

T.C.  
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAM PERLİT AGREGALI BETONDA GERİ KAZANILMIŞ İNCE AGREGA  
İKAMESİNİN BETONLARIN MEKANİK, KILCALLIK VE YÜKSEK SICAKLIK  
DİRENCİ ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Hakan CEBECİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL

TEZ JÜRİ ÜYELERİ  
Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU  
Doç. Dr. H. Alperen BULUT  
Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ERZİNCAN, 2025

© 2025 [Hakan CEBECİ]. Tüm hakları saklıdır.

## ÖZET

# **HAM PERLİT AGREGALI BETONDA GERİ KAZANILMIŞ İNCE AGREGA İKAMESİNİN BETONLARIN MEKANİK, KILCALLIK VE YÜKSEK SICAKLIK DİRENCİ ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Hakan CEBECİ**

**Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ufuk KANDİL**

**2025, 75 sayfa**

Hafif betonlar birim ağırlıklarının az olmasından dolayı ses ve ısı yalıtımı gerektiren uygulamalarda kullanılmasının yanında gerekli özellikler sağlandığında yapıda taşıyıcı eleman üretiminde de kullanılabilirler. Ülkemizin deprem bölgesi olduğu dikkate alındığında hafif betonların yapıda kullanımının yaygınlaşması, yapıya etkileyen deprem yüklerinin azaltılması açısından önemlidir. Diğer taraftan inşaat beton atıklarının kırılıp, öğütülerek betonda agregası olarak kullanılması hem çevresel atıkların azalmasına hem de doğal kaynakların tüketiminin azalmasına katkıda bulunmaktadır. Bu çalışmada Erzincan ilinden temin edilen ham perlit agregası kullanılarak üretilen hafif betonlarda, farklı oranlarda geri kazanılmış ince agregası (GKİA) ikamesinin mekanik özellikler, kılcallık ve yüksek sıcaklık direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla GKİA hacimce %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında ince ham perlit agregası ile ikame edilerek hafif betonlar üretilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisini incelemek için 0°C, 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılan hafif betonların ağırlık kayıpları, basınç dayanımı kayıpları, ultra ses geçiş hızları ölçülmüş ve hem görsel hem de SEM (taramalı elektron mikroskobu) ile incelenerek elde edilen sonuçlar GKİA ikame oranı ve sıcaklık değişimine göre irdelenmiş ve tartışılmıştır. Ham perlit agregası kullanılarak üretilen hafif betonlarda GKİA kullanım oranı artışı ile betonların mekanik ve durabilite özelliklerinde kayıpların meydana geldiği tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklığın beton özelliklerinde ciddi oranlarda kayıplar meydana getirdiği görülmüştür. GKİA ikame oranına bağlı olarak bu kayıplar daha da artmıştır. Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılmasının betonlar üzerinde olumlu bir etki gösterdiği görülmüştür. %20 GKİA içeriği bu çalışmada GKİA kullanımının önerildiği orandır. %20 GKİA içerikli hafif

beton üretimi ile daha çevre dostu ve sürdürülebilir bir hafif beton üretimi mümkün olabileceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** hafif beton, ham perlit agregası, geri kazanılmış ince agregası, mekanik, kılcallık, yüksek sıcaklık



## **ABSTRACT**

# **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF RECYCLED FINE AGGREGATE SUBSTITUTION IN RAW PERLITE AGGREGATE CONCRETE ON MECHANICAL, CAPILLARITY AND HIGH TEMPERATURE RESISTANCE PROPERTIES OF CONCRETES**

**Hakan CEBECİ**

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and  
Technology,**

**Department of Civil Engineering**

**Advisor: Assist. Prof. Dr. Ufuk KANDİL**

**2025, 75 pages**

Lightweight concretes are used in applications requiring acoustic and heat insulation due to their low unit weight and can also be used as a load-bearing element in the structure when the necessary properties are provided. Considering that our country is an earthquake zone, it can be said that the widespread use of lightweight concretes in structures is important in terms of reducing earthquake loads affecting the structure. On the other hand, crushing and grinding construction concrete wastes and using them as aggregates in concrete contributes to both the reduction of environmental waste and the reduction of consumption of natural resources. In this study, the changes in the mechanical, capillarity and high temperature resistance of lightweight concretes using different proportions of recycled fine aggregate (RFA) in lightweight concretes produced using raw perlite aggregate supplied from Erzincan province were investigated. For this purpose, lightweight concretes were produced by replacing RFA with fine raw perlite aggregate at 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100% by volume. In order to investigate the effect of high temperature, weight losses, compressive strength losses, ultrasonic pulse velocity on lightweight concretes exposed to temperatures of 0°C, 200°C, 400°C, 600°C and 800°C were measured by experiments and the results obtained by examining both visually and with SEM (scanning electron microscope) were examined and discussed according to the change of RFA substitution rate and temperature parameters. It was determined that losses in mechanical and durability properties of concretes occurred with

the increase in RFA usage rate in lightweight concretes produced using natural perlite aggregate. It was observed that high temperature caused serious losses in concrete properties. These losses increased even more depending on the RFA substitution rate. It was observed that increasing the curing period from 28 days to 90 days had a positive effect on concretes. 20% RFA content is the recommended rate for RFA usage in this study. A more environmentally friendly and sustainable lightweight concrete production can be made possible with the production of lightweight concrete with 20% RFA content.

**Keywords:** lightweight concrete, raw perlite aggregate, recycled fine aggregate, mechanical, capillary, high temperature



## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında değerli rehberliği, bilgi birikimi ve sabırlı yaklaşımıyla bana yol gösteren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ufuk Kandil'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hakan CEBECİ

Mayıs, 2025



## İÇİNDEKİLER

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| ÖZET .....                                                      | i   |
| ABSTRACT .....                                                  | iii |
| TEŞEKKÜR .....                                                  | v   |
| İÇİNDEKİLER .....                                               | vi  |
| TABLolar DİZİNİ .....                                           | ix  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                           | x   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                            | xii |
| 1. GİRİŞ .....                                                  | 1   |
| 1.1. Araştırmanın Amacı .....                                   | 4   |
| 1.2. Araştırmanın Önemi .....                                   | 4   |
| 2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR .....                 | 6   |
| 2.1. Hafif Betonlar .....                                       | 6   |
| 2.1.1. Hafif betonun tarihçesi .....                            | 7   |
| 2.1.2. Hafif betonların sınıflandırılması .....                 | 7   |
| 2.1.3. Hafif betonun avantajları .....                          | 9   |
| 2.1.4. Hafif betonun dezavantajları .....                       | 9   |
| 2.1.5. Hafif agregalar .....                                    | 9   |
| 2.2. Perlit .....                                               | 10  |
| 2.2.1. Perlitin fiziksel özellikleri .....                      | 12  |
| 2.2.2. Perlitin kullanıldığı alanlar .....                      | 12  |
| 2.2.3. Perlit agregalı betonların birim hacim ağırlıkları ..... | 13  |
| 2.2.4. Perlit agregalı betonların mekanik özellikleri .....     | 13  |
| 2.3. Geri Dönüşüm .....                                         | 14  |
| 2.3.1. Geri kazanılmış agrega (GKA) .....                       | 16  |
| 2.4. Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisi .....                    | 17  |
| 2.5. Kaynak Özetleri .....                                      | 18  |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                     | 23  |
| 3.1. Materyal .....                                             | 23  |
| 3.1.1. Agregalar .....                                          | 23  |
| 3.1.2. Çimento .....                                            | 26  |
| 3.1.3. Su .....                                                 | 26  |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2. Beton Dizaynı, Üretimi ve Numune Hazırlama .....                                        | 26 |
| 3.3. Gerçekleştirilen Deneyler .....                                                         | 30 |
| 3.3.1. Taze hal deneyleri.....                                                               | 30 |
| 3.3.1.1. Taze hal birim ağırlık deneyi.....                                                  | 30 |
| 3.3.1.2. Çökme deneyi.....                                                                   | 30 |
| 3.3.2. Sertleşmiş beton deneyleri.....                                                       | 32 |
| 3.3.2.1. Kuru hal birim ağırlık deneyi .....                                                 | 32 |
| 3.3.2.2. Basınç dayanımı deneyi.....                                                         | 32 |
| 3.3.2.3. Yarmada çekme dayanımı deneyi.....                                                  | 32 |
| 3.3.2.4. Ultrases geçiş hızı deneyi (UGH).....                                               | 32 |
| 3.3.2.5. Kılcallık deneyi .....                                                              | 32 |
| 3.3.2.6. Yüksek sıcaklık direncinin belirlenmesi .....                                       | 32 |
| 4. BULGULAR .....                                                                            | 39 |
| 4.1. Birim Ağırlık Deney Sonuçları.....                                                      | 39 |
| 4.2. Çökme Deney Sonuçları.....                                                              | 40 |
| 4.3. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....                                                    | 40 |
| 4.4. Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları.....                                             | 41 |
| 4.5. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları .....                                               | 41 |
| 4.6. Kılcallık Deney Sonuçları .....                                                         | 42 |
| 4.7. Yüksek Sıcaklık Direnci Deney Sonuçları .....                                           | 42 |
| 4.7.1. Ağırlık kaybı deney sonuçları .....                                                   | 42 |
| 4.7.2. Basınç dayanımı kaybı deney sonuçları .....                                           | 43 |
| 4.7.3. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları.....                                              | 44 |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....                                                                   | 45 |
| 5.1. Birim Ağırlık .....                                                                     | 45 |
| 5.2. Basınç Dayanımı .....                                                                   | 46 |
| 5.3. Yarmada Çekme Dayanımı .....                                                            | 47 |
| 5.4. Ultrases Geçiş Hızı .....                                                               | 49 |
| 5.5. Kılcallık .....                                                                         | 50 |
| 5.6. Yüksek Sıcaklık Direnci.....                                                            | 51 |
| 5.6.1. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları.....        | 51 |
| 5.6.2. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası betonlarda meydana gelen basınç dayanımı kayıpları ... | 53 |
| 5.6.3. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası hafif betonların ultrases geçiş hızları .....          | 55 |
| 5.6.4. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası hafif betonların görsel olarak incelenmesi.....        | 57 |



|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.6.5. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası hafif betonların mikro yapı analizi..... | 61 |
| 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....                                                  | 64 |
| 6.1. Sonuçlar .....                                                            | 64 |
| 6.2. Öneriler.....                                                             | 66 |
| KAYNAKÇA .....                                                                 | 67 |



## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1. Hafif betonların sınıflandırılması .....                                                   | 8  |
| Tablo 2. Erzincan perliti ve dünyadaki perlitin analiz sonuçları (Ulus, 2007).....                  | 11 |
| Tablo 3. Agregalara ilişkin DYK özgül ağırlıklar ve su emme değerleri.....                          | 24 |
| Tablo 4. Beton üretimlerinde kullanılan çimentonun özellikleri.....                                 | 26 |
| Tablo 5. Hafif beton bileşenleri (kg/m <sup>3</sup> ).....                                          | 27 |
| Tablo 6. Hafif betonların birim ağırlıkları.....                                                    | 39 |
| Tablo 7. Hafif betonların çökme sonuçları .....                                                     | 40 |
| Tablo 8. Hafif betonların basınç dayanımları .....                                                  | 40 |
| Tablo 9. Hafif betonların yarmada çekme dayanımları .....                                           | 41 |
| Tablo 10. Hafif betonların ultrases geçiş hızları.....                                              | 41 |
| Tablo 11. Hafif betonların kılcallık katsayıları .....                                              | 42 |
| Tablo 12. Hafif betonlarda yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen ağırlık kayıpları .....         | 43 |
| Tablo 13. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası hafif betonların basınç dayanımları .....                  | 43 |
| Tablo 14. Hafif betonlarda yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen basınç dayanımı kayıpları ..... | 44 |
| Tablo 15. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası hafif betonların ultrases geçiş hızları.....               | 44 |
| Tablo 16. UGH değerlerine göre betonların kalite sınıflandırması .....                              | 57 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Türkiye’de bulunan perlit-pomza yatakları (MTA, t.y.) .....                                             | 11 |
| Şekil 2. Ülkelerin ürettikleri yıkım atıkları (Tam vd., 2018) .....                                              | 15 |
| Şekil 3. Geri kazanılmış agregaya ait şematik gösterim.....                                                      | 17 |
| Şekil 4. Soldan sağa iri, orta, ince ham perlit agregaları ve GKİA .....                                         | 23 |
| Şekil 5. Üretilen betonların agregalarına ait granülometri eğrileri.....                                         | 24 |
| Şekil 6. Ham perlit agregasından alınan SEM görüntüsü.....                                                       | 25 |
| Şekil 7. Çalışmada kullanılan ham perlit agregasına ait EDX analizi.....                                         | 25 |
| Şekil 8. Hafif beton üretimlerinde kullanılan mikser .....                                                       | 28 |
| Şekil 9. Tek bir üretimde hazırlanan numuneler .....                                                             | 29 |
| Şekil 10. Numunelerin kür havuzuna yerleştirilmesi .....                                                         | 29 |
| Şekil 11. Deneyler esnasında tartımlarda kullanılan terazi .....                                                 | 31 |
| Şekil 12. Çökme değerinin ölçülmesi (TS EN 12350-2 (2010)) .....                                                 | 31 |
| Şekil 13. Deneylerde kullanılan etüv.....                                                                        | 32 |
| Şekil 14. Basınç dayanımı deneyi.....                                                                            | 33 |
| Şekil 15. Yarmada çekme dayanımı deneyi .....                                                                    | 34 |
| Şekil 16. Ultrases geçiş hızı deneyi.....                                                                        | 35 |
| Şekil 17. Kılcallık deneyi düzeneği .....                                                                        | 36 |
| Şekil 18. Yüksek sıcaklık fırını ve numuneler .....                                                              | 37 |
| Şekil 19. Numunelere uygulanan sıcaklığın zamanla değişimi .....                                                 | 38 |
| Şekil 20. SEM görüntüsü almak için kullanılan cihaz.....                                                         | 38 |
| Şekil 21. Üretilen betonların birim ağırlıkları .....                                                            | 45 |
| Şekil 22. Üretilen betonların basınç dayanımı test sonuçları .....                                               | 47 |
| Şekil 23. Üretilen betonların yarmada çekme dayanımı test sonuçları .....                                        | 48 |
| Şekil 24. Üretilen betonların ultrases geçiş hızı test sonuçları .....                                           | 49 |
| Şekil 25. Üretilen betonların kılcallık katsayıları .....                                                        | 50 |
| Şekil 26. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları.....                         | 52 |
| Şekil 27. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası betonlarda meydana gelen basınç dayanımı kayıpları .....                | 54 |
| Şekil 28. Yüksek sıcaklığın ultrases geçiş değerleri üzerindeki etkisi .....                                     | 55 |
| Şekil 29. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış GKİA içermeyen (%0) beton numuneler (basınç dayanımı testi öncesi) ..... | 58 |

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 30. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış GKİA içermeyen (%0) beton numuneler (basınç dayanımı testi sonrası) ..... | 59 |
| Şekil 31. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış %100 GKİA ikameli beton numuneler (basınç dayanımı testi öncesi) .....    | 60 |
| Şekil 32. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış %100 GKİA ikameli beton numuneler (basınç dayanımı testi sonrası) .....   | 61 |
| Şekil 33. 800°C sıcaklığa maruz bırakılan GKİA içermeyen (%0) betona ait SEM görüntüleri .....                    | 62 |
| Şekil 34. 800°C sıcaklığa maruz bırakılan %100 GKİA ikameli betona ait SEM görüntüleri .....                      | 62 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|      |                                       |
|------|---------------------------------------|
| DPT  | Devlet Planlama Teşkilatı             |
| GKA  | Geri Kazanılmış Agregat               |
| GKİA | Geri Kazanılmış İnce Agregat          |
| MTA  | Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü |
| SEM  | Taramalı Elektron Mikroskobu          |
| UGH  | Ultrases Geçiş Hızı                   |
| TSE  | Türk Standartları Enstitüsü           |



## 1. GİRİŞ

Çimento, agrega ve su kullanılarak elde edilen ve yapı malzemesi olarak kullanılan karışıma beton adı verilmektedir. Beton, güvenli, ekonomik, dayanıklı ve fazla bakım gerektirmeyen en önemli yapı malzemesidir (Park ve Paulay, 1991). Betonun oluşma prensibinin temelini çimento hamurunun katılaşıırken agregaları birleştirmesi oluşturmaktadır. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyon sonucunda bağlayıcının katılma evresi gerçekleşmektedir (Kosmatka vd., 2002). Bu sayede matriksin dayanım kazanması ile birlikte betonun dayanımı da gittikçe artmaktadır. Tipik olarak hacimce %10 oranında çimento, %15 oranında su, %75 oranında da agrega kullanılarak elde edilen betona gerekli bazı durumlarda belli oranlarda kimyasal ve mineral katkı maddeleri de ilave edilebilmektedir (Dedeoğlu, 2010; Dyer, 2014). Beton konutlar gibi çok kullanılan yapıların temel malzemesi olmakla birlikte; tüneller, viyadükler, yollar, köprüler, tren yolları, barajlar ve bunun gibi birçok yapı beton ile kolayca imal edilebilmektedir (Neville, 1995). Beton belli bir maliyete sahiptir ve bu nedenle yapı sektörü açısından en önemli husus bu maliyetin mümkün oldukça düşürülmesidir. Beton teknolojisinin ve uzmanların öncelik vermesi gereken konu daha ekonomik beton üretebilmek olmalıdır (Aksüt, 2015). Beton kalitesinin en önemli parametresi basınç dayanımıdır. Dayanımı direkt etkileyen su/çimento oranına bağlı olarak agrega nitelikleri üzerinde durmanın faydalı olduğu bilinmektedir.

Betonun kalitesine etki eden en önemli bileşen agregadır. İnorganik bir malzeme olan agrega; yağmur, sel, rüzgâr, akarsu aşındırması, yüksek sıcaklık ve basınç gibi etmenler sonucunda oluşumunu tamamlamamış yapısında birçok farklı mineral barındırmaktadır. Agregayı oluşturan kayaların niteliklerinin, yapısının ve özelliklerinin bilinmesi inşaat mühendisliği açısından oldukça önem arz etmektedir. Beton üretiminde kullanılacak olan agreganın fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin bilinmesi elzemdir. Nehir ve derelerdeki agregaları aslında o bölgedeki havzayı oluşturan yamaçlardaki kayalar oluşturmaktadır. Örneğin bir nehri besleyen kollardaki kayalar zamanla aşınarak ve parçalanarak nehre ulaşmakta ve betonda kullanılacak agregayı oluşturmaktadır. Saf ve zahmetsiz bir malzeme olan agrega, çimentoya göre oldukça ucuzdur ve bu durum ekonomik açıdan düşünüldüğünde büyük bir avantaj oluşturmaktadır. Bu avantajın yanı sıra agrega kendi dayanımı ile birlikte betonun gerekli dayanıma ulaşmasını sağlarken sertleşmiş çimento hamuru içerisinde betonda oluşabilecek hacim farklılıklarını da engellemekte ve dış etkenlere karşı direncini de

artırmaktadır (Cilason, 1992). Agreganın kalitesi betonun dayanım, sürdürülebilirlik, yaş ve homojen özelliklerine doğrudan etki etmektedir (Alexander ve Mindess, 2005). Son yıllarda doğal kaynaklarımızdan elde edilen agreganın büyük oranda tükenmesi ve agrega ihtiyacını karşılayacak taş ocaklarının yetersiz kalması sonucunda alternatif kaynak arayışları hasıl olmuştur. Bu arayış sonucunda; yeni agrega kullanıldığında oluşan maliyeti düşürmek, enerji tüketimini azaltmak ve atık birikiminden dolayı çevreye verilen zararı minimum seviyeye indirmek için geri kazanılmış beton agregalarının yeniden kullanılması fikri cazip hale gelmeye başlamıştır (Postacıoğlu, 1987; Dyer, 2014). Eski yapıların yıkımından sonra ortaya çıkan molozlara beton atık denilmektedir. İnce ve iri agregalardan oluşan bu atıkların kaynakları şu şekilde sıralanabilmektedir. Doğal afetlere veya yangına maruz kalmış yapılar, üretimi kusurlu olan betonlar, ulaşım sistemi için yapılan çalışmalar, yıkılması uygun görülen eski yapılar, kalite kontrol numuneleri ve prefabrik üretim atıkları geri dönüşüm için kullanılacak atıkların kaynaklarıdır (Erdoğan,1995). Yıkım atıklarından geri kazanılmış agrega üretilerek yeni üretilecek olan betonda agrega olarak kullanımı ilk olarak 2. dünya savaşı sırasında ve sonrasında Almanya ve Birleşik Krallıktaki şehirlerde meydana gelen muazzam moloz oluşması sebebiyle uygulanmaya başlanmıştır (Nixon, 1978). Uygulamaya yönelik bu ciddi girişim ile birlikte geri kazanılmış agrega üzerine gerçekleştirilen araştırmalar ve bu agregaların betonda kullanım oranlarında artış görülmeye başlanmıştır.

TSE standartlarına ve bazı şartnâmelere göre yoğunluk itibarıyla 2000 kg/m<sup>3</sup>'ün altında kalan betonlara “hafif beton” adı verilmektedir. Çimentonun hücre sistemiyle veya havayla genleştirilmesi sonucu elde edilebilen hafif beton, aynı zamanda geleneksel agrega yerine hafif agregalar kullanılarak da elde edilebilmektedir. Taşınmasının kolay olması açısından beton üretiminde genellikle hafif agregalar tercih edilmektedir. Hafif betonun kullanım alanları oldukça geniştir. Yangın çıkma olasılığının yüksek olduğu yerlerde hafif beton tercih edilir. Isı ve ses iletim direnci özelliği iyi olduğu için çatılarda da sıklıkla kullanılmaktadır (Kotan, 2009). Bilindiği üzere ülkemiz deprem kuşağında yer almaktadır. Çeşitli bölgelerde meydana gelen depremler sonrası oluşan hasarların büyük bir kısmının beton kaynaklı olduğu görülmektedir. Oluşması muhtemel depremlerde can ve mal kaybının ortadan kaldırılması ya da en aza indirilmesi için mevcut yapıların depreme karşı dayanıklılıklarının tespit edilmesi gerekmektedir. Bu tespit için ise en önemli öğelerden biri yapıdaki betonun kalitesidir. Bu kaliteyi belirlemek için kullanılan birçok metot vardır. En doğru sonuç veren yöntemler tahribatlı yöntemlerdir ancak maliyetli olmaları, zaman almaları ve yapıda zafiyetler oluşturması hasebiyle çok tercih edilmemektedir (Bungey ve Millard, 1996). Mevcut

yapılarda deprem etkisinin yapıya ne düzeyde etki edeceğinin bilinmesi önemli olmakla birlikte yapıların depreme dayanıklı olarak inşa edilmelerinin problemin çözümü açısından daha etkin olduğu söylenebilir. Deprem esnasında yapıya etki eden yüklerin, yapının ağırlığı ile orantılı bir şekilde arttığı bilinmektedir. Bu çerçevede hafif beton kullanılarak inşa edilen yapıların depremden daha az etkileneceği gerçeği hafif betonun yapıda taşıyıcı olarak kullanımını tercih sebebi haline getirebilmektedir.

Betonun dayanımı, ısı iletkenliği, ısı genleşmesi, birim ağırlığı, özgül ısı ve rengi gibi betonun fiziksel özelliklerine etki eden en önemli unsurlardan biri yüksek sıcaklık etkisi ve yüksek sıcaklığa maruz kalma süresidir. Yüksek sıcaklık etkisi malzemeye ve yapıya zarar verdiği gibi aynı zamanda hasara da yol açmaktadır. Yangınlar, endüstri yapılarının bacalarında görülen sıcaklıklar ve nükleer reaktörlerde oluşan sıcaklıklar bu olumsuz etkenlere sebep olarak gösterilebilmektedir (Luccioni vd., 2009). Beton ve betonarme özelliklerinde önemli ölçüde değişikliğe yol açmasından dolayı yüksek sıcaklık etkisi ve yüksek sıcaklığa maruz kalma süresi dikkat çeken araştırma konuları arasındadır.

Bu çalışmada; geri kazanılmış ince agrega (GKİA) kullanımının, Erzincan ilinden temin edilen ham perlit ile üretilen hafif betonlar üzerindeki etkisini ortaya koymak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda GKİA, ince perlit agregası ile hacimce %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında ikame edilerek altı farklı içerikte hafif beton üretilmiştir. Betonların özelliklerinin GKİA ikamesi değişimi ile nasıl değiştiğini ortaya koymak için betonlar üzerinde kuru birim ağırlık, çökme, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı, kılcallık ve yüksek sıcaklığa karşı direnç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklığa karşı hafif betonların dirençlerini ölçmek için üretilen betonlardan alınan numuneler 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Bu sıcaklıklardan sonra betonların ağırlıklarında ve basınç dayanımlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık gören betonlar hem görsel olarak hem mikroyapı incelemesi için SEM (taramalı elektron mikroskopu) kullanılarak yüksek sıcaklığın hafif betonlar üzerinde meydana getirdiği değişimler görsel olarak da incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda GKİA ikame oranı artışı ile birlikte hafif betonların performans özelliklerinde azalmalar olduğu görülmekle birlikte %20 GKİA ikameli betonların çevre dostu hafif beton üretimi için optimum seçim olduğu söylenebilir.



## 1.1. Araştırmanın Amacı

Bilindiği üzere ülkemiz deprem kuşağında yer almaktadır. Deprem kuvveti bina kütlesi ile doğru orantılı olarak binaya etki etmektedir. Bu çalışmada deprem kuvvetinin binaya etkisini en aza indirebilmek için hafif beton oluşturmak, betonu oluştururken maliyeti minimuma düşürmek ve atık malzeme olan geri kazanılmış agregaları bu betonda kullanarak daha çevreci ve sürdürülebilir bir beton geliştirilmesini mümkün kılmak amaçlanmıştır. Bu amaçla agrega olarak tamamen perlit agregası kullanılarak üretilen betonlarda, geri kazanılmış ince agrega (GKİA) ikamesinin üretilcek hafif taşıyıcı betonlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. GKİA'nın etkisini incelemek için GKİA, ince perlit agregası ile %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında ikame edilerek hafif betonlar üretilmiştir. Betonlar üzerinde mekanik ve durabilite deneyleri gerçekleştirilmiş ve betonlar üzerinde meydana gelen değişim incelenmiş ve tartışılmıştır. Ayrıca farklı kür sürelerinde deneyler gerçekleştirilerek uzatılmış kür süresinin GKİA içermeyen ve içeren hafif betonlar üzerindeki etkisini incelemekte çalışmanın amaçlarından bir diğerini oluşturmaktadır.

