



**TUĞLA VE SERAMİK ATIKLARI İÇEREN
LATEKS KATKILI BETONLARDA AGREGA-
ÇİMENTO ARAYÜZ GELİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

Harun YANPINAR

**Tez Danışmanı
Prof.Dr. İlker TEKİN**

**TUĞLA VE SERAMİK ATIKLARI İÇEREN LATEKS KATKILI
BETONLARDA AGREGA-ÇİMENTO ARAYÜZ GELİŞİMİNİN
İNCELENMESİ**

Harun YANPINAR

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. İlker TEKİN**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Eylül 2024**

Harun YANPINAR tarafından hazırlanan “TUĞLA VE SERAMİK ATIKLARI İÇEREN LATEKS KATKILI BETONLARDA AGREGA-ÇİMENTO ARAYÜZ GELİŞİMİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İlker TEKİN

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 11/09/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. H. Süleyman GÖKÇE (İDÜ)

ONLINE

Üye : Prof. Dr. İlker TEKİN (KBÜ)

ONLINE

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şevki EREN (KAEÜ)

ONLINE

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Harun YANPINAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TUĞLA VE SERAMİK ATIKLARI İÇEREN LATEKS KATKILI BETONLARDA AGREGA-ÇİMENTO ARAYÜZ GELİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Harun YANPINAR

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof.Dr. İlker TEKİN

Eylül 2024, 88 sayfa

Bu çalışmada, Sürdürülebilir bir kalkınma için gelecek nesillerin ihtiyaçlarını da dikkate alarak endüstriyel üretimlerin kıt kaynaklarını verimli kullanılması mühendislik bakımından çok önemlidir. Bunun için kalite ve ekonomik kriterler dışında sosyal ve çevresel faktörleri de dikkate alan yenilikçi yaklaşımlar gerekmektedir. Beton teknolojisinde son yıllarda hafif betonların önemi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde hafif betonlar hafif agrega kullanılarak veya hava sürüklenerek üretilebilmektedir. Ancak yapısal beton üretiminde hafif agregaların kullanılması daha uygundur. Çünkü beton hacminin %80'e kadar olan kısmı agregadan oluşmaktadır.

Ülkemiz sınırlarında her 20 yılda bir yıkıcı deprem olmaktadır. Meydana gelen bu depremler çok sayıda yapının hasar görmesine (yıkılması, ağır veya orta hasar alması) sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra ülkemiz coğrafyasının yaklaşık %90'ının deprem kuşağında olması ve yapı stoğunun yaşlanması sebebiyle kentsel dönüşüme ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Doğal olarak betonun en önemli ve yüksek hacimli bileşeni olan nitelikli agregaya ihtiyacı ön plana çıkarmaktadır. Buda kaliteli agrega stoğunun gün geçtikçe azalmasına neden olmakta ve gelecekte üretilen betonlar için kaliteli agregaya ulaşımı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle yapısal taşıyıcı özelliği olsun ya da olmasın tüm betonlar için agrega niteliğinde atık malzemelerin kullanılması kaliteli malzemelerin gelecek kuşaklara bırakılmasında önemli rol oynamaktadır.

Yönetmeliklere uygun olarak yapılsa dahi inşaatlarda kullanılan yapısal betonların birim hacim ağırlıkları (BHA) 2000 kg/m^3 ten yüksektir. Bu durum binaların deprem sırasında yükünü artırmaktadır. Bu nedenle yapısal hafif betonların alternatif üretim yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, bu çalışmada tuğla ve seramik atıklarının betonda kullanımı sonucunda elde edilecek hafif yapısal betonların özellikle agrega-matris arayüzünün incelenmesi konu alınmıştır. Buna ilaveten, üretilen hafif betonların 28 günlük süreçte su emme, klor geçirimliliği, basınç dayanımı, birim hacim ağırlık verileri elde edilmiştir.

Çalışmanın sonucunda tuğla atığı agregalı sertleşmiş betonlarda $1740 - 1820 \text{ kg/m}^3$ ve seramik atığı agregalı sertleşmiş betonlarda $1710 - 1790 \text{ kg/m}^3$ kuru BHA elde edilmiştir. Böylece üretilen tüm betonların hafif beton olduğu belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı tuğla atığı agregalı sertleşmiş betonlarda $45,08 \text{ MPa}$, seramik atığı agregalı sertleşmiş betonlarda $57,66 \text{ MPa}$ olarak elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımları lateks içeren hafif betonlarda gözlenmiştir. Basınç altında su işleme derinlikleri tüm serilerde $19 - 22 \text{ mm}$ arasında olup benzer sonuç göstermiştir. Su emme oranları tuğla atığı agregalı betonlarda $\%6,32 - 9,50$ arasında iken, seramik atığı agregalı sertleşmiş betonlarda $\%4,34 - 5,35$ arasında olmuştur. Klor geçirimliliği seramik atığı agregalı sertleşmiş betonlarda daha düşük seviyede elde edilmiştir. Lateks katkısı klor geçirimliliğini azaltmıştır. Üretilen tuğla ve seramik atığı agregalı hafif betonların 28 gün yaşındaki agrega-çimento arayüz ölçüleri geleneksel agregalı betonlara göre daha küçük olduğu ($10 - 20 \text{ mikron}$) belirlenmiştir. Tuğla atığı agregalı sertleşmiş betonlardaki agrega-çimento arayüzleri $14 - 18 \text{ mikron}$ arasında ölçülürken, seramik atığı agregalı sertleşmiş betonlarda agrega-çimento arayüzleri $18 - 20 \text{ mikron}$

olarak ölçülmüştür. Lateks katkısı tuğla atığı agregalı betonlarda arayüz ölçülerini azaltacak şekilde bir etki gösterirken, seramik atığı agregalı betonlarda arayüz ölçülerini artıracak şekilde bir etki göstermiştir.

Anahtar Sözcükler : Yapısal hafif beton, Tuğla atıkları, Seramik atıkları, Arayüz geçiş bölgesi (ITZ)

Bilim Kodu : 91127



ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF AGGREGATE-CEMENT INTERFACE DEVELOPMENT IN LATEX REINFORCED CONCRETES CONTAINING BRICK AND CERAMIC WASTES

Harun YANPINAR

Karabuk University

Institute of Graduate Programs

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. İlker TEKİN

September 2024, 88 pages

In this study, In the context of sustainable development, the efficient utilization of scarce resources in industrial production is paramount, with due consideration given to the needs of future generations. To achieve this, it is necessary to adopt innovative approaches that take into account not only the traditional quality and economic criteria, but also the social and environmental factors. The significance of lightweight concrete in concrete technology has been growing at a rapid pace in recent years. At the present time, lightweight concrete can be manufactured using lightweight aggregates or by means of air entrainment. Nevertheless, the utilization of lightweight aggregates in structural concrete production is a more appropriate course of action. This is due to the fact that up to 80% of the concrete volume consists of aggregate.

It is estimated that a destructive earthquake occurs within the borders of our country every 20 years. Such seismic events result in structural damage, including collapse and

extensive or moderate impairment, to numerous edifices. Furthermore, the necessity for urban transformation is becoming increasingly apparent, given that approximately 90% of our country's geography is situated within an earthquake zone and that our building stock is becoming increasingly aged. It is therefore evident that there is a need for qualified aggregate, which represents the most important and high-volume component of concrete. This has resulted in a decrease in the quality of the aggregate stock, which is now difficult to access for concrete produced in the future. Consequently, the use of waste materials as aggregates for all concretes, whether they have structural load-bearing properties or not, plays an important role in ensuring that quality materials are available for future generations.

Despite compliance with regulatory standards, the unit volume weight (BHA) of structural concretes utilized in construction often exceeds 2000 kg/m³. This situation increases the load of buildings during earthquakes. Therefore, alternative production methods of structural lightweight concretes need to be developed. In this context, this study examines the aggregate-matrix interface of lightweight structural concrete obtained as a result of the use of brick and ceramic waste in concrete. Additionally, the water absorption, chloride permeability, compressive strength and unit volume weight data of the produced lightweight concretes were obtained over a 28-day period. The study yielded the result that 1740–1820 kg/m³ of dry BHA was obtained in hardened concretes with brick waste aggregate and 1710–1790 kg/m³ in hardened concretes with ceramic waste aggregate. It was thus established that all concrete produced were lightweight concrete. The highest compressive strength was observed in hardened concrete with brick waste aggregate, reaching 45.08 MPa, while the highest value in hardened concrete with ceramic waste aggregate was 57.66 MPa. The highest compressive strengths were observed in lightweight concretes containing latex. The water penetration depths under pressure were found to be between 19 and 22 mm across all series, exhibiting a similar trend. The water absorption rates were found to be between 6.32% and 9.50% in concrete with brick waste aggregate, while in hardened concretes with ceramic waste aggregate, the rates were between 4.34% and 5.35%. The results demonstrated that the chloride permeability was lower in the hardened concretes with ceramic waste aggregate. The addition of latex resulted in a reduction in chloride permeability. It was established that the aggregate-cement interface dimensions of the lightweight concretes produced with brick and ceramic

waste aggregates were smaller (10-20 microns) at 28 days of age in comparison to the conventional aggregate concretes. The aggregate-cement interfaces in the hardened concretes with brick waste aggregates were found to be between 14 and 18 microns in width, while those in the hardened concretes with ceramic waste aggregates were observed to be between 18 and 20 microns. The latex additive was observed to reduce the interface dimensions in the concretes with brick waste aggregates, but conversely, it was observed to increase the interface dimensions in the concretes with ceramic waste aggregates.

Key Word : Concrete interface transition zone (ITZ), Slag aggregate, geopolymer lightweight aggregates, Ceramic shards aggregate, Industrial waste

Science Code : 91127

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, çalışma sürecinde yol gösterici olan, bilgi birikimi ve tecrübesiyle çalıőmamıza farklı bakıő açılarıyla yaklaşmamızı sağlayan, bu projede birlikte çalıőmaktan ve öğrencisi olmaktan gurur duyduğum kıymetli ve değerli danıőman hocam Prof. Dr. İlker TEKİN ve çalışma sürecinde emeklerini esirgemeyen Arda IŞIK, Cenk KILINÇ ve İsmail Fazlı DERELİ'ye teőekkürü borç bilirim. Bu süreçte her daim hoőgörölü ve fedakâr sevgili eőim Zuhâl YANPINAR'a ve ocuklarım Ömer Mirza YANPINAR ve Yusuf YANPINAR destekleri için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ivi
ÖZET	iv
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	x
İÇİNDEKİLER.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	7
KURAMSAL TEMELLER.....	7
2.1. BETON	7
2.1.1. Hafif Beton	7
2.1.1.1 Hafif betonların tarihçesi	8
2.1.1.2 Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	9
2.1.1.3 Hafif Betonun mikro yapısı.....	11
2.1.1.4 Puzolanik Etkileşim	16
2.1.2. Hafif Betonun Üretim Yöntemleri	16
2.1.2.1. Hafif agregalar kullanarak.....	17
2.1.2.2. Betonun içinde boşluklar oluşturmak	19
2.2. LATEKS (STİREN BÜTADIEN) KATKILAR	19
2.2.1. Lateks	19
2.2.2. Lateksin Kullanım Alanları	21
2.2.3. Lateksin Beton Özelliklerine Etkisi	23
2.3. LİTERATÜR TARAMASI.....	25

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3	33
MALZEME VE METOT	33
3.1. MALZEME	33
3.1.1.Çimento	33
3.1.2.Agrega	34
3.1.2.1.Kireçtaşı agregası	34
3.1.2.2.Tuğla Atıkları	35
3.1.2.3.Seramik Atıkları	37
3.1.3. Su	38
3.1.4 Katkılar	38
3.2. YÖNTEM.....	40
3.2.1. Hafif beton harç karışımlarının hazırlanması	41
3.2.2. Taze Beton Deneyleri.....	42
3.2.2.1. Çökme Deneyi	42
3.2.2.2. Yayılma Deneyi.....	43
3.2.2.3. Taze Beton Birim Hacim Ağırlığı Deneyi	43
3.2.2.4. Beton Sıcaklıklarının Ölçülmesi.....	44
3.2.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri	44
3.2.3.1. Basınç Dayanımı Deneyi	44
3.2.3.2. Sertleşmiş Betonların Su Emme Deneyi.....	45
3.2.3.3. Klor Geçirimsizliği Deneyi	46
3.2.3.4. Basınç Altında Su İşleme Derinliği (Permabilite) Deneyi.....	50
3.2.3.5. Betonlarda Çimento-Agrega Arayüz Ölçülmesi	51
3.2.3.6. SEM+EDS Analizleri	53
BÖLÜM 4	54
BULGULAR VE TARTIŞMA.....	54
4.1. TAZE HAL DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA	54
4.2. SERTLEŞMİŞ BETON DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA	55
4.2.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları ve Tartışma	55
4.2.2. Su Emme Deneyi Sonuçları ve Tartışma	59
4.2.3. Su Emme Deneyi Sonuçları ve Tartışma	60

	<u>Sayfa</u>
4.2.4. Klor Geçirirniligi ve Permabilite Deneyi Sonuqlari ve Tartisma	61
4.2.5. Agrega-Matris Arayuz Olqumleri ve Deqerlendirmeleri	61
BÖLÜM 5	80
SONUÇLAR.....	80
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	88



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Türkiye’de yıllara göre hazır beton üretimi (milyon m ³) (Kaynak: THBB) 3	
Şekil 1.2. Yıl bazında oluşan konut stoku (Kaynak: TÜİK)	3
Şekil 2.1. Betonların dayanım ve ağırlık ilişkileri (Chandra, 2002).....	10
Şekil 2.2. a) Betondaki geçiş bölgesinin ve dökme hamurun şematik gösterimi, b) reaktif olmayan silika alt tabaka ile tip I çimento hamuru arasında oluşan arayüzey bölgesi, c) çelik fiber arayüzündeki arayüzey bölgesi.	12
Şekil 2.3. Taze dökülmüş betondaki kanamanın şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.4. Taze betonun yüzey ve iç terleme etkilerini gösteren idealleştirilmiş görseli.	14
Şekil 2.5. Sertleşmiş betonda geçiş bölgesinin idealleştirilmiş gösterimi (puzolanik malzemenin eklenmesiyle geçiş bölgesinin boyutunda ve gözenekliliğinde azalmayı temsil eden şematik diyagram).	14
Şekil 2.6. İnce parçacıklar tarafından sıvı akış kanallarında tıkanmayı temsil eden şematik diyagram.	15
Şekil 2.7. Agregaya ile çimento hamuru (200x) arasındaki arayüzey bölgesi.....	15
Şekil 2.8. Agregaya ile çimento macunu arasındaki arayüz bölgesi.	16
Şekil 2.9. Agregaya tiplerine göre hafif betonların sınıflandırılması (ACI PRC-213-14).	17
Şekil 2.10. Polimer katkısı kullanılan harç ve betonlarda lateks çeşitleri.....	21
Şekil 2.11. Stiren-bütadien kopolimerleri.	21
Şekil 2.12. Lateksin betonda çalışma mekanizması.	22
Şekil 2.13. Doğru kürlenme ile basınç dayanımı arasındaki ilişki (Ceran, 2008).....	25
Şekil 2.14. 1 gün kürlenmiş betonun arayüz bölgesi (Liao ve diğerleri, 2004).	29
Şekil 2.15. 56 gün kürlenmiş betonun arayüz bölgesi (Liao ve diğerleri, 2004).	29
Şekil 3.1. Kireçtaşı 8 – 16 mm.	34
Şekil 3.2. Tuğla atıklarının küçültülmeden önceki hali.	35
Şekil 3.3. Tuğla atıklarının laboratuvar tipi kırıcı ile küçültüldükten sonra farklı eleklerde ayrıştırılmış görselleri.	36
Şekil 3.4. Seramik atıklarının küçültülmeden önceki hali.	37
Şekil 3.5. Seramik atıklarının laboratuvar tipi kırıcı ile küçültüldükten sonra farklı eleklerde ayrıştırılmış görselleri.	38
Şekil 3.6. Katkılara ait bir resim.	39

Şekil 3.7. Betonda kullanılan agregaların granülometri eğrileri.	40
Şekil 3.8. a) Laboratuvar tipi beton mikserinde malzemelerin homojen bir karışım haline gelene kadar karıştırılması, b) Masa tipi vibratörde taze betonun sıkıştırılması, c) 10x10mm 6 adet, 15x15mm ve 10x20mm birer adet taze beton numuneleri.	42
Şekil 3.10. Beton harçlarının yayılma deneyi sonrasındaki görüntüleri.	43
Şekil 3.11. Taze beton birim hacim ağırlığı deneyi.	44
Şekil 3.12. Beton sıcaklığının termometre ile ölçülmesi.	44
Şekil 3.13. Sertleşmiş beton basınç dayanım deneyi.	45
Şekil 3.14. Vakum işlemi deney düzeneği ve numunelerin silikon kauçuktan yapılmış deney düzeneğine yerleştirilmesi.	46
Şekil 3.15. Deney düzeneği, destek ünitesi ve plastik destek aparatı (NT BUILD 492).	47
Şekil 3.16. DC Güç kaynakları ve NT BUILD 492 standardına göre deneyde kullanılan havuzları.	47
Şekil 3.17. Numune yarmada kullanılan aparat.	48
Şekil 3.18. Deneye maruz bırakılıp yarıldıktan sonraki numuneye ait görsel.	49
Şekil 3.19. Klor geçirimsizliği ölçümü için kullanılan metot.	49
Şekil 3.20. Basınç altında su işleme derinliği deney düzeneği (TS EN 12390-8) 1) yerleştirme parçası 3) sıkıştırma plakası 5) basınçlı su girişi 2) sızdırmazlık contası 4) yivli sıkıştırma çubuğu 6) sıkıştırma plakası.	50
Şekil 3.21. Basınçlı su emme deneyi için numunenin deney düzeneğine yerleştirilmesi ve numunenin basınçlı su uygulanan yüzeye dik şekilde ortasından yarılması.	51
Şekil 3.22. Leica DM4500 P model polarizan mikroskop.	52
Şekil 3.23. a) Metkon marka ince kesit alma makinesi, b) Arayüz geçiş bölgelerinin kontrolü için hazırlanan 50x100mm silindir numune örnekleri, c) ve d) İnce kesit numuneler, e) İnce kesit numunelerin kumpas yardımı ile ölçülmesi, f) İnce kesit numunelerin mikrometre ile ölçülmesi.	52
Şekil 4.1. Sertleşmiş beton numuneleri BHA sonuçları.	56
Şekil 4.2. Sertleşmiş beton numuneleri basınç dayanım deneyi sonuçları.	57
Şekil 4.3. Sertleşmiş beton numunelerine ait su emme ve kuru özgül ağırlık sonuçları.	60
Şekil 4.4. Sertleşmiş beton numuneleri basınç dayanım deneyi sonuçları.	60
Şekil 4.5. 7 gün yaşındaki B1 tip betonun ince kesitinden elde edilmiş polarizan mikroskop görüntüleri (alt görsel 500 mikron, sağdaki görsel 200 mikron ve soldaki görsel 100 mikron ölçek).	62

Şekil 4.6. 7 gün (üst resimler) ve 28 gün (alt resimler) yaşındaki B1 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.	63
Şekil 4.7. 7 gün (üst resimler) ve 28 gün (alt resimler) yaşındaki B2 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.	64
Şekil 4.8. 7 gün (üst resimler) ve 28 gün (alt resimler) yaşındaki B3 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.	65
Şekil 4.9. 7 gün (alt resimler) ve 28 gün (üst resimler) yaşındaki B4 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.	66
Şekil 4.10. 7 gün (alt resimler) ve 28 gün yaşındaki C1 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.	66
Şekil 4.11. 7 gün (alt resimler) ve 28 gün (üst resimler) yaşındaki C2 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.	67
Şekil 4.12. 7 gün (alt resimler) ve 28 gün (üst resimler) yaşındaki C3 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.	68
Şekil 4.13. 7 gün (üst resimler) ve 28 gün (alt resimler) yaşındaki C4 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.	68
Şekil 4.14. SEM görüntüleme öncesinde kullanılan numunelerin makro fotoğrafları.	72
Şekil 4.15. B1 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.....	72
Şekil 4.16. B2 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.....	73
Şekil 4.17. B3 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.....	74
Şekil 4.18. B4 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.....	75
Şekil 4.19. C1 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.....	76
Şekil 4.20. C2 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.....	77
Şekil 4.21. C3 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.....	78
Şekil 4.22. C4 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.....	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Yıllara göre hazır beton üretim, firma ve tesis sayıları (Kaynak: THBB)2	
Çizelge 2.1. Hafif beton birim hacim kütle sınıfları (TS EN 206:2013+A2:2021).....	9
Çizelge 2.2. Doğal ve atık malzemelerden elde edilen hafif agregaların özellikleri..	19
Çizelge 2.3. Lateks katkısı ile üretilen betonlardaki polimerlerin fiziki özellikleri...	23
Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal özellikleri	33
Çizelge 3.2. Kireçtaşı agregasının kimyasal analiz raporu	35
Çizelge 3.3. Tüm agregaların fiziksel ve mekanik analiz raporu	35
Çizelge 3.4. Yatay delikli tuğlaların fiziksel ve mekanik analiz raporu (Erbağ Tuğla)	36
Çizelge 3.5. Beton karma suyu analiz raporu (İSKİ).....	38
Çizelge 3.6. Kimyasal katkı teknik özellikleri	39
Çizelge 3.7. Hafif betonların üretiminde kullanılan karışım tasarımları	40
Çizelge 3.8. Uygulanacak gerilim, oluşan akım ve test süresi çizelgesi.....	48
Çizelge 4.1. Üretilen betonların taze haldeki deney sonuçları	54
Çizelge 4.2. Sertleşmiş betonların BHA sonuçları	55
Çizelge 4.3. Sertleşmiş betonların basınç dayanımı deney sonuçları	57
Çizelge 4.4. Tuğla atıkları agregalı betonlardan elde edilen mikroskop görsellerinin agrega-çimento arayüz ölçüm sonuçları.....	69
Çizelge 4.5. Seramik atıkları agregalı betonlardan elde edilen mikroskop görsellerinin agrega-çimento arayüz ölçüm sonuçları.....	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

T	: anolit çözeltilisinin deney başlangıcı ve deney sonundaki sıcaklık ortalaması, °C
x _d	: deney numuneleri içerisine klorür migrasyonu ortalama derinliği, mm
t	: deney süresi, saat
dm ³	: desimetreküp
kPa	: kilo paskal
kg/m ³	: kilogram/metreküp
kgf/cm ²	: kilogram kuvvet / santimetrekare
KT	: kireçtaşı
lt	: litre
MPa	: mega paskal
m ² /sn	: metrekare/saniye
m ³	: metreküp
D _{nssm}	: migrasyon katsayısı, x10 ⁻¹² m ² /s
µm	: mikro metre
mA	: miliamper
mbar	: milibar
mm	: milimetre
N/cm ²	: newton/santimetrekare
L	: numunelerin kalınlığı
Sn	: saniye
°C	: santigrad derece
cm	: santimetre
cm ²	: santimetrekare
U	: uygulanan gerilim, volt
V	: volt

KISALTMALAR

Na_2O , K_2O	: Alkaliler
Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
ACI	: American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)
BHA	: Birim Hacim Ağırlık
Fe_2O_3	: Demir Oksit
C_2S	: Dikalsiyum Silikat
DKY	: Doygun Kuru Yüzey
DC	: Doğru Akım
CaO	: Kalsiyum Oksit
MgO	: Mağnezyum Oksit
NaOH	: Sodyum Hidroksit
NaCl	: Sodyum Klorür
s/ç	: Su/Çimento Oranı
SO_3	: Sülfat
C_4AF	: Tetrakalsiyum Alümino Ferrit
C_3A	: Trikalsiyum Alüminat
C_3S	: Trikalsiyum Silikat

BÖLÜM 1

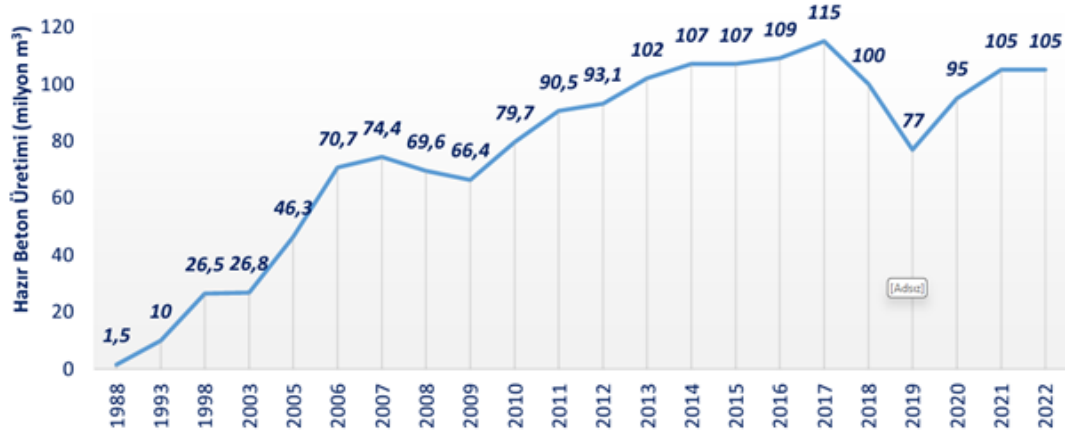
GİRİŞ

İnsanoğlunun yaşamını sürdürebilmesi için en önemli ihtiyacı beslenmeden sonra barınmadır. Kentlerdeki yüksek standartlı hayat algısı kırsaldan göçü hızlandırmış ve özellikle büyük şehirlerde nüfusun hızlı bir şekilde artmasına neden olmuştur. Böylece yeni yapılaşma ihtiyacı artmış ve bu durum kıt kaynakların verimsiz kullanımına sebep olmaktadır. Kentlerdeki nüfus artışına ilaveten yapı stoğunun yaşlanması ve depremler sebebiyle kentsel dönüşüm ihtiyaçları artmakta ve böylece beton bileşenlerine olan ihtiyaç artmaktadır. Sonuç olarak doğal kaynaklar hızla tükenmektedir. Örneğin 6 Şubat depremlerinde meydana gelen ağır hasarlı ve yıkılmış yapıların yerine yenilerinin yapılması için planlanan konut miktarı yaklaşık 800 bin olup, her bir konut için 100 m²'lik bir planlama ile 4 dairesel bir kat planı ve 3 katlı yapıların inşa edilmesi planlanmış olsa toplam yaklaşık beton ihtiyacı 800 milyon m³ ve buna bağlı olarak agrega ihtiyacı yaklaşık 533 milyon m³ (1,4 milyar ton) dur. Bu durum çeşitli katı atıkların geri kazanılması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır (Yüksel, 2009).

