

ALKALİLER, UÇUCU KÜL VE SİNERLEMENİN HAFİF AGREGA ÜRETİMİNE ETKİSİ

Canan MERCAN

Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK

Ocak – 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

Canan MERCAN tarafından hazırlanan “ALKALİLER, UÇUCU KÜL VE SİNERLEMENİN HAFİF AGREGA ÜRETİMİNE ETKİSİ” adlı tez çalışması, aşağıda belirtilen jüri tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek OY BİRLİĞİ ile Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

21/01/2020

Prof. Dr. Önder UYSAL
Enstitü Müdürü, Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Muhammet Çağatay KARABÖRK
Anabilim Dalı Başkanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı


Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK
Danışman, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı


Sınav Komitesi Üyeleri

Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK
Danışman, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

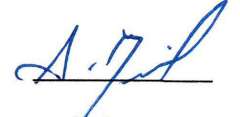
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah DEMİR
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi


Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi





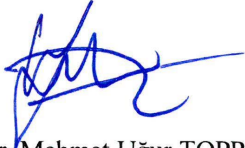






ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının % 18 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.



Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK



Canan MERCAN

ALKALİLER, UÇUCU KÜL VE SİNERLEMENİN HAFİF AGREGA ÜRETİMİNE ETKİSİ

Canan MERCAN

İnşaat Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2020

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK

ÖZET

Bu çalışmada sodyum karbonat (Na_2CO_3), evsel atık ve uçucu kül kullanılarak yüksek sıcaklıklarda, kilin geniştirilmesi yöntemiyle birim hacim ağırlığı düşük ve yüksek dayanımlı hafif agrega üretimi amaçlanmıştır. Deneysel karışımları (kil ağırlığı esas alınarak) %8 Na_2CO_3 , %5 evsel atık, %12 uçucu kül ve %8 Na_2CO_3 , %5 evsel atık, %17 uçucu kül şeklinde iki grup şeklinde hazırlanmıştır. Karışımlar preste farklı yüklerle sıkıştırılarak 12 adet hafif agrega numunesi üretilmiştir. Bu numuneler UK serisi numuneleri olarak adlandırılmış ve üretilen numuneler 1050 ve 1100°C sıcaklıklarda 4 dakika pişirilmiştir. Karşılaştırma yapılacak etken, uçucu kül miktarı ve sıcaklıktır. Numunelerin su emme, basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı ve hacimsel genişleme miktarları ölçülmüştür. UK serisi numunelerinden en yüksek dayanıma 14,8 MPa ile en düşük birim hacim ağırlığa ise 0,596 g/cm³ ile ulaşılmıştır.

Ayrıca NaOH, Na_2CO_3 ve KOH katkıları kil ile farklı oranlarda karıştırılarak hafif agrega üretimi amaçlanmıştır. Söz edilen her katkı (kil ağırlığı esas alınarak) %8-10-12 oranlarında kil ile karıştırılarak 9 karışım elde edilmiştir. Saf halde kilden 3 ve her karışımdan 3'er adet olmak üzere preste sıkıştırma yöntemiyle 30 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler HA serisi numuneleri olarak adlandırılmıştır. Her katkı ve katkı oranına sahip numune 920, 1000 ve 1100°C sıcaklıkta pişirilmiştir. Bu şekilde en uygun sıcaklık, katkı ve katkı oranı belirlenmiştir. Numuneler üzerinde su emme, basınç dayanımı ve birim hacim ağırlığı deneyleri yapılmıştır.

Üretilen numunelerin gözenekli olması kullanılan alanlarda ısı ve ses yalıtımı yönünden, hafif olması deprem nedeniyle yapıya etkiyecek yükleri azaltması yönünden avantaj sağlamaktadır. Literatür araştırması yapıldığında hafif agrega üretimi ile ilgili çok çalışma olmaması bu çalışmanın önemini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler : Hafif agrega, Sodyum karbonat (Na_2CO_3), Sodyum hidroksit (NaOH), Potasyum hidroksit (KOH), Uçucu kül

EFFECT OF ALKALIS, FLY ASH AND SINTERING IN PRODUCTION OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE

Canan MERCAN

Civil Engineering, M.S. Thesis, 2020

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK

SUMMARY

In this study, it is aimed to produce lightweight aggregate with low unit volume weight and high strength by using clay expansion method at high temperatures by using sodium carbonate (Na_2CO_3), domestic waste and fly ash. Experimental mixtures (based on clay weight) were prepared in two groups as %8 Na_2CO_3 , %5 household waste, %12 fly ash and %8 Na_2CO_3 , %5 household waste, %17 fly ash. 12 lightweight aggregate samples were produced by compressing the mixtures with different loads in the press. These samples were called UK series samples and the samples were cooked at 1050 and 1100°C for 4 minutes. The comparison factor is the amount of fly ash and temperature. Water absorption, compressive strength, unit volume weight and volumetric expansion of the samples were measured. The highest strength of the UK series samples was reached with 14.8 MPa and the lowest unit weight was 0.596 g / cm³.

In addition, NaOH, Na_2CO_3 and KOH additives were mixed with clay in different proportions to produce lightweight aggregate. Each additive (based on the weight of the clay) was mixed with 8-10-12% clay and 9 mixtures were obtained. 27 samples were produced by press compression method, 3 for of each mixture. The samples produced were named as HA series samples. The sample with each additive and additive ratio was baked at a temperature of 920, 1000 and 1100°C. In this way, optimum temperature, additive and additive ratio were determined. Water absorption, compressive strength and unit volume weight tests were performed on the samples.

The porosity of the produced samples provides an advantage in terms of heat and sound insulation in the areas where it is used, and because it is light, it reduces the loads that will affect the structure due to the earthquake. When the literature research is done, the lack of many studies about the production of lightweight aggregates reveals the importance of this study.

Keywords : Lightweight aggregate, Fly ash, Sodium carbonate (Na_2CO_3), Sodium hydroxide (NaOH), Potassium hydroxide (KOH)

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bana değerli görüş ve katkılarıyla yol gösteren, çalışmamın her kademesinde büyük bir özveri göstererek bana yardımcı olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK'a,

Çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Eda TAŞÇI'ya, Araş. Gör. Ahmet ÖZCAN'a ve Malzeme Mühendisi Musa AKMAN'a,

Yapılan üretim ve deney çalışmalarında her türlü desteği esirgemeyen Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvar çalışanlarına, projemin bir kısmında beraber yol aldığımız lisans öğrencisi Merwan Ali KERİM'e, fırınlarımı kullanmama olanak sağlayan Tülü Porselen Fabrikası'na, bilgi alışverişinde destek veren SÖĞÜT TOPRAK MADENCİLİK SANAYİ A.Ş.'ye ve Endüstri Mühendisi Aslıhan KALLIOĞULLARI'na teşekkürlerimi borç bilirim.

Bütün eğitim hayatım boyunca gösterdikleri anlayış ve yardımları ile birlikte maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, yaşamım boyunca bana sonsuz güvenen ve güç kaynağım olan babam Yurdakul MERCAN'a, annem Sabahat MERCAN'a ve ablam Ayşen MERCAN'a içtenlikle teşekkür ederim.

Canan MERCAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KİL.....	2
2.1. Kil ve Kil minerallerinin Tanımı.....	2
2.2. Kilin Tarihçesi.....	3
2.3. Kilin Oluşumu.....	4
2.4. Kilin Yapısı.....	4
2.5. Kilin Özellikleri.....	7
2.5.1. Plastisite.....	7
2.5.2. Kohezyon.....	8
2.5.3. Renk.....	8
2.5.4. Rötire.....	9
2.5.5. Sinterleşme.....	9
2.5.6. Yağlılık ve yağsızlık.....	9
2.6. Kil Minerallerinin Sınıflandırılması.....	9
2.7. Killerin Kullanım Alanları.....	11
2.8. Genleştirilmiş Kil.....	11
3. HAFİF AGREGA.....	14
3.1. Agreganın Tanımı.....	14
3.2. Hafif Agreganın Tanımı.....	15
3.3. Hafif Agregaların Özellikleri.....	17
3.3.1. Hafif agregaların su emmesi.....	17
3.3.2. Tane şekli ve yüzey dokusu.....	18
3.3.3. Birim ağırlık.....	18
3.3.4. Hafif agregaların iç yapı özellikleri.....	19
3.3.5. Hafif agregaların yoğunluğu.....	19

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.3.6. Özgül ağırlık.....	19
3.4. Hafif Agregaların Sınıflandırılması.....	20
4. HAFİF BETON.....	21
4.1. Hafif Betonun Tanımı.....	21
4.2. Hafif Beton.....	21
4.2.1. Hafif betonların avantajları.....	22
4.2.2. Hafif betonların dezavantajları.....	23
4.3. Hafif Betonların Sınıflandırılması.....	24
4.3.1. Taşıyıcı hafif betonlar.....	24
4.3.2. Taşıyıcı/yalıtım hafif betonları.....	24
4.3.3. Yalıtım hafif betonları.....	24
4.4. Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	25
4.4.1. Hafif betonun yoğunluğu.....	25
4.4.2. Hafif betonun basınç dayanımı.....	26
4.4.3. Hafif betonun ısı iletkenliği.....	27
4.4.4. Hafif betonun şekil değiştirmesi.....	28
4.4.5. Hafif betonun elastisite modülü.....	28
4.4.6. Hafif betonun sünmesi.....	28
4.4.7. Hafif betonun su emmesi.....	29
4.4.8. Hafif betonun işlenebilirliği.....	29
4.4.9. Hafif betonun dayanıklılığı.....	29
5. MATERYAL VE METOD.....	30
5.1. Kullanılan Malzemeler.....	30
5.1.1. Kil.....	30
5.1.2. Uçucu kül.....	31
5.1.3. Evsel atık.....	33
5.1.4. Sodyum hidroksit.....	33
5.1.5. Sodyum karbonat.....	34
5.1.6. Potasyum hidroksit.....	35
5.1.7. Su.....	35

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.2. Deneysel Çalışmalar.....	36
5.2.1. HA serisinde yapılan deneysel çalışmalar.....	37
5.2.2. UK serisinde yapılan deneysel çalışmalar.....	42
5.3. Hafif Agregalar İçin Yapılan Deneyler.....	44
5.3.1. Su emme testi.....	44
5.3.2. Basınç dayanımı testi.....	45
5.3.3. Birim hacim ağırlık testi.....	46
5.3.4. Hacimsel genleşme testi.....	47
5.3.5. LAB testi.....	47
5.3.6. Optik mikroskopla mikro yapı analizi.....	47
5.3.7. X-Ray difraksiyon analizi (XRD).....	47
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	48
6.1. HA Serisinden Elde Edilen Deney Sonuçları	48
6.1.1. HA serisi su emme testi sonuçları.....	48
6.1.2. HA serisi basınç dayanımı testi sonuçları.....	50
6.1.3. HA serisi birim hacim ağırlık testi sonuçları.....	53
6.1.4. HA serisi numunelerinin LAB testi sonuçları ve numunelerin boşluk yapısı.....	57
6.1.5. HA serisi numunelerinin mikroskop görüntüleri.....	59
6.1.6. HA serisi numunelerinin XRD analizi.....	61
6.2. UK Serisinden Elde Edilen Deney Sonuçları	64
6.2.1. UK serisi su emme testi sonuçları.....	64
6.2.2. UK serisi basınç dayanımı testi sonuçları.....	70
6.2.3. UK serisi birim hacim ağırlık testi sonuçları.....	73
6.2.4. UK serisi hacimsel genleşme yüzdesi testi sonuçları.....	77
6.2.5. UK serisi numunelerinin mikroskop görüntüleri.....	79
7. SONUÇ.....	82
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	84
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Kil tanelerinin tabaka yapılarının görüntüsü.....	3
2.2.a. Tetrahedron yapıtaşı, b. Oktahedron yapıtaşı.....	5
2.3. a. Tetrahedron yapıtaşı, b. Tetrahedronların hekzagonal yapıda düzenlenmesi ile oluşturulan tetrahedron tabakası, c. Oktahedron yapıtaşı, d. Oktahedron yapıtaşlarının oluşturduğu oktahedron tabakası.....	5
2.4. Kil minerallerinin yaprakçıklarında tetrahedron ve oktahedron tabakalarının sıralanışı.....	6
2.5. Kil minerallerinin tabakalarının arasına su moleküllerinin girişinin mineralin tabakalı yapısı ile ilişkisi.....	7
2.6. Genleştirilmiş kil.....	12
2.7. Genleştirilmiş kil agregası.....	17
4.1. Hafif betonların birim ağırlıkları ile ısı iletkenlik katsayıları arasındaki ilişki.....	28
5.1. Deneyde kullanılan uçucu kül.....	32
5.2. Evsel atık arıtma çamuru.....	33
5.3. Halkalı değirmenin görünümü	37
5.4. Nem tayin cihazı.....	40
5.5. Etüv görünümü	40
5.6. Tünel fırın.....	41
5.7. Kül fırın.....	44
5.8. 920°C’ de pişirilen HYM serisi numunelerinin 24 saat suda bekletilme görüntüsü.....	45
5.9. Numunenin prese yerleştirilmesi.....	46
5.10. Birim hacim ağırlığı oldukça düşük olan UK serisi numuneleri.....	46
6.1. 1000°C’de pişirilen HA serisi numunelerinin su emme yüzdeleri.....	50
6.2. 1000°C’de pişirilen HA serisi numunelerinin basınç dayanımları.....	52
6.3. 1000°C’de pişirilen HA serisi numunelerinin birim hacim ağırlıkları.....	55
6.4. HA serisi numunelerinin mikroskopik görüntüleri.....	60
6.5. NaOH katkısına sahip numunelerin XRD analizleri.....	62
6.6. Na ₂ CO ₃ katkısına sahip numunelerin XRD analizleri.....	63
6.7. KOH katkısına sahip numunelerin XRD analizleri.....	64
6.8. UK12-1-BE ve UK12-1-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.....	66
6.9. UK12-3-BE ve UK12-3-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.....	66

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.10. UK12-5-BE ve UK12-5-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.....	67
6.11. UK12 serisi agregalarının sıcaklık değişimine bağlı su emme miktarları.....	67
6.12. UK17-1-BE ve UK17-1-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.....	68
6.13. UK17-3-BE ve UK17-3-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.....	68
6.14. UK17-5-BE ve UK17-5-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.....	69
6.15. UK17 serisi agregalarının sıcaklık değişimine bağlı su emme miktarları.....	69
6.16. Sıcaklık değişimine göre UK12 serisi agregalarının dayanımları (MPa).....	71
6.17. Sıcaklık değişimine göre UK17 serisi agregalarının dayanımları (MPa).....	71
6.18. UK12 ve UK17 serisi agregalarının 1050°C sıcaklıkta pişirilmesi sonucunda ortaya çıkan basınç dayanımları (MPa).....	72
6.19. UK12 ve UK17 serisi agregalarının 1100°C sıcaklıkta pişirilmesi sonucunda ortaya çıkan basınç dayanımları (MPa).....	73
6.20. Sıcaklık değişimine göre UK12 serisi agregalarının birim hacim ağırlıkları (g/cm ³).....	75
6.21. Sıcaklık değişimine göre UK17 serisi agregalarının birim hacim ağırlıkları (g/cm ³).....	75
6.22. 1050°C sıcaklık etkisi altında UK12 ve UK17 serisi agregalarının birim hacim ağırlıkları (g/cm ³).....	76
6.23. 1100°C sıcaklık etkisi altında UK12 ve UK17 serisi agregalarının birim hacim ağırlıkları (g/cm ³).....	77
6.24. Sıcaklık değişimine göre UK12 serisi agregalarının hacimsel genleşme yüzdeleri.....	77
6.25. Sıcaklık değişimine göre UK17 serisi agregalarının hacimsel genleşme yüzdeleri.....	78
6.26. UK12-3-BE numunesinin mikroskopik görüntüsü.....	80
6.27. UK17-3-BE numunesinin mikroskopik görüntüsü.....	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Degens'e göre kil minerallerinin sınıflandırılması.....	10
2.2. Grim R.E' ye göre killerin sınıflandırılması.....	10
2.3. Genleşen kil kimyasal bileşenleri.....	13
3.1. Hafif agrega gevşek birim ağırlıkları.....	15
3.2. Hafif agregaların bazı özellikleri.....	17
4.1. Bazı hafif betonların genel özellikleri.....	22
4.2. Hafif beton sınıfları.....	25
4.3. Hafif beton basınç dayanım sınıfları.....	27
5.1. Kil hammaddesinin XRF analizi.....	31
5.2. Seyitömer uçucu külünün kimyasal kompozisyonu.....	32
5.3. Sodyum hidroksitin (NaOH) kimyasal özellikleri.....	34
5.4. Sodyum karbonatın (Na ₂ CO ₃) kimyasal özellikleri.....	34
5.5. Potasyum hidroksitin (KOH) kimyasal özellikleri	35
5.6. Deneyde kullanılan suyun özellikleri.....	36
5.7. HA serisi karışım oranları.....	39
5.8. UK serisi karışım oranları.....	43
6.1. HA serisi numunelerinin katkı, katkı oranı ve sıcaklıklara bağlı su emme yüzdeleri.....	49
6.2. HA serisi numunelerinin katkı, katkı oranı ve sıcaklıklara bağlı basınç dayanımları.....	51
6.3. HA serisi numunelerinin katkı, katkı oranı ve sıcaklıklara bağlı birim hacim ağırlıkları (g/cm ³).....	54
6.4. HA serisi numunelerinin deney sonuçları.....	56
6.5. HYM serisi numunelerinin boşluk yapısı ve LAB değerleri.....	57
6.6. UK12 serisi numunelerinin zamana bağlı su emme yüzdeleri.....	65
6.7. UK17 serisi numunelerinin zamana bağlı su emme yüzdeleri.....	65
6.8. UK12 ve UK17 serisi numunelerinin yüke ve sıcaklığa bağlı basınç dayanımları (MPa)..	70
6.9. UK12 ve UK17 serisi numunelerinin yüke ve sıcaklığa bağlı birim hacim ağırlıkları (g/cm ³).....	74
6.10. UK serisi numuneleri deney sonuçları	79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Simgeler**

λ	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat
μ	Mikron
γ	Özgül ağırlık

Kısaltmalar**Açıklama**

MPa	Megapaskal
m_s	Yüzey kuru suya doymun halde numunelerin ağırlıkları
m_k	24 saat sonunda etüvden çıkarılan numunelerin ağırlıkları
EK	Etüv kurusu
OM	Optik mikroskop

1. GİRİŞ

Dünyada hafif agrega kullanımı Babil'in inşasına kadar uzanmaktadır. Antik Yunan ve Roma'da hafif agrega amfiteyatrosu, tapınak, su kemeri gibi muhtelif yapıların inşasında yaygın olarak kullanılmıştır. Ülkemizde ve dünyada teknolojik özellikleri ve birçok endüstriyel hammadde türüne göre değişik avantajlara sahip olan hafif agregalar, giderek artan bir eğilimle farklı endüstri dallarında ve özellikle yapı endüstrisinde yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Günümüzde en yaygın kullanılan hafif agregalar, doğal malzemelerin fırınlarda yüksek sıcaklıkta genleştirilmesi ile üretilen yapay hafif agregalardır.

Deprem dayanımı malzeme açısından ele alındığında; taşıyıcı yapı elemanlarının yüksek dayanımlı olmaları, taşıyıcı olmayan elemanların ise yapının toplam ağırlığını azaltması açısından hafif olmaları amaçlanmaktadır.

Depremlerde yapıya gelen yükler yapının ağırlığı ile doğru orantılıdır. Yapının ağırlığına kadar hafif olursa, deprem etkisiyle daha az bir yükü zorlanacaktır. Betonarme bir yapının hafif olabilmesi için, dolgu ve bölme duvarlarının ve döşemelerin olabildiğince hafif malzemelerden yapılması gerekir (Bayülke, 1998).

Genleştirilmiş kil agregası kullanımı ile yapı ağırlığı azaldığından yapılara etki eden deprem kuvvetleri de azalmaktadır (Subaşı vd. 2009; Yaşar, 2003).

Doğal yolla oluşan mineraller ısı işleme tabi tutularak, hücreli veya köpüklü yapıda yapay agregalar üretilmektedir. Böylece büyük hacimsel ağırlık da azaltılmış olmaktadır.

Isıtıldığında hacim artışı gösterip içi boş bir malzeme oluşturan killere genleşen kil adı verilir. Genleştirilmiş killer hafif yapı malzemelerinin arasında basınç dayanımı en yüksek olanıdır. Bu killer pişme esnasında önemli derecede hacim artışı gösterirler. Killerin 1000-1300°C'de ısıtılmasıyla oluşan granüller, poroz seramik ürünleri olup homojen, kapalı ve küçük boşluklar halinde hücreler ihtiva ederler ve sinterleşmiş sert bir kabuk yapısına sahiptirler. Genleştirilmiş kilin en önemli özellikleri hafif olması, yüksek dayanımlı olması ve ısı izolasyonu sağlaması olarak sıralanabilir (Gündüz vd. 2006).

Genleştirilmiş kil agregası birçok ülkede üretilmekte ve yapay agrega olarak beton yapımında kullanılmaktadır. Genleştirilmiş kil agregasının dayanımı pomza, volkanik tüf ve cüruf gibi doğal agregaların dayanımlarına göre oldukça yüksektir (Subaşı vd. 2009; Lo vd. 2007).

2. KİL

Kil, binlerce yıldan beri insanoğlunun faydalandığı en eski ve önemli ham maddelerden biridir. Günümüze kadar önemini hiç kaybetmemiştir. Güzel sanatlardan ileri teknolojik malzemelere kadar hayatın birçok alanında kullanılmaktadır.

Killer hem tane boyutu hem de minerolojik yapısından dolayı çok karmaşık yapıya sahip maddelerdir. Bu karakteristik özellikleri sebebiyle de farklı ortamlarda farklı özellikler gösterirler. Killerin iyi tanımlanması için kil ve kil minerallerinin oluşumunun ve özelliklerinin incelenmesi gereklidir.

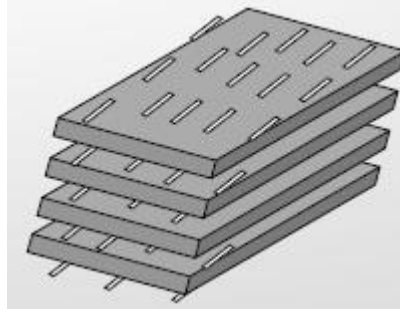
2.1. Kil ve Kil Minerallerinin Tanımı

Killer bilim insanları tarafından değişik şekillerde tanımlanmıştır. Jeologlara göre tane boyutu $< 2 \mu\text{m}$ olan mineraller kildir. İnşaat mühendisleri dayanım ve plastik özelliklerini seramikçiler pişme özelliklerini dikkate alarak tanım yapmıştır. Kimyacılar, kil içinde belli bir kristal yapıya sahip, hidratlaşmış alüminyum ya da magnezyum silikat mineral içeriğinin fazla miktarda olduğunu belirlemişlerdir ve bu yapıya kil adını vermişlerdir.

Kil doğada bol miktarda bulunan minerallerdendir. Ancak saf halde kil bulmak çok kolay değildir. En saf kil olarak bilinen ve Çin kilinde yüksek oranda bulunan kaolen $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ formülü ile gösterilmiştir. Kilin içerisinde alüminyum silikatlarla beraber, kalker, silis, mika, demir oksit, magnezyum, kalsiyum, sodyum ve kuvars gibi mineraller bulunmaktadır. Kilin yapısındaki yabancı maddelerden dolayı kilin rengi sarımtırak, kırmızımtırak, esmer gibi renklerde olabilir.

Killer; alüminyum ve silika içeriği yüksek, doğada oldukça fazla miktarda bulunan, yumuşak ve çok ince taneli, feldspat, mika ve diğer silikatların ayrışması ile oluşmuş sedimanter mineralleridir. (Rice, 1987:473).

Kil mineralleri su içerikli, su ile plastikliği yüksek olan ve çamur şekline getirilebilen, çamurun şekillendirilme işlemi sonrasında suyun uçurulmasıyla sertleşebilen ve yüksek sıcaklıklarda sinterleşebilen tabaka yapılı alüminasilikatlardır. Bünyelerinde mika minerali bulunmasından dolayı killer plastik özellik gösterirler. Kil taneleri defter sayfaları ya da kağıt destesi şeklinde tabakalar halinde yığılırlar. Bu tanelerden her biri negatif yüke sahiptir. Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kil tanelerinin tabaka yapılarının görüntüsü.

Killer amorf ya da plastik özellik gösterebilirler. Genel olarak plastik olan killerin doğal su içeriği %20 civarındadır. Ancak doğada bulunan kil tabakasının üzerindeki örtünün kalınlığına göre bu oran değişebilir. Killerin derinliğine göre su içeriği artıp azalabilir. Bu kalın örtü altında basınca maruz kalan ve porozitesini kaybeden killer şiferton olarak adlandırılır. Şifertonlar tabakalanma yüzeyine paralel bölünme gösterirler. Daha ileri evrede sıcaklık ve basınç etkisiyle killer şistlere dönüşür. Şiferton olarak adlandırılan ateş killeri, düşük miktarda demir oksit, kireç, magnezyum ve alkali içeriğine sahiptir. 1500°C ve daha yüksek sıcaklıklarda bozulma göstermeden kalabilirler.

2.2. Kilin Tarihçesi

Üzerinde yaşadığımız gezegenin kil ile tanışması büyük patlamadan hemen sonra bazaltın atmosferle etkileşimi ile olduğu düşünülmektedir. Çok sonra gezegeni diğer canlılarla birlikte paylaşmaya başlayan insanoğlu kili hemen keşfetmiş ve hayatında kullanmaya başlamıştır.

Kilin ne olduğuna dair 1920'li yıllara kadar önemli bir ilerleme yaşanmamıştır. Belli bir bileşime sahip olmayan amorf maddeler olarak bilinmiştir. Kil içinde silis, alüminyum, demir, magnezyum, kalsiyum, sodyum ve potasyum gibi elementlerin bulunduğu belirlenmiştir. Killerin kimyasal analizlerinin zeolitlerin kimyasal analizleriyle oldukça benzer olduğu görülmüştür (Karakaya, 2006).

İlk olarak 1922 yılında Wentworth, tane boyutu $< 4 \mu\text{m}$ (0.004 mm) olan taneciklere kil denilmesini teklif etmiştir (Wentworth, 1922).

X- ışınları yöntemi (XRD) ile analizler yapılmadan önce killer ya amorf ya da kristal amorf karışımı olarak değerlendirilmiş ve ayrı mineral olarak kabul edilmemiştir. İlk kez XRD

incelemesi 1923'de İsveç'te ve 1924'de de Almanya da ayrı olarak incelenmiştir. Kil minerallerinin kristal yapıda olduğu ortaya çıkarılmıştır. Kil minerallerinin tabakalı ya da lifli yapıda olduğu XRD analiziyle bulunmuştur. XRD analizleriyle kilin içinde farklı kil minerallerinin de olduğu tespit edilmiştir. Bunlar kaolinit, simektit, poligorskit, illit, klorit, sepiolit gibi minerallerdir (Karakaya, 2006).

Kil içinde kristal yapılı kil minerallerinin yanında kil dışı minerallerde safsızlık olarak amorf yapıda bulunur. Bu kil dışı mineraller silika, silikat, feldspat, karbonat, zeolit, fosfat, sülfat, oksit ve benzeri türden çok sayıdadırlar.

Sonuç olarak ana kil minerali simektit olan killere bentonit, kaolinit olan killere ise kaolin denilmektedir.

2.3. Kilin Oluşumu

Kayaçları oluşturan birincil minerallerin ayrışmasıyla kil mineralleri oluşur. Bu nedenle de ikincil silikatlar olarak adlandırılırlar. Yıpranmış olan ana kayaçtan kopan ve taşınan parçacıklar başka bir ortamda çökeler ve bu şekilde de kil oluşmaktadır (Önalp, 1997).

