

Perlit ve Fırın Cürufu Katkılı G Sınıfı Çimentonun Petrol-Jeotermal Kuyulardaki Isıl Yalıtım Özelliklerine Etkisinin DeneySEL ve İstatistiksel Analizi

Sarper ÖZTÜRK^{1*}, Hasan OKTAY², Serdar GÜNDÜZ³

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölümü, 31200, İskenderun, Antakya

²Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, P.kodu, Batman

³Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Malzeme ve İmalat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı, Batman

¹<https://orcid.org/0000-0002-9668-793X>

²<https://orcid.org/0000-0002-0917-7844>

³<https://orcid.org/0000-0003-4456-5882>

*Sorumlu yazar: sarper.ozturk@iste.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 16.05.2025

Kabul tarihi: 10.10.2025

Online Yayınlanma: 16.03.2026

Anahtar Kelimeler:

Petrol

Jeotermal

G sınıfı çimento

Isı yalıtım

Kuyu çimentolama

ÖZ

Enerji talebinin giderek arttığı günümüzde petrol; doğal gaz ve jeotermal kaynakların sondayı ve üretimi ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır. Bu süreçlerde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri yüksek işletme maliyetleridir. Bu nedenle maliyetlerini düşürmek enerji üretim sektöründe ve yüksek enerji tüketimi olan sektörlerde faaliyet gösteren şirketler için stratejik bir hedef haline gelmiştir. Petrol sahaları akışkan özelliklerine göre, Newton ve nano-Newton (ağır) petroler olarak sınıflandırılmakta olup, üretim süreçleri ve maliyetleri birbirinden farklılık göstermektedir. Özellikle ağır ve yüksek viskoziteli petrolerde, rezervin kimyasal bileşenlerine bağlı olarak çeşitli kimyasalların varlığı ve bu maddelerin yüzeye doğru hareketi sırasında oluşan ısı kayıplarına bağlı fiziksel değişimler, üretim hatlarında tıkanıklıklara yol açmaktadır. Bu tür sorunların önlenmesi için birçok maliyetli yöntem uygulanmakla birlikte, bu çalışmada kuyu çimentolamasında kullanılan çimentoların ısı yalıtım özelliklerinin artırılarak maliyetlerin azaltılması ve tıkanma problemlerinin engellenmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında, mevcut petrol-doğalgaz ve jeotermal sahalarda yaygın olarak kullanılan G sınıfı çimentolarda, hacimce %5'ten %30'a kadar değişen oranlarda kimyasal katkı maddeleri ile yüksek fırın cürufu ve genleştirilmiş perlit gibi mineral katkıların farklı ikame seviyelerinde kullanılması sonucu; çimento harcının yoğunluk, basınç ve eğilme dayanımı gibi temel mekanik özellikleri, gözeneklilik gibi fiziksel özellikleri ve ısıl iletkenlik gibi yalıtım performansları çoklu regresyon analizi ile değerlendirilmiş; elde edilen ilişkiler denklem ve grafiklerle sunulmuştur. Çalışmanın amacı; kuyularda kullanılan G sınıfı çimentoya standartlara uygun ilaveler yapılarak üretim kesintilerinin önlenmesi, sürenin mümkün olduğunca kısaltılması, iş kayıplarının önlenmesi ve maliyetlerin düşürülmesidir.

Experimental and Statistical Analysis of the Effect of Perlite and Furnace Slag-Modified Class G Cement on Thermal Insulation Properties in Petroleum and Geothermal Wells

Research Article

Article History:

Received: 16.05.2025

Accepted: 10.10.2025

Published online: 16.03.2026

Keywords:

Oil

ABSTRACT

In today's world where energy demand is increasing, drilling and production of oil, natural gas and geothermal resources are of great economic importance. One of the biggest challenges encountered in these processes is high operational costs. For this reason, reducing costs has become a strategic goal for companies operating in the energy production sector and sectors with high energy consumption. Oil fields are called Newtonian and nano-Newtonian oils

according to their fluid properties and their production processes and costs differ from each other. Especially in heavy and high-viscosity oils, the presence of various chemicals depending on the chemical components of the reserve and the physical changes due to heat losses that occur during the movement of these substances towards the surface lead to blockages in production lines. Although many costly methods are used to prevent such problems, the study aims to reduce costs and prevent these problems by increasing the thermal insulation properties of the cements used in well cementing. Within the scope of this study, the effects of the use of chemical additives at different substitution rates and mineral additives such as blast furnace slag and expanded perlite at increasing rates from 5% to 30% by volume in the G class cement, which is the most widely used in the existing oil-natural gas and geothermal fields, on the density change in the G class cement mortar, basic mechanical properties such as compression and bending strength, physical properties such as porosity and insulation properties such as thermal conductivity were examined by multiple regression analysis and the relationships were given with equations and graphs.

The aim of the study is to prevent production interruptions, reduce time as much as possible, prevent work losses and reduce costs by making additions to the G class cement used in wells in accordance with the standards.

To cite: Öztürk S., Oktay H., Gündüz S. Perlit ve Fırın Cürufu Katkılı G Sınıfı Çimentonun Petrol-Jeotermal Kuyulardaki Isıl Yalıtım Özelliklerine Etkisinin Deneysel ve İstatistiksel Analizi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(2): 800-818.

1.Giriş

Petrol/doğalgaz ve jeotermal kuyularının çimento operasyonunda; çimento türü olan Portland çimento kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2024). Çimentoya su karıştırıldığında, oluşan çimento şerbetinde fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar oluşur. Suyun çimentoya dengeli bir şekilde yeterli miktarda nüfus etmesi süresi uzadıkça, çimento ve içeriğindeki malzemelerin viskozite (Scherer ve ark., 2010), reoloji (Ma ve Kawashima, 2019), basınç dayanımı (Kjellson ve ark., 1991; Du ve ark., 2018), geçirgenlik ve elastik modül (Krauß ve Hariri, 2006) gibi özellikleri gelişmeye devam eder (Sun ve ark., 2023).

Petrol/doğalgaz ve jeotermal sahalarında, formasyon sıvılarının geçişini engellemek, kuyu stabilitesini sağlamak ve kuyu duvarlarını desteklemek amacıyla çimento kullanımı önem teşkil etmektedir. Petrol kuyusu çimentoları, hafif agregalar veya katkı maddeleri kullanılarak mekanik ve termal özellikleri modifiye edilebilmektedir (Kalkan ve ark., 2021). Petrol kuyusu çimentolarından G sınıfı çimento; hem eklenebilen kimyasallar sayesinde özelliklerini arttırılabilmesi hem de yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklılığından dolayı sahalarda en yaygın kullanılan sınıflardan bir tanesidir (Li ve ark., 2021). G sınıfı çimento, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında stabilite sağladığı ve sülfat saldırılarına karşı direnç gösterdiği için jeotermal sahalarında ve yüksek sıcaklığa sahip petrol kuyularında sızdırmazlık ve uzun vadeli stabilite sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Nelson ve Guillot, 2006).

Petrol/doğalgaz ve jeotermal kuyularında çimento operasyonunda üretimi yapılmak istenen kaynakların kalan miktarlarının büyük bir bölümünün yüksek sıcaklıklara sahip derin formasyonlarda bulunmasından kaynaklı çoğu zaman problemler yaşanmaktadır (Guo ve ark., 2020; Pyatina ve ark., 2024). Bu bağlamda, sahalardaki problemlerin önüne geçebilmek standartlara uygun çimento sınıflarının daha da geliştirilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır (Wei ve ark., 2021; Zhiqianq ve ark., 2022).