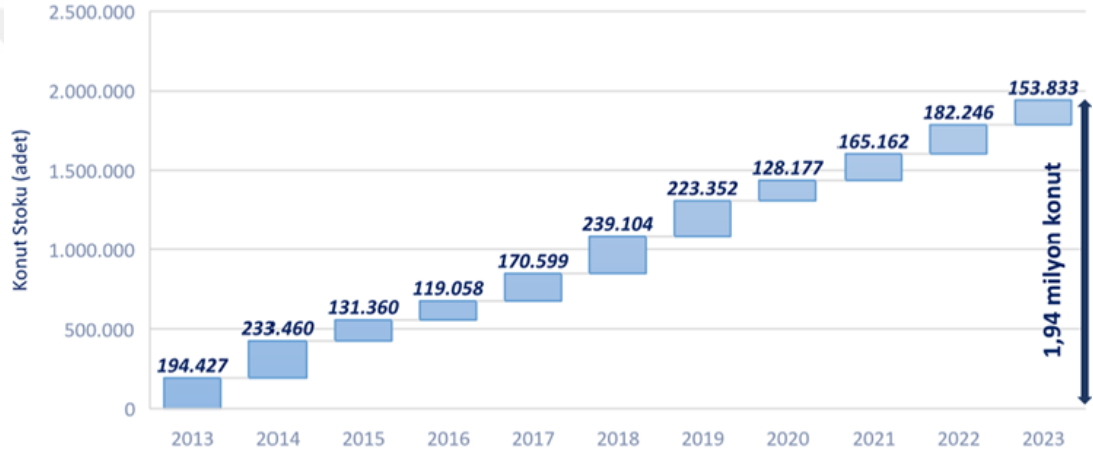
Çizelge 1.1. Yıllara göre hazır beton üretim, firma ve tesis sayıları (Kaynak: THBB)

Yıllar	Hazır Beton Üretimi (milyon m ³)	Hazır Beton Firma Sayısı	Tesis Sayısı
1988	1,5	25	30
1993	10	70	110
1998	26,5	166	341
2003	26,8	238	429
2005	46,3	277	568
2006	70,7	409	718
2007	74,4	477	845
2008	69,6	462	825
2009	66,4	467	845
2010	79,7	500	900
2011	90,5	520	945
2012	93,1	540	980
2013	102	580	1.040
2014	107	580	1.040
2015	107	621	1.098
2016	109	570	1.120
2017	115	540	1.184
2018	100	495	1.100
2019	77	450	900
2020	95	542	1.032
2021	105	600	1.106
2022	105	606	1.114

İnsanların barınma ihtiyacını karşılamak için yapı malzemeleri arasında en çok kullanılanı betondur. Avrupa ülkeleri ile kıyaslandığında Türkiye beton üretimi en fazla olan ülkedir. Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından hazırlanan “Hazır Beton Sektörü İstatistikleri”ne göre 2021 yılında 105 Milyon m³ beton üretimi gerçekleşmiştir (Çizelge 1.1 ve Şekil 1.1). Betonun en önemli hammaddelerinden olan agrega üretimi 2021 yılında 300 Milyon ton olmuştur (Türkiye hazır beton birliği, 2021). Yönetmelikler ve standartlarda yaşanan gelişmelerle birlikte beton teknolojisi de ilerlemiş ve betonarme elemanların yük taşıma kapasitesi ile dayanıklılığı da artmıştır. Yapı ömrünü uzatmak için beton üretiminde kaliteli hammadde (bileşen) ihtiyacı vardır. Betonda en çok tercih edilen agregalar: dere, kırmataş ve bazalt olmak üzere üç farklı türdedir. Ancak bu nitelikteki agregalar kıt kaynak olarak düşünülmelidir. Şekil 1.1’de Türkiye’de yıllara göre hazır beton üretimi (milyon m³) ile Şekil 1.2’de yıl bazında oluşan konut stoku gösterilmiştir. Bu diyagramlara göre her geçen gün yapı stoğu artmakta ve ihtiyaç olan beton miktarı da önemli oranda yükselmektedir.



Şekil 1.1. Türkiye’de yıllara göre hazır beton üretimi (milyon m³) (Kaynak: THBB)



Şekil 1.2. Yıl bazında oluşan konut stoku (Kaynak: TÜİK)

Betonarme yapıların inşasında kullanılan geleneksel betonun birim hacim ağırlığının yüksek olması günümüzde yapı tasarımını önemli derecede etkilemektedir. Yapısal betonların birim ağırlıklarının fazla olması çok katlı yapılarda önemli sorunlar teşkil etmekte ve bu durum yapıları deprem sırasında olumsuz yönde etkilemektedir. Yapısal tasarımda olumsuzluk oluşturan bu yönü iyileştirmek amacıyla bugün gelişmiş ülkelerin birçoğunda geleneksel betonlar hafif beton olarak üretilmektedir. Hafif betonlar yapı ağırlığını azaltırken aynı zamanda yangın direnci ile ses ve ısı yalıtımını artırmaktadır (Mehta ve Monteiro, 2006). Bunların dışında hafif beton kullanımı uygulama kolaylığı açısından bina maliyetlerini düşürmekte ve normal betona göre kullanılan hammaddeler nispeten yeşil olma avantajına sahip olabilmektedir (Lo vd., 2007).

İnşaat sektörünü yöneten diğer üretimler içinde seramik ve kil tuğla üretimleri de önemli bir pozisyon almaktadır. Ancak her iki üretim sistemi önemli oranda atık oluşturmakta ve bu atıkların geri kullanımı (dönüşümü) yeterince olmamaktadır. Bu durum çevre kirliliğinin yanı sıra depolama problemlerine de sebep olmaktadır. Sektör verilerine göre yıllık ortalama 23,6 milyon ton seramik ve 550 bin ton tuğla üretilmiştir. Bu atıklar endüstride yeterince kullanılamamakta ve bu sebeple çevresel zararlara sebep olmaktadır. Tuğla ve seramik atıklarının betonda kullanımına ilişkin çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Tutan (2015) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında 0-7 mm, 7-15 mm ve 15-22 mm kireçtaşı, CEN standart kum ve CEM I 42.5R çimento ile hazırlanan C25/30 beton dayanım sınıfına sahip betonlarda bağlayıcının %0, %5, %10 ve %15'i oranlarında lateks katkısı kullanılarak en iyi performansın hangi oranda olacağını belirlemeyi amaçlamıştır. Buna göre ilave edilen lateks miktarı ile basınç dayanımları arasında ters orantı olduğunu gözlemlemiştir (Tutan, 2015).

Ceran (2008) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, lateks katkılı kil, Puzolonik, Kireç, Alçı, Çimento ve Melez harçların durabilite özelliklerini incelemiştir. Ayrıca artan oranlarda lateks katılan harçların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda lateks katkılı çimento harçları katkısız harçlara göre yüksek olmuştur. Lateksin matris fazdaki boşluklu yapıyı doldurma özelliği, su tutucu/azaltıcı özelliği ve polimerlerin çimento hidrasyonuna olan olumlu etkilerinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Lateks oranı %15'in üstünde olan harçlarda mukavemetin düştüğü tespit edilmiştir. (Ceran, 2008)

Doğan (2001) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, yaptığı çalışmada üç farklı yapıdaki lateks katkısı ile beton üretmiş ve bu betonların sıkıştırma mukavemeti, bükülme mukavemeti ve su geçirimsizlik testlerini gerçekleştirmiştir. Lateks katkısının su geçirimsizlik testinde olumlu, sıkıştırma ve bükülme mukavemetlerinin azaldığını tespit etmiştir (Doğan, 2001).

Hatungimana D. (2019) yapmış olduğu doktora tez çalışmasında, lateks ile geri dönüşüm agrega kullanarak ürettiği betonların fiziksel, mekanik ve durabilite

özelliklerini incelemiştir. Lateks içeren betonların basınç dayanımı, elastisite modülü ve darbe direncinin daha düşük, yarmada çekme dayanımı ve ultrases hızı değerlerinin daha yüksek, su emme, toplam boşluk oranı, basınçlı su sızma derinliği, kılcal su emme değerleri, klor iyonu geçirimsizliğinin daha düşük, donma-çözülme ve sülfat saldırısına karşı dirençlerinin daha yüksek olduğu belirlemiştir (Hatungimana, D. 2019).

Tuğla atıklarının betonda kullanımı üzerine SCOPUS arama motoru kullanılarak gerçekleştirilen literatürde taramasında, “brick aggregate (tuğla agregası), concrete (beton)” anahtar kelimeleri ile Mühendislik, Malzeme Bilimi ve Çevre Bilimleri alanlarında yayınlanmış toplam 457 makale bulunmuştur. Bu çalışmaların bir kısmı tuğla tozunun betonda etkilerini araştırmıştır. Agregada olarak kullanılan tuğla atıklarının betonda etkileri şu şekilde özetlenmiştir:

Seramik atıklarının betonda kullanımı üzerine SCOPUS arama motoru kullanılarak gerçekleştirilen literatürde taramasında, “ceramic aggregate (tuğla agregası), concrete (beton)” anahtar kelimeleri ile Mühendislik, Malzeme Bilimi ve Çevre Bilimleri alanlarında yayınlanmış toplam 226 makale bulunmuştur. Bu çalışmaların bir kısmında seramik tozunun betonda etkileri araştırılmıştır. Agregada olarak kullanılan seramik atıklarının betonda etkileri şu şekilde özetlenmiştir:

Tuğla ve seramik atıklarının betonda agregada olarak kullanıldığı çalışmalar olmasına rağmen, gerçekleştirilen çalışmalar içinde tuğla ve seramik atıklarının agregalarının çimento ile bağ yüzeylerinin (arayüz) zamana bağlı gelişimlerinin araştırılmadığı anlaşılmaktadır. Buna ilaveten polimer katkılı betonlarda arayüz gelişimleri de araştırılmamıştır. Bu kapsamda bu çalışmanın araştırma sorusu “Tuğla ve Seramik atıkları ile üretilen hafif betonlar yapısal özellik taşıyor mu ve matris-agregada arayüzü bu aşamada ne kadar etkindir?” olarak kabul edilmiştir. Bu araştırma sorusunu tamamlayıcı hipotez ise “Tuğla ve seramik atıkları hafif yapısal beton üretiminde agregada yerine kullanılabilir ve bu arayüzü iyileştiren bir yaklaşımdır” şeklinde kurulmuştur.

Bu hipotezi gerçekleştirmek amacıyla aşağıdaki argümanlar kullanılmıştır.

1. Literatür taraması yapıldı.
 - 1.1. Hafif betonlar ve üretim yöntemleri
 - 1.2. Hafif betonların özellikleri
 - 1.3. Hafif betonlarda kullanılan bileşenler
2. Deneysel çalışma yapıldı.
 - 2.1. Atık tuğla ve seramikler 0-8 mm boyutlu agregaya haline getirildi.
 - 2.2. Hafif betonlar üretildi.
 - 2.3. Mekanik ve fiziksel özellikler belirlendi.
3. Mikroskop yöntemi ile agregaya-çimento arayüzleri ölçüldü ve 28 günlük gelişimleri analiz edildi.
4. Sonuçlar tartışıldı.

BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER

2.1. BETON

Beton; agrega, çimento, su ve gerektiğinde kimyasal katkı kullanılarak taze halde işlenebilir, belli bir süre sonunda sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir. Günümüzde beton teknolojisindeki gelişmeler sayesinde farklı alanlarda kullanılacak ihtiyaçlara göre betonlar çeşitlendirilmiştir. Çok sayıda farklı alanlarda kullanılacak beton türlerinden biri olan hafif betonlar beton teknolojisinin en önemli gelişmelerinden birisi olarak her geçen gün kullanımı artmaktadır (Chandra, 2002).

2.1.1. Hafif Beton

Birim ağırlıkları normal betonlardan küçük olan betonlara hafif beton denilmektedir. ACI'ya göre birim ağırlığı 1850 kg/m^3 'den düşük betonlar hafif beton sınıfına girer (ACI PRC-213-14(23)). TS EN 206-2013-A2'ye göre betonlar 3 farklı birim hacim ağırlık sınıfında üretilirler: 1) Etüv kuru BHA 2000 kg/m^3 'ten daha hafif olanlar hafif beton olarak, 2) Etüv kuru BHA $2000-3200 \text{ kg/m}^3$ arasında olanlar normal BHA beton olarak, 3) Etüv kuru BHA 3200 kg/m^3 'ten daha ağır olanlar ağır beton olarak değerlendirilmiştir. DIN 1045'de $300 - 2000 \text{ kg/m}^3$ arasında değişiklik göstermektedir (DIN 1045). Basınç dayanımlarına göre hafif betonlar 17 MPa dayanım altı düşük dayanımlı, 17-50 MPa normal dayanımlı, 50 MPa ve daha yukarı olan betonlar yüksek dayanımlı hafif beton olarak tanımlanır (Gökçe, 2010).

Hafif beton, yeterli mukavemeti korurken betonun yoğunluğunu azaltmak için 1) hafif agregalar içeren, 2) hava sürüklenerek yoğunluğu azaltılarak üretilmektedir. Hafif betonun piyasaya sürülmesi, geleneksel betonun ağırlığı ve bunun yapısal yükler

üzerindeki etkisi, nakliye maliyetleri ve genel inşaat verimliliği gibi belirli inşaat zorluklarının ele alınması ihtiyacından kaynaklanmıştır. Hafif beton tipik olarak geleneksel agregaların (çakıl ve kum gibi) bir kısmını veya tamamını genleştirilmiş kil, şist, perlit, vermikülit veya pomza gibi hafif agregalarla değiştirerek üretilir. Ek olarak, hafif betonda yoğunluğu daha da azaltmak için hafif çimento veya katkı maddeleri kullanılabilir. Günümüzde hafif beton çeşitleri gazbeton, köpük beton, ince agregasız beton, hafif agregalı beton gibi tanımlarla literatürde bulunmaktadır (Mehta ve Monteiro, 2006).

En önemli avantajları,

1. Azaltılmış Ağırlık: Hafif beton, geleneksel betona göre önemli ölçüde daha hafiftir, bu da taşınmasını ve taşınmasını kolaylaştırır.
2. Isı Yalıtımı: Bazı hafif beton türleri, iyileştirilmiş ısı yalıtım özellikleri sağlayarak binalarda enerji verimliliğine katkıda bulunur.
3. Daha Düşük İnşaat Maliyetleri: Azaltılmış ağırlık, nakliye, taşıma ve temel gereksinimleri açısından maliyet tasarrufu sağlayabilir.
4. Geliştirilmiş İşlenebilirlik: Hafif beton daha kolay işlenebilir ve daha kolay yerleştirme ve bitirme olanağı sağlar.

2.1.1.1 Hafif betonların tarihçesi

Hafif betonlar geçmişte genellikle pomza, cüruf vb. gibi volkanik kökenli doğal agregalar kullanılarak yapılmıştır. Sümerler M.Ö. 3000'li yıllarda Babil'in inşasında kullanmışlardır. Yunanlılar ve Romalılar bina yapımında pomza taşı kullanmışlardır. Bu muhteşem antik yapılardan bazıları, İstanbul'da M.S. 4. yüzyılda Miletoslu Isidore ve Trallesli Anthemius adlı iki mühendis tarafından inşa edilen Ayasofya, M.S. 118-128 yıllarında inşa edilen Roma tapınağı Pantheon, prestijli su kemeri Pont du Gard, M.S. 14 ve M.S. 70-82 yılları arasında inşa edilen büyük Roma amfiteyatrosu Kolezyum yapılarıdır. Romalılar, inşaat yapılarının yanı sıra, ağırlığı azaltmak amacıyla "Opus Caementitium" için doğal hafif agregalar ve içi boş kil vazolar kullanmışlardır. Bu aynı zamanda Meksika'daki Maya döneminde Piramitlerin inşasında da kullanılmıştır (Chandra, 2002).

Hafif betona olan talebin artması ve hafif agregaların bulunamaması nedeniyle hafif agrega üretme teknolojisi geliştirilmiştir. Almanya'da 19. yy'da suyun hızla buharlaşmasıyla gözenekli kil parçaları üretilmiş ve Braunschweig'den Kukenthal, 1880'de patent almıştır. Almanya'da doğal hafif agregaların endüstriyel kullanımı, 1845'te bağlayıcı olarak yanmış kireç kullanarak pomzadan duvar blokları üreten Koblenz'li Ferdinand Nebel tarafından başlatıldı. İzlanda'da pomza 1928'den beri yerel inşaat endüstrilerinde kullanılmaktadır.

2.1.1.2 Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Birim hacim ağırlık

Hafif beton yoğunluğu, içeriğinde kullanılan agregaların yoğunluğuyla doğrudan ilişkilidir. Ancak betonun birim hacim ağırlığına etki eden faktörler arasında su-bağlayıcı oranı, kimyasal ve mineral katkıları, betonun yerleştirilme – sıkıştırma yöntemleri önemlidir. TS EN 206:2013+A2:2021 Beton standardına göre hafif betonlar 6 farklı sınıfa ayrılmaktadır. Bu altı farklı hafif beton sınıfı için birim hacim kütle aralıkları Çizelge 2.3'de görülmektedir.

Çizelge 2.1. Hafif beton birim hacim kütle sınıfları (TS EN 206:2013+A2:2021)

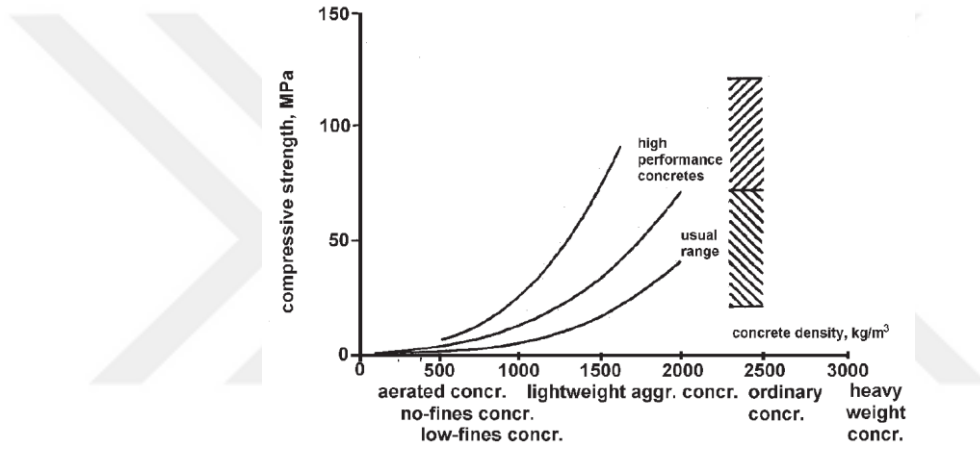
Birim hacim kütle sınıfı	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Hacim kütle aralığı (kg/m ³)	≥800 ve ≤1000	≥1000 ve ≤1200	≥1200 ve ≤1400	≥1400 ve ≤1600	≥1600 ve ≤1800	≥1800 ve ≤2000

İşlenebilirlik

İşlenebilme beton için en önemli özelliklerden biridir. Bu özellik taze betonun taşınması, homojen dağılım ile kohezyonunu kaybetmeden kalıba yerleştirilebilmesi ve yapı elemanını mümkün olduğunca az boşluklu olacak şekilde doldurabilmesini sağlamaktadır (Erdoğan, 2013). Hafif betonlarda yüksek çökme değerleri aşırı segregasyon sebebiyle tercih edilmez. Bu nedenle çökme değeri 75-125 mm aralığında bir değere sahip olan hafif betonun iyi bir işlenebilme yeteneği gösterebileceği düşünülmektedir (TS EN 206:2013+A2:2021).

Dayanım

Hafif betonların karakteristik basınç dayanımları, genellikle kullanılan hafif agreganın birim hacim ağırlığıyla ilişkilidir. Hafif agreganın basınç dayanımı, beton matrisinin basınç dayanım değerinden genellikle düşüktür. Bu nedenle, yük matris fazı tarafından taşınırken hafif agregalar aracılığıyla iletilir. Bu süreçte oluşan çatlaklar, beton yüzeyine paralel bir doğrultuda düz bir çizgi şeklinde ortaya çıkar (Meh ve Monteiro, 2006). Yüksek dayanımlı hafif betonların mekanik ve fiziksel özellikleri hafif agregaların su emme kapasiteleri tarafından kontrol edilmektedir (Zhang ve Gjorv, 1991).



Şekil 2.1. Betonların dayanım ve ağırlık ilişkileri (Chandra, 2002).

Hafif agregaların dış yüzeyleri boşluklu ve pürüzlü olması sebebiyle çimento hamuru ile aderansları normal agregalara göre çok daha yüksektir. Bu nedenle çimento, agregaların arasında bulunan boşluklara daha iyi entegre olarak geleneksel normal ağırlıklı betona göre çok daha kuvvetli bir ara yüzey oluşmasını sağlar (Pekgöz ve Tekin, 2022). Betonun kendi kendine kür mekanizması olarak ta bilinen içsel kür (Self-curing), agregaların tarafından emilerek bünyeye alınan suyun bir kısmının kapiller boşluklarla dışarı atılarak hidrate olmamış çimento tanelerinin hidrasyonunu sürdürmesini sağlar ve devam eden süreçte betonun mukavemetinin uzun süreli artmasına sebep olur (Sundaramoorthy G. ve Meyyappan P. 2024), (Kabay 2009).

Su emme

Hafif agregaların su emme oranı, içindeki boşluk boyutu, yapısı, dağılımı ve sürekliliğine bağlıdır. Hafif agregaların normal agregalara oranla %5 – 25 oranında daha fazla su emerler ve bunun nedeni yapılarında bulunan mikro, meso veya makro boyutlu boşluklardan dolayıdır.

2.1.1.3 Hafif Betonun Mikro Yapısı

Taze beton arayüzünü oluşturan malzemeler

Hidratlı çimento hamuru matrisine gömülmüş, geniş boyut dağılımına ve değişken mineralojik bileşime sahip, nispeten inert agrega parçacıklarından oluşan kompozit bir malzemesi olan betonu oluşturan bileşenler çok çeşitli arayüzlerin ortaya çıkmasına neden olur. Bu arayüzlerin başlıcaları aşağıda listelenmiştir.

1. Taze betonu oluşturan çeşitli aşamalar.
2. Taze beton hamur matrisi ve hala hidrate olmamış çimento taneleri.
3. Puzolanik malzemelerin matrisi ve reaksiyona girmemiş kısmı.
4. Taze beton hamur matrisi ve süreksiz lifler.
5. Taze beton hamur matrisi ve çelik takviye.
6. Katı fazlar ve hava veya su.

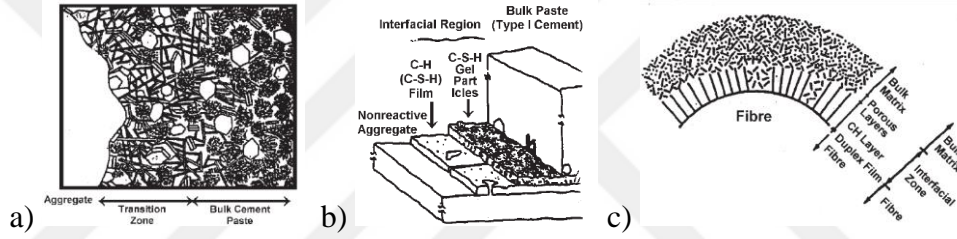
Taze beton arayüzünü oluşturan malzemeler

Çimentolu kompozit sistemlerdeki bağlar, Van Der Waals kuvvetleri, hidrojen bağları ve muhtemelen kimyasal bağlar gibi farklı mekanizmaların kombinasyonunun sonucudur. Bu mekanizmaların doğası, hammaddelerin kimyasal yapısına, hidrasyon koşullarına vb. bağlı olarak sistemden sisteme değişiklik gösterir.

Bu, arayüzey bölgelerinin kesin doğası veya mekanik özellikleri hakkındaki anlaşmazlığın temel nedeni: betonun hazırlanması ve işlenmesi sırasında, sonuçları etkileyen artefaktların ortaya çıkmasıdır. Bununla birlikte, ara yüzey bölgelerinin genel olarak morfoloji, bileşim ve yoğunluk bakımından "yığın" çimento hamurundan

oldukça farklı olduğu açıktır. Ara yüzey bölgesinde genellikle tercihi bir yönelime sahip büyük kristaller bulunur. Ancak bu, arayüzlerin doğasında olan bir özellik olarak alınmamalıdır; büyük olasılıkla suyun sızması nedeniyle arayüzde fazladan boşluk olması nedeniyle ortaya çıkar.

Birbirinden farklı birçok arayüz bölgesi modeli sunulmuştur. Bu modellerden birkaçı Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Diğer farklılıkların yanı sıra, ara yüzey bölgesinin kalınlığının 40 ila 50 μm arasında değiştiği, toplu macundan büyük farkların fiziksel arayüzden ilk 20 veya 50 μm içinde meydana geldiği gösterilmiştir. Üstelik bu ara yüzey bölgesinin en zayıf kısmı fiziksel ara yüzeyde değil, ondan 5 ila 10 μm uzakta, macun fraksiyonunun içinde yer alır.



Şekil 2.2. a) Betondaki geçiş bölgesinin ve dökme hamurun şematik gösterimi, b) reaktif olmayan silika alt tabaka ile tip I çimento hamuru arasında oluşan arayüzey bölgesi, c) çelik fiber arayüzündeki arayüzey bölgesi.

Geleneksel olarak, ara yüzey bölgelerinin betonda sadece küçük bir hacim kapladığı ve dolayısıyla kütle macununun özelliklerinin beton davranışına hakim olduğu varsayılmıştır. Ancak cilalı yüzeylerin dikkatli bir mikroskobik incelemesi, agregası parçacıkları arasındaki ortalama aralığın yalnızca 75 ila 100 μm olduğunu ortaya çıkarmıştır.

HÇP ile agregası arasındaki arayüzün genel olarak betondaki "zayıf halka" olduğu kabul edilir. Bu inanca katkıda bulunan bir dizi gözlem vardır:

1. Çimento agregası ara yüzey bölgesi, toplu hidratlı çimento hamuruna kıyasla açık bir morfolojiye sahiptir.