Killerin oluşumunda ortam önemli rol oynar. Örneğin, aynı mineralden farklı iklim ve ortam koşullarında farklı kil mineralleri oluşabildiği gibi, farklı minerallerden aynı ortam koşullarında aynı kil mineralleri de oluşabilir.

Kil minerallerinin oluşumunda birincil mineralin türü, ortamın sıcaklığı, iyon içeriği ve pH'ı en önemli etkenlerdir. Bu minerallerin hidrotermal koşullarda karakteristiklerinin çok farklı gerçekleştiği de ifade edilmiştir (Hsu, 1991).

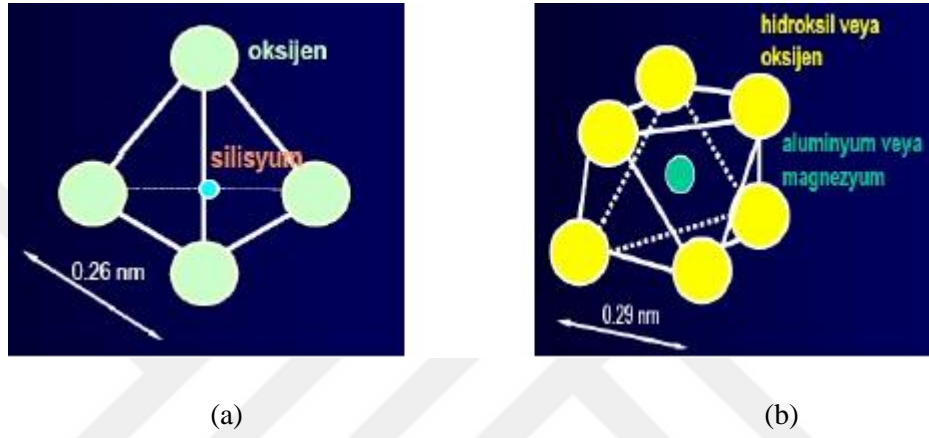
Kil mineralleri düşük ısıda alüminyum silikatların ayrışması ile oluşmuş minerallerdir. Killerin büyük bir kısmı genel olarak buldukları yerde oluşmayıp kendilerinden önce oluşan tortuların ürünleridir (Aras, 2004).

Uzun süreli jeolojik süreçlerle feldispatlar kil minerallerine dönüşür ve feldispatlar magmatik kayaçların ana bileşeni iken kil mineralleri çökeltilerin ana bileşenidir.

2.4. Kilin Yapısı

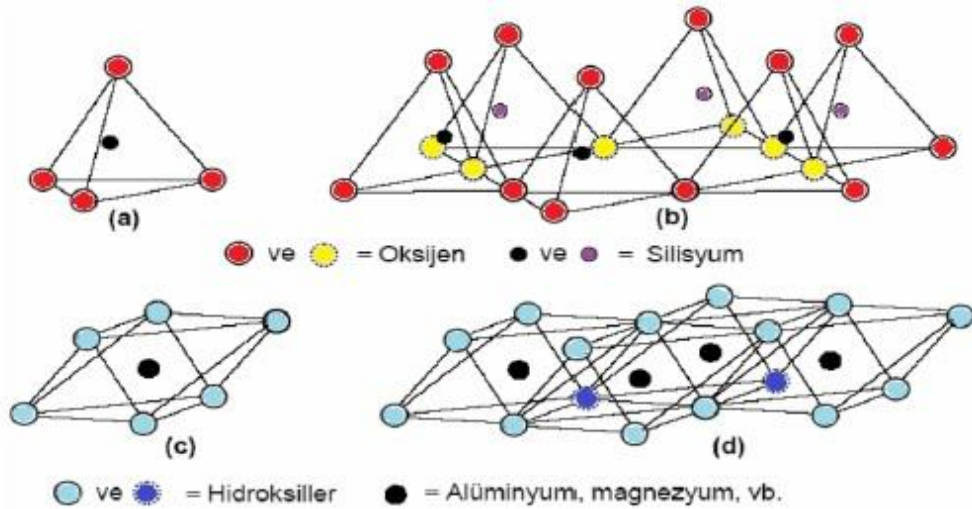
Kil minerallerinin düzgün dört yüzlü (tetrahedron) ve düzgün sekiz yüzlü (oktahedron) olmak üzere farklı iki yapıtaşından oluştuğu ilk olarak Pauling L. (1930) tarafından belirlenmiştir (Brindley ve Brown 1980).

Tetrahedron yapıtaşı [T: SiO_4^{4-}], kenarlarda oksijen atomu bulunan bir düzgün dört yüzlünün ortasına bir silisyum atomunun yerleşmiş halidir. Tetrahedron yapıtaşı SiO_2 olarak ifade edilir. Oktahedron yapıtaşı [O: $\text{AlO}_3(\text{OH})_3^{6-}$] ise bir alüminyum atomu etrafında yer almış altı oksijen atomundan oluşur. Bu yapı birimine gibsit adı verilir. Killerin yapıtaşları Şekil 2.2’de verilmiştir.



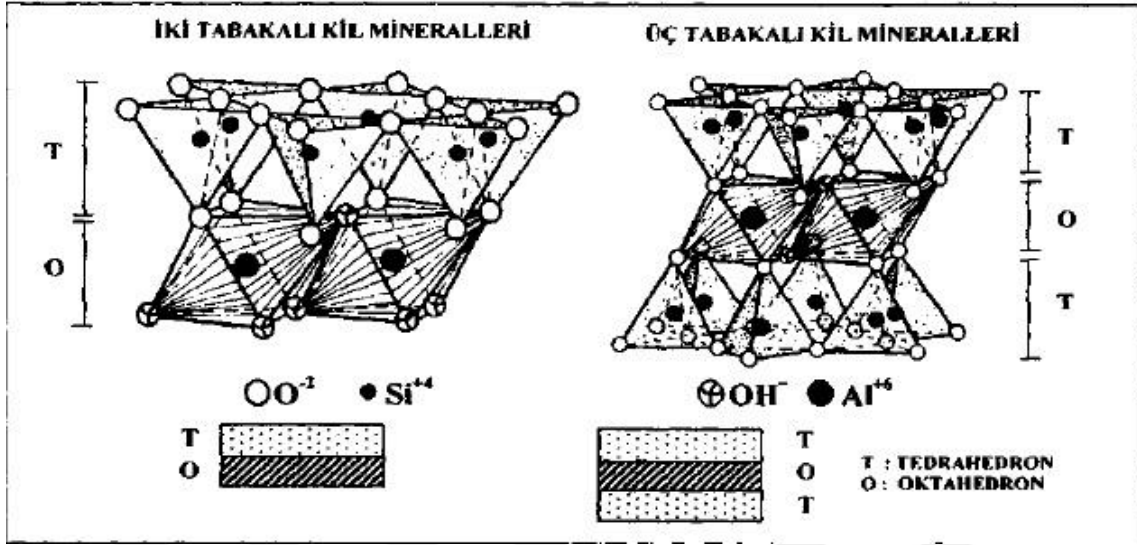
Şekil 2.2. a. Tetrahedron yapıtaşı, b. Oktahedron yapıtaşı (www.agri.ankara.edu.tr/soil_sciences/1248_toprak_kolloidleri.pdf, 2008).

Başka bir gösterimle killerin yapıtaşları Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



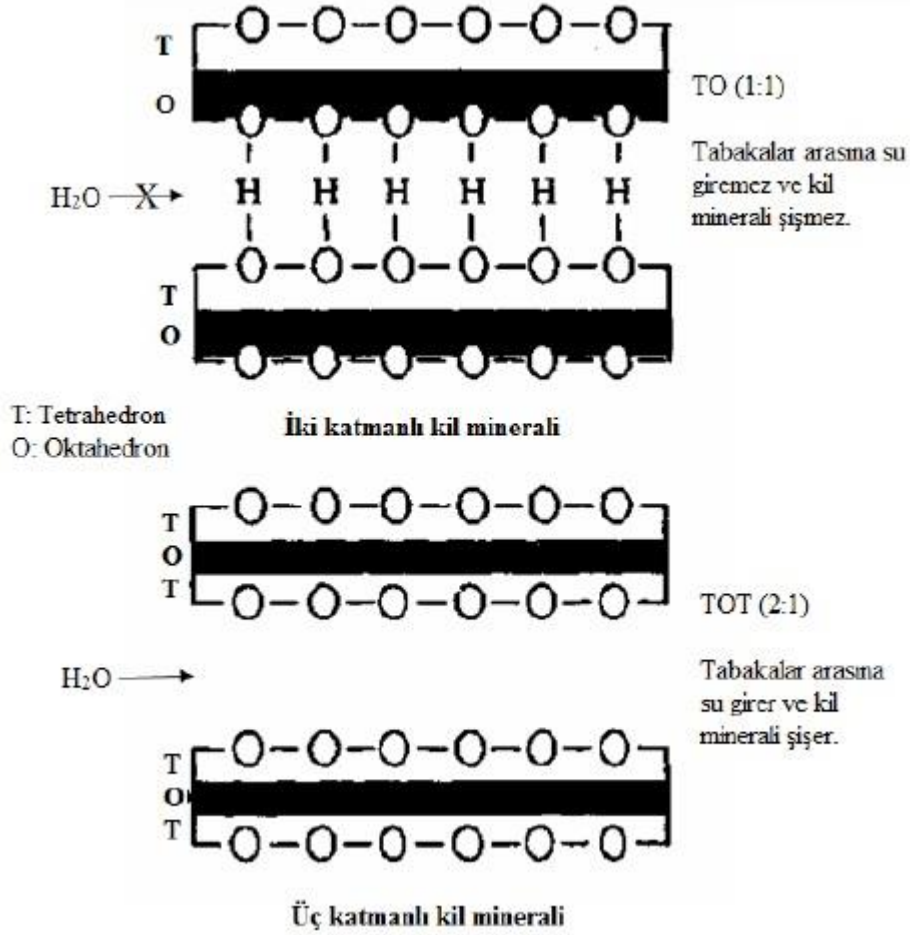
Şekil 2.3. a. Tetrahedron yapıtaşı, b. Tetrahedronların hekzagonal yapıda düzenlenmesi ile oluşturulan tetrahedron tabakası, c. Oktahedron yapıtaşı, d. Oktahedron yapıtaşlarının oluşturduğu oktahedron tabakası (Grim, 1968).

Kil minerallerinin yapısı yaprakçıklı bir şekildedir. Yaprakçıkların her biri iki, üç veya dört oktahedron ve tetrahedron oluşmaktadır. Tetrahedron ve oktahedronların üst üste ve yan yana getirilip oksijen köprüleri ile birbirine bağlanmalarıyla tabakalı bir yapı meydana gelir. Yaprakçıkların üst üste gelmesi ile de kil mineralleri oluşur (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Kil minerallerinin yaprakçıklarında tetrahedron ve oktahedron tabakalarının sıralanışı (Irmak, 1972).

İki katmanlı kil minerallerinde bulunan tetrahedronların oksijenleri, katmanın üst yüzeyinde bir oksijen tabakası oluştururken, oktahedronların alt yüzeyindeki oksijenlerin açıkta kalan negatif yükleri hidrojen iyonu (H^{+}) ile OH^{-} tabakası oluşturur. İki tabakalı bir kil yaprakçığının başka bir kil yaprakçığı ile üst üste gelmesi sonucunda tetrahedronların oksijenleri ile oktahedronların hidroksitleri karşı karşıya gelmiş olur. Bu iki tabaka arasında yer alan H^{+} iyonları, $O-H-O$ bağlantısının oluşmasını sağlarlar. Bu durum iki tabakalı kil minerallerinin yaprakçıkları arasında oluşan elektriksel çekim gücünün meydana gelmesini sağlar. Bu çekim gücü sayesinde katmanlar arasına su molekülleri giremez (Şekil 2.5). Yaprakçıklar arası da çok fazla açılmaz.



Şekil 2.5. Kil minerallerinin tabakalarının arasına su moleküllerinin girişinin mineralin tabakalı yapısı ile ilişkisi (w3.balikesir.edu.tr/~ozkan/ads/adsorpsiyon13.pps, 2008).

Kil mineralleri bu oluşumlara göre de sınıflandırılırlar. Oluşan tabakalar bir tetrahedral, bir oktahedral ise 1:1 tabakalı, iki tetrahedral, bir oktahedral ise 2:1 tabakalı, iki oktahedral, bir tetrahedral ve bir oktahedral ise 2:1+1 tabakalı olarak adlandırılır (Searle, A. B., Grimshaw, R.A., 1960) (Grim, R. E., 1953).

2.5. Kilin Özellikleri

Killerin plastisite, kohezyon, renk, rötre, sinterleşme, yağlılık ve yağsızlık gibi önemli özellikleri bulunmaktadır.

2.5.1. Plastisite

Kristallerinin ince ve levhacıklar halinde olmasından dolayı killerin plastiklik özellikleri ortaya çıkar. Bu levhacıklar üst üste birikmiş haldedirler. Kil su ile çamur haline getirildiğinde

levhacıklar arasına su dolar. Çamur şeklini alan malzemeye baskı uygulandığı zaman bu levhacıklar birbirleri üzerinden kayar ve verilmek istenen şekli oluştururlar. Killerin plastiklik özelliği kili işlenebilir halde çamur şekline getirmek için yeterli olan su miktarı ile tayin edilir. Kil çamur şeklini alana kadar ne kadar su emerse o kadar plastiktir. Killerin plastisite suyu %15 ile %40 arasında olmalıdır.

Kil ve su karıştırıldığında, kilin işlenebilme ve biçimlendirilebilme özelliği ortaya çıkar. Bu özelliğe plastisite denir. Tüm mineraller içinde, plastiklik özelliği olan ek mineral kildir (Press, Siever, 1998:42).

2.5.2. Kohezyon

Kohezyon özelliği, bir bütünü oluşturan bileşenlerin bir arada durabilme yeteneğidir. Bu özellik, kil hamurunun kuruduğu zaman kendisine verilmiş olan şekli muhafaza etme kabiliyetine sahip olmasıdır. Örneğin kum bu özelliğe sahip değildir ve ıslak halde kurumaya bırakıldığında ufak bir darbe sebebiyle kendi kendine dağılma gösterir. Kilin kohezyon özelliğine sahip olabilmesi için su ile karıştırılması gerekir. Sudan başka bir sıvıyla karıştırıldığında kohezyon özelliği kazanmaz.

2.5.3. Renk

Killer doğada beyaz, sarı, gri, kırmızı kahverengi ve siyahımsı gibi farklı renklerde bulunabilirler. Bu renkler kilin fırınlanma yöntemiyle pişirilmesinden sonra değişim yaşayabilirler. Örneğin, rengi siyah olan bir kil piştikten sonra beyaz olabilir. Bunun sebebi kilin içerisinde bulunan kömür gibi maddelerin varlığıdır. Bununla beraber killerin pişme esnasında sinterleşmesi ilerledikçe renk şiddeti de artar.

Kil saf haldeyken beyaz renkli olur ve kaolen adını alır. Genelde metal oksitlerle karışık bir şekilde buldukları için doğal olarak renklenmiş durumdadırlar (Akıncı, 1968:63-72).

Kilin renginden içinde bulunan maddeler hakkında bilgi edinilebilir. Örneğin; açık kahverengi renginden limonit, kırmızı renkten demir-peroksit, siyah ve gri renkten ise mangan bioksit bulunduğu anlaşılabilir. Ayrıca kil yapısındaki oksitlerin yüksek sıcaklıkla renkleri değiştiği için kilin fırınlanmadan önceki rengiyle sonraki rengi farklılık gösterir (Press, Siever, 1998:43).

2.5.4.Rötre

Kil su ile yoğurulup biçimlendirildikten sonra kuruma aşamasına geçildiğinde biçimlendirilme esnasındaki ölçüleri küçülür. Yani hacmi azalır. Hacim küçülmesi fırınlanma sırasında da devam eder. Bu olaya kilin rötre yapması denir. Rötre killerin plastisite özelliklerine göre değişiklik gösterebilir.

Killer, kuruma ve fırında pişme esnasında küçülürler. Kuruma küçülmesi fiziksel, pişme küçülmesi kimyasal bir olaydır. Kil tanelerinin inceliğine bağlı olarak, fazla su kaldıran killer daha fazla küçülme gösterirler. Kuruma küçülmesi, çevre suyuna bağlıdır. Pişme küçülmesi ise kil mineralinin yapısına ve cinsine bağlıdır.

2.5.5. Sinterleşme

Killerin sinterleşme sıcaklıkları birbirinden farklıdır. Kuvars, feldspat, demir oksit, kalker ve koloit bakımından zengin olan killer genellikle 900°C civarı sıcaklıkta sinterleşirler. Bazı killer 1100°C'ye kadar normal yanışlı oldukları halde, 1050-1100°C arasında feldspatların erimeye başlamasıyla değişikliğe uğrarlar. Erime derecesi ile sinterleşme derecesi arasındaki farkın az olmaması, belli bir mesafede olması gerekir. Refrakter gibi bazı killer 1580°C'ye kadar dayanıklıdır. Sonuç olarak partiküller arasında oluşan sinterleşmenin, denge koşulları altında gerçekleştiği kabul edilir.

2.5.6. Yağlılık ve yağsızlık

Yağlı kil, plastiklik özelliği çok iyi olan killere denir. Kaygan özellik gösterirler. Yüzeyleri yağlı gibi hafif parlak olur. Bu killer fazla su emerler ve yoğrulma suları yüksektir. Yağlı killerin bağlama yetenekleri yüksektir. Plastik özellik göstermeyen madde taneciklerini sıkı bir şekilde tutarlar.

Yağsız kil ise yüzeyi parlak ve kaygan olmayan, pürüzlü görünüşe sahip killere denir. Bağlama özellikleri zayıftır, az su kaldırır ve suda çabuk dağılırlar. Sinterleşmeleri için yüksek ısı gereklidir.

2.6. Kil Minerallerinin Sınıflandırılması

Kil minerallerinin sınıflandırılmasında genel bir sınıflandırma mevcut değildir. Birçok araştırmacı tarafından kabul edilmiş sınıflandırmalar bulunmaktadır. Bu sınıflandırmalar

arasında Degens tarafından yapılan (Çizelge 2.1) ve Grim R.E. tarafından yapılan (Çizelge 2.2) vardır.

Çizelge 2.1. Degens'e göre kil minerallerinin sınıflandırılması.

YAPI	GRUP	CİNS
2 Tabakalı olanlar	Kaolinit grubu	Kaolinit
	a- Eş boyutlu olanlar	Dikit
	b- Bir yönde uzamış olanlar	Halloysit
3 Tabakalı olanlar	Simektit grubu	Montmorillonit
	İllit grubu	Bedielit
	Vermikülit grubu	İllit
		Vermikülit
4 Tabakalı olanlar	Klorit grubu	Klorit
Zincir yapısı olanlar	Sepiyolit grubu	Sepiyolit
		Atapulgit
		Paligorskit

Çizelge 2.2. Grim R.E' ye göre killerin sınıflandırılması.

Amorf Olanlar	Kristal yapıda olanlar			
Allofan grubu	a) İki tabakalı tipler			
	i. Eş boyutlu olanlar		ii. Bir yönde uzamış olanlar	
	Kaolinit grubu (kaolinit, dikit, hakrit)		Halloysit grubu	
	b) Üç tabakalı tipler			
	i. Genişleyen kristal yapılı olanlar		ii. Genişlemeyen kristal yapılı olanlar	
	Eş boyutlu olanlar montmorillonit grubu (montmorillonit, savkonit, vermikülit)		Bir yönde uzamış olanlar montmorillonit grubu (nontronit, saponit, hektorit)	İllit grubu
	c) Düzenli karışık tabakalı tipler			
	Klorit grubu			
	d) Zincir yapılı tipler			
	Atapulgit, sepiolit, poligorskit			

2.7. Killerin Kullanım Alanları

Kil mineralleri birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Kil minerallerinin bazı kullanım alanları şunlardır:

- Çimento, tuğla, kiremit
- Yapısal karo, yer karosu, fayans
- Kanalizasyon borusu, drenaj boruları, pis su borusu
- Sıhhi tesisat, dolgu, sondaj
- Kaplamalar (asfalt vb.)
- Çanak, çömlek, çini, cam, porselen, elektro porselen
- Refrakter sanayi
- Döküm sanayi
- Plastik, kâğıt
- Tarım
- Petrol ve yağ endüstrisinde katalizör
- Boya, ilaç ve kimya sanayi
- Kozmetik
- Fren balatalarında asbest yerine
- Polyesterler, tekstil
- Kauçuk sanayi
- Boya, renk giderici madde olarak
- Kaplanmış ark – kaynak elektrotlarında.

2.8. Genleştirilmiş Kil

Doğal killer 1000°C'nin üzerinde pişirildikleri zaman, yapılarında bulunan gazlardan dolayı ve bu gazların genişmesiyle içleri gaz dolu olan gözenekli bir yapı oluştururlar. Bu killere genleştirilmiş kil denilmektedir. Genleştirilmiş killer fırınlarda yavaş ısıtma ile değil, önceden ısıtılmış fırınlarda bir anda yüksek sıcaklığa maruz bırakılırlar. Bu işlemden sonraki görüntüleri Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Genleştirilmiş kil.

Killerin minerolojik yapılarından dolayı 1000-1350°C arasında pişirilen killer, ilk hacimlerinin yaklaşık olarak 1.5 ila 6 katı kadar hacim artışı meydana getirebilirler. Yoğunlukları yaklaşık olarak 320 ila 960 kg/m³ arasında değişmektedir.

Genleştirilmiş killer doğada genişmiş şekilde bulunmazlar, yapay maddelerdir. Doğadaki her kil genişme göstermez. Genleşen kil üretmek için erken sinterleşen kil, kumlu kil, killi şist, şeyl ve şiferton gibi hammaddeler kullanılır.

Killerde genişmeyi sağlayan temel unsurlar şunlardır:

- Yüksek plastisite ve 2 mikrondan küçük tane oranı değeri en az %35 olmalı,
- İçerisinde özellikle illit, serisit, demirli klorit ve mika grubu silikatlar olmalı,
- Kil yapısında %5'ten az karbonat olmalı,
- Kil yapısında %5-10 arasında demir oksit olmalı,
- Kil yapısında %0.5-2.5 arasında organik karbon olmalı,
- Yapısında %12-25 Al₂O₃ organik karbon olmalı,
- Yapısında %50-78 SiO₂ organik karbon olmalı,
- Yapısındaki bileşenlerin sinterleşme oranı birbirlerine yakın ve 1200°C derece civarında olmalı,
- Yapısındaki kum bileşenleri minimum miktarda olmalı ya da hiç olmamalıdır (Anonim, 2000).

Genleşen kil kimyasal bileşenleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Genleşen kil kimyasal bileşenleri.

Kil Çeşitleri	Deniz Dibi Killeri	Lös Killeri	Jura Killeri	Devoniyen Killi Şistler	Şifertonlar
SiO ₂ (%)	47,7	69	53,6	54,6	52,6
Al ₂ O ₃ (%)	17,4	14,4	18,2	17,6	21,8
TiO ₂ (%)	0,42	0,76	0,82	0,52	1,07
Fe ₂ O ₃ (%)	7,6	5,55	5,1	6,9	9,9
CaO (%)	4,04	0,98	3,36	3,34	0,35
MgO (%)	3,6	1,61	3,2	4	2,96
K ₂ O (%)	3,04	2,07	3,35	3,58	6,07
Na ₂ O (%)	0,32	0,71	0,2	0,71	0,13
Kızdırma Kaybı (%)	15,05	5,11	11,59	7,81	5,05

3. HAFİF AGREGA

3.1. Agreganın Tanımı

Agrega, beton içerisinde çimento ve su ile birlikte kullanılan, beton hacminin yaklaşık %75'ini oluşturan kum, çakıl, kırmataş ve cüruf gibi farklı büyüklüklerdeki taneli malzemelerin genel adıdır. Beton hacminin büyük bir kısmını kapladığı için kullanılan agreganın özellikleri ve kalitesi, betonun performansını ve dayanıklılığını önemli bir ölçüde etkilemektedir. Agreganın türü, dokusu, kimyasal ve mineralojik yapısı, boşluk yapısı, kimyasal kararlılığı gibi faktörler; betonun dayanımında, aşınmasında, deformasyonunda ve kimyasal etkilere karşı tutumunda belirli bir şekilde rol oynar. Agreganın şekli ve yüzeyinin pürüzlülük derecesi de beton içindeki agreganın çimentonun arasındaki bağın sağlamlığını belirler (Doğangün, A., 2005).

Beton yapımında kullanılan en pahalı malzeme çimento, en ucuz malzeme ise agregadır. Bu yüzden betonda beton kalitesini düşürmeyecek şekilde mümkün olduğu kadar çok agreganın kullanılması maliyeti düşürmektedir (Türkiye Hazır Beton Birliği [THBB], 2016).

Agregalar ağırlıklarına göre; hafif, normal ve ağır olmak üzere üç sınıfa, tane boyutlarına göre; ince (kum, kırma kum... gibi) ve kaba (çakıl, kırmataş... gibi) agregalar olarak ikiye ayrılırlar.

Ekmekyapar ve Örüng (1993)'e göre agreganın özellikleri, beton özelliklerini büyük ölçüde etkilediğinden dolayı iyi ve kaliteli beton yapımı için agregalarda aranacak özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Agreganın sağlam olması, aşınmaması ve suyun etkisiyle yumuşayıp dağılmaması,
- Sert ve dayanıklı olması,
- Basınca ve aşınmaya karşı dayanımları iyi olması,
- Agreganın içinde betona zarar verebilecek maddelerin bulunmaması,
- Çimentoyla reaksiyonunda zararlı bileşik oluşturmaması, donatıların korozyona karşı korunmasını engellememesi,
- Tanelerin şekli ve dokusu iyi olması, yassı ve uzun taneler içermemeleridir.
- Zayıf taneler (deniz kabuğu, odun... gibi) içermemelidir.

Agregaların en çok kullanıldığı yer harç ve beton gibi yapı malzemelerinin üretimidir. Bunun dışında agregalar karayolu, demiryolu, su artıma tesisleri vb. gibi birçok inşaat alanında kullanılmaktadır (Kocataşkın, 1975).

3.2. Hafif Agregalar

Hafif agregalar içinde fazla boşluk bulunması sebebiyle birim ağırlığı düşük olan agregalar olarak tanımlanmaktadır. Hafif agregaların boşluklu yapılarından dolayı normal agregalara göre su emmesi %5 ile %25 arasındaki oranlarda daha fazladır. Bu oran agregada bulunan boşluk yapısına bağlıdır. Boşluklar birbirleriyle bağlantılı ve agreganın dış yüzeyine daha yakın olursa agreganın suyu emmesi basit ve fazla olur. Ancak boşluklar agreganın iç kısmında olursa ve birbirleriyle bağlantıları olmazsa yani agreganın içindeki boşlukların birbirlerinden bağımsız ve süreksiz olduğu hallerde su emmesi sifira kadar inebilir.

Hafif agregalar bu çalışmanın konusu olmasından dolayı aşağıda detaylıca ele alınmıştır. Hafif agregalar, TS EN 1097-6'ya uygun olarak tayin edilen etüv kuru tane yoğunluğu 2000 kg/m³'ten veya TS EN 1097-3'e uygun olarak tayin edilen etüv kuru yığın (boşluklu) yoğunluğu 1200 kg/m³'ten az olan mineral esaslı malzemelerdir.

Konu ile ilgili standart olan TS 1114 EN 13055-1 (2004)'e göre hafif agregalar, su, çimento ve gerektiğinde katkı maddeleri ile karıştırılarak hafif beton üretiminde kullanılan, gevşek birim ağırlığının en büyük değeri 1200 kg/m³'ü veya tane yoğunluğu 2000 kg/m³'ü aşmayan, kırılmış veya kırılmamış gözenekli inorganik agregalar olarak tanımlanmaktadır (TS 1114 EN 13055-1, 2004) (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Hafif agregaların gevşek birim ağırlıkları.