Çimento üzerine yapılan çalışmalar; ekseriyetle Portland çimento bulamacının mukavemetini ve dayanıklılığını belirlemek üzere olmasına rağmen (Lécolier ve ark., 2007; Abo-El-Enein ve ark., 2018), çimentonun en önemli özelliklerinden biri olan yalıtım özelliği üzerine gereken araştırmalar yeterli oranda ele alınmamıştır. Bu bağlamda, çimento bulamacının termal ve izolasyon özellikleri, kullanılan çimento tipi, bileşenleri ve katkı maddelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden güçlü bir şekilde etkilendiğinden dolayı literatüre çimentonun izolasyon özelliklerinin iyileştirilmesine dair deneysel çalışmaların yapılması büyük önem arz etmektedir. Sahalarda API standardına uygun olarak kullanılan çimento sınıflarında da kuyu dibinden kuyu yüzeyine doğru gelindikçe azalan sıcaklık derecesi ve dolayısıyla düşük yalıtım problemleri nedeniyle ham petrol ürününde katılma oranını arttırmakta ve ürünün işlenmesi öncesi performans özelliklerinde kötüleşme meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle kuyu borusunu çevreleyen çimento malzemesinin izolasyon özelliklerinin iyileştirilmesi büyük bir önem arz etmektedir. Hafif çimento bulamaçlarının (yani nispeten daha yüksek poroziteye ve daha iyi yalıtım özelliklerine sahip çimento) tasarımına çeşitli hafif maddeler uygulanmıştır. Bunlara örnek olarak puzolanik malzemeler gibi mineraller örnek verilebilir. Bu malzemelerin özgül ağırlığı API standartlarına uygun çimentodan daha küçük olup, kullanımlarıyla daha düşük yoğunluklu ve nispeten daha yüksek poroziteye sahip bir bulamaç elde edilmektedir (Anya, 2018). Puzolanik malzemeler doğal, yapay ve endüstriyel yan ürün olarak elde edilebilen ve kendiliğinden bağlayıcılık özellikleri olmayan veya çok az olan mineraller olup, günümüzde kullanılan en yaygın çimento bulamaç genişleticilerinden biridir. Puzolanların en önemli özelliği, çimento bulamaçlarında kullanıldıklarında, çimento hidratasyon reaksiyonları neticesinde elde edilen kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek dayanıma katkı sağlayan ilave hidratasyon ürünü oluşturmalarıdır (Demirhan, 2020; Demirel ve Demirhan, 2021). Elde edilen bu durum, puzolanik malzeme içeren çimento bulamaçlarının yalnızca ağırlık azaltma gibi fayda sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda bentonit ile genişletilen bulamaçlardan daha iyi prizlenmiş çimento mukavemeti sağladığı anlamına gelir (Anya, 2018). Çimento esaslı malzemelerin dayanıklılık problemlerinin temelini oluşturan kalsiyum hidroksit ile reaksiyon gerçekleşip, kalsiyum hidroksit tüketildiği için yüksek sülfat etkisine maruz kalan petrol kuyularının sülfat direnci gibi dayanıklılık özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmekte (Larki ve ark., 2019) ve dolayısıyla kuyuların servis ömrünü artırmaktadır. Puzolan içeren kuyu tamamlama çimentolarının porozitesi nispeten daha yüksek olduğu için (Dousti ve ark., 2022) bölgesel izolasyon gerektiren kuyularda çimentolamanın bölgesel izolasyonunu sağlamaları açısından hedeflenen düzeyde bir izolasyon elde edilebilmektedir (Ledesma ve ark., 2020).

Literatürdeki çalışmalar; perlit, yüksek fırın cürufu (YFC) gibi malzemelerin çimento sınıflarına entegrasyonu ile hazırlanan çimento karışımının işlenebilirliği, priz süresi, yoğunluğu, ısı iletkenliği ve dayanımı üzerinde çeşitli etkiler gözlemlenmiştir (Nelson ve Guillot, 2006). Perlit; çimento karışımlarında kullanıldığında, çimento bulamacının ısı yalıtım performansının arttığı, yoğunluğunun ve mukavemetinin de azaldığı görülmektedir (Kalkan ve ark., 2021). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu

(YCF) hazırlanan çimentoların basınç dayanımı ve dayanıklılıklarının arttığı görülmüştür (Yazıcı ve Karagöl, 2022).

Perlit; gözenekli yapısı ve düşük yoğunluğu nedeniyle çimento karışımına eklenmesiyle kuyularda sıcaklıktan kaynaklanan genleşme gerilmelerini azaltmaktadırlar (Kalkan ve ark., 2021). Genleştirilmiş perlit ile hazırlanan çimento bulamacının basınç dayanımı araştırılması sonucunda perlitin genleşmesi sonucunda çimento bulamacının ağırlık birim hacminin azaldığının görülmesine rağmen basınç dayanımının düştüğü (Topçu ve Işıkdag, 2008). Laboratuvar ortamında perlitin oranları %40'tan %50'ye çıkartıldığında ısı iletkenlik katsayısında %20'lik düşüş görülürken, oran %50'den %60'a çıkartıldığında %10 azalma görülmesi azalan verimler yasası etkisi sonucuna varılması perlitin kullanılma oranında optimum düzeyin ayarlanarak çimento bulamacının termal veriminin artmasında önemini göstermektedir (Kalkan ve ark., 2021).

Petrol, doğalgaz ve jeotermal sahalarda kullanılmak üzere perlit ve yüksek fırın cürufuyla hazırlanan çimento bulamacı, perlitin düşük yoğunluğu ve yüksek gözenekliliğinden dolayı hazırlanan malzemenin kullanılabilirliğinde artış gösterirken, priz süresinde artış ve erken dayanım süresinde azalma görülürken yüksek fırın cürufu eklenmesiyle uzun süreli dayanımlarda iyileşmeler görölse de katkı maddelerinin oranları, partikül boyutları ve çimento bulamacının diğer bileşenlerine bağlı olarak değişebilmektedir (Wang ve Scrivener, 1995; Qian ve Li, 2001; Kanavaris ve ark., 2024). Yapılan araştırmalar neticesinde G sınıfı çimentoya eklenen perlit ve yüksek fırın cürufu, hazırlanan çimento bulamacının reolojik ve mekanik özelliklerinin en iyi duruma getirilebilmesi için katkı maddelerinin oranları titizlikle ayarlanmalıdır (Shi ve Day, 1995; Li ve Zhao, 2003).

Bu çalışmanın amacı; çimentonun izolasyon özelliklerinin iyileştirilmesine dair deneysel çalışmaların yapılarak, API standartlarına uygun olarak hazırlanan çimento sınıflarının özellikle, petrol kuyusu tamamlama işlemleri veya jeotermal kuyulardaki çimentolama işlemi gibi farklı petrol/jeotermal/gaz endüstrisi uygulamalarında G tipi çimentonun minimum petro-fiziksel ve petro-kimyasal özelliklerinden taviz vermeden mevcut kararlı davranışına göre mineral katkıların kullanılabilirliğini değerlendirmektir. Farklı ikame oranlarındaki kimyasal ve mineral katkıların kullanımının G sınıfı çimento harcındaki yoğunluk değişimi, basma ve eğme mukavemeti gibi temel mekanik özellikler, gözeneklilik gibi fiziksel özellikler ile ısı iletkenlik gibi yalıtım özellikleri üzerine etkisinin çoklu regresyon analizine tabi tutularak incelenmesidir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzeme ve Kimyasal Katkılar

API standartlarına uygun olarak sondaj sahalarında G sınıfı çimento türüne ilave edilen maddeler, kuyuların verimi ve sürekliliği açısından çimento operasyonlarında önemli rol oynarlar. Formasyonun ve kuyunun özelliğine göre çimento bulamacına eklenecek katkı maddeleri ve oranları doğru oranda formüle edilmelidir. Çalışmada kullanılan G sınıfı çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. G Tipi çimento kimyasal özellikleri

Kimyasal Analiz %	Analiz sonuçları	Standart No TSEN ISO 10426-1
SiO ₂	19,88	
Al ₂ O ₃	3,85	
Fe ₂ O ₃	4,57	
CaO	62,65	
MgO	3,61	Max % 6,0
SO ₃	2,74	Max % 3,0
K ₂ O	0,62	
Na ₂ O	0,16	
Cl ⁻	0,0059	
Cr ⁺⁶ (ppm)	17,20	
Free CaO	0,29	
Loss of Ignition	0,57	Max % 3,0
Insoluble Residue	0,2	Max % 0,75
Na ₂ O+0.658*K ₂ O	0,57	Max % 0,75
C ₃ S	63,72	Min % 48,0 Max % 65,0
C ₃ A	2,47	Max % 3,0
C ₄ AF	13,90	
2C ₃ A+C ₄ AF	18,84	Max % 24,0

