



PERLİT GENLEŞTİRMEDE SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN AGREGA KARAKTERİSTİĞİNE ETKİLERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME-YENİ BİR YAKLAŞIM

¹Lütfullah GÜNDÜZ , ^{2*}Şevket Onur KALKAN 

*İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir,
TÜRKİYE*



¹lutfullah.gunduz@ikcu.edu.tr, ²sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Genleştirme işlemi sonrası perlit agreganın mukavemetini, kırılgenliğini ve ufalanma olgusunu temsili olarak tanımlayabilmek amacıyla yeni bir yaklaşım irdelenmiştir.
- Bu çalışmada, perlit genleştirmede 560 °C ve 830 °C eşik sıcaklık değerleri olarak tanımlanmıştır.
- Maksimum tane iriliği arttıkça, su ile etkileşime girdiğinde çökme (deforme olma) değerlerinin de arttığı görülmüştür.
- Genleşmiş perlit ile üretilen harç örneklerinde, perlit agreganın genleştirme sıcaklık değeri arttıkça agreganın artan çökme değeri ve azalan yığın yoğunluğu sebebiyle yayılma değerlerinin azaldığı görülmüştür.



PERLİT GENLEŞTİRMEDE SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN AGREGA KARAKTERİSTİĞİNE ETKİLERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME-YENİ BİR YAKLAŞIM

¹Lütfullah GÜNDÜZ , ²Şevket Onur KALKAN 

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir,
TÜRKİYE

¹lutfullah.gunduz@ikcu.edu.tr, ²sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

(Geliş/Received: 16.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.11.2022)

ÖZ: Bu çalışma kapsamında, ham perlitin eşdeğer bir sürede farklı sıcaklık değerlerinde genleştirme işlemi sonrası oluşan genişmiş agrega formlarının değişimi analiz edilmiş olup, genişmiş perlitin yapısal karakteristiğine etkiyen faktörler incelenmiştir. Özellikle genleştirme işlemi sonrası perlit agreganın mukavemetini, kırılgenliğini ve ufalanma olgusunu temsili olarak tanımlayabilmek amacıyla yeni bir yaklaşım irdelenmiştir. Çalışmada, 125-250 µm, 250-500 µm ve 500-750 µm boyut aralıklarındaki ham perlit kullanılmıştır ve genleştirme sıcaklıkları sırasıyla, 200, 360, 410, 480, 530, 560, 590, 610, 640, 660, 690, 730, 760, 830, 900 ve 1040 °C olarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, ham perlitin genleştirme sıcaklığı arttıkça, genişmiş perlitin yığın yoğunluğunun azaldığı ve tane boyutunun arttığı tespit edilmiştir. Maksimum tane iriliği arttıkça, genişmiş perlit agreganın değişen matris yapısındaki farklılık nedeni ile su ile etkileşime girdiğinde çökme (deforme olma) değerlerinin de arttığı görülmüştür. Çimentolu harçlarda genişmiş perlit agregasının çökme oranının artması ile harcın basınç dayanımının ve harcın işlenebilirliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Ancak her ne kadar yüksek sıcaklıkta genleştirilen perlit agregası ile üretilen harçların işlenebilirlik ve dayanım değerleri çökmenin de etkisi ile azalsa da bu tip agrega ile üretilen harcın ısıl performans özelliğinin iyileştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Analiz, Genleştirme, Performans, Perlit, Özellik, Harç, Sıcaklık

An Investigation on the Effects of Temperature Change on Aggregate Characteristics in Perlite Expansion - A New Approach

ABSTRACT: In this study, the changes in the expanded aggregate forms formed after the expansion process of raw perlite at different temperature values in an equivalent time were analyzed and the factors affecting the structural characteristics of the expanded perlite were examined. Especially after expansion process, a new approach has been examined to represent strength, fragility, and crumbling phenomenon of the perlite aggregate. In the study, raw perlite in 125-250 µm, 250-500 µm and 500-750 µm size ranges was used and the expansion temperatures were 200, 360, 410, 480, 530, 560, 590, 610, 640, 660, 690, 730, 760, 830, 900 and 1040 °C, respectively. According to the results, it was determined that as expansion temperature of the raw perlite increased, bulk density of the expanded perlite decreased, and grain size increased. It was observed that as the maximum grain size increased, the collapse (deformation) values increased when interacted with water due to the difference in the changing matrix structure of expanded perlite. Compressive strength and workability decreased with increase in the collapse rate of the expanded perlite aggregate in cementitious mortars. Although workability and strength of the mortars produced with perlite aggregate expanded at high temperature decreased with the effect of collapse, it was determined that the thermal performance of the mortar produced with this type of aggregate improved.

Keywords: Analysis, Expansion, Performance, Perlite, Property, Mortar, Temperature

*Corresponding Author: Şevket Onur KALKAN, sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Perlit, nispeten yüksek su içeriğine sahip amorf yapıda volkanik bir camdır. Doğada özellikle volkanik bölgelerde mineral oluşumları görülmektedir. Bünyesinde %2-%6 oranlarında değişen kristal suyu bulunur. Doğal kayaç formu yeterince ısıtıldığında bu su kaybolur, oluşan su buharı basıncıyla çok fazla genişleme özelliğine sahiptir. Genellikle, genişletilmiş perlit, 900 ila 1200 °C sıcaklıklara maruz kaldığında boyutunda genişleme eğiliminde olan silisli bir volkanik malzeme olarak bilinmektedir [1]. Ham perlitin geliştirilmesi ve inşaat endüstrisinde kullanımı üzerine uzun yıllar çoğu araştırmacılar ilgi duymuş ve genişmiş perlitler farklı tasarımlardaki yapı malzemesi üretimlerinde kullanıla gelmiştir. Yapılan bilimsel araştırmalarda perlitin geliştirilmesi, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişimlerinin incelenmesi ve perlitin refrakter tuğla, yüksek sıcaklık yalıtımı, hafif beton, kriyojenik yalıtım, filtrasyon ve harç katkı maddesi gibi çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda faydalı olduğu rapor edilmiştir [2-4]. Genleşmiş perlit, inşaat sektöründe yapı malzemelerinin üretilmesinde hafif agrega ve/veya dolgu malzemesi olarak kullanımı yaygın bir malzeme türüdür. Kullanıldığı ürüne gözenekli yapısı ve düşük yoğunluk değeri sebebiyle yalıtım özelliği kazandırmaktadır. Özellikle, küresel ısınmanın birincil nedeni olduğuna inanılan enerji tasarrufu ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için, üstün ısı ve ses yalıtım özellikleri gibi dikkate değer faydaları nedeniyle hafif beton geliştirme alanında genişmiş perlit kullanımı dikkat çekmektedir [5]. Şengül ve arkadaşları çalışmalarında normal agregaların %80'i genişmiş perlit ile değiştirildiğinde ısı iletkenlikte %65'lik bir azalma gözlemlendiğini bildirmiştir [6]. İnşaat sektörü haricinde ziraat sektöründe, topraksız tarım uygulamalarında, çiçekçilikte, seracılık gibi alanlarda kullanımı yanı sıra ilaç ve kimya gibi çok farklı endüstriyel alanlarda da kullanımı görülmektedir [7]. Daha az bilinmesine rağmen, camsı doğası ve kimyasal bileşimi (%70-75 SiO₂ ve %12-18 Al₂O₃) nedeniyle çok ince öğütülmüş perlit malzemeler puzolanik özelliklere sahiptir. Yu ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmalarda perlitin puzolanik aktivitesini incelenmişlerdir [8]. Diğer bir çalışmada, Erdem ve arkadaşları öğütülmüş perlit kullanarak harmanlanmış çimentolar ve harçlar üretmişlerdir [9].

Yapı malzemelerinin üretiminde kullanılan genişmiş perlitler, çoğunlukla yüksek sıcaklık değerlerinde genişmiş malzeme karakteristiğini oluşturduğu için kırılğan agrega yapısına sahip olup, ürünlerin elde edilmesi için hazırlanan harç ve/veya hamur karışımlarında diğer karışım bileşenlerinin etkisiyle veya karıştırma şekline bağlı olarak ufalanma özelliği gösterirler. Bu durum, karışıma giren iri boyutlu genişmiş perlit agreganın ürün matrisinde daha küçük taneli bir agregaya dönüşümünü gündeme getirmektedir. Genleşmiş perlitin tane iriliğinin bu şekilde düşüşü hem malzemenin yoğunluğunu artırmakta hem de elde edilen taze harcın beklenilenden daha küçük hacim oluşturmasına neden olmaktadır. Harçtaki hacim düşüşü yapı malzemesinin üretilmesinde genellikle daha fazla harç malzemesi kullanımı ve sarfiyatın daha da artmasına neden olur. Optimum koşullarda ve hacimde bir harç elde etmek için, karışımda kullanılacak olan genişmiş perlitin tane iriliği, genişleme sıcaklığı değeri ve agrega yapısı son derece önem kazanmaktadır. Agreganın mukavemeti yüksek, karışım sürecinde ufalanmayan ve hacim kaybına neden olmayan genişmiş perlitler bu bağlamda önemlidir. Panagiotopoulou ve arkadaşları genişmiş perlit agreganın yığın yoğunluğunun artması ile ezilme dayanımının arttığını tespit etmişlerdir [10]. Ancak, literatür incelendiğinde, genişmiş perlitin narin yapısı nedeniyle çimentolu ürünlerin karıştırılması ve yerine yerleştirilmesi sırasında bu agregadan kaynaklı nasıl bir değişim olacağı eksik bir konu olarak görülmektedir. Bu çalışma kapsamında, ham perlitin eşdeğer bir sürede farklı sıcaklık değerlerinde geliştirme işlemi sonrası oluşan genişmiş agrega formlarının değişimi analiz edilmiş olup, genişmiş perlitin yapısal karakteristiğine etkiyen faktörler incelenmiştir. Özellikle geliştirme işlemi sonrası perlit agreganın mukavemetini, kırılğanlığını ve ufalanma olgusunu temsili olarak tanımlayabilmek amacıyla yeni bir yöntem öngörülmüştür. Bu yöntemde genişmiş perlitin agrega hüviyetinde irdelenebilmesine de temsili bir ölçek olabilecek yaklaşımın bulguları tartışılmıştır. Ayrıca, bu yöntemde göre belirlenmiş ve farklı karakteristik yapıya sahip geliştirilmiş perlit agregalı çimento esaslı kompozit harç örneklerinin teknik performans değerleri de irdelenmiş olup, konu üzerine yeni araştırma yapacak araştırmacılara bir ışık tutmak amaçlanmıştır.