Standart	Agrega cinsi	Maksimum kuru birim ağırlık (kg/m ³)	Minimum kuru birim ağırlık (kg/m ³)
ASTM C 330 ve C331	İnce agregalar	1120	-
	İri agregalar	880	-
	Karışık agregalar	1040	-
ASTM C 332 Grup 1	Perlit	196	120
	Vermikülit	160	88
ASTM C 332 Grup 2	İnce agregalar	1120	-
	İri agregalar	880	-
	Karışık agregalar	1040	-
TS 1114	İnce agregalar	1200	-
	İri agregalar	1000	-
	Karışık agregalar	1100	-

Yine aynı standartta hafif agregalar doğal ve yapay olarak iki sınıfa ayrılmış ve tanımları şu şekildedir:

Doğal agregası, meydana gelişleri sırasında gözenekli bir yapı kazanmış olan, volkanik tüf, bims (pomza), sünger taşı, lav cürufu, diyatomit vb. gibi kırılmış veya kırılmamış agregası olarak tanımlanmıştır. Mekanik işlem dışında herhangi bir işlemde geçirilmemiş olan ve mineral kaynaklardan elde edilen agregasıdır.

Yapay agregası, genişleme özelliği olan malzemelerin ısıll işlemlerden geçirilmesi sonucunda elde edilen mineral kökenli agregasıdır. Aynı standartta yapay hafif agregası; yüksek fırın cürufu, kil, uçucu kül, kuvars, perlit, obsidiyen, vermikülit, şist, arduvaz vb. gibi inorganik elemanlardan ısıtma, bazı hallerde sinterleştirme, gaz veya köpük oluşturma yoluyla gözenekleştirilerek elde edilen kırılmış veya kırılmamış agregası olarak tanımlanmıştır (TS 1114 EN 13055-1, 2004).

Doğal hafif agregaları volkanik kökenli veya volkanik kökenli olmayan hafif agregaları olarak sınıflandırılmaktadırlar. Volkanik kökenli olanlar, lavın volkandan aşağı doğru inerken havayla temasından dolayı ani bir şekilde soğumasından dolayı mat hale gelir. Bundan dolayı kristalize bir yapıya sahip olmayıp amorf veya camısı yapıya sahiptirler.

Betonda agregası kullanılması sağladığı avantajların başında; sertleşen betonun hacim değişikliğinin azaltılması ya da önlenmesi, çevresel faktörlere karşı dayanıklılığını artırması betonun taşıdığı yüklere karşı gerekli dayanımı sağlayabilmesi gelir. Beton içerisinde agregası bulunmasıyla beton daha az büzülme (hacim değişikliği) gösterir. Bunun sebebi de çimento hamurunun kurumasından sonra yapacağı büzülmeyi ve ortaya çıkabilecek çatlakların agregası tarafından belirli bir miktarda sınırlandırılmış olmasıdır (Gökçe, 2010).

Hafif agregasının yapısında bulundurduğu hava sayesinde normal agregasıya oranla ısıll iletkenlik değeri daha düşüktür (Clarke, 1993). Hafif agregaları kullanılarak üretilen hafif betonlarında ısıll iletkenliği normal betonlara göre daha düşüktür. Dış ortama kaybedilen ısı miktarı normal betona göre daha azdır. Hafif betonların ısıll iletkenlik özelliklerinin incelendiği çalışmalara bakıldığında, ısıll iletkenlik ve birim ağırlığın doğru orantılı olduğu deney sonuçlarından görülmektedir. Yani, birim ağırlık azaldıkça ısıll iletkenlikte azalmaktadır.



Şekil 2.7. Genleştirilmiş kil agregası.

3.3. Hafif Agregaların Özellikleri

3.3.1. Hafif agregaların su emmesi

Hafif agregalarda su emme oranı sinterleme sıcaklığının artışına veya azalışına göre değişkenlik gösterir. Niteliği iyi olan doğal hafif agregalarda su emme genellikle %15'in altındadır (Neville ve Brooks, 2010). Hafif agregalar normal agregalarla kıyaslandığında, normal agregalara göre %5 ile %25 oranında daha çok su emer. Bunun sebebi ise hafif agregaların boşluklu yapıya sahip olmasıdır. Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan bazı hafif agregaların su emme oranları Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Hafif agregaların bazı özellikleri (Clarke, 1993).

Tip	Şekil	Su emme oranı (%)	Etüv kuru yoğunluk (kg/m ³)
Genleştirilmiş kil	Yuvarlak	12-14	350-500
Genleştirilmiş şist	Yuvarlak	12-14	500-800
Pomza	Düzensiz	30-40	500-880
Sinterlenmiş uçucu kül	Yuvarlak	9-15	800-850

Hafif agregaların su emme oranı birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler; agreganın boşluk yapısı, boyutu, boşlukların dağılım şekli ve sürekli olup olmamasıdır. Boşluklar yüzeye yakın ve birbiriyle bağlantılıysa kısa bir sürede suyla dolar. Ancak yüzeye uzak yani daha iç kısımda yer alan, birbirleriyle bağlantısız boşluklar yıllarca su içinde bekletildiğinde bile suyu emmeden boş kalır. Agreganın tanesi tarafından emilen su, çimento ile hemen reaksiyona girmez. Ancak uzun süreli kür sonucunda çimentonun hidrasyonu ve agreganın matris ara yüzeyinin güçlenmesinde oldukça faydalıdır.

Hafif agregalar önceden suya doygun hale getirildiğinde içsel kürlenme söz konusudur. Yani ön ıslatmayla boşluklarına suyu emer ve emdiği suyun diğer evrelerde yavaş yavaş salınımını yapar. Bu sayede beton dış ortamdan su almasa dahi betondaki dayanım artışı ve hidrasyon devam eder. Devam eden hidrasyon çatlak oluşumunu azaltır (Yolcu ve Girgin, 2017).

İçerisindeki boşlukları birbirinden bağımsız olan hafif agregalar su emme işlemini engeller. Agregası şekli ve yüzeyi de su emme de çok etkili bir başka faktördür. Bu nedenle yoğunlukları çok farklı olsa bile normal ve hafif agregalar arasında su emme miktar ve hız olarak benzerlik gösterebilir.

İçsel kürlenme mekanizmasında karışımındaki su tanelerinin dağılımı en önemli etkidir. Su tanelerinin matris içinde iyi dağılımıyla içsel kürlenmenin verimliliği de artar. İçsel kürlenmede önemli bir başka parametre ise küçük ve suya doygun hafif agregaların beton içerisinde dağıtılmasıdır. Bu sayede küçük su rezervuarları oluşur ve agregası taneleri arasında mesafe azalacağından, suyun difüzyonu için uzun mesafe kat etmesine gerek yoktur (Lura, vd., 2003).

3.3.2. Tane şekli ve yüzey dokusu

Doğal hafif agregalar kaynağına, yapay hafif agregalar ise üretim şekline göre yüzey dokusu ve tane şekli açısından değişiklik gösterir. Hafif agregaların taneleri küresel, kübik, sivri ya da düzensiz şekilli olabildiği gibi yüzeyleri de ince boşluklu, büyük boşluklu, düzgün ya da düzensiz bir yapıda olabilir. Bu özellikler, beton karışımının çimento ve su ihtiyacını, işlenebilirliğini, iri ya da ince agregası oranını, fiziksel ve mekanik özelliklerini de etkilemektedir (Lamond ve Pielert, 2006).

3.3.3. Birim ağırlık

Agregası birim ağırlığı, agregası daneleri arasındaki ve bu danelerin içindeki boşlukları da kapsayan yığın haldeki kütlelerin kapladığı hacme olan oranıdır. Birim ağırlık agregası dane boyutuna, inceliğine, şekline, içerdiği neme, agregaların gevşek ya da sıkı olmasına bağlıdır. Malzemelerin birim ağırlığı birbirinden farklıdır. Aynı tür malzemelerin boyutlarının ve inceliklerinin farklı olması, birim ağırlıklarının farklı olmasını da beraberinde getirir (Lamond ve Pielert, 2006).

3.3.4. Hafif agregaların iç yapı özellikleri

Hafif agregaların tane yoğunluğu gözenekli bir yapıya sahip olmaları nedeniyle oldukça düşüktür. Tanelerdeki bu gözenekli yapı, bazı ham maddelerin erime sıcaklığına kadar ulaşması sonucunda oluşmaktadır. Gazlar, erime sıcaklığında genişleyerek yaklaşık 5–300 µm boyutunda homojen dağılmış boşluk oluştururlar. Böylelikle gazlar hacim artışı oluşumunu sağlar ve soğuma sırasında da bu durumunu korurlar (Lamond ve Pielert, 2006).

3.3.5. Hafif agregaların yoğunluğu

Yoğunluk, boşluklu olan agreganın ağırlığının boşluksuz hacme oranıdır. Hafif agregalar, TS EN 1097-6'ya uygun olarak tayin edilen etüv kurusu tane yoğunluğu 2000 kg/m³'ten veya TS EN 1097-3'e uygun olarak tayin edilen etüv kurusu yığın (boşluklu) yoğunluğu 1200 kg/m³'ten az olan mineral esaslı malzemelerdir. Hafif agreganın yoğunluğu, hafif agregayı oluşturan hammaddeye bağlıdır.

3.3.6. Özgül ağırlık

Özgül ağırlık; agreganın tanelerinin işgal ettiği mutlak birim hacim ağırlığıdır.

$$\gamma = W_1 / (W_1 + W_2 - W_3)$$

W_1 : Numunenin ağırlığı

W_2 : Su ile dolu ölçü kabının ağırlığı

W_3 : İçine numune konmuş, su dolu kabın ağırlığı

Bir başka deyişle agreganın özgül ağırlığı, agreganın kütesinin, agreganın dolu kısmındaki partiküllerin toplam hacmine oranıdır. Bu dolu hacim, partiküllerdeki küçük yani mikro boşlukları kapsar ama partiküller arasındaki makro boşlukları kapsamaz. Bu partiküllerin özgül ağırlığı, o boşlukların hacmine bağlıdır ve genellikle tane boyutu azaldıkça artar (Lamond ve Pielert, 2006). Hafif agregaların özgül ağırlığı 2.4'ten düşüktür.

Hafif agregaların tane büyüklüğü de özgül ağırlığı etkileyen bir faktördür. İri hafif agregaların özgül ağırlığı ince hafif agregaların özgül ağırlığına göre daha düşüktür. Özgül ağırlık değeri hafif agregalar için arşimet terazisiyle hesaplanamaz. Çünkü hafif agregalar genellikle suda yüzer. Bu değer hesaplanırken piknometre kullanılır.

3.4. Hafif Agregaların Sınıflandırılması

Hafif beton üretiminde amaç birim ağırlığı istenen düzeyde tutmaktır ve bunun için en uygun yöntem hafif agrega kullanımınıdır. Hafif agregalar üretildikleri malzemenin kaynağına ve agrega birim ağırlıklarına göre sınıflandırılırlar. Üretildikleri malzemenin kaynağına göre dört şekilde sınıflandırılırlar:

- Doğal Hafif Agregalar: Pomza taşı, volkanik tuf, volkanik cüruf ve ağaç parçacıkları gibi organik malzemeler.
- Doğal Malzemedен Üretilen Yapay Hafif Agregalar: Genleştirilmiş kil, genleştirilmiş şist, genleştirilmiş arduvaz, perlit, vermikülit ile stiropor gibi polimer esaslı malzemeler.
- Endüstriyel Atıklardan Üretilen Hafif Agregalar: Yüksek fırın cürufu, uçucu kül.
- Endüstriyel Atıkların İşlenmesiyle Üretilen Hafif Agregalar: Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu ve kızdırılmış uçucu kül (Dikici, 2010).

4. HAFİF BETON

4.1. Hafif Betonun Tanımı

Normal betonun yoğunluğu, 2400 kg/m^3 civarındadır. Yoğunluğu, 2600 kg/m^3 'ten fazla olanlar "ağır beton", etüv kurusu (EK) durumdaki yoğunluğu 800 kg/m^3 'ten fazla 2000 kg/m^3 'ün altında olanlar ise "hafif beton" olarak tanımlanmaktadır (TS EN 206-1).

ACI 213R-03 standardında taşıyıcı hafif betonlar, hava kurusu birim hacim ağırlığı 1120 kg/m^3 'ten fazla, 1960 kg/m^3 'ün altında olan ve 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa 'ı geçen beton olarak tanımlanmaktadır.

TS 2511 standardına göre de, karakteristik basınç dayanımı 16 MPa 'dan daha fazla ve havada kurumuş haldeki birim hacim ağırlığı da en fazla 1900 kg/m^3 olan hafif agregalı betonlar taşıyıcı hafif beton olarak adlandırılmaktadır.

4.2. Hafif Beton

Hafif beton oluşturmanın en önemli yolu betonda doğal ve yapay hafif agreganın kullanımınıdır. Kullanılan agreganın bir kısmı ya da tamamı farklı tip ve özelliklere sahip hafif agregalar olabilir. Hafif betonlar hafif agregalı, iri agregalı ve boşluklu betonlar olmak üzere üç ana grupta toplanır. Agreganın karışımında hafif agreganın miktarının artırılması ile daha hafif, bir başka deyişle birim ağırlığı daha düşük olan betonlar elde edilebilmektedir (Postacıoğlu, 1987; TS EN 206-1).

Hafif beton üretiminde yaygın olan 3 yöntem vardır. Birinci yöntemde, özgül ağırlığı düşük olan, gözenekli hafif agregalar kullanılır. Elde edilen beton hafif agregalı beton olarak isimlendirilir. İkinci yöntemde, betonda veya harçta büyük boşluklar oluşturulur. Bu tip betonlar havalı, hücreli, köpüklü veya gaz beton gibi isimlerle bilinirler. Üçüncü yöntemde ise sadece iri agregalar kullanılır. Karışımındaki ince agregalar çıkarılır. Bu tip betonlar da ince agregalar içermeyen iri agregalı betonlar olarak isimlendirilir.

Kullanım amacına göre hafif betonun, hem yeterli mukavemete sahip olması hem de ısı yalıtkanlık özelliğinin iyi olması istenmektedir. Konutlarda hafif beton kullanımı özellikle yalıtım özelliklerinin iyi olması nedeniyle çok önemlidir. Yapılarda kullanılan hafif betonlar, normal agregalar yerine doğal veya yapay hafif agregalar kullanılarak elde edilen hafif betonlardır.

Hafif betonlarda basınç dayanımı agreganın doğal ya da yapay olmasına yani agreganın cinsine bağlıdır. Normal betonla benzer dayanımlar elde etmek için hafif betonda daha fazla çimento kullanmak gerekir (Postacıoğlu, 1987; Taşdemir, 1982).

Betonda agreganın niteliği çok önemlidir. İyi bir beton elde edebilmek için beton yapısında uygun agrega kullanılmalıdır. Agreganın kimyasal ve mineralojik bileşimi, özgül ağırlığı, birim ağırlığı, boşluk yapısı, su emmesi, yüzey yapısı, tane şekli ve boyutları oldukça önemlidir. Betonun yaklaşık olarak %60-75 oranında agregalardan oluştuğu bilindiğine göre birim ağırlığı düşük olan hafif agregalar kullanılırsa betonun ağırlığı azalır ve yapı için ölü yük oranı da düşer.

Çizelge 4.1. Bazı hafif betonların genel özellikleri (Neville, 2000).

Beton Tipi	Agrega Boyutu	Agrega Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Betonun Etüv Kurusu Yoğunluğu (kg/m ³)	Basınç dayanımı (MPa)
Genleştirilmiş çüruf	İnce	900	1850	21
	İri	650	2100	41
Dönel fırında üretilen genleştirilmiş kil	İnce	700	1200	17
	İri	400	1300	20
Sinterlenmiş uçucu kül	İnce	1050	1500	25
	İri	800	1540	30
Pomza	-	500-800	1200	15
Perlit	-	40-200	400-500	1,2-3
Vermikülit	-	60-200	300-700	0,3-3

4.2.1. Hafif betonların avantajları

- Hafif beton düşük yoğunluğu sayesinde yapıların zati ağırlıklarını, yapılara gelen yükleri, deprem etkilerini, inşaat maliyetlerini ve daha küçük boyutlarda yapı elemanları tasarlanabileceği için inşaat kesit alanlarını azaltır.
- Geçici taşıyıcı, daimi taşıyıcı ve eğilme etkisinde olan elemanlarda daha fazla ekonomiklik sağlamaktadır (Dikici, 2010).
- Normal betonun birim ağırlığı büyük, dolayısıyla ısı iletkenlik katsayısı da yüksektir. Hafif betonda elemanlara kazandırılacak ısı yalıtımı özelliği sayesinde ısı yalıtımı yüksektir. Enerji tasarrufuna ve hava kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlar.

- Hafif beton kullanıldığında yapı ağırlığında azalma meydana gelir. Bu azalmadan dolayı yapıya gelen düşey yüklerde ve yapıyı etkileyen atalet kuvvetlerinde de azalma olur. Bu sayede deprem yapıya daha az zarar verir ve depreme karşı güvenlik açısından hafif beton daha güvenilirdir.
- Hafif betonun ses yutma özelliği ve sese karşı yalıtkanlığı normal betondan daha iyidir. Çünkü havadaki ses enerjisi hafif betonda, betonun çok küçük kanallarında ısıya dönüştürülebilir. Betonun yoğunluğu azaldıkça ses yutuculuğu iyileşmektedir. Hafif betonun ses yutuculuk katsayısı normal betonun ses yutuculuk katsayısının 2 katı kadardır (Konuk, 2003).
- Hafif betonun ısıl genleşmesinin normal betona göre düşük olmasından dolayı yangına dayanımı daha iyidir (Konuk, 2003).
- Hafif beton kullanıldığında betonarme elemanlardaki donatıyı azaltmak mümkündür.
- Özellikle donma-çözülme olayının sık olduğu soğuk bölgelerde dona karşı daha dayanıklıdır.
- Birim hacme düşen malzeme kütesinin azalmasıyla beton kalıbında daha düşük bir basınç oluşur ve hafiflik sayesinde taşıma ve yerleştirme daha kolaylaşır.
- Hafif betonlar homojenlik açısından iyidir (Dikici, 2010).
- Normal betonun çekme dayanımı/basınç dayanımı oranına göre çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı yüksek olduğundan rötre çatlakları azalır (Reşat Sönmez, Mahmut Demir, Hakan Ekim).

4.2.2. Hafif betonların dezavantajları

- İçinde poroziteleri olması nedeniyle basınç dayanımları düşüktür ve aşınmaya karşı dayanıklılıkları daha azdır.
- Sünme ve rötre değerleri normal betonla kıyaslama yapıldığında daha yüksektir.
- Normal betona bakıldığında daha çok çimento dozajı gerektirmektedir. Bu da maliyet artışına yol açmaktadır.
- Normal betonun kesme dayanımına göre daha düşük bir kesme dayanımına sahiptirler.
- Üretim yapılmıyorsa hafif agrega bulmak güç olduğu için ek masraf gerekmektedir.
- İmalat ve yerine konması daha kaliteli işçilik gerektirmektedir. Daha çok emek ve dolayısıyla maliyet istemektedir.
- Elastisite modülünün düşük olmasından dolayı taşıyıcı hafif betonlu kirişlerde, dönmeler daha yüksek olmaktadır (Dikici, 2010).

4.3. Hafif Betonların Sınıflandırılması

Hafif agregalı betonlar, kullanım amaçları esas alınarak taşıyıcı hafif betonlar, taşıyıcı/yalıtım hafif betonları ve yalıtım hafif betonları olmak üzere üç gruba ayrılır (Clark, 1993; Lamond ve Pielert, 2006). Hafif betonların yoğunluk, ısı iletim katsayısı ve basınç dayanımı aralıkları Çizelge 2’de verilmiştir.

4.3.1. Taşıyıcı hafif betonlar

ASTM C 567’ye göre 1120–1920 kg/m³ arasında yoğunluğu olan, 28 günlük basınç mukavemeti 17 MPa’ dan fazla olan hafif betonlar olarak tanımlanmıştır (ACI 213R, 2003).

RILEM’ e göre ise, 1600-2000 kg/m³ yoğunluğa sahip, basınç dayanımı 15 MPa’ın üzerinde olan betonlar taşıyıcı hafif betonlardır (Clark, 1993).

Taşıyıcı hafif betonlarda genellikle ısıtılmış şist, kil, arduvaz, genleştirilmiş çüruf ve volkanik kaynaklardan elde edilen agregalar kullanılmaktadır (Lamond ve Pielert, 2006).

4.3.2. Taşıyıcı/yalıtım hafif betonları

Taşıyıcı/yalıtım hafif betonlarının basınç dayanımının, yoğunluğunun ve ısıt özelliklerinin taşıyıcı hafif beton ile yalıtım hafif betonunun arasındaki değerlerde olması gerekir. Basınç dayanımları 3,4–17,0 MPa arasında değişir. Bunlar, yüksek oranda hava boşluğu içerecek biçimde hafif agrega ile üretilir. Genel olarak dolgu betonu gerektiren uygulamalarda kullanılır (Lamond ve Pielert, 2006).

4.3.3. Yalıtım hafif betonları

Taşıyıcılık özelliği taşımayan elemanlarda yüksek seviye de ısıt direnç sağlanması amacıyla kullanılan, yoğunluğu ve dayanımı düşük olan betonlar yalıtım hafif betondur. Bu nedenle bu betonun üretiminde de yoğunluğu ve dayanımı düşük olan agregalar kullanılır. Yalıtım hafif betonlarının yoğunluğu 800kg/m³’ten düşük, basınç mukavemeti de 0,7 ile 3,4 MPa arasındadır (Lamond ve Pielert, 2006).

Çizelge 4.2’de görülen S1 ve S2 sınıflarına ait olan betonlar duvar işleri gibi işlevlerde kullanılır. S1 ve S2 taşıyıcı hafif beton olarak tasarlanmamıştır. Yapının ağırlığındaki azalma sayesinde depreme karşı dayanıklılıkta artmış olur. S4, S5 ve S6 için doğal agrega yerine,

endüstriyel yollarla üretimi sağlanan yapay agregalar kullanılmalıdır (Postacıoğlu ve Taşdemir, 1986).

Çizelge 4.2. Hafif beton sınıfları.

Hafif Beton Sınıfı	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Basınç Dayanım 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

4.4. Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

4.4.1. Hafif betonun yoğunluğu

Hafif betonlarda, malzeme oranına, su ihtiyacına ve hava miktarına bağlı olarak taze betonun yoğunluğu sertleşen betonun yoğunluğundan daha fazladır. Sertleşen betonun yoğunluğunun daha az olmasının sebebi ise betondaki nem kaybıdır. Hafif beton karışımlarında hafif agregalar kullanıldığında karışımın yoğunluğu azalır. Ancak hafif agregalar yerine normal agregalar ya da kum kullanılırsa sertleşmiş betonun yoğunluğu artar (Lamond ve Pielert, 2006).

Clarke'a (1993) göre;

- Betonun karışımındaki hafif agregaların yerine normal agregalar kullanılırsa, betonun yoğunluğu yaklaşık olarak 150-200 kg/m³ artar.
- Beton karışımında suya doygun ya da kısmen doygun hafif agregalar kullanıldığında, üretilen bu betonların yoğunluğu da artar. Özetle agreganın içerdiği su oranının artması yoğunluğu artırır.
- Hafif betonda, boşluklu olan hafif agregalar kullanıldığında sürüklenen hava sonucu normal betona oranla yoğunluk yaklaşık 90 kg/m³ azalır.

4.4.2. Hafif betonun basınç dayanımı

Hafif agregalı betonlarda basınç dayanımı asıl olarak agregata tanelerinin; cinsine, yapısına, dayanımına, rijitliğine, nem içeriğine aynı zamanda mineral katkılara ve oranlarına, çimento miktarına ve betonun kür koşulları gibi faktörlere bağlıdır.

Ancak betonun basınç dayanımını etkileyen en büyük faktör kullanılan agreganın cinsi ve dayanımıdır. Agregata tanelerinin dayanımı zayıflaştıkça daha fazla çimento kullanımını gerektirmektedir (Lamond ve Pielert, 2006).

Basınç dayanımına etki eden en önemli faktörlerden biri de agreganın içerdiği nem miktarıdır. Genel olarak suya doyurulmuş agregalar betonun basınç dayanımını arttırmaktadır.

Betonda kullanılan hafif agreganın rijitliği ile çimento hamurunun rijitliğinin birbirine yakın olmasından dolayı gerilme dağılımı üniform olmaktadır. Bu etki de hafif betonun basınç dayanımının beklenen dayanımından daha yüksek çıkmasını sağlamaktadır (Bremner, 1998).

Kür koşullarında zamanın hafif betona etkisi, normal betona etkisiyle kıyaslandığında benzerlik söz konusudur. Ancak normal beton kurduğu zaman hidrasyon sona ererken, hafif betonda kullanılan hafif agregaların emdiği sudan dolayı hidrasyon sona ermez. Bu yüz zayıf kür şartları uygulandığında, hafif beton normal betona göre daha dayanıklıdır (Clarke, 1993).

Hafif betonlar TS EN 206-1'de basınç dayanımına göre de sınıflandırılmaktadır. Basınç dayanım sınıfı ise LC8/9 ile LC80/88 arasında değişmekte; en düşük karakteristik silindir basınç dayanımı ($f_{ck,sil}$, N/mm²) 8 ile 80 N/mm² arasında, en düşük karakteristik küp dayanımı ($f_{ck,küp}$, N/mm²) ise 9 ile 88 N/mm² arasında değerler almaktadır. Çizelge 4.3'te bu sınıflandırma gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Hafif beton basınç dayanım sınıfları.

Basınç Dayanımı Sınıfı	En Düşük Karakteristik Silindir Dayanımı $f_{ck,sil}$ (N/mm ²)	En Düşük Karakteristik Küp Dayanımı $f_{ck,küp}$ (N/mm ²)
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

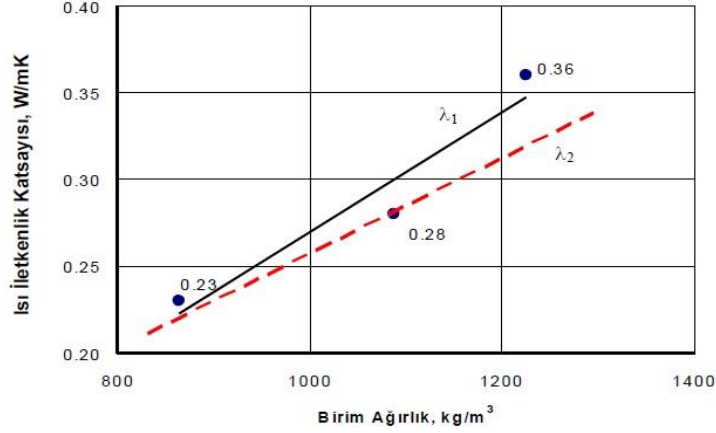
4.4.3. Hafif betonun ısı iletkenliği

Isı İletkenlik Katsayısı λ (W/mK): Bir malzemenin ısıyı ne kadar iletmediğini gösteren değerdir. λ değeri ne kadar küçükse o malzeme ısıyı o kadar az iletir.

Hafif beton ısı izolasyonunu normal betona göre daha iyi sağlar. Bir malzemenin ısı iletkenliği o malzemenin silikat yapısı ile içindeki boşluklarda bulunan havanın ısı iletkenliklerinin toplamıdır (Demirboğa, 1999).

Normal betonun ısı iletkenliği, yoğunluğuna göre 1,4 ile 3,6 W/mK arasında değişirken; hafif beton için bu değer 0,2 ile 1,0 W/mK arasındadır. Bu özellik yoğunluğunun az olmasından dolayı hafif betonu önemli kılmaktadır (Neville, 1996).

3 farklı birim ağırlıkta üretilen hafif betonların ısı iletkenlik değerleri ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 4.1’de gösterilmektedir (Konuk, 2003).