Çalışmada hedeflenen optimum mekanik özellikler ve ısı yalıtım özelliği olduğundan bunları gerçekleştirmek amacıyla mineral katkı malzemeleri kullanılmıştır. Bunlar ise sırasıyla genleştirilmiş perlit ve yüksek fırın cürufudur. Perlit; yüksek sıcaklıkla suyla birleştiğinde kimyasal reaksiyona uğraması sonucunda camsı silika taneciklerine dönüşür. Bu durumdaki hacmi perlitin işlenmemiş halindeki normal hacminin 20 katı kadar genleşmeye ulaşabilmektedir (Mindess ve ark., 2003; Tie ve ark., 2022). Diğer taraftan kullanılan yüksek fırın cürufu malzemesi İskenderun bölgesindeki Demir-çelik işletmelerindeki ocaklardan temin edilmiştir. Demir üretim süreçlerinde, yüksek sıcaklığa ulaşabilen fırın sistemleri sürekli olarak uygun hammaddelerle beslenmekte ve bu sayede sıcaklık yaklaşık 1600 °C'ye kadar yükselmektedir. Bu yüksek sıcaklık koşullarında, karışım içerisindeki maddeler çözünerek ayrışır; ergimiş metal kütlesi fırının alt kısmında pik demiri olarak toplanırken, yüzeyde daha hafif olan cüruf fazı oluşur. Elde edilen yüksek fırın cürufu daha sonra öğütülerek ayrıştırılır. Çalışmada kullanılan genleştirilmiş perlit ve yüksek fırın cürufu mineralinin kimyasal ve fiziksel bileşimi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Genleştirilmiş perlit ve yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimleri (%)

Kimyasal Bileşim (%)	Genleştirilmiş Perlit	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂	71-75	32-36
Al ₂ O ₃	12-16	11-15
Fe ₂ O ₃	0,5-1,5	0,7-1,2
CaO	0,2-0,5	36-44
MgO	0-0,5	-
SO ₃	-	7-11
Na ₂ O	2,9-4	0,1-0,5
K ₂ O	4-5	0,1-0,5
TiO ₂	0-0,2	-

Bu çalışmada, agregaların özgül ağırlıkları TS EN 1097-6 standardına uygun olarak cam fanus yöntemiyle belirlenmiştir. Özellikle yüksek su emme kapasitesine sahip genleştirilmiş perlitin, çimento harcı içerisindeki su miktarını doğrudan etkilediği görülmüştür; bu durum ise harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Perlit agregaların çimento harcının etkili su/çimento oranını değiştirmesini önlemek ve mekanik özellikleri korumak amacıyla hazırlanan karışımlara eklenmeden önce 30 dakika suyun içinde bekletilmesi tavsiye edilmektedir (Liu ve ark., 2024). Bu doğrultuda, her karışımda kullanılan perlit miktarına bağlı olarak, agregaların 30 dakikalık su emme miktarları laboratuvar ortamında belirlenmiş ve karışım suyu bu değerlere göre ayarlanmıştır. Bu veriler, karışım tasarımında dikkate alınmış ancak tablo dışında bırakılmıştır çünkü deneysel bir ölçüm sonucu olup karışım bileşeni niteliği taşımamaktadır. Farklı elek aralıklarındaki perlit agregasının test edilen fiziksel özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Genleştirilmiş perlit agregalarının fiziksel nitelikleri

Agrega tipi		Elek aralığı (mm)					
		4-8	2-4	1-2	0,5-1	0,25-0,5	0-0,25
GPA	DKY özgül ağırlığı	0,22	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
	Su emme kapasitesi (%)	97,1	62,5	137,6	182,4	216,4	260,6
	Su emme (%)	180,7	189,1	205,6	241,0	271,9	327,5

Kombinasyonu elde etmek için 0,45 dereceden Fuller parabolünden yararlanılmıştır.

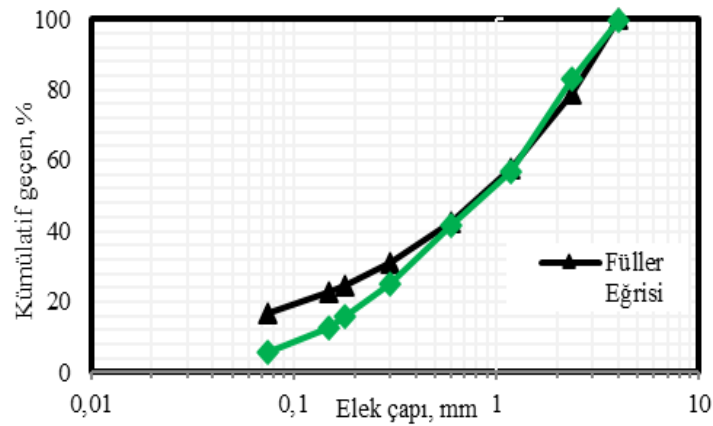
$$P_i = (d_i/D)^{0.45} \quad (1)$$

burada;

P_i : i nolu elekten geçen kümülatif yüzde, %

d_i : i nolu eleğin elek çapı

D: maksimum agregata tane çapını ifade eder.



Şekil 1. Karışık perlit agreganın gradasyon eğrisi

TS EN 933-8 standardında belirtilen oranlar doğrultusunda seçilen agrega fraksiyonları kullanılarak, agrega tane dağılımının Fuller parabolü ile en yüksek uyumu sağlayacak şekilde düzenlenmesi amaçlanmıştır (Şekil 1).

G sınıfı çimentondan beklenen en uygun kıvam, prizlenme ve dayanım özelliklerini sağlayabilmek için uygun kimyasal katkıları eklenmektedir. Geleneksel G sınıfı çimento üretiminde kullanılan kimyasallar sırasıyla dağıtıcı, genişletici ve hızlandırıcı katkılardır. G sınıfı çimentolarda yaygın olarak kullanılan kimyasal katkılara ek olarak, bu çalışmada özellikle sertleşmiş çimento harçlarının yalıtım özelliklerini iyileştirmeye yönelik belirli kimyasal katkı maddeleri kullanılmıştır. Hava sürükleyicisi olarak bilinen bu katkı maddeleri, harcın içine havayı kontrollü bir şekilde sürükleyerek çimentoda mikro düzeyde hava gözenekleri oluşmasını sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan hava sürükleyicisi katkı malzemesinin fiziksel özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Hava sürükleyici katkı maddesinin fiziksel özellikleri

Özellik	Nitelik/Nicelik
Kimyasal bileşen	Alkol yağı ve amonyum tuzu
Yoğunluk (g/cm ³), 20°C	1,00 – 1,02
Alkalin içeriği (%)	<10
Renk	Amber
Hali	Sıvı