## 1.2. Araştırmanın Önemi

Beton günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesi konumundadır. Bu kadar çok yaygın kullanıma sahip olan bir malzeme günümüz ihtiyaçları doğrultusunda farklı özelliklerde üretilmekte ve ihtiyaçlara cevap verecek şekilde tasarlanabilmektedir. Farklı tasarımlar ile üretilen bu betonlar özel betonlar olarak isimlendirilmektedir. Özel bir beton türü olan hafif betonlar yapıda farklı amaçlarla kullanılabilir. Son yıllarda hafif betonun yapıda taşıyıcı beton olarak kullanılabilmesi ile ilgili çalışmalarda artış meydana gelmiştir. Geleneksel betona kıyasla yoğunluğu daha az olan hafif betonlar kullanılarak inşa edilen yapılar, ağırlığının azalması ve boşluklu bir yapıya sahip olması nedeniyle bazı avantajlara sahiptirler. Bunlar; yapıya etkiyen deprem yüklerinin azalması, yapının ısı ve ses iletkenliğinin azalması, yapının yangına daha dayanıklı bir hale gelmesi, yapının donma-çözülme direncini artması vb. olarak sayılabilir. Özellikle deprem bölgesinde olan ülkemizde deprem etkilerini azaltmak için hafif beton kullanımının sağlayacağı avantajlar hafif beton özelliklerinin daha çok araştırılması ihtiyacını doğurmaktadır. Erzincan ili bir açıdan deprem ile anılmasına rağmen diğer taraftan perlit madeninin zenginliği ile de bilinmektedir. Perlit hafif beton üretiminde, hafif agrega üretiminde de kullanılabilir. Geri kazanılmış agregaların (GKA) beton üretiminde kullanılması ise betonda kullanılan doğal agrega

ihtiyacını azaltmakta, atık olan GKA'nın bertarafına yardımcı olmaktadır. Bu sayede daha çevreci bir beton üretimi mümkün kılınmaktadır.

GKA'ların ham perlit içeren hafif betonlara etkisi ile ilgili literatürde yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın en önemli özgülüğü olarak gösterilebilir. Bu çalışmada tamamen perlit agregası içeren hafif betonlarda geri kazanılmış ince agregaların (GKİA) belirli oranlarda ince perlit agregası ile ikame edilmesinin hafif betonların mekanik, durabilite ve yüksek sıcaklık dirençleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Literatürde hafif betonlar ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde kapsamlı bir şekilde özellikleri incelenen az sayıda çalışma bulunmasına rağmen ham perlit agregası içeren hafif betonlarla ilgili ise oldukça az sayıda çalışmaya rastlanmış olup bu durum çalışmanın bir diğer özgülüğü olarak gösterilebilir. Tüm bu özellikler incelenirken farklı kür sürelerinde betonlar üzerinde deneyler gerçekleştirilmesi, kür süresinin de etkisini ortaya koyarak ortaya değerli bir çalışma çıkarıldığı düşünülmektedir.

## 2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. Hafif Betonlar

Taşıyıcı yapı sistemlerinin imalatında kullanılan geleneksel betonun birim ağırlığı göreceli olarak yüksektir. Bununla doğru orantılı olarak ısı iletkenlik katsayısı da yüksektir. Standart betonların birim ağırlıkları üzerinde oynamalar yapılabilmektedir. Birim ağırlığı düşürülen beton ile betonarme binaların öz ağırlıkları da düşürülerek yapı daha hafif hale getirilebilir. Bu sayede betonda ısı iletkenliği ve ısı genleşme katsayıları küçülürken yangına karşı mukavemet artar. Taşıyıcı sistem elemanlarının kesitleri de küçültülebileceği için yapı daha ekonomik hale gelir. Tüm bunların yanı sıra betondaki boşluk miktarı artınca dayanım ve aşınma direnci azalır ve beton neme karşı daha hassas hale gelir. 28 günlük silindir basınç dayanımı 17 MPa'ı aşan ve birim ağırlıkları  $1840 \text{ kg/m}^3$ 'ü geçmeyen betonlara hafif beton adı verilir. Bazı ülkelerin standartlarına göre hafif beton birim ağırlığı  $1900 \text{ kg/m}^3$ 'e kadar çıkmasına izin verilir ve buna Türkiye de dahildir. Genellikle birim ağırlıklarındaki pratik değişim aralığı  $300\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$  olan hafif betonların ısı yalıtım katsayısı düşük olduğu için yalıtımın üst düzeyde olmasını sağlarken aynı zamanda orta dayanımlı taşıyıcı malzemelerdir (Taşdemir, 2003).

Hafif betonların mekanik özellikleri ve elastisite modülleri düşüktür. Bunun nedeni bünyesindeki boşluk miktarının fazla olmasıdır. Bu özelliklerinden dolayı yapılarda taşıyıcı eleman olarak kullanılmasından ziyade detay malzemesi olarak kullanılması daha uygundur. Yapılarda hafif betonların kullanılması hem maliyeti düşürmekte hem de ısı yalıtımı açısından avantaj sağlamaktadır (Chandra and Berntsson, 2002). Hafif betonlarda kullanılan su miktarının artması beton dayanımını daha fazla olumsuz etkilediği için s/ç oranı normal betona göre daha düşük tutulur. Yapılan incelemelerde kırılmış, köşeli ve pürüzlü yüzeye sahip agregaların dayanımlarının az, yuvarlak ve düzgün yüzeye sahip agregaların ise dayanımlarının daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Hafif betonlarda sünme fazladır çünkü elastisite modülleri düşüktür. Çimentonun fazla, agrega rijitliğinin ise az olması sebebiyle rötre artar. S/Ç oranı düşük tutularak rötrenin önüne geçilebilir. Rötrenin normal betona oranla hafif betonlarda %20 daha fazladır. Rötrenin azalması için agrega rijitliğinin yüksek olması gerekmektedir. Normal beton hafif betona göre %12-22 oranında daha az su emer. Donma açısından ele alındığında ise hafif betonlar normal betonlardan daha dayanıklıdır. Hafif betonlar hangi yolla elde edilmiş olursa olsun bu hususlarda aynı özellikleri göstereceklerdir.

Betonun donmaya dayanıklılığını artırabilmek için su/çimento oranı düşürülebilir. Hafif agregalarda ısı genleşme katsayıları normal agregalara göre daha düşüktür. Agreganın çeşidine ve katılma miktarına bağlı olan bu özellik sayesinde ısı genleşme katsayısı normal betona göre %20 oranında daha az olabilmektedir. Agreganın hafifliği arttığı oranda hafif betonun bu özelliği de aynı oranda artar. Isı iletim katsayısı normal betonda  $\lambda = 1.75$  kcal/mh°C mertebelerinde iken hafif betonda  $\lambda \geq 0.12$  kcal/mh°C mertebelerindedir (Clarke, 2010).

### **2.1.1. Hafif betonun tarihçesi**

Hafif betonun kullanım tarihi M.Ö. 3000’li yıllara dayanmaktadır. İlk olarak bina yükünü azaltmak amacı ile döşemelerde kullanılmaya başlanmıştır. O dönemlerde normal agregalar değil de boşluk miktarı fazla olan ve daha hafif olan doğal ve yapay agregalar kullanılmıştır. Örneğin ponza taşı, genleşmiş kil, genleşmiş perlit, odun talaşı ve plastik köpüğü gibi hafif olan aynı zamanda boşluk miktarı fazla olan agregalar kullanılmıştır (Chandra and Berntsson, 2002). 1970’li yıllara gelindiğinde hafif betonun köprülerdeki kullanımında artış görülmeye başlanmıştır. “Dukenburgse Köprüsü” bu kullanıma verilebilecek en güzel örneklerden biridir. Hollanda Nijmegen yakınlarında, “Mass–Well Kanalı” üzerindeki bu köprünün uzunluğu 188,8 m, genişliği 28,7 m ve boyuna üç açıklığı sırasıyla 37,4 m, 112,2 m ve 37,4 m’dir. Bu köprünün yapımında kumdan üretilen beton ve genleştirilmiş kil kullanılmıştır. Beton yoğunluğu  $1750 \text{ kg/m}^3$ ’tür. 28 günlük silindir basınç dayanımı ise 38,5 MPa değerini sağlamaktadır (Gül ve Geçten, 1994).

### **2.1.2. Hafif betonların sınıflandırılması**

Hafif betonların sınıflandırılmasında dayanım koşullarının yanı sıra birim ağırlık da baz alınmaktadır. Hafif betonların, özellikle birim ağırlık bakımından sınıflandırılmasında farklı kabuller vardır (Neville, 1975). Taşıyıcı olan hafif betonların birim ağırlığı  $1450\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$  arasındadır ancak çoğunlukla birim ağırlık  $1600\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$  arasında kalmaktadır. Hafif betonları birim ağırlıklarına göre üç ayrı gruba ayırmak mümkündür. Bunlar;

- Yalıtım betonları:  $300 \text{ kg/m}^3 < \text{Birim Ağırlık} < 800 \text{ kg/m}^3$
- Orta mukavemetli hafif betonlar:  $800 \text{ kg/m}^3 < \text{Birim Ağırlık} < 1400 \text{ kg/m}^3$
- Taşıyıcı hafif betonlar:  $1400 \text{ kg/m}^3 < \text{Birim Ağırlık} < 2000 \text{ kg/m}^3$

şeklindedir.

Pomza taşı ile elde edilen hafif betonlar genellikle orta dayanımlı beton sınıfına girmektedir. Genleştirilmiş perlit ve vermikülit hafif agregasıyla üretilen betonlar ise genellikle yalıtım betonlarıdır. Hem orta dayanımlı hem de yalıtım beton olarak adlandırılan betonlar gaz ve köpük betonlardır. Normal agregalı hafif betonlar taşıyıcı sınıfına dahil edilirken kumsuz taşıyıcı hafif agregalı betonlar orta dayanımlı beton sınıfına dahil edilirler. Orta dayanımlı beton sınıfına dahil edilebilecek diğer bir beton ise volkanik cüruf agregalı betonlardır. Diğer taraftan şist ile genleştirilmiş cüruf, genleştirilmiş kil ya da endüstriyel biçimde üretilen sinterlenmiş uçucu kül uygulamada taşıyıcı beton sınıfına dahil edilirler. S2 ve S3 betonları orta dayanımlı beton sınıfına girerler ve yalıtım özellikleri vardır. S4, S5 ve S6 betonları birçok ülkede taşıyıcı beton olarak kabul edilirler (Neville, 1975).

Hafif betonlar başka bir şekilde Tablo 1’de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir. Duvar işlerinde kullanılan betonlar, taşıyıcı hafif beton niteliğinde tasarlanmayan S1 ve S2 sınıfına dahil olan betonlardır. Bu sayede yapının toplam ağırlığında ciddi bir azalma meydana gelir ve depreme karşı dayanım büyük ölçüde artar. Endüstriyel yolla üretilen hafif agregaların ise S4 ve üstü için kullanılması gerekmektedir (Postacıoğlu ve Taşdemir, 1986).

Tablo 1. Hafif betonların sınıflandırılması

| Hafif Beton Sınıfı | Birim Ağırlık ( $\text{kg/m}^3$ ) | Basınç Dayanımı Aralığı (MPa) |
|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| S1                 | < 800                             | 1-7                           |
| S2                 | 800-1200                          | 7-10                          |
| S3                 | 1000-1400                         | 10-14                         |
| S4                 | 1300-1800                         | 14-25                         |
| S5                 | 1500-1800                         | 25-40                         |
| S6                 | 1800-2000                         | 40-70                         |

### **2.1.3. Hafif betonun avantajları**

Bazı avantajlarından dolayı hafif betonların son yıllarda kullanımı oldukça artmıştır. Avantajlarından dolayı son yıllarda hafif beton ile ilgili araştırmalar artmakla beraber ayrı bir alan olarak da karşımıza gelmektedir. Hafif betonun avantajları;

- donmaya karşı dayanıklılık,
- yangına karşı dayanıklılık,
- toplam malzeme ağırlığı azaldığı için beton kalıbındaki basıncın azalması,
- üretim ve yerleştirmenin daha kolay olması,
- birim ağırlıklarının düşük olmasından dolayı yapı yüklerinin azalması,
- yapı yüklerinin azalması dolayısıyla yapı elemanlarının boyutlarının küçülmesi,
- ısı yalıtımlarının yüksek olması,
- yangın riski açısından daha avantajlı olması,
- ağırlığı az olduğundan dolayı yapıya etki eden yükleri azaltma ve ısı iletkenliğinin az olması şeklinde sıralanabilir (Taşdemir, 1982).

### **2.1.4. Hafif betonun dezavantajları**

Hafif betonların normal betonlara göre avantajları olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Hafif betonlar içerisinde boşluk barındırdığı için mukavemetleri düşük betonlardır. Normal betonlara göre aşınmaya karşı daha dayanıksızdırlar. Bunların yanı sıra neme karşı da yalıtıma ihtiyaç duyarlar (Taşdemir, 1982).

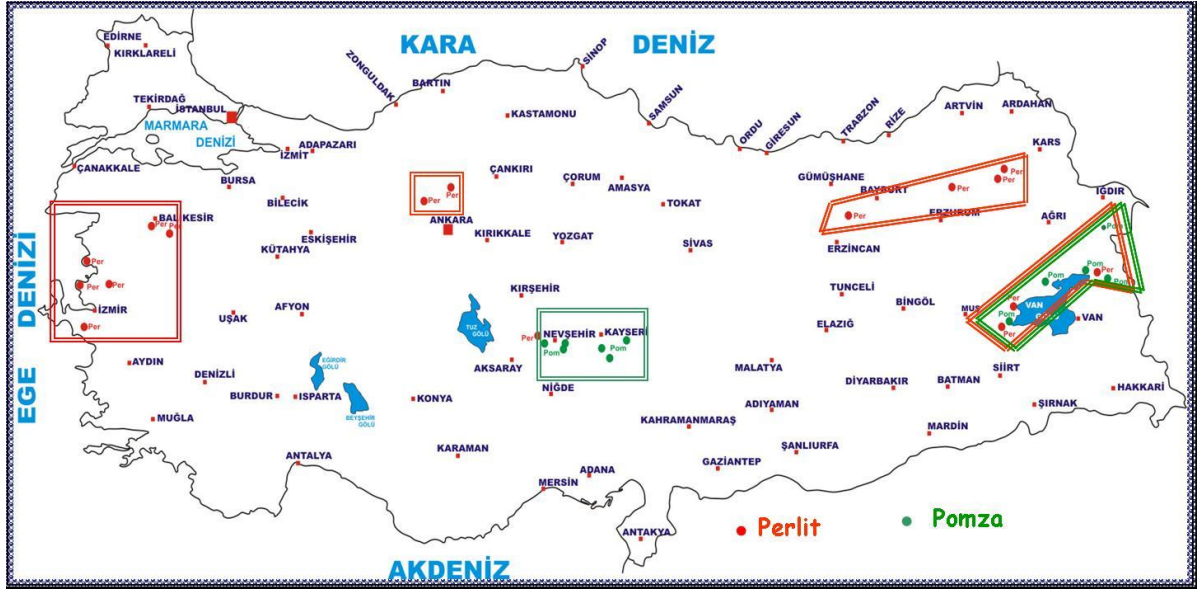
### **2.1.5. Hafif agregalar**

Üretilen beton eğer taşıyıcı olarak kullanılacaksa bu betonun üretiminde hafif agrega kullanımı en yaygın yöntemdir. Hafif agregaların birim hacim ağırlıkları düşüktür ve yüksek boşluk oranına sahiptirler. Bu sebeplerden ötürü daha az ısı iletimine, daha yüksek su emme potansiyeline ve daha düşük dayanıma sahiptirler. Hafif betonlarda kullanılan hafif agregalar beş grupta toplanabilir:

- Şist, arduvaz ve genleştirilmiş kil gibi doğal malzemelerden elde edilen agregalar.
- Volkanik tüf, volkanik c r f ve pomza taşı gibi doğal ve hafif agregalar.
- Kızdırılmış  cucu k l ve genleştirilmiş c r f gibi işlenmiş endüstriyel atıklardan elde edilen agregalar.
- Ağaç parçacıkları ve hububat tanecikleri gibi organik hafif agregalar (Rilem, 1978).

## 2.2. Perlit

İnşaat, tarım ve sanayi sektöründe kullanılan perlit, doğal olarak oluşan volkanik camsı bir kayaa türüdür.  ğ t lerek ya da agrega boyutunda parçalanarak toz haline getirilen perlit, hafif agrega olarak kullanılır. Yangına dayanımı ve yalıtımı yüksek bir malzeme olduğu için yapılarda çeşitli alanlarda tercih edilmektedir. Isı ve ses yalıtımı yüksek olan perlit, çift katmanlı dış duvarlarda, gevşek dolgu olarak döşemelerde, zemin kat ve çatı döşemelerinde kullanılır. Bunların yanı sıra sıva agregası olarak tavan sıvasında ve dış duvarlarda kullanılırken blok şeklinde ise duvar gövdesi olarak kullanılır. Perlit, duvar elemanı olarak kullanıldığında alan kazandırması, yapıya verdiği yük miktarını azaltması ve yakıt tasarrufu sağlaması açısından maliyeti düşüren bir malzemedir (Ayberk, 1995). Perlit, maden olarak çıkarılır ve ani yüksek ısıya maruz bırakılarak içeriğindeki su buharlaştırılır. Dünyadaki en büyük perlit rezervine sahip olan  lke Türkiye'dir. Sonrasında Yunanistan ve Japonya gelir. Perlit üretimine ülkemizde 1961 yılında başlanmış sonraki yıllarda da bu üretim artarak devam etmiştir. Farklı renk ve yapılara sahip perlit kayaaları mevcuttur. Gri renkte olan ham perlit genleştiği zaman tamamen beyazlaşmaktadır. Perlitin en önemli özelliği bileşeninde barındırdığı %2,5 oranındaki sudur ve bu su perlitin kararlılığını sağlamaktadır. 700-1200 C arasında ani sıcaklığa maruz bırakılan perlit içeriğindeki suyun buharlaşması ile genleşerek camsı tanelerden oluşan köpük agregasına dönüşür. Bu şekilde oluşan perlite genleşmiş perlit adı verilir (ok vd., 2003). Türkiye'de bulunan pomza ve perlit yataklarına ilişkin harita şekil 1'de verilmiştir. Erzincan ili maden zenginliği bakımından Türkiye'de önemli bir yere sahiptir. Perlit madenide Erzincan'da yoğun olarak bulunan bir madendir. Ülkenin ihracatında da önemli bir rol oynayan perlit madeni Erzincan'da özellikle Mollaköy'de yoğun olarak bulunmaktadır.



Şekil 1. Türkiye’de bulunan perlit-pomza yatakları (MTA, t.y.)

Erzincan-Mollaköy ham perlitü üzerinde Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğünün (MTA) gerçekleştirmiş olduğu analizler ile dünya genelinde elde edilen analiz verilerine Tablo 2’de verilmiştir (Ulus, 2007). Tablodan görüldüğü üzere Erzincan Mollaköy’den çıkarılan perlit ile dünya genelinde elde edilen analiz değerleri birbirlerine yakındır.

Tablo 2. Erzincan perlitü ve dünyadaki perlitin analiz sonuçları (Ulus, 2007)

| Bileşenler                     | MTA1 (%) | MTA2 (%) | MTA3 (%) | MTA4 (%) | Genel Perlit |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 74,6     | 73,71    | 74,8     | 73,86    | 71-75        |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,027    | 0,036    | 0,032    | 0,037    | 0,01         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,2     | 12,98    | 12,91    | 12,91    | 12,5-16      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,48     | 0,51     | 0,49     | 0,52     | 0,3-0,5      |
| FeO                            | 0,13     | 0,55     | 0,48     | 0,16     | 0,33         |
| MnO                            | 0,075    | 0,071    | 0,07     | 0,068    | 0,071        |
| MgO                            | 0,018    | 0,04     | 0,02     | 0,032    | 0,03-0,02    |
| CaO                            | 0,75     | 0,77     | 0,76     | 0,76     | 0,4-0,82     |
| Na <sub>2</sub> O              | 3,1      | 3,3      | 3,22     | 3,11     | 3,2          |
| K <sub>2</sub> O               | 3,14     | 3,18     | 3,2      | 4,2      | 4-5          |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,004    | 0,005    | 0,003    | 0,002    | 0,00375      |
| Kızdırma kaybı (%)             | 2,37     | 2,83     | 2,85     | 2,23     | 2,502        |



### 2.2.1. Perlitin fiziksel özellikleri

Perlit ait bazı fiziksel özellikler aşağıda verilmektedir;

- Tanım: Konkoidal, sferidal kırıklı camsı volkanik kayacık
- Renk: Beyaz, gri ve tonları, genişince tümüyle beyaz
- Özgöl ağırlık: 2200-2400 kg/m<sup>3</sup>
- Gevşek yoğunluk: 32-400 kg/m<sup>3</sup>
- Sertlik (Mohs): 5-6
- Yumuşama noktası: 871-1093°C
- Erime noktası: 1260-1343°C
- Özgöl ısı: 0,2 Cal/g°C
- Refraktif indeks: 1,5
- Isı iletkenliği: 0,04 W/mK
- Serbest nem (%): Maks. 0,5
- pH: 6,5-8
- Asitte erime özelliği: Konsantre sıcak alkali ve hidroklorik asitte erir.
- Konsantre mineral asitlerinde az erir (%2)
- Seyreltik mineral veya konsantre asitlerde çok az erir (%0,1) (DPT, 2001).

### 2.2.2. Perlitin kullanıldığı alanlar

Perlit, yapıda kullanımının yanı sıra tarım, kimya ve boya sanayisi başta olmak üzere yüzden fazla alanda ve farklı amaçlarla kullanılabilmektedir. Perlitin başlıca kullanım alanları;

- Beton ve yan taşıyıcı elemanlarda agrega yerine,
- Yalıtım özelliğinden faydalanmak için dolgu betonu olarak,
- Perlit içeren beton hafifliği ve yalıtımının yüksek olmasından ötürü prefabrik elemanları bölme amacı ile,
- Akustik pano yapımında,
- Blok tuğla yapımında ve bölme duvar elemanı olarak alçı ile birlikte,
- Sıvama malzemesi olarak akustik sıva yapımında ve hazır sıva yapımında,
- Yapılarda ısı yalıtımı sağlamak için iç ve dış sıvalarda tek başına ya da başka agregalarla karıştırılarak,
- Hazır izolasyon plaklarının yapımında ısı ve neme karşı koruma sağlaması için bazı katkı maddeleri ile birlikte,

- Perlit agregası ile hasır elik ve kuvarz kumu kullanılarak beton plakların yapımında,

eklinde sıralanabilir (Gökhan ve Baytın, 1978). Perlitle ilgili birçok çalışma yapılmakta ve bu çalışmaların sonucunda her geçen gün perlitin kullanım alanı ve miktarları artış göstermektedir.

### **2.2.3. Perlit agregalı betonların birim hacim ağırlıkları**

Hafif agregalar içinde fazlaca boşluk barındıran malzemelerdir. Bu nedenle yoğunlukları da düşüktür. Dolayısıyla bu özelliklere sahip hafif agregaların basınç dayanımları da genellikle düşük olmaktadır. Normal betonların yoğunlukları genellikle  $2400 \text{ kg/m}^3$  iken hafif betonlarda bu değer  $1000\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$  civarına kadar düşer (Pekdemir, 2011). İnce agregası kullanılmadan sadece hafif iri agregası kullanılarak üretilen hafif betonlarda birim hacim ağırlığı  $640 \text{ kg/m}^3$ 'e kadar düşürülebilir (Baradan vd., 2010). Perlit agregaların kuru birim hacim ağırlıklarının  $1000\text{-}1200 \text{ kg/m}^3$  aralığında olması sebebiyle bu malzeme ile üretilen hafif betonların birim ağırlıkları  $1000\text{-}1200 \text{ kg/m}^3$  arasında olabilir.

### **2.2.4. Perlit agregalı betonların mekanik özellikleri**

Betonun birim ağırlığı azaldıkça basınç dayanımı ve elastisite modülü azalır. Hafif betonlarda da geleneksel betonlar gibi zamanla beton dayanımı artar. Isı yalıtımı yüksek olan hafif betonların içerisinde oluşan hidrasyon ısısı rahatça dışarı çıkamaz ve bunun sonucunda betonun iç kısmı dış kısmına nazaran daha erken sertleşir. Bu sertleşme neticesinde betonda çatlaklar oluşabilir. Hafif betonların çekme dayanımları normal agregalı betonlara oranla daha düşüktür ve bunun sonucunda %25 daha az dayanımlı beton üretilmiş olur (Ulus, 2007). Agregası ile beton rijitliği doğru orantılıdır ve agregası miktarı arttıkça betonun rijitliği de artar. Fakat hafif betonlarda durum böyle değildir. Agregası miktarı arttıkça beton rijitliği azalır. Bunun nedeni ise hafif agregasının rijitliğinin normal agregaya göre ve bazen imento matrisine göre daha düşük olmasıdır. Basınç dayanımının hafif beton ile normal betonda aynı olması halinde hafif betonun elastisite modülü normal betonun %50-%75'i oranında olur. Hafif betondan yapılan kirişlerde sehim yapma oranı normal betonlara göre daha yüksektir çünkü hafif betonların elastisite modülü normal betonun %50'si kadardır (Pekdemir, 2011).