Şekil 4.1. Hafif betonların birim ağırlıkları ile ısı iletkenlik katsayıları arasındaki ilişki.

4.4.4. Hafif betonun şekil değiştirmesi

Hafif agregalarla üretilen hafif betonlar gerilme şekil değiştirme ilişkisi yönünden ele alındığında normal betonun gerilme şekil değiştirmesine göre daha lineer ve gevrek davranış gösterir. Bu davranışın sebebi, agrega taneleri ve çimento matrisi arasındaki aderansın daha iyi oluşuna bağlıdır (Clarke, 1993).

Agrega sertliği çimento hamurunun sertliğine yakın olduğunda betonun elastik davranışa daha yakın bir özellik gösterdiği görülmüştür (Neville, 1995). Bu durumda hafif agrega sertliği de çimento hamurunun sertliğine yakın olursa hafif betonun elastiklik özelliği normal betonunkine benzer olur.

4.4.5. Hafif betonun elastisite modülü

Betonun elastisite modülü, beton karışımındaki malzemelerin (harç, agrega vb.) elastisite modüllerine ve malzemelerin karışımındaki oranlarına bağlıdır. Genel olarak hafif agregaların elastisite modülleri, normal agregaların elastisite modüllerinden daha düşüktür. Dolayısıyla hafif agregalarla üretilen hafif betonun elastisitesi de normal betonuna göre düşüktür. Hafif agrega içeren hafif betonların elastisite modülü normal betonların elastisite modülünün 1/2~3/4'ü kadardır (ACI 213R, 2003; Clarke, 1993).

4.4.6. Hafif betonun sünmesi

Sabit sıcaklık, sabit gerilme ve sabit çekme/basınç yükleri etkisi altında meydana gelen yavaş ancak ilerleyen plastik deformasyona, yani zaman içerisinde meydana gelen şekil değişimine sünme adı verilir.

Hafif agregalı betonların sünme şekil değiştirmesi ve kuruma rötresi normal betona göre daha fazladır. Çünkü hafif betonların elastisite modülü daha düşüktür. Hafif agregalı betonların sünmesi yaklaşık olarak 1,0-1,5 kat daha fazladır (ACI 213R, 2003; Clarke, 1993).

4.4.7. Hafif betonun su emmesi

Genel olarak hafif agregaların su emme oranı normal agregaların su emme oranına göre daha fazladır. Bu nedenle hafif agregalar kullanılarak üretilen hafif betonun su emme oranının normal betonunkinden daha fazla olduğu düşünölmektedir. Ancak, hafif betonda agregalar taneleri yüksek kalitede bir matris ile çevrilidir ve hafif beton su emmesinin normal beton su emmesiyle olan farkının çok yüksek olmadığı bilinmektedir (Clarke, 1993).

Elsharief, vd. (2005), yaptıkları deneysel çalışmada, kuru ve 24 saat suya doyurulan hafif agregalar kullanıp harç numuneleri üretmişlerdir. Bu kılcal su emme deneyinde suya doygun agregalar kullanılan harçların su emme oranlarının kuru agregalar kullanılan harçlara göre daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Bunun sebebinin suya doygun agregalar kullanılan harçtaki ara yüzey mikro yapısının daha boşluklu olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

4.4.8. Hafif betonun işlenebilirliği

Mekanik yönden hafif agregalı beton normal betona göre biraz daha farklı davranış sergilemektedir. Çökme değerleri aynı olan hafif beton ve normal beton kıyaslandığında, hafif betonun işlenebilirliği daha iyidir. Aynı zamanda hafif agregalı betonun işlenebilirliği iyi olduğundan ve yoğunluğunun az olmasından dolayı sıkıştırma faktörü daha düşük değer almaktadır. Çünkü betonu sıkıştıran yerçekimi kuvveti yoğunluk düşükçe azalır (Neville, 1995).

4.4.9. Hafif betonun dayanıklılığı

Hafif agregalı hafif betonların durabilitesi beton matrisinin boşluk yapısıyla büyük ölçekte ilişkilidir (Lo, vd., 2008). Hafif agregalar ve çimento hamurunun rijitliklerinin birbirine yakın olması ve çimento hamuru matrisi ile hafif agregalar arasında iyi bir aderans olmasından dolayı dayanım oldukça yüksektir. Bu faktörler hafif agregalı betonun durabilitesini arttırmaktadır (Bremner, 1998).

5. MATERYAL VE METOD

Bu deneysel çalışmada, kil hammaddesinden kısa süreli pişirme ve uzun süreli pişirme yöntemleriyle hafif agrega üretimi amaçlanmıştır.

İlk aşamada kil ve çeşitli alkaliler farklı oranlarda karıştırılarak üretilen numuneler tünel fırında farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde uzun süreli pişirme yöntemiyle pişirilmiştir. Elde edilen hafif agregaların fiziksel, mekanik, mineralojik özellikleri ve mikro yapıları değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada ise taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılacak dayanımda hafif agrega üretimi amaçlanmıştır. Bu amaçla kil; boşluk oluşturucu olarak evsel atık ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) ile iskelet oluşturucu olarak uçucu kül ile karıştırılmıştır. Karışımlar birlikte öğütülerek elde edilen agrega numuneleri kısa süreli (4 dakika) olarak iki farklı sıcaklıkta pişirilmiştir. Hafif agregaların, fırın sıcaklığına ve uçucu kül miktarlarına bağlı olarak fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

5.1. Kullanılan Malzemeler

5.1.1. Kil

Bu çalışmada kullanılan kil hammaddesi Eskişehir bölgesinden alınmıştır. Alınan hammadde herhangi bir işleme tabi tutulmadan Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarına getirilmiştir. İncelenen sahadan alınan ve laboratuvara getirilen hammadde agrega üretimi için uygun boyuta getirilmelidir. Bu işlem için halkalı değirmen kullanılmıştır. Boyut küçültme aşamasında hammadde halkalı değirmende öğütülmüştür. Kil hammaddesinin özgül yüzey (Blaine) değeri $2700 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 'dır ve kimyasal içeriği Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kil hammaddesinin XRF analizi.

Kimyasal Bileşen	% Değerleri
SiO ₂	56,07
Al ₂ O ₃	15,98
Fe ₂ O ₃	6,52
K ₂ O	1,93
CaO	1,91
MgO	1,27
TiO ₂	0,57
Na ₂ O	0,14
MnO	0,11
Cl	0,06
P ₂ O ₅	0,06
SO ₃	0,05
Cr ₂ O ₃	0,04
ZrO ₂	0,04
Kızdırma kaybı	15,25

5.1.2. Uçucu kül

Bu çalışmada katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Santralden alınan uçucu kül herhangi bir işleme tabi tutulmadan Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarına getirilmiştir.

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

a) F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

b) C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde $\text{CaO} > \%10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılır. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğın yanı sıra bağlayıcı özelliğine de sahiptirler.

Kullanılan uçucu külün özgül yüzey (Blaine) değeri $3270 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 'dir ve kimyasal kompozisyonu Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. Seyitömer uçucu külünün kimyasal kompozisyonu.

Kimyasal kompozisyon (%)	
Oksit	Seyitömer uçucu külü
SiO_2	54,49
Fe_2O_3	9,27
Al_2O_3	20,58
CaO	4,26
MgO	4,48
Na_2O	0,65
K_2O	2,01
SO_3	0,52
KK	3,74

Çizelge 5.2'ye göre; Seyitömer uçucu külü, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 toplamı %84,34 ile %70'den fazla ve CaO oranı %4,26 ile %10'dan düşük olduğu için F sınıfı uçucu küller sınıfına girmektedir. Çalışmada kullanılan uçucu kül Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Deneyde kullanılan uçucu kül.

5.1.3. Evsel atık

Bu çalışmada katkı maddesi olarak Eskişehir, İstanbul, Bilecik, Bursa, Ankara Belediyeleri Evsel Atık Su Arıtma Tesislerinden alınan 190805 kodlu evsel atık arıtma çamuru Bilecik ilinin Söğüt ilçesinde bulunan Söğüt Toprak Madencilik Sanayi A.Ş. 'den temin edilmiştir. Bu evsel atık %79 su ve %21 organik maddeden oluşmaktadır. Şekil 5.2'de kullanılan evsel atık gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Evsel atık arıtma çamuru.

5.1.4. Sodyum hidroksit

Bu çalışmada katkı maddesi olarak öğütülmüş olan toz halde sodyum hidroksit kullanılmıştır. Çizelge 5.3'te kullanılan sodyum hidroksit katkısının kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.3. Sodyum hidroksitin (NaOH) kimyasal özellikleri.

Görünüm	Beyaz pastil
Formül	NaOH
Safılık (NaOH)	%99,1
pH (20°C)	12,4
Ağır metal (Ag gibi)	Maksimum 20 ppm
Ağır metal (Pb gibi)	Maksimum 5 ppm
Toplam N (nitrojen)	Maksimum 3 ppm
CO₃	%0,9
Cl	Maksimum 50 ppm
PO₄	Maksimum 5 ppm
SiO₄	Maksimum 10 ppm
Erime noktası	318°C

5.1.5. Sodyum karbonat

Bu çalışmada katkı maddesi olarak öğütülmüş olan toz halde sodyum karbonat kullanılmıştır. Çizelge 5.4'te kullanılan sodyum karbonat katkısının kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.4. Sodyum karbonatın (Na₂CO₃) kimyasal özellikleri.

Formül	Na ₂ CO ₃
Safılık (Na₂CO₃) (minimum)	%99,3
Sodyum Klorür, NaCl (%)	Maksimum 0,25
Demir, Fe⁺³	Maksimum 15 ppm
Sülfat, SO₄ (%)	Maksimum 0,01
Suda çözünmeyen madde (%)	Maksimum 0,015
Isıtma Kaybı (250°C) (%)	Maksimum 0,30

5.1.6. Potasyum hidroksit

Bu çalışmada katkı maddesi olarak öğütülmüş olan toz halde potasyum hidroksit kullanılmıştır. Çizelge 5.5'te kullanılan potasyum hidroksit katkısının kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.5. Potasyum hidroksitin (KOH) kimyasal özellikleri.

Formül	KOH
Yoğunluk (20°C)	2.044 g/cm ³
Kaynama noktası	1,327°C
Erime noktası	360°C
Molar kütle	56.11 g mol ⁻¹

5.1.7. Su

Agrega üretiminde kullanılan su olarak, Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarının içme suyu kullanılmıştır. Agregada üretiminde kullanılan içme suyunun kimyasal analizi aşağıdaki Çizelge 5.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.6. Deneyde kullanılan suyun özellikleri.

KİMYA BİRİMİ ANALİZ SONUÇLARI			
Deney Adı	Standart	Sonuç	Sınır Değerler
Sülfat Muhtevası (SO ₄ ²⁻)	EPA 9038: 1986	23 ppm (mg/L)	2000 ppm (mg/L)
Klorür Muhtevası (Cl)	TS EN 196-21: 2002 B-	66 ppm (mg/lt)	4500 ppm (mg/L)
Sodyum Oksit (Na ₂ O)	TS EN 196-21: 2002 B-	52 ppm (mg/lt)	-
Potasyum Oksit (K ₂ O)	TS EN 196-21: 2002 B-	11 ppm (mg/lt)	-
Toplam Alkali	TS EN 196-21: 2002 B-	8 ppm (mg/lt)	1500 ppm (mg/L)
pH Değeri	TS EN 1008: 2003 B-6.	7,8	5 den küçük olmamalı
Koku	TS EN 1008: 2003 B-6.	Yok	Koku bulunmamalı
Renk	TS EN 1008: 2003 B-6.	Berrak	Açık sarı ya da daha acık olmalı
Askıda katı madde içeriği	TS EN 1008: 2003 B-6.	4ml	Çökelti 4 ml den az olmalı
Deterjanlar	TS EN 1008: 2003 B-6.	yok	Herhangi bir köpük 2 dakikada kaybolmalıdır.
Sıvı ve Katı Yağlar	TS EN 1008: 2003 B-6.	yok	Görünür izlerden daha fazla olmamalıdır.
Organik Madde	TS EN 1008: 2003	Oluşan renk standart renkten açıktır.	NaOH ilavesi sonrasında renk açık sarı ya da daha açık olmalıdır.
Kurşun (Pb ²⁻)	TS EN 1008: 2003	0,05 ppm	100 ppm (mg/L)
Fosfat (P ₂ O ₅)	TS EN 1008: 2003	1,5 ppm (mg/L)	100 ppm (mg/L)
Çinko (Zn ²⁻)	TS EN 1008: 2003	10 ppm (mg/L)	100 ppm (mg/L)

5.2. Deneysel Çalışmalar

Bu tez çalışması kapsamında farklı katkı ve karışım oranlarına sahip iki farklı hafif agrega üretimi yapılmıştır. Bu agregalara farklı kür uygulanarak, agregaların su emme, basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı, hacimsel genleşme, mineralojik özellikleri ve iç yapı değişiklikleri belirlenmiştir. Bu iki farklı agrega türü HA ve UK serisi olarak adlandırılmışlardır.

HA serisi çalışmasından elde edilen sonuçlarda, Na₂CO₃ katkısının kabuk oluşturuvcu etkisinden, birim hacim ağırlıkların, su emme miktarlarının ve basınç dayanımlarının istenilen

seviyede olmasından dolayı HA serisinde kullanılan 3 katkı çeşidinden Na_2CO_3 katkısı seçilerek UK serisi çalışmasına devam edilmiştir.

5.2.1. HA serisinde yapılan deneysel çalışmalar

HA serisi karışım hazırlama

Bu serilerin oluşturulmasında 3 farklı katkı ve 3 farklı katkı oranı kullanılmıştır. Bu katkılar; sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve potasyum hidroksittir (KOH). Kil halkalı değirmende öğütülerek toz haline getirilmiştir. Daha sonra kil ve katkılar ayrı ayrı ve belirli oranlarda karıştırılmıştır. Katkı miktarları kil ağırlığı esas alınarak %8-10-12 oranlarında kullanılmıştır. Kil söz edilen katkılarla birlikte halkalı değirmende öğütülmeye devam edilmiştir. Böylece malzeme homojenize duruma getirilmiştir. Toz haldeki öğütülmüş karışımlar havayla temas etmemesi için kilitli poşetlerde deney gününe kadar bekletilmiştir.

Öğütme işleminde Ünal Mühendislik markalı halkalı değirmen kullanılmıştır. Şekil 5.3'te halkalı değirmen gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Halkalı değirmenin görünümü.

HA serisi şekillendirme

Toz haldeki HA serisi karışımları kilitli poşetlerden çıkarıldığında nem tayin cihazıyla karışımların nem miktarları ölçülmüştür ve %2 nem oranına sahip oldukları görülmüştür. Daha sonra %2 neme sahip karışımlar su ilavesi yapılmadan çapı 25 mm olan silindir kalıpta 3 kN basınç yükü altında preslenerek numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Katkısız kil karışımına da az miktarda su püskürtülmüştür ve kontrol numunesi olarak adlandırılmıştır. Kontrol numunesinin şekillendirme işlemi de 3 kN yük etkisiyle oluşturulmuştur. Toplam 30 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen hafif agrega numunelerinin isimlendirilmesi ve karışım oranları Çizelge 5.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.7. HA serisi karışım oranları.

HA SERİSİ	Numune kodu	Piştirilen sıcaklık	Katkı	Katkı miktarı (%) (Kil ağırlığı esas alınmıştır.)
	K-D	920°C	-	-
	S8-D	920°C	NaOH	8
	S10-D	920°C	NaOH	10
	S12-D	920°C	NaOH	12
	SC8-D	920°C	Na ₂ CO ₃	8
	SC10-D	920°C	Na ₂ CO ₃	10
	SC12-D	920°C	Na ₂ CO ₃	12
	P8-D	920°C	KOH	8
	P10-D	920°C	KOH	10
	P12-D	920°C	KOH	12
	K-B	1000°C	-	-
	S8-B	1000°C	NaOH	8
	S10-B	1000°C	NaOH	10
	S12-B	1000°C	NaOH	12
	SC8-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	8
	SC10-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	10
	SC12-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	12
	P8-B	1000°C	KOH	8
	P10-B	1000°C	KOH	10
	P12-B	1000°C	KOH	12
	K-BY	1100°C	-	-
	S8-BY	1100°C	NaOH	8
	S10-BY	1100°C	NaOH	10
S12-BY	1100°C	NaOH	12	
SC8-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	8	
SC10-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	10	
SC12-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	12	
P8-BY	1100°C	KOH	8	
P10-BY	1100°C	KOH	10	
P12-BY	1100°C	KOH	12	

Toz haldeki karışımların nem miktarını ölçebilmek için Radwag MA 50.R marka nem tayin cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.4'te nem tayin cihazı gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Nem tayin cihazı.

HA serisi kurutma

Şekillendirilme işleminden sonra silindirik şekle sahip olan numuneler içerisindeki nemin uzaklaştırılması için 24 saat açık havada bekletilmiştir. Daha sonra numuneler, nemlerini tamamen kaybetmeleri için 105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat daha bekletilerek kurumaya bırakılmışlardır. Şekil 5.5'te Yüksel Kaya Makina markalı 105±2°C sıcaklıkla çalışan etüv gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Etüv görünümü.

HA serisi genleştirme

Genleştirme işlemi, istenilen özelliklerdeki hafif agregayı üretmek için esas sonucun alınacağı kısımdır. Numunenin hangi sıcaklıkta genişmeye başladığı ve hangi sıcaklıkta en iyi genişmeyi gösterdiğini tespit edebilmek için farklı fırınlar, farklı fırın sıcaklıkları ve farklı fırında kalma süreleri gibi faktörler göz önüne alınmıştır.

Üretilen silindir numuneler 920, 1000 ve 1100°C sıcaklıklarında ve sıcaklıkları kademeli olarak artan fırında pişirilmiştir. Dayanım, su emme ve birim hacim ağırlığı faktörlerine bağlı olarak en iyi pişirme sıcaklığını bulabilmek için her katkı türünün her katkı oranı belirtilen sıcaklıkların hepsinde pişirilmiştir. Numunelerin pişirme sıcaklığı fırında kademeli olarak arttığı gibi soğuma işlemleri de fırın içerisinde kademeli olarak azaltılarak yapılmıştır.

HA serisi numunelerinin pişirme işlemi Kütahya Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Tulû Porselen Fabrikası'ndaki tünel tipi fırında gerçekleştirilmiştir. Numuneler 920°C'de 10 saat 15 dakika, 1000°C'de 9 saat 45 dakika ve 1100°C'de 4 saat 30 dakika fırında pişirme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 5.6'da deneyde kullanılan RIEDHAMMER marka tünel tipi fırın gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Tünel fırın

5.2.2. UK serisinde yapılan deneysel çalışmalar

UK serisi karışım hazırlama

Bu serilerin oluşturulmasında 3 farklı katkı kullanılarak 2 farklı karışım hazırlanmıştır. Bu katkılar; Na_2CO_3 , evsel atık ve uçucu küldür. Kil halkalı değirmende öğütülerek toz haline getirilmiştir. Karışımlarda kullanılacak uygun Na_2CO_3 ve evsel atık miktarı ön çalışmalar yapılarak sırasıyla (kil ağırlığı esas alınarak) %8 ve %5 olarak belirlenmiştir. Genleşme miktarını artırmak için iki karışımda da aynı oranda evsel atık kullanılmıştır. Homojenliği sağlamak için karışımda kullanılan malzemeler kil, uçucu kül evsel atık ve Na_2CO_3 beraber olarak (toz halde) halkalı değirmende öğütülmüştür. Bu şekilde katkıların karışım içinde homojen dağılımı sağlanmıştır. Bu çalışma UK serisi olarak isimlendirilmiştir. %12 ve %17 uçucu kül kullanılarak hazırlanan iki ayrı seri (UK12 ve UK17) oluşturulmuştur. Toz haldeki öğütülmüş karışımlar havayla temas etmemesi için kilitli poşetlerde 4 gün bekletilmiştir.

UK serisi şekillendirme

Toz haldeki UK12 ve UK17 serisi karışımları deney gününe gelindiğinde kilitli poşetlerden çıkarılmıştır. Her iki seride de toz haldeki karışıma bir miktar su ilavesi yapılmış, hamur oluşturulmuş ve iyi bir şekilde karıştırılarak hamur uygun kıvamına getirilmiştir. Daha sonra iki seri içinde hamur kıvamına gelen malzeme 15 mm çapında silindir kalıba yerleştirilmiştir ve hamur preste 1 kN, 3 kN ve 5 kN basınç yükleri altında sıkıştırılmıştır. Oluşturulan hafif agrega numunelerinin isimlendirilmesi, numunelerine uygulanan yükler ve numune katkı oranları Çizelge 5.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.8. UK serisi karışım oranları

		Katkı (Kil ağırlığı esas alınmıştır.)			Uygulanan yük (kN)	Pişirilme sıcaklığı
	Numune kodu	Na ₂ CO ₃	Evsel atık	Uçucu kül		
UK12Serisi	UK12-1-BE	8%	5%	12%	1 kN	1050°C
	UK12-1-BY				1 kN	1100°C
	UK12-3-BE				3 kN	1050°C
	UK12-3-BY				3 kN	1100°C
	UK12-5-BE				5 kN	1050°C
	UK12-5-BY				5 kN	1100°C
UK17Serisi	UK17-1-BE	8%	5%	17%	1 kN	1050°C
	UK17-1-BY				1 kN	1100°C
	UK17-3-BE				3 kN	1050°C
	UK17-3-BY				3 kN	1100°C
	UK17-5-BE				5 kN	1050°C
	UK17-5-BY				5 kN	1100°C

UK serisi kurutma

Şekillendirme işleminden sonra oluşturulan 12 adet hafif agrega numunesi, içerisinde barındırdığı suyu uzaklaştırmak için 24 saat açık havada bekletilmiştir. Suyu tamamen uzaklaştırmak için hafif agrega numuneleri 105°C etüvde 24 saat daha bekletilerek kurumaya bırakılmıştır.

Kurutma işlemi, fırınlanacak olan ve fırında yüksek sıcaklık uygulanan numunelerde çatlak oluşumunu engellemek için önemli bir işlemdir. Sıkıştırılmış olan UK serisi numunelerinin dayanımları iyi olduğu için etüvde kurutulan numunelerde herhangi bir şekil değişimine rastlanmamıştır.

UK serisi genleştirme

UK serisi numunelerinin pişirme işlemi laboratuvarında bulunan kül fırında gerçekleştirilmiştir. Fırın çıkışında hafif agrega numuneleri ani soğumaya maruz bırakılmıştır. Hangi karışımın daha iyi sonuç vereceğini görebilmek için UK12 ve UK17 serisi numunelerine uygulanan her yük 1050 ve 1100°C sıcaklıklarda pişirilecek şekilde pişirme işlemi

gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7’de deneyde kullanılan 1100°C sıcaklığa ulaşabilen Protherm Furnaces marka kül fırını gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Kül fırını.

5.3. Hafif Agregalar İçin Yapılan Deneyler

Üretilen numunelerin üretim koşulları altında özelliklerinin belirlenebilmesi için birtakım fiziksel deneylerin yapılması, sonuçlarının değerlendirilmesi ve en iyi sonuçlara ulaşılabilmesi için bazı testler yapılmıştır.

HA serisi hafif agrega numunelerine su emme, basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, LAB, mikro yapı ve XRD analizi testleri uygulanmıştır.

UK serisi hafif agrega numunelerine su emme, basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, hacimsel genleşme ve mikro yapı testleri uygulanmıştır.

5.3.1. Su emme testi

Su emme deneyinde, DESİS marka 0,05 gr hassasiyete sahip 3000 g kapasiteli dijital tartı, 105±2°C' ye kadar ayarlanabilen etüv ve çeşitli büyüklükteki kaplar kullanılmıştır. Şekil 5.8’de gösterildiği gibi numuneler oda sıcaklığında su ile dolu bir kap içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.8. 920°C’de pişirilen HA serisi numunelerinin 24 saat suda bekletilme görüntüsü.

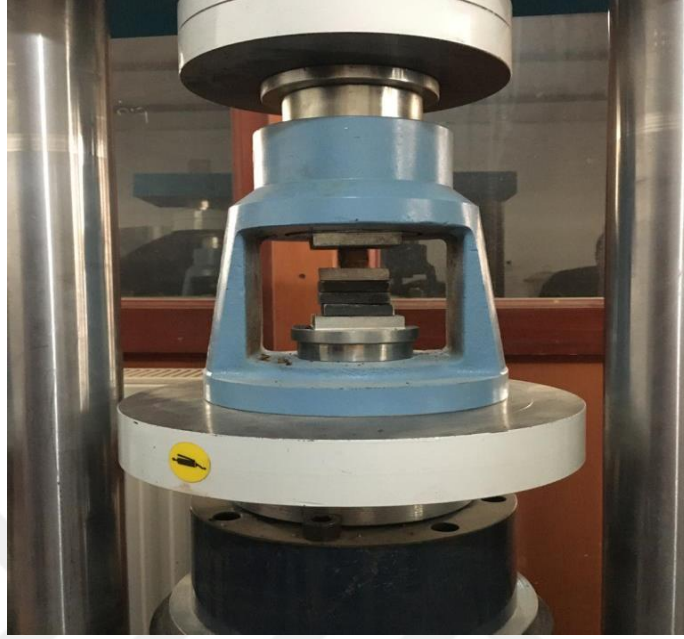
Ölçüm yapılmak istenen dakikalarda ve 24 saat su içinde bekletilmiş ve daha sonra sudan çıkarılıp bir bez yardımıyla yüzeylerindeki kaba su alındıktan sonra (yüzey kuru suya doymun hale geldiklerinde) hassas tartıda numunelerin ağırlıkları tartılmıştır (m_s). Emilen toplam suyu belirlemek için numuneler 105°C etüvde 24 saat kurumaları için bekletilmiştir. 24 saat sonunda etüvden çıkarılan numunelerin ağırlıkları tekrar tartılmıştır (m_k). Numunelerin su emme oranı, Eşitlik 5.1’den hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme oranı (\%)} = \frac{m_s - m_k}{m_k} \times 100 \quad (5.1.)$$

Kil agrega örneklerinin su emme kapasiteleri, ASTM C 127-42 ve C 128-57 standartlarında belirtilen esaslara göre belirlenmiş olup, öngörülen prensipler ve limit değerler baz değişken olarak kabul edilmektedir.

5.3.2. Basınç dayanımı testi

Şekil 5.9’da gösterildiği gibi su emme testi yapıldıktan sonra 105°C etüvde kurutulan numunelerin basınç presinde basınç dayanımları ölçülmüştür.



Şekil 5.9. Numunenin prese yerleştirilmesi.

5.3.3. Birim hacim ağırlık testi

Genel olarak numunelerin birim hacim ağırlığı oldukça düşük ve su içi tartımı mümkün olmadığı için numune içerisindeki boşlukların dikkate alınması gerekmektedir. Su emme testleri sonuçlarına bakarak numune içindeki boşlukların hacmi bulunur. Bu sayede hafif agrega numunelerinin birim hacim ağırlığına ulaşılmaktadır. Birim hacim ağırlık analizi için TS 1114 ve TS 3529 standartlarında öngörülen prensipler ve limit değerler baz değişken olarak kabul edilmektedir. Şekil 5.10'da birim hacim ağırlığı oldukça düşük olan hafif agrega numunesi gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Birim hacim ağırlığı oldukça düşük olan UK serisi numuneleri.

5.3.4. Hacimsel genleşme testi

Numunelerinin pişirilmeden önceki çap, yükseklik değerleri kumpas ile ölçülmüştür. Buna göre ham hafif agrega numunesinin hacmi hesaplanıp not edilmiştir. Daha sonra pişirildikten sonraki çap, yükseklik değerleri de yine aynı şekilde ölçülmüştür. Hacim hesabı yapılmıştır.

Genleşen hafif agrega numunesinin hacminin, ham hafif agrega numunesinin hacmine oranı hacimsel genleşme oranını vermektedir.