2. HAM PERLİT VE KARAKTERİSTİĞİ (RAW PERLITE AND ITS CHARACTERISTICS)

Farklı sıcaklık değerlerinde ham perlitin genleştirilmesi ve sonrasında genleştirilmiş perlit agreganın çimento esaslı kompozit bir harç karışımında hafif agrega olarak kullanımında harcın mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi amacıyla farklı sıcaklık değerlerinde genleşebilme özelliğine sahip bir perlit kayacı üzerinde araştırmanın detaylandırılması önem kazanmaktadır. Bu açıdan güncel olarak ham perlit kayacını birden farklı coğrafik bölgelerden temin edebilmek mümkündür. Ancak, her bir doğal perlit kayacının genleşme karakteristikleri gerek orijini gerek kimyasal içeriği ve gerekse yapısal-fiziksel özelliklerine göre farklılıklar görülebilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan ham perlit, İzmir Bergama bölgesinde normal piyasa koşullarından temin edilmiş olup, doğal kayaç formunda laboratuvar ortamına getirilmiştir. Ham perlit, öncelikle primer bir kırıcıda kırılmış (Şekil 1) ve 2 mm'lik bir elek ile ön boyutlandırma yapılmıştır. Daha sonra ön boyutlandırması yapılmış ham perlit, üç ayrı boyut sınıfına elenerek gruplandırılmıştır: 125-250 μm , 250-500 μm ve 500-750 μm . 125 μm altı boyut toz boyut olarak kabul edilmiş olup, çalışmada 125 μm 'den daha düşük ince taneli ham perlitler değerlendirmeye alınmamıştır. Bununla birlikte 750 μm boyut üstü ham perlit malzemelerde değerlendirmeye alınmamıştır. Tane boyutu sınıflandırılmış ham perlit malzeme örneklerinin kuru yığın yoğunluk değerleri, 125-250 μm boyut aralığı için ortalama 1140 kg/m^3 , 250-500 μm boyut aralığı için ortalama 1115 kg/m^3 ve 500-750 μm boyut aralığı için ortalama 1090 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, ham perlitin kimyasal içerik değerleri de Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Ham perlitin primer kırıcı sonrası genel görünümü

Figure 1. View of raw perlite after primary crusher

Çizelge 1. Ham perlitin kimyasal özellikleri

Table 1. Chemical composition of the raw perlite

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	MnO	SO ₃	K.K.
%71,60	%13,40	%1,15	%2,24	%4,05	%1,12	%0,08	%0,03	%0,24	%4,11

3. ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

3.1. Sıcaklık –Tane Boyutu ve Genleşme Oranı İlişkisi (Temperature - Grain Size and Expansion Rate Relationship)

Ham perlitin geliştirilmesinde başlıca dört temel faktör irdelenmektedir. Bunlardan birincisi, ham perlitin orijini ve yapısal özelliğidir. Bir diğeri, agrega tane boyutudur. Üçüncüsü, geliştirme işlemi için gerekli sıcaklık değeridir. Sonuncusu ise geliştirme işleminde uygulanacak süredir.

Ham perlit oluşumu itibarıyla genellikle SiO₂'ce zengin asidik karakterdeki bir magmanın yüzeyde ani soğumasıyla katılaşması sürecinde oluşan kütlelerin bünyesine su buharı girmesi sonucu oluşan volkanik kökenli bir kayaç yapısına sahiptir. Kimyasal yapının perlit gelişmesine etkisi üzerine farklı araştırmacıların infrared spektrometresinde yaptıkları çalışmalarda, ham perlitteki gevşek bağlı su moleküllerinin hidrojen bağları 3.0 ve 6.1 mikron bantlarında görüldüğünü rapor etmişlerdir [11-12]. Riyolitik camın şebeke yapısındaki sıkı bağlanmış monomerik OH grupları ise, 2.75 μ 'de tipik absorpsiyon bandı vermediği deklere etmişlerdir. Bu araştırmacıların farklı perlit malzeme örnekleri üzerinde yaptıkları kimyasal analizlerde, riyolit tipindeki esas bileşimin sabit kaldığı ve sadece bağlı su içeriğinin değiştiğini gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, ham perlitin gelişme kabiliyetinin perlitin kimyasal bileşimi yerine efektif su miktarına göre değiştiğini rapor etmişlerdir [11-12]. Ham perlit malzemeler genellikle %2-%5 aralığında su içermektedir. Perlitteki suyun bir kısmı gevşek bağlanmış su olup, 350°C civarında ısıtıldığında perlitteki suyun %3-%3,5'lük kısmı, bünyeden atılır. Ancak geriye kalan su, sıkı bağlanmış su olarak tanımlanmakta olup, ancak 750-1100°C arasında ısıtıldığında bünyeden atılabilmektedir. Bu sıkı bağlanmış suya genellikle efektif su (*aktif su*) denilmektedir [11-12]. Kayacın bünyesinde oluşum mekanizmasına göre farklı oranlarda efektif su (*aktif su*) bulunmakta olup, bu su miktarının perlitin gelişme karakteristiğine etkisi büyüktür. Bu bağlamda, kayacın bünyesindeki efektif suyun (*aktif su*) miktarına göre ham perlitler genellikle aktif perlit ve pasif perlit olarak tanımlanabilmektedir. Aktif perlitlerin bünyesinde aktif su miktarı yüksek olup, düşük sıcaklık değerlerinde (750-900°C) büyük hacim artışı oluşturarak gelişme karakteristiği gösterebilirler. Pasif perlitler de ise, aktif su miktarı daha düşük düzeyde olup, ancak yüksek sıcaklık değerlerinde (900-1100°C) gelişebilirler [11-12]. Ham perlitlerin yapılan kimyasal analizleri ile kızdırma kaybı değeri, ham perlitlerin yapısal özellikleri hakkında önemli yorumlamaların yapılabilmesine imkân tanımaktadır [11]. Bu çalışma kapsamında kullanılan ham perlit örneklerinin kimyasal analiz sonucunda ham perlitlerin kızdırma kaybı ortalama %4,11 olarak belirlenmiştir. Analiz bulgularına göre geriye kalan yaklaşık %1,98'lik kısmın ise perlit örneklerinde geliştirilmesinde etkili olabilecek efektif su (aktif su) miktarı olduğu değerlendirilmiştir. Benzer yaklaşım, Şapçı N. ve Ceylan H. Nevşehir-Acıgöl perlitlerinin geliştirilmesi üzerine yaptıkları deneysel çalışmalarda da uygulanmıştır [13]. Bu değerlendirmeye göre, çalışmada örnek olarak kullanılan ham perlitin aktif su içeriği varlığı sebebiyle gelişme özelliği gösterebileceği öngörülmüş olup, yapılan 780°C'de yapılan ön geliştirme çalışmasında perlitin yüksek hacim artışı oluşturarak gelişme özelliği gösterdiği belirlenmiştir. Bu bağlamda bu perlit örneklerinin aktif perlit hüviyetinde bir perlit karakteristiğine sahip olduğu belirlenmiştir.

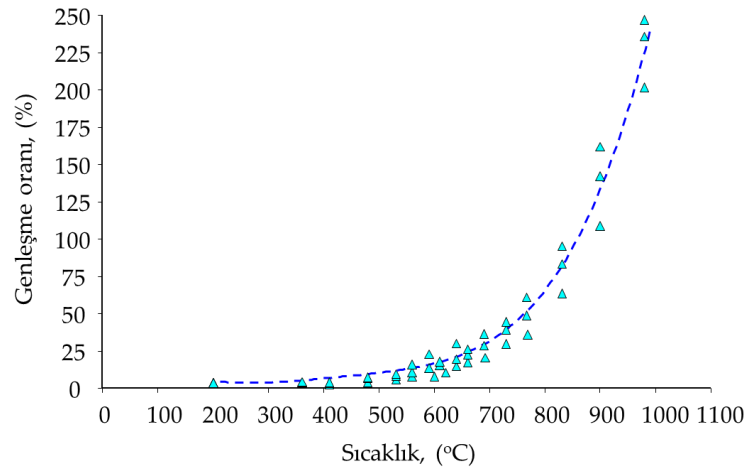
Ham perlitin tane boyutu gelişme oranına etki eden önemli bir fiziksel faktördür. Tane boyutu arttıkça, gelişme sürecinde daha uzun süre sıcaklığa maruz kalmaları gerekmektedir. İri taneli aktif perlitlerde pasiflere oranla daha kısa sürede gelişme olgusu sergileyebilmektedir. Bu çalışmada, ham perlit agrega örneklerinin farklı sıcaklık değerlerinde geliştirilmesi amacıyla 3 ayrı tane boyutunda sınıflandırılmış 125-250 μ m, 250-500 μ m ve 500-750 μ m boyut aralıklarındaki malzemeler kullanılmıştır.