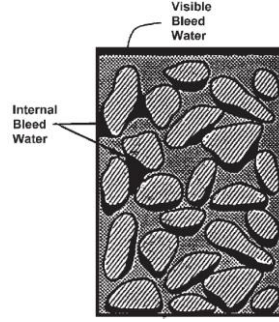
2. Ara yüzey bölgesi, tercihen zayıflık düzlemleri oluşturacak şekilde yönlendirilmiş büyük portlandit kristalleri $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içerir.
3. Tahliye suyu sıklıkla daha büyük agregâ parçacıklarının altında birikerek ek zayıflık düzlemleri oluşturur.

Mikroskopik incelemelerin çoğu, katkısız betondaki çatlakların tercihen arayüzey bölgesinde, genellikle agregâ yüzeylerinden birkaç mikrometre uzakta yayıldığını göstermiştir. Ancak çatlakların bu bölgede mi yoksa dökme hamurdaki çatlaklarda mı başladığı bilinmemektedir. Ara yüzey bölgesinde çatlakların meydana gelme eğiliminde olduğu gerçeği, normal betondaki ara yüzeyin kırılma dayanıklılığının agregâ veya dökme hamurunkinden önemli ölçüde daha düşük olduğu gözlemleriyle tutarlıdır.

Hafif betonda çatlaklar, çatlak yolundaki agregâ parçacıkları boyunca düz bir çizgide yayılma eğilimindedir. Bu durum agregâların hidratlı çimento hamurundan veya arayüzey bölgelerinden daha zayıf olduğunu gösterir.

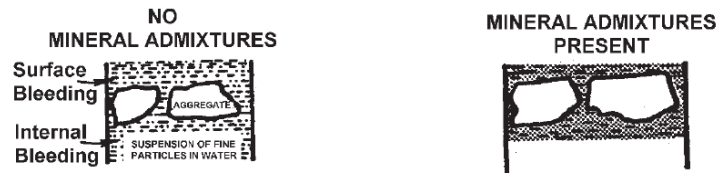
Hafif Agregâ-Çimento Macunu Arayüzü

Arayüz, puzolanik reaksiyon formundaki kimyasal etkileşimle birlikte mekanik bir kilitleme ile karakterize edilir. Hafif agregâların gözenekli yüzeye sahip olması nedeniyle bağlayıcının bir kısmı agregânın içine nüfuz eder. Taze yerleştirilmiş betonda yüzey kanaması olgusu, hidratlanmamış çimento hamurunun yüksek geçirgenliğinden kaynaklanmaktadır. Bu olgunun doğal bir sonucu, sertleşmiş betonun yüzeyinde oldukça gözenekli ve zayıf bir harç tabakasından oluşan laitence'dir. İç kanama olgusu iyi bilinmemektedir. Şekil 2.3'te gösterilmektedir. İç kanama suyu yüzeye ulaşamamış, dolayısıyla betonda kaba agregâ altında biriken sudur. Yüzey sızıntı suyu gibi, iç sızıntı suyu da ince kum ve çimento parçacıkları içerebilir ve yüzey şerbetine benzer bir olay olan agregâ yüzeyinde gözenekli bir çimento hamuru matrisinin oluşmasına neden olur.

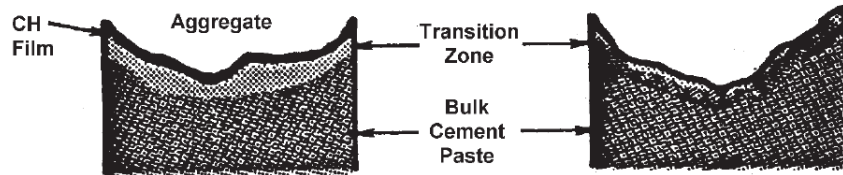


Şekil 2.3. Taze dökülmüş betondaki kanamanın şematik gösterimi.

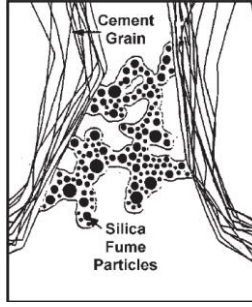
Yüzey ve iç terleme birbiriyle yakından ilişkilidir; birincisini etkileyen faktörler ikincisini de aynı şekilde etkiliyor gibi görünmektedir. Agregalar gözenekli olduğunda veya hafif agregalarda (genişletilmiş kil, şist vb.) olduğu gibi puzolanik karakterde olduğunda veya karışıma mineral katkı eklendiğinde iç sızıntı suyu alanı azalacaktır. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5, iki çimento tanesi arasındaki ince mineral katkı parçacıklarının (0,1 µm çapında) varlığının kanal akışının boyutunu etkili bir şekilde nasıl azaltacağını, böylece yeni yerleştirilmiş bir betonda geçirgenliği ve kanamayı önemli ölçüde azaltacağını şematik olarak göstermektedir. Buna ek olarak, tahliye suyunun mineral katkılı kısmının kimyasal etkileşimi gözenekli LWA'ya doğru hareket edecektir. Ara yüzey geçiş bölgesini (ITZ) daha da azaltacaktır. Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Agregalar arasındaki bağ, normal betondaki taş agregalarda olduğu gibi agregaların yüzeyinde olmayacak, hafif agreganın içinde daha da ilerleyecektir.



Şekil 2.4. Taze betonun yüzey ve iç terleme etkilerini gösteren idealleştirilmiş görseli.



Şekil 2.5. Sertleşmiş betonda geçiş bölgesinin idealleştirilmiş gösterimi (puzolanik malzemenin eklenmesiyle geçiş bölgesinin boyutunda ve gözenekliliğinde azalmayı temsil eden şematik diyagram).

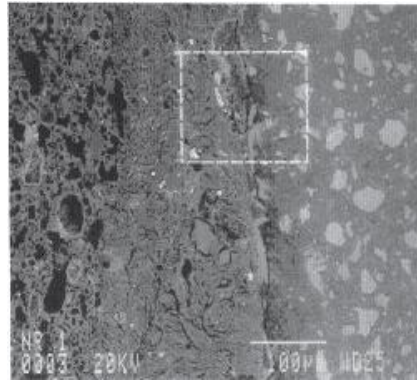


Şekil 2.6. İnce parçacıklar tarafından sıvı akış kanallarında tıkanmayı temsil eden şematik diyagram.

Hafif agregalı betonların mikroyapı çalışması, macun-agrega bağının agreganın dış kabuğunun doğasına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Mekanik kilitleme arayüzün güçlendirilmesinde önemli bir rol oynar. Ara yüzeyde yönlendirilmiş kalsiyum hidroksit kristallerinin bulunmaması, agrega tarafından su emilmesiyle ilgilidir. Diğer faktörlerin optimize edilmesi koşuluyla, arayüz bölgesinin belirgin bir şekilde iyileştirilmesinin elde edilebileceği gösterilmiştir. Kimyasal reaksiyon nedeniyle mümkün olan LWA'nın puzolanik aktivitesine dair bazı mikroyapısal kanıtlar vardır.

Arayüz Geçiş Bölgesinin Mikro Yapısı

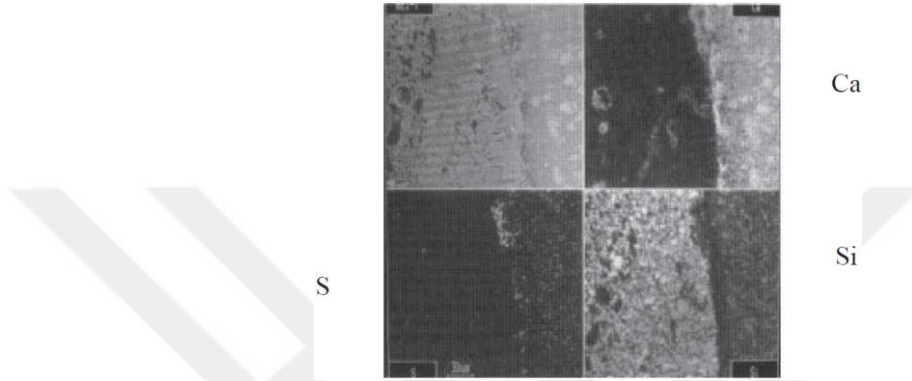
Mikroyapı genellikle enerji dağılımlı x-ışını analiz sistemine sahip bir taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenir. Agregat ve çimento hamurundan oluşan bir kompozit için arayüz bölgesinin tipik bir mikro yapısı Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Agregat ile çimento hamuru (200x) arasındaki arayüz bölgesi.

Agregat ile çimento macunu arasındaki arayüz bölgesi Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Resimde soldaki alan agregat, sağdaki alan ise çimento hamurudur. Agregadaki ve

arayüzey bölgesindeki gözenekler (siyah alan) ve hidrate olmamış çimento parçacıkları (parlak) kolaylıkla ayırt edilebilir. Yukarıdaki gözlem, çok yoğun bir dış kabuğa sahip bir LWA için, büyük miktarda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içeren gözenekli bir ara yüzey bölgesinin oluşumunun mümkün olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni muhtemelen duvar etkisi ve lokal terlemedir. Çünkü yoğun kabuğun su emmesi minimum düzeydedir.



Şekil 2.8. Agreganın ile çimento macunu arasındaki arayüz bölgesi.

2.1.1.4 Puzolanik Etkileşim

Hafif agreganın, sinterleme işlemi sırasında oluşan camsı bir yüzeye sahiptir. Bu faz amorfür, dolayısıyla potansiyel olarak reaktiftir. Genel olarak yüksek sıcaklıkta iyi sinterlenmiş kil puzolanik malzeme gibi çalışır. Bu puzolanik malzeme, çimentonun hidrasyonu sırasında üretilen kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak etkileşime girer.

2.1.2. Hafif Betonun Üretim Yöntemleri

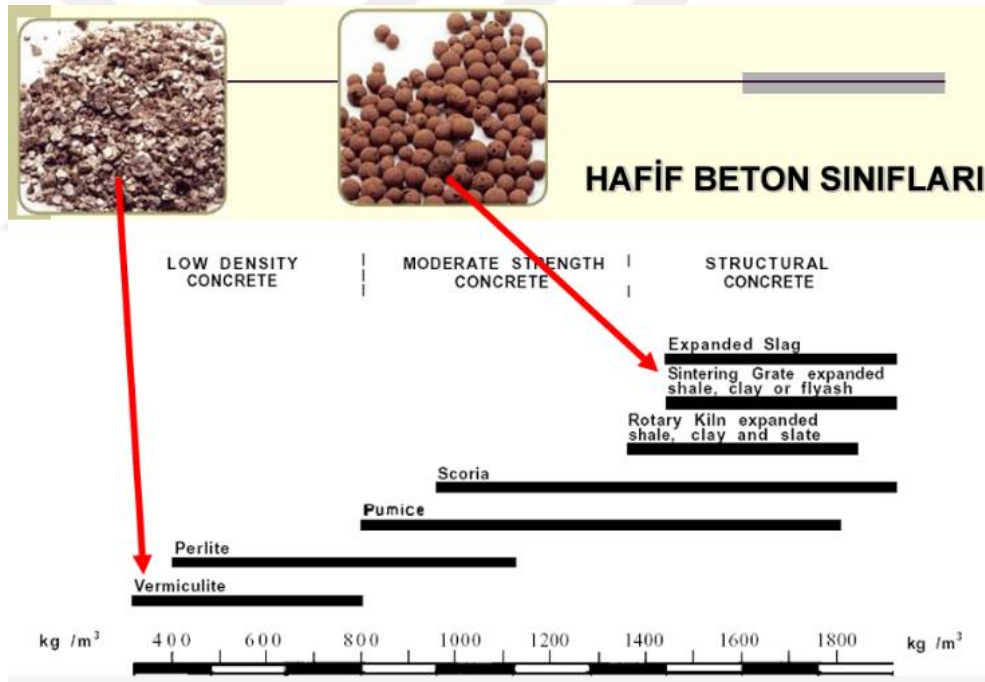
Hafif beton farklı yöntem ve tekniklerle üretilebilmektedir (Baradan 2004):

1. Hafif agregalar kullanarak
2. Kum kullanımı olmadan boşluklu beton üreterek
3. Köpük beton üretimi ile
4. Gaz beton üretimi ile

Bu yöntemler kısaca aşağıda detaylandırılmıştır.

2.1.2.1. Hafif Agregalar Kullanarak

Betonun hacimce %80'e yakınına agrega oluşturmaktadır (Erdoğan, 2002). Deprem kuşağında yer alan ülkemizde yönetmeliklerinde yapılan değişikliklerle beraber inşa edilen yapılarda kullanılan beton dayanım sınıfları gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum beton üretiminde kullanılan agregaların kalitesini ön plana çıkarmaktadır. Buda kaliteli malzeme stoğunun gün geçtikçe azalmasına neden olmakta ve gelecekte üretilen betonlar için kaliteli agregaya ulaşımı gün geçtikçe zorlaştırmaktadır. Gelişen teknoloji ile özel projelerdeki artış betonda da farklı özellikte beton üretilmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Bu nedenle yapısal taşıyıcı özelliği olsun ya da olmasın tüm betonlar için atık malzemelerin kullanılması kaliteli malzemelerin gelecek kuşaklara bırakılmasında önemli rol oynamaktadır.



Şekil 2.9. Agrega tiplerine göre hafif betonların sınıflandırılması (ACI PRC-213-14).

Hafif agregalar doğal kaynaklardan elde edilebileceği gibi, insan yapımı da olabilir. Başlıca doğal kaynak volkanik malzemedir. İnsan yapımı veya sentetik agregalar fabrikalarda ısı ile üretilir. Doğal hafif agregalar doğal kaynaklardan elde edilen hafif agregaları içerir. Örnek olarak volkanik kökenli pomza taşı, vermikülit ve perlit verilebilir. Volkanik Kökenli agregalar (pomza veya volkanik cüruf), yanardağdan

gelen lavın aniden soğuması nedeniyle oluşan, amorf ve camsı bir yapıya sahip agregalardır. Organik Agregalar; Palm Yağı Kabukları. Palmiye yağı kabukları, yağ fabrikalarında büyük miktarlarda üretilmekte ve hafif beton üretiminde agrega olarak kullanılabilir. Tarımsal atıkların inşaat malzemeleri üretiminde agrega olarak kullanılmasının birçok pratik ve ekonomik avantajı vardır (Chandra, 2002).

Yapay hafif agregalar endüstriyel işlemlerle elde edilen hafif agregaları kapsar. Örnek olarak genişletilmiş kil, genişletilmiş şist, genişletilmiş polistiren köpük ve genişletilmiş cam boncuk verilebilir. Bu agregalar, genişletme veya köpürtme işlemleriyle elde edilir ve hafif beton, hafif dolgu malzemeleri ve yalıtım malzemelerinde kullanılır.

Yan ürün hafif agregalar, endüstriyel süreçlerin yan ürünleri olarak elde edilen hafif agregalardır. Taban külü, çimento fabrikalarının yan ürünü olarak elde edilen tüvenan kömür külü, metalurjik süreçlerden elde edilen çelik çürüğü ve termal enerji üretiminden kaynaklanan çimento klinkeri tozu verilebilir. Bu agregalar, atık malzemelerin geri dönüşümüyle elde edilir ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir.

Sentetik Hafif Agregalar, sentetik malzemelerden üretilen hafif agregaları içerir. Örnek olarak sentetik köpükler ve sentetik granüller verilebilir. Bu agregalar, özel üretim süreçleriyle elde edilir ve yüksek performanslı betonlarda ve hafif dolgu malzemelerinde kullanılır (GÜL, 2018). Hafif betonlar kullanılan hafif agregaya bağlı olarak farklı adlar alabilir. Örneğin, genişletilmiş kil gibi taşıyıcı betonlar, perlit betonu, pomza taşı betonu gibi yalıtım veya orta mukavemetli betonlar hafif beton örnekleri olarak gösterilebilir. Hafif agregalarla üretilmiş özel betonların özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Doğal ve atık malzemelerden elde edilen hafif agregaların özellikleri

Hafif agregaların özellikleri	Doğal hammaddelerden elde edilen hafif agregalar		Atık maddelerden elde edilen hafif agregalar			
	Perlit ve vermikülit	Genleştirilmiş kil	Cam granül	Kırma kum granül	Mineral köpük granül	Uçucu kül ve diğer bileşen.
Fırınlanma sıcaklığı (°C)	Yaklaşık 900	1100-1200	750-900	1000-1080	<1000	1000-1300
Yığın yoğunluğu (kg/m ³)	32-400	160-850	190-300	250-600	150-400	710-1400
Isı iletkenliği (W/mK)	0.04-0.06	0.08-0.12	0.07	0.06-0.09	0.09	0.07

2.1.2.2. Betonun İçinde Boşluklar Oluşturmak

Betonun içinde büyük boşluklar oluşturmak, fiziksel veya kimyasal yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bu boşluklar genellikle hava sürükleyici katkı maddeleri kullanılarak elde edilir. Bu tip betonlar gaz betonu, köpük betonu veya hava sürüklenmiş beton olarak adlandırılır. Kumsuz betonlar ise betonun ince agregası çıkarılarak büyük boşluklar oluşturulan betonlardır. İri agregalar, birbirlerine 1-3 mm kalınlığında çimento hamuru ile bağlanır. Bu tür betonlar kumsuz betonlar olarak adlandırılır.

2.2. LATEKS (STİREN BÜTADIEN) KATKILAR

2.2.1. Lateks

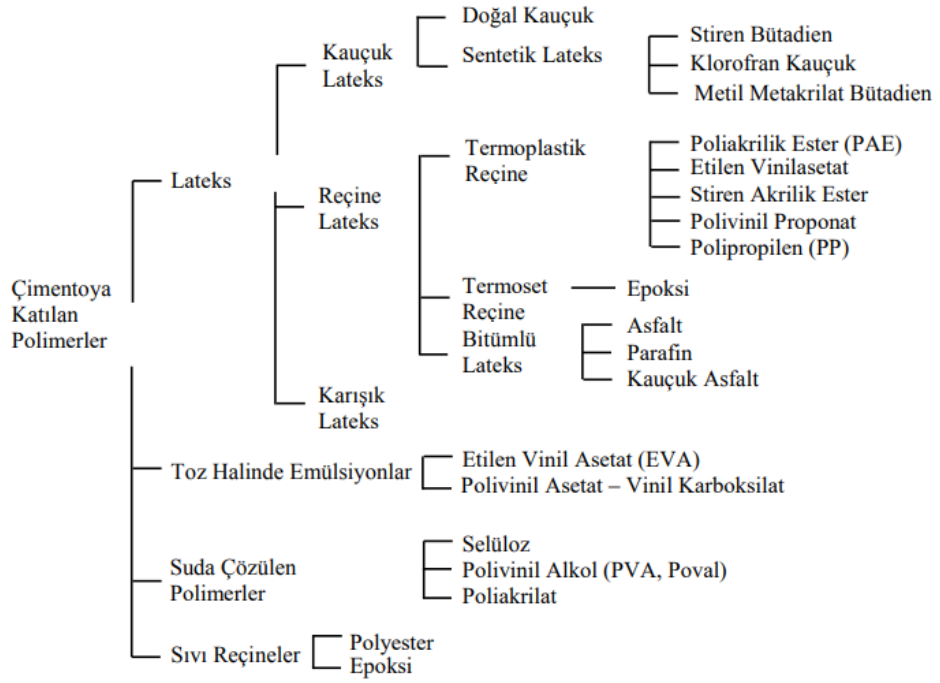
Lateks, doğadaki bir kısım bitkilerden sağlanan açık renkli süt özü olan bir hammaddedir. Aynı zamanda doğal olarak üretilen kauçuk üretilmesi için hammadde olarak lateks kullanılır. Lateks % 60 su, % 35 kauçuk ve % 5 protein'den oluşur. Lateks, ayrılmış organik polimer moleküllerinin % 45-50 oranında sıvı yüzey etken madde içinde dağılmıştır. (Baş, 2009). Lateks şu işlemler sonucunda üretilmektedir (Anonim, 2013):

1. Doğada yaklaşık 1000 farklı türde kauçuk ağacı vardır.

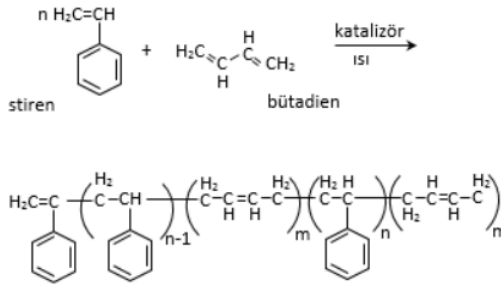
2. Kauçuk ağaçları 5-7 yaşındayken günlük ağaç başına ortalama 100 gram lateks üretebilir.
3. Doğal lateks ağacın gövdesinde bir çizikten akan sıvının toplanması yöntemiyle üretilir. Biriken lateks süzülür ve koruyucu katkı ilavesiyle depolanır.

Lateksler suda çözülen ve çözülmeyen olarak ikiye ayrılır (Ceran, 2008). Lateks üretiminde farklı yöntemler kullanılır. Ancak bunların tamamı, betonda katkı maddesi olarak kullanılamaz. Polimer katkılı harç ve betonlarda kullanılan lateksler Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

Stiren-bütadien kopolimerleri, Stiren ve bütadien polimerizasyonu ile üretilir (Şekil 2.11). Komonomer oranı kauçuksu veya plastik özellikleri etkiler. Stiren-bütadien kauçuğu (SBR) ağırlıkça %45'ten az stiren içerir. Stiren miktarı arttıkça plastik özellikler artar (Beşergil, 2010). SBR, yüksek sıcaklığa, yağ ve çözücülere karşı çok dirençlidir. Siyah karbon ve boşlukların doldurulması için kullanılan maddeler SBR'de özelliklerini fiziksel açıdan geliştirebilir. Sentetik kauçuklarda SBR yaygın olandır. SBR, % 25 stiren ve % 75 bütadien monomerlerinin polimerizasyonu ile üretilir. Bütadien kauçuk benzeri esneklik sağlarken, stiren malzemeye sertlik katarak dayanımı artırır (Erkek, 2007).



Şekil 2.10. Polimer katkısı kullanılan harç ve betonlarda lateks çeşitleri.



Şekil 2.11. Stiren-bütadien kopolimerleri.

2.2.2. Lateksin Kullanım Alanları

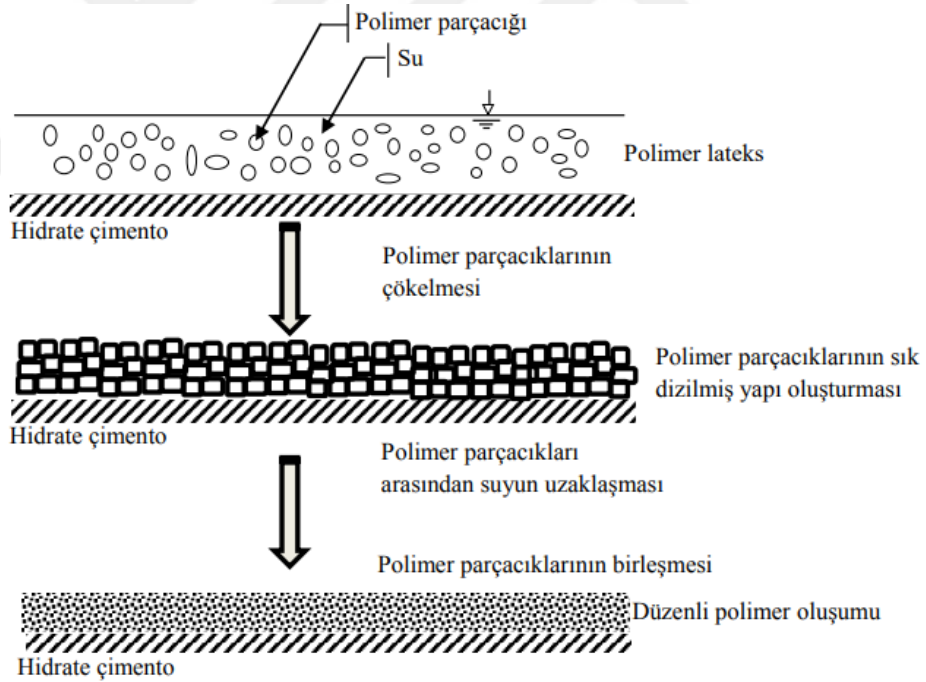
Lateks genel olarak aşağıdaki alanlarda kullanılmaktadır (Özturan, 2013):

1. Sıvadan önce serpmeye yapılırken,
2. Yapı hasarı tamiri için harç,
3. Duvar sıvaları,
4. İnşaatı şapı,
5. Islak zemin kaplaması yapıştırıcıları,
6. Yalıtım malzemelerinden önce astar olarak.

Lateks (stiren bütadien) akrilik dispersiyon esaslı, aderans artırıcı özelliği sayesinde geçirimsizliği artırmak için sıva ve şaplarda kullanılan bir katkı malzemesidir. Mikro boyutta polimerlerin suda emülsiyon haline getirilmesidir. Beton teknolojisinde, normal katkılarla üretilen betonlardan farkı yoktur. Sektörde en çok poliakrilat kopolimer bazlı elastomer kauçuk polimerleri ve SBR katkı maddeleri kullanılır (Özturan, 2013). Taze betonda katkı olarak kullanılan Lateks;

1. Polimer taneleri çimento hamurunda dağılımı homojendir.
2. Karışım içinde bulunan su, su emmenin ve terlemenin azalması ile, polimer molekülleri, hidratasyonu başlamış çimento parçacıkları üzerine çökme olur.

Kimyasal tepkimenin sonunda çökelen moleküller birleşip CSH'da kısa polimer kaplama (Şekil 2.12) meydana getirir (Özturan, 2013).



Şekil 2.12. Lateksin betonda çalışma mekanizması.

Özturan kılcal boşluk yüzeyinde ve matris arayüzünde polimer film tabakasının oluştuğunu, bu durumun betonun ara yüzeyinde güçlü bağ oluşturduğunu ve karışım suyunun kılcal boşluklarda kısıtlı olarak hareket ettiğini belirtmektedir (Özturan, 2013).

Lateks kullanılan betonların polimer tipi, uygulamada kullanılan alanlar ve taze haldeki basınç dayanımlarını gösteren Çizelge 2.3 aşağıda yer almaktadır.