Genleşmeyi oluşturan asıl faktör, karışımda ısı etkisiyle birlikte oluşan gazların, sinter kabuğun oluşumuyla birlikte bünyede kapanıp kalmasıdır (Özgüven, 2009).

5.3.5. LAB testi

Deneysel çalışmada Dumlupınar Üniversitesi Seramik Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Konica Minolta CM-2300d markalı LAB test cihazıyla ölçüm yapılmıştır.

5.3.6. Optik mikroskopla mikro yapı analizi

Deneysel çalışmada Dumlupınar Üniversitesi İLTEM'de (İleri Teknolojiler Merkezi) bulunan Nikon AZ100M marka üstten aydınlatmalı optik mikroskop kullanılmıştır. Çalışmada hafif agrega numunelerinin optik mikroskop görüntüleri alınmıştır.

Optik mikroskopun avantajı boşluk sıvılarının varlığında numunenin kılcal yapısının gözlenebilmesidir. Bu nedenle kimyasal sıvılar varlığında tanecikler arasındaki etkileşimin doğasını anlamak amacıyla kilin optik mikroskop (OM) görüntüleri alınmıştır.

Kaya ve Fang (2005),organik sıvıların varlığında zemin yapısındaki değişiklikleri incelemek için optik mikroskop (OM) kullanmışlardır.

5.3.7. X-Ray difraksiyon analizi (XRD)

X dalgaları normal ışığın yansıyor kırılmasına benzer şekilde çarptıkları kristalde emilip yok olmadan kristal yüzeyinden içeriye birkaç atom tabakasını geçerler. Bu sırada atom tabakaları titreşir ve ışınları her yöne saçar. Belirli yönlerdeki ışınım uygun fazda olursa bunların çakışmasıyla beliren ışın, fotoğraf filmi üzerine düşürülür veya Geiger-Müller sayacıyla sayılarak şiddeti ve yönü saptanabilir (Önalp 2007).

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

HA serisi çalışmasında 920°C’de pişirilen numunelerde istenilen hafiflik elde edilememiştir. 1100°C’de pişirilen numunelerde sıcaklığın yüksek olmasından ve numunelerin fırında kalma sürelerinin fazla olmasından dolayı numuneler eriyerek tabana yayılmıştır. Basınç dayanımı ve hafiflik açısından aranan özelliklere 1000°C’de pişirilen hafif agrega numunelerinde ulaşılmıştır. Bu sıcaklıkta pişirilen bu numunelerin birim hacim ağırlıkları ve su emme değerleri de istenilen seviyededir. Bu nedenle uygulanan deneyler sadece 1000°C sıcaklık için yapılmıştır.

UK serisinin 1050 ve 1100°C sıcaklıklarda pişirilen hafif agrega numunelerinin su emme miktarları, basınç dayanımları, birim hacim ağırlıkları ve hacimsel genişleme miktarları ölçülerek pişirilme sıcaklıklarının ve uçucu kül miktarlarının farklı olması açısından karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu serideki UK12-3-BE ve UK17-3-BE numunelerinin optik mikroskop görüntüleri çekilmiş ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

6.1. HA Serisinden Elde Edilen Deney Sonuçları

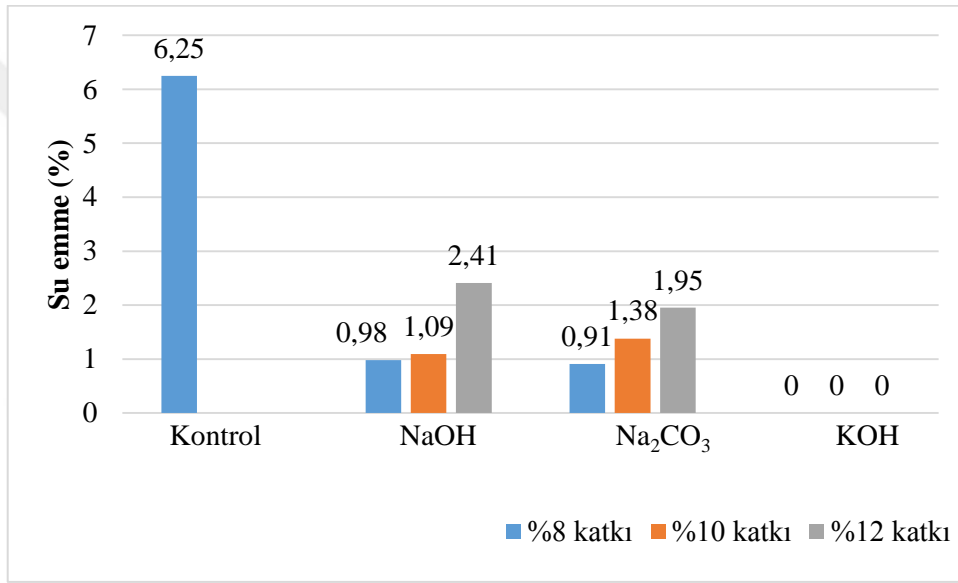
6.1.1. HA serisi su emme testi sonuçları

HA serisi numunelerinin 920°C, 1000°C ve 1100°C fırın çıkışından sonra hassas tartı ile ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra agrega numuneleri 24 saat boyunca suda bekletilmiştir. 24 saat sonunda numunelerin yüzeyi kurulanmış ve yüzey kuru suya doymun halde ağırlıkları ölçülmüştür. Buna göre su emme değerleri hesaplanmıştır. HA serisi numunelerinin su emme yüzdeleri Çizelge 6.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.1. HA serisi numunelerinin katkı, katkı oranı ve sıcaklıklara bağlı su emme yüzdeleri.

HA SERİSİ	Numune kodu	Piştirilen sıcaklık	Katkı	Katkı miktarı (%)	Su emme (%)
	K-D	920°C	-	-	14,53
	S8-D	920°C	NaOH	8	12,07
	S10-D	920°C	NaOH	10	14,28
	S12-D	920°C	NaOH	12	16,05
	SC8-D	920°C	Na ₂ CO ₃	8	0,25
	SC10-D	920°C	Na ₂ CO ₃	10	0,92
	SC12-D	920°C	Na ₂ CO ₃	12	3,48
	P8-D	920°C	KOH	8	10,78
	P10-D	920°C	KOH	10	11,41
	P12-D	920°C	KOH	12	12,97
	K-B	1000°C	-	-	6,25
	S8-B	1000°C	NaOH	8	0,98
	S10-B	1000°C	NaOH	10	1,09
	S12-B	1000°C	NaOH	12	2,41
	SC8-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	8	0,91
	SC10-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	10	1,38
	SC12-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	12	1,95
	P8-B	1000°C	KOH	8	0
	P10-B	1000°C	KOH	10	0
	P12-B	1000°C	KOH	12	0
	K-BY	1100°C	-	-	4,5
	S8-BY	1100°C	NaOH	8	0
	S10-BY	1100°C	NaOH	10	0
S12-BY	1100°C	NaOH	12	0	
SC8-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	8	0	
SC10-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	10	0	
SC12-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	12	0	
P8-BY	1100°C	KOH	8	0	
P10-BY	1100°C	KOH	10	0	
P12-BY	1100°C	KOH	12	0	

NaOH ve KOH katkılı numuneler 920°C sıcaklıkta pişirildiklerinde su emme miktarları (%10-16) kontrol karışımına (%14) yakın bulunmuştur. Bu sıcaklıkta Na₂CO₃ katkısına sahip numunelerin su emme miktarları (0,9-3) kontrol numunesine göre oldukça düşüktür. Bu durum Na₂CO₃ katkısının sinterleme sıcaklıklarını düşürmesi sonucu oluşan camsı yapı ve tane tane etkileşimlerinin artmasıdır. 1100°C sıcaklıkta pişirilen numuneler ise tamamen camlaştıkları için hiç su emmemektedir. 1000°C'de pişirilen numunelerin su emme yüzdeleri Şekil 6.1'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1. 1000°C'de pişirilen HA serisi numunelerinin su emme yüzdeleri.

1000°C'de pişirilen numunelerin su emme değerleri oldukça düşüktür. Farklı oranlarda KOH katkısına sahip numunelerin su emme değerleri sıfırdır. NaOH ve Na₂CO₃ katkısına sahip numunelerin katkı oranı arttıkça boşluk boyutunun büyümesine bağlı olarak su emme değerlerinde artış meydana gelmektedir. 1000°C'den sonra oluşan camsı yapı nedeniyle su emme sadece yüzeyde oluşan kapalı boşluklarda oluşmaktadır. Aslında numuneler içerisine su emmemektedir.

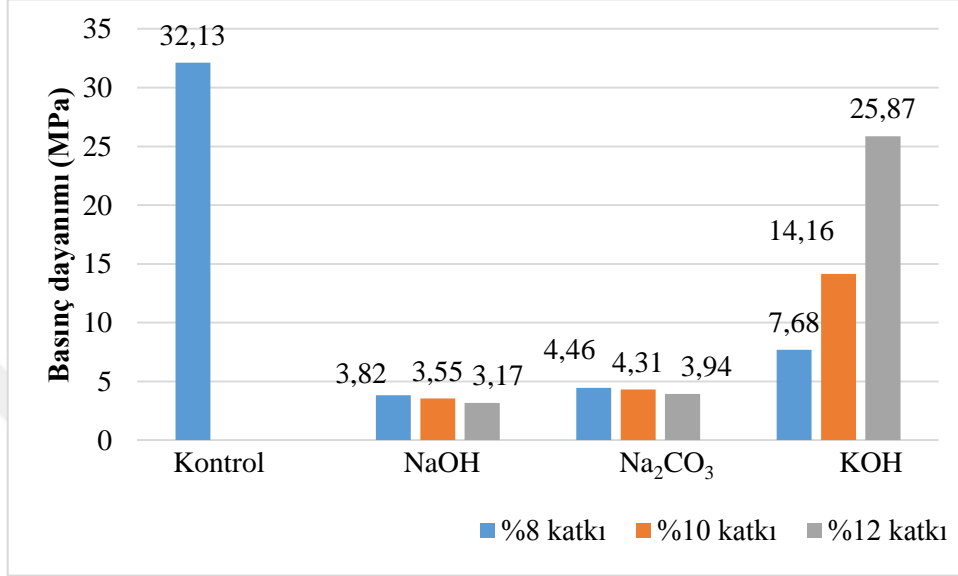
6.1.2. HA serisi basınç dayanımı testi sonuçları

3 farklı katkı, katkı oranı ve sıcaklıkta pişirilen HA serisi numunelerinin basınç dayanımları birlikte olarak Çizelge 6.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.2. HA serisi numunelerinin katkı, katkı oranı ve sıcaklıklara bağlı basınç dayanımları.

HA SERİSİ	Numune kodu	Piştirilen sıcaklık	Katkı	Katkı miktarı (%)	Basınç dayanımı (MPa)
	K-D	920°C	-	-	33,67
	S8-D	920°C	NaOH	8	9,75
	S10-D	920°C	NaOH	10	8,44
	S12-D	920°C	NaOH	12	8,23
	SC8-D	920°C	Na ₂ CO ₃	8	9,41
	SC10-D	920°C	Na ₂ CO ₃	10	8,86
	SC12-D	920°C	Na ₂ CO ₃	12	6,17
	P8-D	920°C	KOH	8	9,48
	P10-D	920°C	KOH	10	10,25
	P12-D	920°C	KOH	12	12,86
	K-B	1000°C	-	-	32,13
	S8-B	1000°C	NaOH	8	3,82
	S10-B	1000°C	NaOH	10	3,55
	S12-B	1000°C	NaOH	12	3,17
	SC8-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	8	4,46
	SC10-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	10	4,31
	SC12-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	12	3,94
	P8-B	1000°C	KOH	8	7,68
	P10-B	1000°C	KOH	10	14,16
	P12-B	1000°C	KOH	12	25,87
	K-BY	1100°C	-	-	28,43
	S8-BY	1100°C	NaOH	8	3,24
	S10-BY	1100°C	NaOH	10	2,88
S12-BY	1100°C	NaOH	12	2,22	
SC8-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	8	3,83	
SC10-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	10	3,50	
SC12-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	12	3,25	
P8-BY	1100°C	KOH	8	3,78	
P10-BY	1100°C	KOH	10	4,65	
P12-BY	1100°C	KOH	12	5,14	

1000°C’de pişirilen numunelerin dayanımları Şekil 6.2’de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. 1000°C’de pişirilen HA serisi numunelerinin basınç dayanımları.

1000°C sıcaklıkta pişirilen numunelerin içerdikleri katkılara göre dayanım sonuçları incelendiğinde, NaOH ve Na₂CO₃ katkısına sahip numunelerin katkı oranlarının artmasıyla basınç dayanımlarının düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi katkı oranının artmasıyla numunenin içerdiği boşluk boyutunun büyümesi, boşluk dağılımındaki homojenliğin azalmasıdır. Aynı zamanda bu serilerin birim hacim ağırlıkları da katkı miktarındaki artışa paralel olarak azalmaktadır. Ancak KOH katkısına sahip numuneler bunlara göre zıt bir davranış göstermektedir. KOH katkılı numunelerde katkı oranı arttıkça boşluk boyutu azalmakta, basınç dayanımı artmaktadır. Burada dayanım yoğunluk artışıyla iyileştirilebilmektedir.

KOH katkısı bu katkılar içerisindeki iç yapıdaki amorflaşma miktarını en fazla arttıran katkıdır. Bu nedenle KOH katkılı numunelerin basınç dayanımı miktarı, diğer katkılara sahip numunelerden daha fazladır.

NaOH katkısının ergime sıcaklığı KOH katkısına göre daha düşüktür. Bu nedenle NaOH katkısının boşluk oluşturma, camlaştırma ve köpürme oranı KOH’a göre daha yüksektir. NaOH katkısının köpürmesiyle birlikte ortaya çıkan gözenekler dayanımı düşürmektedir. Bu katkıya sahip numunelerde camlaşma yapının her yerinde, KOH katkılı numunelerde camlaşma

yüzeye yakın meydana gelmektedir. Bu nedenle yapının bozulması KOH katkısına sahip numunelerde daha azdır. Basınç dayanımının yüksek çıkmasının bir diğer nedeni de budur.

Na_2CO_3 katkısı ilavesinin NaOH katkısı ilavesine göre basınç dayanımını daha fazla arttırdığı görülmektedir. Ancak Na_2CO_3 miktarının artmasıyla basınç dayanımında düşüş yaşanmaktadır. Na_2CO_3 katkısının gözenek oluşturma eğiliminin fazla olması dayanımların kontrol numunesine göre oldukça düşük olmasının en büyük sebebidir.

6.1.3. HA serisi birim hacim ağırlık testi sonuçları

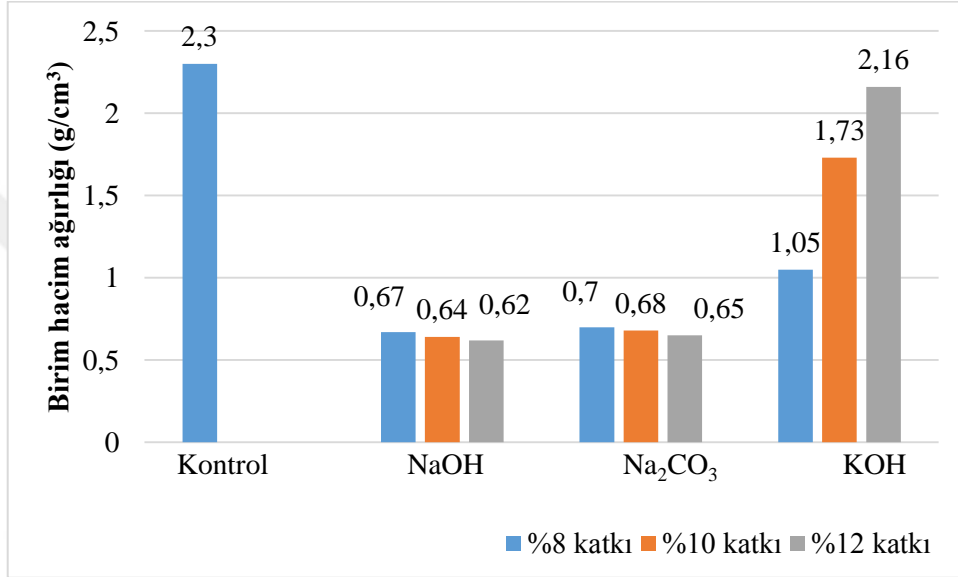
3 farklı katkı, katkı oranı ve sıcaklıkta pişirilen HA serisi numunelerinin birim hacim ağırlıkları birlikte olarak Çizelge 6.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 6.3. HA serisi numunelerinin katkı, katkı oranı ve sıcaklıklara bağlı birim hacim ağırlıkları (g/cm³).

HA SERİSİ	Numune kodu	Piştirilen sıcaklık	Katkı	Katkı miktarı (%)	Birim hacim ağırlığı(g/cm ³)
	K-D	920°C	-	-	1,79
	S8-D	920°C	NaOH	8	2,02
	S10-D	920°C	NaOH	10	1,75
	S12-D	920°C	NaOH	12	1,76
	SC8-D	920°C	Na ₂ CO ₃	8	2,36
	SC10-D	920°C	Na ₂ CO ₃	10	2,37
	SC12-D	920°C	Na ₂ CO ₃	12	2,22
	P8-D	920°C	KOH	8	1,91
	P10-D	920°C	KOH	10	1,94
	P12-D	920°C	KOH	12	1,90
	K-B	1000°C	-	-	2,30
	S8-B	1000°C	NaOH	8	0,67
	S10-B	1000°C	NaOH	10	0,64
	S12-B	1000°C	NaOH	12	0,62
	SC8-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	8	0,70
	SC10-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	10	0,68
	SC12-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	12	0,65
	P8-B	1000°C	KOH	8	1,05
	P10-B	1000°C	KOH	10	1,73
	P12-B	1000°C	KOH	12	2,16
	K-BY	1100°C	-	-	2,39
	S8-BY	1100°C	NaOH	8	0,57
	S10-BY	1100°C	NaOH	10	0,53
S12-BY	1100°C	NaOH	12	0,48	
SC8-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	8	0,61	
SC10-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	10	0,57	
SC12-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	12	0,51	
P8-BY	1100°C	KOH	8	0,92	
P10-BY	1100°C	KOH	10	1,65	
P12-BY	1100°C	KOH	12	2,2	

Çizelge 6.10'dan görüldüğü gibi sıcaklığın fazla olması NaOH ve Na₂CO₃ katkılarına sahip numunelerde katkıların yüksek sıcaklıkta köpürme ve boşluk oluşturmasından dolayı birim hacim ağırlığı düşürmektedir.

1000°C'de pişirilen numunelerin birim hacim ağırlıkları Şekil 6.3'te gösterilmektedir.



Şekil 6.3. 1000°C'de pişirilen HA serisi numunelerinin birim hacim ağırlıkları.

Şekil 6.21'de gösterildiği gibi 1000°C'de pişirilen NaOH ve Na₂CO₃ katkılı numunelerde katkı oranının artmasıyla birim hacim ağırlık değerleri düşmektedir. Bunun temel sebebi bu katkıların ergime sıcaklığını düşürmesi, köpürmesi, hacimsel genleşme ve boşluk oluşturmasıdır. Artan katkı oranıyla numune içerisindeki boşluk boyutu büyümekte ve birim hacim ağırlık değeri de bu etkenlere bağlı olarak azalmaktadır. Ancak basınç dayanımında olduğu gibi birim hacim ağırlıkta da KOH katkısı, NaOH ve Na₂CO₃ katkılarından farklı davranmaktadır. Katkı oranının artmasıyla boşluk boyutu küçülmekte ve birim hacim ağırlığında artış meydana gelmektedir.

Çizelge 6.4'te HA serisi numunelerine yapılan deneylerin sonuçları beraber olarak tablo haline getirilmiştir.







Çizelge 6.4. HA serisi numunelerinin deney sonuçları.

HA SERİSİ	Numune kodu	Piştirilen sıcaklık	Katkı	Katkı miktarı (%)	Su emme (%)	Basınç dayanımı (MPa)	Birim hacim ağırlığı (g/cm ³)
	K-D	920°C	-	-	14,53	33,67	1,79
	S8-D	920°C	NaOH	8	12,07	9,75	2,02
	S10-D	920°C	NaOH	10	14,28	8,44	1,75
	S12-D	920°C	NaOH	12	16,05	8,23	1,76
	SC8-D	920°C	Na ₂ CO ₃	8	0,25	9,41	2,36
	SC10-D	920°C	Na ₂ CO ₃	10	0,92	8,86	2,37
	SC12-D	920°C	Na ₂ CO ₃	12	3,48	6,17	2,22
	P8-D	920°C	KOH	8	10,78	9,48	1,91
	P10-D	920°C	KOH	10	11,41	10,25	1,94
	P12-D	920°C	KOH	12	12,97	12,86	1,90
	K-B	1000°C	-	-	6,25	32,13	2,30
	S8-B	1000°C	NaOH	8	0,98	3,82	0,67
	S10-B	1000°C	NaOH	10	1,09	3,55	0,64
	S12-B	1000°C	NaOH	12	2,41	3,17	0,62
	SC8-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	8	0,91	4,46	0,70
	SC10-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	10	1,38	4,31	0,68
	SC12-B	1000°C	Na ₂ CO ₃	12	1,95	3,94	0,65
	P8-B	1000°C	KOH	8	0	7,68	1,05
	P10-B	1000°C	KOH	10	0	14,16	1,73
	P12-B	1000°C	KOH	12	0	25,87	2,16
	K-BY	1100°C	-	-	4,5	28,43	2,39
	S8-BY	1100°C	NaOH	8	0	3,24	0,57
	S10-BY	1100°C	NaOH	10	0	2,88	0,53
S12-BY	1100°C	NaOH	12	0	2,22	0,48	
SC8-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	8	0	3,83	0,61	
SC10-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	10	0	3,50	0,57	
SC12-BY	1100°C	Na ₂ CO ₃	12	0	3,25	0,51	
P8-BY	1100°C	KOH	8	0	3,78	0,92	
P10-BY	1100°C	KOH	10	0	4,65	1,65	
P12-BY	1100°C	KOH	12	0	5,14	2,2	





6.1.4. HA serisi numunelerinin LAB testi sonuçları ve numunelerin boşluk yapısı

Katkı oranları ve kodları belirlenmiş 1000°C’de pişen HA serisi numunelerinin renk analiz sonuçları (L*a*b değerleri) ve numunelerin boşluk yapıları Çizelge 6.5’te gösterilmektedir.

Çizelge 6.5. HA serisi numunelerinin boşluk yapısı ve LAB değerleri.

	S8-B numunesi		
	L	A	B
	32,97	9,12	5,05
	S10-B numunesi		
	L	A	B
	37,26	5,73	3,1
	S12-B numunesi		
	L	A	B
	37,89	5,17	2,55
	SC8-B numunesi		
	L	A	B
	40,29	2,76	10,16
	SC10-B numunesi		
	L	A	B
	38,05	7,93	5,28
	SC12-B numunesi		
	L	A	B
	37,88	8,25	4,23

Çizelge 6.5. (Devam) HA serisi numunelerinin boşluk yapısı ve LAB değerleri.

	P8-B numunesi		
	L	A	B
	39,09	11,43	8,76
	P10-B numunesi		
	L	A	B
	34,25	12,24	10,45
	P12-B numunesi		
	L	A	B
	35,08	12,84	11,35
	K-B numunesi		
	L	A	B
	35,54	19,15	17,97

Numunelere ait L^*a^*b ölçüm sonuçları.

L^* : Helligkeit

Açıklık (lightness) koordinatı ($L^*=0$ siyahı gösterir ve $L^*=100$ beyazdır).

A^* : Grün-rot Achse

Kırmızı/yeşil koordinatıdır ve $+a^*$ kırmızıyı, $-a^*$ ise yeşili belirtir.

B^* : Gelb-blauAchse

Sarı/mavi koordinatıdır ve $+b^*$ sarıyı, $-b^*$ ise maviyi belirtir.

Çizelge 6.5'te gösterildiği gibi aynı sıcaklıkta sinterlenmiş numunelerin renklerinde farklılıklar gözlenmiş olup, katkı miktarı artışı ile numunelerin renklerinde koyulaşma meydana gelmektedir.

Sabit sıcaklık oranında kile ilave edilen NaOH ilavesi $L^*a^*b^*$ değerlerinde değişken özellik göstermektedir. Buna göre katkı ilavesi arttıkça sabit sıcaklıkta L^* değeri artarken a^* değeri ve b^* değeri azalma göstermektedir.

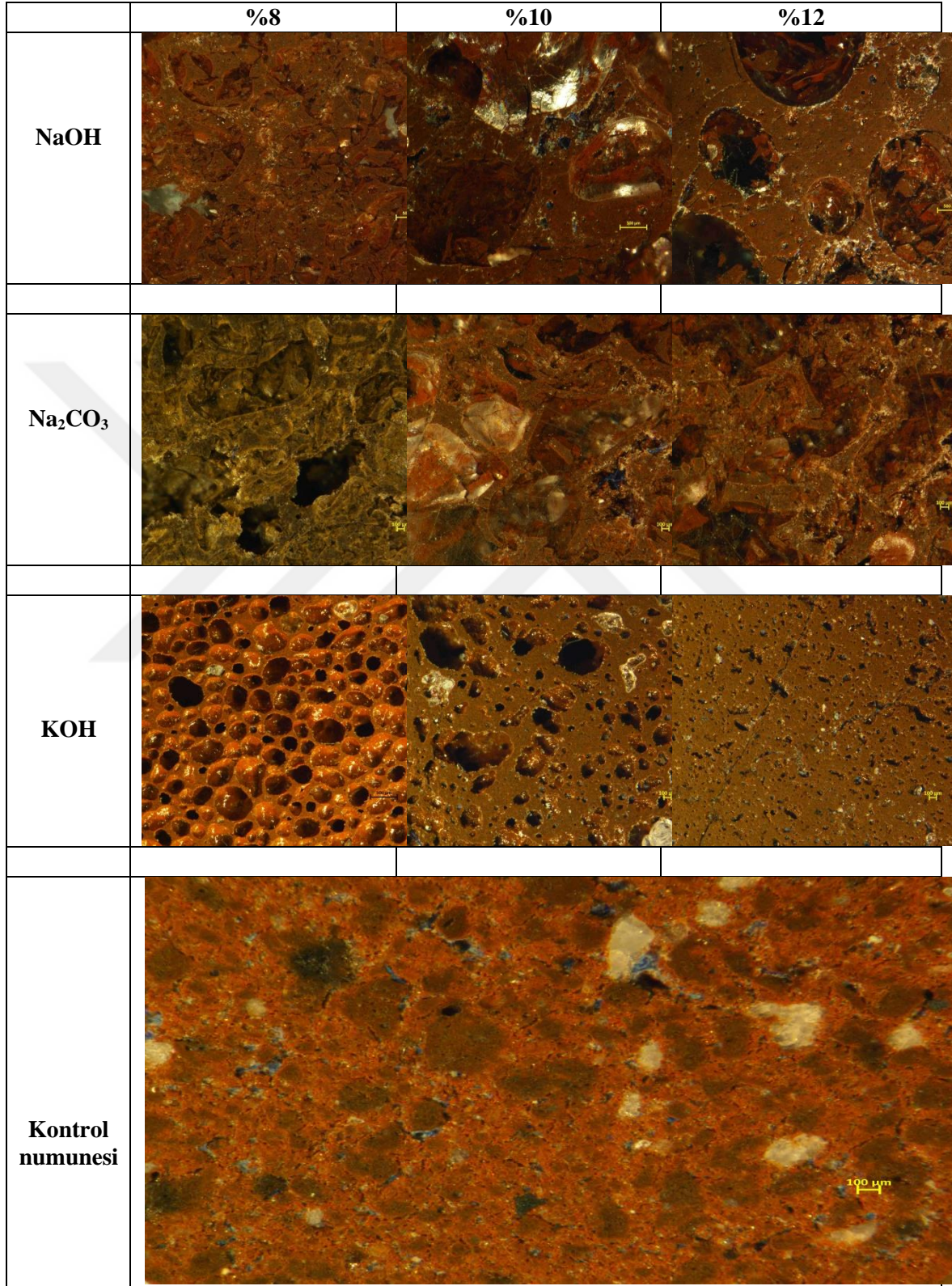
Sabit sıcaklık oranında kile ilave edilen Na_2CO_3 ilavesi $L^*a^*b^*$ değerlerinde değişken özellik göstermektedir. Buna göre katkı ilavesi arttıkça sabit sıcaklıkta L^* değeri azalırken a^* değeri artış ve b^* değeri azalış göstermektedir.