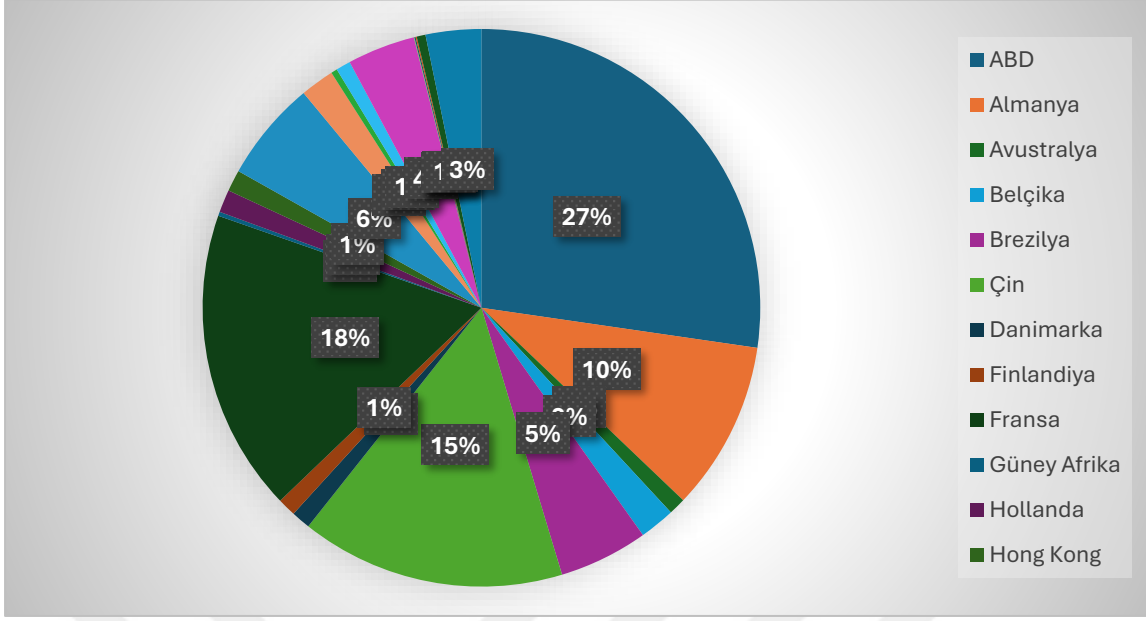
Sıcaklığın farklı olduğu bir alanda, ısıнын sıcak olan alandan daha düşük olduğu alana geçmesine ısı iletimi denir. Bir malzemenin ısıyı iletme yeteneği ise ısı iletkenliği veya termal iletkenlik olarak adlandırılır. Birimi (kcal/mh°C) olarak alınır. Normal betonlardaki ısı yalıtımı hafif betonlar kadar iyi değildir. Hafif betonlarda kullanılan agreganın cinsine göre bu durum değişkenlik gösterebilir ancak hafif agreganın birim ağırlığı düşük olduğu için ısı yalıtımı her zaman normal betona göre daha fazladır (Pekdemir, 2011).

Hafif betonların dayanımlarının normal betonla aynı olması için hafif betonda kullanılan çimento miktarının genellikle fazla olması gerekmektedir. Buna rağmen hafif betonla normal beton arasında sünme farkı yoktur. Bu şartlarda hafif betonda kullanılan çimento miktarı normal betona göre fazla olacaktır. Bu da betonda istenmeyen bir durumdur ancak hafif agrega çimento hamurundaki suyu emer ve su/çimento oranı düşer böylece istenmeyen durum ortadan kalkmış olur. Çimento rötresini etkileyen unsur perlit katılmasıdır ve perlitin artması rötre değerini azaltır (Ulus, 2007). Perlit agregalı betonların yapısı boşluklu olduğu için normal betona kıyasla donma ve çözünmeye karşı daha dayanıklıdır (Polat, 2007).

### **2.3. Geri Dönüşüm**

Dünya nüfusunun hızla artmasından kaynaklı gelişen kentleşme ve sanayinin bir sonucu olarak üretim miktarları arttığı gibi atık miktarları da artış göstermektedir. Atıklar geri dönüştürülmediğinde dünyamıza zarar vermekte ve tüm canlılar bu durumdan olumsuz etkilenebilmektedir. Ayrıca atıkların geri kazanılarak kullanılmaması doğal kaynakları da ciddi oranda azaltmaktadır. Atıkların geri dönüştürülmesi özellikle gelişmiş ülkelerde bir devlet politikası haline gelmiştir. Gelişmekte olan ülkelerde ise bazı önlemler alınmaya başlanmış ve uzun vadede daha etkin bir geri dönüşüm planları yapılmaya başlanmıştır.

Geri dönüşüme inşaat çerçevesinden bakıldığında en önemli geri dönüşüm malzemesini inşaat yapım ve yıkım atıkları oluşturmaktadır. Özellikle ömrünü tamamlamış ve çoğunluğu beton kaynaklı yapıların yıkılması ile birlikte çok büyük miktarlarda yıkım atıkları ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların ortaya çıkması çevreye zarar vermesi ile birlikte ayrıca geri dönüşüm programlarına sokulmaması durumunda ise hammadde kaynaklı sıkıntıların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Son verilere göre elde edilen inşaat yıkıntı atığı Şekil 2'deki grafikte verilmektedir (Tam vd., 2018). Şekil 2 incelendiğinde, en büyük ölçekli inşa ve yıkım atıklarının ABD, Fransa ve Çin'de olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Ülkelerin ürettikleri yıkım atıkları (Tam vd., 2018)

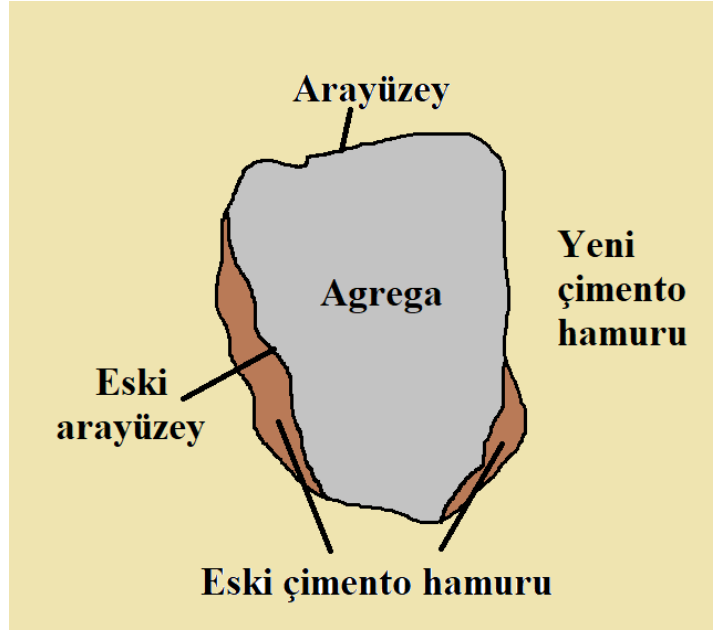
İnşaat yapım ve yıkım atıkları içeriğinde beton, seramik, tuğla, ahşap, çelik, asfalt vb. içeren malzemelerdir. Bu atıklar konut, yol, altyapı gibi yapıların inşası veya yıkımı esnasında ortaya çıkan atıklardır (Cardoza and Colorado, 2023).

İnşaat yapım ve yıkım atıklarının da tüm atık malzemelerde uygulandığı gibi kaynağı koruma, atık azaltma, tekrar kullanma, geri dönüşüm ve sonuç olarak bertarafı şeklinde yönetilmesi gerekmektedir. Yeniden kullanılabilir nitelikte olan bazı malzemeler yeniden kullanılarak hem doğal kaynakların tüketilmesi hem de atık miktarının azaltılmasını sağlamaktadır. Kapılar, pencereler, elektrik malzemeleri gibi bazı malzemeler yeniden kullanılan malzemelere verilebilecek örneklerden bazılarıdır. Diğer taraftan beton, çelik donatı, briket, alçı taşı, tahta çerçeveler, asfalt döşeme malzemesi vb. geri dönüşüm malzemelerine verilebilecek birkaç örnektir. Bunlardan asfalt döşeme malzemesi yeni asfaltta agrega olarak, alçı taşı yeni alçı taşı yapımında ve absorbent ürünlerinde, briket parklarda ve spor sahalarında yürüyüş yolu malzemesi olarak kullanılabilir. İnşaat yapım ve yıkım atıklarından en çok araştırılan ve çok miktarda ortaya çıkan atık beton birçok uygulamada kullanılmaktadır. Atık beton; altyapı malzemesi olarak, dolgu malzemesi olarak, kaldırım yapımında, drenaj sistemlerinde kullanılabilir (Ölmez ve Yıldız, 2008). Son yıllarda atık betonun agrega haline getirilip yeni beton üretiminde kullanılması oldukça dikkat çekici bir hale gelmiş, araştırmaların birçoğunda yer almıştır.

### 2.3.1. Geri kazanılmış agregası (GKA)

Yeryüzünde beton kullanımının artmasına paralel olarak beton üretiminde kullanılan çimento ve agregası kullanımı da artmaktadır. Beton üretiminde bu bileşenlerin kullanımının azaltması için bazı önlemler alınmakla birlikte artan dünya nüfusu ile hammaddelerimiz ciddi miktarlarda azalmakta ve sonuç olarak çevremiz tahrip olmaktadır. Mühendislik açısından, özellikle beton yıkıntı atıklarını agregası boyutlarında parçalayarak geri kazanılmış agregası (GKA) haline getirip yeni üretilecek betondaki doğal agregası yerine belirli oranlarda kullanmak, umut verici ve ilgi çekici hale gelmiş ve araştırmacıların ilgi odağı olmuştur (Tam vd., 2023).

GKA, doğal agregası ile karşılaştırıldığında genellikle daha zayıf özellikler göstermektedir. Atık beton, GKA üretiminde kullanılmak üzere parçalandığında oluşan agregalar üzerinde bulunan yapışmış haldeki eski çimento hamuru tabakasının varlığı bu zayıflığa neden olmaktadır. Böylece GKA'nın, yapay olarak kaplanmış bir granüler malzeme haline geldiği düşünülmektedir. GKA'da bulunan yapışmış çimento harcı gözenekli, düşük sertliğe sahip ve mikro çatlaklı bir yapıdan oluşmaktadır. Bu da GKA'nın kullanıldığı betonun normal betona kıyasla nispeten daha düşük mukavemetli, yüksek su emilimine sahip ve düşük yoğunlukta bir beton olmasına neden olmaktadır (Katz, 2003). Şekil 3'te geri kazanılmış agregaya ait şematik görsel sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi GKA'nın yapısında bulunan yapışmış eski çimento hamuru varlığı ve eski ve yeni ara yüzey geçiş bölgelerinden dolayı GKA'nın özelliklerinde normal agregaya göre olumsuzluklar meydana gelmektedir.



Şekil 3. Geri kazanılmış agregaya ait şematik gösterim

#### 2.4. Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisi

Beton diğer yapı malzemeleri ile kıyaslandığında yangına karşı oldukça dirençli bir yapı malzemesidir. Betonun yangına maruz kalma derecesine ve süresine göre beton özelliklerinde ciddi düzeylerde bozulmalar olabilir.

300°C sıcaklıktan sonra betonun bileşiminde bulunan CSH yapısındaki su ayrışmaya başlar. Betonun mukavim yapısından önemli derecede sorumlu olan CSH yapısının parçalanması ile beton hasar almaya başlar. Sıcaklık 500°C'ye çıktığında çimento hamurundaki  $\text{Ca(OH)}_2$ 'nin  $\text{CaO}$ 'ya dönüşümü olayı başlar. Bu durum betonun büzülmesine yol açar. Hem CSH yapısının bozulması hem de meydana gelen büzülme sonucunda betonun dayanımı ciddi oranda düşer. Daha yüksek sıcaklıklarda sertleşmiş çimento hamurunun bozulmasına ek olarak agregalarda da fiziksel ve kimyasal bozulmalar başlar. Bu durum betonun mukavemetini daha da çok düşürür ve beton artık görevini yapamaz duruma gelir (Baradan vd., 2010). Yüksek sıcaklık etkisi betonun dayanım gibi özelliklerini ciddi oranda azaltmak birlikte, durabilite özelliklerinde de önemli ölçüde bozulmalar meydana getirmektedir.

Özel üretimlerden ötürü fırın bacalarında oluşan sıcaklıklar, yangınlar ve hava alanı pistlerinde sürtünmeden dolayı oluşan ısınmalar ve nükleer reaktörler yapı ve malzemede hasara yol açan yüksek sıcaklık kaynakları olarak gösterilebilir.

## 2.5. Kaynak Özetleri

Bu bölümde çalışmamızda üretilen betonlara yakın özellikler taşıyan betonlar üzerinde gerçekleştirilmiş çalışmalar ile ilgili kaynak özetleri sunulmuştur.

Ulus (2007), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ham perlit agregası kullanılarak yüksek dayanımlı hafif beton üretimi üzerine kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Çalışmanın temel amacı, geleneksel ağır betonlara kıyasla daha düşük yoğunlukta ( $1830-1915 \text{ kg/m}^3$ ) ve yüksek mekanik performansa sahip hafif betonların üretim potansiyelini ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, farklı su/çimento oranları ( $0,30 - 0,50$  aralığında) ve değişen bağlayıcı dozajları ( $450 - 650 \text{ kg/m}^3$ ) kullanılarak çeşitli beton karışımları hazırlanmıştır. Ayrıca, karışımlara %5 oranında çelik lif ilave edilerek lif takviyesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, çelik lif katkısının özellikle çekme dayanımı üzerinde önemli bir artış sağladığını göstermektedir. Nitekim, %5 lif içeren karışımlarda çekme dayanımında %70'e varan artış gözlemlenmiş; buna karşın, basınç dayanımı üzerinde belirgin bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Çalışmada dikkat çeken bir diğer önemli bulgu ise en yüksek basınç dayanımının,  $660 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı dozajı ve süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak elde edilen numunede, 90 günlük kür sonunda 110 MPa seviyesine ulaştığıdır. Bu sonuç, hafif agregalı betonlarda dahi yüksek basınç dayanımının mümkün olabileceğini göstermektedir. Araştırma genelinde, su/çimento oranı ile bağlayıcı miktarının betonun mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğu ortaya konmuştur. Bununla birlikte, geleneksel mineral katkıların kullanımının zorunlu olmadığı; doğru karışım oranları, uygun katkı maddeleri ve lif takviyesi ile yüksek dayanımlı, hafif beton üretiminin gerçekleştirilebileceği vurgulanmıştır. Sonuç olarak Ulus'un çalışması, ham perlit agregasının yalnızca hafiflik sağlamakla kalmayıp, uygun tasarımla yüksek performanslı beton üretiminde de etkili bir malzeme olabileceğini göstermektedir. Bu da söz konusu betonların, taşıyıcı sistemler dahil olmak üzere çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılabilirliğini destekleyen önemli bir bulgudur.

Seçer (2008), tarafından yapılan çalışmada, polipropilen (PP) lifler, hava sürükleyici katkıları (HS) ve genleştirilmiş perlit agregasının (GPA) betonun yüksek sıcaklık dayanımı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu amaçla, farklı PP lif uzunlukları, değişen oranlarda HS katkısı ve GPA ikamesi kullanılarak dokuz farklı beton karışım grubu hazırlanmıştır. Elde edilen numuneler,  $23^\circ\text{C}$  ile  $700^\circ\text{C}$  arasındaki sıcaklıklara maruz

bırakılarak termal etkilere karşı performansları test edilmiştir. Araştırma bulgularına göre, yüksek sıcaklıkların beton dayanımı üzerinde önemli derecede olumsuz etkisi olduğu, sıcaklık arttıkça mekanik özelliklerde ciddi azalmalar gözlemlendiği saptanmıştır. Özellikle 700°C'ye ulaşıldığında, beton dayanımında %82'ye varan oranda bir azalma meydana geldiği raporlanmıştır. Bununla birlikte, 20 mm uzunluğundaki PP lif içeren karışımların, 300°C'ye kadar olan sıcaklıklarda diğer gruplara kıyasla daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, HS ve GPA oranlarının artırılması ile betonun yüksek sıcaklık sonrası dayanım kayıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, bu katkıların betonun mikro yapısında olumlu etkiler yaratarak termal bozulmayı sınırladığını göstermektedir. Özellikle, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) ile sarılan beton numunelerinde dikkat çekici sonuçlar elde edilmiştir. Bu grupta, özellikle 6 mm uzunluğundaki PP lif içeren numuneler, yangın sonrası mekanik dayanımda %233'e kadar varan artışlar göstermiştir. Bu durum hem PP liflerin hem de GFRP sarımının betonun yangın sonrası performansını artırmada etkili bir kombinasyon sunduğunu ortaya koymaktadır.

Gökçe (2010), ham ve genleştirilmiş perlit agregalarının hafif beton üretimindeki performansını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada 5 farklı boyutta ham perlit ve 3 farklı genleştirilmiş perlit kullanılarak toplam 24 farklı karışım hazırlanmış, %0-15 silis dumanı ikamesi ve süper akışkanlaştırıcı ile yüksek dayanımlı hafif betonlar üretilmiştir. 117 adet 100 mm küp numunede yapılan testlerde: Taze beton işlenebilirliği (çökme değerleri), birim hacim ağırlık, su emme oranları, basınç dayanımı özellikleri ölçülmüştür. Farklı agrega içeriklerinin betonların basınç dayanımı üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca silis dumanı ikamesinin ve kür süresinin artmasının basınç dayanımı pozitif olarak etkilediğini belirtmişlerdir.

Eser (2014), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, doğal perlit agregası ve perlit tozu kullanılarak üretilen yüksek performanslı hafif betonların (yüksek dayanımlı hafif beton – HSLWC ve kendiliğinden yerleşen hafif beton – SCLWC) mekanik ve dayanıklılık özellikleri araştırılmış ve bu özellikler, yüksek dayanımlı normal betonlar (HSNWC) ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, perlit esaslı hafif betonların performans düzeylerini belirleyerek, bu malzemelerin geleneksel betonlara alternatif olup olamayacağını ortaya koymaktır. Araştırma kapsamında hazırlanan üç farklı beton türü üzerinde çeşitli deneysel testler uygulanmıştır. Bu testler arasında basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü ve dayanıklılığa yönelik uzun vadeli özellikler yer almıştır. Elde edilen veriler, perlit



içeren hafif betonların yalnızca düşük yoğunluk sağlamadığını, aynı zamanda yüksek mukavemet değerlerine de ulaşabildiğini göstermektedir. Özellikle perlit agregası ve perlit tozu içeren beton karışımlarının 50 MPa seviyesine kadar basınç dayanımı elde ettiği ve bu değerlerin birçok normal beton karışımı ile karşılaştırılabilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Hatta bazı performans kriterlerinde, geleneksel yüksek dayanımlı normal betonlara kıyasla daha üstün sonuçlar elde edilmiştir. Bu da perlit katkılı hafif betonların, taşıyıcı yapı elemanlarında da güvenle kullanılabilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, Eser'in çalışması, doğal perlit içeriğine sahip hafif betonların, özellikle yüksek dayanım ve dayanıklılık gerektiren yapısal uygulamalar için ekonomik, hafif ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, perlit esaslı betonların, modern yapı teknolojilerinde geleneksel malzemelerin yerini alabilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Engin (2018), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geliştirilmiş perlit agregası kullanılarak ısı yalıtım özelliği yüksek, ultra hafif betonların geliştirilmesi amaçlanmış ve özellikle farklı agregata boyutlarının betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu doğrultuda, yoğunluğu yalnızca 150 kg/m<sup>3</sup> olan özel beton karışımları hazırlanmış ve çeşitli deneysel testler uygulanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, agregata boyutunun artmasıyla birlikte betonun birim hacim ağırlığında, basınç dayanımında ve ısı iletkenlik katsayısında belirgin bir azalma meydana geldiğini ortaya koymuştur. Örneğin, betonun basınç dayanımının yalnızca 0,13 MPa düzeyinde olduğu, buna karşın ısı iletkenlik katsayısının oldukça düşük bir değer olan 0,039 W/mK seviyesine ulaştığı belirlenmiştir. Bu özellik, betonun ısı yalıtımı açısından oldukça avantajlı bir yapı malzemesi olduğunu göstermektedir. Öte yandan, agregata boyutundaki artışa paralel olarak su emme oranlarında da önemli bir artış gözlemlenmiştir; en yüksek değer %242,3 gibi oldukça yüksek bir seviyeye ulaştığı rapor edilmiştir. Ayrıca, donma-çözülme döngülerine karşı dayanımda da iyileşmeler olduğu belirlenmiştir. Bu durum, geliştirilmiş perlit agregası ile üretilen ultra hafif betonların özellikle dış ortam koşullarına maruz kalabilecek yapılarda da kullanılabilirliğini göstermektedir. Çalışmada ayrıca katkı malzemelerinin etkileri de değerlendirilmiştir. Özellikle 4,5 kg/m<sup>3</sup> oranında hava sürükleyici katkı maddesi kullanımının betonun performansı açısından optimum sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bunun yanında, fiber lif katkısının %0,01 oranının üzerine çıkması durumunda betonun kıvamında bozulmalar meydana geldiği ve bu durumun çökmeye yol açtığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, Engin'in çalışması, geliştirilmiş perlit agregasının uygun katkılarla birleştirilerek oldukça düşük

yoğunlukta, yüksek yalıtım özelliğine sahip ve belirli çevresel koşullara karşı dayanıklı betonlar üretilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu tür betonlar, özellikle ısı yalıtımı gerektiren yapı elemanlarında ve sürdürülebilir yapı tasarımlarında önemli bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

Sayın (2022), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hafif beton atıklarının geri dönüşüm malzemesi olarak yeniden değerlendirilmesi ve beton teknolojisinde kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, normal beton (NB), hafif beton (HB) ve kompoze hafif beton (KHB) olmak üzere üç farklı kontrol serisi tasarlanmış ve bu serilere ek olarak üç farklı türde hafif geri dönüşüm agregası kullanılarak çeşitli beton karışımları üretilmiştir.

Hazırlanan beton numuneleri, 7, 14 ve 28 günlük su kürleri sonrasında laboratuvar ortamında çeşitli mekanik ve fiziksel testlere tabi tutulmuştur. Bu testler arasında ultrasonik ses geçirgenlik ölçümleri, basınç dayanımı testleri ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yer almıştır. Elde edilen veriler ışığında, özellikle kompoze beton karışımlarının geri dönüşüm agregaları ile birlikte kullanımının, betonun dayanım özelliklerini olumlu yönde etkileyebildiği gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçları, hafif beton atıklarının sadece çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda mekanik performans bakımından da beton üretiminde etkin ve verimli bir şekilde yeniden kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Bu durum, hem inşaat sektöründeki atıkların azaltılmasına hem de kaynak kullanımının daha verimli hale getirilmesine katkı sağlamaktadır. Araştırma, geri dönüşüm malzemelerinin beton üretiminde alternatif bir kaynak olarak kullanılabilirliğini destekleyen önemli bulgular sunmaktadır.

Khair Allah (2023), tarafından yürütülen çalışmada, geri dönüştürülmüş agrega (GDA) ve pomza kumu kullanılarak üretilen hafif betonların yüksek sıcaklık altında gösterdiği davranışlar araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılarak hem çevresel sürdürülebilirliği destekleyen hem de yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı beton üretiminin mümkün olup olmadığını ortaya koymaktır. Bu kapsamda, farklı oranlarda (%25, %50, %75 ve %100) GDA içeren beton karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, 100°C ile 750°C arasında değişen sıcaklıklarda ısıtılma tabi tutulmuştur. Isıl işlem sonrası numuneler üzerinde hem basınç dayanımı testleri hem de kılcal su emme deneyleri gerçekleştirilerek termal etkilerin betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. DeneySEL sonuçlar, GDA kullanımının yüksek sıcaklık sonrası betonun basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur. Özellikle

daha yüksek GDA oranı içeren karışımların, termal bozulmaya karşı daha dirençli olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kılcal su emme değerleri incelendiğinde, GDA katkılı karışımların gözenek yapısında meydana gelen değişimlere rağmen kabul edilebilir seviyede performans sergilediği belirlenmiştir. Genel olarak, çalışma bulguları atık beton agregasının sadece geri dönüşüm açısından değil, aynı zamanda yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda da kullanılabilecek nitelikte olduğunu göstermektedir. Bu da GDA'nın sürdürülebilir beton üretimi için çevre dostu ve teknik açıdan uygun bir alternatif malzeme olduğunu ortaya koymaktadır.