Çizelge 2.3. Lateks katkısı ile üretilen betonlardaki polimerlerin fiziki özellikleri

Polimer	Tip	Uygulama Alanları	Islak Dayanım
Vinil asetat	Termoplastik	Aderans sağlayıcı	Düşük
Vinil asetat etilen	Termoplastik	Aderans sağlayıcı	Orta
Stiren butadiyen	Elastomerik	Beton-harç yüzey kaplama, onarım	Orta
Vinilidinklorit	Termoplastik	Alçı sıva, süs	İyi
Akrilik ester	Termoplastik	Kaplama, aderans sağlayıcı	Orta
Epoksi	Termoset	Kaplama	İyi

2.2.3. Lateksin Beton Özelliklerine Etkisi

Literatürde iki çeşit hafif agregaya SBR emdirildikten sonra, agregalarla beton üretilmiştir. Elde edilen betonların erken basınç dayanımı 39,7-51,9 MPa ve etüv kurusu BHA'ları 1460-1605 kg/m³ mertebesinde olmuştur. SBR lateksleri S/Ç ve su emmeyi azaltırken, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımını arttırmaktadır (Bideci, 2011).

Aktaş, lateks katkısının beton kıvamını yükseltirken ve terlemeyi azaltmada etkili olduğunu belirtmiştir. Yüksek oranda lateks kullanılması yüzeyde bir kabuk oluşturur, çok kohezif yüzeyin düzleştirilmesi zorlaşır. Çalışma sonucunda, lateks katkısının priz süresini normal betonlara oranla artırdığı tespit edilmiştir (Aktaş 2014).

Ceran'a (2008) göre, lateks katkılı betonların özellikleri şu şekilde özetlenmiştir: Lateks (stiren bütadien) üretime dahil olduğu andan itibaren güçlü ve kalıcı bir bağ oluşturarak aderansı artırır ve geçirimsizliği azaltır. Donma çözülme dayanımı yüksek olan lateks zararlı çözeltilere (yağ, su ve tuz vb.) karşı direnci artırma özelliğine sahiptir. Betonun çekme dayanımını artırarak geniş alanlarda gerilmeleri azaltır. Rötreyi azaltıcı özelliği nedeniyle çatlak miktarını ciddi seviyede azaltır.

Kıvam: Lateks kullanılan beton ve harçların kullanılmayanlara oranla lateks polimerlerinin yuvarlak yapıları nedeniyle daha işlenebilir haldedir. Beton içindeki hava ve emülgatör oranı işlenebilirliğin artmasında etkilidir. Sabit kıvamda Lateks

kullanılarak su miktarı azaltılabilir. Böylece dayanım artarken, rötrede azalma meydana gelir. Lateksin etki süresi süper akışkanlaştırıcı katkı ile kullanıldığında 3 katına çıkmaktadır.

Hava Sürüklenme: Sürfaktanın fazla olması nedeniyle lateks katkılı betonlarda fazla hava sürüklenir ve bu nedenle basınç dayanımında azalma olabilir. Köpük kesici diye adlandırılan kimyasal katkıları sayesinde bu durum engellenebilir. Hava ölçme cihazı kullanılarak yapılan testler sonucunda lateks katkı kullanılan betonlarda hava miktarı yaklaşık %2'nin altında olması normal betonlarla aynı özellikte olduğunu göstermektedir.

Kıvam Koruma: Geleneksel katkılı betonlarda kıvam yüzey suyunun azalması nedeniyle korunmamaktadır. Kıvam değeri sıcaklık, nem ve rüzgâr durumuna göre değişkenlik gösterirken, lateks kullanılan betonların karışım işlemi tamamlandıktan yaklaşık 30dk içinde sona erer.

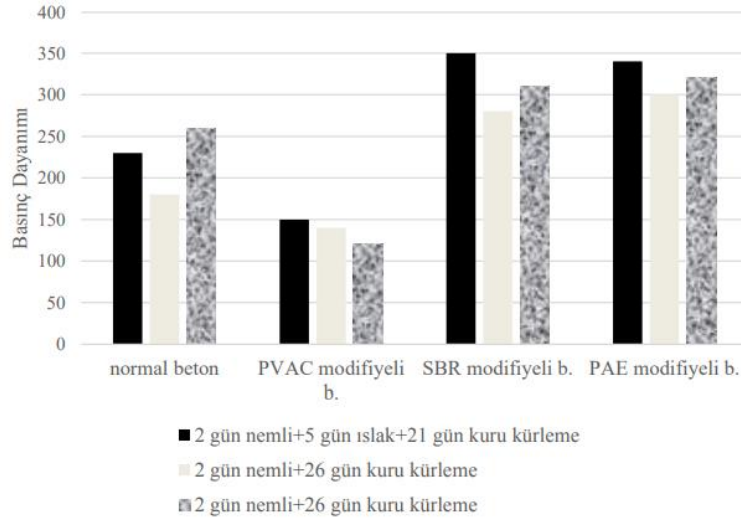
Su Tutma: Lateksin suyu tutuculuk özelliği Polimer miktarının çimento miktarına oranına bağlıdır. Beton iç yapısındaki boşlukların lateks ile dolması ile su hapsolür buharlaşma engellenmiş olur. Böylelikle boşluklarda bulunan karışım suyu çimento hidrasyon sürecini bitirmesini sağlamış olur ve dayanım artar. Normal betonlarda matris bağının az olmasının nedeni buharlaşmayla hidrasyon tam olarak gerçekleşmemesidir.

Segregasyon ve Priz Alma: Lateksin segregasyona ve priz almaya karşı daha etkili olmasının nedeni, lateksin su tutması, emülgatörlerin su kesme ve betondaki hava içeriğini artırmasındandır (Ceran, 2008). Çimento harçlarında lateksin yarmada çekme dayanımını artırırken, basınca bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni polimer yapının çekmeye karşı daha dayanıklı ve çekim kuvvetinin yüksek olmasıdır. Basınç dayanımı, karışıma giren hammaddelerin miktarına, tipine, kür durumuna ve hava içeriğine bağlıdır (Ceran, 2008).

Betonda kullanılan lateksin dayanımı arttıkça betonun da dayanımı artmaktadır. Lateks yapısında bulunan plastikleştirren moleküller nedeniyle basınç dayanımı düşerken monomer moleküller sayesinde basınç dayanımı artmaktadır. Lateks içinde

bulunan sürfaktanın miktarı basınç dayanımını artırmaktadır. Ancak kullanılan sürfaktanın fazla olması ise basınç dayanımını azaltır. Dayanımın azalmasının sebebi Sürfaktan hidratasyon üzerinde azaltıcı bir etkisinin olması ve hava içeriğini artırması nedeniyledir. Ceran, yaptığı çalışmada %5 ten fazla ve %30 dan az sürfaktanın daha verimli olduğunu tespit etmiştir. Köpüklenme azaltıcı ajanların latekste fazla olması da basınç dayanımını artırmaktadır (Ceran, 2008).

Lateksli beton ve harçlarda kullanılan polimerin karışım oranı da dayanımı etkilemektedir. Ceran çalışmasında uygun polimer-çimento oranını % 20-30 olarak belirtmiştir. Karışımda lateksin daha fazla kullanılması durumunda mikro strüktürde boşluklar ve kopmalar oluşmakta ve dayanım azalmaktadır. Beton karışımında lateksin kullanımının %5'den az olması basınç dayanımına hiç etki etmemesine sebep olmakta ve uygun oran % 5 ile % 20 arasında seçilmelidir. Ancak önemli olan bir noktada doğru kür işleminin yapılmasıdır. Lateks polimeri ile bağlayıcı oranın arttıkça su miktarı yaklaşık %30 civarında azaltarak basınç dayanımını artırmaktadır. Doğru kürlemenin basınç dayanımındaki değişim Şekil 2.13'de gösterilmiştir (Ceran, 2008).



Şekil 2.13. Doğru kürleme ile basınç dayanımı arasındaki ilişki (Ceran, 2008).

2.3. LİTERATÜR TARAMASI

Çam (2019), ince agrega yerine granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC) beton özelliklerine etkisini araştırmıştır. Üretilen karışımlarda GYFC agregası miktarının

artmasıyla işlenebilirlik azalmıştır. Ayrıca GYFC beton basınç dayanımlarını azaltmıştır. GYFC betonun birim ağırlıklarını düşürerek hafif beton üretilmesini sağlamıştır.

Kale (2020), Pomza agregası kullanılarak üretilen hafif beton özelliklerinin %1, %3 ve %5 oranlarında uçucu külü çimento ile ikame ederek iyileştirilmesi üzerine bir çalışma yapmış, üretilen bu hafif betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmış ve mikro yapısal analizi yapmıştır. Çalışma sonucunda; uçucu kül miktarının artması ile numunenin fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Bakırhan (2019), Bitlis pomzası ve perlit kullanılarak üretilen hafif beton özelliklerinin karşılaştırmasını yapmıştır. Buna göre perlit kullanılarak üretilen hafif betonlar, pomza kullanılanlara oranla ısı yalıtımını artırırken, buna karşın mukavemetlerinin ise düşük olduğunu tespit etmiştir.

Güneş (2019), Genleştirilmiş kil agregası ile kireçtaşı agregasını hacimce %40 oranında yer değiştirerek Dmax 16 ve 22,4mm olan taşıyıcı hafif beton üreterek geleneksel betonla ağırlık ve basınç dayanımlarını karşılaştırmıştır. Küçük genleştirilmiş kil agregalarının puzolonik özelliklerinin de katkısı ile dayanımları daha yüksek çıkmıştır. Buna karşın büyük genleştirilmiş kil agregası kullanılan hafif betonların basınç dayanımları ortalama %56,55 düştüğü tespit edilmiştir.

Koman (2015), Soğuk bağlama yöntemiyle prizmatik agregalar üreterek 1900-2000kg/m³ yoğunluklu 28 ila 32 MPa basınç dayanımlı taşıyıcı hafif beton yapmış ve özgül ağırlık ile su emme oranlarını incelemiştir. Sonuç olarak kalsiyum içeren uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun çimento yerine kullanılmasının dayanımı düşürmediğini tespit etmiştir.

Akçaözoğlu (2008), 1-2 mm ve karışık (0-4 mm) olmak üzere iki farklı Polieitilen Tereftalat (PET) şişe kırıkları ile yüksek fırın cürufu ve uçucu kül de, çimentoyla ağırlıkça %50 oranında ikame ederek PET-bağlayıcı (P/B) oranları 0.50 ve 0.60 hafif beton üretmiştir. Çalışmada basınç dayanımlarının düşmediği, eğilme dayanımlarının ise bir miktar düştüğü ve rötreyi azalttığı tespit edilerek bu atıkların agrega olarak kullanılmasının deprem açısından dayanımı yüksek binaların üretiminde

kullanılabileceğini tespit etmiştir. Bunun dışında cürufllu numunelerin, uçucu küllü olanlara göre daha yüksek basınç ve eğilme dayanımları gösterdiği ve S/B oranının 0.50'den 0.45'e düşmesi, harçların dayanım, rötre ve karbonatlaşma gibi özelliklerini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Atalar (2006), betonda %5-40 arasında değişen oranlarda agrega yerine kayısı çekirdeği kabuğu eklenmiştir. Kayısı çekirdeği kabuğu ilavesinin betonun basınç dayanımında %7.5-57 oranında azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. SEM analiz sonuçları, kayısı çekirdeği kabukları ile çimento arasındaki bağ kuvvetinin zayıf olduğunu göstermiştir.

Gökçe (2010), ham perlit agregalı ve genleştirilmiş perlit agregalı hafif betonlar üretmek için su emme, basınç ve birim hacim ağırlık deneyleri uygulamıştır. Ham perlit agregası ile ürettiği hafif betonda basınç dayanımları 10 – 37.9 MPa aralığında olduğu ölçülmüştür. Betonların BHA değerleri ise 1.779 ile 1.890 kg/dm³ arasında hafif beton sınırı içerisinde bulunmuştur. Su emme deneyi verilerinin oranları ise % 9.3-13.2 arasında değişmektedir. Genleştirilmiş perlit agregasıyla üretilen hafif beton numunelerde basınç dayanımı 34.8 – 40.8 MPa aralığında çıkmıştır. Betonların BHA'ları 1.841 ile 1.903 kg/dm³ arasında hafif beton sınırı içerisinde bulunmuştur. Su emme oranları ise % 7.5 -10.1 arasında değişmektedir. Hafif betonların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde farklı agrega karışımı ve genleştirilmiş perlit agregası kullanımının etkili olduğu belirlenmiştir.

Aksoy (1995), Elazığ yöresindeki volkanik cüruf agregasını kullanarak hafif beton üretmiş ve bu betonların basınç dayanımı, durabilitesi ve ekonomik olarak analiz etmiştir. Bu çalışmada düşük S/Ç oranına sahip taşıyıcı betonların beklenen dayanımı sağladıkları görülmüştür. Ekonomik olarak volkanik cüruf hafif betonunun diğer taşıyıcı hafif beton çeşitleri yanında oldukça ucuz olduğu hatta neredeyse fiyatının normal betona eşit olduğu görülür.

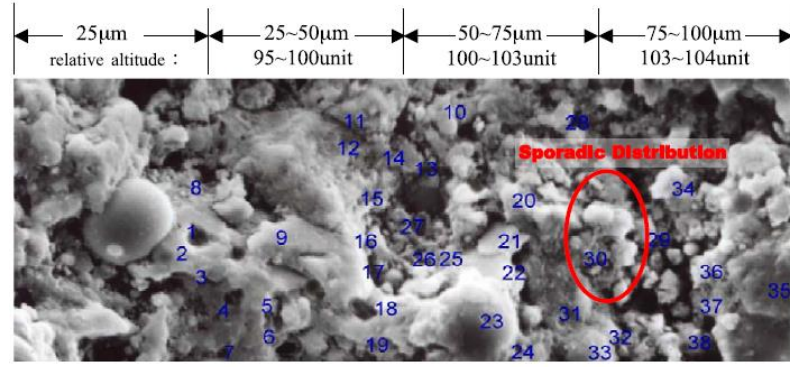
Gül (2018), hafif beton üretiminde agrega olarak plastik ve doğal kum ile hafif beton üretimi gerçekleştirmiştir. Deneylerinde birim ağırlığı 1150-2100 kg/m³ arasında hafif betonların su/çimento oranını 0,5 ve 0,3 olarak belirlemiştir. PET katkılı hafif

betonların küp basınç dayanımları, hacimce PET oranına bağlı olarak (%0, %10, %20, %30, %40) sırasıyla 29.10 MPa, 17.03 MPa 12.08 MPa, 10.84 MPa, 6.25 MPa tespit edilmiştir. Bu oranlar akışkanlaştırıcı ve PET kullanılarak hazırlanan betonlar için 38.21 MPa, 26.47MPa, 26.42 MPa, 20.51 MPa, 16.94MPa olarak tespit edilmiştir.

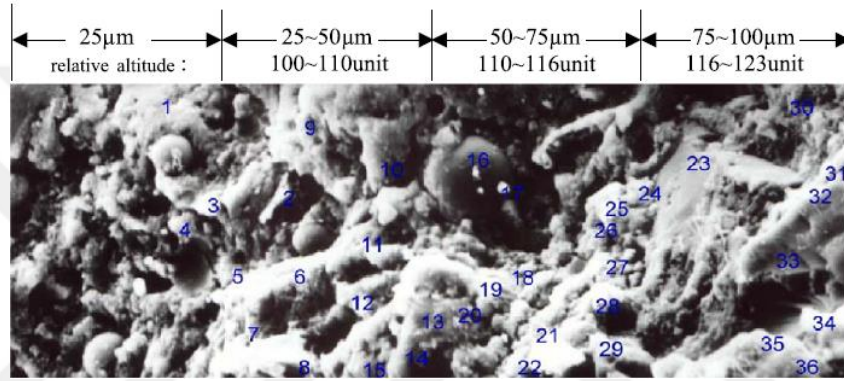
Gülengül (2020), çalışmalarında hacimce farklı oranlarda geliştirilmiş cam ve doğal kum kullanarak hafif beton üretmiştir. Genleştirilmiş cam %5-%20 oranları arasında belirlemiştir. Yaptığı analiz ve araştırmaları sonucu geliştirilmiş camın hafif beton agregası olarak kullanılmasında bir sakınca olmadığını ispatlamış ve üretimlerde kullanılabilir olmasını desteklemiştir.

Liao ve diğerleri (2004), 56 günlük farklı yaşlardaki yüksek performanslı betonun arayüz geçiş bölgesinin (ITZ) davranışını incelemiştir. 1 günlük betonlarda, Agreganın kenarında çok fazla susuz çimento parçacıkları mevcuttur. Kürlenme yaşının artmasıyla hidrasyon ürünleri C-S-H hızlı bir şekilde artar. Hidrasyon C-S-H ürünleri iğne benzeri bir yapıya sahiptir ve uçucu kül henüz aktif olmamıştır. 56 günlük betonda gözenek boyutu azalmış ve kristal yapı çok daha yoğundur. Ağ tipi C-S-H jeli yapısı süreklidir ve uçucu külün tane boyutunun azaldığı görülmektedir. Agreganın çevresinin yapısı gevşek olmasına rağmen, önceki yaşların yapısına göre arayüz yapısı daha yoğun ve daha sıkıdır.

Korouzhdeh ve diğerleri (2022) çimento inceliği ve su/çimento oranının çimento harcının arayüz geçiş bölgesinin (ITZ) özelliklerini fazla miktarda etkilediğini tespit etmişlerdir. ITZ mikro yapısının özelliğini derinlemesine değerlendirmek için, 1000X büyütme ile çevresel SEM ve 0.18µm'lik fiziksel çözünürlükte agregaların etrafındaki bölgelerden rastgele görüntüler alınmıştır. Çimento dayanım sınıfları 32.5 MPa, 42.5 MPa, 52.5 MPa ve incelik değerleri sırasıyla 3000, 3300, 3700 (cm²/g) olan çimentolarla yapılan çalışma sonucunda çimento dayanımları ve inceliği arttığında arayüz geçiş bölgesi yapısını iyileştirdiği görülmüştür. Yüksek dayanım sınıfı ve düşük su/çimento (W/C) oranı ile daha iyi bir hidrasyon sağlandığı, daha ince ITZ oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.14. 1 gün kürlenmiş betonun arayüz bölgesi (Liao ve diğerleri, 2004).



Şekil 2.15. 56 gün kürlenmiş betonun arayüz bölgesi (Liao ve diğerleri, 2004).

Gao ve diğerleri, (2022), Birçok araştırmacı ITZ'yi iyileştirip ilgili betonun mekanik özellikleri, geçirimsizliği ve dayanıklılığı geliştirmek için farklı yöntemler denemiştir. 1970'lerde, araştırmacılar ITZ'yi iyileştirmek için çelik lifler ve sentetik lifler gibi dolgular kullandılar. Ancak bu lifler betonun mukavemetini güçlendirdiği gibi aynı zamanda beton akışkanlığını etkilemektedir.

Türkmenoğlu (2017), Hafif agrega ve endüstriyel atık katkıları kullanılarak kendiliğinden yerleşen hafif betonlar (KYHB) üretilen taze ve sertleşmiş haldeki beton özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada ağırlıkça çimento %10, %20 ve %30 oranında endüstriyel atıklar ile ikame edilerek kullanılmıştır. Üretilen betonlarda endüstriyel atıkların mikroyapı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacı ile sertleşmiş betonlar üzerinde Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), incelemeler yapılmıştır. SEM görüntülerinde betonların genel olarak gözenekli bir camsı yapıya sahip olduğu, içinde portlandit etrenjit, kalsit mineralleri ve CSH jeli bulunduğu gözlemlenmiştir. Katkısız betonun küçük portlandit minerallere sahip sıkı bir yapıda ve kristallerin düzenli

dağılım gösterdiği gözlenmiştir. Mermer tozu katkı miktarı arttıkça yapıda filler etki göstermiş, boşluk yapısını ve poroziteyi azaltmıştır. Bilindiği üzere mermer tozunun puzolonik bir özelliği olmadığından betonun dayanımına olumlu yada olumsuz bir katkısının varlığı anlaşılammaktadır. Hidratasyon reaksiyonlarının hızla devam ettiği oluşan portlandit ve C-S-H'den anlaşılmaktadır.

Uddina vd. (2017) yaptığı çalışmada, maksimum agrega boyutu (12,5 mm, 19,0 mm, 25,0 mm, 37,5 mm ve 50,0 mm) hacim oranı 0.40 ve 0.45 tuğla agregası ve farklı kumlarla yapılan 0.45, 0.50 ve 0.55 W/C oranı ve çimento içeriği 375 kg/m³ ve 400 kg/m³ üretilen betonlardan alınan numunelerin basınç dayanımı, gerilme-gerinim eğrisi, ayrılma çekme dayanımı ve Young modülü açısından etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, daha yüksek çimento içeriği (400 kg/m³) için agregalarla yapılan betonun daha fazla basınç dayanımı sağladığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, 375 kg/m³ çimento içeriği ve 0,45 W/C oranı için, maksimum agrega boyutunun 37,5 mm'ye kadar artması ile s/a oranının 0,40'tan 0,45'e yükselmesiyle basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir (Uddina vd. 2017).

Ge P. vd (2021) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş tuğla agregalı beton veya hafif agregalı beton için uygun olan yeni bir karışım oranı tasarım yöntemi önermiştir. Bu testte, geri dönüştürülmüş tuğla agregası hacim fraksiyonu, kum hacim fraksiyonu ve su/çimento oranı dikkate alınmıştır. geri dönüştürülmüş tuğla agreganın hacim fraksiyonu %44 ile %47 arasında olduğunda ve geri dönüştürülmüş tuğla agrega ile kumun toplam hacim fraksiyonu yaklaşık %70 olduğunda, Basınç dayanımı maksimuma ulaşmıştır; geri dönüştürülmüş tuğla agreganın hacim oranı %40 ile %50 arasında olduğunda, iskelet katkı mukavemeti çimento harcınınkinden daha büyüktür. Kum/çimento oranı yaklaşık 0.35 ile 2.1 arasında olduğunda, kum iskeleti katkı mukavemeti daha yüksektir. geri dönüştürülmüş tuğla agrega hacim oranı %40 ile %50 arasında olduğunda, kaplanmış iri agrega üzerindeki gerçek ortalama macun kalınlığı 10,04 mm ile 5,86 mm arasındadır.

Wonga C.L. vd (2018), yaptıkları çalışmada tuğla atıklarının potansiyel parsiyel çimento ve agrega ikame malzemesi olarak kullanımı özetlenmiş, betonun mekanik dayanımları açısından performansı ve dayanıklılıkla ilgili bazı özellikleri tartışılmıştır.

Geri dönüştürülmüş tuğlanın en uygun kullanımının tuğla tozu şeklinde olduğu, bu sayede %20'ye kadar çimento değişiminin, tuğla tozu parçacıklarının potansiyel puzolanik reaktivitesi nedeniyle betonun mukavemetini ve bazı dayanıklılık özelliklerini artırabileceği bulunmuştur.

Houa S. vd. (2021), yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş tuğla agregasındaki nem durumu ve tuğla içeriğinin taze betonun reolojik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Geri dönüştürülmüş tuğla agregasının normal betonla karşılaştırıldığında reolojik özelliklerin zaman değişkenli özellikleri üzerinde daha fazla etki yaptığını göstermiştir. Hava kuruması koşullarında geri dönüştürülmüş tuğla agregasındaki ile yapılan betonların reolojik özelliklerinin değişim oranı, fırında kuru veya doymuş yüzey kuruması koşullarında geri dönüştürülmüş tuğla agregası betonu ile yapılandırılan daha düşük olduğu gözlenmiştir. Taze geri dönüştürülmüş tuğla agregası betonunun hem çökme hem de çökme akışına ilişkin ampirik test sonuçları, reolojik test sonuçları tarafından hesaplanan karşılık gelen dinamik akma gerilimi ile iyi bir şekilde uyumludur.

Miguel C.S. vd. (2018), yaptıkları çalışmada, endüstriyel tuğla atıklarından geri dönüştürülmüş seramik iri agregalarla yapılan betonun mekanik performansını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Doğal agrega yerine %0, %10, %30, %50 ve %75 mutlak hacim yüzdelerinde geri dönüştürülmüş agrega ikamesiyle aynı işlenebilirlik ve agrega boyut derecelendirmesi betonlar üretmişlerdir. Sertleşmiş betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarılmada çekme dayanımı ve yoğunlukları değerlendirilmiştir. Geri dönüşüm agregası kullanımının artmasıyla betonun mekanik performansının azalmasına rağmen, kısmen değiştirilmesinin uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Derrick J. vd. (2016), yaptıkları çalışmada %20, %25, %35, %50, %65, %75, %80 ve %100 olmak üzere üç farklı atık seramik karo malzemesi ile betonda iri agrega değiştirme şeması incelenmiştir. Sonuçlar, atık seramiği, mekanik özelliklerde minimum değişikliklerle olası uygulanabilir bir doğal iri agrega ikame malzemesi olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

Zahra Keshavarz ve Davood Mostofinejad (2019), yaptıkları çalışmada betondaki iri agregaların yerine iki tür porselen ve sıradan kırmızı seramik kullanılmıştır. Basınç dayanımı, çekme ve eğilme mukavemetlerinin yanı sıra su emme özelliklerini test etmek için 65 adet numune hazırlanmıştır. Sonuçta porselen karo atığının beton basınç dayanımını %41'e kadar artırabildiği, kırmızı seramik atığın ise %29'a kadar artırdığını tespit etmişlerdir. Ek olarak, porselenin gerilme ve eğilme mukavemetlerini sırasıyla %41 ve %67'ye kadar artırabildiği, ayrıca porselenin beton su emilimini %54'e kadar artırırken, kırmızı seramik atığının %91 oranında artırdığını tespit etmişlerdir.

Amin M. vd. (2020), yaptıkları çalışmada iri agrega olarak seramik atıklar kullanılarak hazırlanan ultra yüksek performanslı betonu (UYPB) iyileştirmek için silis dumanı (SD) ve metakaolinin (MK) çimento ile değiştirilmesinin etkinliğini araştırmışlardır. %10, %20 ve %30 oranlarında SD veya MK içeren on bir UYPB karışımı tasarlanmıştır. Bu karışımların taze, fiziksel, mekanik ve mikroyapı özellikleri değerlendirilmiş ve test sonuçları, çimentonun SD veya MK ile değiştirilmesinin UYPB'nun mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirebileceğini göstermiştir.

Bommisettya J. vd. (2019) yaptıkları çalışmada kırılmış atık seramik karoları, betonda %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 ikame ile doğal iri agregaların yerine kullanmışlardır. Sonuçlar analiz edildikten sonra, su/çimento oranı 0,5 olan beton karışımında kullanılacak atık seramik karoların optimum değeri yaklaşık %20 olarak belirlenmiştir. Bulgular, atık seramik karo kullanımının betonun özelliklerinin artmasına yol açtığını ortaya koymuştur.