Sabit sıcaklık oranında kile ilave edilen KOH ilavesi $L^*a^*b^*$ değerlerinde değişken özellik göstermektedir. Buna göre katkı ilavesi arttıkça sabit sıcaklıkta L^* değeri azalırken a^* değeri ve b^* değeri artış göstermektedir.

Genel olarak 3 katkı ilavesi karşılaştırıldığında ise KOH katkı miktarının yapı içerisinde artmasıyla yapı içerisindeki boşluk oluşumu ile porozitenin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu gözeneklerin azaldığını mukavemet testinde çıkan sonuçlarda desteklemektedir.

6.1.5. HA serisi numunelerinin mikroskop görüntüleri

HA serisinin 1000°C 'de pişirilen numunelerinin mikroskop görüntüleri Şekil 6.4'te gösterilmektedir.



Şekil 6.4. HA serisi numunelerinin mikroskopik görüntüleri.

Sabit sıcaklıkta pişirilen katkılı kil numunelerinin optik polarize mikroskopta incelenmesi ile katkı oranlarına bağlı olarak karışımların homojen karışım olup olmadıkları, karışımların pişme kalitesi ve yoğunluk kazanma durumları, yapı içerisinde oluşan gözenek miktarları, reaksiyona girmeden kalan SiO₂ yapısı hakkında bilgi edinilebilir.

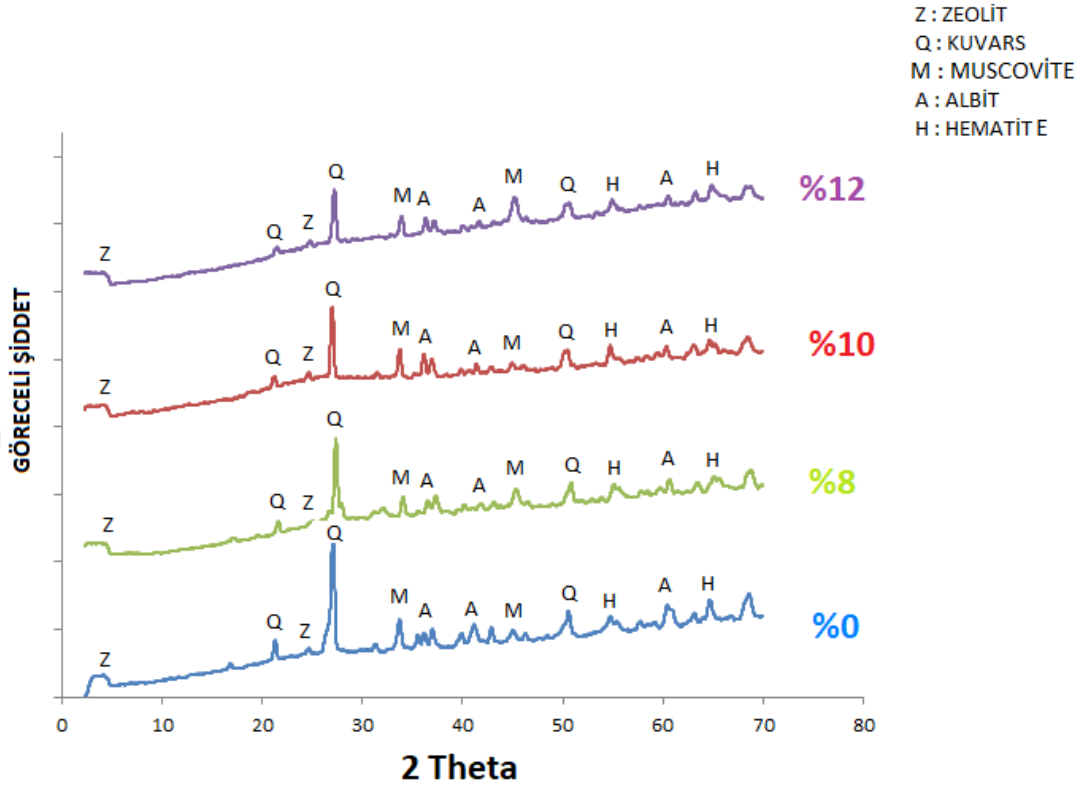
Katkı faz dağılımına genel olarak bakıldığında, sabit sıcaklıkta NaOH katkı ilavesi arttıkça yapıda yoğun görünüm azalmaktadır. Katkının arttırılmasıyla yüksek sıcaklık uygulanan yapıda köpürme meydana gelmektedir. Boşluk boyutunun büyüdüğü ve reaksiyona girmeden kalan tanelerin olduğu görülmektedir. Bunlar su emme değerindeki artış, birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımı değerlerindeki azalmayı açıklamaktadır.

Aynı şekilde sabit sıcaklıkta ilave edilen Na₂CO₃ katkı oranı arttıkça yapıda reaksiyona girmeden kalan tanelerin varlığı artmakta, yapıda köpürme meydana gelmekte ve boşluk boyutunun büyüdüğü görülmektedir. Bunlar su emme değerindeki artış, birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımı değerlerindeki azalmayı açıklamaktadır.

KOH ilavesinde ise katkı oranı arttıkça yapıdaki yoğunlaşmanın da arttığı görülmektedir. Tüm tanelerin reaksiyona girmiş olduğu söylenebilmektedir. Katkı miktarının artmasıyla yapıda oluşan boşluk boyutları küçülmektedir. Basınç dayanımı ve birim hacim ağırlığı değerinde görülen artışın mikro yapı özelliği ile ortaya çıkmış olduğu söylenebilmektedir.

6.1.6. HA serisi numunelerinin XRD analizi

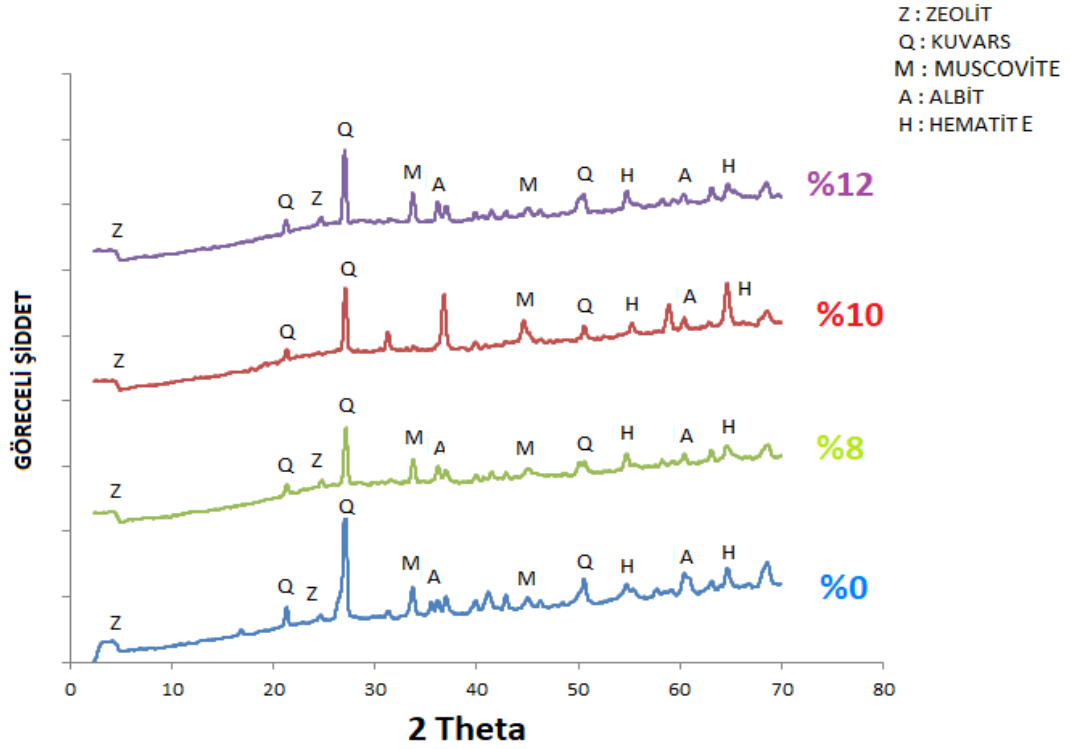
Şekil 6.5-6.6-6.7'de 1000°C'de pişirilen numunelerin XRD analiz grafikleri verilmektedir.



Şekil 6.5. NaOH katkısına sahip numunelerin XRD analizleri.

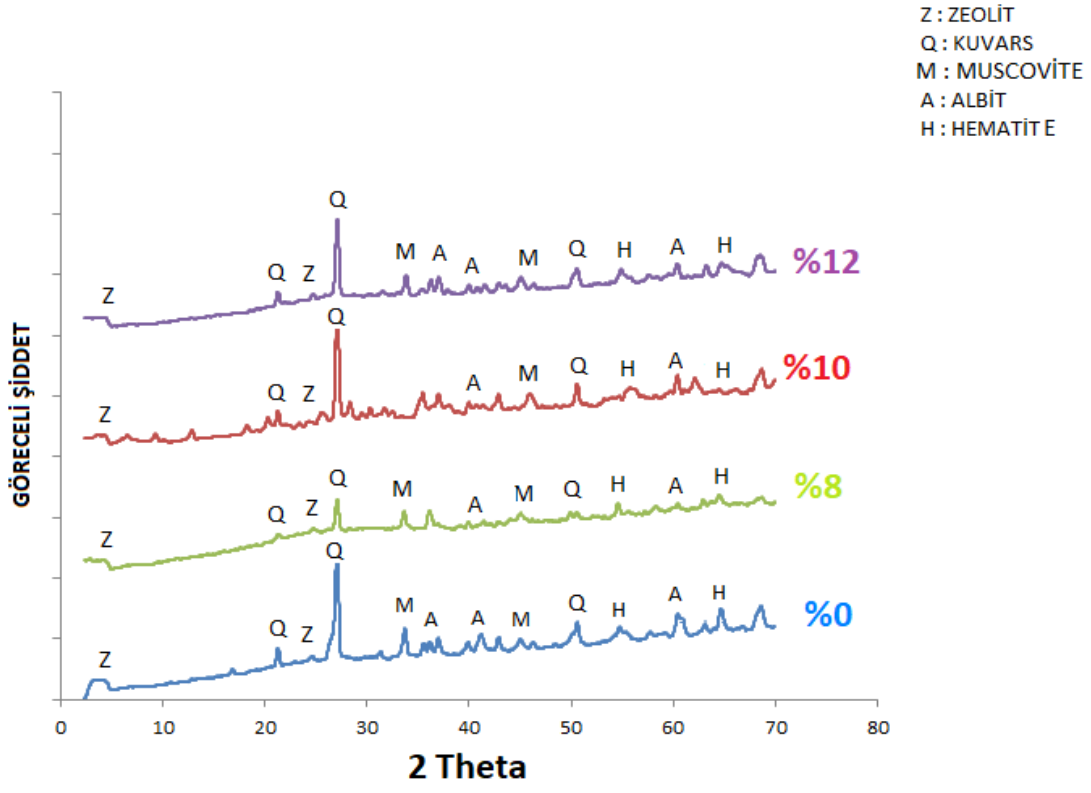
Kil hammaddesi içerisinde ilave edilen katkı çeşidine ve miktarına bağlı olarak değişen fazlar ve değişen faz şiddetleri ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Kil kendi başına 1000°C’de pişirildiğinde kuvars fazı, muskovit, hematit ve az miktarda albit ve zeolit fazlarından oluşmaktadır.

NaOH ilavesine bağlı olarak yapıda katkısız kil numunesine bakılarak kuvars fazının miktarında azalma temel farklılık olarak görülmektedir. NaOH katkısının artmasıyla üretilen numunelerin kuvars miktarında daha da düşüş yaşanmaktadır. Diğer fazların miktarlarında, kristallenme oranlarında piklerin değerlerinde belirgin bir değişiklik görülmemektedir. Genel olarak NaOH katkısı ile yapıdaki amorflaşma miktarı değişmektedir.



Şekil 6.6. Na_2CO_3 katkısına sahip numunelerin XRD analizleri.

Na_2CO_3 ilavesine bağlı olarak yapıda katkısız kil numunesine bakılarak kuvars fazının miktarında azalma temel farklılık olarak görülmektedir. Ancak Na_2CO_3 katkısının artmasıyla üretilen numunelerin kuvars miktarında tekrar bir artış yaşanmaktadır. Diğer fazların miktarlarında, kristallenme oranlarında piklerin değerlerinde belirgin bir değişiklik görülmemektedir. Ancak %10 Na_2CO_3 ilavesinde faz şiddetlerinde biraz değişim görülmektedir. Bu katkı oranında hematit miktarı diğer katkı oranlarına sahip yapılara göre artış göstermektedir. Genel olarak Na_2CO_3 katkısı ile yapıdaki amorflaşma miktarı değişmektedir.



Şekil 6.7. KOH katkısına sahip numunelerin XRD analizleri.

KOH ilavesine bağlı olarak yapıda katkısız kil numunesine bakılarak kuvars fazının miktarında azalma temel farklılık olarak görülmektedir. Ancak KOH katkısının artmasıyla üretilen numunelerin kuvars miktarında tekrar bir artış yaşanmaktadır. Bu artış %8 KOH ve %10 KOH katkılı numunelerin kuvars miktarlarının karşılaştırılmasıyla açık bir şekilde görülebilmektedir. Diğer fazların miktarlarında, kristallenme oranlarında piklerin değerlerinde belirgin bir değişiklik görülmemektedir. Genel olarak KOH katkısı ile yapıdaki amorfleşme miktarı değişmektedir.

6.2. UK Serisinden Elde Edilen Deneysel Sonuçları

6.2.1. UK serisi su emme testi sonuçları

UK12 ve UK17 serisi numunelerinin 1050°C ve 1100°C fırın çıkışından sonra sırasıyla 5, 10, 15, 30 dakikalık ve 24 saatlik süre zarflarında su emme miktarları ölçülmüştür. UK12 ve UK17 serisi numunelerinin suda bekletilen her süre için su emme yüzdeleri birlikte olarak Çizelge 6.6-6.7'de gösterilmektedir.

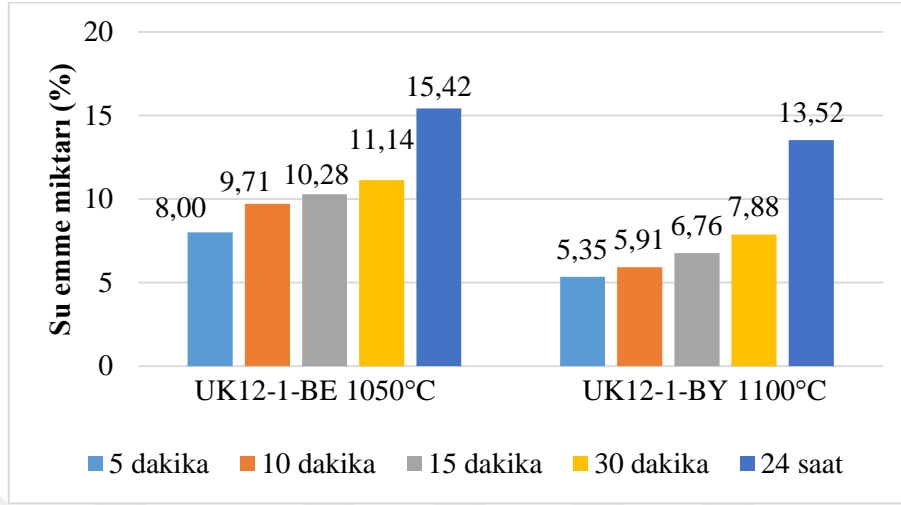
Çizelge 6.6. UK12 serisi numunelerinin zamana bağlı su emme yüzdeleri.

Numune no.	Numuneye uygulanan yük	Numunenin pişirilme sıcaklığı	Su emme (%)				
			5 dakika	10 dakika	15 dakika	30 dakika	24 saat
UK12-1-BE	1 kN	1050°C	8	9,71	10,28	11,14	15,42
UK12-1-BY	1 kN	1100°C	5,35	5,91	6,76	7,88	13,52
UK12-3-BE	3 kN	1050°C	10,25	11,39	12,25	14,24	19,08
UK12-3-BY	3 kN	1100°C	5,71	7,14	7,42	8,85	13,86
UK12-5-BE	5 kN	1050°C	7,42	8,57	9,71	11,42	16,57
UK12-5-BY	5 kN	1100°C	10,63	11,78	12,35	13,21	18,96

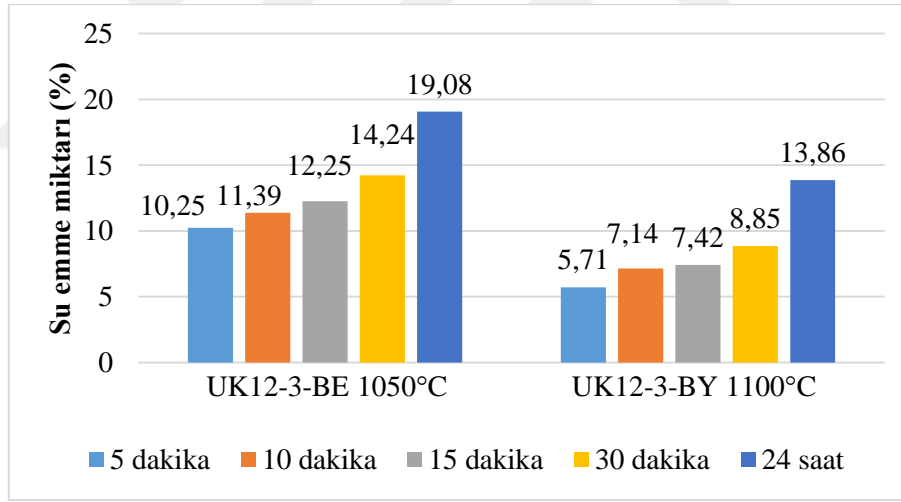
Çizelge 6.7. UK17 serisi numunelerinin zamana bağlı su emme yüzdeleri.

Numune no.	Numuneye uygulanan yük	Numunenin pişirilme sıcaklığı	Su emme (%)				
			5 dakika	10 dakika	15 dakika	30 dakika	24 saat
UK17-1-BE	1 kN	1050°C	9,85	11,54	11,83	12,11	17,46
UK17-1-BY	1 kN	1100°C	8,52	8,8	9,65	10,79	14,48
UK17-3-BE	3 kN	1050°C	9,11	10,22	11,32	11,87	16,02
UK17-3-BY	3 kN	1100°C	6,01	9,56	9,83	10,38	14,35
UK17-5-BE	5 kN	1050°C	8,68	8,96	9,8	10,64	15,12
UK17-5-BY	5 kN	1100°C	5,29	6,34	7,14	7,93	12,16

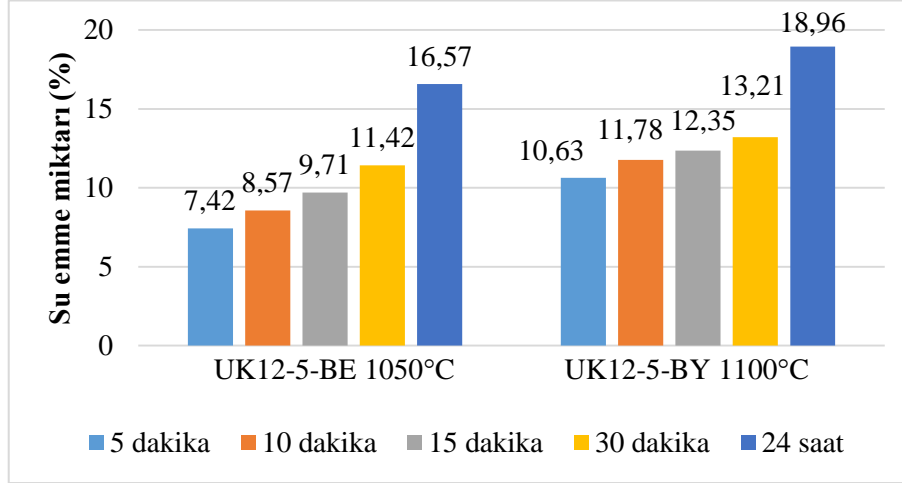
UK12 serisi numunelerinin bu süreler için su emme yüzdeleri detaylı olarak Şekil 6.8 -6.9-6.10' da gösterilmektedir.



Şekil 6.8. UK12-1-BE ve UK12-1-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.

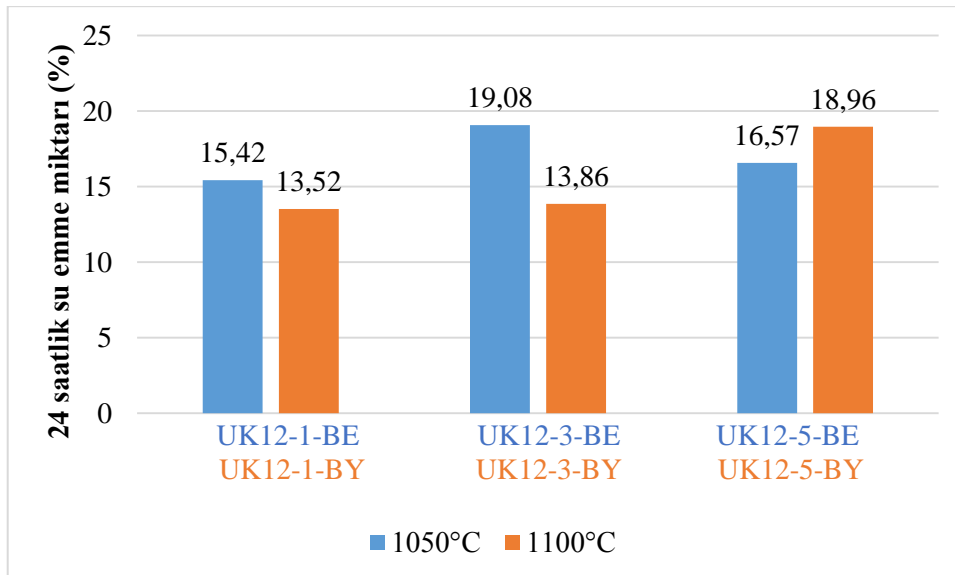


Şekil 6.9. UK12-3-BE ve UK12-3-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.



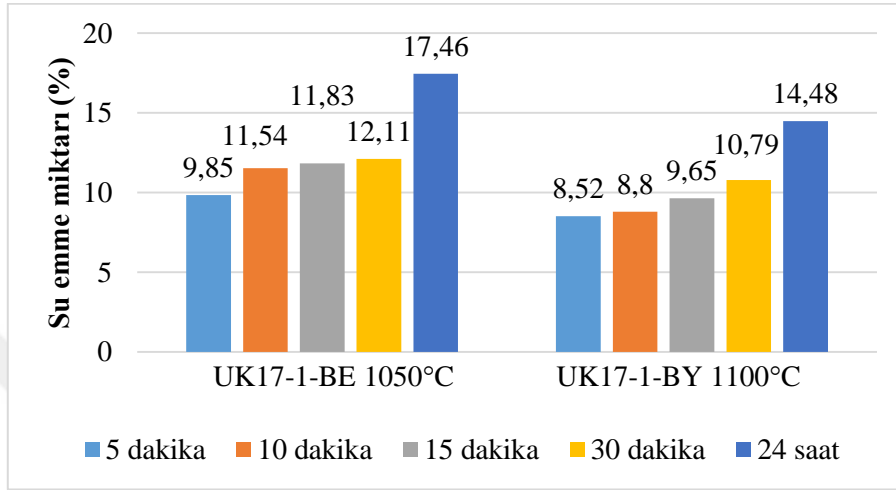
Şekil 6.10. UK12-5-BE ve UK12-5-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.

Şekillerden görüldüğü üzere 1 kN ve 3 kN yük uygulanarak oluşturulan, 1050°C’de pişirilen ve 24 saat suda bekletilen UK12 serisi numunelerinin su emme miktarları, aynı yükler uygulanarak oluşturulan ve 1100°C’de pişirilen numunelerin su emme miktarlarına göre daha fazladır. Ancak 5 kN yük etkisinden sonra 1100°C’de pişirilen UK12 serisi numunelerinin su emme miktarları, 1050°C’de pişirilen numunelerin su emme miktarlarına göre artış göstermektedir. Bu fark Şekil 6.11’de daha açık gösterilmektedir.

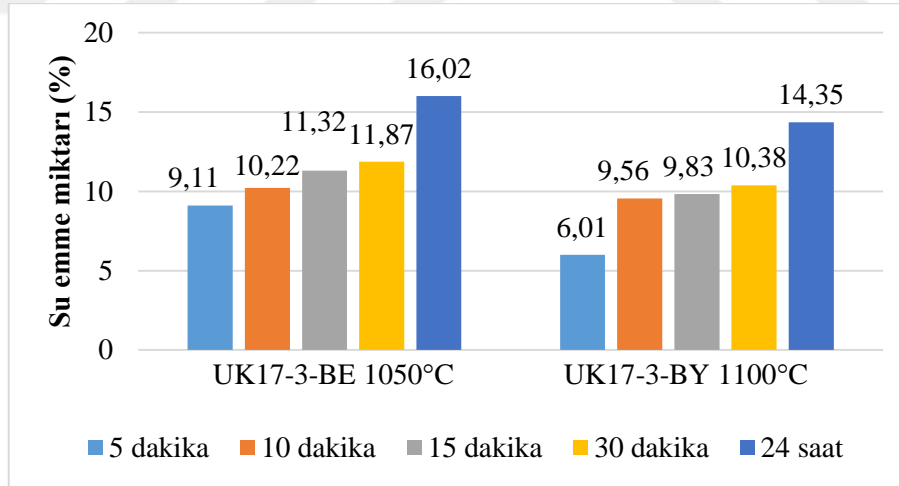


Şekil 6.11. UK12 serisi agregalarının sıcaklık değişimine bağlı su emme miktarları.

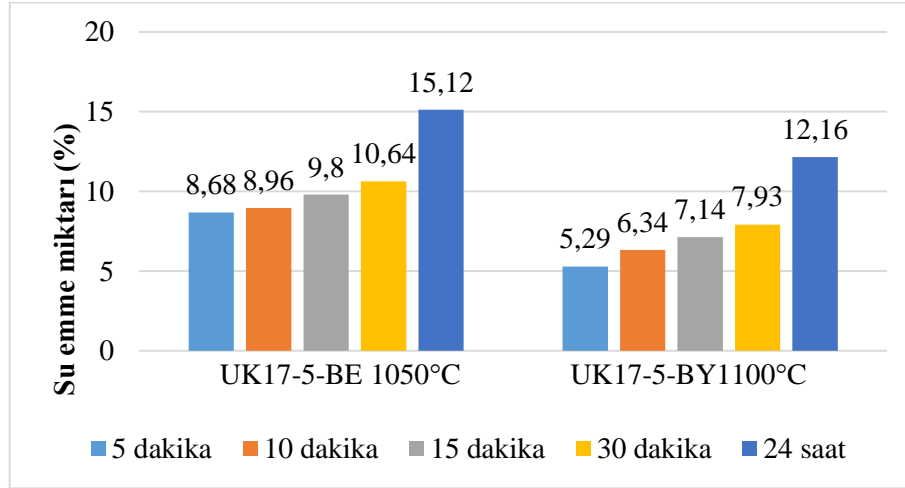
UK17 serisi agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreler için su emme miktarları detaylı olarak Şekil 6.12-6.13-6.14'te gösterilmektedir.