2.2. Çimento Harcının Hazırlanması

Hazırlanan çimento karışımının üretim süreci; API standartlarına uygun olarak katkı maddelerinin miktarlarının hesaplanmasıyla başlamakta ve bu süreç birden fazla aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, oluşturulacak çimento karışımının uygun birim hacim ağırlığı, yüksek işlenebilirlik ve yeterli dayanım gibi temel özellikleri sağlayabilmesi için, öncelikle uygun su/çimento oranı belirlenmiş, ardından uygun oranlardaki agrega ve kimyasal katkı miktarları tespit edilmiştir. Hedeflenen optimum özelliklere ulaşmak amacıyla literatür taramasına dayalı çok sayıda deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda yeni geliştirilen G sınıfı harç için en uygun su/çimento oranı 0,28 olarak belirlenmiştir. Karışımlarda, düşük birim ağırlık, yüksek işlenebilirlik, yeterli dayanım ve iyi bir ısı yalıtım performansı elde edebilmek amacıyla, toplam karışım hacmi baz alınarak %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında genişletilmiş perlit agregası ilave edilmiştir. Literatürde yer alan optimum değerler ve ön deneysel çalışmalar doğrultusunda, yüksek fırın cürufu oranı %20 olarak sabitlenmiştir. Ayrıca, çimento harcının mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla tüm karışımlara, çimento ağırlığının %20'si oranında yüksek fırın cürufu ile birlikte belirli oranlarda akışkanlaştırıcı, hızlandırıcı, genişletici ve hava sürükleyici katkı maddeleri de eklenmiştir. 1 metreküp karışım hacmi için gerekli malzeme miktarları (kg) hesaplanmış olup, ilgili değerler Tablo 5'te sunulmuştur. Karışımlar sırasıyla, sadece normal G tipi çimento içeren Referans harcı (R), yüksek fırın cürufu G sınıfı harç (GFC), çeşitli kimyasal katkılar içeren katkılı G sınıfı harç (KGÇ) ve genişletilmiş perlit katkısı da içeren katkılı G sınıfı harç (KGP) olarak üretilmiştir. Harç adlarının sonundaki sayılar (5, 10, 15, 20, 25, 30), karışımda yer alan perlit oranını yüzde (%) cinsinden ifade etmektedir. Hazırlanan

karışımlar, homojen hale gelinceye kadar 20 L'lik küçük dikey eksenli bir karıştırma kabında zorlamalı beton mikseri ile karıştırıldı ve elde edilen harçlar bir titreşim masasında 2 dakika boyunca düzgün bir şekilde sıkıştırıldı. Tüm deneyler için, her seriden 4 x 4 x 16 cm³'lük dikdörtgen prizma numunelerinden 15 adet çelik kalıplara döküldü ve 20±2 °C sıcaklıktaki bir laboratuvarında 24 saat bekletildi. Kalıplardan çıkarılan numuneler API standardına bağlı olarak %40 ile %60 bağıl nemde 60 °C'ye ayarlanan bir fırında 8 saat boyunca kurutulmuştur.

Tablo 5. Metreküp çimento harcı için hesaplanan karışım miktarları (kg)

Numune	R	GFC	KGÇ	KGP5	KGP10	KGP15	KGP20	KGP25	KGP30
S/Ç Oranı	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Perlit				35,3	62,5	84,2	101,8	116,6	128,8
Su	472,6	467,1	453,9	388,1	343,5	308,5	279,7	256	235,8
Çimento	1687,8	1334,6	1296,9	1108,8	981,4	881,5	799,1	731,4	673,7
Dis 180			6,5	4,2	3,7	2,2	2	0,9	0,8
Geo Acc			6,5	5,5	4,9	4,4	4	3,7	3,4
Geo Ext			6,5	5,5	4,9	4,4	4	3,7	3,4
Hava sürük.			4,9	4,2	3,7	3,3	3	2,7	2,5
Fırın cürufu		333,6	324,2	277,2	245,4	220,4	199,8	182,9	168,4
Kuru yoğ. (kg/m³)	1687,76	1668,21	1645,46	1440,65	1306,45	1200,47	1113,6	1041,79	981,02
Taze karışım yoğ. (kg/m³)	2160,34	2135,31	2099,38	1828,72	1649,96	1509,01	1393,27	1297,78	1216,81

2.3. Numunelerine Uygulanan Testler

G sınıfı çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Uygulanan testler arasında kuru yığın yoğunluğu, gözeneklilik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ısı iletkenlik yer almaktadır. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde hava kurusu numuneler kullanılmıştır. Ancak, nem içeriğinin ölçüm sonuçlarını etkileyebileceği dikkate alınarak, kuru yığın yoğunluğu ve ısı iletkenlik testleri, fırında kurutulmuş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Tek eksenli basma deneyi

Tek eksenli basınç dayanımı testleri, EN 12390-1 standardı esas alınarak gerçekleştirilmiş ve numuneler, 40×40 mm kesit boyutlarına sahip kare prizma şeklinde hazırlanmıştır. Bu numuneler, iki metal plaka arasına yerleştirilerek 0,5 MPa/sn yükleme hızı ile test edilmiştir (Şekil 2). Eğilme dayanımı testleri için her seriden 4×4×16 cm boyutlarındaki beş prizmatik numune hazırlanmış ve üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Bu testler, ASTM C203 (1999) standardı doğrultusunda, 250 kN kapasiteli Shimadzu AG-IC tipi universal test cihazında ve 17,78 N/sn yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Isıl iletkenlik testlerinin gerçekleştirilmesi

Gözeneklilik testleri, tüm beton numunelerine ASTM C1202-12 standardına uygun olarak vakum doygunluk yöntemiyle uygulanmıştır. Isıl özellik ölçümleri için ise, etüvde kurutulmuş ve 4×4×16 cm boyutlarında hazırlanan numuneler, EN 12667 (2003) standardı doğrultusunda test edilmiştir. Bu ölçümler sırasında TPS 500S cihazı kullanılarak sertleşmiş çimento harçlarının ısı iletkenliği, özgül ısı kapasitesi ve ısı yayılım katsayısı belirlenmiştir (Şekil 3). Numuneler, ASTM C332 standardına uygun biçimde, 105 °C sıcaklıktaki etüvde, 24 saat içinde %1'in üzerinde ağırlık kaybı gözlenmeyene kadar kurutulmuş, ardından yüzeyleri ölçüm öncesinde zımparalanarak hazırlanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Üretilen G sınıfı çimento numunelerinin mekanik ve ısıl özellikleri test edilmiş olup, tek eksenli basınç dayanımı, üç nokta eğme dayanımı, kuru yığinsal yoğunluk, gözeneklilik (porozite) ve ısıl iletkenlik test sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Petrol, doğalgaz ve jeotermal kuyu sondaj işlemlerinde çimentolama operasyonlarına müteakip devam edilecek olan sondaj işlemlerinde çimentonun hidratasyon sürecinin yani dayanım gelişiminin belirlenmesi iş ve işlerin takip ve düzenlenmesine ilave olarak maliyeti de etkileyecektir. Özellikle günlük maliyetin çok yüksek düzeylerde olduğu deniz sondajlarında bu sürecin yani çimento dayanım gelişiminin olabilecek en kısa süre zarfında olması istenmektedir. Dolayısıyla, G sınıfı çimentonun basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yeterli seviyede olması, kuyu çimentolama uygulamalarında temel bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Genel olarak, çimentonun basma

dayanımının takriben 3,5 MPa (500 Psi) değerini sağlamı ile koruma borusunun desteklenmesi sağlanmış olacağından kuyu sondajına devam edilmesinin iş ve işlemleri güvenli tarafta bırakacağı sonucuna varılmıştır (API RP 10B-5 (ISO 10426-5) (2005).

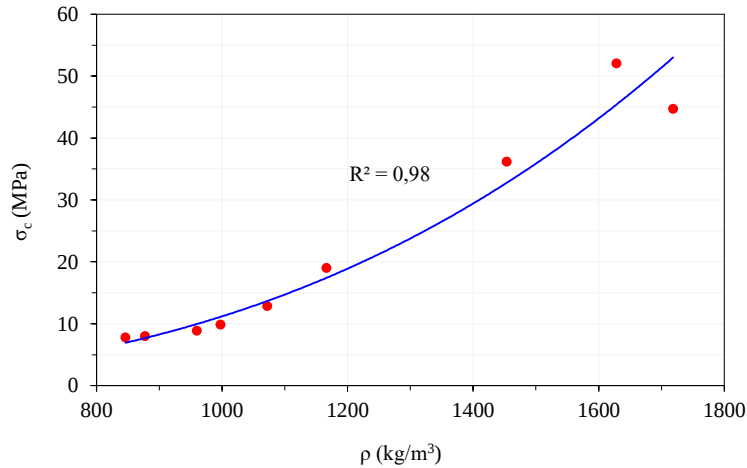
Tablo 6. G sınıfı çimento harçlarının mekanik ve ısı özellikleri