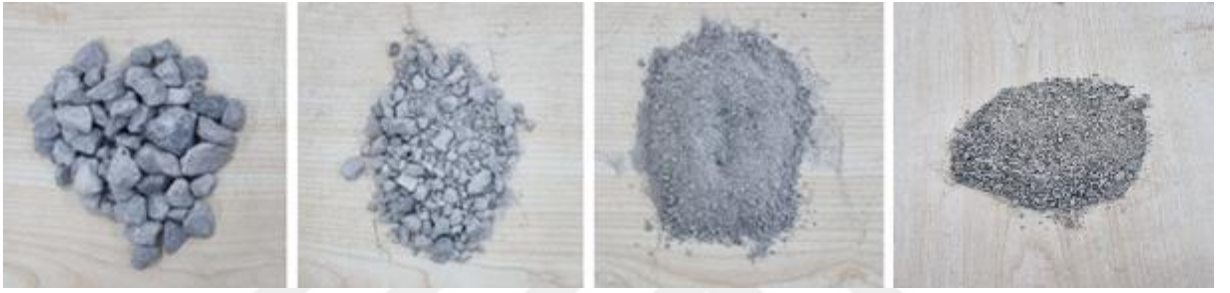
Topal (2023), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, doğal perlit agregası (NPA) ve doğal perlit tozu (NPP) kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen hafif betonun (SCLWC) mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, doğal perlit tozunun beton karışımına dahil edilmesiyle betonun kendi ağırlığını azaltmak ve aynı zamanda maliyet etkinliği yüksek, ekonomik bir hafif beton (LWC) üretmektir. Bu doğrultuda, içeriğinde sırasıyla %0, %25 ve %50 oranlarında doğal perlit tozu (NPP) bulunan üç farklı beton karışımı geliştirilmiş ve bu karışımlar sırasıyla M0, M25 ve M50 olarak adlandırılmıştır. Tüm karışımlar,  $400 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı madde içerecek şekilde tasarlanmış, su/bağlayıcı oranı ise 0,38 olarak sabit tutulmuştur. Böylece hem kıvam hem de dayanım açısından karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Beton karışımlarından elde edilen takviye edilmiş beton kirişler, mekanik performanslarını değerlendirmek amacıyla dört noktalı eğilme testi ile test edilmiştir. Bu test sayesinde, kirişlerin eğilme altındaki davranışları, çatlak oluşumu ve yük taşıma kapasiteleri detaylı şekilde gözlemlenmiştir. Deneysel veriler, hem doğal perlit agregasının (NPA) hem de perlit tozunun (NPP), SCLWC üretiminde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, 28 günlük kür sonunda üretilen SCLWC karışımlarının basınç dayanımı değerlerinin 34 MPa ile 55 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, doğal perlit esaslı malzemelerin sadece hafiflik sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda yeterli düzeyde yapısal dayanım sunabildiğini göstermektedir. Eğilme testine tabi tutulan takviye edilmiş beton kirişlerde ise, düzgün biçimde dağılan çatlak desenlerinin oluştuğu ve kirişlerin başarılı bir şekilde eğilme yüklerini taşıdığı gözlemlenmiştir. Bu da perlit içeren SCLWC'nin yapısal elemanlarda güvenle kullanılabileceğini desteklemektedir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

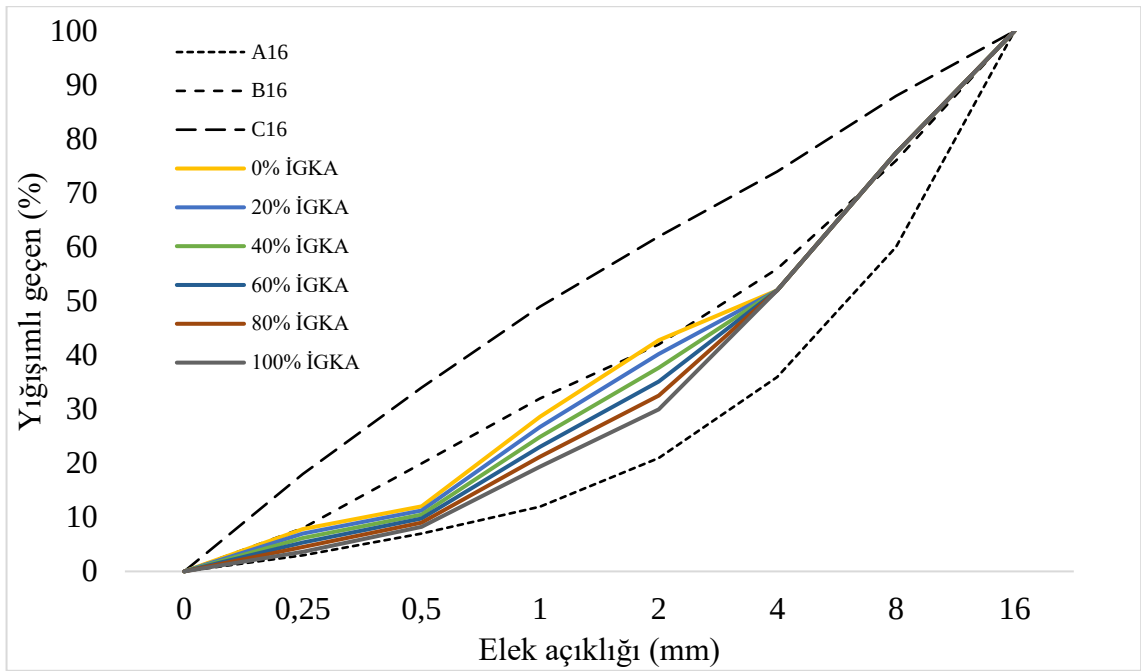
##### 3.1.1. Agregalar

Çalışma kapsamında hafif beton üretimlerinde agrega olarak ham perlit agregası kullanılmıştır. Ham perlit agregası ince (0-4 mm), orta (4-12 mm) ve iri (12-15 mm) olmak üzere 3 farklı tane boyutunda temin edilmiştir. Geri kazanılmış ince agrega (GKİA), yıkıntı beton atıklarından elde edilmiş olup dane boyutu 0 – 4 mm'dir. Hafif beton üretiminde kullanılan agregalara ilişkin resimler Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Soldan sağa iri, orta, ince ham perlit agregaları ve GKİA

GKİA içermeyen betonda (%0) %50 ince ham perlit agregası, %25 orta ham perlit agregası ve %25 iri ham perlit agregası kullanıldığında üretilen betonların granülometrisinin TS 802 (1985) standartlarında  $D_{max} = 16$  mm için uygun granülometri aralığına düştüğü görülmüştür. İnce ham perlit agregası ve GKİA agregasının granülometri eğrisi birbirinin aynısı olmasa bile birbirlerine oldukça yakındır. Üretilen tüm betonların granülometri eğrileri Şekil 5'te verilmiştir.



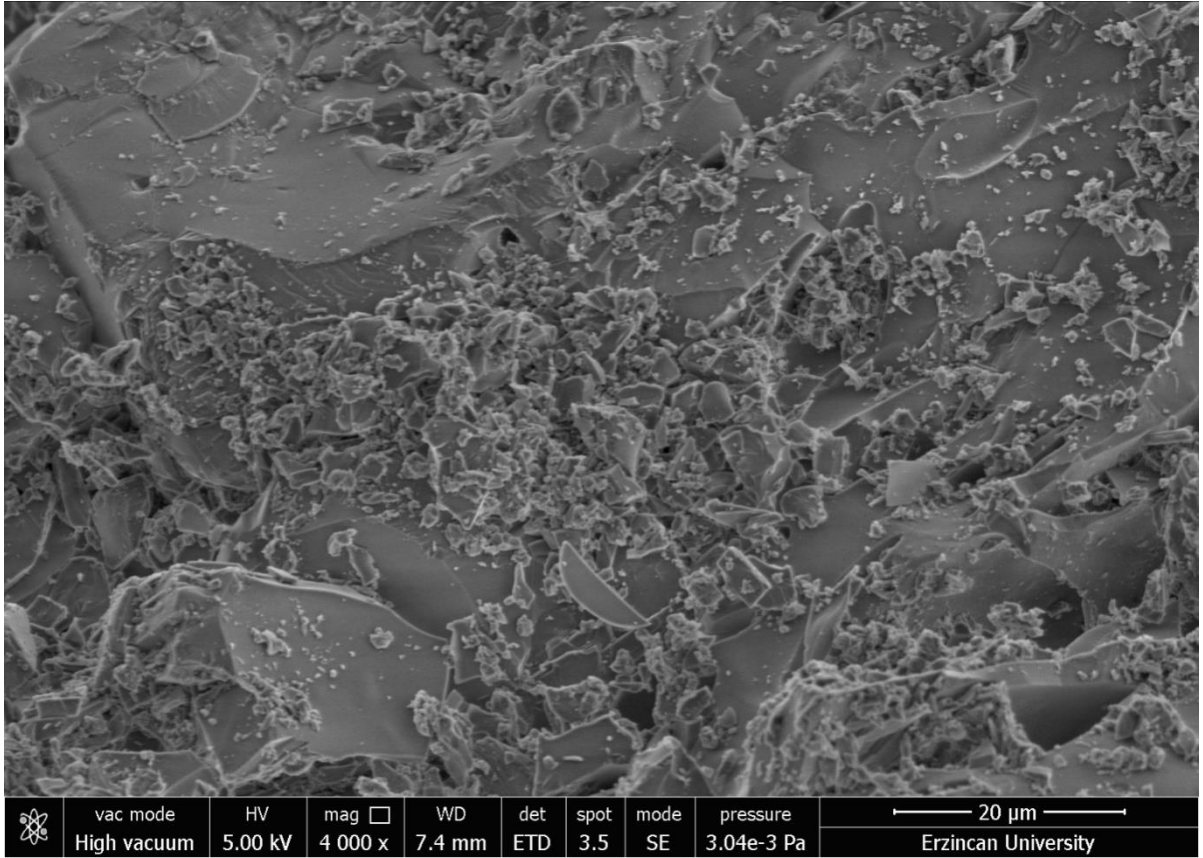
Şekil 5. Üretilen betonların agregalarına ait granülometri eğrileri

Beton üretimlerinde kullanılan ham perlit agregaları ve GKİA için su emme ve özgül ağırlık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda hesaplanan doygun yüzey kuru (DYK) özgül ağırlıklar ve 40 dakikalık su emme (%) değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

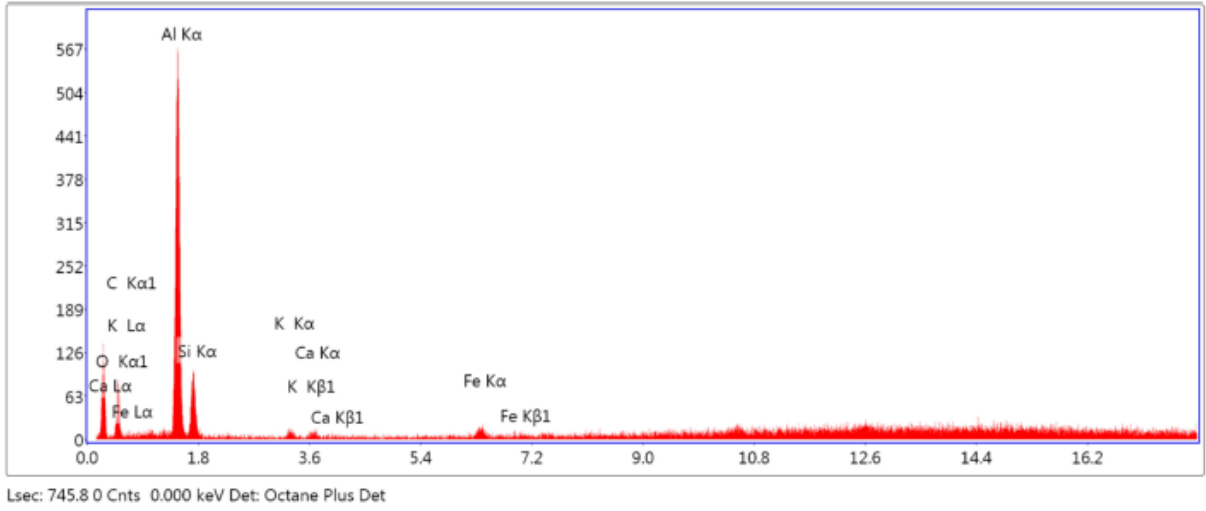
Tablo 3. Agregalara ilişkin DYK özgül ağırlıklar ve su emme değerleri

| Agrega Cinsi              | Özgül Ağırlık | Su emme (%) |
|---------------------------|---------------|-------------|
| Ham perlit- İri agregası  | 1,88          | 4,86        |
| Ham perlit- Orta agregası | 1,97          | 4,65        |
| Ham perlit- İnce agregası | 2,01          | 4,06        |
| GKİA                      | 2,35          | 5,34        |

Çalışmada kullanılan ham perlit agregasına ait SEM görüntüsü Şekil 6'da SEM görüntüsü üzerinden elde edilen EDX analizine ilişkin grafik ise Şekil 7'de sunulmuştur. Şekil 7'den görüldüğü üzere çalışmada kullanılan ham perlit agregası yüksek Al içeriği ile ön plana çıkmaktadır.



Şekil 6. Ham perlit agregasından alınan SEM görüntüsü



Şekil 7. Çalışmada kullanılan ham perlit agregasına ait EDX analizi

### 3.1.2. Çimento

Çalışmada tüm üretimlerde TS EN 197-1 (2012) standardında tanımlanan CEM I 42,5 R tip bir çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentoya ait özellikler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Beton üretimlerinde kullanılan çimentonun özellikleri

| <b>Kimyasal birleşim</b>              | <b>%</b> |
|---------------------------------------|----------|
| SiO <sub>2</sub>                      | 19,58    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 4,94     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 3,18     |
| CaO                                   | 61,45    |
| MgO                                   | 2,09     |
| SO <sub>3</sub>                       | 2,95     |
| Na <sub>2</sub> O                     | 0,39     |
| K <sub>2</sub> O                      | 0,95     |
| Cl <sup>-</sup>                       | 0,01     |
| Kızdırma kaybı                        | 3,39     |
| <b>Fiziksel ve mekanik özellikler</b> |          |
| 32 mikron elek üstünde kalan (%)      | 7.98     |
| Özgül ağırlık                         | 3.10     |
| Özgül yüzey(cm <sup>2</sup> /g)       | 3339     |
| Priz başlangıcı                       | 2sa-40dk |
| Priz bitişi                           | 3sa-5dk  |
| Hacim genleşmesi                      | 1        |
| <b>Basınç dayanımı (MPa)</b>          |          |
| 7 gün                                 | 42,7     |
| 28 gün                                | 51,8     |

### 3.1.3. Su

Tüm beton karışımlarında şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

## 3.2. Beton Dizaynı, Üretimi ve Numune Hazırlama

Çalışmada, perlit agregası kullanılarak üretilen hafif betonların birim ağırlıkları, mekanik ve kılcallık özellikleri ile yüksek sıcaklığa karşı dirençlerinin, GKİA ikamesi ile nasıl değiştiği incelenmiştir. Gerçekleştirilen tüm hafif beton üretimlerinde su/çimento oranı 0,53 olarak sabit tutulmuştur. Çimento dozajı tüm karışımlarda 450 kg/m<sup>3</sup> olacak şekilde belirlenmiştir. TS EN 206-1 (2002) standardı uyarınca ön dökümler gerçekleştirilerek bu parametreler belirlenmiştir.

Hafif beton karışımları hazırlanırken GKİA, ince perlit agregası ile %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında ikame edilmiştir. Bu şekilde toplamda 6 beton karışımı hazırlanmıştır. GKİA ikamesinin artış oranı ile birlikte betonların çökme değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Betonların çökme değerleri 6-8 cm arasında olacak şekilde belirlenmiştir. Çalışmada üretilen hafif betonlara ait karışım reçeteleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Hafif beton bileşenleri (kg/m<sup>3</sup>)

| GKİA İkame Oranı (%) | GKİA | Agrega (İnce) | Agrega (Orta) | Agrega (İri) | Çimento | Karışım Suyu |
|----------------------|------|---------------|---------------|--------------|---------|--------------|
| 0                    | 0    | 599           |               |              |         |              |
| 20                   | 140  | 479           |               |              |         |              |
| 40                   | 280  | 360           |               |              |         |              |
| 60                   | 420  | 240           | 294           | 280          | 450     | 238          |
| 80                   | 561  | 120           |               |              |         |              |
| 100                  | 701  | 0             |               |              |         |              |

Hafif betonların tasarımı ve üretimi TS 2511 (1977) standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Ön üretimler ve nihai olarak karışımlar belirlenirken bu standarttaki beton bileşen miktarlarının sınır değerleri ve üretimde dikkat edilecek noktalara dikkat edilerek üretimler gerçekleştirilmiştir. Karışımlar oluşturulurken, öncelikle iri perlit agregası, sonra orta büyüklükteki perlit agregası, sonrasında ise ince perlit agregası ve GKİA beton mikserine eklenerek kuru bir şekilde 30 sn karıştırılmıştır. Bu işlemden sonra hesaplanan agregası doyma suyu agregası karışımına ilave edilip mikser 30 sn boyunca çalıştırılmış ve agregaların bu doyma suyunu emmesi için yaklaşık 15 dk boyunca beklenmiştir. Bekleme süresi boyunca 5 dk bir 30 sn mikser çalıştırılmıştır. Sonrasında çimento ve karışım suyu da eklenerek toplamda 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Beton üretimlerinde 50 lt kapasiteli tek eksenli bir mikser kullanılmıştır. Üretimlerde kullanılan mikserin fotoğrafı Şekil 8'de verilmiştir.





Şekil 8. Hafif beton üretimlerinde kullanılan mikser

Karışım işleminden sonra betonlar üzerinde çökme deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numunelerin beton kalıplarına alınması esnasında betonların taze birim ağırlıkları da ölçülmüştür. Numuneler kalıplarına alınmadan önce kalıpların iç kısmı yağlanıp kalıplar hazır hale getirilmiştir. Her bir karışım için 16 adet 10 cm boyutlu küp numuneler ve 6 adet 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindir numuneler alınmıştır. Bir karışımda toplamda 22 adet, 6 farklı karışım için ise 132 adet numune üretilmiştir. Tek seferde üretilen ve kalıplarına yerleştirilen numunelere ait fotoğraf Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Tek bir üretimde hazırlanan numuneler

Numuneler kalıplandıktan bir gün sonra kalıplarından çıkarılıp 20°C sıcaklığa ayarlanan kür havuzundaki suda deney günlerine kadar muhafaza edilmiştir. Numunelerin yerleştirildiği kür havuzu Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 10. Numunelerin kür havuzuna yerleştirilmesi

Üretilen 10 cm boyutlu küp numunelerden 3’er adet olacak şekilde toplamda 6 adet numune 28 ve 90 gün kür süreleri sonunda UGH deneyi ve ardından basınç dayanımı tespiti deneyinde

kullanılmıştır. Diğer 6 adet 10 cm boyutlu numunenin 3'ü 28 gün, 3'ü ise 90 gün kür sonunda kılcallık deneyinde kullanılmıştır. Kalan 8 adet 10 cm boyutlu küp numuneler ise hafif betonların yüksek sıcaklık dirençlerini belirlemek için kullanılmıştır. 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıkların her biri için 2'şer adet numune kullanılmıştır. 20 adet 10 cm boyutlu küp numune deneylerde bu şekilde kullanılmıştır. 6 adet 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde silindir numuneler ise yarmada çekme dayanımını deneyi için kullanılmıştır. 3 adet 28 gün kür sonunda, diğer 3 adet ise 90 gün kür sonunda kullanılmıştır.

### **3.3. Gerçekleştirilen Deneyler**

Bu bölümde üretilen hafif betonlar üzerinde gerçekleştirilen taze ve sertleşmiş haldeki beton deneyleri sunulacaktır.

#### **3.3.1. Taze hal deneyleri**

##### **3.3.1.1. Taze hal birim ağırlık deneyi**

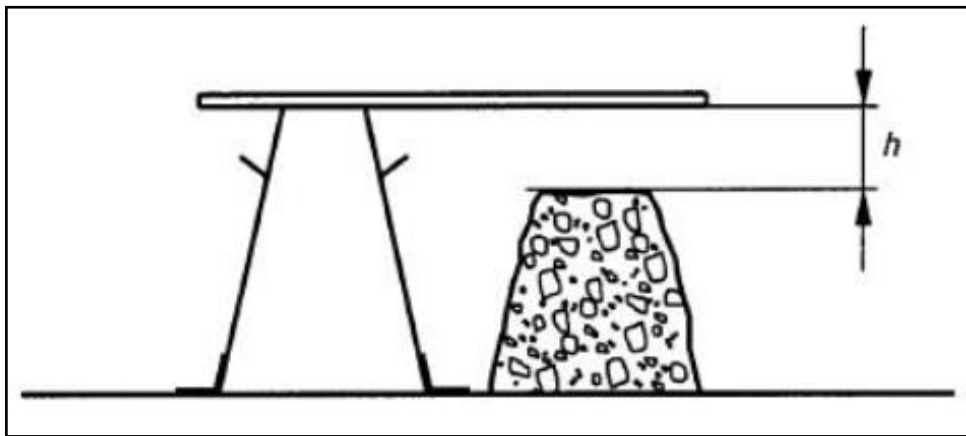
Taze hafif betonların taze hal birim ağırlıklarının belirlenmesi TS EN 12350-6 (2019) standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. İkili halde bulunan 10 cm küp numune kalıbının darası alındıktan sonra beton ile doldurulup tartım yapıp yerleştirilen beton kütlesi bulunmuştur. Bulunan beton kütlesi kalıbın aldığı beton hacmine bölünerek betonların taze hal yoğunlukları bulunmuştur. Bu deneyde ve başka deneylerde tartımlarda kullanılan 0,1 g hassasiyetle ölçüm yapan terazi Şekil 11' verilmiştir.



Şekil 11. Deneyler esnasında tartımlarda kullanılan terazi

### 3.3.1.2. Çökme deneyi

Çökme deneyi TS EN 12350-2 (2010) standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. 30 cm yüksekliğindeki çökme hunisinin öncelikle yaklaşık üçte birlik kısmı doldurulmuş ve 25 kez şişleme çubuğuyla doldurulan beton şişlenerek sıklaştırılmıştır. Daha sonra toplamda üçte ikilik kısmı doldurulmuş ve yine 25 kez şişlenmiştir. Sonra tamamen doldurulup tekrar 25 kez şişlendikten sonra üst kısım mala ile düzeltilerek huni yavaşça yukarı çekilip çökme miktarı Şekil 12’da gösterildiği gibi cetvel ile ölçülmüştür.



Şekil 12. Çökme değerinin ölçülmesi (TS EN 12350-2 (2010))

### 3.3.2. Sertleşmiş beton deneyleri

#### 3.3.2.1. Kuru hal birim ağırlık deneyi

Kür havuzundan çıkarıldığında doymun halde bulunan beton numunelerin yüzeyleri bir bez ile silinerek kurutulduktan sonra hacimlerini belirlemek amacıyla Arşimet terazisi yardımıyla suda tartımı yapılmıştır. Hacimleri belirlendikten sonra numuneler değişmez ağırlığa gelinceye kadar etüvde kurutulduktan sonra tartımı yapılmıştır. Kuru haldeki kütlenin bulunan hacme bölünmesi ile birlikte kuru halde birim ağırlıkları bulunmuştur. Numuneleri deneylerde kurutmak için kullanılan etüve ait fotoğraf Şekil 13’da verilmiştir. Deney 10 cm küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deney sadece 28 gün kür gören numuneler için uygulanmıştır.



Şekil 13. Deneylerde kullanılan etüv

#### 3.3.2.2. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3 (2019) standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyinde 10 cm boyutlu küp numuneler kullanılmıştır. Çalışma kapsamında hem 28 gün hem 90 gün kür gören numuneler için basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Kür



havuzundan çıkarılan numuneler 3-4 saat bekletilerek yüzeylerinin kuruması sağlanıp sonra deneye tabi tutulmuştur. Ayrıca yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanımı bulunurken de burada anlatılan yöntem kullanılmıştır. Deneyde ELE marka, otomatik kontrollü, 100 ton kapasiteli bir pres kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyine ait fotoğraf Şekil 14’te verilmiştir.



Şekil 14. Basınç dayanımı deneyi

### 3.3.2.3. Yarmada çekme dayanımı deneyi

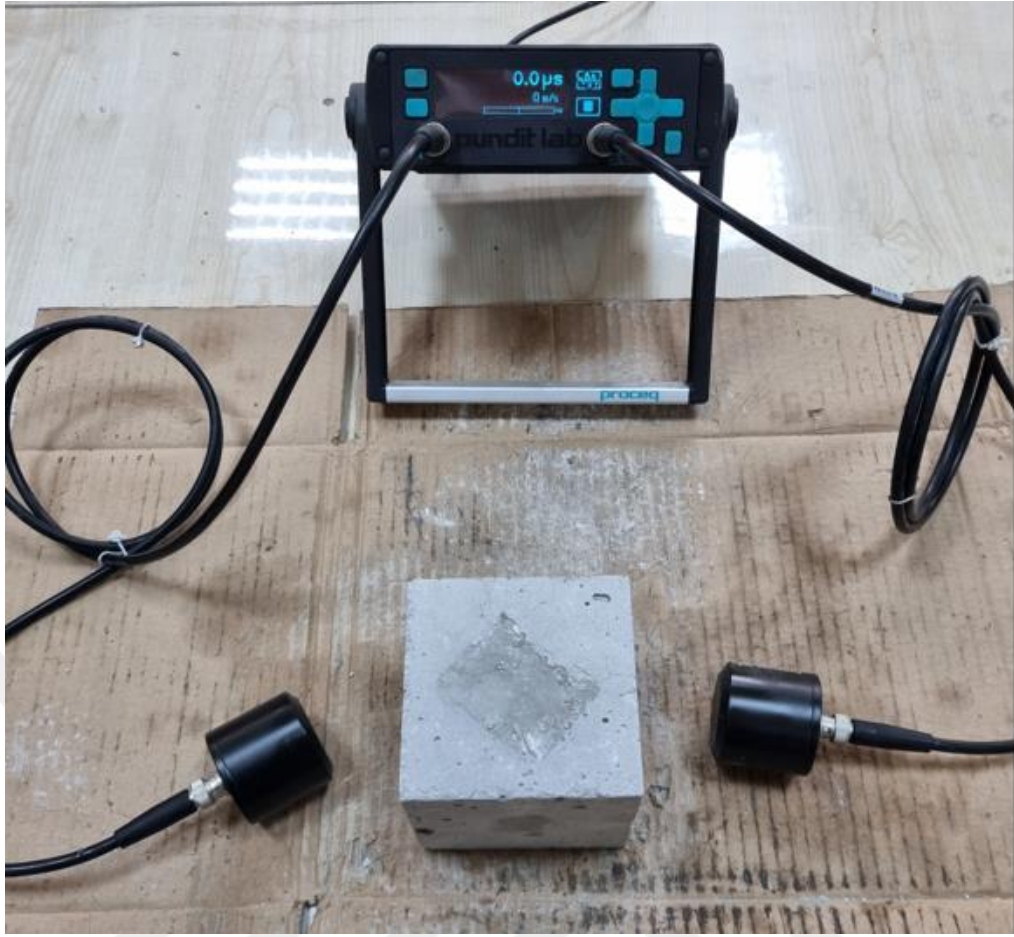
Yarmada çekme dayanımı deneyi TS EN 12390-6 (2010) standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deneyde 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde numuneler kullanılmıştır. Deney 28 gün ve 90 gün standart küre maruz kalan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları bilgisayara girildikten sonra yarmada çekme dayanımı deney bitiminde ekrandan okunmuştur. Deneye ait fotoğraf Şekil 15’te verilmiştir.



Şekil 15. Yarmada çekme dayanımı deneyi

#### 3.3.2.4. Ultrases geçiş hızı deneyi (UGH)

Ultrases geçiş hızı (UGH) deneyi IS 13311: Part 1 (1992) uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deneyde 10 cm boyutlu küp numuneler basınç dayanımı deneyi öncesinde kullanılmıştır. Deney hem oda sıcaklığındaki numuneler üzerinde hem de yüksek sıcaklığa maruz kalmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. UGH deneyinde bir verici ve bir alıcı prop beton numunenin yüzeylerine merkezi olarak karşılıklı olarak yerleştirilmiş ve sesin betondan geçiş süresi  $\mu$ s cinsinden ölçülmüştür. Proplar beton yüzeylerine temas ettirilirken prop ve beton arasındaki sürekliliği sağlamak için jel kullanılmıştır. Sesin numuneden geçtiği mesafe ses geçiş süresine bölünerek, UGH değerleri m/s cinsinden elde edilmiştir. Deneyde 54 kHz frekansa sahip proplar kullanılmıştır. Deney düzeneğine ait görüntü Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. Ultrases geçiş hızı deneyi

#### 3.3.2.5. Kılcallık deneyi

Kılcallık katsayısı ASTM C 1585 (2013) standardı uyarınca belirlenmiştir. Deneyde 10 cm boyutlu küp numunelerden toplamda 6 adet numune (3'ü 28 gün, 3'ü 90 gün kür sonunda) kullanılmıştır. Deney zamanı gelen numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra etüve konularak iki gün boyunca 70°C'de tutularak değişmez ağırlığa gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra numuneler etüvden çıkarılarak sıcaklıklarının ortam sıcaklığına düşmesi beklenmiştir. Numunelerin suyla temas edecek yüzeyinin çevresindeki yüzeyler su geçirimsiz bant ile kuşatılarak yan yüzeylerden su emilimi engellenmiştir. Numuneler ilk ağırlıkları tartılarak belirlendikten sonra, daha önceden su ile doldurulmuş bir tepsiye yaklaşık 3 mm dalacak şekilde demir mesnetlere yerleştirilmiştir. Kurulan deney düzeneğine ait fotoğraf Şekil 17'de verilmiştir.