Şekil 6.12. UK17-1-BE ve UK17-1-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.

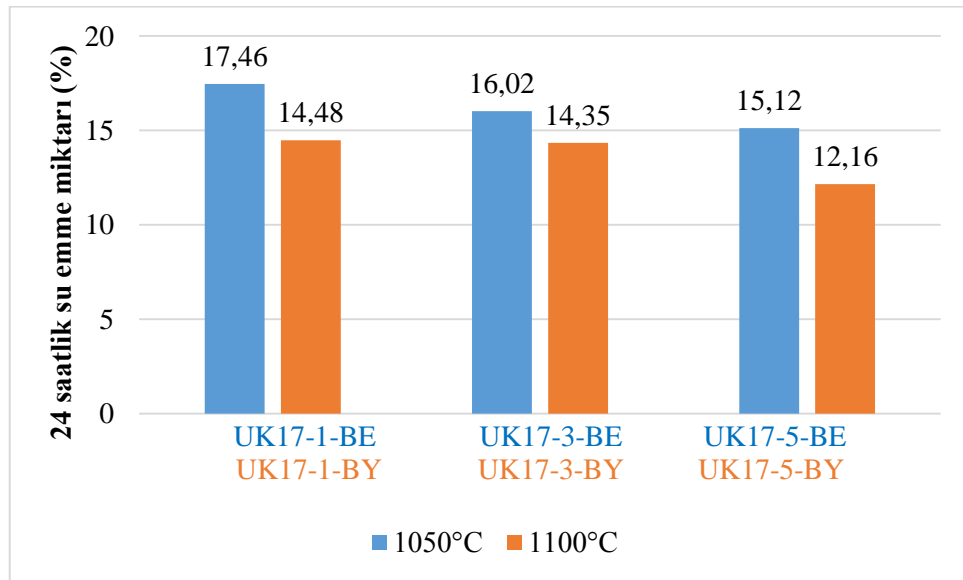


Şekil 6.13. UK17-3-BE ve UK17-3-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.



Şekil 6.14. UK17-5-BE ve UK17-5-BY agrega numunelerinin 5, 10, 15, 30 dakika ve 24 saat süreleri için sıcaklığa bağlı su emme miktarları.

Şekillerden görüldüğü üzere 1 kN, 3 kN ve 5 kN yük uygulanarak oluşturulan UK17 serisi agregalarının tüm süreler için 1050°C’de pişirildiklerinde ölçülen su emme miktarları, 1100°C’de pişirildiklerinde ölçülen su emme miktarlarından daha fazladır (Şekil 6.15).



Şekil 6.15. UK17 serisi agregalarının sıcaklık değişimine bağlı su emme miktarları.

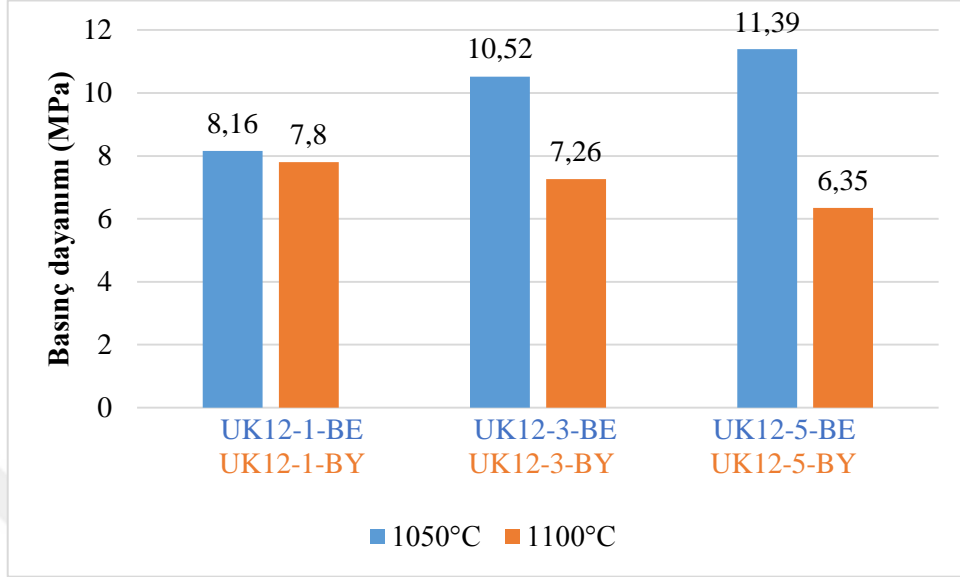
Şekil 6.15’ten görüldüğü gibi numunelere uygulanan pres yükü arttıkça ve pişirme sıcaklığının artışıyla numunelerin su emme miktarı da azalma göstermektedir.

6.2.2. UK serisi basınç dayanımı testi sonuçları

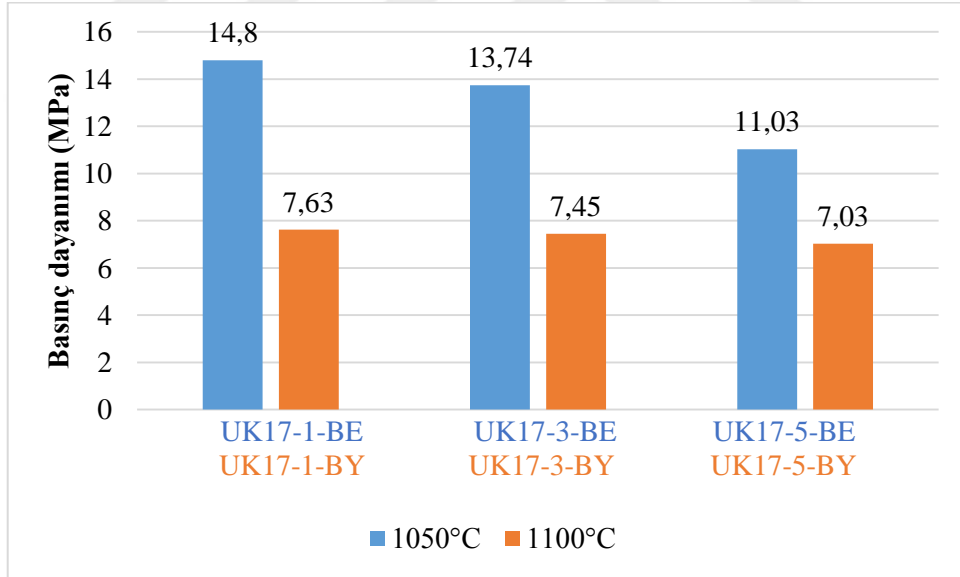
UK12 ve UK17 serisi numunelerinin uygulanan yük ve sıcaklık değişimine bağlı basınç dayanım değerleri birlikte olarak Çizelge 6.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.8. UK12 ve UK17 serisi numunelerinin yüke ve sıcaklığa bağlı basınç dayanımları (MPa).

	Numune kodu	Katki			Uygulanan yük (kN)	Pişirilme sıcaklığı	Basınç dayanımı (MPa)
		Na ₂ CO ₃	Evsel atık	Uçucu kül			
UK12 Karışımı	UK12-1-BE	8%	5%	12%	1 kN	1050°C	8,16
	UK12-1-BY				1 kN	1100°C	7,8
	UK12-3-BE				3 kN	1050°C	10,52
	UK12-3-BY				3 kN	1100°C	7,26
	UK12-5-BE				5 kN	1050°C	11,39
	UK12-5-BY				5 kN	1100°C	6,35
UK17 Karışımı	UK17-1-BE	8%	5%	17%	1 kN	1050°C	14,8
	UK17-1-BY				1 kN	1100°C	7,63
	UK17-3-BE				3 kN	1050°C	13,74
	UK17-3-BY				3 kN	1100°C	7,45
	UK17-5-BE				5 kN	1050°C	11,03
	UK17-5-BY				5 kN	1100°C	7,03



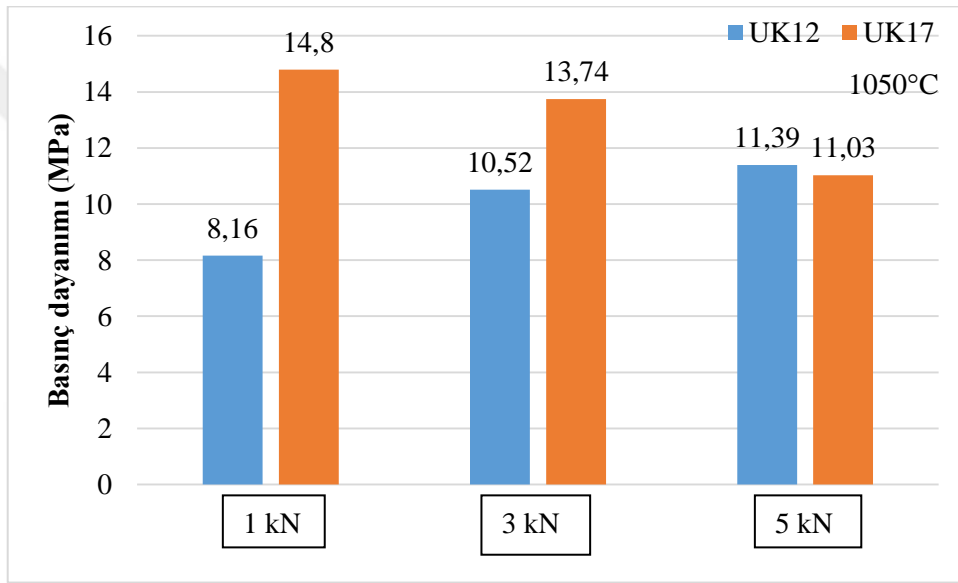
Şekil 6.16. Sıcaklık değişimine göre UK12 serisi agregalarının dayanımları (MPa).



Şekil 6.17. Sıcaklık değişimine göre UK17 serisi agregalarının dayanımları (MPa).

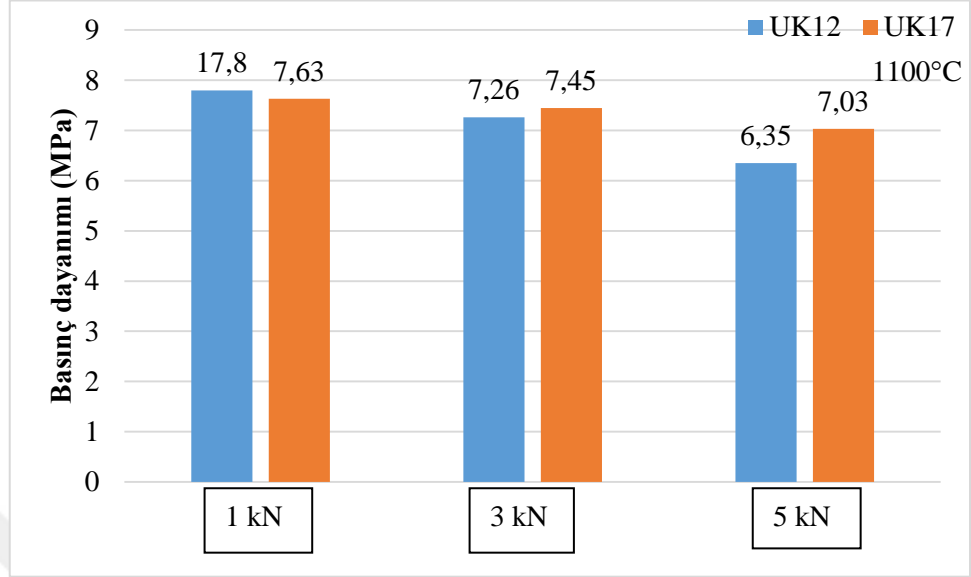
UK12 ve UK17 serisi agregaları, 1050°C ve 1100°C pişirme sıcaklığına tabi tutulduğunda agregaların ortaya çıkan basınç dayanımları Şekil 6.16-6.17’de gösterilmektedir. UK12 serisi 1050°C’de pişirildiğinde, daha fazla pres yüküyle oluşturulan numunelerin dayanımlarının daha iyi olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, sıkıştırma etkisinden dolayı taneler birbirine daha fazla yaklaştığı için bu sıcaklıkta kabuk oluşumunun daha hızlı ve daha

sağlam olmasıdır. Yine aynı sıcaklıkta UK17 serisi numunelerinin dayanımlarının ise pres yüküyle ters orantılı olduğu görülmektedir. Bu seride uçucu külün daha fazla olmasından dolayı pres etkisiyle taneler birbirine yaklaştıkça bu sıcaklıkta kabuk oluşumu erken olmamaktadır. Bu nedenle pres yükünün daha az uygulandığı numunelerde dayanım daha yüksek çıkmaktadır. Şekillerde sıcaklık karşılaştırılması yapıldığında, iki seride de 1050°C’de pişirilen agrega dayanımlarının 1100°C’de pişirilen agrega dayanımlarına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Sıcaklık artışı UK12 ve UK17 serisi agregaları için dayanımı düşürmektedir.



Şekil 6.18. UK12 ve UK17 serisi agregalarının 1050°C sıcaklıkta pişirilmesi sonucunda ortaya çıkan basınç dayanımları (MPa).

Şekil 6.18’de gösterildiği gibi genel olarak 1050°C’de UK17 serisi numunelerinin UK12 serisi numunelerine göre dayanımlarının biraz daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Uçucu külün küresel tane yapısı ve tane boyutunun etkisiyle boşluk doldurma özelliğinden dolayı uçucu kül miktarı arttığında basınç dayanımının artan etkisi gözlemlenmektedir. Kısaca uçucu külün kullanılan kilden çok daha ince olması nedeniyle bu malzemeler taneler arasında kalan boşlukları doldurarak daha yoğun ve dayanımı iyi olan bir agrega yapısının ortaya çıkmasını sağlamaktadır.



Şekil 6.19. UK12 ve UK17 serisi agregalarının 1100°C sıcaklıkta pişirilmesi sonucunda ortaya çıkan basınç dayanımları (MPa).

Şekil 6.19'da gösterildiği gibi UK12 ve UK17 serisi numuneleri 1100°C'de pişirildiklerinde iki serisinde dayanımlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu sıcaklıkta numunelerde camsı faz oluşumu gözlemlenmiştir. Bu camsı faz, katkıların etkisiyle oluşan gaz çıkışından dolayı oluşan boşluklara dolmakta ve yapı artık homojen olmamaktadır. Bu nedenle 1100°C sıcaklıkta basınç dayanımı oldukça düşmektedir.

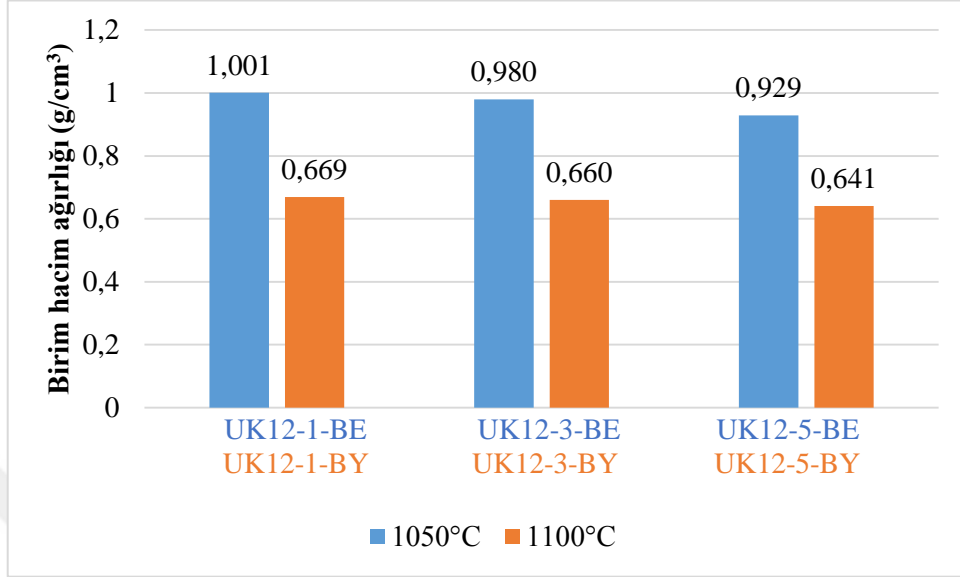
Koçkal ve Özturan (2011) yaptıkları çalışmada 1100°C'de 1 saat pişirdikleri hafif uçucu küllü agreganın basınç dayanımını 5,1 MPa, birim hacim ağırlığını 1,51 g/cm³ ve ağırlıkça su emme oranını %18,4 olarak bulmuşlardır.

6.2.3. UK serisi birim hacim ağırlık testi sonuçları

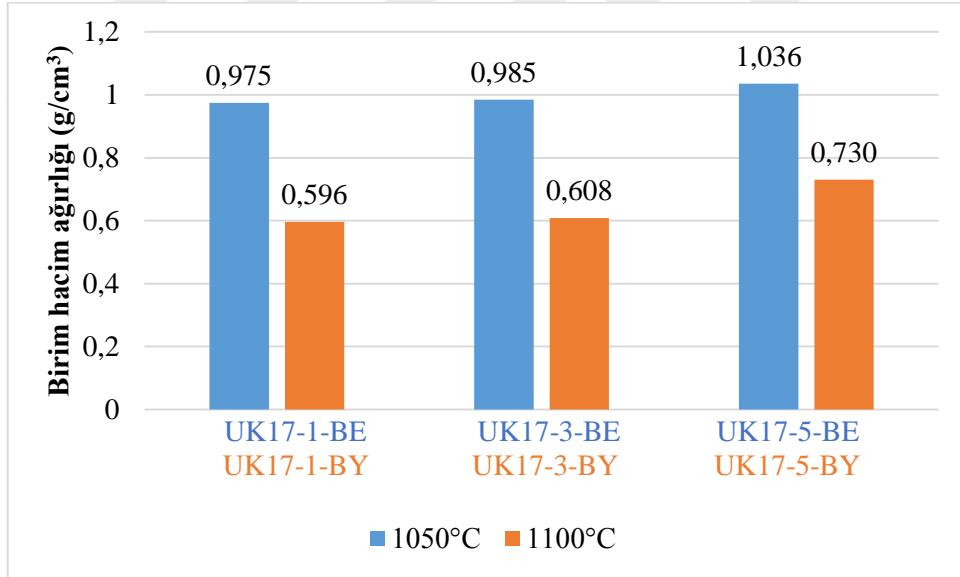
UK12 ve UK17 serisi numunelerinin uygulanan yük ve sıcaklık değişimine bağlı birim hacim ağırlık değerleri birlikte olarak Çizelge 6.9'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.9. UK12 ve UK17 serisi numunelerinin yüke ve sıcaklığa bağlı birim hacim ağırlıkları (g/cm^3).

	Numune kodu	Katki			Uygulanan yük (kN)	Pişirilme sıcaklığı	Birim hacim ağırlığı (g/cm^3)
		Na_2CO_3	Evsel atık	Uçucu kül			
UK12 Karışımı	UK12-1-BE	8%	5%	12%	1 kN	1050°C	1,001
	UK12-1-BY				1 kN	1100°C	0,669
	UK12-3-BE				3 kN	1050°C	0,980
	UK12-3-BY				3 kN	1100°C	0,660
	UK12-5-BE				5 kN	1050°C	0,929
	UK12-5-BY				5 kN	1100°C	0,641
UK17 Karışımı	UK17-1-BE	8%	5%	17%	1 kN	1050°C	0,975
	UK17-1-BY				1 kN	1100°C	0,596
	UK17-3-BE				3 kN	1050°C	0,985
	UK17-3-BY				3 kN	1100°C	0,608
	UK17-5-BE				5 kN	1050°C	1,036
	UK17-5-BY				5 kN	1100°C	0,730



Şekil 6.20. Sıcaklık değişimine göre UK12 serisi agregalarının birim hacim ağırlıkları (g/cm³).

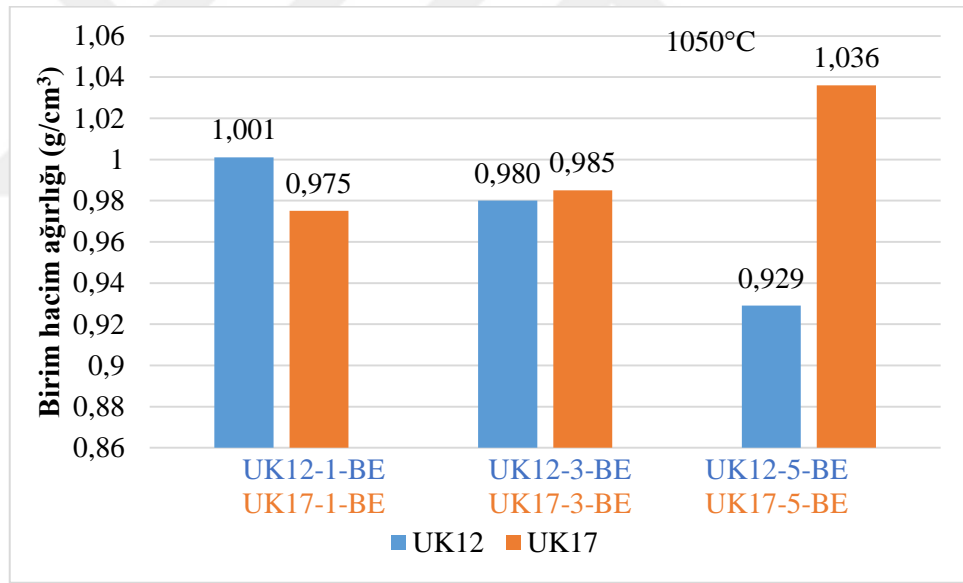


Şekil 6.21. Sıcaklık değişimine göre UK17 serisi agregalarının birim hacim ağırlıkları (g/cm³).

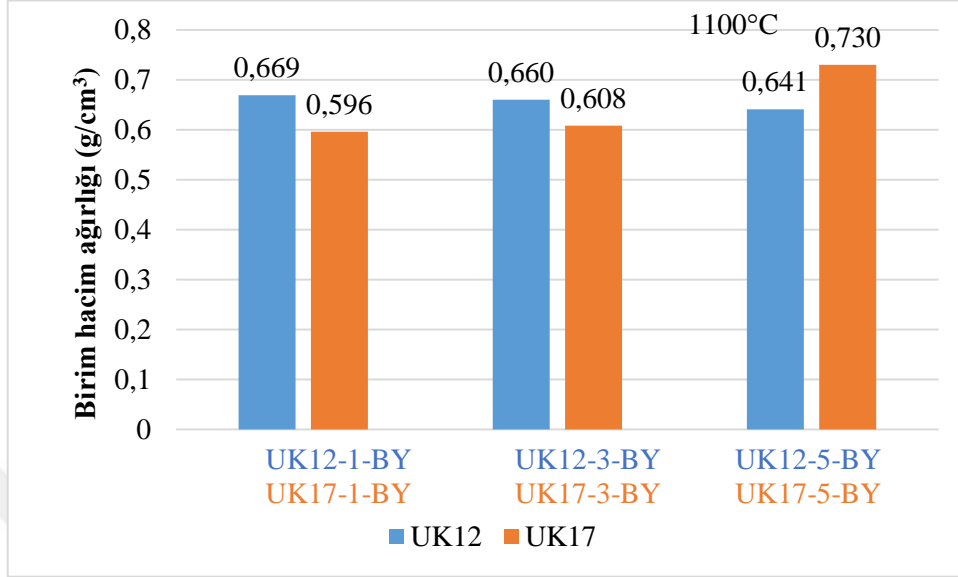
Şekil 6.20-6.21’de gösterildiği gibi 1100°C’de pişirilen UK12 ve UK17 serisi agregalarının birim hacim ağırlıklarının, 1050°C’de pişirilen numunelerin birim hacim ağırlıklarına göre azaldığı görülmektedir. Sıcaklık artışıyla birlikte daha fazla gaz çıkışı meydana gelmekte ve hafiflik artmaktadır.

UK12 serisi numunelerinde bulunan Na_2CO_3 katkısı yüksek sıcaklıklarda yapıyı tamamen terk etme eğilimindedir. Numuneye uygulanan basınç yükü arttırıldığında yüzeyde daha kolay sinterlenebilen bir tabaka oluşmaktadır. Kabuk oluşumu daha hızlıdır. Dolayısıyla Na_2CO_3 katkısı ve evsel atık gazı yüzeye doğru çıkmak istemektedir. Yüzeyde de daha kolay sinterlenebilen bir tabaka oluştuğu için Na_2CO_3 ve evsel atık katkıları yapıyı terk edemez, şişirir ve yapıda hacimsel genişleme meydana getirir. Hacimsel genişmeden dolayı da birim hacim ağırlık düşer.

UK17 serisi numunelerinde uçucu kül miktarı UK12 serisi numunelerine göre daha fazladır. Numunelere uygulanan pres yükünün artmasıyla taneler birbirine yaklaşmakta, kabuk oluşumu gecikmekte ve uçucu kül miktarının fazla olmasından dolayı yapıda genişleme yapacak kısım azalmaktadır. Bu nedenle pres yükü arttıkça birim hacim ağırlıkta artmaktadır.



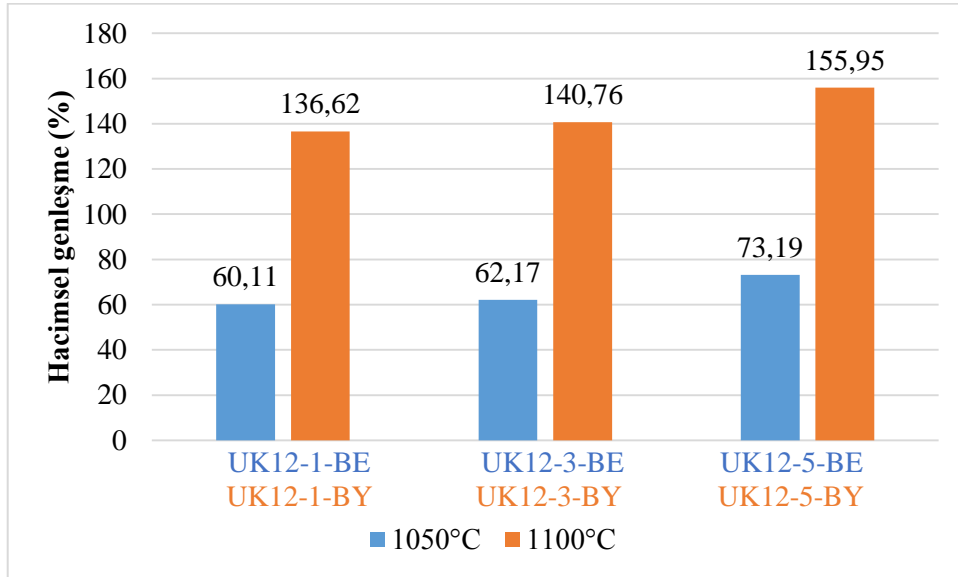
Şekil 6.22. 1050°C sıcaklık etkisi altında UK12 ve UK17 serisi agregalarının birim hacim ağırlıkları (g/cm^3).



Şekil 6.23. 1100°C sıcaklık etkisi altında UK12 ve UK17 serisi agregalarının birim hacim ağırlıkları (g/cm³).