Mixture	σ_c (Mpa)	σ_t (Mpa)	ϕ (%)	λ (W/m.K)	ρ_k (kg/m ³)
R	44,67	2,01	22,97	0,800	1718,51
BFGC	52,02	3,16	21,86	0,695	1628,39
AGC	36,14	2,36	24,31	0,659	1453,57
GEPC5	18,98	2,30	24,70	0,453	1166,07
GEPC10	12,83	2,06	25,85	0,401	1071,76
GEPC15	9,83	1,57	26,82	0,384	997,42
GEPC20	8,84	1,46	27,74	0,353	959,52
GEPC25	7,96	1,26	28,91	0,333	876,84
GEPC30	7,79	1,13	30,27	0,301	845,97

Tablo 6’da gösterilen sonuçlara göre test edilen G sınıfı çimento harçlarının basma dayanımlarının (σ_c) 7,79 MPa ila 52,02 MPa arasında değiştiği, eğme dayanımlarının (σ_t) ise 1,13 MPa ila 3,16 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

3.1. Analitik Analizler

Bu bölümde, test edilen çimento numunelerinin termofiziksel özellikleri analitik olarak karşılaştırılmış ve aralarında doğrudan bir ilişki olup olmadığı incelenmiştir. Farklı kimyasal katkıların ve çeşitli oranlardaki perlit ikamesinin kullanılmasıyla elde edilen G sınıfı çimento harçlarının mekanik ve fiziksel özelliklerinde görülen farklılıklar, incelenen parametre aralığını genişleterek bu alandaki uygulamalarda daha kapsamlı değerlendirmeler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Çimentolara ait özelliklerin analizleri Microsoft Excel yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Kurulan regresyon modellerinin doğruluğu, çoklu belirleme katsayısının karesi olan R^2 değeri üzerinden değerlendirilmiştir. R^2 değerinin “1”e yaklaşması, incelenen veriler arasındaki ilişkinin anlamlılığını göstermektedir. Bu analizlerde parametreler arasındaki en uygun bağıntı türü olarak üstel eğri seçilmiş ve grafiklerde ilgili R^2 değerleri ile gösterilmiştir.



Şekil 4. G sınıfı çimento tiplerinin basma dayanım ve kuru yoğunluk arasındaki ilişkisi

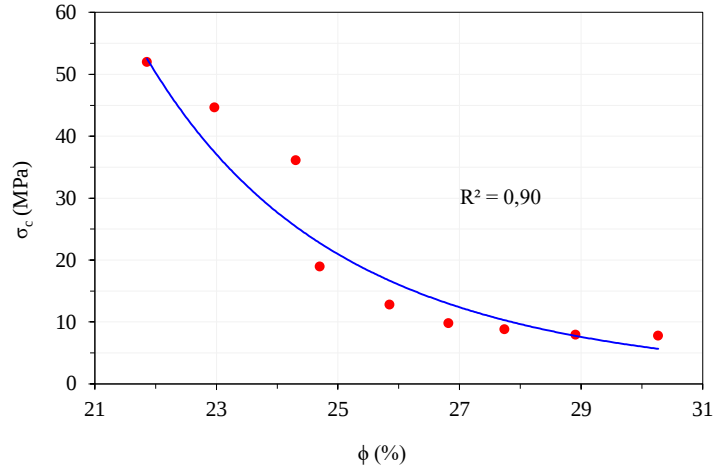
Literatürde benzer çalışmaların da genellikle üstel eğri üzerinden yürütülmesi nedeniyle, bu yönteme bu çalışmada da yer verilmiştir. Şekil 4'te, elde edilen numunelerin basma dayanımı ile kuru yoğunluk değerleri arasındaki ilişki sunulmaktadır.

Regresyon analizi ile elde edilen denklem, test edilen basınç dayanımı (σ_c) değerlerini temsil etmekte olup, bu dayanımın kuru yığın yoğunluğu (ρ) ile ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$\sigma_c = 3 \times 10^{-8} \rho^{2,87} \quad (2)$$

Denklem (2), $R^2 = 0,95$ olan numunelere ait sonuçların birleşimine dayanarak güçlü bir korelasyon ortaya koymaktadır. Bu denklem, numunelerin kuru yoğunluklarının test edilen aralıkta kalması koşuluyla, G sınıfı çimento harçlarının basma dayanımının tahmininde kullanılabilir. Ancak, bu aralığın dışındaki farklı içeriklere sahip malzemeler için denklemin dikkatli bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Elde edilen sonuçlara göre test edilen G sınıfı çimento harçlarının basma dayanımlarının (σ_c) 7,79 MPa ila 52,02 MPa arasında, kuru yoğunluklarının ise 846 kg/m³ ile 1718,5 kg/m³ arasında değiştiği görülmüştür. Şekil 4 incelendiğinde, eğrinin eğiminin 1200 kg/m³ üzerindeki yoğunluk değerlerinde daha dik olduğu görülmektedir. Karışımdaki genleştirilmiş perlit oranı %5'ten %30'a yükseldiğinde, referans numune olan katkısız G sınıfı çimentoya kıyasla basınç dayanımında %55,27 ile %82,56 arasında azalma gözlemlenmiştir. Bu durum, genleştirilmiş perlitin mevcut G sınıfı çimentoya göre daha yüksek gözeneklilik ve düşük mekanik dayanım sergilemesinden kaynaklanmaktadır. Öte yandan, yüksek fırın cürufu katkısının çimentoya ikame edilmesiyle hazırlanan karışımların, katkısız G sınıfı çimentoya göre daha yüksek basma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Bu artış, mineral katkılı yüksek fırın cürufunun numunenin geçirgenlik ve mukavemet gibi temel özelliklerini iyileştirmesine bağlanabilir. Literatürde yüksek fırın cürufunun çimento hidratasyonu sırasında C-S-H jeli oluşumunu artırdığı ve gözenek yapısını sıkılaştırarak mekanik dayanımı iyileştirdiği SEM analizleri ile gösterilmiştir (Larki ve ark., 2019; Dousti ve ark., 2022). Bu çalışmadaki basınç ve eğilme dayanımı artışları da benzer mekanizmalarla açıklanabilir.

Elde edilen %62'ye varan ısı iletkenlik azalması, sadece laboratuvar koşullarında değil, saha uygulamaları açısından da dikkate değerdir. Özellikle ağır petrol içeren kuyularda, üretim hattı boyunca sıcaklığın daha iyi korunması, parafin ve asfaltin çökelmelerinin engellenmesine katkı sağlayabilir. Bu durum, üretim sürekliliğini artırmanın yanı sıra, kimyasal çözücü veya mekanik müdahale gibi maliyetli işlemlere olan ihtiyacı azaltma potansiyeli taşır.

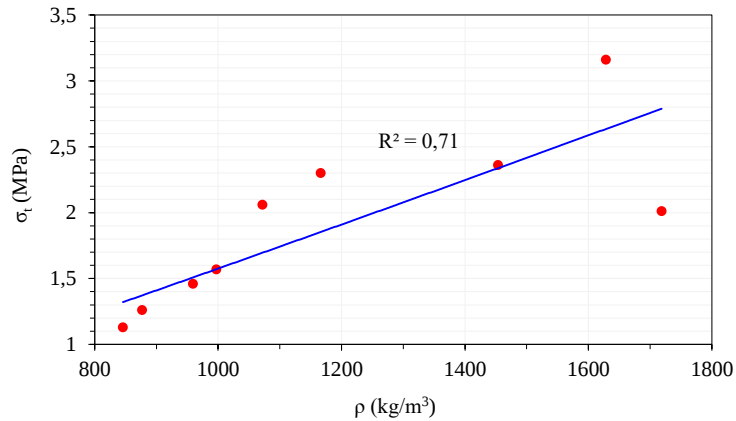


Şekil 5. G sınıfı çimento tiplerinin basma dayanım ve porozite arasındaki ilişkisi

Şekil 5’te sunulan regresyon analizi sonucunda elde edilen denklem, test edilen aralıktaki basma dayanımı ile porozite (%) değerlerinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$\sigma_c = 8 \times 10^{10} \phi^{-6,85} \quad (3)$$