Ham perlitin geliştirme işleminde öncelikle bünyesinde bulunan gevşek bağlı suyu buharlaştırmak amacıyla suyun buharlaşmasının sağlanabileceği bir sıcaklık değerinde ön ısıtma işlemi uygulanır. Bu süre perlitin tane boyutuna göre farklılık gösterebilir. Çalışma kapsamında her üç tane boyutunda hazırlanmış ham perlitlerin geliştirilmesinde ortalama 180°C'lik bir etüv ortamında tüm ham perlit örnekleri 15 dakika süreyle ön ısıtma işlemine tabi tutulmuşlardır. Daha sonra seramik krozeler içerisine konmuş ham perlit örnekleri 16 farklı sıcaklık değerinde laboratuvar boyutlu bir fırın ortamında 5 dakika süreyle sıcaklığa maruz bırakılarak gelişme karakteristikleri analiz edilmiştir. Kroze içerisine

yerleştirilen her bir perlit örneğinin farklı yönlerden en az 12 adet çap değerleri 0.01 mm hassasiyetli dijital bir kumpas ile ölçülüp kaydedilerek, genleşme işlemi öncesi bu ölçümlerin ortalaması alınarak test örneğinin başlangıç çap değeri (D_1) olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu test örnekleri belirlenen sıcaklık değerinde 5 dakikalık genleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra fırından çıkartılarak bir desikatör içerisinde soğumaya bırakılmış ve ısı işlem sonrası oluşan yeni çap değeri başlangıçta uygulanan metoda benzer şekilde yeniden belirlenerek, genleşmiş örneğin ortalama çap değeri (D_2) olarak kaydedilmiştir. Her iki başlangıç ve ısı işlem sonrası çap değer değişimleri arasında oluşan fark değerinden yüzde değeri hesaplanarak test örneğinin genleşme oranı (ΔG) aşağıdaki yaklaşımla belirlenmiştir:

$$\Delta G = ((D_2 - D_1) / D_1) * 100$$

Çalışma kapsamında uygulanan genleştirme sıcaklık değerleri sırasıyla, 200, 360, 410, 480, 530, 560, 590, 610, 640, 660, 690, 730, 760, 830, 900 ve 1040 °C'dir. Bu genleşme-sıcaklık etkileşimi sonrası üç farklı tane boyutundaki her bir ham perlitin genleşme sonrası genleşme oranları % cinsinde belirlenmiş olup, bulgular grafiksel olarak Şekil 2'de verilmiştir.

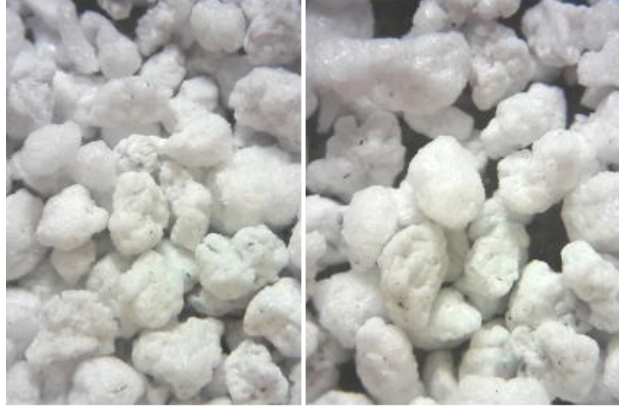


Şekil 2. Ham perlitin genleşme sonrası sıcaklık – genleşme oranı ilişkisi

Figure 2. Expansion temperature – expansion ratio relationship of raw perlite

Ham perlitin 200 °C–410 °C aralığında düşük sıcaklık ortamında genleşme oranlarının %4'ün altında olduğu görülmekle birlikte, 125-250 µm tane boyutunda bu sıcaklık aralığında genleşme oranı 250-500 µm ve 500-750 µm boyutlu perlitlere göre daha düşük seviyelerdedir. Ham perlitin tane boyutu irileştikçe aktif perlit formunda genleşme oranı artmaktadır. Benzer olgu 410 °C'nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde de görülmüş olup, özellikle >560°C olan sıcaklığa maruz kalmış ham perlitin belirgin bir genleşme olgusu sergilediği görülmüştür. 200°C–1040°C sıcaklık aralığında ham perlit örnekleri için elde edilen genleşme oranları her bir boyut aralığı için sırasıyla; 125-250 µm tane boyutlu ham perlit için %0,7 - %202, 250-500 µm tane boyutlu ham perlit için %0,8 - %236 ve 500-750 µm tane boyutlu ham perlit için %0,9 - %247'dir.

Genleşmiş perlitin hafif agrega olarak kullanıldığı harç karışımlarında, yüksek mukavemet arzu edilen sonuçlar için homojen dağılımlı ve düzenli formlu nispeten küçük gözenek boyutlarına sahip perlit agrega kullanımı önem kazanmaktadır. Çalışma kapsamında 530 °C, 660 °C ve 900 °C sıcaklık değerlerinde genleştirilmiş perlit agregaların genleşme sonrası örneklerin sembolik tane görünüşleri Şekil 3 – Şekil 5'de verilmiştir. Bu görseller irdelendiğinde görüldüğü üzere, genleşme sıcaklık değeri arttıkça agreganın fiziksel formu ve matris karakteristiği daha gözenekli bir yapı kazanmaktadır. 880 °C'nin üzerinde sıcaklık değerlerinde genleşmiş perlit agrega taneleri arasında kısmen akma yapısına yakınsak form oluşturan tanelerin varlığı da dikkat çekmektedir (Şekil 6).



Şekil 3. Genleşmiş perlit agreganın genel görünümü (530 °C)
Figure 3. View of expanded perlite aggregate (530 °C)



Şekil 4. Genleşmiş perlit agreganın genel görünümü (660 °C)
Figure 4. View of expanded perlite aggregate (660 °C)



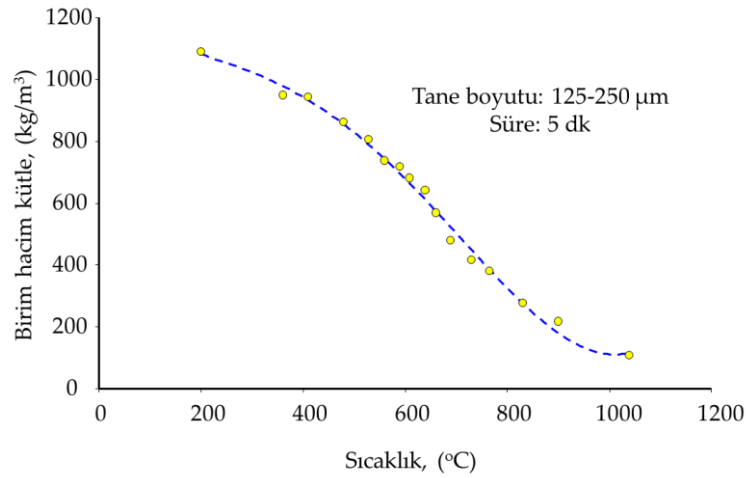
Şekil 5. Genleşmiş perlit agreganın genel görünümü (900 °C)
Figure 5. View of expanded perlite aggregate (900 °C)



Şekil 6. Genleşmiş perlit agrega taneleri arasındaki form farklılığı sembolik görünümü

Figure 6. The appearance of the difference in form between the expanded perlite aggregate grains

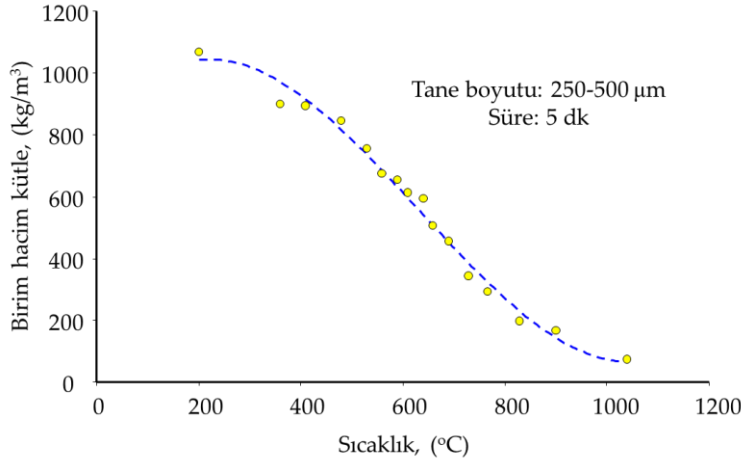
Ham perlitin tane boyutundaki farklılık genleşme sonrası elde edilen genleşmiş perlit agreganın birim hacim kütle değerlerinin de farklılık göstermesine etken bir faktördür. Üç ayrı tane boyut aralığındaki perlit örneklerinin farklı sıcaklık değerlerinde genleştirilmesi sonrası malzemelerin birim hacim kütle değişimleri sırasıyla Şekil 7 – Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 7. Sıcaklık – birim hacim kütle etkileşimi (125-250 µm boyut aralığı)

Figure 7. Temperature – unit weight interaction (125-250 µm size range)

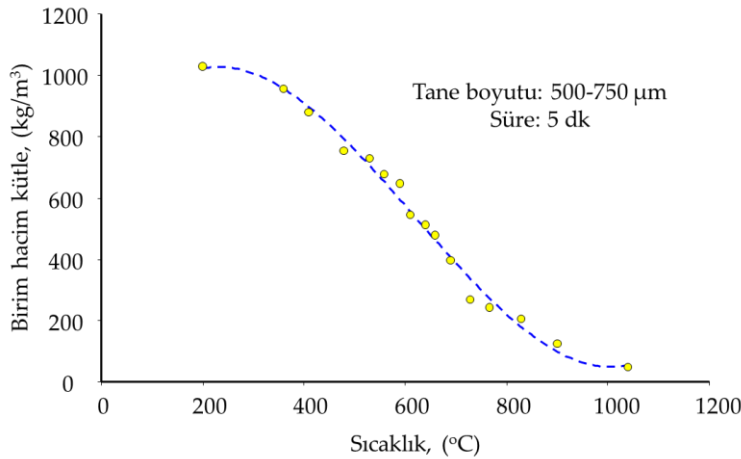
125µm–250µm boyut aralığında sınıflanmış ham perlitin genleşme sonrası birim hacim kütle değişimi, oluşan yeni matris yapının genel formuna göre değişkenlik göstermektedir. 200 °C’den 560 °C’lik ilk eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 1090 kg/m³’ten 738 kg/m³’e %32’lik bir değişimle hafifleyerek azalmıştır. 560 °C’den 830 °C’lik ikinci eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 717 kg/m³’ten 275 kg/m³’e %61,6’lık bir değişimle düşmüştür. 830 °C sıcaklık değeri üzerindeki sıcaklıkta genleştirilen perlitin birim hacim kütle değeri ise 218 kg/m³’ten 108 kg/m³’e %50,4’lük bir değişimle gelişmektedir. Perlitin birim hacim kütlelerinde en fazla değişimin ikinci eşik sıcaklık değerinde oluştuğu görülmüştür. Genel bir eğilim olarak sıcaklık arttıkça genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri düşmekte ve daha hafif bir form kazanmaktadır.



