yasası ve hazne malzemesinin ısıl genleşme özellikleri çerçevesinde analitik olarak

inceleyen bu çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

CCGP yönteminde ortam ve reaksiyon sıcaklığındaki değişimlerin, yalnızca gazın kinetik basıncını etkilemediği; aynı zamanda ölçüm haznesinde ısıl genleşme veya büzülme nedeniyle meydana gelen boyutsal değişimlerden etkilendiği analitik olarak gösterilmiştir.

Geliştirilen analitik model doğrultusunda, sahada okunan anlık basınç değerini (P), cihazın kalibre edildiği referans sıcaklık koşullarındaki gerçek basınç değerine (P_0) dönüştüren boyutsuz bir düzeltme katsayısı (C_T) ilişkisi sunulmuştur.

Ortam sıcaklığının üst/alt sınırlarında su içeriğindeki sapmanın %6 ve daha fazlası olabileceği öngörülmektedir. Önerilen P_0=P C_T düzeltme mimarisi, literatürde sıklıkla ihmal edilen hazne hacmi genleşmesini sisteme entegre ederek, hızlı nem tayini yöntemlerindeki sıcaklık kaynaklı sistematik sapmaları ortadan kaldırabilecektir.

Gelecek çalışmalarda, türetilen bu analitik modelin farklı malzeme tiplerine (farklı alaşımlardaki hazneler veya bilye setleri) sahip ticari cihazlar üzerinde gerçekleştirilecek deneysel çalışmalarla doğrulanması ve bu çalışmada sunulan teorik değerlendirmenin deneysel olarak sonraki aşamada teyit edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Arsoy, S., Ozgur, M., Keskin, E., ve Yilmaz, C. (2013), "Usability of Calcium Carbide Gas Pressure Method in Hydrological Sciences", Journal of Hydrology, Vol 503, 67-76.

Arsoy, S., Keskin, E., ve Ozgur, M. (2014), "Reliability of Soil Water Content Measurements by the Calcium Carbide Gas Pressure Method for Small Specimens", Scientia Iranica, Vol 21, 1762-1772.

ASTM International. (2018), "Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester (ASTM D4944-18)", West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2019), "Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass (ASTM D2216-19)", ASTM International.

Atkins, P. ve de Paula, J. (2006), "Atkins' Physical Chemistry", 8th ed., W. H. Freeman and Company.

Blystone, J. R., Pelzner, A. ve Steffens, G. P. (1961), "Moisture Content Determination by the Calcium Carbide Gas Pressure Method", Public Roads, Vol 31, 177-181.

Cai, S., Zhang, B., ve Cremaschi, L. (2017), "Review of Moisture Behavior and Thermal Performance of Polystyrene Insulation in Building Applications", Building and Environment, Vol 123, 50-65.

Callister, W. D., ve Rethwisch, D. G. (2018), "Materials Science and Engineering: An Introduction", 10th ed., Wiley.

Gasik, M. I., Lyakishev, N. P., ve Gasik, M. M. (2009), "Physical Chemistry and Technology of Ferroalloys", Sistemnye Tehnologii.

He, H., Aogu, K., Li, M., Xu, J., Sheng, W., Jones, S. B., González-Teruel, J. D., Robinson, D. A., Horton, R., Bristow, K., Dyck, M., Filipovic, V., Noborio, K., Wu, Q., Jin, H., Feng, H., Si, B., ve Lv, J. (2021), "A Review of Time Domain Reflectometry (TDR) Applications in Porous Media", Advances in Agronomy, Vol 168, 83-155.

Huang, Y., Xu, W., Ji, Y., ve Yang, L. (2025), "Mechanical Strength and Mechanism Analysis of Silt Soil Cured by Straw Ash–Calcium Carbide Slag", Materials, Vol 18, 455.

Lang, L. Z., Xiang, W., Huang, W., Cui, D. S., ve Schanz, T. (2017), "An Experimental Study on Oven-drying Methods for Laboratory Determination of Water Content of a Calcium-rich Bentonite", Applied Clay Science, Vol 150, 153-162.

Liu, C., Zhang, X., ve Liu, J. (2026), "A Rapid Field Moisture Measurement Unit for Compaction Acceptance of Unbound Materials", Transportation Geotechnics, Vol 57, 101885.

Polat, G., Özcan, M. ve Özgü, M. (2023), "Fen Bilimleri Laboratuvarı Öğretmen Rehber Kitabı", T.C. Millî Eğitim Bakanlığı: Devlet Kitapları.

Radtke, F. (2015), "Bestimmung des Wassergehaltes mit der Carbid-Methode", Radtke Messtechnik.

Sebesta, S., Oh, J., Lee, S. I., Sanchez, M., ve Taylor, R. (2013), "Initial Review of Rapid Moisture Measurement for Roadway Base and Subgrade", Texas A&M Transportation Institute.

Serway, R. A., ve Beichner, R. J. (2015), "Fen ve Mühendislik İçin Fizik 1", K. Çolakoğlu, Çev., Palme Yayıncılık.

Strangfeld, C., ve Klewe, T. (2022), "Comparison of the Calcium Carbide Method and Darr Drying to Quantify the Amount of Chemically Bound Water in Early Age Concrete", Materials, Vol 15, 8422.

Tang, P., Javadi, A. A., ve Vinai, R. (2024), "Sustainable Utilisation of Calcium-rich Industrial Wastes in Soil Stabilisation: Potential Use of Calcium Carbide Residue", Journal of Environmental Management, Vol 357, 120800.

Tang, P., Javadi, A. A., ve Vinai, R. (2025), "Calcium Carbide Residue for Clay Stabilisation: Mechanical and Microstructural Properties", Transportation Geotechnics, Vol 51, 101543.

Trubyanov, M. M., Mochalov, G. M., Suvorov, S. S., Puzanov, E. S., Petukhov, A. N., Vorotyntsev, I. V., ve Vorotyntsev, V. M. (2018), "Towards the Interaction Between Calcium Carbide and Water During Gas-chromatographic Determination of Trace Moisture in Ultra-high Purity Ammonia", Journal of Chromatography A, Vol 1560, 71-77.

Wang, Q., Kong, L., Tseng, M. L., Song, Y., ve Wang, H. (2022), "Solid Waste Material Reuse Analysis: Filling the Road Subgrade with Riverway Silt and Sediment", Environmental Science and Pollution Research, Vol 29, 35096-35109.