Hassan M. Magbool (2022) yaptığı çalışmada geri dönüştürülmüş atık seramik agreganın (GDSA) betonda kullanımı ve işlenebilirlik, mekanik özellikler ve dayanıklılık gibi beton özellikleri üzerindeki etkisi hakkında yayınlanmış çalışmaların eksiksiz bir incelemesini sağlamaktır. Ayrıca araştırmada, taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen mikro yapısı ile ilgili bilgileri analiz ederek GDSA'nın dayanıklılık üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Bulgular, GDSA'nın kısmi ikame olarak kullanılmasının işlenebilirliği azalttığını, ancak basınç, eğilme ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir.

BÖLÜM 3

MALZEME VE METOT

3.1. MALZEME

3.1.1. Çimento

Numune üretiminde Nuh Çimento'dan temin edilen CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Kimyasal analize göre Bogue formülleri kullanılarak (TÇMB, Türk Çimento Kalite Formülleri, 2022) gerçekleştirilmiş hesaplardan çimento bileşenleri C_3S =%56,83 (%63,59 (Mehta & Monteiro, 2002), C_2S =%14,30 (%9,2 (Mehta & Monteiro, 2002), C_3A =%5,51 ve C_4AF =%11,59 olarak hesaplanmıştır. Bu bileşen oranlarına göre deneysel çalışmalarda kullanılan çimento ASTM'e göre Tip 3'e benzer bir yapıda olup erken dayanımı yüksek çimento sınıfındadır.

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal özellikleri

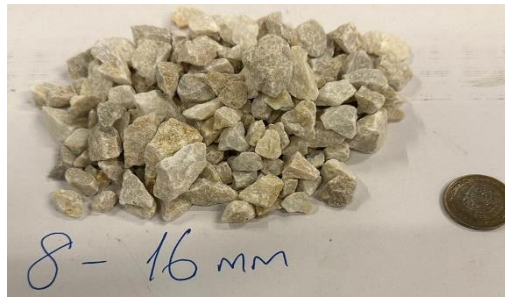
Kimyasal Özellikler	%	Fiziksel/Mekanik Özellikler	
SiO ₂	19,94	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,15
Al ₂ O ₃	4,51	Kıvam (Su/Çimento, %)	29,0
Fe ₂ O ₃	3,81	Priz Başlangıcı (dk)	110
CaO	63,46	Priz Sonu (dk)	180
MgO	1,56	Hacim Sabitliği (mm)	1
SO ₃	2,62	Özgül Yüzey (Blaine, cm ² /g)	3883
Çözünmeyen Kalıntı	0,40	90 mm elek bakiye %	0,2
Kızdırma Kaybı	2,91	1 gün Basınç Dayanım (MPa)	18,8
Serbest Kireç	1,65	2 gün Basınç Dayanım (MPa)	27,5
Toplam Alkali Na ₂ O+0,658 K ₂ O	0,49	7 gün Basınç Dayanım (MPa)	41,9
Klorür	0,0162	28 gün Basınç Dayanım (MPa)	56,1

3.1.2. Agregas

Deneysel çalışmalarda 3 tip agregas kullanılmıştır. Deneysel gruplarından her ikisinde agregas olarak 8 – 16 mm elek aralığında kireçtaşı, 0 – 8 mm elek aralığında bir grupta tuğla atıkları diğers grupta karo seramik atıkları kullanılmıştır. Agregalara ilişkin bilgiler başlıklar altında detaylandırılmıştır.

3.1.2.1. Kireçtaşı Agregası

Hafif betonların üretiminde kullanılan kireçtaşı agregaları Şekil 3.1’de gösterildiği gibi Bursa ili sınırlarında Orhangazi ilçesindeki kireçtaşı ocağından temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kireçtaşı agregası 8 – 16 mm elek boyutlarında olup; MTA mineralojik raporlarına göre yüksek saflıkta CaCO_3 , az miktarda kuvars yapılar içermektedir. Ayrıca makroskobik yapıda çok açık gri renkli ve masif dokulu özellikte, mikroskobik yapıda kırıntılı, peloidal dokulu ve homojen dağılımlı karbonat grubu mineraller (kalsit), pellet, biyoklastlar, ayrıca heterojen dağılımlı intrakastlar, agregat taneler ve oolitlerden oluşmaktadır. Mikroskobik tanımlamada alt zemin genel bağlayıcı olarak feldsparit kalsitten oluşmakta ve bazı alanlarda az oranda mikrit de eşlik etmektedir. Çökelmeye bağlı dokusal özellikleri dikkate alındığında Embry ve Klovan (1971) sınıflamasına göre “Tane taşı”, Folk (1962)’un basit kireçtaşı sınıflamasına göre ise “biyo-feldsparit” olarak da isimlendirilebilir. Kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’de verilmiştir. Mineralojik ve petrografik analizler MTA laboratuvarlarında, kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler THBB laboratuvarlarında ilgili standartlar dikkate alınarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Kireçtaşı 8 – 16 mm.

Çizelge 3.2. Kireçtaşı agregasının kimyasal analiz raporu

Analizler	Deney Standardı	Sonuç
Asitte çözünebilen sülfat içeriği (%SO ₃)	TS EN 1744-1	% 0,09
Toplam Kükürt İçeriği (%S)	TS EN 1744-1	% 0,03
Hafif organik kirleticiler	TS EN 1744-1	<% 0,01
Suda çözünebilir klorür tuzları (%Cl ⁻)	TS EN 1744-1	<% 0,001
Magnezyum sülfat deneyi	TS EN 1367-2	% 1

Çizelge 3.3. Tüm agregaların fiziksel ve mekanik analiz raporu

	Standart	Kireçtaşı	Tuğla Atıkları	Seramik atıkları
Tane Yoğunluğu (DKY) (g/cm ³)	TS EN 1097-6	2,72	2,09	2,11
Su Emme (%)	TS EN 1097-6	0,3	19,9	9,1
Yassılık Endeksi (%)	TS EN 933-3	12	15	8
Los Angeles (%)	TS EN 1097-2	25	97	91
Gevşek Yığın Yoğunluğu (t/m ³)	TS EN 1097-3	1,43	0,65	0,71

3.1.2.2. Tuğla Atıkları

Hafif betonların üretiminde kullanılan tuğla atıkları Afyon ili Işıklar ilçesinde bulunan tuğla fabrikalarından Şekil 3.2’de gösterildiği gibi temin edilmiştir. Bu atıkların büyük çoğunluğu yatay ve düşey delikli kil tuğlalardan oluşmaktadır. Kil tuğlalar genellikle 850 – 950 oC sıcaklıkta illit killeri ile üretilirler. Bunun yanı sıra az miktarda silis kumu, kireç ve alçı gibi bileşenlere de sahiptir (Tuğla - Kiremit Üretimi, Sektörel uygulama raporu, 2020).



Şekil 3.2. Tuğla atıklarının küçültülmeden önceki hali.

Tuğla atıkları temin edildikten sonra Şekil 3.3'te gösterildiği gibi laboratuvar tipi bir kırıcı kullanılarak 0 – 8 mm boyutlara küçültülmüştür. Ardından 0,25, 0,5, 1, 2, 4 mm ve 8 mm boyutlardaki eleklerden elenerek her bir elek altı malzeme farklı kaplarda depolanmıştır. Laboratuvar koşullarında (22±2 oC ve 50±5 R.H.) numune hazırlığı sürecine kadar bekletilmiştir. Yatay düşey delikli tuğlaların teknik özellikleri Çizelge 3.4'te, üretilen betonlarda agrega olarak kullanılan tuğla atıklarının fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Yatay delikli tuğlaların fiziksel ve mekanik analiz raporu (Erbağ Tuğla)

Ağırlık (kg)	7,5
Boyut (cm)	25 x 25 x 20
Basınç Dayanımı (N/mm ²)	2,5
Metrekare İçin Gereken Tuğla Sayısı (Adet)	15 – 20
Isı İletkenliği (W/mK)	0,32



Şekil 3.3. Tuğla atıklarının laboratuvar tipi kırıcı ile küçültüldükten sonra farklı eleklerde ayrıştırılmış görselleri.

3.1.2.3. Seramik Atıkları

Hafif betonların üretiminde kullanılan seramik atıkları Bilecik ili Bozüyük ilçesinde bulunan seramik fabrikalarından temin edilmiştir (Şekil 3.4). Bu atıkların büyük çoğunluğu karo seramik atıklarından oluşmaktadır. Seramik, inorganik bileşiklerden Al_2O_3 , SiO_2 , CaO gibi bileşenlerden oluşan ham maddesi kaolin killeri olan $1200\text{ }^{\circ}C$ sıcaklığa kadar pişirildikten sonra SiO_2 ile sır uygulanan sert, kırılğan ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerdir (Seramik Üretimi, Sektörel Uygulama Kılavuzu, 2020).



Şekil 3.4. Seramik atıklarının küçültülmeden önceki hali.

Seramik atıkları temin edildikten sonra Şekil 3.5'te gösterildiği gibi laboratuvar tipi bir kırıcı kullanılarak $0 - 8\text{ mm}$ boyutlara küçültülmüştür. Ardından $0,25$, $0,5$, 1 , 2 , 4 mm ve 8 mm boyutlardaki eleklerden elenerek her bir elek altı malzeme farklı kaplarda depolanmıştır. Laboratuvar koşullarında ($22\pm 2\text{ }^{\circ}C$ ve $50\pm 5\text{ R.H.}$) numune hazırlığı sürecine kadar bekletilmiştir. Seramik atıklarının fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Seramik atıklarının laboratuvar tipi kırıcı ile küçültüldükten sonra farklı eleklerde ayrıştırılmış görselleri.

3.1.3. Su

Betonların üretiminde kullanılan beton karma suyu İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) tarafından tedarik edilen şehir şebeke suyudur. Su analizi sonuçları Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Beton karma suyu analiz raporu (İSKİ)

Analizler	Deney Standardı	Sonuç
Klorür	TS EN 1008	51,9 mg/L
Asitler (pH)	TS EN 1008	6,9
Sülfat	TS EN 1008	19,5 mg/L

3.1.4. Katkılar

Betonların üretiminde kimyasal katkı olarak BASF firmasından temin edilen Master Cast 125 ve Master Glenium ACE 450 kullanılmıştır. Master Cast 125, dispersiyon reçine esaslı katkı malzemesi olup, sıva ve şaplar üzerinde yapışmayı artırıp ve su işleme derinliğini azaltmakta ve sektörde bu tanımla satışı yapılmaktadır. Ancak

malzeme bir polimer türü olan ve modifiye edilmiş betonlarda en çok kullanılmakta olan lateks (stiren bütadien) olarak teknik isimle tanınmaktadır. Master Glenium ACE 450 is yüksek oranda su azaltıcı veya süperakışkanlaştırıcı beton katkısı olarak tanımlanmaktadır. İçerik olarak polikarboksi eter olarak kimyasal formüle sahiptir. Çözünmüş yaklaşık %36 katı madde içermektedir (Şekil 3.6). Kullanılan katkılara ait teknik bilgileri Çizelge 3.6’da verilmiştir.



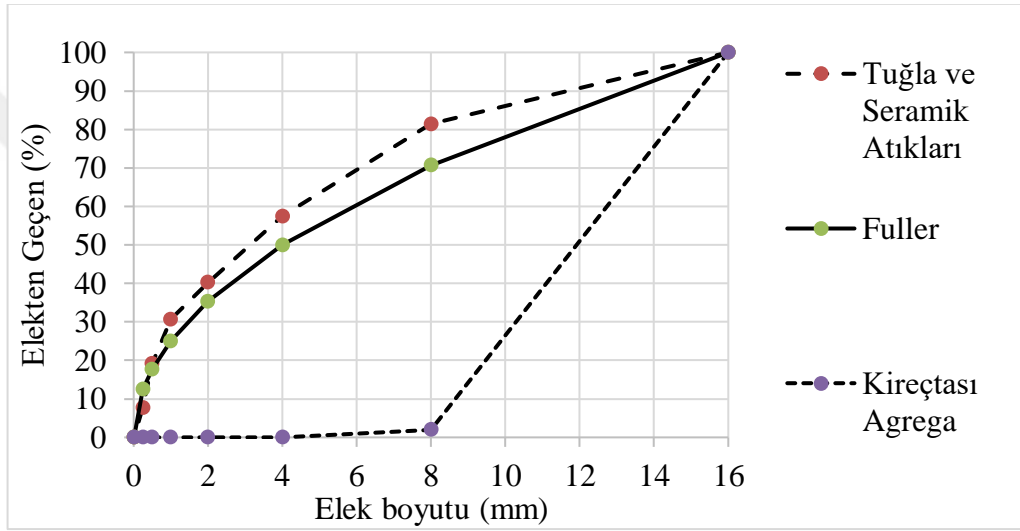
Şekil 3.6. Katkılara ait bir resim.

Çizelge 3.6. Kimyasal katkı teknik özellikleri

Analizler	Master Cast 125	Master Glenium ACE 450
Malzemenin Yapısı	Modifiye edilmiş akrilik dispersiyon	Polikarboksilik Eter Esaslı
Görünüm	Beyaz	Kahverengi - Sıvı
Özgül ağırlık (20°C’de)	1,08 kg/L	1,069 – 1,109 kg/L
pH-değeri	7 – 9	5 – 7
Alkali içeriği (%)	-	≤ 3,00
Klor iyon içeriği (%)	-	≤ 0,10

3.2. YÖNTEM

Deneysel çalışmaları gerçekleştirmek için beton harç numunelerinin üretimlerinde karışım tasarımı farklı 8 tip beton tasarımı planlanmıştır. Bu plan dahilinde 0.5 s/ç oranına sahip, 350 kg/m³ ve 450 kg/m³ çimento dozajlı, stiren bütadien (Latex) katkılı ve katkısız, tuğla (B serisi) ve seramik (C serisi) atıkları agregalarından oluşan beton harçlarının karışım tasarımları Çizelge 3.7’de verilmiştir. Çizelge 3.7’de B serisi Tuğla atıklarının, C serisi Seramik atıklarının agrega olarak kullanıldığı betonları sembolize etmektedir. Agrega karışımları Fuller B eğrisi (Şekil 3.7) esas alınarak belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Betonda kullanılan agregaların granülometri eğrileri.

Çizelge 3.7. Hafif betonların üretiminde kullanılan karışım tasarımları

Kod	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Lateks (kg/m ³)	SA (kg/m ³)	Agrega (kg/m ³)			Teorik BHA (kg/m ³)
					Kireçtaşı (8-16 mm)	Tuğla (0-8 mm)	Seramik (0-8 mm)	
B1	350	175		5,25	283	1238	-	2047
B2	350	175	28	5,25	283	1238	-	2075
B3	450	225		6,75	248	1092	-	2017
B4	450	225	36	6,75	248	1092	-	2053
C1	350	175		5,25	283	-	1250	2059
C2	350	175	28	5,25	283	-	1250	2087
C3	450	225		6,75	250	-	1103	2028
C4	450	225	36	6,75	250	-	1103	2064

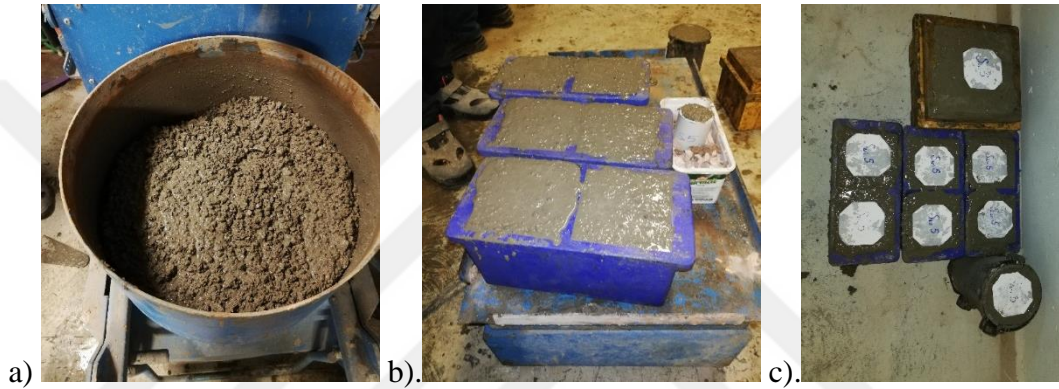
Beton tasarımlarında yüksek dayanım elde edebilmek amacıyla tuğla ve seramik atık agrega yerine 8-16 mm boyutlarında ağırlıkça %15 kireç taşı kullanılmıştır. Bunun yanında kimyasal katkı olarak 0,015 oranında ACE 450 süperakışkanlaştırıcı ile bazı serilerde çimento ağırlığınca 0,08 lateks kimyasal katkıları kullanılmıştır. Su/çimento oranı yüksek işlenebilirlik sağlanabilmesi için 0,5 kabul edilerek tasarımlar planlanmıştır. Tasarımlarda S5 kıvam sınıfı hedeflenmiştir, böylece vibrasyon enerjisinden verim sağlanması ve daha iyi yerleşebilen betonların üretilmesi planlanmıştır. Ancak bazı serilerde S3 kıvam sınıfı elde edilmiştir. Atık tuğla malzemesiyle 4 seri, seramik malzemesiyle 4 seri olacak şekilde toplamda 8 seri beton dökülmüştür. Her seride 6 adet 10x10x10cm küp numune, 1 adet 5x10cm silindir, 1 adet 15x15x15cm küp, 1 adet 10x20cm silindir olacak şekilde 72 adet numune üzerinde 2 ve 28 gün sürelerde basınç dayanımı, su emme ve agrega-çimento arayüz incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Buna ilaveten 28 gün yaşında klor geçirimsizliği ve permeabilite (su geçirimsizliği) özellikleri de incelenmiştir.

3.2.1. Hafif Beton Harç Karışımlarının Hazırlanması

Karışım hazırlanmadan önce malzemelerin rutubet yüzdeleri ve su emme değerleri hesaplanmıştır. Tane yoğunluğu ve elek analizi değerlerine göre hazırlanan beton numunelerin karışımında malzemelerin yüzde cinsinden miktarları hesaplanarak 7 dm³ beton karışımları için bileşenler hazırlanmıştır. Hafif beton harçlarının karışımlarında pan tipi laboratuvar mikseri içerisine öncelikle agregalar (kireç taşı, tuğla veya seramik atıkları) eklenmiş ve agregaları doygun kuru yüzey haline getirmek amacıyla su ihtiyaçları miktarınca karışıma su eklenerek 1 dk süreyle homojen olacak şekilde karıştırılmıştır. Ardından karışıma çimento eklenmiştir. Kuru karışıma beton karışım suyunun %70'i yavaş yavaş eklendikten sonra, geriye kalan %30 su eklenen lateks ve/veya süperakışkanlaştırıcı katkı ile birlikte harç karışımına ilave edilmiştir.

Yaklaşık 3 dk karıştırma işlemi sonrasında taze hal deneyleri gerçekleştirilmiş ve ardından beton harçları silindir ve küp kalıplara yerleştirilerek masa tipi vibrasyon cihazıyla yaklaşık 1 dk süreyle sıkıştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması standardına uygun olarak 100x100x100mm ölçülerinde küp numuneler, 100x200mm

ölçülerinde silindir numune ve elektron mikroskobu ölçümlerinde kullanılmak üzere 50x100mm ölçülerinde silindir numune kalıpları dolduruldu. Yaklaşık 24 saat kalıplarda bekletilen numuneler priz aldıktan sonra kalıplardan çıkarılarak 2/3'ü 20±2 °C sıcaklıktaki kirece doygun kür havuzlarına ve 1/3'ü laboratuvar ortam koşullarına bırakıldı. Böylece hem standart kirece doygun su kürü ve aynı zamanda ortam kürünün etkileri de incelenmiştir. Numunelerin 7 ve 28 gün yaşlarında ayrı ayrı kür tankından çıkarılmasıyla basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Beton harçlarının hazırlanması ve kalıplanması süreci Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. a) Laboratuvar tipi beton mikserinde malzemelerin homojen bir karışım haline gelene kadar karıştırılması, b) Masa tipi vibratörde taze betonun sıkıştırılması, c) 10x10mm 6 adet, 15x15mm ve 10x20mm birer adet taze beton numuneleri.

3.2.2. Taze Beton Deneyleri

3.2.2.1. Çökme Deneyi

Taze betonda çökme deneyi TS EN 12350-2:2019'a göre Şekil 3.9'da gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Taze beton harçları kesik koni içinde standarda uygun bir şekilde 3 kademe ve her kademe en az 25 defa olacak şekilde şişlenmiştir.

Ardından, kesik koni yavaşça yukarı doğru çekilmiş ve çöken taze beton harcının en üst noktası ile kesik koninin en üst noktası arasındaki mesafesi ölçülerek taze betonun kıvam değeri belirlenmiştir.



Şekil 3.9. Bazı beton harçlarının çökme deneyi sonrasındaki görüntüleri.

3.2.2.2. Yayılma Deneyi

Yayılma tablasının üstünde çökme konisi ters çevrilip içine taze beton harcı doldurulmuştur. Ardından çökme konisi yukarı doğru yavaşça çekilerek betonun kendi ağırlığı ile yayılması izlenmiştir. Yayılma işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 3.10'da gösterildiği gibi harcın çapı iki dik yönde ölçülmüştür. Daha sonra bu iki ölçümün ortalaması alınmış ve yayılma değeri olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.9. Beton harçlarının yayılma deneyi sonrasındaki görüntüleri.

3.2.2.3. Taze Beton Birim Hacim Ağırlığı Deneyi

TS EN 12350-6:2019'e göre hava miktarı ölçümü deneyinde kullanılan 5 lt kapasiteli kaba taze beton harçları iki kademe olacak şekilde sıkıştırılarak doldurulmuştur. Ardından taze beton harçlarının kütlesi Şekil 3.11'de gösterildiği gibi 0,001 hassasiyette tartılmıştır. Tartım sonucu kabın hacim değerine bölünerek taze betonun birim hacim kütlesi kaydedilmiştir.



Şekil 3.10. Taze beton birim hacim ağırlığı deneyi.

3.2.2.4. Beton Sıcaklıklarının Ölçülmesi

Taze beton harçlarının sıcaklıkları kütle ölçümü yapılırken metal problu bir termometre ile ölçülmüştür. Bu sebeple termometre betonun içine yerleştirildi ve bir süre beklenmiştir. Şekil 3.12’de gösterildiği gibi termometre sabit sıcaklığa ulaşana kadar tutularak betonun sıcaklığı kaydedilmiştir.



Şekil 3.11. Beton sıcaklığının termometre ile ölçülmesi.

3.2.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.2.3.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyleri 7 ve 28 gün yaşlarında TS EN 12390-3:2019’a göre Şekil 3.13’de gösterildiği gibi 300 ton kapasiteli tek eksenli hidrolik pres kullanılarak yapılmıştır. Presten elde edilen kırılma yükleri toplam alana bölünerek (Eşitlik 1) gerilme değerleri elde edilmiştir ve MPa (N/mm^2) cinsinden değerlendirmeye alınmıştır.



Şekil 3.12. Sertleşmiş beton basınç dayanım deneyi.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

σ : Gerilme (MPa:N/mm²)

P: Yük (N)

A: Alan (mm²)

3.2.3.2. Sertleşmiş Betonların Su Emme Deneyi

Sertleşmiş betonların Su Emme (SE) oranları TS EN 12390-7'ye göre belirlenmiştir. 24 saat kür havuzunda tutulan numuneler sudan çıkarıldıktan sonra yüzeyleri kurulanmış ve tartılmıştır (M1). Ardından aynı numune su içinde tartılmıştır (M2). Son olarak numuneler 24 saat boyunca etüvde bekletilerek tamamen kurutulmuştur (M3). Numunelerin tartımında 0,001 hassasiyette bir terazi kullanılmıştır. Su emme ve kılcal su emme deneylerine ait veriler kullanılarak suya doymun BHA ve su emme oranlarının hesaplanması için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\rho_d = \frac{M1}{(M1 - M2)}$$
$$w = \frac{(M1 - M3)}{M3}$$

ρ_d : doymun birim hacim ağırlık, g/cm³

w : su emme oranı, %

M1 : numunenin doymun kuru yüzey ağırlığı, g

M2 : numunenin su içerisindeki ağırlığı, g

M3 : numunenin etüv kurusu ağırlığı, g

3.2.3.3. Klor Geçirirliği Deneyi

Klor iyonu migrasyonu deneyi NT Build 492 standardına göre yapılmıştır. Deneyin prensibi klorür iyonlarının beton içerisinde yıllar içerisinde ilerleyeceği mesafenin elektriksel kuvvet etkisi ile hızlandırılması (hızlı yaşlandırma) ve derinlik ölçümü yapılarak geçirirlilik katsayısının hesaplanmasıdır. Numunelerin klor iyonu penetrasyonuna karşı gösterdikleri dirence göre migrasyon katsayısı düşmektedir.

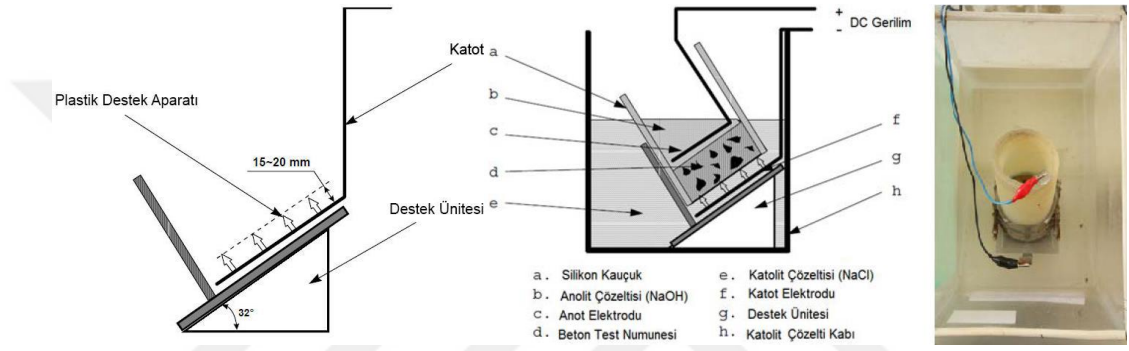
100/200 mm silindir numuneler elmas uçlu testere ile 50x100mm ölçülerinde iki parçaya ayrılmıştır. Bu iki numuneden biri deneyde kullanılırken diğeri gerektiğinde daha ileri yaşlarda kullanım için saklanabilmektedir. Deneyde kullanılacak numuneler Şekil 3.14'te gösterildiği gibi standarda uygun olacak Şekilde temizlenip kurutulduktan sonra kesilmiş yüzeyler çözelti ile temas edecek Şekilde vakum düzeneğine alınmıştır.