Şekil 8. Sıcaklık – birim hacim kütle etkileşimi (250-500 µm boyut aralığı)

Figure 8. Temperature – unit weight interaction (250-500 µm size range)

250µm–500µm boyut aralığında sınıflanmış ham perlitin genleşme sonrası birim hacim kütle değişimi irdelendiğinde; 200 °C'den 560 °C'lik ilk eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 1067 kg/m³'ten 675 kg/m³'e %36,7'lik bir değişimle hafifleyerek azalmaktadır. 560 °C'den 830 °C'lik ikinci eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 654 kg/m³'ten 196 kg/m³'e %70'lik bir değişimle düşmektedir. 830 °C sıcaklık değeri üzerindeki sıcaklıkta geliştirilen perlitin birim hacim kütle değeri ise 165 kg/m³'ten 74 kg/m³'e %55,2'lik bir değişimle gelişmektedir. 125 µm–250 µm boyut aralığında görüldüğüne benzer şekilde perlitin birim hacim kütlede en fazla değişimin ikinci eşik sıcaklık değerinde oluşmuştur. Diğer taraftan, eşik sıcaklık değer aralığında elde edilen sayısal büyüklüklerden görüldüğü gibi ham perlitin tane boyutu arttığında artan genleşme miktarının bir fonksiyonu olarak daha hafif perlit agrega elde edilebilmektedir. Bu yaklaşım, malzemenin artan tane boyutuna bağlı perlitin daha etkin aktifliği ve kristal su miktarının yeterliliği ile doğrudan orantılıdır.



Şekil 9. Sıcaklık – birim hacim kütle etkileşimi (500-750 µm boyut aralığı)

Figure 9. Temperature – unit weight interaction (500-750 µm size range)

500 µm–750 µm boyut aralığında sınıflanmış ham perlitin de genleşme sonrası birim hacim kütle değişimi irdelendiğinde; 200 °C'den 560 °C'lik ilk eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 1029 kg/m³'ten 677 kg/m³'e %34,2'lik bir değişimle hafifleyerek azalmaktadır. 560 °C'den 830 °C'lik ikinci eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 646 kg/m³'ten 204 kg/m³'e %768,4'lük bir değişimle düşmektedir. 830 °C sıcaklık değeri üzerindeki sıcaklıkta

genleştirilen perlitin birim hacim kütle değeri ise 124 kg/m^3 'ten 65 kg/m^3 'e %47,6'lık bir değişimle gelişmektedir. Diğer her iki perlit tane boyutu aralığında görüldüğüne benzer şekilde perlitin birim hacim kütlelerinde en fazla değişimin ikinci eşik sıcaklık değerinde oluşmuştur. Genleştirilmiş perlitin hafif agregata olarak bir harç karışımı bileşeni olarak kullanımı düşünüldüğünde, elde edilecek harç ve/veya ürünün dayanım, durabilite ve suya karşı direnci vb. gibi teknik parametreler dikkate alındığında perlitin birim hacim kütlelerinin ne düzeyde olması gerektiği önceden belirlenmesi gerekliliği önem arz eder. Bu bağlamda, yüksek dayanım ve/veya ürün için yürürlükte olan bir standardın öngördüğü basınç dayanım değerinin sağlanabilmesi için genleşmiş perlitin yoğunluğunun da yüksek olması bir gerekliliktir. Örneğin 80 kg/m^3 birim hacim kütleli bir perlit agregata ile 250 kg/m^3 birim hacim kütleli başka bir perlit agregatla yapılmış sertleşmiş harcın dayanım değerleri eşdeğer değildir. Perlit yoğunluğu arttıkça harç malzeme de dayanım kazanacaktır. Bununla birlikte, laboratuvar çalışmalarından elde edilen bulgularda; genleşmiş perlit yoğunluğu düştükçe perlit malzemenin su ile teması sonrası oluşan karışımın hacminde de önemli miktarda azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Bu hacim azalması "çökme" ve/veya "oturma" olarak da ifade edilebilecek harcın yoğunluğunu artırıcı bir etki oluşturmaktadır. Bu bakımdan genleşmiş perlitin uygulamada çökme değerlerini de dikkate alınarak gerekli hesap ve irdelemelerin yapılması kaçınılmaz olmaktadır.

3.2. Genleşmiş Perlit Karakteristiğinin Analizi (Analysis of Expanded Perlite Characteristics)

Her bir genleşmiş perlit tanesi, genleşme işlemindeki sıcaklık, süre ve tane boyutuna bağlı farklı gözeneklilik oranına sahiptir. Yüksek sıcaklık değerlerinde genleşmiş olan bir perlitin matris yapısında oluşan yüksek gözeneklilik sebebiyle su emme kapasitesi de yüksek olmakta, bununla birlikte emilen suyu bünyede tutma süresi de uzamaktadır. Yüksek gözeneklilik oranına ve aynı zamanda düşük birim hacim kütle değerine sahip genleşmiş perlit, herhangi bir harç karışımında hafif agregata olarak kullanıldığında, harcın karma suyu etkisiyle bünyeye hızlı bir şekilde su emilimi gerçekleşmekte, matris yapının karakteristiğine bağlı olmak koşuluyla gözenekler arasındaki matris birimin deforme olabilmesiyle agregata hacminde bir düşüş gerçekleşebilmektedir. Bu durum, genleşmiş perlitin su teması sonrası "çökme değeri" olarak da tanımlanabilmektedir. Çökme değeri ne kadar yüksekse, bu özelliği taşıyan genleşmiş perlitli harçların yaş kıvamında hacim kaybı da daha yüksek olmaktadır. Genleşmiş perlit kullanımındaki bu durum çoğu zaman bir olumsuzluk olarak da nitelendirilebilmektedir. Bu bakımdan, harç karışımları tasarımı yapılırken genleşmiş perlit kullanımından kaynaklı yaş harçtaki hacim düşüşü/kaybı (çökme) önceden irdelenerek, çökme miktarını minimize edecek özellik taşıyan bir genleşmiş perlit malzemesinin kullanımı önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında genleşmiş perlit kullanımı için uygunluk değeri olarak öngörülecek yalın bir yaklaşım tanımlanmış olup, uygulama bulguları detaylı etüt edilmiştir.

Genleşmiş perlitin su teması sonrası oluşan yaş kıvamındaki hacim kaybı/çökme değerini agregata bazında önceden belirlemeye yönelik öngörülen metodolojide öncelikle $200 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık ortamına 5 dakika maruz kalmış perlit agregata örnekleri hazırlanır. Bu perlit agregatadan daha sonra 200 ml hacminde bir miktar alınarak $\text{Su/Katı}=0,75$ oranında su ile karıştırılarak taze ve yaş bir perlit agregata karışımı elde edilir. Bu karışım 3 dakika süreyle düşük devirli bir karıştırıcı ile karıştırılır ve en az 250 ml hacimli cam mezür içerisine konularak en az 5 dakika dinlenmeye bırakılır. Bu dinlenme süresi sonrasında yaş perlit agregatlı karışımın mezürdeki yükseklik değeri mezür üzerindeki ölçekten okunarak, "referans değer" " H_{ref} " olarak kaydedilir. Daha sonra, harç karışımında kullanımı düşünülen bir veya birkaç genleşmiş perlit agregatadan 200 ml hacimli örnekler alınarak eşdeğer $\text{Su/Katı}=0,75$ oranında su ile karıştırılarak taze ve yaş genleşmiş perlit agregata karışımları hazırlanır. Bu karışımlar da 3 dakika süreyle düşük devirli bir karıştırıcı ile karıştırılır ve en az 250 ml hacimli cam mezürler içerisine konularak en az 5 dakika dinlenmeye bırakılır. Bu dinlenme süresi sonrasında genleşmiş perlit agregatlı yaş karışımın mezürlerdeki yükseklik değerleri mezür üzerindeki ölçekten okunarak, her bir genleşmiş perlit agregatı için ayrı ayrı "ölçüm değeri" " H " olarak kaydedilir. Genleşmiş perlit matris yapısı, gözeneklilik oranı, tane boyutuna bağlı olarak referans değere kıyasla daha yüksek bir çökme değeri gösterecektir. Bu ölçüm değerlerinde, referans değerinin yükseklik bulgusuna göre belirli bir miktar düşüş olduğu gözlenir

(Şekil 10). Daha sonra her bir genişmiş perlit için Eşitlik 1’de öngörülen yaklaşımla genişmiş perlit malzemenin agrega formunda çökme değeri (hacim kaybı) “ δ_H ” % biriminde tanımlanır. Bu yaklaşımla elde edilen δ_H değerlerinden hangi genişmiş perlite ait değer diğerinden daha düşük oranda ise (daha az çökme değerine sahipse), tasarlanan harç karışımı için daha ideal bir malzeme seçimi olacağını temsil eder.

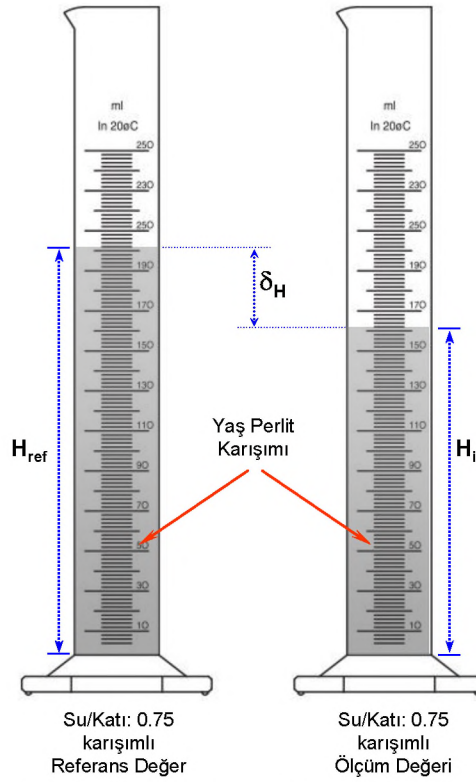
$$\delta_H = \frac{H_{ref} - H_i}{H_{ref}} \times 100 \quad (1)$$

Burada;

δ_H : Genişmiş perlit çökme değeri, %

H_{ref} : Referans değer, ml,

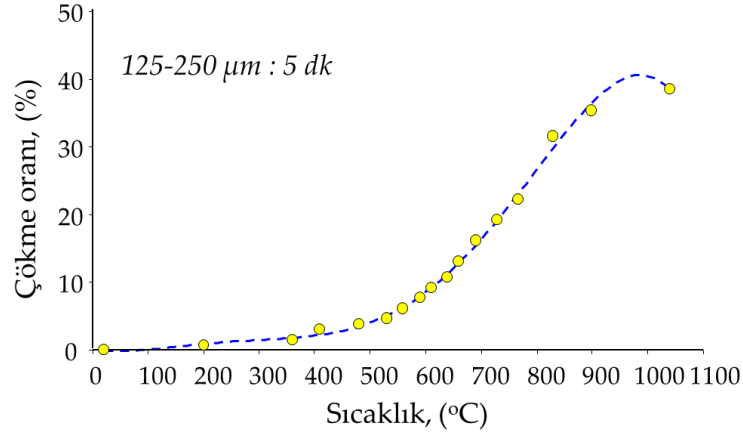
H_i : Ölçüm değeri, ml.