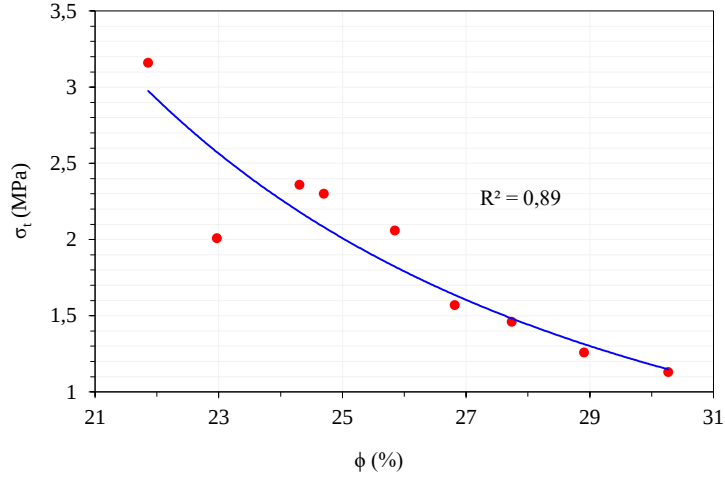
Denklem (3), $R^2 = 0,92$ olan numunelere ait sonuçların birleşimine dayanarak güçlü bir ilişki ortaya koymaktadır. G sınıfı çimentoya geliştirilmiş perlitin eklenmesiyle numune içindeki boşluk miktarı artmış ve buna bağlı olarak basma dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Bununla birlikte KGÇ numunesi içerisinde kullanılan yüksek fırın cürufu ise dayanımın daha fazla düşmesini engellemiştir. Sonuçlar incelendiğinde geliştirilmiş perlit miktarının %10’a kadar kullanıldığı numunelerin basma dayanımları API standartında G sınıfı çimentolar için belirlenen değerin (10,3 MPa) üstünde olduğu görülmüştür. Bu değer, geliştirilmiş perlit miktarının %10 ‘dan %30’a kadar kullanımında orantılı olarak standart değerin altına düşmüştür. Sonuç olarak, basınç dayanım değerleri 3,5 MPa’nın üzerinde olduğundan API değerinin altında kalan numunelerin bile uygulama alanlarına göre kullanılabileceği yukarıda belirtilmiştir.



Şekil 6. G sınıfı çimento tiplerinin üç nokta eğme dayanım ve kuru yoğunluk arasındaki ilişkisi

Üretilen G sınıfı çimento numunelerinin üç nokta eğme dayanımı ile kuru yoğunluk değerleri arasındaki ilişki Şekil 6'da sunulmaktadır. Elde edilen verilere göre, test edilen çimento harçlarının üç nokta eğme dayanımı (σ_c) 1,13 MPa ile 3,16 MPa arasında değişim göstermiştir. Regresyon analizinden elde edilen R^2 değeri 0,62 olup, bu durum eğme dayanımı ile kuru yoğunluk arasında anlamlı bir korelasyon olmadığını göstermektedir. Bu çalışmada, veriler arasındaki ilişkinin doğasını tanımlamada üssel model tercih edilmiştir. Üssel modeller, çimento esaslı malzemelerin mekanik özellikleri ile fiziksel parametreleri arasındaki korelasyonların belirlenmesinde literatürde sıklıkla kullanılan ve yüksek açıklayıcılık sağlayan fonksiyonel yapılardır (Nelson ve Guillot, 2006; Topçu ve Işıkdag, 2008). Ayrıca bu model, düşük veri noktası sayısı ve geniş varyans içeren deneysel verilerde aşırı uyum riskini azaltarak istatistiksel güvenilirliği koruma avantajı sunmaktadır. Bu görece düşük R^2 değerinin, geliştirilmiş perlitin çimento harçlarında basma ve eğilme dayanımlarını farklı mekanizmalarla etkilemesinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Özellikle perlitin gözenekli yapısı ve puzolanik etkisi, basma dayanımını düşürürken, eğme dayanımı üzerindeki etkisi daha kompleks olabilir. G sınıfı çimentoya geliştirilmiş perlitin eklenmesiyle çimento harçlarının yoğunluğu azalmış ve buna paralel olarak basma dayanımlarında da düşüş meydana gelmişti. Basma dayanımı değerlerinin üç nokta eğme dayanımı ile nerdeyse doğru orantılı olduğu tespit edilmesine rağmen, özellikle geliştirilmiş perlit içeren numunelerde yüksek eğme dayanımı görülmüştür. Bunun nedeni, perlit içeren çimentonun normal çimentolara göre puzolanik reaksiyonla oluşturduğu çimentonun hidratasyonu sırasında ilave C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) fazlarının, çimento malzemesinin esnekliğini ve bağ dayanımını arttırarak eğme dayanımını arttırdığı söylenebilir. Çimento harçlarının eğme dayanımları karşılaştırıldığında referans çimentoya göre karışımdaki geliştirilmiş perlit miktarının %5 kullanıldığı numunede %32,71 artış, %30 perlit miktarın kullanıldığı numunede ise %14,01 azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte %20 fırın cürufu eklenmiş GCF numunesin katkısız G sınıfı çimentoya göre yoğunluğu daha az olmasına rağmen daha yüksek eğme dayanımı özelliği göstermiştir.

Çalışmada yer alan diğer fiziksel ve mekanik parametrelerde genellikle ikinci dereceden veya üssel korelasyonlar tercih edilmiş olmasına rağmen, eğme dayanımı ile kuru yoğunluk arasındaki ilişki için birinci dereceden model seçilmiştir. Bu seçim, ilgili veri setinde daha yüksek dereceli modellerin aşırı uyum riski taşıması ve birinci dereceden modelin fiziksel yoruma daha uygun bir yapı sunması nedeniyle yapılmıştır.

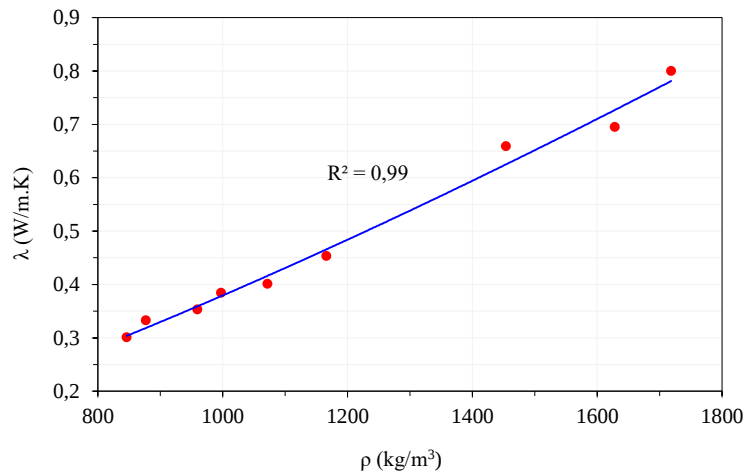


Şekil 7. G sınıfı çimento tiplerinin üç nokta eğme dayanım ve porozite arasındaki ilişki

Şekil 7’de, hazırlanan çimento harçlarının üç nokta eğilme dayanımı ile porozite değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Regresyon analizi sonucunda elde edilen model, test edilen aralıkta eğilme dayanımı (σ_t) ile kuru yığın yoğunluğu (ρ) arasındaki bağıntıyı açıklamaktadır ve şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\sigma_t = 2,5 \times 10^4 \phi^{-2,93} \quad (4)$$

Denklem (4), $R^2 = 0,85$ olan numunelere ait sonuçların birleşimine dayanarak iyi bir ilişki ortaya koymaktadır. G sınıfı çimentoya genleştirilmiş perlitin eklenmesiyle numune içindeki boşluk miktarı artmış ve buna bağlı olarak eğme dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Diğer taraftan perlit içeren çimentoların puzolanik reaksiyonla oluşturduğu ilave C-S-H fazlarının, çimento malzemesinin esnekliğini ve bağ dayanımını arttırarak eğme dayanımını bir nebze yükselttiği söylenebilir.