Şekil 3.13. Vakum işlemi deney düzeneği ve numunelerin silikon kauçuktan yapılmış deney düzeneğine yerleştirilmesi.

Daha sonra kutu içindeki basınç 10 – 50 mbar (1 – 5 kPa) aralığında olması için vakum metre vasıtası ile kontrol edilerek 3 saat işleme devam edilir. Süre tamamlandığında vakum pompası çalışırken numunelerin tamamı doymuş kireç çözeltisi ile kaplanacak Şekilde yeterli miktarda vakum kutusu içerisine çekilerek 1 saat daha kutu içerisindeki vakum sabit tutulmuştur. 1 saat sonra vakum pompası kapatılmış ve tahliye musluğu açılıp kutu içindeki basıncın normale dönmesi sağlanmıştır. Daha sonra numuneler vakum kutusu içerisinde 18 ± 2 saat süreyle doymuş kireç çözeltisine gömülü halde bekletilir. Süre sonunda numunelerin yüzeyi kurulanıp numunenin dış yüzeyi çözelti sızmasını engelleyecek Şekilde bant ile sarılmış ve Şekil 3.14'teki silikon kauçuktan

yapılmış deney düzeneğinin içine yerleştirilip paslanmaz sanayi tipi kelepçeler yardımı ile sıkıştırılmıştır. Silikon kauçuk deney düzeneğine yerleştirilen numunelerin üzerinde kalan boşluk yaklaşık 300 ml 0,3 M NaOH çözeltisi ile tamamen kaplanmıştır. Daha sonra numuneler Şekil 3.15'teki aparat ile içinde yaklaşık 12L %10'luk NaCl çözeltisi bulunan Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterilen deney kaplarına alınmış ve standartta gösterilen şekilde Şekil 3.16'daki DC güç kaynaklarına anot ve katot bağlantıları yapılır ve Çizelge 3.11'de belirtilen akıma uygun olarak deneye başlanmıştır.



Şekil 3.14. Deney düzeneği, destek ünitesi ve plastik destek aparatı (NT BUILD 492).

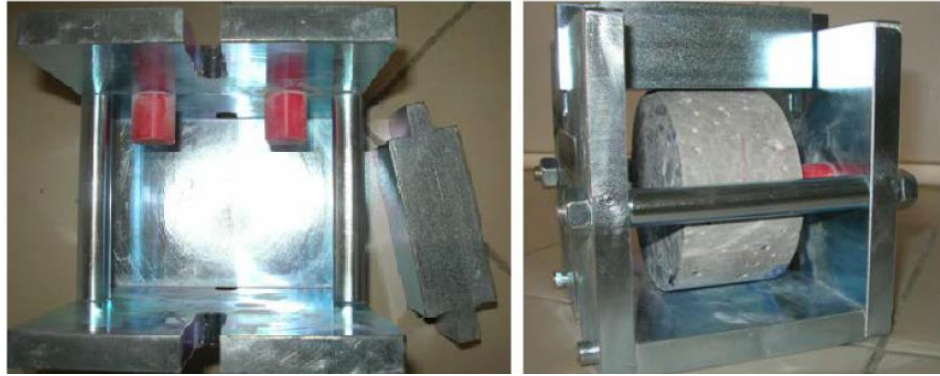


Şekil 3.15. DC Güç kaynakları ve NT BUILD 492 standardına göre deneyde kullanılan havuzları.

Çizelge 3.8. Uygulanacak gerilim, oluşan akım ve test süresi çizelgesi

Başlangıç akımı I_{30v} (mA)	Uygulanan gerilim U (Volt)	Ayardan sonra okunan akım I_0 (mA)	Test süresi t (saat)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Çizelgede belirlenen deney süresi tamamlandıktan sonra güç kaynağı kapatılıp numuneler havuzlardan dışarı alınmış ve silikon kauçuk deney düzeneğinden çıkarılıp yıkanmış ve kurulanmıştır. Daha sonra numuneler Şekil 3.17’de gösterildiği gibi bu deney için özel olarak yapılmış yarma aparatı ile ortadan ikiye ayrılmıştır.



Şekil 3.16. Numune yarmada kullanılan aparat.

İki parçaya ayrılan numune yüzeylerine 0,1 M $AgNO_3$ çözeltisi püskürtülmüş ve klor iyonlarının beton içine nüfus ettiği kısım belli olana kadar yaklaşık 15 dk kuruması için beklenmiştir. Daha sonra kumpas ile 10mm aralıklarla 7 farklı ölçüm noktasından klor geçirimsizliği okunmuş ve mm olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.17. Deneye maruz bırakılıp yarıldıktan sonraki numuneye ait görsel.



Şekil 3.18. Klor geçirimsizliği ölçümü için kullanılan metot.

Gelişen teknolojiyle beraber farklı simülasyon programları sayesinde hesaplanan klorür migrasyon katsayısı klorür iyonlarının uzun yıllarda beton içerisinde ilerleme mesafesi yüksek doğrulukta bulunabilmekte ve inşa edilecek yapının maruz kalacağı çevresel şartlara uygun tasarımlar yapılabilmektedir (Işık, 2018). Ölçümler tamamlandıktan sonra aşağıdaki formül kullanılarak matematiksel hesaplamalar yapılmış ve klorür migrasyon katsayısı m^2/s cinsinden bulunmuştur. Migrasyon katsayısı hesaplama formülü:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 (273 + T)L}{(U - 2)t} (Xd - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L Xd}{(U - 2)}})$$

D_{nssm} : Migrasyon katsayısı, *10-12 m^2/s

U : Uygulanan gerilim, Volt t : Deney süresi, saat

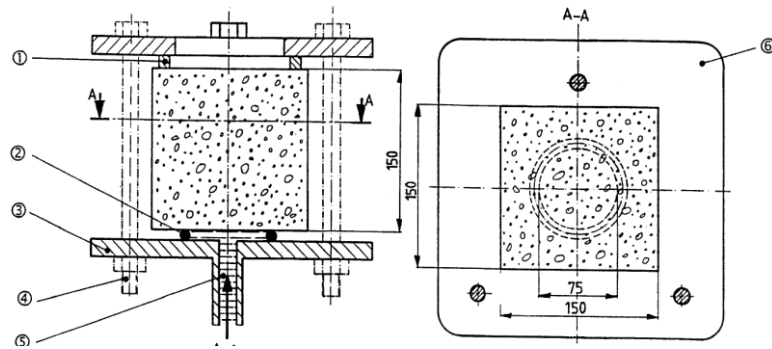
T : Anolit çözeltisinin deney başlangıcı ve sonundaki sıcaklık ortalaması, °C

L : Deney numunelerinin kalınlığı, mm

xd : Deney numuneleri içerisine klorür migrasyonu ortalama derinliği, mm

3.2.3.4. Basınç Altında Su İşleme Derinliği (Permabilite) Deneyi

Basınç altında su işleme derinliğinin tayini TS EN 12390-8 standardına göre yapılmıştır. Standarda göre deney numunesinin su basıncı uygulanacak yüzeyi, numune kalıptan çıkartıldıktan hemen sonra, tel fırça ile pürüzlendirilmiştir. Su basıncı, 150x150x150mm numunenin mastarlanmış yüzeyine uygulanmıştır. Numune, Şekil 3.20 gösterilen şekilde cihaza yerleştirilmiş ve (72 ± 2) saat süreyle (500 ± 50) kPa su basıncı uygulanmıştır. Deney esnasında, deney numunesinin basınç uygulanmayan yüzeyleri su sızıntısı olup olmadığının tespiti için belirli aralıklarla gözlenmiştir. Standarda göre su sızıntısı görülmesi halinde, deneyin sonuca ulaştığı kabul edilmektedir. Belirtilen süre sonunda uygulanmasından sonra deneye son verilmiş ve numune cihazdan çıkarılmıştır. Basıncılı su uygulanan yüzeydeki fazla su silinmiş ve numune, basınçlı su uygulanan yüzeye dik şekilde, ortasından TS EN 12390-6'da tarif edilen metot ile Şekil 3.21'de gösterildiği gibi yarılarak ikiye bölünmüştür. Numunenin bölünmesi ve incelenmesi esnasında basınçlı su uygulanan yüzey alt tarafa getirilmiştir. Numunenin bölünmesiyle ortaya çıkan numune yüzeyinin, su işleyen kısım kesitinin belirgin şekilde görülünceye kadar kurutulmasından hemen sonra, ıslak alanın sınırları işaretlenmiştir. Basınç uygulanan deney alanından itibaren, suyun işlediği en büyük derinlik, ölçülerek en yakın milimetreye yuvarlatılmak suretiyle kaydedilmiştir. Deney sonucu, en yakın milimetreye yuvarlatılmak suretiyle gösterilen, en büyük su işleme derinliğidir.



Şekil 3.19. Basınç altında su işleme derinliği deney düzeneği (TS EN 12390-8) 1) yerleştirme parçası 3) sıkıştırma plakası 5) basınçlı su girişi 2) sızdırmazlık contası 4) yivli sıkıştırma çubuğu 6) sıkıştırma plakası.



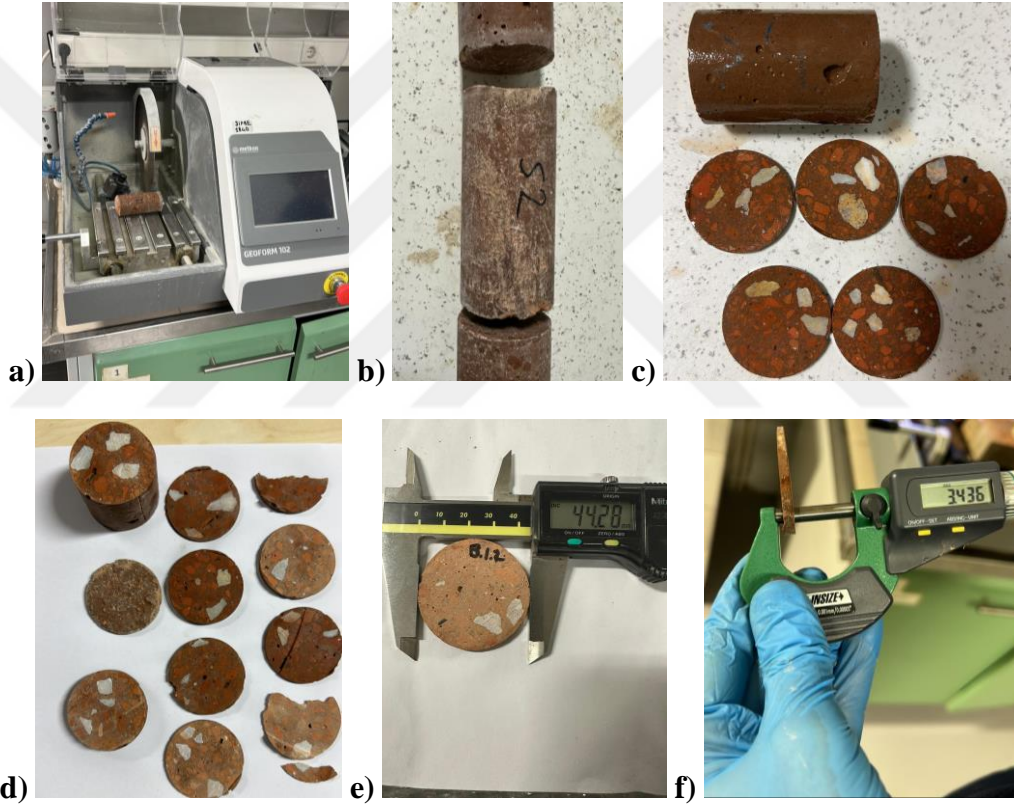
Şekil 3.20. Basınçlı su emme deneyi için numunenin deney düzeneğine yerleştirilmesi ve numunenin basınçlı su uygulanan yüzeye dik şekilde ortasından yarılması.

3.2.3.5. Betonlarda Çimento-Agrega Arayüz Ölçülmesi

Sertleşmiş beton numunelerin çimento-agrega ara yüz fazlarının ölçülebilmesi amacıyla Şekil 3.22’de gösterilen Leica DM4500 P model polarizan mikroskop kullanılmıştır. Ancak mikroskop ile çimento-agrega arayüzlerinin ölçümlerin yapılabilmesi için ince kesit hazırlığı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla sertleşmiş 50x100 mm boyutlu silindir beton numuneler Şekil 3.23’te görülen kesme makinesi kullanılarak yaklaşık 3-4 mm kesit kalınlığında 20’ye yakın parçalara ayrılmıştır. İnce kesit beton numuneler fotoğraf makinası ile görüntülendikten sonra numunelerin üst yüzeyinden 3 ve 4. sıraya gelen kesitler yüzeyleri ıslatıldıktan sonra mikroskop altına yerleştirilmiştir. 100x, 200x ve 500x büyütme ölçeklerinde büyütme yapılarak mikroskopun bilgisayarına entegre olan programda resimler kaydedilmiştir. Kaydedilen fotoğraflar bir özel 3D Görüntü Analiz yazılımı kullanılarak her bir numune içinde en az 20 noktada agrega-çimento arayüz ölçüleri kaydedilmiştir. Bu kapsamda 7 ve 28 gün yaşlarında arayüz ölçümleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Excel programı ile belirleyici istatistikler hesaplanmıştır.



Şekil 3.21. Leica DM4500 P model polarizan mikroskop.



Şekil 3.22. a) Metkon marka ince kesit alma makinesi, b) Arayüz geçiş bölgelerinin kontrolü için hazırlanan 50x100mm silindir numune örnekleri, c) ve d) İnce kesit numuneler, e) İnce kesit numunelerin kumpas yardımı ile ölçülmesi, f) İnce kesit numunelerin mikrometre ile ölçülmesi.

3.2.3.6. SEM+EDS Analizleri

Agrega-çimento arayüzlerinin ölçümleri için hazırlanan numuneler 28 gün yaşında ODTÜ MERLAB taramalı elektron mikroskobu laboratuvarında görüntülenmiştir. Elde edilen görüntüler Bölüm 4'te tartışılmıştır.



BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. TAZE HAL DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalarına ilişkin bulgular Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelgede çökme deneyi ve yayılma çapı deneyi, birim hacim ağırlık (BHA) hesaplamaları ve beton sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Üretilen betonların taze haldeki deney sonuçları

Kod	Çimento dozu (kg/m ³)	Lateks katkı	Çökme (cm)	Yayılma çapı (cm)	Beton sıcaklığı (10 dk sonra)	BHA (kg/dm ³)
B1	350	Yok	15	-	22,1	2,045
B2	350	Var	14	-	22,4	2,037
B3	450	Yok	-	67	22,7	2,076
B4	450	Var	-	70	22,5	2,184
C1	350	Yok	15	-	22,0	2,094
C2	350	Var	15	-	22,6	2,135
C3	450	Yok	-	69	22,8	2,163
C4	450	Var	-	70	22,9	2,120

Çizelge 4.1’e göre, çimento dozajı 350 kg/m³ ve 450 kg/m³ olan betonların kıvamları sırasıyla S3 ve S5 olarak elde edilmiştir. S5 kıvam sınıfındaki betonları yayılma çapları yaklaşık 70 cm değerine ulaşmıştır. Bu durum kimyasal katkının çimento dozajındaki artışla birlikte performansının arttığını göstermektedir. Ayrıca lateks katkılı betonlarda kıvamın S3 olması, lateks katkısının kıvama yeterince etki etmediğini göstermiştir.

Hidratasyon sıcaklıklarının çimento doz ve lateks katkısıyla önemli derecede değişmediği gözlenmiştir. Ancak beton sıcaklıkları çok düşüğe olsa beklendiği gibi çimento dozajının etkisi agrega ve lateks katkısından daha belirgin seviyededir. Üretilen betonların taze halde BHA değerleri 2,04 – 2,18 kg/dm³ arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler TS EN 206 [Madde 4.3.2 Hafif beton için birim hacim kütlesi sınıfları]'e göre üretilen betonların hafif beton sınıfında olduğunu göstermektedir.

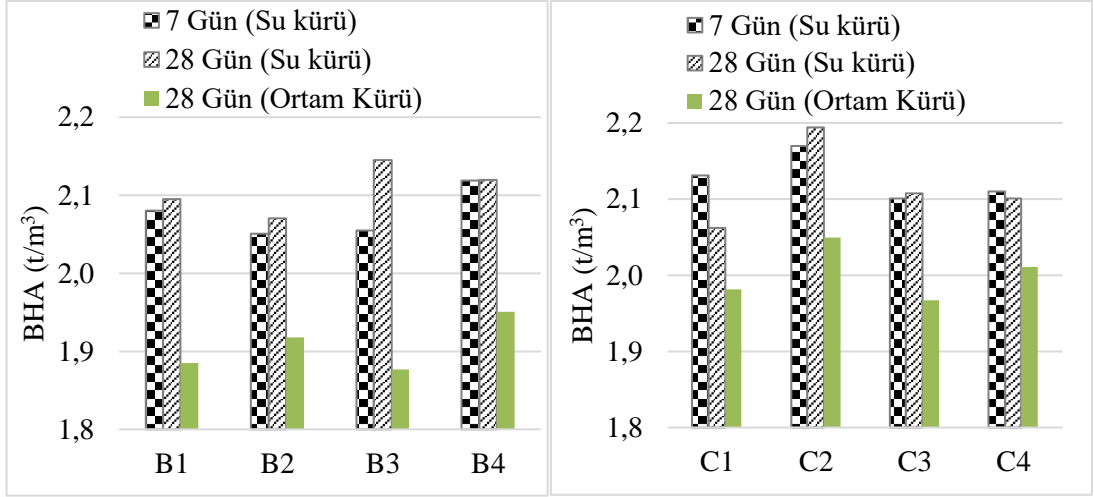
4.2. SERTLEŞMİŞ BETON DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA

4.2.1. Basınç Dayanımı Denev Sonuçları ve Tartışma

Sertleşmiş beton numuneler basınç dayanımı deneyi öncesinde tartılarak öncelikle ağırlıkları belirlenmiş ve ardından tek eksenli 300 tonluk hidrolik preste basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen betonların sertleşmiş hal BHA verileri Çizelge 4.2'de ve grafik karşılaştırması Şekil 4.1'de, basınç dayanımı denev sonuçları Çizelge 4.3'te ve grafik karşılaştırması Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Sertleşmiş betonların BHA sonuçları

Kod	7 Gün (Su kürü)		28 Gün (Su kürü)		28 Gün (Ortam Kürü)	
	Ort.	S. Sapma	Ort.	S. Sapma	Ort.	S. Sapma
B1	2,08	0,0226	2,10	0,0057	1,89	0,0057
B2	2,05	0,0035	2,07	0,0014	1,92	0,0042
B3	2,05	0,0035	2,15	0,0127	1,88	0,0078
B4	2,12	0,0007	2,12	0,0148	1,95	0,0191
C1	2,13	0,0021	2,06	0,0728	1,98	0,0064
C2	2,17	0,0035	2,19	0,0028	2,05	0,0163
C3	2,10	0,0141	2,11	0,0247	1,97	0,0311
C4	2,11	0,0170	2,10	0,0028	2,01	0,0184



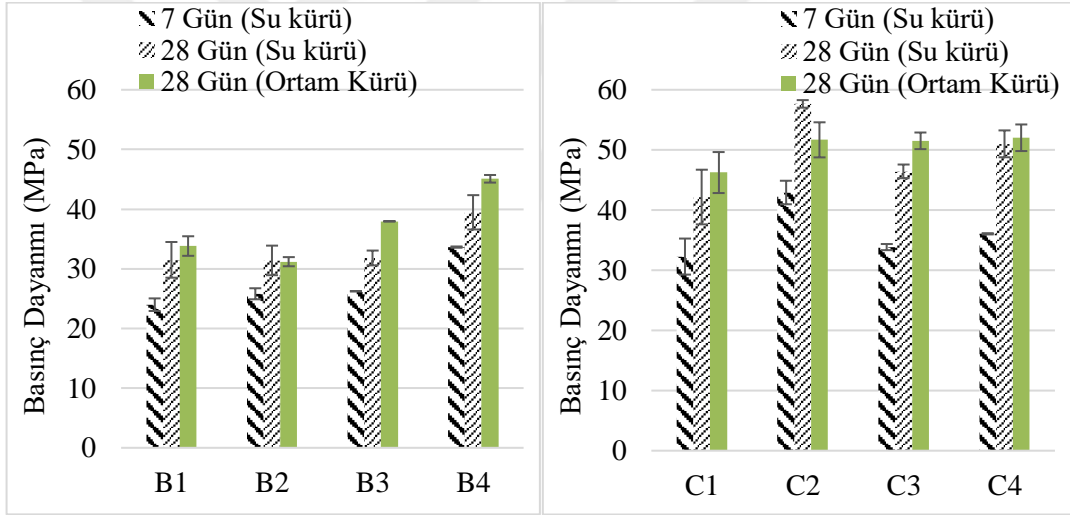
Şekil 4.1. Sertleşmiş beton numuneleri BHA sonuçları.

Şekil 4.1’de sertleşmiş beton numunelerin basınç dayanımı deneyi öncesinde gerçekleştirilen ağırlık tartımlarına göre hesaplanan BHA değerleri verilmiştir. Buna göre, su kürü içinde bekletilen beton numuneler nemli oldukları için ortamda bekleyen numunelere göre daha yüksek BHA değerlerine sahiptir. 28 gün süresince ortam koşullarında bekletilen TA agregası ile üretilen B1, B2, B3 ve B4 betonlarının BHA’ları suda bekletilenlere göre sırasıyla %10,02, %7,34, %12,52 ve %7,97 azalmıştır. Bu verilere göre lateks katkılı TA agregalı betonlar ortam koşullarında suda bekletilenlere göre daha az su kaybetmiştir yani su tutmuştur. 28 gün süresince ortam koşullarında bekletilen SA agregası ile üretilen C1, C2, C3 ve C4 betonlarının BHA’ları suda bekletilenlere göre sırasıyla %3,93, %6,59, %6,67 ve %4,28 azalmıştır. TA agregalı betonların su kürü ve ortam kürü numunelerinin BHA değerleri arasındaki fark SA agregalı betonlara göre daha yüksek çıkmıştır.

BHA verilerine göre C2 ve C4 serileri hariç (350 kg/m^3 ve 450 kg/m^3 çimento dozajlı lateksli seriler) diğer TA ve SA agregalı betonlar TS EN 206’ya göre hafif beton sınıfındadır. Ancak SA agregalı betonların BHA değerleri TA agregalı betonlara göre daha yüksektir. TA agregalı betonların BHA’ları 28 gün ortam koşullarında yaklaşık $1,89 - 1,95 \text{ t/m}^3$ iken, SA betonların BHA’ları $1,97 - 2,05 \text{ t/m}^3$ arasında elde edilmiştir. Her iki atık agregalı betonlarda lateks katkısı BHA’ları önemli derecede etkilememiştir, ancak çok az da olsa ($0,03 - 0,05 \text{ t/m}^3$) BHA’ları artırmıştır. Bunun sebebinin lateks katkısının su tutması sebebiyle olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.3. Sertleşmiş betonların basınç dayanımı deney sonuçları

Kod	7 Gün (Su kürü)		28 Gün (Su kürü)		28 Gün (Ortam Kürü)	
	Ortalama	S. Sapma	Ortalama	S. Sapma	Ortalama	S. Sapma
B1	23,98	1,05	31,50	2,99	33,81	1,64
B2	25,81	0,93	31,40	2,48	31,19	0,77
B3	26,23	0,01	31,81	1,24	37,96	0,03
B4	33,63	0,10	39,46	2,88	45,08	0,64
C1	32,27	3,00	42,17	4,54	46,24	3,41
C2	42,93	1,95	57,66	0,63	51,68	2,92
C3	33,85	0,51	46,44	1,14	51,52	1,38
C4	36,06	0,10	51,02	2,23	52,03	2,21



Şekil 4.2. Sertleşmiş beton numuneleri basınç dayanım deneyi sonuçları.

Şekil 4.3'e göre standart kürde bekletilen Tuğla atığı agregalı hafif betonlarda en düşük erken dayanım 350 kg/m^3 çimento dozlu lateksiz hafif betonda yaklaşık 24 MPa olarak, nihai dayanım 28 günde ortam küründe yaklaşık 31 MPa ile B4 serisi lateksli 450 kg/m^3 çimento dozlu hafif betonda elde edilmiştir. En yüksek erken ve nihai dayanımlar sırasıyla yaklaşık 34 MPa ve 45 MPa ile B4 serisi 450 kg/m^3 çimento dozlu lateksli hafif betonda elde edilmiştir. Ortam küründe bekletilen TA agregalı betonlarda en yüksek nihai dayanımlar yaklaşık 45 MPa ile B4 serisi 450 kg/m^3 çimento dozlu lateksli hafif betonda elde edilmiştir.

Basınç dayanımı verilerine göre Tuğla atığı agregalı ortam kürüne maruz kalan hafif betonların basınç dayanımı su kürüne maruz kalan betonlara göre daha yüksektir. Bunun sebebi, lateks türevi polimer katkıları 2 temel işleve sahiptir: 1) Hidrofobik yapıları sebebiyle su iterler, 2) Su itici özelliği sayesinde iki yüzey arasında bir polimerik bağ yapısı oluşturarak, katmanları birbirine bağlar (Özturan, 2013). Lateks katkıları betonların ortam küründe daha verimli sonuçlar oluşturduğu literatürde belirtilmektedir (Ceran, 2008; Özturan, 2013). Bu kapsamda lateks içerikli betonlarda elde edilen yüksek basınç dayanımı değerleri lateksin sistem içinde çalıştığına göstergesidir. Beton içinde fazla suyu iterek bileşenlerin bağlayıcı ile birlikte daha kompakt bir yapı oluşturmasını sağlayarak dayanımı artıran bir faktör oluşturmuştur. Bu kapsamda Tuğla atığı agregalı betonlarda **ortam kürünün su küründen daha verimli** olduğu söylenebilir.