Şekil 10. Genişmiş perlit çökme değeri tayini sembolik gösterimi

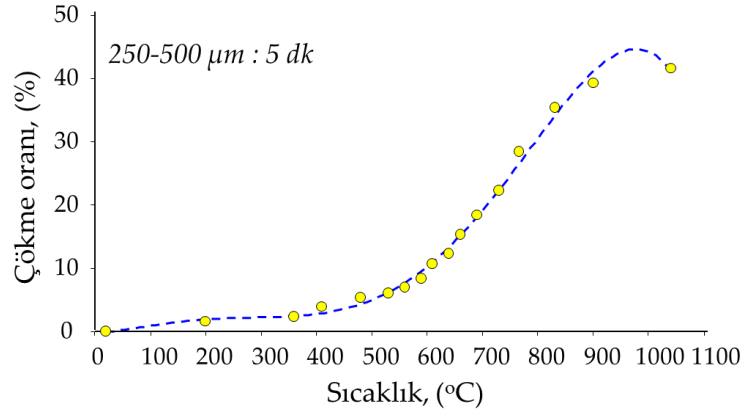
Figure 10. Expanded perlite collapse value determination

Çalışma kapsamında 125-250 μm , 250-500 μm ve 500-750 μm tane boyutlarında üç farklı grupta hazırlanan ham perlitlerin, farklı sıcaklık değerlerinde eşdeğer sürelerle genişletme işlemi sonrası, yukarıda belirtilen yaklaşımla çökme değerleri analiz edilmiştir. Her bir boyuttaki perlit için elde edilen bulgular grafiksel olarak Şekil 11 – Şekil 13’de verilmiştir.



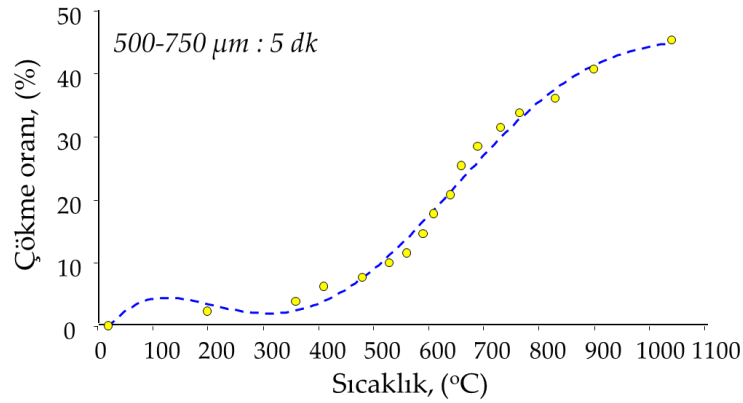
Şekil 11 Sıcaklık – çökme oranı ilişkisi (125-250 μm boyut aralığı)

Figure 11. Temperature – collapse rate relationship (125-250 μm size range)



Şekil 12. Sıcaklık – çökme oranı ilişkisi (250-500 μm boyut aralığı)

Figure 12. Temperature – collapse rate relationship (250-500 μm size range)

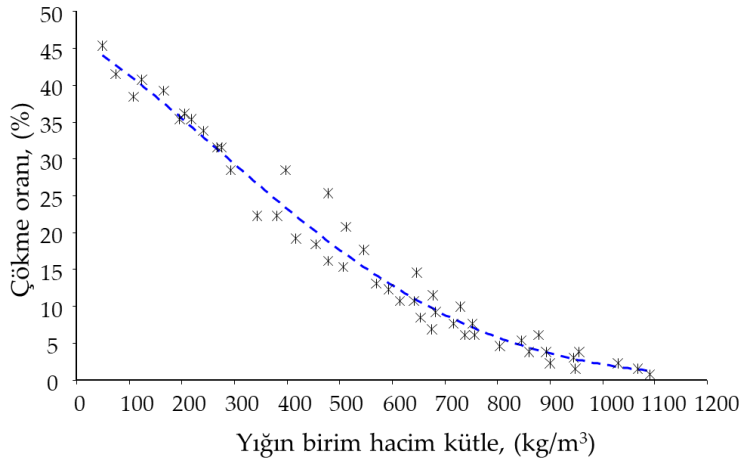


Şekil 13. Sıcaklık – çökme oranı ilişkisi (500-750 μm boyut aralığı)

Figure 13. Temperature – collapse rate relationship (500-750 μm size range)

125 μm–250 μm boyut aralığında sınıflanmış ham perlitin 200 °C'den 560 °C'lik ilk eşik sıcaklık değer aralığında genleşmesi sonrası agrega malzemenin çökme oranı değerleri %0,77'den %6,15'e yükselmiştir. 560 °C'den 830 °C'lik ikinci eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin çökme değeri ise %7,69 - %31,54 aralığındadır. 830 °C sıcaklık değeri üzerinde genleştirilen perlitin çökme değeri %38,46'ya kadar artmaktadır. Bu analiz bulgusundan görüleceği üzere, genleştirme sıcaklık değeri arttıkça, genleşen perlit malzemenin matris yapısındaki değişim, gözeneklilikteki artış ve gözenek

boyutlarının değişimi gibi faktörlere bağlı olarak çökme oranı artmaktadır. Bu olgu, sıcaklık artışı ile genişmiş perlitin agregaya olarak mukavemet kaybettiği, yaş harç karışımlarında daha fazla hacim düşüşü oluşturacağı anlamını taşımaktadır. Benzer şekilde, diğer boyutlardan 250 µm–500 µm ve 500 µm–750 µm boyut aralıklarında sınıflanmış ham perlitlerin 200 °C'den 560 °C'lik ilk eşik sıcaklık değer aralığında genişmesi sonrası agregaya malzemenin çökme oranı değerlerindeki değişim sırasıyla %1,54'ten %6,92'e ve %2,31'den %11,54'e yükselmiştir. 560 °C'den 830 °C'lik ikinci eşik sıcaklık değerine kadar genişmiş perlitin çökme değeri ise 250 µm–500 µm boyut aralığı için %8,46 - %35,38 aralığında, 500 µm–750 µm boyut aralığı için %14,62 - %36,15 aralığında değişmektedir. 830 °C sıcaklık değeri üzerinde geliştirilen 250 µm–500 µm boyut aralığındaki perlitin çökme değeri %41,54'e, 500 µm–750 µm boyut aralığındaki perlitin çökme değeri ise %45,38'e kadar artmaktadır. Ham perlitin tane boyutu sınıflandırmasının, genişleme sonrası agregaya malzemenin çökme değerine doğrudan etkileyen bir faktör olduğu buradan görülmektedir. Tane boyut dağılımındaki maksimum tane iriliği arttıkça, genişmiş perlit agreganın değişen matris yapısındaki farklılık nedeni ile çökme değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna etken bir diğer parametre ise genişmiş perlitin yığın birim hacim kütle değerinin düşmesinin (agreganın hafiflemesi) de çökme değerine olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Bu olgu, çalışma kapsamında irdelenen tüm genişmiş perlit agregaya malzemelerin genel bir eğilimi olarak Şekil 14'te analiz edilmiştir.



Şekil 14. Yığın birim hacim kütle – çökme oranı ilişkisi

Figure 14. Bulk density-collapse ratio relationship

Şekil 14 irdelendiğinde görüldüğü üzere genişmiş perlitin yığın yoğunluğu arttıkça, çökme değeri düşmektedir. Genişmiş perlit agregalı harç karışımlarında elde edilen taze yaş harcın kıvamı ve uygulamada tüketim miktarının düşük olması, harcın dolayısıyla genişmiş perlitin çökme oranının düşük olmasına bağlıdır. Bu bağlamda, uygulamada harç için önceden öngörülebilecek bir tüketim miktarının sağlanması amacıyla hangi boyutta ve hangi yoğunlukta genişmiş perlit agregaya kullanımının daha rasyonel olacağı tanımlanmalı ve bu değeri sağlayabilecek agregaya malzeme kullanımı son derece önem kazanmaktadır.

3.3. Genişmiş Perlit Kullanımının Kompozit Harcın Özelliklerine Etkisi (Effect of Expanded Perlite Usage on the Properties of Composite Mortar)

Genişmiş perlitin çimento esaslı kompozit bir harçta hafif agregaya olarak kullanımında, harcın mekanik özelliklerindeki değişim ve sertleşmiş harcın performans değerlerine ne ölçüde etken olduğunu belirlemek üzere bir dizi deneysel inceleme yapılmıştır. Bu analizlerde Çizelge 2'de özellikleri belirtilen 7 farklı sıcaklık değerinde eş sürede (5 dakika) geliştirme işlemi yapılmış perlitler agregaya malzeme olarak kullanılmıştır.