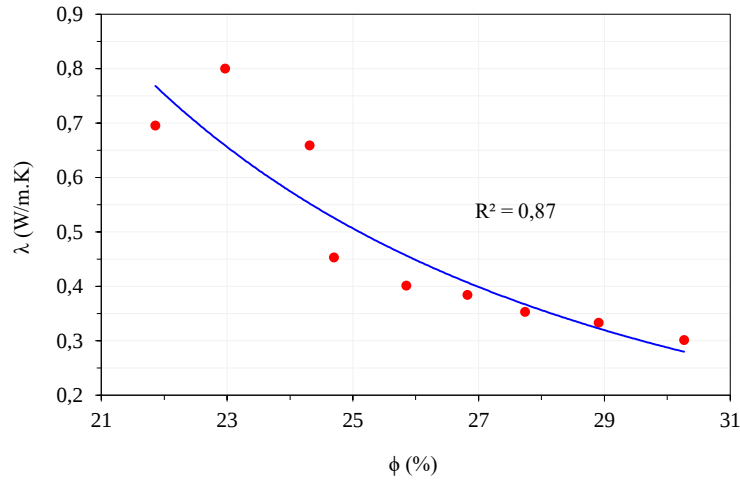
Şekil 8. G sınıfı çimento tiplerinin ısı iletkenlik ve kuru yoğunluk arasındaki ilişkisi

Üretilen G sınıfı çimento harçlarının kuru yoğunlukları ile ısı iletkenlikleri arasındaki ilişki Şekil 8’de gösterilmiştir. Tüm numunelerden elde edilen veriler doğrultusunda, bu iki parametre arasında üssel bir korelasyon belirlenmiş olup, hesaplanan determinasyon katsayısı (R^2) 0,99 olarak bulunmuştur. Bu

durum, değişkenler arasındaki ilişkinin oldukça yüksek bir doğrulukla tanımlandığını göstermektedir. Söz konusu ilişki aşağıdaki regresyon denklemi ile ifade edilmektedir:

$$\lambda = 4 \times 10^{-5} \rho^{1,33} \quad (5)$$

Yapılan deneysel analizler sonucunda numunelerin kuru yoğunluk değerlerinin 846 kg/m^3 ile $1718,5 \text{ kg/m}^3$ aralığında değiştiği tespit edilmiştir. G sınıfı çimentonun %5 ila %30 oranında genişletilmiş perlit agregası ile ikame edilmesiyle, referans numuneye kıyasla kuru yoğunluk değerlerinde %32,14 ile %50,77 arasında değişen oranlarda azalma gözlemlenmiştir. Bu azalmalar, genişletilmiş perlitin G sınıfı çimentoya kıyasla daha düşük yoğunluğa ve daha gözenekli yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Perlitin numunelerde gözenekliliği artırması, yoğunlukların düşmesine ve buna bağlı olarak ısı iletkenliğinin azalmasına neden olmuştur. Ayrıca, genişletilmiş perlit dışında, katkılı tüm numunelere eklenen hava sürükleyici katkı da yapıya dahil edilen hava boşluklarını artırarak ısı iletkenliğinin düşürülmesinde etkili olmuştur. Buna ek olarak, kullanılan yüksek fırın cürufunun da G sınıfı çimentoya göre daha düşük yoğunluk ve ısı iletkenliğe sahip olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda, GFC ve KGÇ türü çimentoların kuru yoğunlukları referans çimentoya göre sırasıyla %5,24 ve %15,41 oranında daha düşük bulunurken, bu numunelerin ısı iletkenlik değerlerinde de sırasıyla %13,13 ve %17,62 oranında azalma tespit edilmiştir.



Şekil 9. G sınıfı çimento tiplerinin ısı iletkenlik ve porozite arasındaki ilişkisi

Şekil 9'da, hazırlanan numunelere ait ısı iletkenlik ile porozite değerleri arasındaki ilişki sunulmaktadır. Regresyon analizi sonucunda elde edilen denklem, test edilen aralık boyunca porozite (ϕ) değerlerini temsil etmekte olup, ısı iletkenliğinin (λ) bir fonksiyonu olarak aşağıda verilmiştir.

$$\lambda = 1 \times 10^4 \phi^{-3,1} \quad (6)$$

Elde edilen bulgular doğrultusunda, test edilen numunelerin ısı iletkenlik değerlerinin 0,301–0,800 W/mK aralığında, porozite değerlerinin ise %21,86 ile %30,27 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Genleştirilmiş perlit esaslı numunelere ait veriler değerlendirildiğinde, bu agreganın %5'ten %30'a kadar olan oranlarda G sınıfı imento ile ikame edilmesi sonucunda, referans numuneye kıyasla ısı iletkenlik değerlerinde %43,38 ile %62,37 arasında azalma, porozite değerlerinde ise %12,54 ile %31,78 arasında artış meydana gelmiştir. Denklem (6), $R^2 = 0,83$ olan bu veriler temelinde, ısı iletkenlik ile porozite arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde yansıtmaktadır.

G sınıfı çimentonun bileşiminde yer alan minerallerin yüksek gözenekli yapısı ile genleştirilmiş perlitin benzer şekilde gözeneklilik göstermesi, toplam porozite oranında artışa neden olmuştur. Bu artış, iç yapıda tutulan hava miktarını da beraberinde getirmiştir. Durgun havanın ısı iletkenliği 0,024 W/mK olup, yapı içindeki hava oranının artmasıyla birlikte bu değere yaklaşılması beklenmektedir. Ancak, gözeneklerin geometrik özelliklerinin de ısı iletkenlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu unutulmamalıdır. Yapı bünyesinde bulunan mikro ve mezo düzeydeki gözeneklerin, imento numunelerinin ısı iletkenlik performansını doğrudan etkilediği söylenebilir. Bununla birlikte, GFC numunesinde, katkısız G sınıfı imento numunesine kıyasla gözeneklilikte %5,08 oranında bir azalma kaydedilmiştir. Bu durum, fırın cürufunun hidrasyon süreci esnasında yapıdaki boşluk hacminin azalmasından kaynaklanmaktadır.

4.Sonuçlar

Bu çalışmada, petrol/doğalgaz ve jeotermal kuyu uygulamaları için yalıtım özellikleri geliştirilmiş yeni tip G sınıfı imento harçları tasarlanmıştır. Farklı oranlardaki kimyasal ve mineral katkıların kullanımıyla, imento harcının yoğunluk, basınç ve eğilme dayanımı gibi temel mekanik özellikleri ile gözeneklilik gibi fiziksel ve ısı iletkenlik gibi termal özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen numunelerin termofiziksel özellikleri çoklu regresyon analizi ile değerlendirilmiş ve beklenildiği üzere, kuru yoğunluk ile ısı iletkenlik arasında güçlü ilişkilerin bulunduğu ortaya konmuştur. Genleştirilmiş perlit miktarının imento harcı içerisinde artışı gözeneklilik değerlerini arttırmış olup, bu durum G sınıfı çimentoların kuru yoğunluk değerlerinin, basma ve eğme mukavemetlerinin genel anlamda azalmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte imento içerisindeki durgun hava miktarı arttığından çimentonun ısı iletkenlik değerleri azalarak yalıtım özelliğinin iyileşmesini sağlamıştır. Bununla birlikte kullanılan kimyasal katkı ve yüksek fırın cürufu ile üretilen numunelerin katkısız G sınıfı çimentoya göre ısı iletkenlik değerleri azalmış, mukavemet özellikleri iyileşmiştir. Çimentoya eklenen kimyasal katkıların imento harcının ısı yalıtım özelliklerini iyileştirdiği görölmüştür.