Şekil 4.3'e göre standart kürde bekletilen Seramik atığı agregalı hafif betonlarda en düşük erken dayanım lateksiz hafif betonlarda (C1 ve C3) yaklaşık 33 MPa olarak, 28 günde nihai dayanım standart kürde yaklaşık 42 MPa ile lateksiz 350 kg/m³ çimento dozlu hafif betonda (C1) elde edilmiştir. En yüksek erken ve nihai dayanımlar sırasıyla yaklaşık 43 MPa ve 58 MPa ile C2 serisi 350 kg/m³ çimento dozlu lateksli hafif betonda elde edilmiştir. Ortam küründe bekletilen Seramik atığı agregalı betonlarda en yüksek nihai dayanımlar yaklaşık 52 MPa ile C2, C3 ve C4 serilerinde elde edilmiştir. C1 serisinin ortam küründeki nihai basınç dayanımı düşük olmasına rağmen diğer serilerin basınç dayanımından yaklaşık %12'lik bir fark oluşmuştur. Bu farkın istatistiksel olarak çok anlamlı olmadığı düşünülmektedir. Kısaca ortam kürü seramik agregalı hafif betonların nihai basınç dayanımlarında önemli farklar oluşturmamıştır. Seramik atıkları ile üretilen betonlarda 350 kg/m³ dozajlı lateksiz hafif betonların ortalama nihai basınç dayanımı lateksli hafif betonların nihai basınç dayanımları arasında %38 fark oluşmuştur. 350 kg/m³ dozajlı hafif betonlarda lateks katkısının etkisi %10 ile sınırlı kalmıştır. Bu durum tuğlanın daha yassı oluşunun ve agrega dayanımının daha düşük olduğunun bir göstergesi olarak düşünülebilir.

Seramik atıkları ile üretilen betonlarda ortam küründe bekleyen numunelerin su kürü içinde bekleyen numunelere göre ortalama dayanım sonuçları C2 serisi haricinde daha yüksek dayanım sağladığı tespit edilmiştir. Ortam kürüne tabi tutulan numuneler ile

su kürü numunelerinin ortalama basınc dayanim deneyi sonuçlarında %0,19 ile %10,9 arasında bir fark olduğu tespit edilmiştir.

Ortam krnde bekleyen numunelerden C2 serisi 350 kg/m³ imento dozajlı ve lateks katkılı betonların ortalama dayanimı su krne göre % 11,56 düşük sonuç vermiştir. Buna göre 450 kg/m³ dozajlı betonlarda lateks katkısının basınc dayanımına çok büyük bir etkisi olmazken, 350 kg/m³ dozajlı betonlarda lateks katkısının basınc dayanimını düşürdüğü gözlenmektedir.

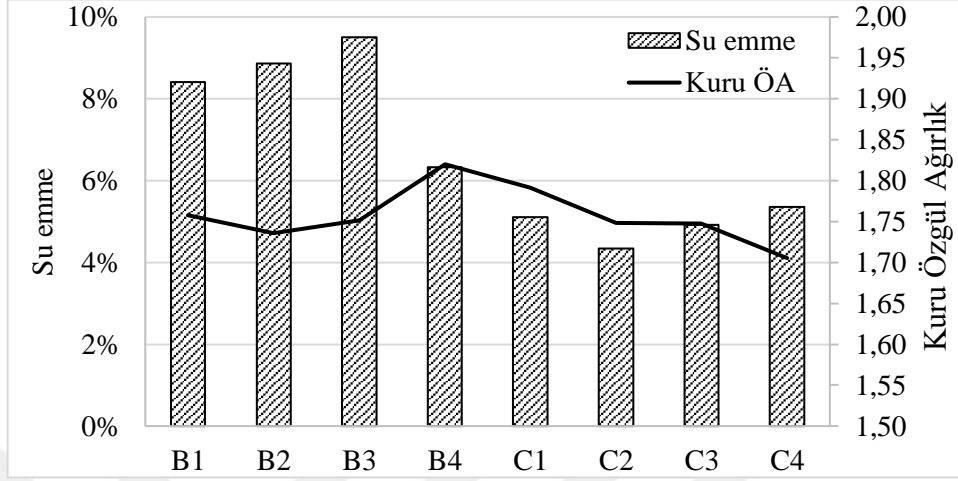
Tuğla atıkları ile üretilen betonlarda 350 kg/m³ dozajlı numunelerin ortalama basınc dayanimı ile 450 kg/m³ dozajlı numunelerin basınc dayanimları arasında % 21,27 fark oluşurken, seramik atıkları ile üretilen betonlarda 350 kg/m³ dozajlı numunelerin ortalama basınc dayanimı ile 450 kg/m³ dozajlı numunelerin basınc dayanimları arasında % 7,69 fark meydana gelmiştir. Bu durum tuğlanın daha yassı oluşunun ve agrega dayanimının daha düşük olduğunun bir göstergesi olarak düşünülebilir.

4.2.2. Su Emme Deneyi Sonuçları ve Tartışma

Su emme deneylerinin sonuçları Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Buna göre lateks katkısının ve imento dozajının betonların BHA değerlerine önemli derecede etki etmediği tespit edilmiştir. Numunelerin yüksek su emme kapasitesine sahip olduğunu düşünüldüğünde üretilen betonların kuru özgül ağırlıkları en fazla 1820 kg/m³ olmuştur. TS EN 206 (2013)-A2'ye göre etüvde kurutulmuş betonların BHA'ları 2000 kg/m³'ten küçük olduğu için tüm seriler hafif beton sınıfında yer almaktadır.

Tuğla atıkları ile üretilmiş hafif betonların BHA'ları, Seramik atıkları ile üretilmiş hafif betonların BHA'larına göre %10 civarında daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Benzer Şekilde tuğla atıkları betonların su emme oranlarını seramik atıklarına göre %4-5 oranında artırmıştır. Bunun sebebi tuğlanın üretimini sırasında 950 oC'lık bir sıcaklık ve illit kili kullanılmaktadır, diğer taraftan seramik üretiminde 1200 oC'lık sıcaklık ile kaolin kili kullanılmaktadır. Buna ilaveten seramik retiminde Na₂SiO₃ türevi camlaştırıcı malzemelerin kullanıldığı bilinmektedir. Bu sebeple seramik malzemeler,

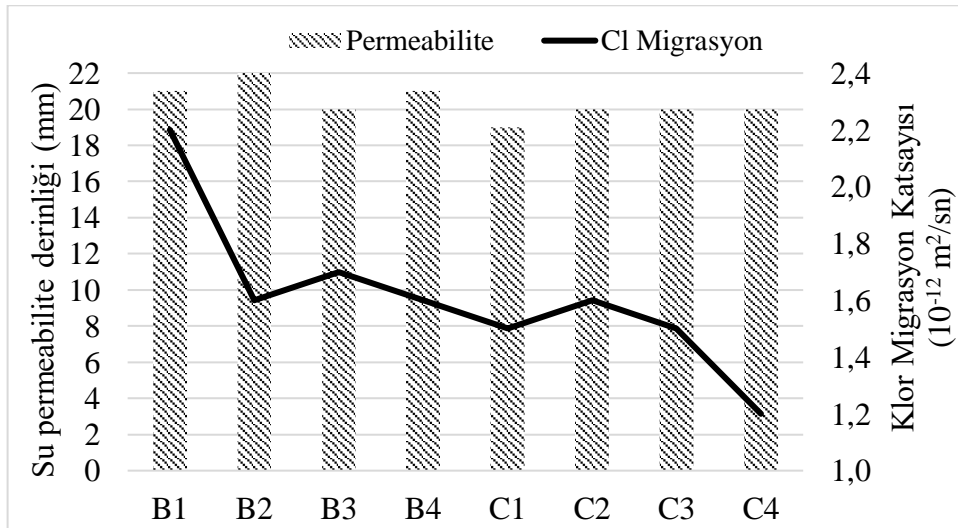
kil tuğla malzemelere göre daha düşük oranda su emme özelliği gösterirler. Bu sonuç üretilen betonlara da yansımıştır.



Şekil 4.3. Sertleşmiş beton numunelerine ait su emme ve kuru özgül ağırlık sonuçları.

4.2.3. Su Emme Deneyi Sonuçları ve Tartışma

Basınç altında su işleme deney sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir. Deney sonuçlarına göre tuğla ve seramik atıkları ile üretilen betonlarda basınç altında su emme değerlerinin birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Seramik atıkları ile üretilen betonlarda basınç altında su işleme derinliğinin tuğla atıklarına göre %10'a yakın fark olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. Sertleşmiş beton numuneleri basınç dayanım deneyi sonuçları.

4.2.4. Klor Geçirirnililiği ve Permabilite Deneyi Sonuçları ve Tartışma

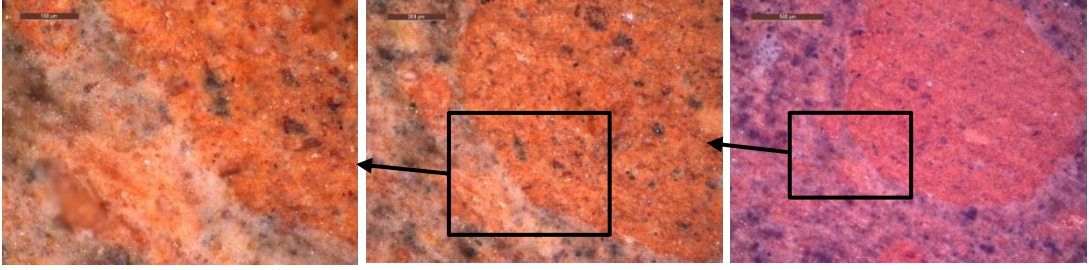
Klorür geğirirnililiği (Klorür migrasyon katsayısı) deney sonuçları Şekil 4.4'te görülmektedir. Migrasyon katsayısı arttıka migrasyon değeri dolayısıyla klor difuzyonu artmaktadır. B1 350 doz lateks katkısız tuğla atıkları ile üretilen betonda en yüksek değer, C4 450 doz lateks katkılı seramik atıkları ile üretilen betonda da en düşük klor migrasyon dolayısıyla difuzyon en düşük gözlenmiştir. Diğer dizaynlarda belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Bu konuda aşağıda belirtilen tespitin etkili olduğu düşünülmektedir.

Tuğla ve seramik atıkları ile üretilen betonların tümünde deneye başlamadan önce deneyin uygulama süresini belirlemek için yapılan 30A ve 60A ölçümlerinde değerler 0-5 mA arası ıkmış ve deney süresi 96 saat olarak hesaplanmıştır. Ancak deneye başladıktan 24 – 96 saat sonra numuneler gözlenmiş ve deneyin tamamlandığı tespit edilmiştir. Başlangııda ıok yüksek klor direnci beklentisi oluşmasına rağmen deney sonuğlandığında, bu deneyde numunelerin dış yüzeylerinde aşırı migrasyon gerçekleştiği için elde edilen ölçüm sonuçlarına bu anomalinin tesir ettiği düşünülmektedir. Beton numunelerine yapılan bu deneyde Şekil 3.17'de deneyin normalinde olan deneyin karakteristiğinde uygun olan bir migrasyon geğişi gözlenmemiştir. Üretilen bu tasarımların klor geğişine karşı dayanıklılık gerektiren ıevresel etkiye maruz kalacak taşıyıcı yapılarda daha ileri düzey ıalışmalar yapılarak kullanılmaması tavsiye edilir. İlk direnç ölçümlerinin yüksek ııkmasının nedeni tuğla ve seramik atıklarının laboratuvar tipi kırıcıda kırılırken ıok ince malzeme miktarının ıok olması nedeniyle betonların boşluk miktarının ıok az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.2.5. Agrega-Matris Arayüz lmleri ve Değerlendirmeleri

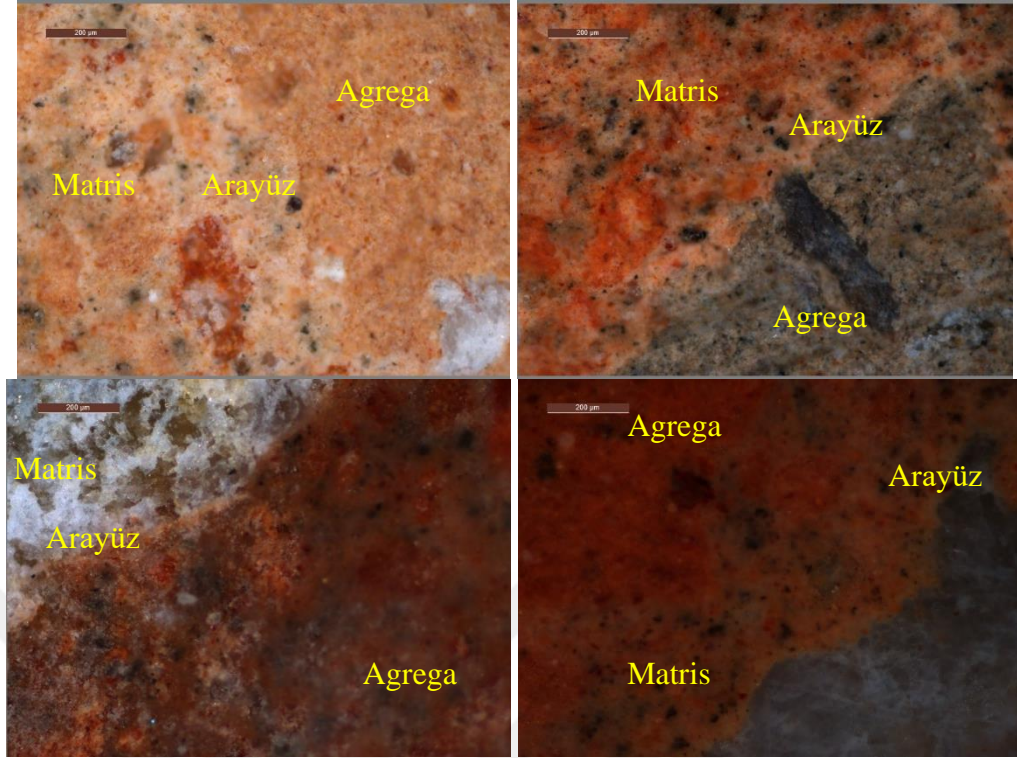
Üretilen betonların ince kesitleri üzerinde mikroskop yardımıyla gerçekleştirilen agrega-ıimento arayüz ölçümlerinin sonuçları ve değerlendirmeleri bu bölümde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar belirleyici istatistik verileri dikkate alınarak hesaplanmış ve ıizelge 4.4'te verilmiştir. Buna ilaveten ince kesitlere ilişkin

mikroskop görüntüleri ve bu görüntüler üzerindeki detay incelemeler Şekil 4.5- 4.13'te gösterilmiştir.



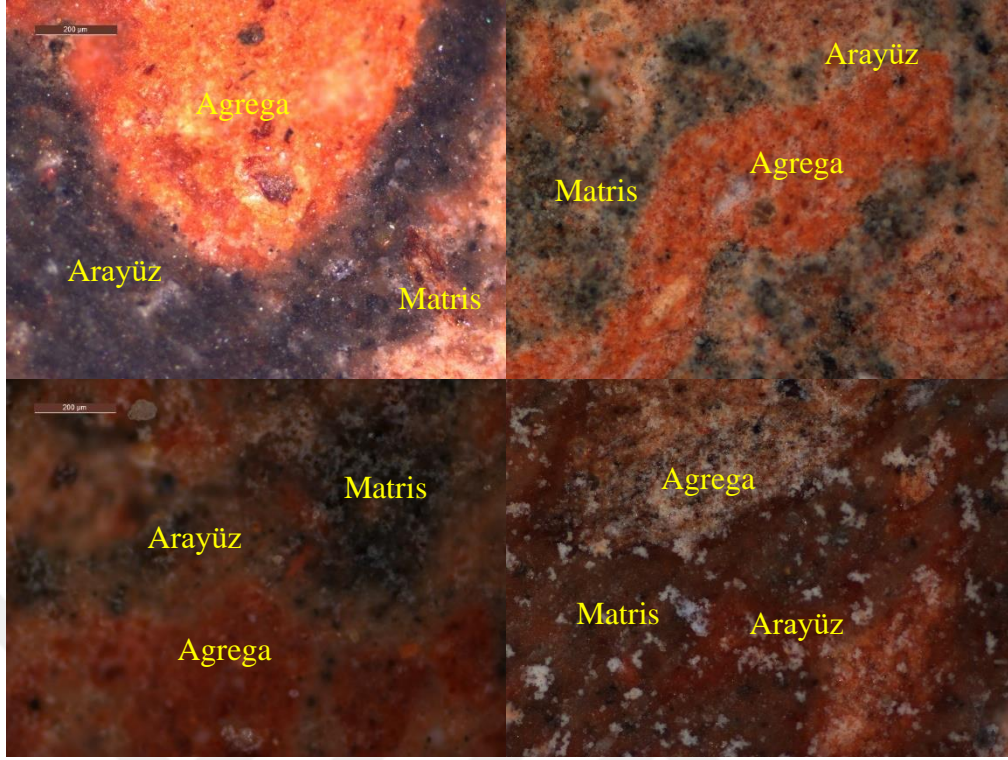
Şekil 4.5. 7 gün yaşındaki B1 tip betonun ince kesitinden elde edilmiş polarizan mikroskop görüntüleri (alt görsel 500 mikron, sağdaki görsel 200 mikron ve soldaki görsel 100 mikron ölçek).

Çalışmanın başlangıcında mikroskop ile ince kesitler üzerinde Şekil 4.5'te gösterildiği gibi 100 mikron, 200 mikron ve 500 mikron görseller elde edilmiştir. Bu görseller üzerinde ilk değerlendirmeler ve kalibrasyonlar bir özel görüntü analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada 200 mikron ölçekli görselden elde edilen veri adedi ve hassasiyeti istenilen ölçüde olması sebebiyle 7 ve 28 günlük mikroskop görüntüleme ölçeği olarak 200 mikron seçilmiştir. Sonraki süreçte üretilen betonlardan elde edilen ince kesitlerin 7 ve 28 günlük mikroskop görüntüleme işlemleri ve görüntü kayıtları 200 mikron ölçek üzerinde olmuştur. Bu ölçek dahilinde elde edilen ve arayüz ölçümlerinde kullanılan görseller Şekil 4.6 – 4.13'te gösterilmiştir. Her bir ince kesit beton örnek üzerinde en az 6 farklı görsel nokta mikroskopta kaydedilmiş olup, bu görseller üzerinde her bir beton serisi için 25 adet farklı noktadan agrega-çimento arayüz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler belirleyici istatistik özellikleri ile Çizelge 4.4'te verilmiştir.



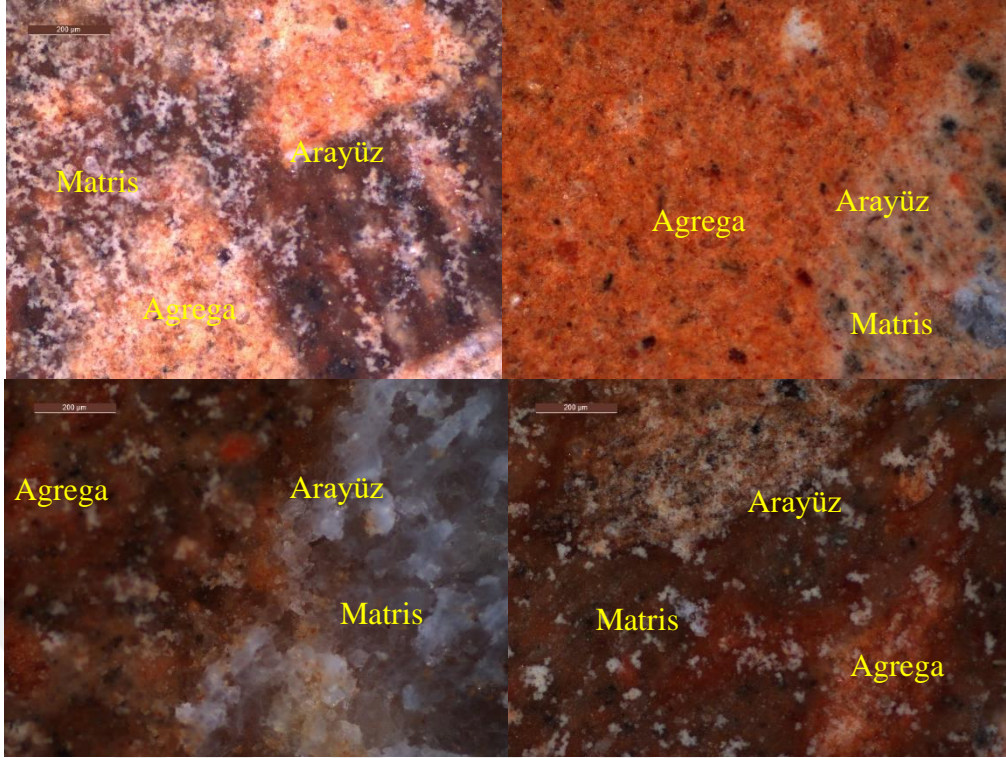
Şekil 4.6. 7 gün (üst resimler) ve 28 gün (alt resimler) yaşındaki B1 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.

B1 ve B3 numunesinden elde edilen kesitler üzerinde gerçekleştirilen mikroskop örnek görselleri Şekil 4.6 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Elde edilen mikroskop görüntülerinde 200 mikrondan büyük ve küçük agregaların çimento ile arayüzleri şekillerde gösterildiği alanda ölçülmüştür. Şekilde de görüldüğü gibi, 7 gün yaşındaki betonun arayüz kesitleri daha açık tonda ve beyaz olarak gözlenmiştir. Agregalar daha koyu renkte net bir şekilde ayrıştırılmıştır. Matris, iki katman arasında kalan kısım olarak koyu tonların bir karışımı olarak görülmektedir. 28 günde ise, görselin genel renk tonu daha koyu olduğu, agreganın en koyu renkte, arayüz tabakasının daha açık tonlu görüldüğü ancak oldukça küçüldüğü gözlenmiştir. 200 mikronluk ölçekte gerçekleştirilen ölçümlerde 28 gün yaşında B1 için yaklaşık 15-30 mikron, B3 için yaklaşık 15-22 mikron arayüz tabakası ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6 ve 4.8’de görüldüğü gibi kireçtaşı agregasının da kesitlerde mikroskop incelemesine dahil edildiği görülmektedir. Ancak ölçümlerde bu kısımda kalan arayüzler hesaplara dahil edilmemiştir.



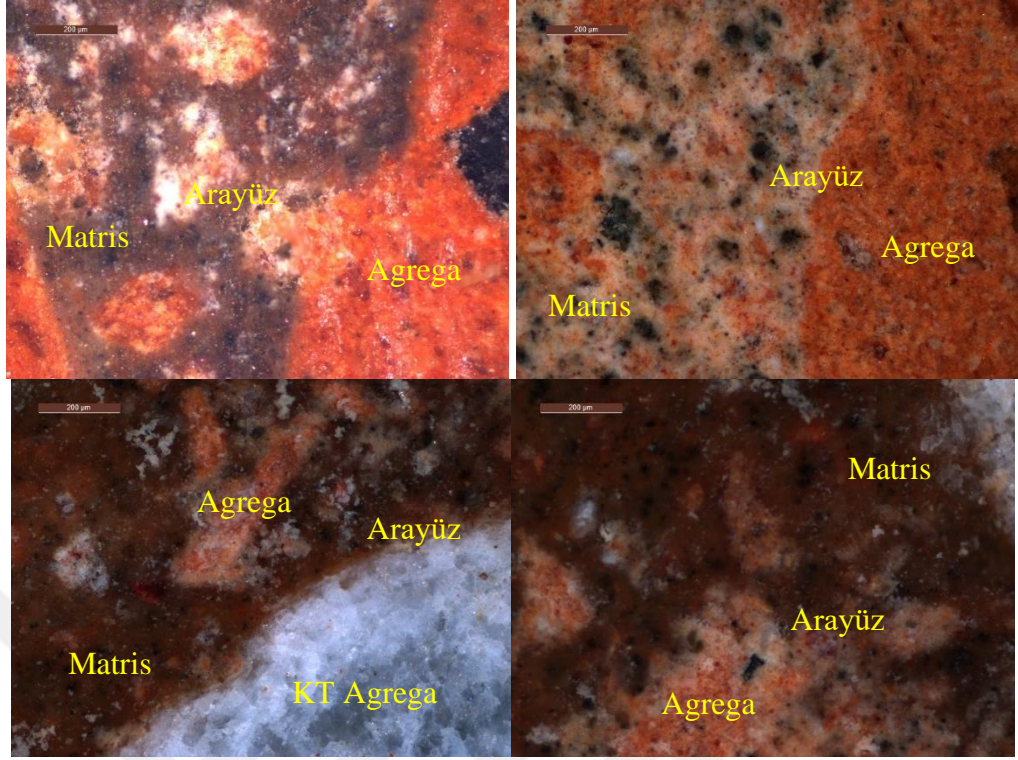
Şekil 4.7. 7 gün (üst resimler) ve 28 gün (alt resimler) yaşındaki B2 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.

B2 ve B4 numunesinden elde edilen kesitler üzerinde gerçekleştirilen mikroskop örnek görselleri Şekil 4.7 ve 4.9'da gösterilmiştir. Elde edilen mikroskop görüntülerinde 200 mikrondan büyük ve küçük agregaların çimento ile arayüzleri şekillerde gösterildiği alanda ölçülmüştür. Şekillerde de görüldüğü gibi, 7 gün yaşındaki betonun arayüz kesitleri siyah tonda ve koyu kahverengi olarak gözlenmiştir. Agregalar açık kahverengi renkte net bir şekilde ayrıştırılmıştır. Matris, iki katman arasında kalan kısım olarak koyu tonların bir karışımı olarak görülmektedir. 28 günde ise, görselin genel renk tonu daha koyu olduğu, agreganın kahverengi, arayüz tabakasının siyaha yakın tonlu görüldüğü gözlenmiştir. 200 mikronluk ölçekte gerçekleştirilen ölçümlerde 28 gün yaşında B2 için yaklaşık 10-16 mikron ve B4 için yaklaşık 10-17 mikron arayüz tabakası ölçümü gerçekleştirilmiştir.