Şekil 17. Kılcallık deneyi düzeneği

Deneye başlamadan (numuneler suyla temas etmeden) hemen önce numunelerin ağırlıkları (0. dk için) tartılarak belirlenmiştir. Numuneler suya temas ettikten sonra 5, 10, 20, 30, 45, 60 ve 120. dakikalar sonunda numuneler tartılmış ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Numunelerin kaydedilen bu ağırlık değerlerinden kuru ağırlıkları çıkarılarak o dakikada numunenin emdiği su miktarı hesaplanmıştır. Betonların kılcallık katsayıları bulunurken Denklem 1’de verilen formülden yararlanılmıştır.

$$q = \frac{Q}{A} = kx\sqrt{t} \quad (1)$$

Bu denklemde; t numunenin suyla temasından sonra geçen süreyi, A numunenin suyla temas eden alanını, Q emilen su miktarını ve k ise kılcallık katsayısını göstermektedir. ASTM C 1585 (2013) standardına göre doğrusal regresyon yapılarak kılcallık katsayıları, mm/s<sup>0,5</sup> cinsinden belirlenmiştir.

### 3.3.2.6. Yüksek sıcaklık direncinin belirlenmesi

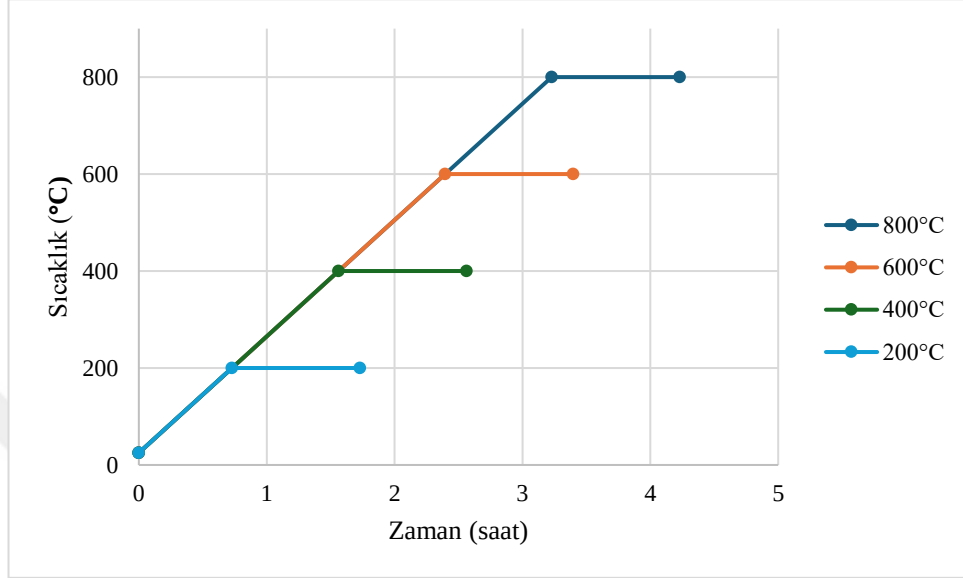
Hafif betonların yüksek sıcaklığa karşı dirençlerini belirlemek amacıyla, betonların yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasında ölçülen ağırlık kayıpları, basınç dayanımı kayıpları ve UGH değerleri yorumlanmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığa maruz kalan beton numuneler için görsel değerlendirme yapılmıştır. Son olarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile numunelerin içyapıları analiz edilmiştir. Deney için 10 cm boyutlu küp numuneler kullanılmıştır. Her bir betondan her bir sıcaklık değeri için iki adet numune kullanılmıştır. Deneyde kullanılan yüksek sıcaklık fırını Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. Yüksek sıcaklık fırını ve numuneler

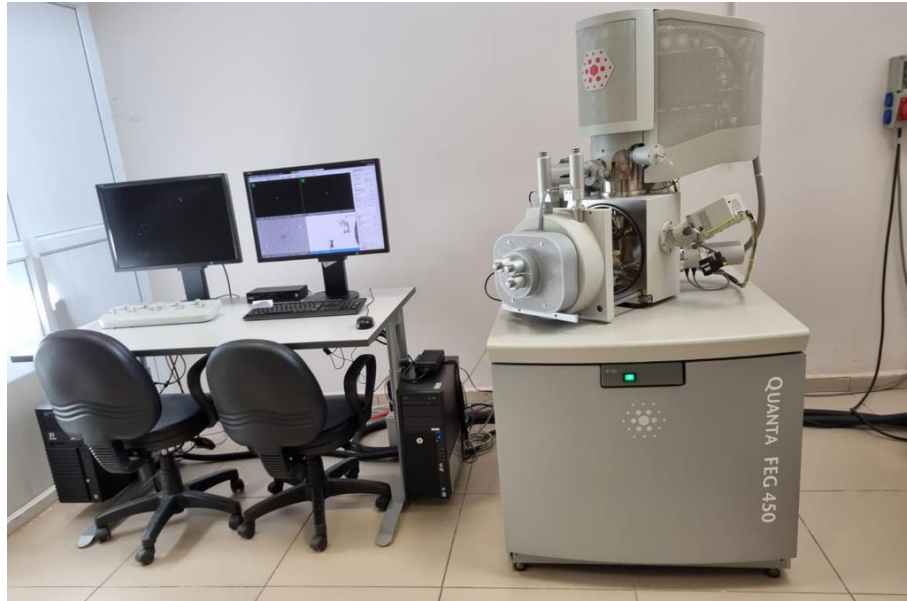
Numunelere yüksek sıcaklıklar uygulanmadan önce UGH ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra numuneler 100°C sıcaklıkta bir gün boyunca fırında bekletilerek kurutulduktan sonra yüksek sıcaklık deneyi gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık olarak 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklar belirlenmiş ve numunelere uygulanmıştır. Numuneler yüksek sıcaklık fırınına yerleştirildikten sonra belirlenen hedef sıcaklığa fırın ayarlanmış ve numunelere yüksek

sıcaklık maruziyeti başlatılmıştır. Fırının ısıtma hızı yaklaşık 4°C/dk olarak ayarlanmıştır. Fırın belirlenen hedef sıcaklığa ulaştıktan sonra 1 saat bu sıcaklıkta numuneler bekletilmiştir. Daha sonra fırının kapağı açılarak numunelerin hava ortamında doğal olarak soğuması sağlanmıştır. Numunelere uygulanan sıcaklık rejimine ilişkin grafik Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19. Numunelere uygulanan sıcaklığın zamanla değişimi

Numunelerin içyapıları ile ilgili bilgi edinmek amacıyla kullanılan SEM cihazına ait fotoğraf Şekil 20’de verilmiştir.



Şekil 20. SEM görüntüsü almak için kullanılan cihaz

#### 4. BULGULAR

Bu bölümde hafif betonlar üzerinde gerçekleştirilen deneylere ilişkin elde edilen sonuçlar tablolar halinde verilmiştir. Sonuçlar sunulurken GKİA kısaltması geri kazanılmış ince agregayı belirtmektedir. GKİA kısaltmasının sonuna getirilen sayı ise o hafif betondaki ince agreganın yüzde kaçının GKİA ile ikame edildiğini göstermektedir. Örneğin; GKİA-40, %40 oranında ince perlit agregasının GKİA ile ikame edildiği beton anlamına gelmektedir.

##### 4.1. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Üretilen hafif betonlara ait birim ağırlık deney sonuçları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Hafif betonların birim ağırlıkları

| Beton türü | Taze hal birim ağırlık<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 28 gün kür görmüş<br>hafif betonlar için<br>kuru birim ağırlık<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| GKİA-0     | 1912                                           | 1750                                                                                   |
| GKİA-20    | 1899                                           | 1760                                                                                   |
| GKİA-40    | 1931                                           | 1770                                                                                   |
| GKİA-60    | 1958                                           | 1779                                                                                   |
| GKİA-80    | 1984                                           | 1816                                                                                   |
| GKİA-100   | 1985                                           | 1823                                                                                   |

#### 4.2. Çökme Deney Sonuçları

Üretilen hafif betonlara ilişkin çökme deney sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Hafif betonların çökme sonuçları

| Beton türü | Çökme<br>(cm) |
|------------|---------------|
| GKİA-0     | 6             |
| GKİA-20    | 7             |
| GKİA-40    | 7             |
| GKİA-60    | 6             |
| GKİA-80    | 8             |
| GKİA-100   | 6             |

#### 4.3. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Üretilen hafif betonların basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Hafif betonların basınç dayanımları

| Beton türü | 28 gün kür gören<br>betonların basınç<br>dayanımları (MPa) | 90 gün kür gören<br>betonların basınç<br>dayanımları (MPa) |
|------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| GKİA-0     | 50,5                                                       | 52,7                                                       |
| GKİA-20    | 48,3                                                       | 50,2                                                       |
| GKİA-40    | 48,4                                                       | 49,1                                                       |
| GKİA-60    | 45,0                                                       | 45,9                                                       |
| GKİA-80    | 44,6                                                       | 45,3                                                       |
| GKİA-100   | 43,7                                                       | 45,1                                                       |

#### 4.4. Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

Üretilen hafif betonların yarmada çekme dayanımı deney sonuçları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Hafif betonların yarmada çekme dayanımları

| Beton türü | 28 gün kür gören<br>betonların yarmada<br>çekme dayanımları<br>(MPa) | 90 gün kür gören<br>betonların yarmada<br>çekme dayanımları<br>(MPa) |
|------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| GKİA-0     | 4,4                                                                  | 4,5                                                                  |
| GKİA-20    | 4,0                                                                  | 4,2                                                                  |
| GKİA-40    | 3,8                                                                  | 4,0                                                                  |
| GKİA-60    | 3,7                                                                  | 3,9                                                                  |
| GKİA-80    | 3,5                                                                  | 3,6                                                                  |
| GKİA-100   | 3,7                                                                  | 3,9                                                                  |

#### 4.5. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

Üretilen hafif betonların ultrases geçiş hızı deney sonuçları Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Hafif betonların ultrases geçiş hızları

| Beton türü | 28 gün kür gören<br>betonların ultrases<br>geçiş hızları (m/s) | 90 gün kür gören<br>betonların ultrases<br>geçiş hızları (m/s) |
|------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| GKİA-0     | 3448                                                           | 3478                                                           |
| GKİA-20    | 3419                                                           | 3448                                                           |
| GKİA-40    | 3347                                                           | 3419                                                           |
| GKİA-60    | 3353                                                           | 3419                                                           |
| GKİA-80    | 3317                                                           | 3344                                                           |
| GKİA-100   | 3289                                                           | 3339                                                           |

#### 4.6. Kılcallık Deney Sonuçları

Üretilen hafif betonların kılcallık katsayıları Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Hafif betonların kılcallık katsayıları

| Beton türü | 28 gün kür gören<br>betonların kılcallık<br>katsayıları (mm/s <sup>0,5</sup> ) | 90 gün kür gören<br>betonların kılcallık<br>katsayıları (mm/s <sup>0,5</sup> ) |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|            | (x10 <sup>-2</sup> )                                                           | (x10 <sup>-2</sup> )                                                           |
| GKİA-0     | 2,89                                                                           | 2,56                                                                           |
| GKİA-20    | 3,35                                                                           | 3,10                                                                           |
| GKİA-40    | 3,73                                                                           | 3,42                                                                           |
| GKİA-60    | 4,64                                                                           | 3,58                                                                           |
| GKİA-80    | 4,83                                                                           | 3,75                                                                           |
| GKİA-100   | 5,24                                                                           | 4,13                                                                           |

#### 4.7. Yüksek Sıcaklık Direnci Deney Sonuçları

##### 4.7.1. Ağırlık kaybı deney sonuçları

Üretilen hafif betonlar belirtilen kür süresi bitiminde, 100°C’ye maruz bırakıldıktan sonra ağırlıkları ölçülerek kuru ağırlıkları (KA) bulunmuştur. Daha sonra ağırlığı ölçülen bu numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık maruziyetinden sonra ağırlıkları (YS) tekrar ölçülmüştür. Daha sonra Denklem 2 yardımıyla numune ağırlıklarında meydana gelen azalma hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlık kaybı (\%)} = \frac{KA - YS}{KA} \times 100 \quad (2)$$

Bu şekilde hesaplanan ağırlık kayıpları Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Hafif betonlarda yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen ağırlık kayıpları

| Beton türü      | Hafif betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları (%) |                |                |                |
|-----------------|------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                 | 200°C'ye maruz                                       | 400°C'ye maruz | 600°C'ye maruz | 800°C'ye maruz |
|                 | kalmış                                               | kalmış         | kalmış         | kalmış         |
| <b>GKİA-0</b>   | 1,4                                                  | 6,7            | 8,4            | 10,9           |
| <b>GKİA-20</b>  | 1,4                                                  | 6,9            | 8,8            | 10,8           |
| <b>GKİA-40</b>  | 1,3                                                  | 6,8            | 9,5            | 11,5           |
| <b>GKİA-60</b>  | 1,6                                                  | 6,8            | 10,0           | 11,8           |
| <b>GKİA-80</b>  | 2,9                                                  | 7,6            | 10,5           | 12,0           |
| <b>GKİA-100</b> | 3,1                                                  | 7,8            | 10,6           | 12,3           |

#### 4.7.2. Basınç dayanımı kaybı deney sonuçları

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış betonlar üzerinde gerçekleştirilmiş basınç dayanımı deneyi sonuçları Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası hafif betonların basınç dayanımları

| Beton türü      | Yüksek sıcaklığa maruz kalan hafif betonların basınç dayanımları (MPa) |                |                |                |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                 | 200°C'ye maruz                                                         | 400°C'ye maruz | 600°C'ye maruz | 800°C'ye maruz |
|                 | kalmış                                                                 | kalmış         | kalmış         | kalmış         |
| <b>GKİA-0</b>   | 44,9                                                                   | 46,9           | 39,8           | 20,6           |
| <b>GKİA-20</b>  | 42,5                                                                   | 43,6           | 35,1           | 18,0           |
| <b>GKİA-40</b>  | 42,1                                                                   | 42,4           | 32,1           | 15,4           |
| <b>GKİA-60</b>  | 38,8                                                                   | 39,0           | 27,3           | 13,4           |
| <b>GKİA-80</b>  | 35,5                                                                   | 36,5           | 24,4           | 11,9           |
| <b>GKİA-100</b> | 33,9                                                                   | 35,7           | 22,4           | 10,1           |

Yüksek sıcaklık görmeyen betonlara kıyasla basınç dayanımlarında meydana gelen azalma oranları Tablo 14'te verilmiştir.



Tablo 14. Hafif betonlarda yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen basınç dayanımı kayıpları

| Beton türü      | Hafif betonlarda meydana gelen basınç dayanımı kayıpları (%) |                          |                          |                          |
|-----------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                 | 200°C'ye maruz<br>kalmış                                     | 400°C'ye maruz<br>kalmış | 600°C'ye maruz<br>kalmış | 800°C'ye maruz<br>kalmış |
| <b>GKİA-0</b>   | 11,1                                                         | 7,0                      | 21,2                     | 59,3                     |
| <b>GKİA-20</b>  | 12,0                                                         | 9,6                      | 27,4                     | 62,8                     |
| <b>GKİA-40</b>  | 13,0                                                         | 12,4                     | 33,7                     | 68,2                     |
| <b>GKİA-60</b>  | 13,9                                                         | 13,3                     | 39,4                     | 70,3                     |
| <b>GKİA-80</b>  | 20,4                                                         | 18,2                     | 45,2                     | 73,4                     |
| <b>GKİA-100</b> | 22,5                                                         | 18,3                     | 48,7                     | 76,9                     |

#### 4.7.3. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış betonlar üzerinde gerçekleştirilmiş ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları Tablo 15'te verilmiştir.

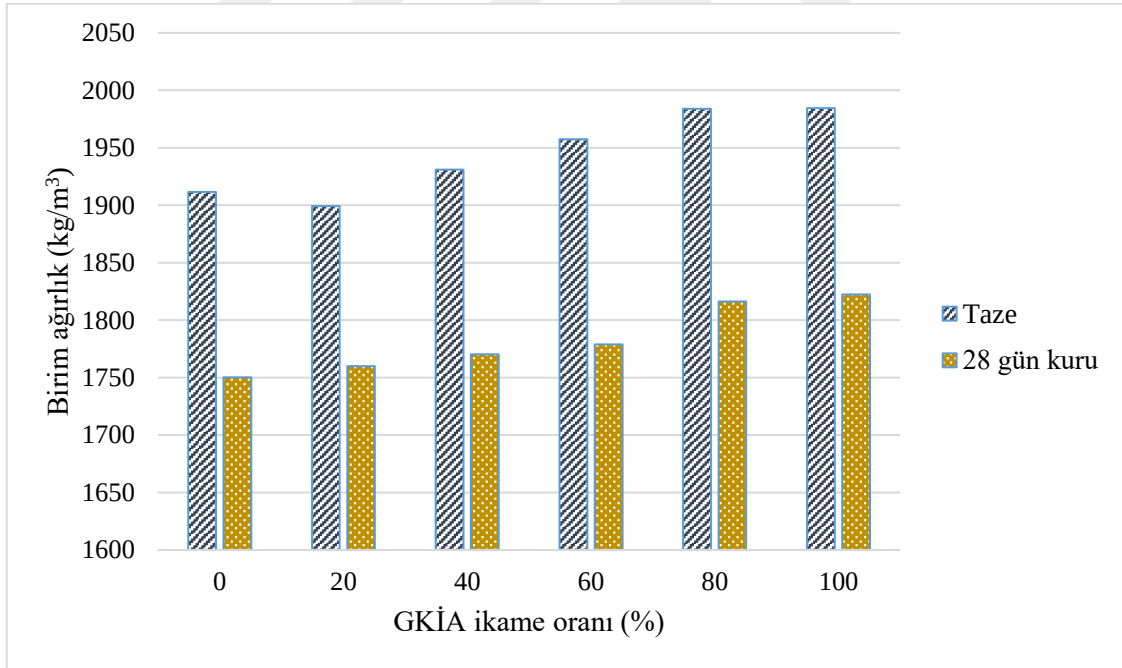
Tablo 15. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası hafif betonların ultrases geçiş hızları

| Beton türü      | Yüksek sıcaklığa maruz kalan hafif betonların ultrases geçiş hızları (m/s) |                          |                          |                          |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                 | 200°C'ye maruz<br>kalmış                                                   | 400°C'ye maruz<br>kalmış | 600°C'ye maruz<br>kalmış | 800°C'ye maruz<br>kalmış |
| <b>GKİA-0</b>   | 3252                                                                       | 2732                     | 2413                     | 2232                     |
| <b>GKİA-20</b>  | 3185                                                                       | 2677                     | 2309                     | 2105                     |
| <b>GKİA-40</b>  | 3110                                                                       | 2577                     | 2179                     | 1969                     |
| <b>GKİA-60</b>  | 3063                                                                       | 2519                     | 2004                     | 1784                     |
| <b>GKİA-80</b>  | 3017                                                                       | 2463                     | 1866                     | 1608                     |
| <b>GKİA-100</b> | 2981                                                                       | 2436                     | 1747                     | 1437                     |

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

### 5.1. Birim Ağırlık

Hafif betonların taze ve 28 gün kür sonundaki kuru birim ağırlıkları Şekil 21’de verilmiştir. Geri kazanılmış ince agregası (GKİA) ikame oranının artışı ile birlikte hafif betonların hem taze hem de 28 gün kür gören ve kuru halde birim ağırlıklarında artışlar görülmüştür. Taze haldeki betonların birim ağırlıkları incelendiğinde en düşük birim ağırlığın  $1899 \text{ kg/m}^3$  değeri ile %20 GKİA içeren betonda, en yüksek birim ağırlığın ise  $1985 \text{ kg/m}^3$  değeri ile %100 GKİA içeren betonda olduğu görülmektedir. GKİA içermeyen betona kıyasla %100 GKİA içeren betonun birim ağırlığındaki artış %3,8 olmuştur. 28 gün kür gören sertleşmiş ve kuru haldeki betonların birim ağırlıkları incelendiğinde; en düşük birim ağırlığa sahip beton  $1750 \text{ kg/m}^3$  değeri ile GKİA içermeyen beton, en yüksek birim ağırlığa sahip beton ise  $1823 \text{ kg/m}^3$  değeri %100 GKİA içeriğine sahip betondur. GKİA içermeyen betona kıyasla %100 GKİA içeren betonun kuru birim ağırlığındaki artış %4,2 olarak hesaplanmıştır.



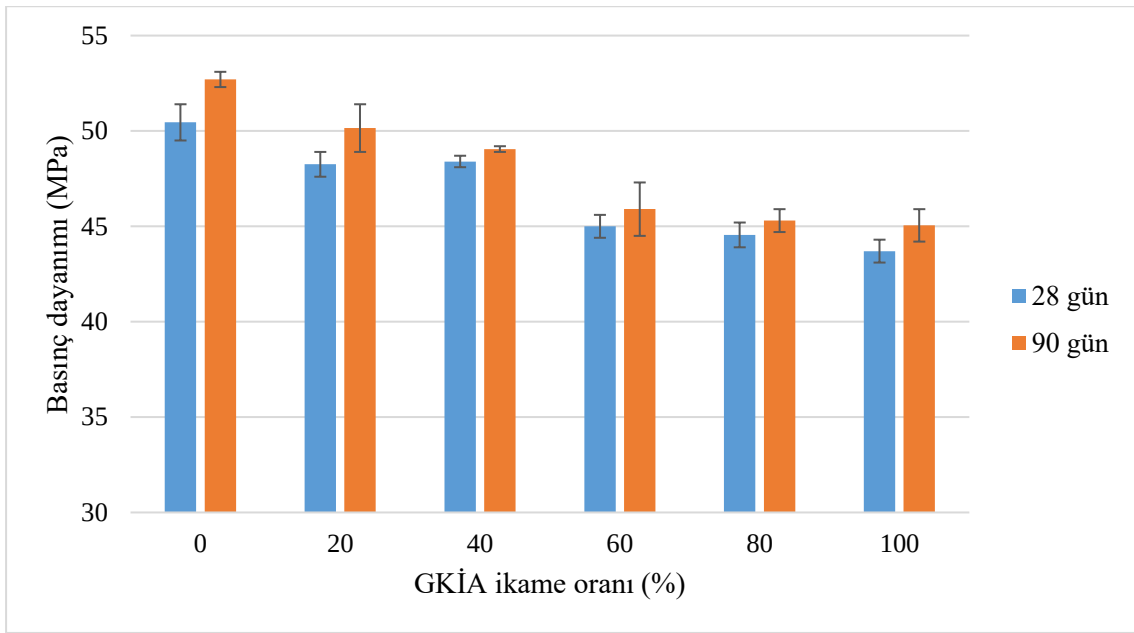
Şekil 21. Üretilen betonların birim ağırlıkları

Hafif betonların kuru birim ağırlıkları literatürde  $2000 \text{ kg/m}^3$ 'ten daha az olarak verilmiştir (TS EN 206-1, 2002; Öztürk, 2019). Her ne kadar GKİA ikamesi oranı artışı ile birlikte kuru birim ağırlıkların arttığı görülse bile, %100 GKİA betonlarda dâhil olmak üzere üretilen tüm

betonların hafif beton sınıfında yer aldığı görülmektedir. Böylece perlit agregalı bir betonda ince agreganın tamamının GKİA ile ikame edildiği durumda bile hafif betonlar elde edilebileceği görülmüştür. Betonların birim ağırlıklarının GKİA oranı arttıkça artmasının nedeni GKİA'nın ince perlit agregasından daha yüksek bir yoğunluk değerine sahip olmasındandır. Karışımında hafif agrega oranının artmasıyla birlikte taze beton birim hacim ağırlığının azaldığı literatürde birçok çalışmada raporlanmıştır (Teoh vd., 2023; Mijan vd., 2024; Gao vd., 2024).

## **5.2. Basınç Dayanımı**

Üretilen hafif betonların 28 gün 90 gün sonunda ölçülen basınç dayanımları Şekil 22'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek basınç dayanımının hem 28 gün hem 90 gün kür süresi sonunda GKİA içermeyen betonda (%0) olduğu görülmektedir. Bu betonun 28 gün kür süresi sonundaki basınç dayanımı 50,5 MPa ve 90 gün kür süresi sonundaki basınç dayanımı ise 52,7 MPa olarak bulunmuş olup tamamı ham perlit agregasından oluşan bir hafif betonda yüksek dayanımların elde edilebileceği görülmüştür. Betonların basınç dayanımlarının GKİA ikame oranının artışına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. %100 GKİA içeren betonun GKİA içermeyen betona kıyasla basınç dayanımındaki azalma miktarı 28 gün kür gören numunelerde %13, 90 gün kür gören numunelerde ise %14 olarak bulunmuştur. Görüldüğü üzere hafif betonda kullanılan tüm ince perlit agregası geri kazanılmış ince agrega ile ikame edildiğinde bile basınç dayanımındaki azalma miktarı %13-14 mertebelerinde kalmaktadır. Referans betonuna göre (%0), %20 ve %40 GKİA ikameli betonların basınç dayanımlarındaki azalma sırasıyla yaklaşık %4 ve %6 olup, bu azalma miktarlarının oldukça küçük değerler olduğu görülmektedir. Buradan, %40 oranına kadar GKİA'nın ince perlit agregası ile ikame edilerek kullanılmasının basınç dayanımı açısından önemli derecede bir olumsuzluk oluşturmayacağı sonucuna varılmaktadır. Kür süresinin betonların basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde; kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması durumunda basınç dayanımlarında ortalama olarak yaklaşık %3'lük bir artış meydana geldiği hesaplanmıştır. Bu anlamda %20-40 ikame oranına kadar GKİA ikame edilerek üretilen betonların basınç dayanımlarında meydana gelen azalma kür süresinin uzatılmasıyla azalacağı hatta bertaraf edilebileceği görülmektedir.