Çizelge 2. Genleşmiş perlit agreganın özellikleri*Table 2. Properties of the expanded perlite aggregate*

Agrega Kodu	Genleşme Sıcaklığı (°C)	Yığın Birim Hacim Kütle Değeri (kg/m ³)	Çökme Değeri (%)
A1	900	124	40,8
A2	830	196	35,4
A3	730	268	31,5
A4	760	292	28,5
A5	730	344	22,3
A6	530	756	6,2
A7	410	893	3,9

Farklı sıcaklık değerlerinde genleşmiş ve farklı çökme ve yığın yoğunluk değerlerine sahip bu yedi farklı genleşmiş perlit agregalar, tasarlanan bir kompozit harç karışımında ağırlıkça eşit miktarlarda (ağırlıkça %34,5) kullanılarak kompozit formda harç örnekleri hazırlanmıştır. Harç kombinasyonlarının ağırlıkça karışım oranları ve taze yaş harç formunda bazı teknik özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Genleşmiş perlit agregalı harç karışım kombinasyonları ve yaş harç özellikleri*Table 3. Mortar mix combinations and fresh mortar properties*

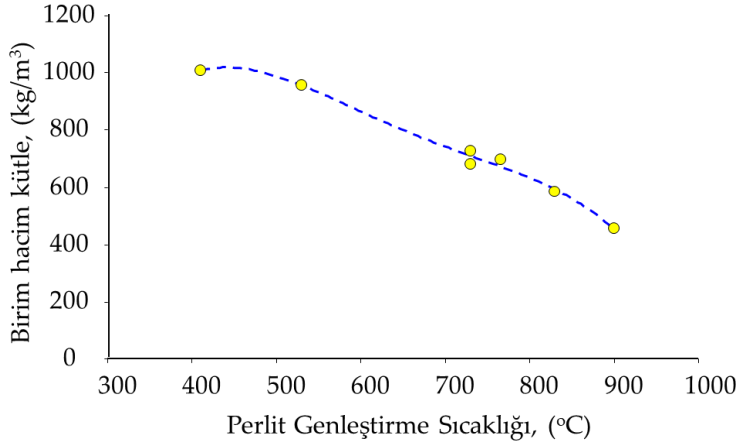
Agrega Kodu	Çimento (%)	Genleşmiş Perlit (%)	Toz Kireç (%)	Kalsit (%)	Vinil asetat-Akrilat esaslı Kıvamlaştırıcı (%)	Su/Katı Oranı	Taze Harç Yoğunluğu (kg/m ³)	Yayıma (mm)
A1	33	34,5	7	25	0,5	0,75	637	144
A2	33	34,5	7	25	0,5	0,75	764	155
A3	33	34,5	7	25	0,5	0,75	848	156
A4	33	34,5	7	25	0,5	0,75	862	158
A5	33	34,5	7	25	0,5	0,75	887	160
A6	33	34,5	7	25	0,5	0,75	1055	161
A7	33	34,5	7	25	0,5	0,75	1088	164

Hazırlanan tüm harç karışımlarında ağırlıkça eşit miktarlarda çimento, toz kireç, dolgu materyali ve polimer katkı malzemeleri kullanılmıştır. Dolgu materyali olarak maksimum tane boyutu 500 mikron olan kalsit kullanılmıştır. Harca kıvam vermek ve işlenebilirliğini artırmak amacıyla piyasa koşullarından temin edilen toz formda vinil asetat-akrilat asetat esaslı ve polivinil koruyuculu kıvamlaştırıcı toz katkı kullanılmıştır. Tüm harç karışımlarında su/çimento oranı sabit tutulmuş olup, su/çimento=2,27'dir. Karışım örnekleri PÇ 42,5R çimento ile hazırlanmıştır. Bu karışımlarda hazırlanan tüm harç örnekleri 50x50x50 mm boyutlu kalıplara yerleştirilerek, 24 saat sonrasında kalıptan çıkarılmış ve 28 gün boyunca bünye nemini kaybetmeyecek bir ortamda TS EN 998-1 [14] standardının öngördüğü prensiplere göre kütleme işlemine tabi tutulmuştur. 28 gün kür sonrasında havalandırılmalı bir etüv ortamında değişim kütle değerine ulaşmaya kadar 70±10°C'lik bir etüvde kurulmuş ve sonrasında mekanik testleri yapılmıştır. Genleşmiş perlit agregalı kompozit harç örnekleri İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri Laboratuvarında hazırlanarak, TS EN 998-1 standardı ve bu standartta öngörülen diğer TS EN normu standartlarına göre testler yapılmıştır.

Taze harç kıvamı olarak elde edilen yayılma değerleri irdelendiğinde, perlit agreganın genleştirme sıcaklık değeri arttıkça agreganın artan çökme değeri ve azalan yığın yoğunluğu sebebiyle yayılma değerlerinin azaldığı görülmektedir [15-16]. Ağırlıkça eş değer miktarlarda genleşmiş perlit ve diğer karışım bileşenleri de eşit miktarlarda kullanılmış olmasına rağmen, yayılma değerinde düşmenin oluşması harcın işlenebilirlik değerinin azaldığını temsil etmektedir. Harcın işlenebilirliğini artırmak ve/veya iyileştirmek için perlitin genleştirme sıcaklık değerinin düşük sıcaklık değerlerinde olması daha

arzu edilir bir durumu göstermektedir. Bu olgunun bir diğer göstergesi olarak da benzer eğilimin taze yaş formunun yoğunluğu olarak da incelenebilir. Perlitin genleşme sıcaklığı azaldıkça artan agregaya yığın yoğunluğu ve azalan gözeneklilik olgusu sebebiyle yaş harcın yoğunluğu da artmaktadır. Harcın yoğunluğunun artması eşdeğer bir karışım kombinasyonunda harç kıvamını iyileştirme ve daha işlenebilir hale getirmektedir.

Genleşmiş perlit agregalı harç karışımlarının sertleşmiş harç formunda kuru birim hacim kütle değerlerinin analizi, harç karışımında kullanılan perlitin genleştirilme sıcaklık değerine bağlı değişimi grafiksel olarak Şekil 15’de verilmiştir.

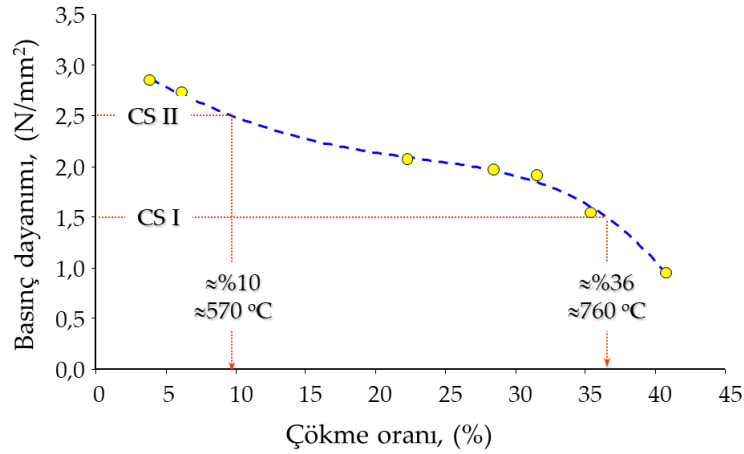


Şekil 15. Perlit genleştirme sıcaklığı-birim hacim kütle ilişkisi

Figure 15. Perlite expansion temperature-unit weight relationship

Ham perlitin genleştirme sıcaklık değeri arttıkça, bu sıcaklık değerinde eşdeğer sürede genleşmiş perlit agregalı sertleşmiş harç örneklerinin kuru birim hacim kütle değerleri azalmaktadır. Diğer bir değişle sertleşmiş harç hafiflemektedir. Buna temel etken sebep, genleşmiş perlitin agregaya olarak tane yoğunluğunun düşmesi ve gözeneklilik oranının artmasıdır. Bu analiz bulgusu irdelendiğinde, örneğin 500 kg/m³ yoğunlukta bir sertleşmiş harç elde etmek için bu karışım bileşenleri bağlamında 880 °C sıcaklıkta genleştirilmiş bir perlit malzemenin karışımında agregaya olarak kullanılması gerektiği görülmektedir. Benzer şekilde, 650 kg/m³ yoğunlukta daha yüksek bir sertleşmiş harç elde etmek için ise yaklaşık 790 °C sıcaklıkta genleştirilmiş perlit malzemenin kullanımının uygun olacağı, 800 kg/m³ yoğunluk için ise yaklaşık 650 °C sıcaklıkta genleştirilmiş perlit malzemenin kullanımının daha uygun olacağı görülmektedir. Karışımlarda hedeflenen sertleşmiş harç yoğunluğu için karışımında kullanılacak genleşmiş perlitin agregaya olarak genleştirme işlemindeki sıcaklığının önceden belirlenmesi önem kazanmaktadır. Çoğu ArGe çalışmalarında sertleşmiş harcın yoğunluğu, karışımlarda kullanılan genleşmiş perlitin miktarı ile ayarlanması yönünde projelendirildikleri sıklıkla görülmektedir. Bunun yerine perlit agregaya miktarının ayarlanmasından ziyade, perlitin genleştirme sıcaklığına dikkat çekilerek yapılacak projelendirmeler daha efektif sonuçlar verecektir. Bununla birlikte, yukarıdaki bölümlerde de değinildiği gibi agregaya yığın yoğunluğunda düşme eğilimi genleşmiş perlitlerin çökme oranını artırmakta, ancak taze harcın yoğunluğundaki azalma miktarının yüksek oluşu ve yaş harcın hacim kaybetmesine rağmen daha düşük yoğunluk değerleri elde edilebilmektedir. Bu değişim, aynı zamanda sertleşmiş harcın mukavemet açısından zayıflayacağını da temsil edebilmektedir.