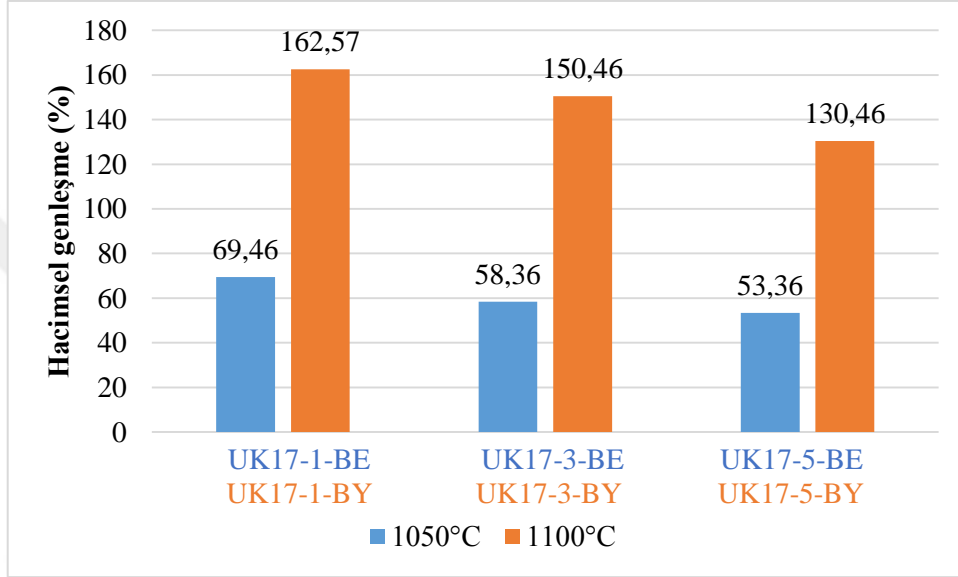
Şekil 6.22-6.23'te gösterildiği gibi 50°C sıcaklık artışının UK12 ve UK17 serisi numunelerinin birim hacim ağırlıklarını önemli ölçüde düşürdüğü gözlemlenmiştir.

6.2.4. UK serisi hacimsel genleşme yüzdesi testi sonuçları



Şekil 6.24. Sıcaklık değişimine göre UK12 serisi agregalarının hacimsel genleşme yüzdeleri.

Şekil 6.24'te gösterildiği gibi UK12 serisi numunelerinin, sıcaklık ve pres yükü artışına bağlı olarak hacimsel genişleme miktarları artmaktadır. Aynı sıcaklık uygulanan numunelerde pres yükünün artışıyla hacimsel genişleme oranı arttıkça bu numunelerinin birim hacim ağırlığı düşmektedir.



Şekil 6.25. Sıcaklık değişimine göre UK17 serisi agregalarının hacimsel genişleme yüzdeleri.

Şekil 6.25'de gösterildiği gibi UK17 serisi numunelerinin hacimsel genişleme miktarları sıcaklık artışıyla artmakta, pres yükü artışıyla düşmektedir. Aynı sıcaklık ancak farklı pres yükü uygulanan numunelerde hacimsel genişleme miktarlarının düşmesiyle bu numunelerin birim hacim ağırlığı artmaktadır.

UK12 serisinde yüksek sıcaklıklarda numunelere uygulanan basınç kuvvetinin artmasıyla yüzeyde daha kolay sinterlenebilir bir tabaka oluşmakta, oluşan gazlar yüzeyi terk edemediği için yapı şişme göstermekte ve hacimsel genişleme meydana gelmektedir. UK17 serisinde uçucu külün daha fazla olmasından dolayı uygulanan basınç kuvvetinin artmasına bağlı olarak bu tabaka oluşmamaktadır.

Çizelge 6.10'da UK serisi numunelerinin 24 saatlik su emme, basınç dayanımı, birim hacim ağırlık ve hacimsel genişleme yüzdesi değerleri gösterilmektedir.

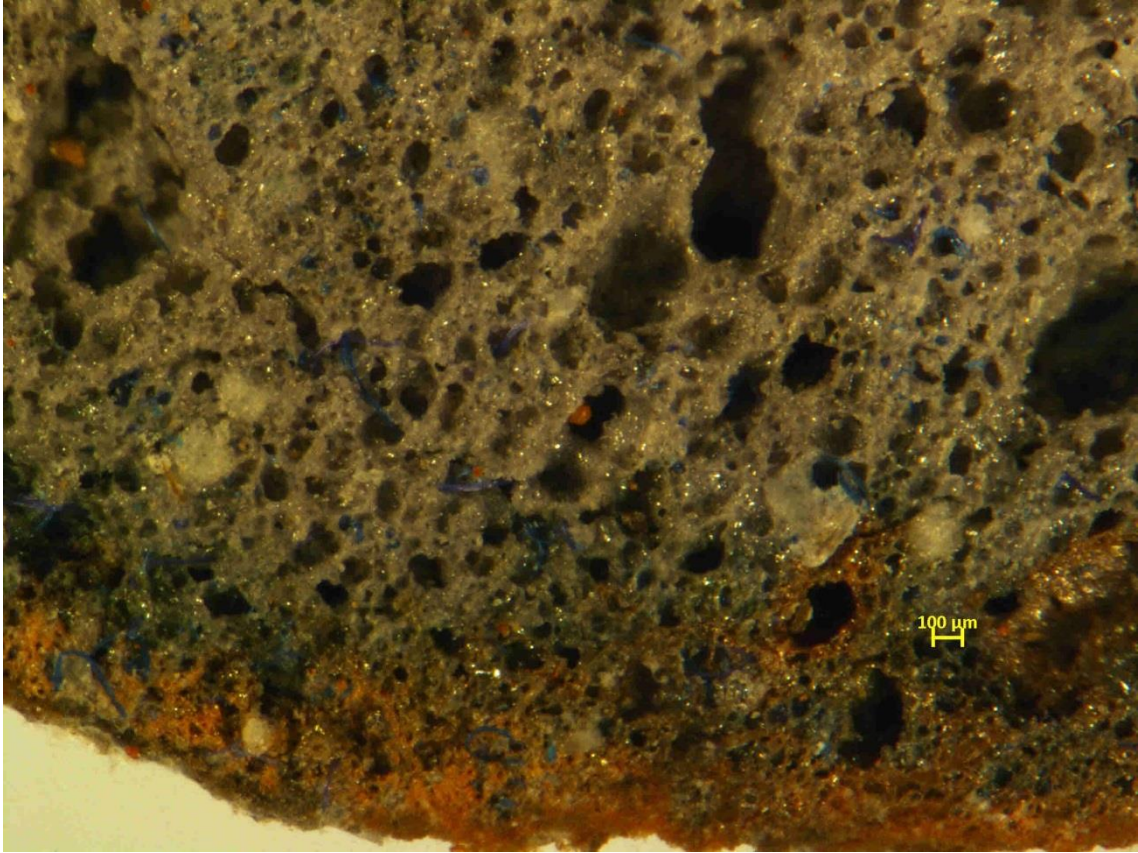
Çizelge 6.10. UK serisi numuneleri deney sonuçları.

	Numune kodu	Katkı			24 saatlik su emme (%)	Basınç dayanımı (MPa)	Birim hacim ağırlığı (g/cm ³)	Hacimsel genleşme (%)
		Na ₂ CO ₃	Evsel atık	Uçucu kül				
UK12 Karışımı	UK12-1-BE	8%	5%	12%	15,42	8,16	1,001	60,11
	UK12-1-BY				13,52	7,8	0,669	136,62
	UK12-3-BE				19,08	10,52	0,980	62,17
	UK12-3-BY				13,86	7,26	0,660	140,76
	UK12-5-BE				16,57	11,39	0,929	73,19
	UK12-5-BY				18,96	6,35	0,641	155,95
UK17 Karışımı	UK17-1-BE	8%	5%	17%	17,46	14,8	0,975	69,46
	UK17-1-BY				14,48	7,63	0,596	162,57
	UK17-3-BE				16,02	13,74	0,985	58,36
	UK17-3-BY				14,35	7,45	0,608	150,46
	UK17-5-BE				15,12	11,03	1,036	53,36
	UK17-5-BY				12,16	7,03	0,730	130,46

Koçkal ve Özturan yaptıkları çalışmada 1 saat pişirme sıcaklığına maruz kalan uçucu küllü hafif agregalarda sinterleme sıcaklığı arttıkça ağırlıkça su emme oranının azaldığını, özgül ağırlık ve kırılma dayanımının ise arttığını gözlemlemişlerdir. Su emme ve dayanımdaki artış oranının 1150°C'den sonra daha belirgin olduğunu belirtmişlerdir.

6.2.5. UK serisi numunelerinin mikroskop görüntüleri

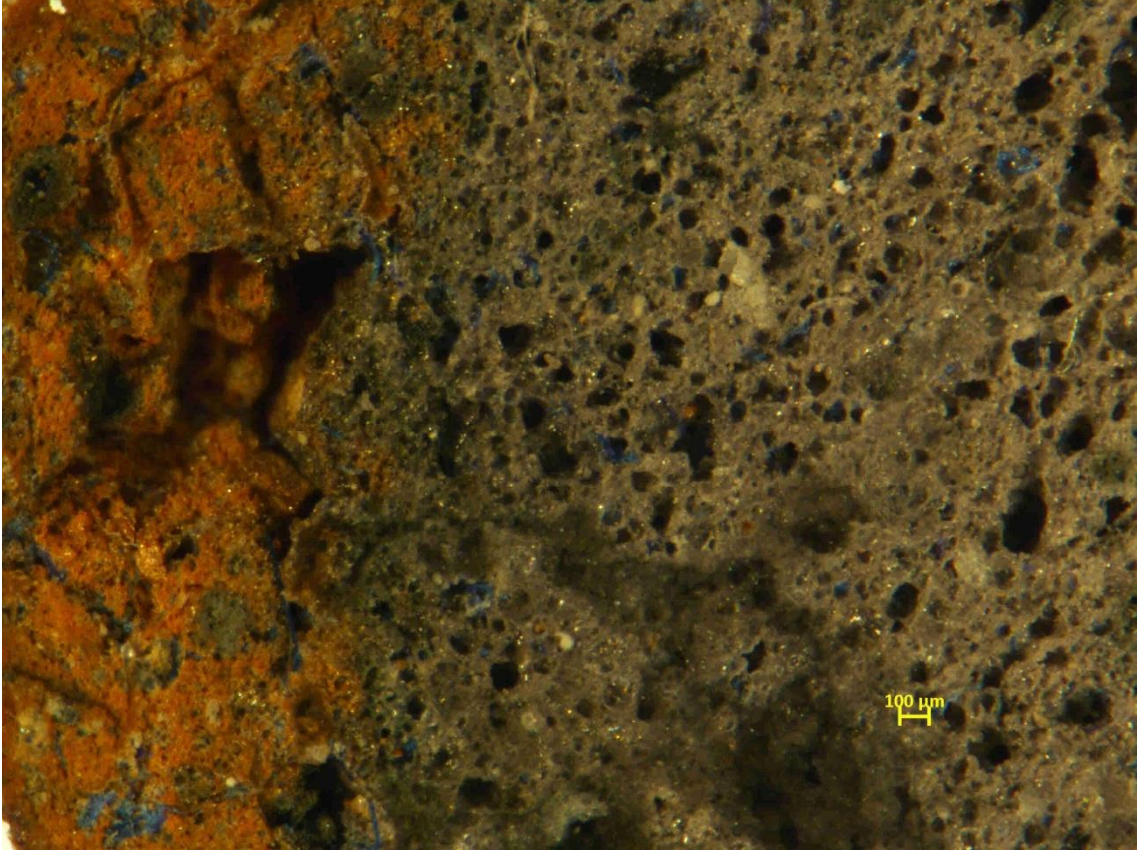
UK12-3-BE ve UK17-3-BE numunelerinin mikroskop görüntüleri Şekil 6.26-6.27'de gösterilmektedir.



Şekil 6.26. UK12-3-BE numunesinin mikroskobik görüntüsü.

Uçucu kül miktarının daha az olduğu UK12-3-BE numunesinde kabuk oluşumu UK17-3-BE numunesine göre daha hızlı olmuştur. Hızlı oluşan kabuk daha ince ve daha dayanıksızdır. Kabuğa yakın iç kısımda UK17-3-BE numunesine göre daha az homojen olan boşluk yapısı gözlemlenmiştir. Numunenin iç kısımlarında oluşan boşluk boyutlarının daha büyük ve farklı şekillerde oluştuğu Şekil 6.26'da gösterilmektedir.

Oluşan bu yapıyı basınç dayanımı test sonuçları da desteklemektedir (UK12-3-BE hafif agrega numunesinin basınç dayanımı 10,52 MPa'dır).



Şekil 6.27. UK17-3-BE numunesinin mikroskobik görüntüsü.

Uçucu kül miktarının daha fazla olduğu UK17-3-BE numunesinde UK12-3-BE numunesine göre daha kalın ve sağlam kabuk oluşumu meydana gelmiştir. Kabuğa yakın iç kısımda daha homojen boşluk yapısı gözlemlenmiştir. Numunenin kabuktan uzak iç bölgelerinde oluşan boşlukların UK12-3-BE numunesinin boşluklarına göre daha küresel olduğu görülmekte ve bu numunenin iç kısımlarında oluşan boşlukların daha küçük ve daha homojen dağıldığı Şekil 6.27’de gösterilmektedir.

Oluşan bu yapıyı basınç dayanımı test sonuçları da desteklemektedir (UK17-3-BE hafif agrega numunesinin basınç dayanımı 13,74 MPa’dır).

7. SONUÇ

HA serisi hafif agrega numuneleri

- HA serisi hafif agrega numunelerinin su emme değerleri sıcaklığa göre belirgin bir şekilde değişim göstermektedir. 920°C’de pişirilen numunelerin su emme miktarları çok fazlayken, 1000°C’de pişirilen numuneler köpürerek camsı yapı kazanmaya başladığı için su emme miktarları oldukça azdır. Ayrıca bu iki sıcaklık için katkı miktarının artması numunede daha fazla gözenek oluşturduğu için su emme miktarları katkı miktarıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. 1100°C’de pişirilen numuneler tam olarak camsı bir yapı kazandığı için hiç su emmemektedir.
- NaOH ve Na₂CO₃ katkılarıyla oluşturulan numunelerde 1000°C ve üstündeki sıcaklıklarda numunelerin çok fazla köpürdüğü ve katkı miktarının artmasıyla boşluk yapısının da büyüdüğü gözlemlenmiştir. Ancak KOH katkısı kullanılarak oluşturulan numunelerde homojen dağılan boşlukların oluştuğu ve katkı miktarı arttıkça boşluk yapısının daha da küçüldüğü gözlemlenmiştir.
- Birim hacim ağırlık sıcaklık artışıyla genel olarak ters orantılı olarak davranmaktadır. Sıcaklık arttıkça numunelerin birim hacim ağırlığı azalmakta ve numuneler hafiflemektedir.
- Fırında kademeli olarak sıcaklık artışı ve azalışıyla uzun süre pişirilen numunelerde sinterleme sıcaklığının artışıyla köpürme meydana gelmektedir.
- HA serisinde gözenek boyutunun oldukça büyük olmasından dolayı katkı miktarlarının istenilenden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.
- 1000°C sıcaklıkta kile ilave edilen NaOH, su emme, birim hacim ağırlık ve mukavemet değerlerinde değişken özellik göstermektedir. Buna göre katkı ilavesi arttıkça oluşan sabit sıcaklıkta su emme değeri artarken birim hacim ağırlık ve mukavemet değerleri azalma göstermektedir. Bunun en büyük sebebi katkı miktarının artmasıyla boşluk boyutunun büyümesi ve sıcaklığın yüksek olmasından dolayı oluşan köpürmedir. Na₂CO₃ katkısı da NaOH katkısıyla aynı özelliği göstermektedir.
- Sabit sıcaklık oranında kile ilave edilen KOH, su emme, birim hacim ağırlık ve mukavemet değerlerinde değişken özellik göstermektedir. Buna göre katkı ilavesi arttıkça 1000°C sıcaklıkta su emme değeri hiç yokken, birim hacim ağırlık ve mukavemet değerleri artma göstermektedir. Bunun en büyük sebebi katkı miktarının artmasıyla boşluk boyutunun küçülmesi ve yapının daha homojen hale gelmesidir.

- 3 farklı katkı kendi arasında karşılaştırıldığında ise sabit sıcaklıkta (1000°C) pişen numunelerin su emme miktarı yüzdelerinde KOH içerikli yapının oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. NaOH ve Na₂CO₃ içeren numunelerde katkı miktarının artırılmasıyla su emme miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. Hafif agrega numunelerinin basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde ise en iyi basınç dayanımı sonucunun %12 KOH ilavesinde 25,87 MPa olduğu görülmektedir.

UK serisi hafif agrega numuneleri

- Üretilen hafif agregalarda daha fazla uçucu kül ilavesi dayanımı çok az miktarda arttırmaktadır.
- 1050°C’de pişirilen UK12 ve UK17 serisi hafif agrega numunelerinde birim hacim ağırlık azaldıkça basınç dayanımının arttığı gözlemlenmektedir.
- 1100°C’de pişirilen hafif agrega numunelerinde basınç dayanımlarının, uçucu kül miktarı ve birim hacim ağırlıkla çok fazla değişmediği gözlemlenmektedir.
- 1100°C’de pişirilen hafif agregaların 1050°C’de pişirilen hafif agregalara göre su emme miktarının daha az olduğu gözlemlenmektedir. Uçucu küllü hafif agrega numunelerinde sinterleme sıcaklığı arttıkça ağırlıkça su emme oranı bir miktar azalmaktadır.
- Hacimsel genleşme, 1100°C’de pişirilen numunelerde belirgin bir şekilde daha fazladır. Ancak uçucu kül miktarının daha az olduğu UK12 serisi hafif agregalarına uygulanan pres yükünün artırılmasıyla, uçucu kül miktarının daha fazla olduğu UK17 serisi hafif agregalarına ise uygulanan pres yükünün azaltılmasıyla numunelerin hacimsel genleşme miktarları artış göstermektedir. Ayrıca 1050°C’de pişirilen UK12 serisi agregalarında yine numunelere çok yük uygulanmasıyla, UK17 serisi agregalarında da numunelere az yük uygulanmasıyla hacimsel genleşmelerinin arttığı gözlemlenmektedir.
- UK serisi numunelerinde numunenin sert dış kabuğunun oluşmasını sağlayan katkı Na₂CO₃’tür. Ön çalışmalarda sadece kil, uçucu kül ve evsel atıkla oluşturulan numunelerde bu kabuğun oluşmadığı görülmüştür.
- Kısa süreli ani soğutma yöntemiyle pişirilen numunelerde köpürmenin oluşmadığı gözlemlenmiştir.
- XRD sonuçlarına bakıldığında 1050°C’de pişirilen UK17 serisi numunelerinde fırın sonrasında oluşan kabuğun UK12 serisi numunelerine göre daha kalın ve sağlam olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca UK17 serisi numunelerinin boşluklarının daha homojen olarak dağıldığı görülmüştür.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- ACI 213R-03, (2003). Guide For Structural Lightweight-Aggregate Concrete. American Concrete Institute, ACI.
- Akıncı, Ö. (1968). Seramik Killeri ve Jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, Sayı:71, 63-72.
- Anonim, (2000). A Technical Report on The Lightweight Expanded Clay Aggregates (LECA). USA: ESCSI, 125.
- Anonim (2008), Toprak Kolloidleri, Ankara Üniversitesi, www.agri.ankara.edu.tr/soil_sciences/1248_toprak_kolloidleri.pdf,
- Anonim (2008), Adsorpsiyon, Balıkesir Üniversitesi, www.balikesir.edu.tr/~ozkan/ads/adsorpsiyon13.pps,
- Aras, A. (2004). The Change of Phase Composition in Ceramic Bodies in Kaolinite and İlliterich Clay-Based Ceramic Bodies. Applied Clay Science, 24, 257-269.
- ASTM C 127-42 (2015). Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia.
- ASTM C 128-57 (2015). Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia.
- ASTM C 330/C330M-17a (2017). Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia.
- ASTM C 567 (2005). Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia.
- ASTM C 618 (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia.
- Bayülke, N. (2003). Betonarme Yapının Dolgu Duvarı. TMH – Türkiye Mühendislik Haberleri 426, 85-98.
- Bremner, T., W. (1998, October). Lightweight Concrete an Environmentally-Friendly Material. International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry, Ottawa, Canada, 21-23.
- Brindley, G.W. ve Brown, G. (1980). Crystal structure of clay minerals and their X-ray identification (New Edition). London: Mineralogical Society, 495.
- Clarke, J.L. (1993). Structural Lightweight Aggregate Concrete (First Edition). Britain: CRC Press, 256.
- Degens, E.T. (1965). ET Degens Geochemistry of Sediments. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 342.
- Demirboğa, R. (1999). Silis Dumanı ve Uçucu Külün Perlit ve Pomza ile Üretilen Hafif Beton Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 147s.
- Dikici, T. (2010). Taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 125s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Doğangün, A. (2005). Betonarme yapıların hesap ve tasarımı (CD ilaveli geliştirilmiş 1. Baskı). Türkiye: Birsen Yayınevi, 844.
- Ekmekyapar, T., Örüng, İ. (1993). İnşaat Malzeme Bilgisi. Erzurum: Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Kitabı, 145.
- Elsharief, A., Cohen, M., D. ve Olek, J. (2005). Influence of Lightweight Aggregate on the Microstructure and Durability of Mortar. *Cement and Concrete Research*, 35:1368-1376.
- Gökçe, H.S. (2010). Hafif Beton Üretiminde Ham ve Genleştirilmiş Perlitin Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 59s.
- Gündüz, L., Şapçı, N., Yorgun, S. (2006). Genleştirilmiş Kilin Hafif Agregada Olarak Kullanılabilirliği. *KİBİTED Kil Bilimi Teknoloji Dergisi*, Cilt 1, 43-49.
- Grim, R. E. (1953). *Clay Mineralogy*, Mc Graw-Hillbook, 76(4), 317.
- Grim, R.E. (1968). *Clay Mineralogy (2nd Edition)*. New York: Mc Graw Hill Book Company, 31-125.
- Hsu, T.S., Saxena S.K. (1991). A General Formula for Determining Density of Compacted Soils with Oversize Particles. *Soils and Foundations* 31(3).
- İrmak, A. (1972). *Toprak İlimi (İkinci baskı)*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayın No. 1268, Orman Fakültesi Yayın No. 121, (XII/299).
- Karakaya, Ç. M. (2006). *Kil Minerallerinin Özellikleri ve Tanımlama Yöntemleri*. Ankara: Bizim Büro Basınevi, 640.
- Kaya, A. ve Fang, H.Y. (2005). Experimental Evidence of Reduction in Attractive and Repulsive Forces Between Clay Particles Permeated with Organic Fluids. *Canadian Geotechnical Journal*, Technical Note, 42, 632-640.
- Kocataşkın, D. (1975). *Yapı Malzemeleri Bilimi Özellikler ve Deneyler*. İstanbul: Birsen Kitapevi Yayınları, 132.
- Koçkal, N.U., Özturan, T. (2011, Ocak). Durability of Lightweight Concretes with Lightweight Fly Ash Aggregates. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1430-1438.
- Konuk, H. (2003). Hafif Agregalı Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 58s.
- Lamond, J. F. ve Pielert, J. (2006), Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials (STP 169D). PA: ASTM special technical publication, 664.
- Lo, T., Y., Tang, W., C. ve Nadeem, A. (2007). Comparison of Carbonation of Lightweight Concrete with Normal Weight Concrete at Similar Strength Levels. In pres: *Construction and Building Materials*, 22(8), 1648-1655.
- Lo, T. Y., Cui, H. Z., Tang, W. C., ve Leung, W. M. (2008). The Effect of Aggregate Absorption on Pore Area at Interfacial Zone of Lightweight Concrete. *Building and Environment*, 22, 623-628.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lura, P., Bentz, D., P., Lange, D., A., Kovler, K., Bentur, A. ve Breugel, K. V. (2003, 10-14 Aug). Measurement of Water Transport from Saturated Pumice Aggregates to Hardening Cement Paste. Engineering Conferences International, 89-100.
- Neville, A. M. (1995). Properties of Concrete. England, Longman Group, Burnt Mill, Harlowessex, 844.
- Neville, A. M. (1996). Properties of Concrete (4th Edition). New York: John Wiley & Sons Inc, 844.
- Neville, A. M. (2000). Properties of Concrete (4th Edition). New York: Pitman publishing Limited, 674-760.
- Neville, A. M. ve Brooks, J.J. (2010). Concrete Technology (2nd edition). England: Prentice Hall Harlow, 442.
- Önalp, A. (1997). Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği. Sakarya Üniversitesi Yayını No: 27, 440 s.
- Özgüven, A. (2009). Genleşen Kil Agregası Üretimi ve Endüstriyel Olarak Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 329s.
- Pauling, L. (1930, January). The Structure of the Micas and Related Minerals. Gates Chemical Laboratory, California Institute of Technology, 123-129.
- Postacıoğlu, B., Taşdemir, M. A. (1986), Depreme Dayanıklı Yapılarda Doğal Hafif Agregalı Betonlardan Yararlanılması. Yapı Endüstri Merkezi "Deprem" Semineri Bildiriler Kitabı.
- Postacıoğlu, B. (1987). Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar (Cilt 2). İstanbul: Teknik Kitaplar Yayınevi, 404.
- Press, F., Siever, R. (1998). Understanding Earth (3rd edition). USA: W.H.Freeman and Company, 42-573.
- Rice, P.M. (1987). Pottery Analysis, The University of Chicago Press, Chicago, 473.
- RILEM, (1975). Functional Classification of Lightweight Concrete. RILEM Publications SARL, LC2, 173-175.
- Searle, A. B. and Grimshaw, R. W. (1960). The Chemistry and Physics of Clays and other Ceramic Materials (3rd Edition). London: Ernest Benn Limited, 274-297.
- Subaşı, S., Beycioğlu A., Emiroğlu M. (2009, Haziran). Genleştirilmiş Kil Agregalı Hafif Betonlarda Bulanık Mantık Yöntemiyle Yarmada Çekme Dayanımı Tahmin Modeli Geliştirilmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt:XXII, Sayı: 3.
- Sönmez, R., Demir, M., Ekim, H. (2004). Stiropor Hafif Agregalı Beton. Türkiye Hazır Beton Birliği, Beton 2004 Kongresi, 10.
- Taşdemir, M.A. (1982). Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 111s.
- TS 1114, (1972). Hafif Agregalar, T.S.E, Ankara.
- TS 2511, (1977). Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları, T.S.E, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- TS 3529, (2015). Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini, T.S.E, Ankara.
- TS 1114 EN 13055-1, (2004). Hafif Agregalar - Bölüm 1: Beton, Harç ve Şerbette Kullanım İçin, T.S.E, Ankara.
- TS EN 197-1, (2012). Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, T.S.E, Ankara.
- TS EN 206-1, (2002). Beton - Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, T.S.E, Ankara.
- TS EN 1097-3, (1999). Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri İçin Deneyle - Bölüm 3: Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini, T.S.E, Ankara.
- TS EN 1097-6, (2013). Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyle - Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, T.S.E, Ankara.
- Türkiye Hazır Beton Birliği (2016). Hafif Agregası. 20 Ekim 2016.
<http://www.thbb.org/teknik-bilgiler/agrega/>
- Uygunoğlu, T. (2008). Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 151s.
- Wentworth, C.K. (1922). A Scale Of Grade And Class Terms For Clastic Sediments. Journal of Geology, 30, 377-392.
- Yaşar, E., Kılıç, A., Duran, C., Özcan, F. (2003, Ekim). Mineral Katkılar İçeren Scoria Agregası ile Yapılmış Yüksek Mukavemetli Hafif Beton. Çimento ve Beton Araştırmaları, Science Direct, 33(10), 1595-1599.
- Yolcu, C., Girgin, Z. C. (2017, Kış). Dünyada Yapay Hafif Agregalı Yapısal Beton Uygulamaları ve Doğal Pomza Agreganın Kullanılabilirliği. Aurum Mühendislik Sistemleri ve Mimarlık Dergisi, 59-67.

ÖZGEÇMİŞ

Canan MERCAN, 1993 yılında Balıkesir'in Dursunbey ilçesinde doğdu. 2012 yılında Tavşanlı İMKB Anadolu Öğretmen Lisesi'nden mezun oldu. 2013 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı ve 2017 yılında mezun oldu. Ocak 2018'te Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda lisansüstü eğitimine başladı. 2019 yılında Anadolu Üniversitesi İşletme bölümünden mezun oldu.