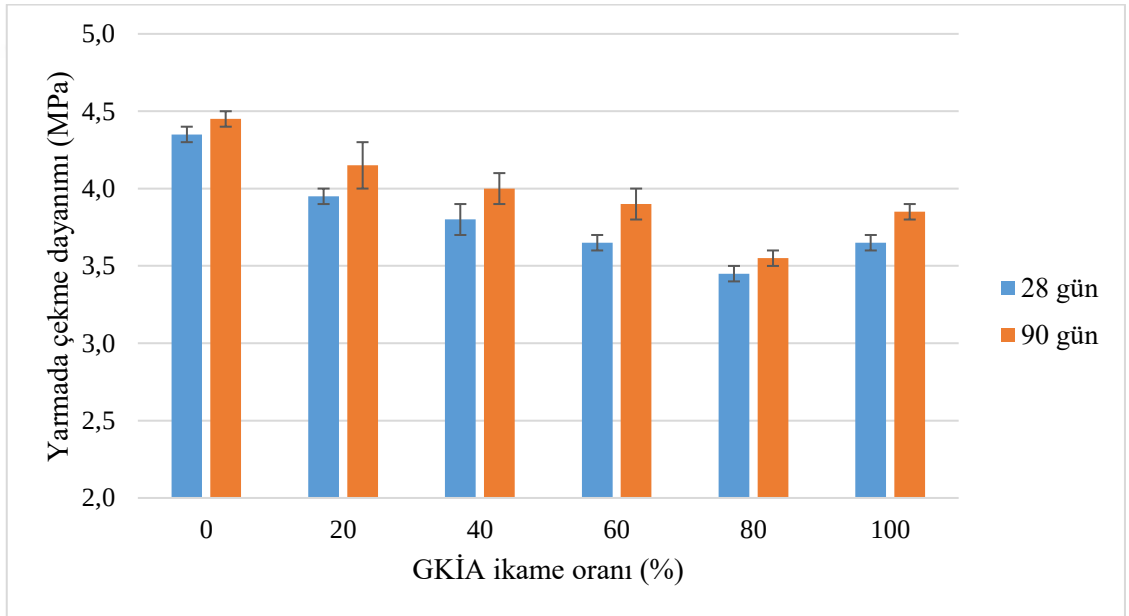
Şekil 22. Üretilen betonların basınç dayanımı test sonuçları

GKİA ikame oranı artışı ile betonların basınç dayanımlarında meydana gelen azalmanın nedeninin geri kazanılmış agrega üzerinde yapışmış olarak bulunan eski çimento hamurunun zayıf mekanik özellikler göstermesi nedeniyle olduğu bildirilmektedir (Katz, 2003; Xie vd. 2020; Bu vd., 2022; Tang vd., 2022). Bu çalışmada olduğu gibi yüksek dayanım düzeylerine çıkılabilmiş hafif betonların elde edilebildiği çalışmalar rapor edilmiş olup, bu bağlamda literatürle paralellik görülmektedir (Tandiroglu, 2010; Wadie, 2013; Mansour ve Ghernouti, 2021; Acar ve Ramyar, 2024).

### 5.3. Yarmada Çekme Dayanımı

Şekil 23'te betonların 28 ve 90 gün su kürü sonundaki yarmada çekme dayanımları verilmiştir. Şekil 23 incelendiğinde en yüksek yarmada çekme dayanımının GKİA içermeyen (%0) betonda olduğu görülmektedir. Bu betonda (%0) 28 günlük yarmada çekme dayanımı 4,4 MPa ve 90 günlük yarmada çekme dayanımı ise 4,5 MPa olarak bulunmuştur. %80 GKİA ikame oranına kadar GKİA ikame artışı ile birlikte betonların yarmada çekme dayanımlarında azalmalar görülmüştür. %100 GKİA ikameli betonun yarmada çekme dayanımı ise %60 GKİA ikameli beton ile hemen hemen aynı ve %80 GKİA ikameli betonlardan ise yüksek bulunmuştur. Bu durumun nedeninin yüksek oranda GKİA içeren betonlarda ince (filler) malzemedeki eski çimento hamuru taneciklerinin betondaki kohezif etkiyi artırması ve perlit agregasından daha sert olduğu düşünülen GKİA'nın belirli bir kullanım oranına ulaştığında

deney esnasında çatlak oluşumunu engelleme kabiliyetini artırması olduğu düşünülmektedir. GKİA'nın mekanik özellikler üzerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada; %75 GKİA ikame oranına kadar betonların yarmada çekme dayanımında azalma olmuştur. %100 GKİA içeren betonun yarmada çekme dayanımında ise artış meydana gelmiş olup %100 GKİA içeren betonun yarmada çekme dayanımının kontrol betonundan sonra en yüksek dayanıma sahip olduğu görülmüştür (Chen ve Xu, 2024). Bulunan bu sonuç çalışmamızdan elde edilen sonuçlarla oldukça benzerlik göstermekte olup literatürle paralellik gösteren sonuçların elde edildiği anlaşılmaktadır. %100 GKİA içeren betonların yarmada çekme dayanımındaki azalma kontrol betonuna (%0) göre yaklaşık %15 düzeyindedir. Bu oran %20 GKİA ikameli betonda yaklaşık %8 ve %40 GKİA ikameli betonda ise yaklaşık %12 olarak bulunmuştur.

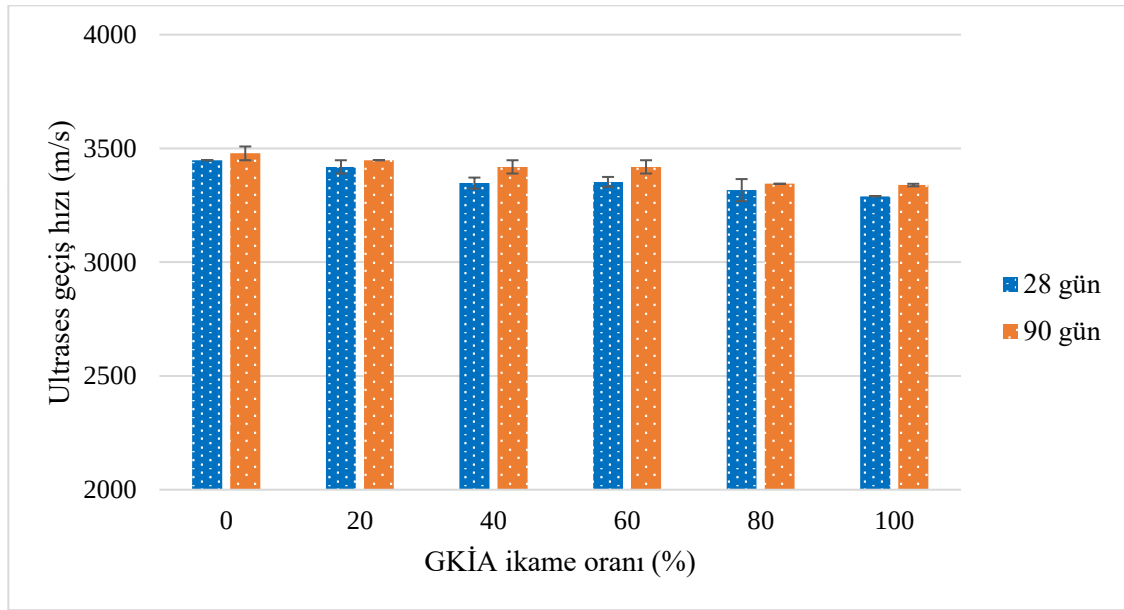


Şekil 23. Üretilen betonların yarmada çekme dayanımı test sonuçları

Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılmasıyla betonların yarmada çekme dayanımlarında iyileşmeler görülmüştür. Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması sonucunda tüm betonların yarmada çekme dayanımlarındaki iyileşmenin ayrı ayrı ortalaması alındığında %3'lük bir iyileşme olduğu sonucuna varılmaktadır. GKİA agregası içeren betonların içermeyen betonlara göre daha düşük yarmada çekme dayanımına sahip olmasının nedeni, kırılgan harç ve zayıf arayüzeydir. Bu durum, GKİA ve sertleşmiş çimento hamuru arasındaki bağ mukavemeti olumsuz etkilemektedir (Wang ve Xiao, 2022). Bu nedenle GKİA ikame oranı artışıyla birlikte yarmada çekme dayanımlarında azalmalar meydana geldiği söylenebilir.

#### 5.4. Ultrases Geçiş Hızı

Üretilen betonlara ait ultrases geçiş hızları Şekil 24’de sunulmuştur. Şekil 24 incelendiğinde, GKİA ikame oranı artışı ile birlikte betonların ultrases geçiş hızlarında belirgin olmamakla birlikte azalmalar olduğu görülmektedir. %100 GKİA içeren betonun ultrases geçiş hızındaki azalma %0 GKİA içeren betonlara göre 28 gün kür gören betonlar için %5, 90 gün kür gören betonlar için ise %4’tür. Görüldüğü üzere hafif betondaki tüm ince agregayı, GKİA ile ikame ettiğimizde bile çok küçük bir oranda ultrases geçiş hızında azalma meydana gelmektedir.



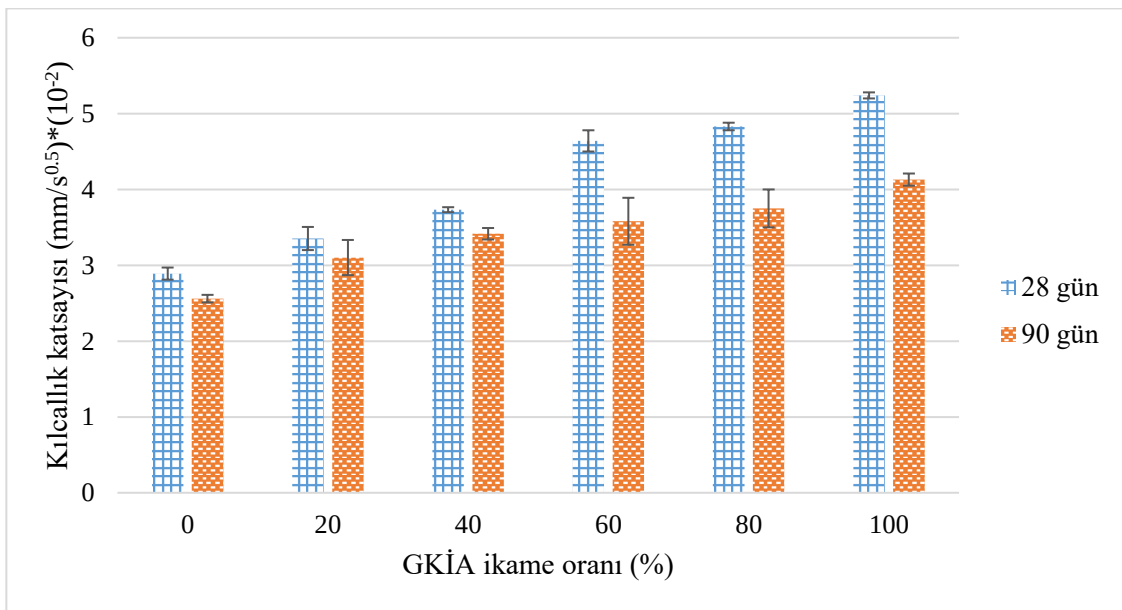
Şekil 24. Üretilen betonların ultrases geçiş hızı test sonuçları

Ultrases dalgalarının karşısına boşluklar çıktığında, ses bu boşluktan ve boşluğun etrafından geçerek ilerler. Bu nedenden dolayı boşluklu malzemede ses geçiş süresi artar ve ses geçiş hızı azalır (Tangüner, 2007). GKİA ikame oranının artışıyla birlikte betonların birim ağırlıklarının arttığı Şekil 21’de sunulmuştu. Ultrases geçiş hızı, ortamın yoğunluğu ile doğrudan orantılı artmakla birlikte ortamdaki boşluk dağılımının bir doğrultu üzerinde toplanması da ultrases geçiş hızını ciddi oranda etkilemektedir. Boşlukların betonda homojen olmadan belli bir doğrultu üzerinde bulunması genellikle mikro çatlak şeklinde veya agrega çimento hamuru arayüzey kusuru şeklinde olmaktadır. Gerek malzeme içindeki mikroçatlaklar, gerek çimento hamuru agrega arasındaki arayüzey yoğunluğu (GKİA’da hem eski hem yeni arayüzey olması nedeniyle daha belirgin olmaktadır) ultrases geçiş hızını ciddi oranda düşürmektedir (Mohammed vd., 2016; Ahn vd., 2019). Bu durum artan GKİA ikame oranı ile arayüzey artışına neden olmakta ve ultrases geçiş hızındaki azalmayı açıklamaktadır.

Kür süresinin etkisinin UPV üzerindeki etkisi incelendiğinde; 28 gün kür gören betonlara kıyasla, 90 gün kür gören tüm betonlarda ortalama olarak ultrases geçiş hızında %1,4 oranında bir artış meydana geldiği görülür. Uygulanan kür süresinin 28 günden 90 güne çıkması ile birlikte oransal olarak çok az bir miktar olan ses geçiş hızındaki bu artış literatürdeki çalışmalarda da görülmüş olup bulunan sonuçların literatürle uyum sağladığı görülmektedir (Zakaria and Sulieman., 2020).

### 5.5. Kılcallık

Betonlara ilişkin hesaplanan kılcallık katsayısı değerleri Şekil 25'te verilmiştir. Grafikte en düşük kılcallık katsayılarının GKİA içermeyen betonda (%0) olduğu görülmüştür. Bu betonun 28 gün sonundaki kılcallık katsayısı  $2,89 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{0.5}$  bulunurken 90 gün sonundaki kılcallık katsayısı ise  $2,56 \times 10^{-2} \text{ mm/s}^{0.5}$  bulunmuştur. GKİA ikame oranı artışı ile betonların kılcallık katsayılarının arttığı görülmektedir. 28 gün kür süreleri dikkate alındığında; GKİA içermeyen betona kıyasla %20 GKİA içeren betonun kılcallık katsayısındaki artış %16 iken, %100 GKİA içeren betonun kılcallık katsayısındaki artış ise %81 olmuştur. Geri kazanılmış agrega kullanımının betonların kılcallık katsayısını arttırdığı literatürde birçok çalışmada ortaya koyulmuştur (Ulas vd., 2024). Özellikle arayüzey geçiş bölgesindeki mikro çatlaklı yapının neden olduğu zayıf halka GKA içeren betonların en zayıf halkasını oluşturmakta ve betonun geçirimsizlik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Ulsen vd., 2022; Lu vd., 2024).



Şekil 25. Üretilen betonların kılcallık katsayıları

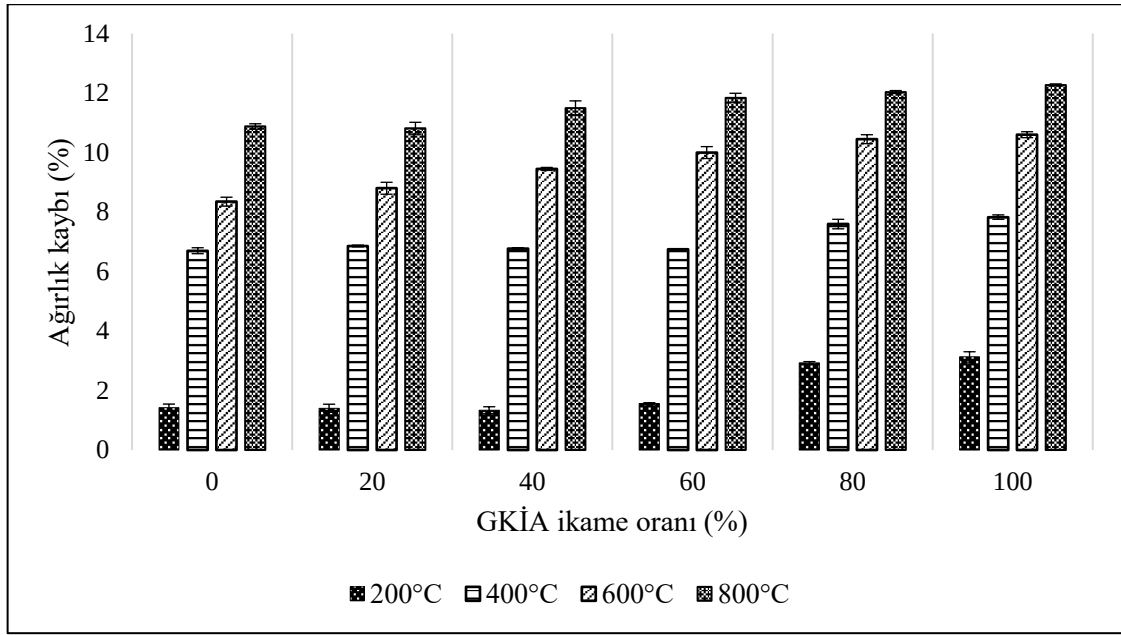
Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılmasıyla betonların kılcallık katsayılarında dikkate değer bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Özellikle %60 ve üstü oranlarda GKİA ikame edilen betonlarda kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması sonucunda betonların kılcallık katsayılarında %22 oranında bir azalma olduğu görülmektedir. Kür süresinin bu olumlu etkisi sonucu GKİA içeren betonlar üreterek kullanılabilir hale getirmek mümkün olabilir. Kür süresinin bu olumlu etkisi literatürdeki diğer çalışmalarda da görülmektedir (Rashid vd., 2023). Sonuç olarak GKİA kullanımının betonlarda durabilite ve geçirimsizlik açısından olumsuz sonuçlar meydana getirdiği görülmekte ve sınırlı miktarlarda GKİA kullanımı önerilmektedir. Ayrıca GKİA kullanımından dolayı ortaya çıkan olumsuz etkinin kür süresinin artırılması sonucu azaltılabileceği görülmüştür.

## **5.6. Yüksek Sıcaklık Direnci**

### **5.6.1. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları**

Şekil 26'da yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların ağırlıklarında meydana gelen kayıplar yüzde olarak verilmiştir. Şekil 26'daki grafikten betonların her bir yüksek sıcaklık değeri için yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasında ağırlık kayıpları olduğu görülmüştür. Sıcaklığın artışı ile birlikte betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları büyük oranlarda artış göstermiştir. 200°C'de betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları %1,4 ila %3,1 arasında değişirken; 800°C'de bu değerler %10,9 ila %12,3 arasında değişiklik göstermiştir. Özellikle 400°C'den sonra betonların ağırlık kayıplarında dikkate değer ölçüde artışların meydana geldiği söylenebilir. Yüksek sıcaklık etkisi bir yapıda genellikle yangınla birlikte meydana gelir. Yangın veya yüksek sıcaklık etkisi sonucu, beton içinde ve beton içyapısındaki suyun buharlaşması sonucu ağırlık kayıpları oluşur. 200°C'ye kadar olan buharlaşmalar genellikle beton yapısındaki serbest suyun buharlaşması ile ilgiliyken, bu sıcaklıktan daha büyük sıcaklıktaki buharlaşmaların genellikle hidrasyon reaksiyon ürünlerinin yapısındaki suyun buharlaşması ile ilgili olduğu da bazı araştırmacılar tarafından savunulmuştur (Liu vd., 2024). Bu bilgi bize 400°C ve daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelen yüksek orandaki ağırlık kaybını daha net bir şekilde açıklamaktadır.





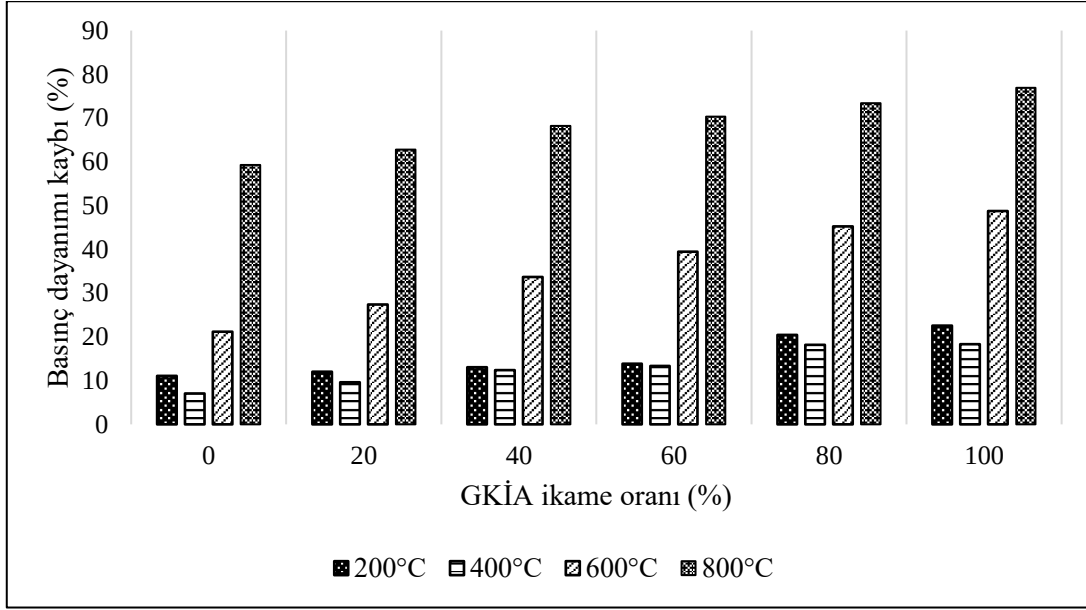
Şekil 26. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları

GKİA ikame oranı artışı ile betonların ağırlık kayıpları da artış göstermiştir. Örneğin; %0 GKİA içeren betonun 600°C'ye maruz kaldıktan sonra ağırlığında %8,4 oranında bir azalma olurken %100 GKİA ikameli betonun 600°C'ye maruz kaldıktan sonra ağırlığında %10,6 oranında bir azalma olmuştur. Sonuç olarak, 600°C sıcaklığı için GKİA ikame oranının %0'dan %100'e çıkarılması ile birlikte ağırlık kaybında %26 oranında bir artış meydana geldiği hesaplanabilir. Bu oran diğer tüm sıcaklıklar için hesaplandığında %100 GKİA içeren betonların, GKİA içermeyen betonlara kıyasla ağırlık kayıplarında meydana gelen artışın ortalama olarak %44 mertebelerinde olduğu hesaplanır. Aynı şekilde %20 ve %40 GKİA içeren betonların, GKİA içermeyen betonlara kıyasla ağırlık kayıplarında meydana gelen artış ise sırayla ortalama olarak %2 ve %5 mertebelerinde kalmakta olduğu görülmektedir. Ağırlık kaybı açısından bakıldığında %20 ve hatta %40 GKİA içeriğine kadar hafif betonların ağırlık kayıplarında ciddi bir değişimin olmadığı söylenebilir. GKA içeren betonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışlarının araştırıldığı bir çalışmada GKA'nın fazla miktarda ve su emmeye yatkın olan gözenekli yapısından dolayı ısıtma işlemi esnasında betonun ağırlığındaki kayıplarda artış meydana geldiği bu ağırlık kaybının ise mekanik ve fiziksel özellikler üzerinde olumsuz yönde etki meydana getirdiği belirtilmiştir (Marques vd., 2013). Literatürden elde edilen bu sonuç ile GKİA ikame oranının artışı ile meydana gelen ağırlık kaybının artması durumunu açıklamaktadır. Çalışmada kullanılan GKİA'nın gerek su emmesinin yüksek olması, gerek agrega üzerinde yapışan eski çimento hamuru varlığı nedeniyle su emmenin yüksek olması nedeniyle betonların su emme özelliğinde bir artış

gözlemlenmektedir. Bu duruma ayrıca eski ve yeni ara yüzeylerdeki boşluklu ve mikro çatlaklı yapının da eklenmesi ile GKİA ikameli betonlardaki ağırlık kaybının daha yüksek olduğu düşünülmektedir. Ayrıca ağırlık kaybının bir diğer nedeni de yüksek sıcaklık etkisi sonucu çatlayıp, dökülüp, kapak atmaların olduğunu da söylemek mümkündür.

#### **5.6.2. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası betonlarda meydana gelen basınç dayanımı kayıpları**

Şekil 27’de yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların oda sıcaklıklarındaki betonların basınç dayanımlarına kıyasla basınç dayanımlarında meydana gelen kayıplar yüzde olarak verilmiştir. Şekil 27’den görüleceği üzere basınç dayanımı kayıpları yüksek sıcaklığa maruz kalma derecesi arttıkça artış göstermiştir. Her bir GKİA ikamesine sahip betonların ortalaması alındığında basınç dayanımlarında meydana gelen azalma; 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C için sırasıyla yaklaşık %16, %13, %36 ve %69 olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere 200°C, 400°C sıcaklıklarına maruz kalındığında basınç dayanımlarında olan azalma miktarı çok yüksek olmamakla birlikte 800°C’ye maruz kalan betonlar için ciddi oranda bir basınç dayanımı azalması meydana gelmiştir. Yapılan bir çalışmada hafif betonlara uygulanan 1 saatlik 750°C sıcaklığa maruziyet sonrasında meydana gelen basınç dayanımı kaybının %70 olduğu bulunmuştur (Bingöl ve Gül, 2004). Başka bir çalışmada ise 900°C’ye maruz bırakılan hafif betonların basınç dayanımlarında %67’lere varan oranda azalma olduğu vurgulanmıştır (Lotfy vd., 2016). Bu sonuçlar bize çalışmamızdan elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğunu göstermektedir.