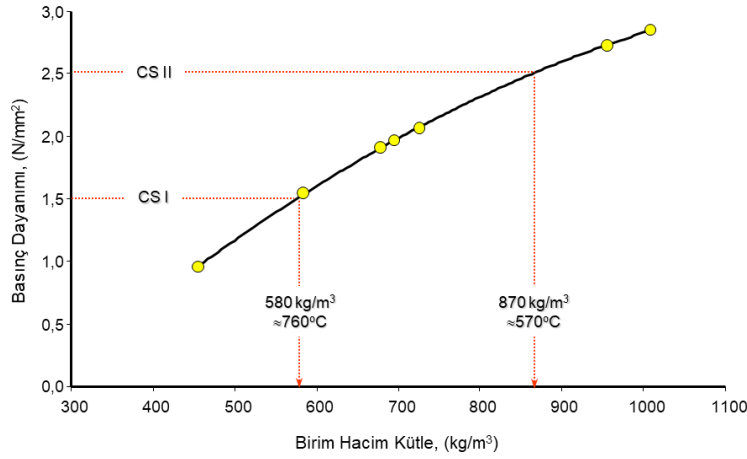
Sertleşmiş harç örneklerinin 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri, genleşmiş perlit agreganın çökme oranının ve birim hacim ağırlık değerinin bir fonksiyonu olarak değişim göstermektedir. Bu olgu, sırasıyla Şekil 16 ve Şekil 17’de analiz edilmiştir.



Şekil 16. Genleşmiş perlit çökme oranı-basınç dayanımı ilişkisi

Figure 16. Expanded perlite collapse rate-compressive strength relationship

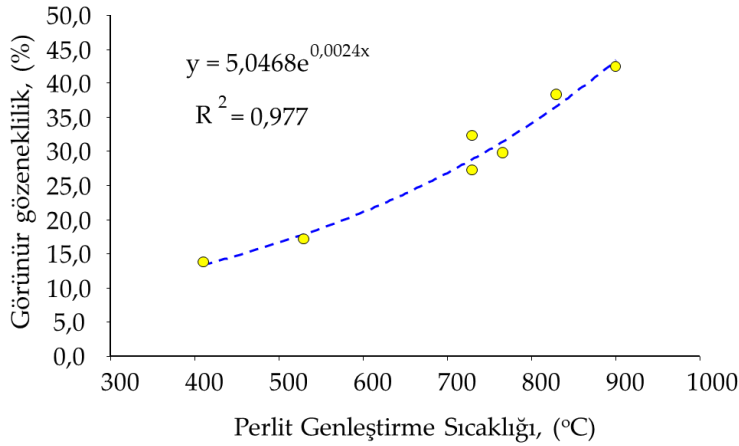
Genleşmiş perlit agreganın çökme değeri arttıkça, bu perlit karışumlu harcın basınç dayanımı da azalmaktadır. Agreganın çökme oranı yığın yoğunluğunun ve genleştirilme sıcaklığının birer fonksiyonu olarak değişim göstermesi, agregadaki artan gözenekliliğe bağlı harcın basınç dayanımının düşmesine neden olmaktadır. Ancak, sertleşmiş harcın kullanım yerine uygunluğu açısından öngörülen basınç dayanımları farklı kategorik değerler ile sınırlandırılabilir. Örneğin, TS EN 998-1 standardında sertleşmiş harç dayanım basınç değerleri CS I, CS II ve CS III gibi kategorilerde sınıflandırılmıştır [14]. Bu standarda göre CS II dayanım sınıfında yer alacak bir sertleşmiş harcın basınç dayanımı en az 2,5 N/mm² olması öngörülmüştür. Genleştirilmiş perlit agregalı bir kompozit harcın bu çalışmada uygulanan karışım bileşenleri bağlamında bu dayanım değerini sağlayabilmesi için ortalama %10 çökme oranı değerine sahip bir malzemenin kullanılması gerekliliği açıkça görülmektedir. Bu oran değeri de yaklaşık 570 °C sıcaklıkta genleştirilmiş perlit agregası ile sağlanabileceği bu çalışmada gözlenmiştir. Diğer taraftan daha düşük mukavemet değeri sergileyen CS I sınıfı dayanım değerine sahip bir sertleşmiş harcın basınç dayanımı en az 1,5 N/mm² olması öngörülmüştür. Genleştirilmiş perlit agregalı bir kompozit harcın bu çalışmada uygulanan karışım bileşenleri bağlamında bu dayanım değerini sağlayabilmesi için ortalama %36 çökme oranı değerine sahip bir malzemenin kullanılması gerekliliği ve bu oran değerinin de yaklaşık 760 °C sıcaklıkta genleştirilmiş perlit agregası ile sağlanabileceği belirlenmiştir. Bu analiz bulguları göstermektedir ki, eşdeğer miktarda agregası kullanılmasına rağmen genellikle düşük genleştirme sıcaklık değerlerine sahip perlit agregalı harçlar daha yüksek basınç dayanım değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu analiz bölümündeki bulgulara göre, endüstriyel uygulamalara ışık tutmak açısından CS I dayanım sınıfında bir harç elde etmek için kullanılacak genleşmiş perlitin maksimum çökme oranı yaklaşık %35 ile sınırlandırılabilir ve CS II dayanım sınıfı için ise maksimum çökme oranı yaklaşık %10 ile sınırlandırılabilir.



Şekil 17. Birim hacim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisi
Figure 17. Unit volume weight-compressive strength relationship

Genleşmiş perlit agregalı harçların birim hacim ağırlık değerleri arttıkça, harçların basınç dayanım değerleri de artmaktadır. Harcın üretiminde kullanılan perlit agreganın genleştirme sıcaklığına bağlı olarak gözenek oranının artması ile harcın birim hacim ağırlığı düşmekte, bununla paralel olarak harcın basınç dayanımı azalmaktadır. Ancak, TS EN 998-1 standardının öngördüğü CSI ve CSII dayanım sınıflandırmasına uygun harç örneklerinin üretilebileceği Şekil 17'den de tespit edilebilmektedir.

Perlit agreganın artan genleştirme sıcaklığı, genleşmiş agreganın gözenekliliğinin artmasına neden olduğu kadar, bu agregalı karışımlara ait sertleşmiş harcın da görünür gözeneklilik oranının artmasını sağlamaktadır. Bu eğilim grafiksel olarak Şekil 18'de analiz edilmiştir.



Şekil 18. Perlit genleştirme sıcaklığı-görünür gözeneklilik ilişkisi
Figure 18. Perlite expansion temperature-apparent porosity relationship

410 °C sıcaklık ile 900 °C sıcaklık aralığında genleştirme işlemi yapılmış perlit agregalı sertleşmiş harçların görünür gözeneklilik oranı %13,4 - %42,4 aralığında değişmektedir. Agreganın genleştirme sıcaklığı arttıkça, görünür gözeneklilik de anlamlılık düzeyi yüksek seviyede lineer üstel bir fonksiyon olarak artmaktadır. Bu analiz bulgusu göstermektedir ki; yüksek gözeneklilik arzu edilen harç matrislerinin elde edilmesi için yüksek sıcaklık değerlerinde genleştirme işlemi yapılmış perlit agregalara gereksinim duyulmaktadır. Bu tür matris yapıları binalarda çoğunlukla yalıtıma katkı sağlamak amaçlı uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak, bu matris yapılarına sahip sertleşmiş harçların yukarıda da değinildiği üzere dayanımları düşük olabilmektedir. Diğer taraftan, daha yüksek mukavemet sağlayan harç kombinasyonları için ise düşük sıcaklık değerlerinde genleştirilmiş ve düşük görünür gözeneklilik matrisini sağlayan perlit agregalara gereksinim duyulmaktadır. Sertleşmiş harcın

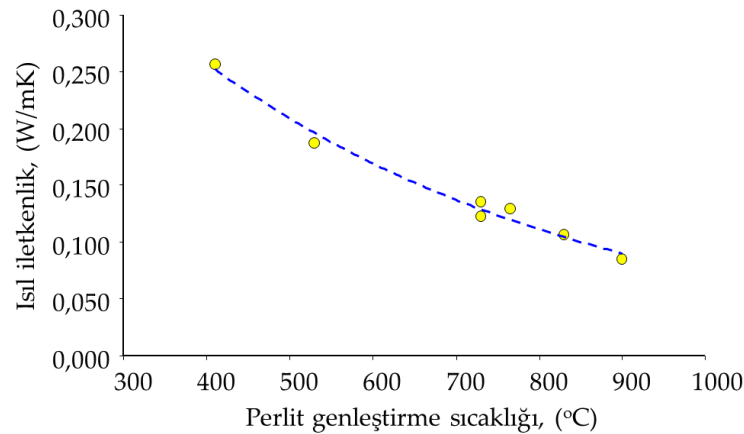
görünür gözeneklilik olgusunun yüksek oluşu, aynı zamanda bu harcın ısı iletkenlik değerinin de düşük değerlerde olabileceğini temsil edebilmektedir. Çalışma kapsamında bu bağlamda yapılan bir seri irdelemelerde Şekil 19'de grafiksel olarak verilen bulgular elde edilmiştir.

Test örneklerinin ısı iletkenlik değeri ölçümleri için laboratuvar ölçekli Sıcak Kutu (Hot Box) yöntemi kullanılmıştır. Sıcak Kutu yönteminde test örneği, opsiyonel olarak 0°C ile +55°C arasında değişen sıcaklık ortamları için ısı iletkenlik ölçümü yapılabilmektedir. Ölçüm sırasında, örneğin her bir yüzeyindeki ısı değeri, yüzeyde bir karelaj oluşturacak şekilde en az 9'ar noktadan ölçülmüştür. Isı iletkenlik ünitesi, ısı kutusu (sıcak oda) olarak adlandırılan bölümde, bir elektrikli ısıtıcı, numunenin yerleştirildiği bölüm ve soğuk odadan oluşmaktadır. Soğuk ve sıcak odanın her ikisinde de yer alan ısı sensörleri, zarar görmeden örnek yüzeyine tam olarak temas ettirilerek örnek yüzey sıcaklık değerleri 0.1°C hassasiyetle ölçülmüştür. Verilen ısının kontrolü, sürekli değişebilen (20-400 watt) akım ile sağlanabilmekte ve test cihazı, ısı geçişinin üç boyutlu olması nedeniyle, hatalar minimize edilerek tasarımılandırılmıştır. Sıcaklık verilerini kaydetmeden önce, numunenin kararlı duruma gelmesi sağlanmış olup, kararlı duruma ulaştıktan sonra veri kaydına başlanmıştır. Düzenek içine yerleştirilmiş test numunesinin her iki yüzeyinde istenen sıcaklık farkı ısıtıcıya uygulanan elektriksel güç (Q_T , Watt) vasıta ile sağlanmış ve yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ölçüm değerlerinden ortalama değer olarak (ΔT , °C) belirlenmiştir. Test örneğinin ısı iletkenlik değeri yalnız bir şekilde (λ , W/mK), aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\lambda = \frac{Q_T \times d}{A \times \Delta T}$$