Yapılan analizler sonucu elde edilen denklemlerin kullanımıyla, test edilen aralıktaki herhangi bir yapı malzemesine ait bilinen bir özellik üzerinden diğer temel özelliklerin tahmini mümkün olacaktır. Bu yaklaşım, yoğunluk gibi kolay, hızlı ve düşük maliyetle ölçülebilen bir parametre kullanılarak, sunulan denklemler aracılığıyla diğer önemli özelliklerin hesaplanmasını sağlayarak zaman ve maliyet açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan geliştirilmiş perlit katkılı G sınıfı çimentoların yüksek ısı yalıtım özellikleri sayesinde, petrol/doğalgaz ve jeotermal kuyularda gerçekleştirilecek çimentolama uygulamalarında kuyu verimliliğinin artırılmasının yanı sıra, ilave yalıtım veya tamamlama işlemlerine olan gereksinimin azaltılmasıyla enerji tüketimi ve işletme maliyetlerinde düşüş sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen veriler, özellikle petrol ve doğalgaz üretiminde kullanılacak çimento sistemlerinin performansını değerlendirmek açısından önemli olup, ileride yapılacak detaylı araştırmalar için de yönlendirici niteliktedir.

Bu çalışma, perlit ve yüksek fırın cürufunun G sınıfı çimento özelliklerini iyileştirmede umut verici katkılar sunduğunu göstermektedir. Gelecekteki çalışmalarda, farklı puzolanik minerallerin veya nano-ölçekli katkı maddelerinin benzer yöntemlerle değerlendirilmesi faydalı olacaktır.

Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.”

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.”

Yazar Katkıları

- “ÖZTÜRK”, “OKTAY”. Çalışma konsepti ve tasarım
- “ÖZTÜRK”, “OKTAY”, “GÜNDÜZ”. Veri toplama
- “ÖZTÜRK”, “OKTAY”. Verilerin analizi ve yorumlanması
- “ÖZTÜRK”, “OKTAY”. Taslağın oluşturulması
- “ÖZTÜRK”, “OKTAY”, “GÜNDÜZ”. Revizyon

Teşekkür

Çalışmada, “İskenderun Teknik Üniversitesi ve Batman Üniversitesi” laboratuvarında çalışmamıza izin vererek destek olan, İskenderun Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölüm Bşk. ‘lığına ve Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Bşk. ‘lığına teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Abo-El-Enein SA., El-Hosiny FI., El-Gamal SMA., Amin MS., Ramadan M. Gamma radiation shielding, fire resistance and physicochemical characteristics of Portland cement pastes modified with synthesized Fe₂O₃ and ZnO nanoparticles. Construction and Building Materials 2018; 173: 687-706.
- Anyaa A. Lightweight and ultra-lightweight cements for well cementing-a review. In SPE Western Regional Meeting, 2018 April 22, p. D031S003R003), SPE.
- Demirel Ö., Demirhan S. Investigation of microstructural properties of high-volume fly ash blended cement mortars including micronized calcite. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2021; 36(4): 2255-2269.

- Demirhan S. Combined effects of nano-sized calcite and fly ash on hydration and microstructural properties of mortars. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2020; 20(6): 1051-1067.
- Dousti A., Beyki H., Shekarchi M. Strength and durability performance of mortars incorporating calcined clay as pozzolan in comparison with silica fume. *Journal of Civil Engineering and Materials Application* 2022; 6(3): 159-174.
- Du J., Bu Y., Cao X., Shen Z. Utilization of alkali-activated slag-based composite in deepwater oil well cementing. *Construction and Building Materials* 2018; 186: 114-122.
- Guo J., Li M., Wang L., Yang B., Zhang L., Chen Z., Abraham A. Estimating cement compressive strength using three-dimensional microstructure images and deep belief network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2020; 88: 103-378.
- Kalkan ŞO., Gündüz L., İsker AM. A comparative analysis on the effects of pumice, tuff and conventional aggregates on energy efficiency performance in new generation composite mortars. *Arabian Journal of Geosciences* 2021; 14(11): 929.
- Kanavaris F., Soutsos M., Chen J. Effect of temperature on the early-age hydration and setting behaviour of mixes containing GGBS. *Journal of Advanced Concrete Technology* 2024; 22(1): 14-32.
- Kjellsen KO., Detwiler RJ., Gjorv OE. Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research* 1991; 21(1): 179-189.
- Krauß M., Hariri K. Determination of initial degree of hydration for improvement of early-age properties of concrete using ultrasonic wave propagation. *Cement Concrete Composites* 2006; 28(4): 299-306.
- Larki OA., Apourvari SN., Schaffie M., Farazmand R. A new formulation for lightweight oil well cement slurry using a natural pozzolan. *Advances in Geo-Energy Research* 2019; 3(3): 242-249.
- Ledesma RB., Lopes NF., Bacca KG., de Moraes MK., dos Santos Batista G., Pires MR., da Costa EM. Zeolite and fly ash in the composition of oil well cement: Evaluation of degradation by CO₂ under geological storage condition. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2020; 185: 106656.
- Li Z., Vandenbossche JM., Iannacchione A., Vuotto A. Characterization of oil well cement performance during early hydration under simulated borehole conditions. *SPE Journal* 2021; 26(06): 3488-3504.
- Li G., Zhao X. Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites* 2003; 25(3): 293-299.
- Liu Y., Deng H., Jiang Z., Tian G., Wang P., Yu S. Research on influence laws of aggregate sizes on pore structures and mechanical characteristics of cement mortar. *Construction and Building Materials* 2024; 442: 137606.
- Lécolier E., Rivereau A., Le Saoût G., Audibert-Hayet A. Durability of hardened portland cement paste used for oilwell cementing. *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP* 2007; 62(3): 335-345.

- Ma S., Kawashima S. A rheological approach to study the early-age hydration of oil well cement: Effect of temperature, pressure and nanoclay. *Construction and Building Materials* 2019; 215: 119-127.
- Mindess S., Young JF., Darwin D. *Concrete* 2nd ed. NY: Prentice Hall Upper Saddle River, NJ 07458, 2003.
- Nelson EB, Guillot D. *Well cementing* 2nd ed. NY: Schlumberger, Sugar Land, TX., 2006.
- Pyatina T., Sugama T., Moghadam A., Naumann M., Skorpa R., Feneuil B., Godøy R. Assessment of cementitious composites for high-temperature geothermal wells. *Materials* 2024; 17(6): 1320.
- Qian X., Li Z. The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. *Cement and Concrete Research* 2001; 31(11): 1607-1611.
- Scherer GW., Funkhouser GP., Peethamparan S. Effect of pressure on early hydration of class H and white cement. *Cement and Concrete Research* 2010; 40(6): 845-850.
- Shi C., Day RL. A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research* 1995; 25(6): 1333-1346.
- Sun LJ., Pang XY., Ghabezloo S., Yan HB. Modeling the hydration, viscosity and ultrasonic property evolution of class G cement up to 90 °C and 200 MPa by a scale factor method. *Petroleum Science* 2023; 20(4): 2372-2385.
- Tie TS., Mo KH., Alengaram UJ., Kaliyavaradhan SK., Ling TC. Study on the use of lightweight expanded perlite and vermiculite aggregates in blended cement mortars. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 2022; 26(8): 3612-3631.
- Topçu İB., Işıklıdağ B. Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal of Materials Processing Technology* 2008; 204(1-3): 34-38.
- Wang SD., Scrivener KL. Hydration products of alkali activated slag cement. *Cement and Concrete Research* 1995; 25(3): 561-571.
- Wei T., Cheng X., Gu T., Huang S., Zhang C., Zhuang J., Zheng Y. The change and influence mechanism of the mechanical properties of tricalcium silicate hardening at high temperature. *Construction and Building Materials* 2021; 308: 125065.
- Yazıcı N., Karagöl F. Examination of mechanical and durability properties of fly ash based and slag added geopolymer concretes. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2022; 12(3): 1592-1606.
- Zhang H., Hu M., Li PP., Liu GQ., Chang QL., Cao J., Liu M., Xu WH., Xia XJ., Guo JT. Thickening progression mechanism of silica fume-oil well cement composite system at high temperatures. *Petroleum Science* 2024; 21(4): 2793-2805.
- Zhiqiang W., Renjun X., Jin Y., Xiucheng N., Xiaowei C. High-temperature mechanical properties and microstructure of high belite cement. *Frontiers in Materials* 2022; 9: 831889.