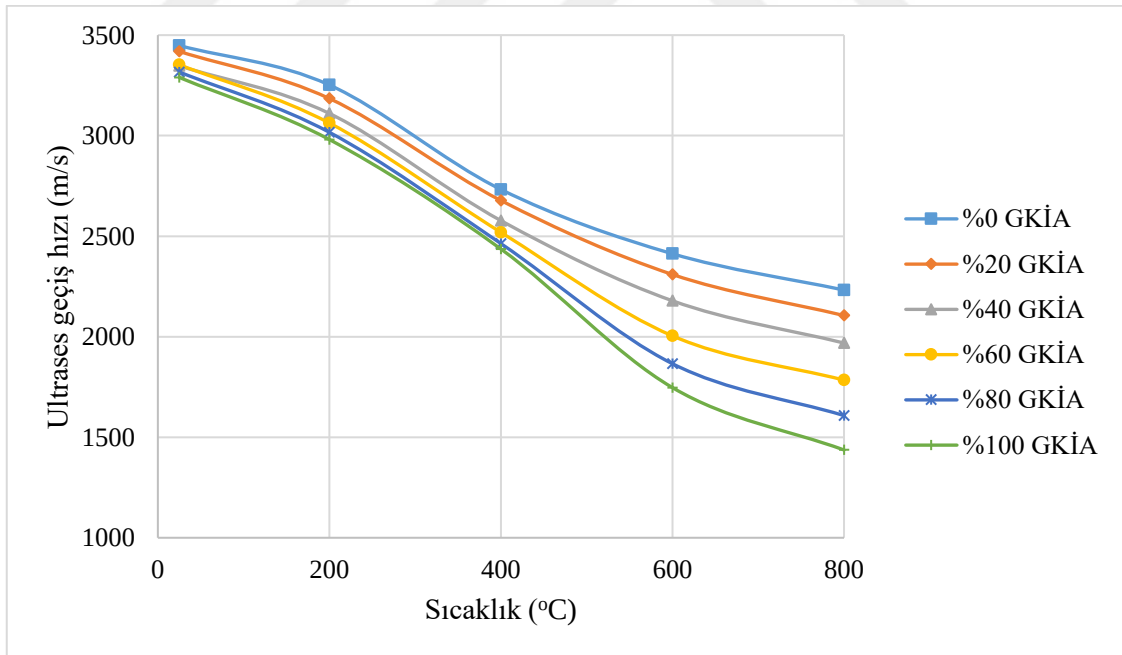


Şekil 27. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası betonlarda meydana gelen basınç dayanımı kayıpları

Şekil 27’de GKİA ikame oranı artışına bağlı olarak basınç dayanımı kayıplarında artışlar olduğu görülmektedir. Ortalama olarak, %20 ve %40 GKİA ikame oranına sahip numunelerin, GKİA içermeyen (%0) betona kıyasla, basınç dayanımı kayıplarında meydana gelen artış sırasıyla %20 ve %40 mertebelerindedir. Bu oranlardan daha fazla GKİA ikamesine sahip betonların, GKİA içermeyen (%0) betona kıyasla, basınç dayanımı kayıplarında meydana gelen artışta ciddi oranlarda artmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklıkta (800°C) GKİA ikame oranı artışıyla basınç dayanımlarında meydana gelen artış oranı nispeten düşük iken düşük sıcaklıklarda bu oran daha yüksektir. Örneğin; 200°C sıcaklığa maruz kalan numuneler incelendiğinde GKİA ikame oranının %0’dan %100’ çıkması ile basınç dayanımı kaybında %100’den fazla bir artış olduğu hesaplanırken, 800°C için bu oranın %30 olduğu görülmektedir. Sonuç olarak yüksek sıcaklıklarda GKİA ikamesi etkisinin azaldığı söylenebilir. GKİA’nın sahip olduğu ara yüzeyin zayıf yapısı nedeniyle GKİA içeren betonların porozitesi ve su emme oranları artmakta ve yangın performansları azalmaktadır (Chen vd., 2014; Ying vd., 2024). Yüksek sıcaklık etkisiyle birlikte betonarmede bulunan beton ve çeliğin mekanik özellikleri önemli ölçüde değişebilir. Özellikle 600°C sıcaklıktan sonra iç yapıdaki değişikliklerle birlikte meydana gelen mekanik özelliklerdeki bu bozulma ile yapıda önemli hasarlar meydana gelebilir (Raj vd., 2016). 300°C’yi geçtikten sonra betonun basınç dayanımında azalmalar meydana gelmeye başlar ve 700°C’yi aştığında betonun mekanik özelliklerinin ciddi ölçüde azaldığı belirtilir (Li vd., 2019; Vafaei vd. 2022). Bu etkiler grafikten de net bir şekilde okunabilmektedir.

### 5.6.3. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası hafif betonların ultrases geçiş hızları

Yüksek sıcaklık ve betonların ultrases geçiş hızları ilişkisi Şekil 28’de verilmiştir. İlgili grafikten, en yüksek ultrases geçiş hızı değerlerinin GKİA içermeyen (%0) betonlarda olduğu görülmekte olup, bu beton için oda sıcaklığında ölçülen ultrases geçiş hızı değeri 3448 m/s’dir. GKİA içermeyen (%0) betonun 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklarına maruz kaldıktan sonra, ultrases geçiş hızlarındaki azalma sırasıyla; %6, %21, %30 ve %35 oranında olmuştur. 200°C’ye maruz kalan betonların ultrases geçiş hızlarında çok küçük bir azalma meydana gelirken, daha yüksek sıcaklıklarda ultrases geçiş hızlarında ciddi oranlarda kayıp meydana geldiği görülmektedir. Hafif beton üzerine yapılan bir çalışmada; oda sıcaklığında ölçülen UGH değeri 3,59 km/s ve 800°C’ye maruz kaldıktan sonra ölçülen UGH değeri 1,97 km/s olarak bulunmuş olup böylece 800°C’de UGH değerinin %45 oranında azaldığı görülmektedir (Akçazoğlu ve Akçaoğlu, 2017). Başka bir çalışmada ise oda sıcaklığında ölçülen UGH değerine göre 800°C’de ölçülen UGH değeri %77 oranında azalmıştır (Choi vd., 2021). Literatürdeki çalışmalardan elde edilen değerler çalışmamızda elde edilen değerlerle benzerlik göstermekte olup literatürle uyumlu sonuçlara ulaşıldığı söylenebilir.



Şekil 28. Yüksek sıcaklığın ultrases geçiş değerleri üzerindeki etkisi

Şekil 28’de her bir sıcaklık değeri için, GKİA ikame oranı artışı ile UGH’nin azaldığı görülmektedir. Oda sıcaklığı için; GKİA içermeyen betona (%0) kıyasla %100 GKİA içeren betonun UGH değerindeki azalma %5 olarak hesaplanır. Görüldüğü gibi oda sıcaklığında yapılan ölçümlerde geçerli olmak üzere tüm ince agrega GKİA ile ikame edilmiş olsa bile ultrases geçiş hızlarında büyük bir azalma olmamaktadır. 800°C sıcaklığa maruz kalmış betonlar için; GKİA içermeyen betona (%0) kıyasla %100 GKİA içeren betonun UGH değerindeki azalma %36 olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi GKİA içeren betonun yüksek sıcaklığa maruziyeti sonrasında UGH değerlerinin GKİA içermeyen betona kıyasla daha yüksek oranda azaldığı sonucuna varılmaktadır.

GKİA içermeyen beton (%0) için, 25°C sıcaklıkta ölçümü yapılan betona kıyasla 800°C’ye maruz kalan betonda UGH değerindeki azalma %35 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu oran (kayıp), %20 GKİA içeriğine ve %100 GKİA içeriğine sahip betonlarda ise sırasıyla %38 ve %56 oranında olduğu görülür. Buradan UGH değerlerinde %20 GKİA ikameli betonun GKİA içermeyen (%0) betona kıyasla sıcaklık artışıyla beraber UGH değerlerindeki kayıpların oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yani %20 GKİA’nın betonlarda kullanımının beton özelliklerini olumsuz etkilemesi bakımından dikkate değer bir değişim meydana getirmediği savunulabilir.

Yüksek sıcaklık etkisinde, GKİA ikame oranı artışına bağlı olarak gerek yüksek sıcaklıkta gerek normal koşullarda, betonların UGH değerlerindeki azalma temel olarak üç sebebe bağlanmaktadır. Bunlar;

- Eski çimento hamuru ile yeni çimento hamuru arasındaki zayıf ara yüzey,
- GKİA’nın yüksek sıcaklıklardaki daha zayıf mukavemeti,
- GKİA’da olmuş olabilecek mikro çatlaklardır. (Gales vd., 2016).

Bu nedenlerden dolayı GKİA ikame oranı artışıyla birlikte betonların performanslarında azalmalar meydana gelmektedir. Betonların kalitesine ilişkin IS 13311 (IS 13311) standardından elde edilen sınıflandırma Tablo 16’da verilmiştir.

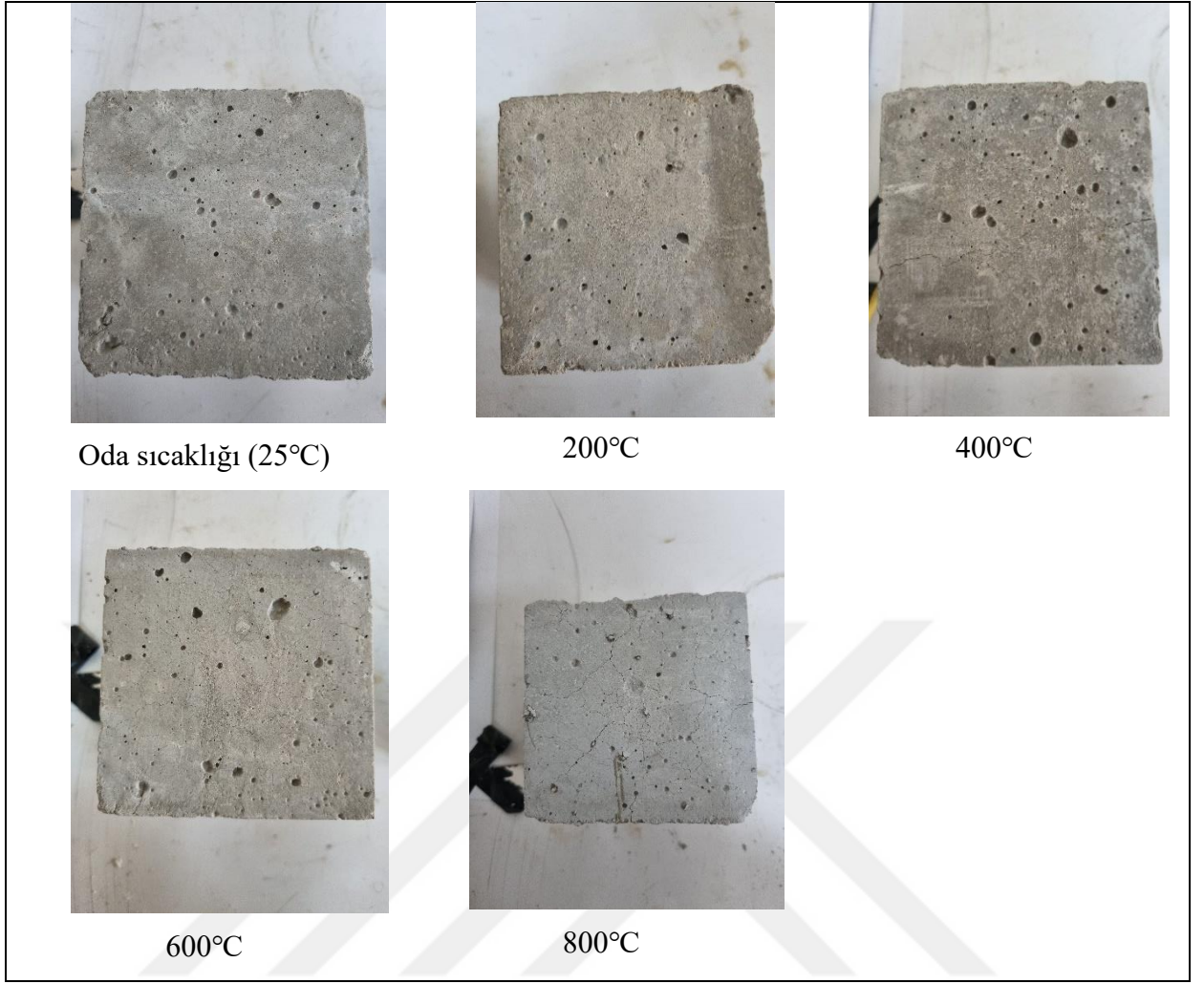
Tablo 16. UGH değerlerine göre betonların kalite sınıflandırması

| UGH (km/s) | Betonun kalitesi |
|------------|------------------|
| > 4,5      | Mükemmel         |
| 3,5 – 4,5  | İyi              |
| 3,0 – 3,5  | Orta             |
| < 3,0      | Şüpheli          |

Tablo 16’da göre oda sıcaklığındaki tüm betonlar ve %100 GKİA içeriğine sahip beton dışındaki 200°C sıcaklığa maruz kalmış tüm betonlar orta kaliteye sahip betonlar olarak sınıflandırılabilir. Sıcaklık arttıkça (400°C ve üstü) betonların kalite sınıflandırması şüpheli kategorisine girmektedir. Yüksek sıcaklığın betonların kalitesi üzerindeki olumsuz etkisini bu sonuçlar bize net bir şekilde göstermiştir. Benzer sonuçlar diğer çalışmalarda da rastlamıştır (Akçaözoğlu ve Akçaözoğlu, 2017).

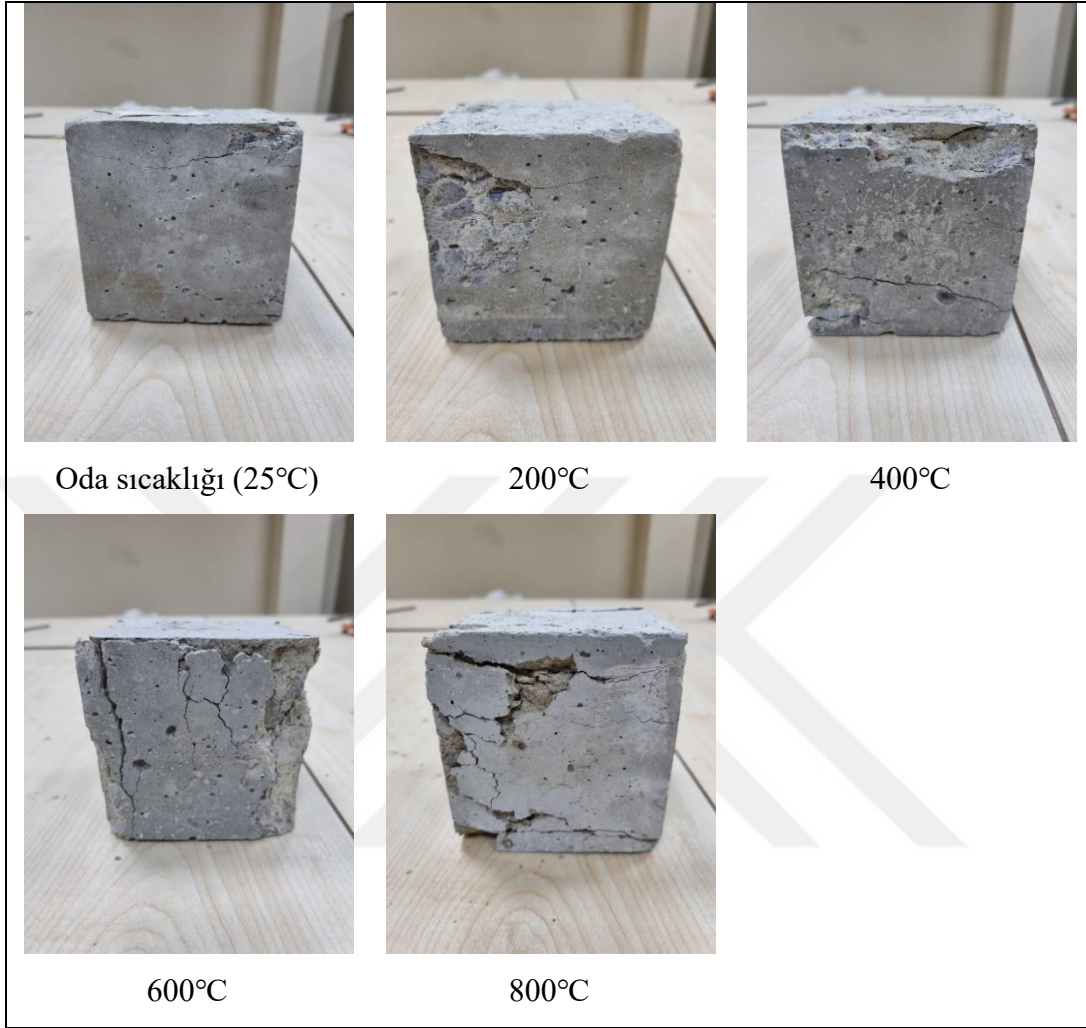
#### 5.6.4. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası hafif betonların görsel olarak incelenmesi

Bu bölümde GKİA içermeyen (%0) ve %100 GKİA içeren beton numunelerden çekilmiş fotoğraflar sunulmuştur. Şekil 29’da GKİA içermeyen beton numunelerin basınç dayanımı testi öncesinde çekilmiş fotoğraflar, Şekil 30’da ise GKİA içermeyen beton numunelerin basınç dayanımı testi sonrası çekilen fotoğraflar verilmiştir.



Şekil 29. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış GKİA içermeyen (%0) beton numuneler (basınç dayanımı testi öncesi)

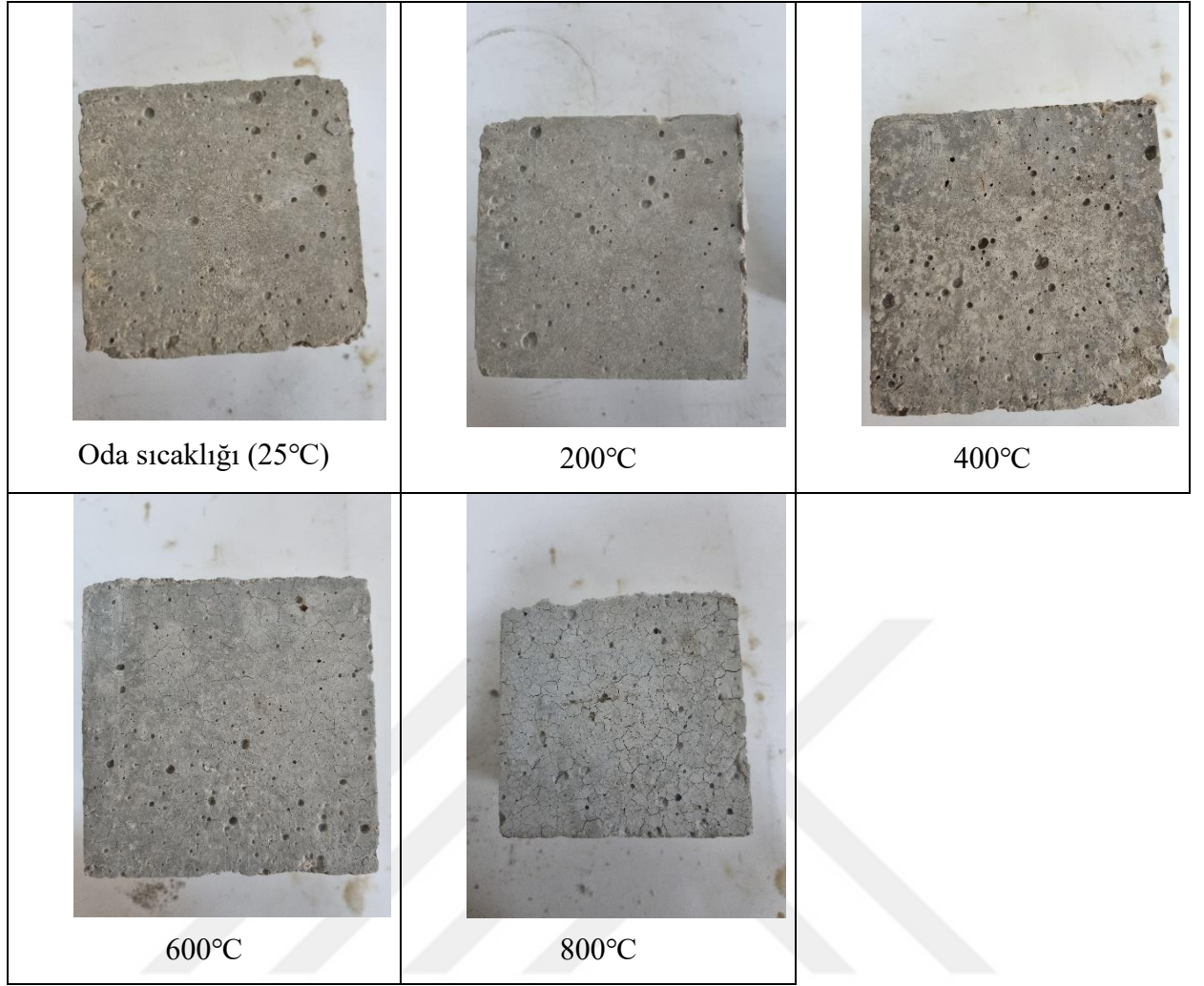
Şekil 29 incelendiğinde sıcaklığın artması ile birlikte beton daha çatlaklı bir hal almakta ve numunenin ağırlığının azaldığı hissedilebilmektedir. Numune üzerindeki çatlaklı yapı özellikle 800°C’de daha belirgin bir hal almıştır. Şekil 30 incelendiğinde ise düşük sıcaklıklara maruz kalan beton numunelerin basınç dayanımı testi sonrası daha az deforme olduğu, yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerde ise basınç dayanımı testi sonrası daha fazla çatlak oluşumu ve deformasyon miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca 800°C’ye maruz kalmış numunelerde oluşan çatlaklı yapıda, daha kuru ve kahverengi tonlarda bir içyapı meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 30. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış GKİA içermeyen (%0) beton numuneler (basınç dayanımı testi sonrası)

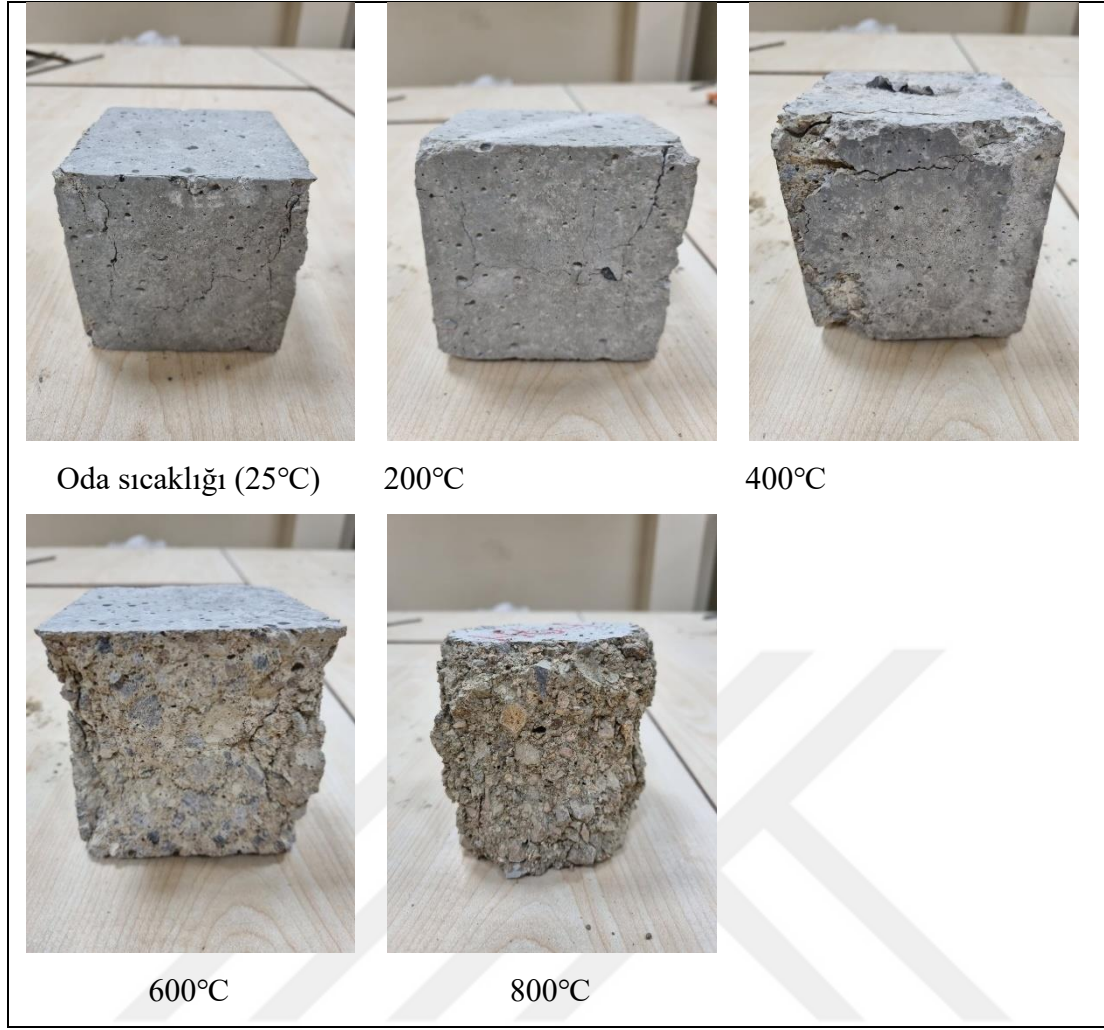
Şekil 31’de %100 GKİA içeren beton numunelerin basınç dayanımı testi öncesinde çekilmiş görüntüler, Şekil 32’de ise %100 GKİA içeren beton numunelerin basınç dayanımı testi sonrası çekilmiş görüntüler verilmiştir.





Şekil 31. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış %100 GKİA ikameli beton numuneler (basınç dayanımı testi öncesi)

Şekil 31 incelendiğinde, numunelerin maruz bırakıldığı sıcaklık yükseldiğinde numunelerin yüzeyindeki kılcal çatlakların GKİA içermeyen betonlara kıyasla arttığı görülmektedir. Çatlak oluşumu özellikle 600°C ve 800°C'ye maruz kalan numunelerde daha net görülmektedir. Şekil 32'de ise yüksek sıcaklığın etkisi ile betonların basınç dayanımı testi sonrası ciddi oranda bozuldukları görülmektedir. Özellikle 600°C ve 800°C'ye maruz kalan beton numunelerde betonlar üzerinde oluşan deformasyon ile betonlar kübik şeklini tamamen yitirmişlerdir.