Burada;

- λ = Test örneğinin ısı iletkenlik değeri, (W/mK),
- Q_T = Isıtıcıya uygulanan elektriksel güç, (Watt),
- d = Numune kalınlığı, (m),
- A = Isıtma bölümünde ısıtılan alan, (m²),
- ΔT = Yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı, (°C),



Şekil 19. Perlit genleştirme sıcaklığı-ısı iletkenlik değeri ilişkisi

Figure 19. Perlite expansion temperature-thermal conductivity value relationship

Perlit agreganın genleştirme sıcaklığı arttıkça bu perlit karışımı harcın ısı iletkenlik değeri de düşmektedir. Diğer bir değişle temsili olarak daha ısı yalıtımlı bir form kazanmaktadır. TS EN 998-1 standardında sertleşmiş harçlar, yoğunluk değerlerinin bir fonksiyonu olarak sağladıkları ısı iletkenlik (λ) değerlerine göre yalıtıma katkı sağlamak amaçlı yapı bileşenleri olarak kullanılmalarını da gündeme getirmektedir. Bu bağlamda, TS EN 998-1 standardında sertleşmiş harç ısı iletkenlik değerleri T1 ve T2 olarak iki ayrı grupta sınıflandırılmıştır. T1 sınıfı harçlar için öngörülen ısı iletkenlik değeri $\lambda < 0,10$ W/mK koşulunu sağlaması, T2 sınıfı harçlar için ise öngörülen ısı iletkenlik değeri $\lambda < 0,20$ W/mK

koşulunu sağlaması gerekmektedir. T1 sınıfında yer alabilecek geliştirilmiş perlit agregalı bir kompozit harcın bu çalışmada uygulanan karışım bileşenleri bağlamında öngörülen λ değerini sağlayabilmesi için harçta kullanılacak perlit agreganın minimum 850 °C'lik sıcaklık değerinde geliştirme işlemine tabi tutulmuş olması gerektiğini göstermektedir. Bu aynı zamanda harcın binalarda ısı yalıtımına katkı sağlayabilecek özellik taşıyacağını da vurgulamaktadır. Diğer taraftan T2 sınıfında yer alabilecek geliştirilmiş perlit agregalı bir kompozit harcın bu çalışmada uygulanan karışım bileşenleri bağlamında öngörülen λ değerini sağlayabilmesi için ise harçta kullanılacak perlit agreganın minimum 520 °C'lik sıcaklık değerinde geliştirme işlemine tabi tutulmuş olması gerektiğini göstermektedir. Isı yalıtımına katkı sağlamak amaçlı tasarlanan harç karışımlarında yüksek sıcaklıkta geliştirilmiş perlitlerin agrega olarak kullanımının alternatif malzemelere göre daha önem kazandığı düşünülmektedir.

4. SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışma kapsamında, ham perlitin eşdeğer bir sürede farklı sıcaklık değerlerinde geliştirme işlemi sonrası oluşan gelişmiş agrega formlarının değişimi analiz edilmiş olup, gelişmiş perlitin yapısal karakteristiğine etkiyen faktörler incelenmiştir. Özellikle geliştirme işlemi sonrası perlit agreganın mukavemetini, kırılgenliğini ve ufalanma olgusunu temsili olarak tanımlayabilmek amacıyla yeni bir yöntem öngörülmüştür. Ayrıca, bu yöntemle göre belirlenmiş ve farklı karakteristik yapıya sahip geliştirilmiş perlit agregalı çimento esaslı kompozit harç örneklerinin teknik performans değerleri de irdelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre:

1. Bu çalışmada 560 °C ve 830 °C eşik sıcaklık değerleri olarak tanımlanmıştır.
2. 200 °C–1040 °C sıcaklık aralığında ham perlit örnekleri için elde edilen gelişme oranları her bir boyut aralığı için sırasıyla; 125-250 μm tane boyutlu ham perlit için %0,7 - %202, 250-500 μm tane boyutlu ham perlit için %0,8 - %236 ve 500-750 μm tane boyutlu ham perlit için %0,9 - %247'dir.
3. 830 °C'nin üzerinde gelişmiş perlitin daha kırılgen, kolay ufalanabilen bir özellik kazandığı görülmüştür. Perlitin birim hacim kütlelerinde en fazla değişimin ikinci eşik sıcaklık değerinde olduğu görülmüştür.
4. Ham perlitin tane boyutu arttığında artan gelişme miktarının bir fonksiyonu olarak daha hafif perlit agrega elde edilebilmektedir.
5. 125 μm –250 μm boyut aralığında sınıflanmış ham perlitin geliştirilmesi sonucu elde edilen gelişmiş perlit agreganın çökme değeri %38,46'ya kadar, 250 μm –500 μm ve 500 μm –750 μm boyut aralıklarında ise bu değer %41,54 ve %45,38'e kadar artmaktadır. Gelişmiş perlitin yığın yoğunluğu arttıkça, çökme değeri düşmektedir.
6. Gelişmiş perlit agrega ile üretilen harç örneklerinde, perlit agreganın geliştirme sıcaklık değeri arttıkça agreganın artan çökme değeri ve azalan yığın yoğunluğu sebebiyle yayılma değerlerinin azaldığı görülmektedir.
7. Ham perlitin geliştirme sıcaklık değeri arttıkça sertleşmiş harç hafiflemektedir.
8. Çökme oranındaki artışın basınç dayanımını azaltan bir faktör olduğu tespit edilmiştir. TS EN 998-1'e göre CS I dayanım sınıfında bir harç elde etmek için kullanılacak gelişmiş perlitin maksimum çökme oranı yaklaşık %35 ile sınırlandırılabilmesi ve CS II dayanım sınıfı için ise maksimum çökme oranı yaklaşık %10 ile sınırlandırılabilmesi öngörülebilir.
9. Agreganın geliştirme sıcaklığı arttıkça, harcın görünür gözeneklilik seviyesi de artmaktadır.
10. Perlit agreganın geliştirme sıcaklığı arttıkça, bu perlit karışımı harçların ısıl iletkenlik değerleri azalmaktadır. TS EN 998-1'e göre T1 sınıfında yer alabilecek geliştirilmiş perlit agregalı bir kompozit harcın bu çalışmada uygulanan karışım bileşenleri bağlamında öngörülen λ değerini sağlayabilmesi için harçta kullanılacak perlit agreganın minimum 850 °C'lik sıcaklık değerinde geliştirme işlemine tabi tutulmuş olması gerektiği tespit edilmiştir.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Makale etik kurallara uygundur.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Lütfullah GÜNDÜZ: Özgün Taslak Hazırlama, Gözden Geçirme ve Düzenleme, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Doğrulama, İnceleme, Kaynaklar.

Şevket Onur KALKAN: Gözden Geçirme ve Düzenleme, Kavramsallaştırma, Görselleştirme, İnceleme, Deneysel Çalışma.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkiliyor gibi görünebilecek bilinen hiçbir finansal çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] O. Gencil, O. Y. Bayraktar, G. Kaplan, O. Arslan, M. Nodehi, A. Benli, A. Gholampour, and T. Ozbakkaloglu, "Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties," *Construction and Building Materials*, vol. 320, 126187, 2022.
- [2] M. Samar, S. Saxena, 2016, " Study of chemical and physical properties of perlite and its application in India," *International Journal of Science Technology and Management*, vol. 5, no. 04, pp. 70-80, 2016
- [3] United States Geological Survey, "USGS Mineral Commodity Summaries, Perlite," *United States Geological Survey*, 2023. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-perlite.pdf>. [Accessed: Feb. 17, 2023].
- [4] L. D. Maxim, R. Niebo, and E. E. McConnell, "Perlite toxicology and epidemiology – A review," *Inhalation Toxicology*, vol. 26, no. 5, pp. 259-270, 2014.
- [5] M. Ibrahim, A. Ahmad, M. S. Barry, L. M. Alhems, and A. C. Mohamed Suhothi, "Durability of structural lightweight concrete containing expanded perlite aggregate," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 14, no. 1, pp. 1-15, 2020.
- [6] O. Şengül, S. Azizi, F. Karaosmanoglu, and M. A. Tasdemir, "Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2-3, pp. 671-676, 2011.
- [7] Perlite Institute, 2022. [Online]. Available: <https://www.perlite.org/perlite-online/>. [Accessed: Feb. 17, 2023].
- [8] L. H. Yu, L. Ou, and L. L. Lee, "Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 1 pp. 73-76, 2003.
- [9] T. K. Erdem, Ç. Meral, M. Tokyay, and T. Y. Erdoğan, "Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 1, pp. 13-21, 2007.
- [10] C. Panagiotopoulou, P. M. Angelopoulos, D. Kosmidi, I. Angelou, L. Sakellariou, and M. Taxiarchou, "Study of the influence of the addition of closed-structure expanded perlite microspheres on the density and compressive strength of cement pastes," *Materials Today: Proceedings*, vol. 54, no. 1, pp. 118-124, 2022.
- [11] O. Orhun, "Perlit," *Bilimsel Madencilik Dergisi*, Cilt 8, Sayı 4, s213-222, 1969.
- [12] İ. Özgenç, "Perlitler içindeki suyun kimyasal yapısı ve bu yapının genleşme özelliğine etkisi," *Jeoloji Mühendisliği*, s.42, 60-63, 1993.
- [13] N. Şapçı, and H. Ceylan, "Perlit Agregalarının Farklı Sıcaklıklarda Genleştirilmesi Üzerine Teknik Bir Analiz," *Teknik Bilimleri Dergisi*, Cilt 11, Sayı 2, 32-40, 2021.

- [14] TS EN 998-1, Kâgir harcı - Özellikler - Bölüm 1: Kaba ve ince sıva harcı Ankara, TSE, 2006.
- [15] ASTM C230/C230M-08 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, USA, 2014.
- [16] TS EN 1015-3, Kâgir Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası İle) Ankara, TSE, 2000.