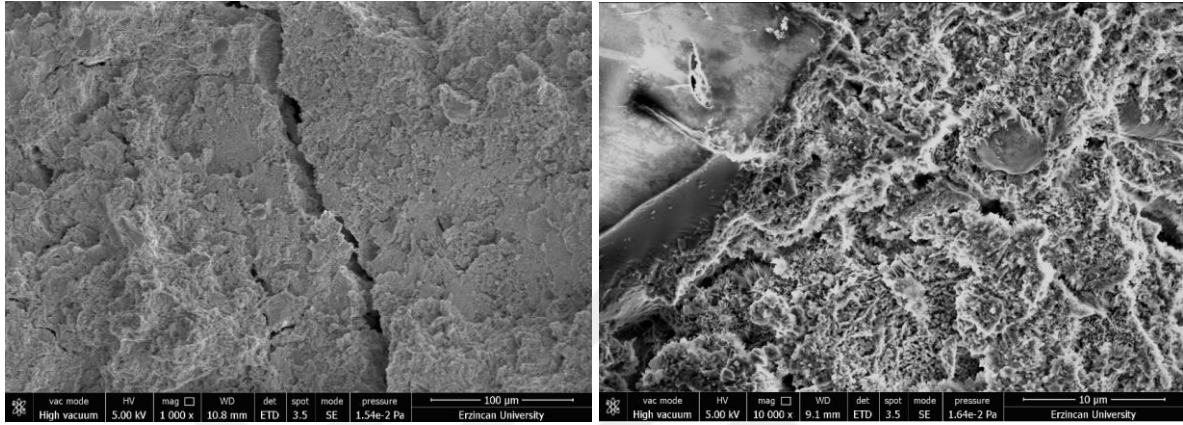
Şekil 32. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış %100 GKİA ikameli beton numuneler (basınç dayanımı testi sonrası)

Şekil 31 ve Şekil 32 birlikte irdelendiğinde %100 GKİA içeren beton 800°C gibi bir yüksek sıcaklığa maruz kaldığında GKİA içermeyen betona kıyasla daha fazla dökülmüş ve parçalanmış olduğu görülmektedir. Betonlarda GKİA kullanımı ile birlikte çimento hamuru ve agrega arasındaki arayüzeyde oluşan zayıf yapının betonların mekanik özelliklerine olan etkisinin görsel olarak burada belirgin bir hal aldığı görülmektedir. Bu nedenle mekanik özellikler irdelenirken de vurgulanan GKİA ikame oranının %40 oranını geçmemesi, hatta uygun değer olarak %20 oranında kullanılması önerilmektedir.

#### 5.6.5. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası hafif betonların mikro yapı analizi

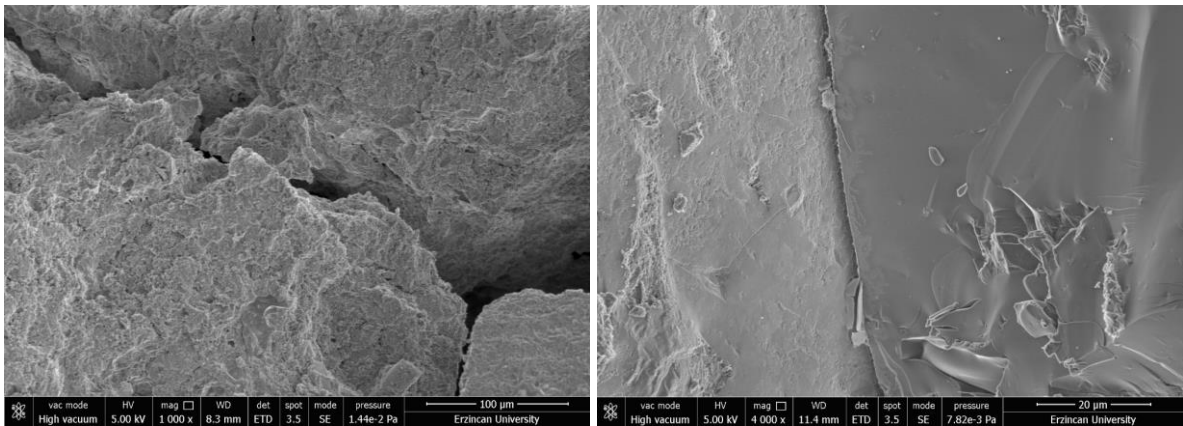
Hafif betonların mikro yapılarını analiz etmek amacıyla numunelerden SEM görüntüleri alınmış ve yorumlanmıştır. Üretilen hafif betonlarda en çok tahribat 800°C sıcaklıkta meydana geldiğinden, bu sıcaklığa maruz kalmış numuneler üzerinde SEM görüntüleri

alınmıştır. SEM görüntüleri yalnızca GKİA içermeyen (%0) beton ve %100 GKİA içerikli betondan alınmıştır. GKİA içermeyen betona ait farklı bölge ve büyüklükte çekilen SEM görüntüleri Şekil 33’te verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, yüksek sıcaklık etkisi ile birlikte özellikle hidrate çimento bileşenlerinin deformasyona uğradığı görülmektedir. Yapı içinde çatlaklar meydana geldiği ve agrega çimento hamuru ara yüzeyinin belirginleştiği görülmektedir.



Şekil 33. 800°C sıcaklığa maruz bırakılan GKİA içermeyen (%0) betona ait SEM görüntüleri

Şekil 34’te ise 800°C’ye maruz bırakılmış %100 GKİA ikameli hafif beton numunesinden farklı bölge ve büyüklüklerde alınmış SEM görüntüleri verilmiştir. Bu iki şekil birlikte incelendiğinde derin çatlaklı bölgelere rastlanmaktadır. Agrega-çimento hamuru ara yüzeyinin daha belirgin bir hal aldığı bölgelerin varlığına da rastlanmaktadır. Ara yüzey geçiş bölgelerinin derinliği dikkat çekicidir. Yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen gerek hidrate çimento bileşenleri gerek agregadaki yapı bozulmaları GKİA içermeyen betonlarınkine kıyasla daha belirgin bir halde görülmektedir.



Şekil 34. 800°C sıcaklığa maruz bırakılan %100 GKİA ikameli betona ait SEM görüntüleri

GKİA içeren ve içermeyen betonlar için kıyas yapılırsa, GKİA içermeyen betonlarda çatlak genişliği ve büyüklüğünün daha az olduğu görülmektedir. Ara yüzey bölgesindeki boşluk ve mikro çatlak miktarının %100 GKİA içeren betonda daha belirgin olduğu SEM fotoğraflarında ortaya çıkmıştır. Üzerinde yapışmış eski harcın varlığından dolayı mikro çatlak içeriği fazla olan GKA'nın beton üretiminde kullanılmasıyla birlikte beton fiziksel ve durabilite açısından zayıflar (Zhang and Zhao, 2015; Zeng vd., 2020). Çatlak derinliği fazla olan GKİA içerikli beton yüksek sıcaklıklardan daha fazla olumsuz etkilenebilmektedir. Bunun nedeninin beton içerisinde artan GKİA kullanımı ile birlikte betonun gözenek yapısındaki değişimlere, beton matrisinin yüksek sıcaklıklara maruz kalmasıyla oluşan termal genleşmeye ve diğer termal etkilere atfedilebilir (Alharthai vd., 2024). Sonuç olarak, üretilen hafif betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin GKİA ikame oranı artışıyla birlikte olumsuz yönde etkilenmesi durumunun SEM analizi sonucu ile paralellik gösterdiği görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Tamamen ham perlit agregası kullanılarak üretilen taşıyıcı hafif betonlarda, geri kazanılmış ince agreganın (GKİA), ince ham perlit agregası ile ikame edilmesinin hafif betonun özelliklerine etkisinin incelendiği bu deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar ve öneriler özetle maddeler halinde aşağıdaki gibi sunulabilir;

- Üretilen hafif betonlarda geri kazanılmış ince agregası (GKİA) ikame oranı arttıkça betonların birim ağırlıkları artmıştır. Fakat %100 GKİA kullanım oranında bile betonların yoğunlukları  $2000 \text{ kg/m}^3$ 'ten az olup üretilen tüm betonlar hafif beton sınıfındadır.
- Hafif betonların basınç dayanımları GKİA ikame oranı artışı ile azalmıştır. Bu azalma miktarı; %20 GKİA ikame oranında %4 gibi küçük bir değer iken, %100 GKİA ikame oranında ise %13 mertebesinde dir. Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması ile basınç dayanımlarında yaklaşık %3 mertebesinde bir artış meydana gelmiştir.
- GKİA ikame oranı artışı ile birlikte hafif betonların yarmada çekme dayanımları (YÇD) genellikle azalmıştır. En düşük yarmada çekme dayanımı %80 GKİA ikame oranına sahip betonda meydana gelmiş olup %100 GKİA ikame oranına sahip betonların yarmada çekme dayanımlarında tekrar bir artış olmuştur. %20 GKİA ikame oranına sahip betonların yarmada çekme dayanımları GKİA içermeyen betona kıyasla %8 oranında azalmıştır. Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması ile yarmada çekme dayanımlarında yaklaşık %3 mertebesinde bir artış meydana gelmiştir.
- Ultrases geçiş hızları GKİA ikame oranı artışına bağlı olarak azalmasına karşın önemli oranda etkilenmemiştir. GKİA içermeyen betona kıyasla %100 GKİA içeren betonlarda bile ultrases geçiş hızında %5 mertebesinde bir azalma olmuştur. Benzer şekilde kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması durumunda ultrases geçiş hızlarında artış meydana gelmesine rağmen bu artış %1,4 mertebesinde dir.

- Hafif betonların kılcallık katsayıları GKİA ikame oranı artışına paralel olarak ciddi bir şekilde artmıştır. %20 GKİA ikameli hafif betonların kılcallık katsayısı GKİA içermeyen betona kıyasla %16 oranında artmıştır. Kür süresinin 28 günden 90 güne çıkarılması ile kılcallık katsayılarında ortalama olarak %22 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Yüksek oranda GKİA içeren betonların kür süresinin uzatılması ile kılcallık katsayılarında meydana gelen azalmanın daha belirgin olduğu söylenebilir.
- 600°C ve 800°C gibi yüksek sıcaklıklara maruz kalan hafif betonların hem ağırlık kayıpları hem basınç dayanımı kayıpları ciddi düzeyde olmuştur. 800°C'ye maruz kalan hafif betonların basınç dayanımlarında ortalama olarak %69 seviyesinde bir kayıp meydana gelmiştir. GKİA ikame oranının artışı ile her bir sıcaklık maruziyeti için hem ağırlık hem basınç dayanımı kayıplarındaki artış yükselmiştir.
- Betonların maruz kaldığı sıcaklık yükseldikçe ultrases geçiş hızlarında büyük oranlarda azalmalar olmuştur. %20 GKİA içeren betonların ultrases geçiş hızlarındaki azalmanın GKİA içermeyen betona oldukça yakın olduğu görülmüştür.
- Yüksek sıcaklık sonrası gerçekleştirilen görsel değerlendirme ve SEM görüntülerinin ağırlık kaybı, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı deneylerinden elde edilen sonuçları destekler nitelikte olduğu görülmüştür.
- Deprem bölgesi olan ülkemizde yapıların depremden asgari düzeyde etkilenmesi için yapının ağırlığının az olması önemlidir. Hafif taşıyıcı betonlar bu açıdan tercih edilmektedir. Diğer taraftan sürdürülebilirlik ve çevre dostu bir beton üretmek için geri kazanılmış agregaların betonlarda kullanılması önem arz etmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada GKİA'nın perlit agregası içeren hafif betonlarda ince agrega ile ikame edilerek kullanılmasının betonların özellikleri üzerinde olumsuz etki oluşturduğu görülmesine karşın, GKİA'nın düşük oranlarda kullanımının uygun olabileceği görülmüştür. %20 GKİA ikameli hafif betonların GKİA içermeyen betonlara kıyasla incelenen birçok özelliğinde önemli oranda bir olumsuzluk oluşmadığı söylenebilir. Ayrıca GKİA kullanımı ile hafif betonlarda oluşan negatif etkilerin kür süresinin uzatılmasıyla azaltılabileceği görülmüştür.

## 6.2. Öneriler

Aşağıda verilen öneriler doğrultusunda çalışmaların yapılması gelecekte yapıların inşasında ham perlit ve GKİA içeren betonların kullanılmasını yaygın hale getirilebilir. Bunlar;

- %20'den daha az oranda GKİA içeren ham perlit agregalı hafif betonların özelliklerini incelemek,
- Mineral katkılarla birlikte geri kazanılmış agreganın ham perlit agregalı hafif betonlara olan etkisini incelemek,
- Daha farklı durabilite deneyleri gerçekleştirerek bu tip betonların özelliklerini çok yönlü ortaya koymak şeklinde sıralanabilir.

## KAYNAKÇA

- Acar, C. T. ve Ramyar, K. (2024). Ham perlit agregasının betonun mekanik ve taşıyım özelliklerine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(3), 386-394.
- Ahn, E., Shin, M., Popovics, J. S., & Weaver, R. L. (2019). Effectiveness of diffuse ultrasound for evaluation of micro-cracking damage in concrete. *Cement and Concrete Research*, 124, 105862.
- Akçaözoğlu, K. & Akçaözoğlu, S. (2017). The effect of elevated temperature on the lightweight concrete produced by expanded clay aggregate and calcium aluminate cement. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 1(2), 59-70.
- Aksüt, Y. S. (2015). *Erzincan-üzümlü yöresi volkanik kayaçlarının beton agregası olarak kullanılabilirliği*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 406524).
- Alexander, M. & Mindess, S. (2005). *Aggregates in concrete*. London: CRC Press.
- Alharthai, M., Mydin, M. A. O., Alimrani, N. S., Majeed, S. S., Tayeh, B. A. (2024). Evaluating deterioration of the properties of lightweight foamed concrete at elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 84, 108515.
- ASTM C 1585. (2013). Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, United States.
- Ayberk, M. (1995). *Perlitin yapı gereci olarak kullanımı ve yapı maliyetine etkisi*. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2010). *Beton ve betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite)*, İstanbul: THBB yayınları.



- Bingöl, A. F. & Gül, R. (2004). Compressive strength of lightweight aggregate concrete exposed to high temperatures. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 11, 68-72.
- Bu, C., Liu, L., Lu, X., Zhu, D., Sun, Y., Yu, L. vd. (2022). The durability of recycled fine aggregate concrete: A review. *Materials*, 15(3), 1110.
- Bungey, J. H. & Millard, S. (1996). Testing of concrete in structure, third edition. London: CRC Press.
- Cardoza, A. & Colorado H. A. (2023). Alkali-activated cement manufactured by the alkaline activation of demolition and construction waste using brick and concrete wastes. *Open Ceramics*, 16, 100438.
- Chandra, S. & Berntsson, L. (2002). Lightweight aggregate concrete. William Andrew.
- Chen, G. M., He, Y. H., Yang, H., Chen, J. F., Guo, Y. C. (2014). Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 71, 1–15.
- Chen, H. & Xu, Y. (2024). Fracture properties and acoustic emission characteristics of manufactured sand recycled fine aggregate concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 133, 104633.
- Choi, Y., Kang, J. W., Hwang, T. Y., Cho, C. G. (2021). Evaluation of residual strength with ultrasonic pulse velocity relationship for concrete exposed to high temperatures. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(9), 16878140211034992.
- Cilason, N. (1992). Beton. İstanbul: STFA Yayınları.
- Clarke, L. J. (2010). Hafif agregalı yapısal beton, Britanya Çimento Birliği.
- Çok, G., Erdinç, M., Erdinç, E. (2003). Mesleki perlit maruziyetinde bronkoalveoler lavaj sıvısı ve difüzyon kapasitesi sonuçları. *Solunum Hastalıkları*, 14(3), 165-168.

- Dedeoğlu, R. Ş. (2010). *Akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin beton üzerine etkilerinin incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 274724).
- DPT. (2001). *Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu - Endüstriyel hammaddeler alt komisyonu yapı malzemeleri III (pomza-perlit-vermikulit-flogopit-genleşen killer) çalışma grubu raporu*. <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/08/Sekizinci-Bes-Yillik-Kalkinma-Plani-Madencilik-OIK-Raporu-EndustriyelHammaddelerAltKomisyonu-YapiMalzemeleri-III-CalismaGrubuRaporu.pdf> adresinden 3 Mart 2025 tarihinde edinilmiştir.
- Dyer, T. (2014). *Concrete durability*. London: CRC Press.
- Engin, C. (2018). *Farklı tane boyutlu genişletilmiş perlit agregası ile üretilen ultra hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 502616).
- Erdoğan, T. (1995). *Betonu oluşturan malzemeler-çimentolar*, İstanbul: THBB yayınevi.
- Eser, H. (2014). *Ham perlit agregası ve perlit tozu kullanılarak yapılan yüksek performanslı taşıyıcı hafif beton*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 365605).
- Gales, J., Parker, T., Cree, D., Green, M. (2016). Fire performance of sustainable recycled concrete aggregates: mechanical properties at elevated temperatures and current research needs. *Fire Technology*, 52, 817-845.
- Gao, Y., Liu, G., Han, X., Gao, Q., Ren, J. (2024). Research on the design method of mix proportion of ceramsite lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 433, 136665.
- Gökçe, H. S. (2010). *Hafif beton üretiminde ham ve genleştirilmiş perlitin kullanılabilirliğinin araştırılması*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 269772).
- Gökhan, Ç. ve Baytın, D. (1978). Hafif agregalar ve perlit. *Mimarlık Dergisi*, 16(4), 73-79.

- Gül, R. & Geçten, O. (1994). Hafif agregalı betonun kullanılabilirliği. *DSİ Teknik Bülteni*, 81, 31-36.
- IS 13311. (1992). Part 1, Non-destructive testing of concrete – Methods of test – Ultrasonic pulse velocity. Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and concrete research*, 33(5), 703-711.
- Khir Allah, M. (2023). *Atık beton agregalı hafif betonların yüksek sıcaklık etkisinden sonra özellikleri*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 787096).
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C. (2002). Design and control of concrete mixtures, fourteenth edition. USA: Portland Cement Association.
- Kotan, T. (2009). *Pasinler ? Demirdöven pomzası ile üretilen hafif betonların mekanik özelliklerine atmosferik basınçlı buhar kürünün etkisi*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 246913).
- Li, Y., Yang, E. H. & Tan, K. H. (2019). Effects of heating followed by water quenching on strength and microstructure of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 207, 403-411.
- Liu, S., Zheng, W., Hou, X., Wang, Y. (2024). Research on the residual compressive properties of concrete with preload after sustained high temperatures. *Structures*, 65, 106764.
- Lotfy, A., Hossain, K. M., Lachemi, M. (2016). Durability properties of lightweight self-consolidating concrete developed with three types of aggregates. *Construction and Building Materials*, 106, 43-54.
- Lu, D., Fu, C., Jiang, X., Chen, Z., Qu, F., Huo, Y., Leng, Z., Zhong, J. (2024). Sustainable microwave-heating healing asphalt concrete incorporating functional aggregates and waste ferrite. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 129, 104117.

- Luccioni, B., Ambrosini, D., Nurick, G., Snyman, I. (2009). Craters produced by underground explosions. *Computers and Structures*, 87(21-22), 1366-1373.
- Mansour, S. M. & Ghernouti, Y. (2021). Behaviour of self-compacting concrete incorporating natural perlite used as part of cement and as aggregates. *Selected Scientific Papers- Journal of Civil Engineering*, 16(2), 115-132.
- Marques, A. M., Correia, J. R., De Brito, J. (2013). Post-Fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate. *Fire Safety Journal*, 58, 49-57.
- Mijan, R. S., Momeni, M., Hadianfard, M. A. (2024). Impact of fine lightweight aggregates and coal waste on structural lightweight concrete: Experimental study and gene expression programming. *Structures*, 63, 106397.
- Mohammed, T. U. & Mahmood, A. H. (2016). Effects of maximum aggregate size on UPV of brick aggregate concrete. *Ultrasonics*, 69, 129-136.
- MTA. (t.y.). *Perlit – pomza yatakları haritası*.  
[https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/images/b\\_h/perlit\\_pomza.jpg](https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/images/b_h/perlit_pomza.jpg) adresinden 3 Mart 2025 tarihinde edinilmiştir.
- Neville, A. M. (1975). Properties of concrete. London: Pitman Publishing.
- Neville, A. M. (1995). Properties of concrete. California University: Pearson.
- Nixon, P. J. (1978). Recycled concrete as an aggregate for concrete-a review. *Matériaux et Construction*, 11, 371-378.
- Ölmez, E. & Yıldız, Ş. (2008). *İnşaat ve yıkıntı atıklarının yönetimi ve planlanan İstanbul modeli*. Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları'08 Sempozyumu, İstanbul.
- Öztürk, E. (2019). *Yapılarda hafif beton kullanımında son gelişmeler*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 561945).
- Park, R. & Paulay, T. (1933). Reinforced concrete structure. Canada: A. Wiley -Interscience Publication.

- Park, R.& Paulay, T. (1991). Reinforced concrete structures. New York: Jonh Wiley and Sons.
- Pekdemir, M. (2011). *Hasankale Pasinler pomzası ile üretilen betonların bazı mekanik özelliklerinin araştırılması*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 299795).
- Polat, R., 2007. *Genleştirilmiş perlit ve pomza ile hava sürükleyici katkının betonda kılcal geçirimsizlik ve don hasarına etkisi*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 200795).
- Postacıoğlu, B. & Taşdemir, M. A. (1986). Depreme dayanıklı yapılarda doğal hafif agregalı betonlardan yararlanılması. *Deprem Semineri Bildiriler Kitabı, Yapı Endüstri Merkezi*.
- Postacıoğlu, B. (1987). Beton (Cilt 1). İstanbul: Matbaa Teknisyenleri Basımevi.
- Raj, H., Saraf, A., Sangal, S., Misra, S. (2016). Residual properties of TMT steel bars after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015098.
- Rashid, K., Fatima, N., Haq, E. U., Shaheen, N., Ju, M. (2023). Feasibility assessment of microwave-cured lightweight aggregate concrete by mineral encapsulated self-healing. *Journal of Building Engineering*, 76, 107084.
- Rilem, (1978). Functional classification of lightweight concrete. recommendation LC2. 2nd edition.
- Sayın, M. N. (2022). *Betonarme yapılarda beton basınç dayanımının yapı dinamik davranışına etkisi*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 747447).
- Seçer, O. (2008). *Yüksek sıcaklık etkisinden hasar görmüş lifli, hava sürükleyici katkılı ve perlit agregalı betonların dayanım özellikleri ve GFRP ile onarımı ve güçlendirilmesi*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 232362).

- Tam, V. W., Soomro, M., Evangelista, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, 172, 272-292.
- Tam, V. W. Y., Butera, A., Le, K. N., Li, W. (2023). Utilising CO<sub>2</sub> technologies for recycled aggregate concrete: A critical review. *Construction and Building Materials*, 172, 118903.
- Tandiroglu, A. (2010). Temperature-dependent thermal conductivity of high strength lightweight raw perlite aggregate concrete. *International journal of thermophysics*, 31, 1195-1211.
- Tang, Y., Xiao, J., Zhang, H., Duan, Z., Xia, B. (2022). Mechanical properties and uniaxial compressive stress-strain behavior of fully recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 323, 126546.
- Tangüner, R. (2007). *Uçucu küllü düşük ve yüksek mukavemetli betonların elastiklik modülünün incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 223639).
- Taşdemir, C. (2003). Hafif betonların ısı yalıtım ve taşıyıcılık özellikleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 427, 57-61.
- Taşdemir, M. A. (1982). *Taşıyıcı hafif agregalı betonların elastik ve elastik olmayan davranışları*. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi.
- Teoh, K. B., Chua, Y. S., Dai Pang, S., Kong, S. Y. (2023). Experimental investigation of lightweight aggregate concrete-filled cold-formed built-up box section (CFBBS) stub columns under axial compression. *Engineering Structures*, 279, 115630.
- Topal, E. S. (2023). *Kendiliğinden yerleşen hafif beton ile üretilen betonarme kirişlerde doğal perlit agrega ve perlit tozunun kullanımı*. (Yüksek lisans tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 836925).
- TS 2511. (1977). Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS 802. (1985). Beton karışımı hesap esasları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.

- TS EN 12350-2. (2010). Beton-taze beton deneyleri-bölüm 2: çökme (slump) deneyi. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12350-6. (2019). Beton-taze beton deneyleri-bölüm 6: birim hacim kütlesi. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-3. (2019). Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 3: deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-6. (2010). Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 6: deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 197-1. (2012). Çimento-bölüm 1: genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 206-1. (2002). Beton-bölüm 1: özellik, performans, imalat ve uygunluk. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- Ulas, M. A., Culcu, M. B. Ulucan, M. (2024). Valorization of recycled aggregates to eco-efficient lightweight self-compacting mortars: studies on microstructure, mechanical, durability, environmental, and economic properties. *Construction and Building Materials*, 419, 135436.
- Ulsen, C., Contessotto, R., dos Santos Macedo, R., Kahn, H. (2022). Quantification of the cement paste and phase's association in fine recycled aggregates by SEM-based image analysis. *Construction and Building Materials*, 320, 126206.
- Ulus, İ. (2007). *Ham perlit agregası kullanılarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliğinin araştırılması*. (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 200791).
- Vafaei, D., Ma, X., Hassanli, R., Duan, J., Zhuge, Y. (2022). Microstructural and mechanical properties of fiber-reinforced seawater sea-sand concrete under elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 50, 104140.

- Wadie, R. N. (2013). Properties of high strength structural lightweight mortar using perlite as partial replacement of fine aggregate. *Engineering and Technology Journal*, 31(2), 266-276.
- Wang, C. & Xiao, J. (2022). Material properties and structural behaviors of recycled fine aggregate concrete: an overview [in Chinese], *China Civ. Eng. J.*, 55(5), 37–53.
- Xie, T., Yang, G., Zhao, X., Xu, J., Fang, C. (2020). A unified model for predicting the compressive strength of recycled aggregate concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119752.
- Ying, J., Chen, W., Wang, W., Tian, Z., Liang, L., Chen, B. (2024). Multiscale study on high-temperature mechanical behaviors and durability of recycled concrete reinforced by polycarboxylate-modified 3D porous graphene. *Construction and Building Materials*, 450, 138676.
- Zakaria, N. Z. & Sulieman, M. Z. (2020). Difference curing conditions on the engineering properties of high strength lightweight reinforced concrete (HSLRC) using sawdust and coconut fiber. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 11(1), 206-214.
- Zeng, W., Zhao, Y., Zheng, H., sun Poon, C. (2020). Improvement in corrosion resistance of recycled aggregate concrete by nano silica suspension modification on recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 106, 103476.
- Zhang, H., & Zhao, Y. (2015). Integrated interface parameters of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 861-877.