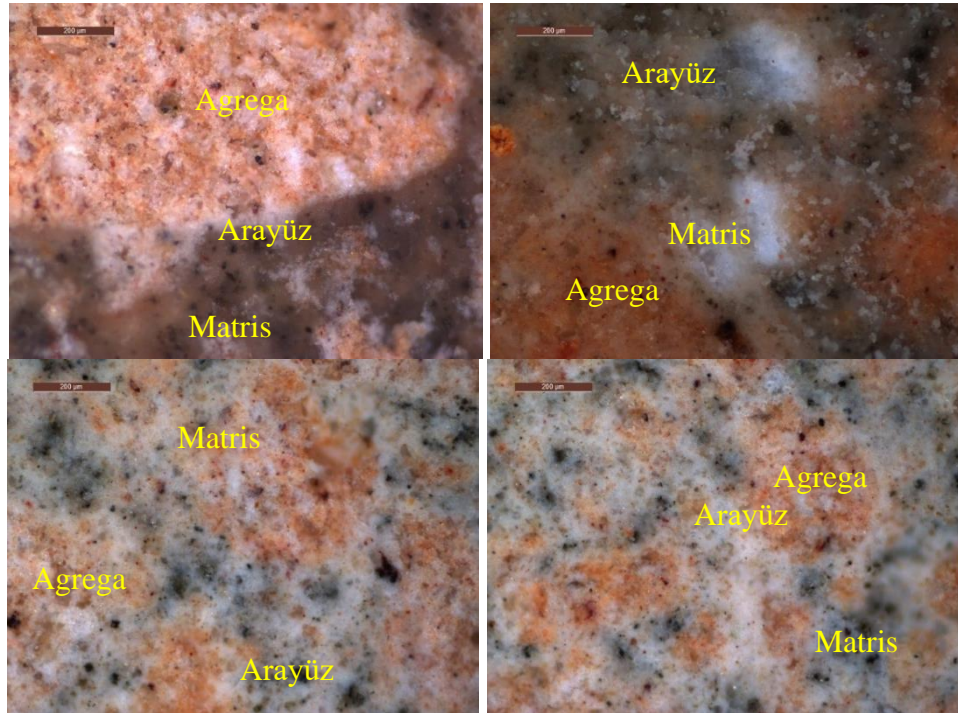


Şekil 4.8. 7 gün (üst resimler) ve 28 gün (alt resimler) yaşındaki B3 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.

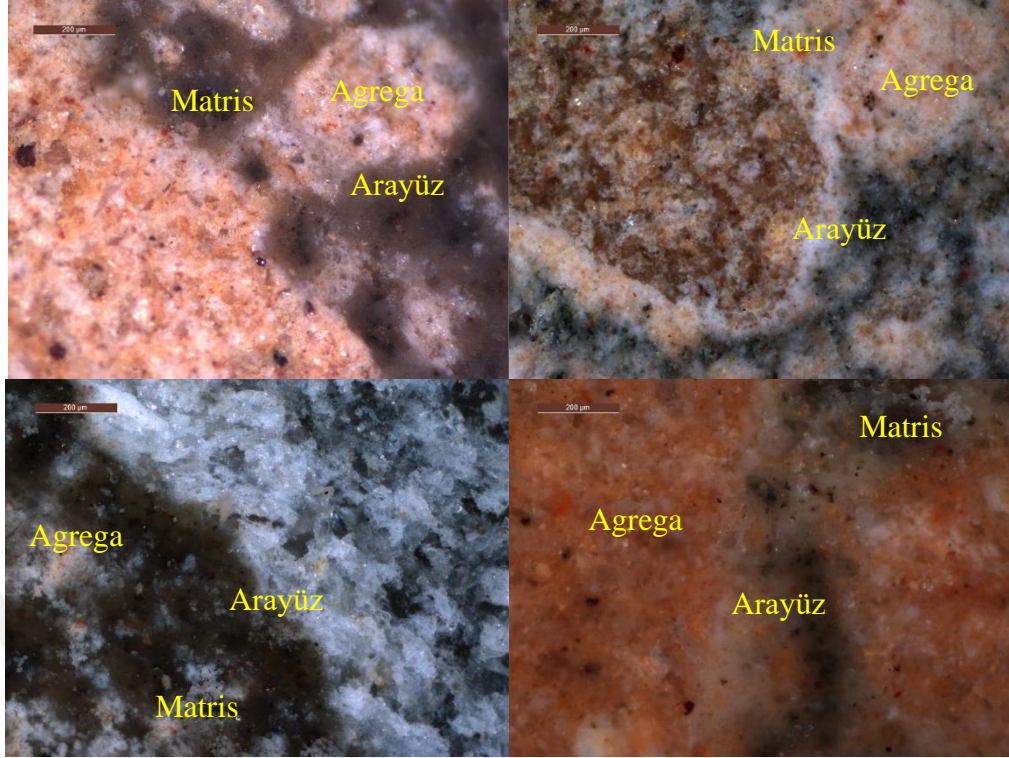
C1 ve C3 numunesinden elde edilen kesitler üzerinde gerçekleştirilen mikroskop örnek görselleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Elde edilen mikroskop görüntülerinde 200 mikrondan büyük ve küçük agregaların çimento ile arayüzleri şekillerde gösterildiği alanda ölçülmüştür. Şekilde de görüldüğü gibi, 7 gün yaşındaki betonun arayüz kesitleri daha açık tonda ve beyaz olarak gözlenmiştir. Agregalar daha koyu renkte net bir şekilde ayrıştırılmıştır. Matris, iki katman arasında kalan kısım olarak koyu tonların bir karışımı olarak görülmektedir. 28 günde ise, görselin genel renk tonu daha koyu olduğu, agreganın en koyu renkte, arayüz tabakasının daha açık tonlu görüldüğü ancak oldukça küçüldüğü gözlenmiştir. 200 mikronluk ölçekte gerçekleştirilen ölçümlerde 28 gün yaşında C1 için yaklaşık 10-23 mikron, C3 için yaklaşık 10-21 mikron arayüz tabakası ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10 ve 4.12’de görüldüğü gibi kireçtaşı agregasının da kesitlerde mikroskop incelemesine dahil edildiği görülmektedir. Ancak ölçümlerde bu kısımda kalan arayüzler hesaplara dahil edilmemiştir.



Şekil 4.9. 7 gün (alt resimler) ve 28 gün (üst resimler) yaşındaki B4 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.

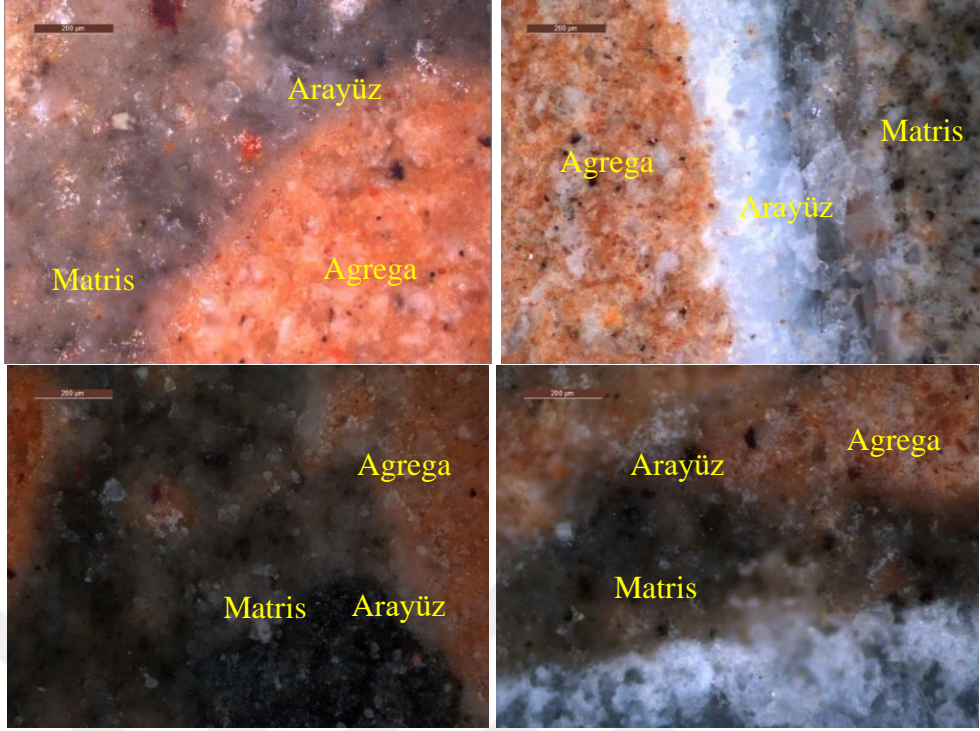


Şekil 4.10. 7 gün (alt resimler) ve 28 gün yaşındaki C1 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.

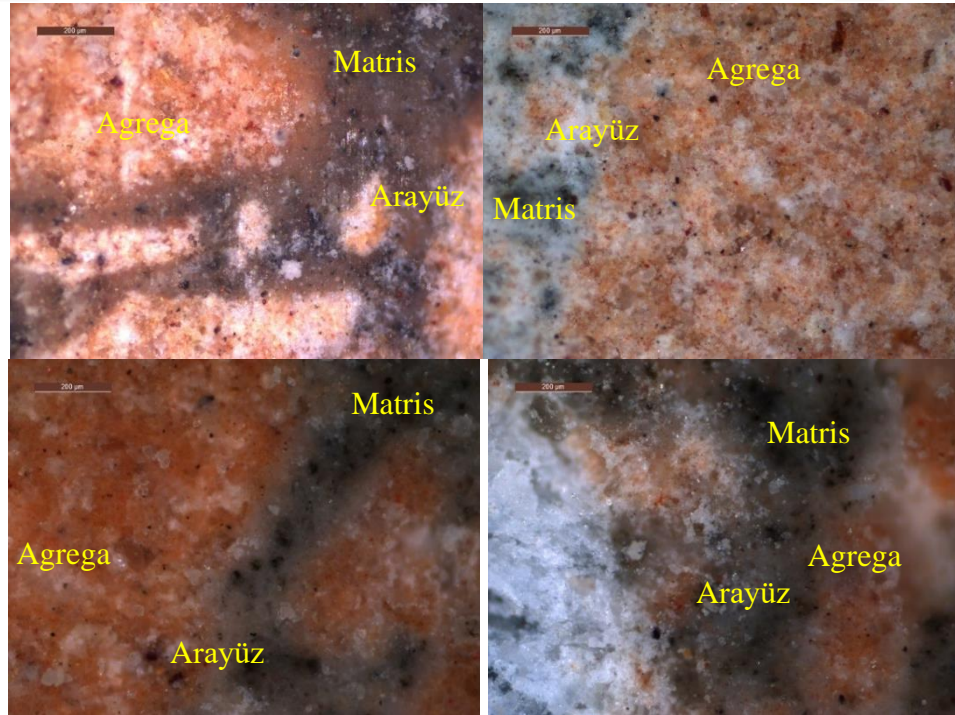


Şekil 4.11. 7 gün (alt resimler) ve 28 gün (üst resimler) yaşındaki C2 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.

C2 ve C4 numunesinden elde edilen kesitler üzerinde gerçekleştirilen mikroskop örnek görselleri Şekil 4.11 ve 4.13’de gösterilmiştir. Elde edilen mikroskop görüntülerinde 200 mikrondan büyük ve küçük agregaların çimento ile arayüzleri şekillerde gösterildiği alanda ölçülmüştür. Şekillerde de görüldüğü gibi, 7 gün yaşındaki betonun arayüz kesitleri siyah tonda ve koyu kahverengi olarak gözlenmiştir. Agregalar açık kahverengi renkte net bir şekilde ayrıştırılmıştır. Matris, iki katman arasında kalan kısım olarak koyu tonların bir karışımı olarak görülmektedir. 28 günde ise, görselin genel renk tonu daha koyu olduğu, agreganın kahverengi, arayüz tabakasının siyaha yakın tonlu görüldüğü gözlenmiştir. 200 mikronluk ölçekte gerçekleştirilen ölçümlerde 28 gün yaşında C2 için yaklaşık 12-33 mikron ve C4 için yaklaşık 14-25 mikron arayüz tabakası ölçümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.12. 7 gün (alt resimler) ve 28 gün (üst resimler) yaşındaki C3 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.13. 7 gün (üst resimler) ve 28 gün (alt resimler) yaşındaki C4 tip beton ince kesitinden elde edilmiş 200 mikron ölçekte polarizan mikroskop görüntüleri.

Çizelge 4.4. Tuğla atıkları agregalı betonlardan elde edilen mikroskop görsellerinin agrega-çimento arayüz ölçüm sonuçları

No	B1			B2			B3			B4		
	Kür Havuzu		Lab	Kür Havuzu		Lab	Kür Havuzu		Lab	Kür Havuzu		Lab
	7 G	28 G	Kürü	7 G	28 G	Kürü	7 G	28 G	Kürü	7 G	28 G	Kürü
1	41,99	19,35	19,52	105,5	15,43	21,56	48,53	16,53	31,01	40,79	13,83	18,21
2	54,10	11,65	26,04	102,0	12,77	24,04	51,22	19,07	36,92	44,08	15,58	12,34
3	66,82	10,09	33,22	95,28	13,15	26,46	56,35	17,29	23,89	47,44	17,02	22,08
4	47,33	11,99	25,31	120,6	16,04	22,18	85,98	17,43	12,78	65,83	15,57	20,08
5	92,41	6,46	28,49	98,20	15,61	20,99	53,34	19,55	15,85	37,96	13,94	20,99
6	60,87	7,49	30,26	88,85	14,26	35,15	35,49	17,40	14,49	53,09	12,11	14,42
7	48,02	25,97	26,96	87,53	14,06	15,93	40,26	19,54	13,86	30,49	13,27	23,42
8	48,42	12,63	25,05	93,00	10,66	20,38	49,15	17,25	13,54	31,55	13,90	20,97
9	45,57	17,95	31,73	88,53	12,44	21,92	32,78	19,15	23,78	37,07	12,47	20,99
10	35,24	26,25	17,68	91,15	14,24	24,02	51,79	17,93	16,32	27,02	16,07	18,60
11	38,21	15,51	21,50	94,04	15,89	26,90	47,57	16,27	21,66	51,76	17,30	21,93
12	53,58	12,86	20,38	64,37	15,07	21,24	26,00	17,51	17,34	42,32	16,86	15,36
13	54,86	12,60	23,39	75,03	15,70	25,03	33,45	19,55	23,57	39,37	15,54	17,10
14	49,27	16,73	22,13	126,6	14,06	23,26	33,27	17,43	12,84	32,41	13,62	14,98
15	62,42	17,17	19,44	75,19	15,71	25,46	46,38	15,54	17,21	49,63	12,27	15,36
16	45,25	18,50	20,32	78,90	14,09	23,25	47,63	19,13	15,46	33,64	10,16	18,78
17	45,60	14,88	19,57	82,73	12,13	21,59	27,82	17,67	22,13	37,26	11,94	20,31
18	76,35	11,56	21,74	77,48	12,87	20,33	37,71	17,29	16,57	38,76	13,88	23,56
19	47,11	12,28	22,48	91,22	14,17	22,03	37,58	18,29	19,67	25,38	15,23	22,44
20	64,85	17,17	20,48	64,07	16,03	28,22	48,86	20,25	16,90	38,96	17,17	22,46
21	46,80	10,14	30,57	93,24	15,60	26,76	24,17	19,38	20,47	29,98	15,49	18,54
22	45,05	11,01	26,98	64,99	14,24	25,14	35,36	17,18	15,31	33,88	15,67	20,89
23	54,82	15,53	25,09	74,42	16,03	21,25	35,02	19,56	13,55	47,44	17,03	17,00
24	48,85	11,04	21,04	67,07	12,45	26,28	63,08	22,55	15,87	42,28	15,41	20,50
25	64,55	15,04	16,33	71,77	15,47	24,88	51,51	20,44	16,56	34,60	17,01	22,27
A.Ort	53,53	14,47	23,83	86,87	14,33	23,77	44,01	18,37	18,70	39,72	14,73	19,34
St. S.	12,56	4,82	4,55	16,31	1,48	3,61	13,37	1,56	5,80	9,22	1,96	3,08
Max	92,41	26,25	33,22	126,6	16,04	35,15	85,98	22,55	36,92	65,83	17,30	23,56
Min	35,24	6,46	16,33	64,07	10,66	15,93	24,17	15,54	12,78	25,38	10,16	12,34

Çizelge 4.4'e göre; 350 kg/m³ çimento dozajlı B1 ve B2 beton serilerinde 7 günden 28 güne arayüz kesit ölçüsü B1'de ortalama 54µ'dan 15µ'a yaklaşık %73; B2'de ortalama 87µ'dan 14µ'a yaklaşık %84 oranlarında küçülmüştür. 450 kg/m³ çimento dozajlı B3 ve B4 beton serilerinde 7 günden 28 güne arayüz kesit ölçüsü B3'de ortalama 44µ'dan 18µ'a yaklaşık %58; B4'de ortalama 40µ'dan 15'e yaklaşık %63 oranlarında küçülmüştür. Bu davranış çimento tipinin erken dayanımı yüksek çimento (C₃S esaslı) olması sebebiyle olduğu düşünülmektedir. Lateksli serilerde arayüzdeki küçülme

(daralma) 350 kg/m³ çimento dozajında %11 iken, 450 kg/m³ çimento dozajında %5 daha fazla olmuştur. Bunun sebebi lateks (stiren bütadien) katkısı bir çeşit polimer katkıdır ve su itici (hidrofob) özelliğe sahiptir. Bu sebeple matris içinde arayüzdeki suyun bir kısmını iterek bu noktalarda su/çimento oranını belli oranda azalttığı öngörülmektedir. Böylece arayüzde iyileşme sonucunda basınç dayanımları da artmıştır.

Çizelge 4.5. Seramik atıkları agregalı betonlardan elde edilen mikroskop görsellerinin agrega-çimento arayüz ölçüm sonuçları

No	C1			C2			C3			C4		
	Kür Havuzu		Lab	Kür Havuzu		Lab	Kür Havuzu		Lab	Kür Havuzu		Lab
	7 G	28 G	Kürü	7 G	28 G	Kürü	7 G	28 G	Kürü	7 G	28 G	Kürü
1	53,81	18,39	22,59	73,01	12,03	18,88	72,46	15,65	19,40	42,34	20,33	24,90
2	62,60	22,29	20,89	59,27	29,10	17,46	100,42	17,15	22,33	40,72	14,21	27,07
3	56,81	20,30	22,35	85,45	33,41	18,49	84,92	18,56	21,07	58,12	15,34	23,81
4	51,27	18,80	15,67	68,54	24,24	17,17	78,31	17,16	22,53	62,51	20,54	28,35
5	29,54	19,22	13,90	63,20	18,43	14,79	69,72	13,87	19,54	43,74	22,06	25,41
6	48,67	23,72	17,90	86,24	22,92	13,59	49,97	12,32	20,44	50,36	19,43	27,03
7	51,13	18,66	18,97	84,76	26,03	11,94	96,21	10,52	17,70	34,90	16,98	25,20
8	35,83	15,10	21,03	71,86	19,29	10,49	61,86	15,92	14,92	60,33	21,66	27,03
9	56,95	17,24	22,01	64,89	19,03	16,93	68,64	17,31	13,55	60,11	23,44	17,55
10	41,02	13,79	20,42	68,04	15,15	16,78	56,08	18,81	22,35	63,11	18,62	18,67
11	50,77	20,92	19,13	76,30	23,57	15,30	44,65	20,52	17,10	45,19	17,16	22,38
12	51,82	22,11	20,68	83,67	22,04	12,45	67,66	17,39	15,13	61,08	15,51	25,76
13	61,64	18,98	17,06	83,03	20,64	14,08	46,35	18,44	13,38	66,11	17,39	31,42
14	40,43	12,32	18,61	76,96	23,99	11,87	55,69	17,32	15,20	87,22	17,44	30,32
15	45,34	21,87	13,70	93,04	22,30	15,21	55,63	18,79	17,01	57,21	25,52	26,79
16	42,27	23,82	15,51	72,51	13,80	16,74	52,24	20,51	15,15	68,79	22,29	25,08
17	46,41	20,51	17,08	85,58	15,46	14,93	62,63	15,45	18,65	63,21	18,76	26,87
18	41,46	15,42	18,92	79,17	14,30	13,49	85,50	21,03	20,89	44,82	23,76	25,03
19	75,17	22,21	20,88	63,04	12,37	12,03	40,90	18,78	17,94	57,06	21,03	24,18
20	53,38	20,57	18,72	81,25	16,13	13,42	51,24	16,97	19,01	64,15	17,55	27,12
21	54,54	10,88	20,44	88,32	13,80	19,16	60,70	13,70	17,39	86,36	20,62	24,50
22	56,99	13,62	13,55	62,58	17,29	16,63	58,28	15,92	14,96	52,00	18,81	27,80
23	42,58	20,35	15,61	89,95	18,85	15,10	59,27	16,42	13,74	64,22	20,26	20,33
24	72,36	23,47	17,09	53,41	21,64	16,95	56,63	18,60	17,27	62,05	15,75	21,78
25	50,24	19,01	18,60	76,58	13,80	18,38	37,96	20,82	19,03	62,24	16,37	23,86
Ort.	51,07	18,94	18,45	76,58	19,58	15,29	58,85	17,12	17,83	61,06	19,23	25,13
Sap.	10,48	3,62	2,70	10,59	5,41	2,45	14,06	2,61	2,84	12,37	2,92	3,23
Min	29,54	10,88	13,55	53,41	12,03	10,49	37,96	10,52	13,38	34,90	14,21	17,55
Max	75,17	23,82	22,59	93,04	33,41	19,16	100,42	21,03	22,53	87,22	25,52	31,42

Çizelge 4.5'e göre; 350 kg/m³ çimento dozajlı C1 ve C2 beton serilerinde 7 günden 28 güne arayüz kesit ölçüsü C1'de ortalama 51µ'dan 19µ'a yaklaşık %63; C2'de ortalama 77µ'dan 20µ'a yaklaşık %74 oranlarında küçülmüştür. 450 kg/m³ çimento dozajlı C3 ve C4 beton serilerinde 7 günden 28 güne arayüz kesit ölçüsü C3'de ortalama 59µ'dan 17µ'a yaklaşık %70; C4'de ortalama 61µ'dan 19'e yaklaşık %69 oranlarında küçülmüştür. Bu davranış çimento tipinin erken dayanımı yüksek çimento (C₃S esaslı) olması sebebiyle olduğu düşünülmektedir.

Lateksli serilerde arayüzdeki küçülme (daralma) 350 kg/m³ çimento dozajında %12 iken, 450 kg/m³ çimento dozajında %5 daha fazla olmuştur. Bunun sebebi lateks (stiren bütadien) katkısı bir çeşit polimer katkıdır ve su itici (hidrofob) özelliğe sahiptir. Bu sebeple matris içinde arayüzdeki suyun bir kısmını iterek bu noktalarda su/çimento oranını belli oranda azalttığı öngörülmektedir. Böylece arayüzde iyileşme sonucunda basınç dayanımları da artmıştır.

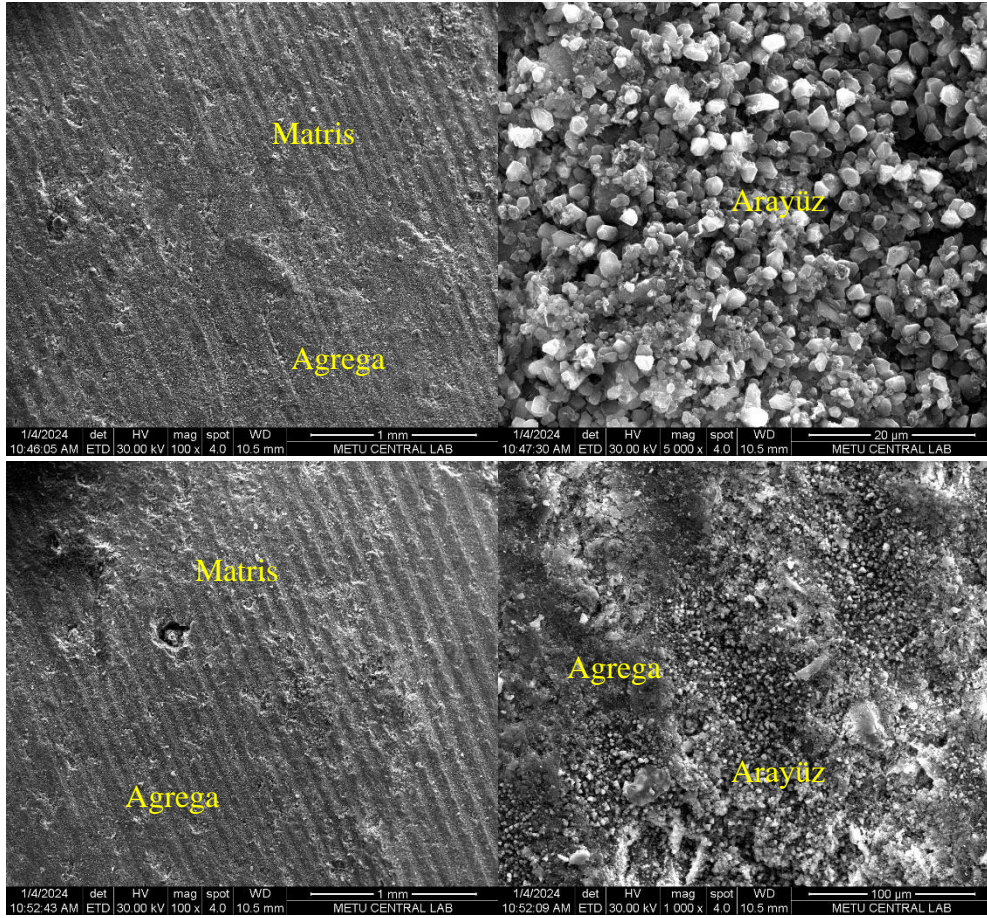
3.2.4. SEM ve EDS Analizleri ve Değerlendirmeleri

Üretilen hafif betonlar ortam ve su küründe ayrı ayrı kür edildikten sonra 28 gün yaşında 2 – 4 mm kalınlıkta kesitler halinde elmas uçlu daire testere ile kesildikten sonra kesitler öncelikle polarizan mikroskop ile arayüz incelemeleri için görüntülenmiş ve ardından ODTÜ MERLAB Elektron Mikroskobu Laboratuvarında FEI marka bir tarayıcı elektron mikroskobu (SEM+EDS) ile görüntülenmiştir. SEM görüntülerinin elde edildiği numunelere ilişkin görseller Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

Şekil 4.14'te gösterilen kesitler üzerinden elde edilen SEM görselleri Şekil 4.15 – 4.22'de gösterilmiştir. Bu SEM görüntülerinde 1 mm ölçekte büyütülmüş görsellerden 2 farklı notadan alınmış mikroskop görüntüsü örnek olarak verilmiştir. Soldaki SEM görselleri 1 mm ölçekli 100X büyütme yapılmış görseller halinde, sağdaki SEM görselleri 20 ve 100 mikron ölçekli SEM görselleri halinde sunulmuştur. Görsellerde tanımlanabilen bölgeler agrega, matris ve arayüz olmak üzere işaretlenmiştir. Buna göre aşağıdaki yorumlar yapılmıştır.

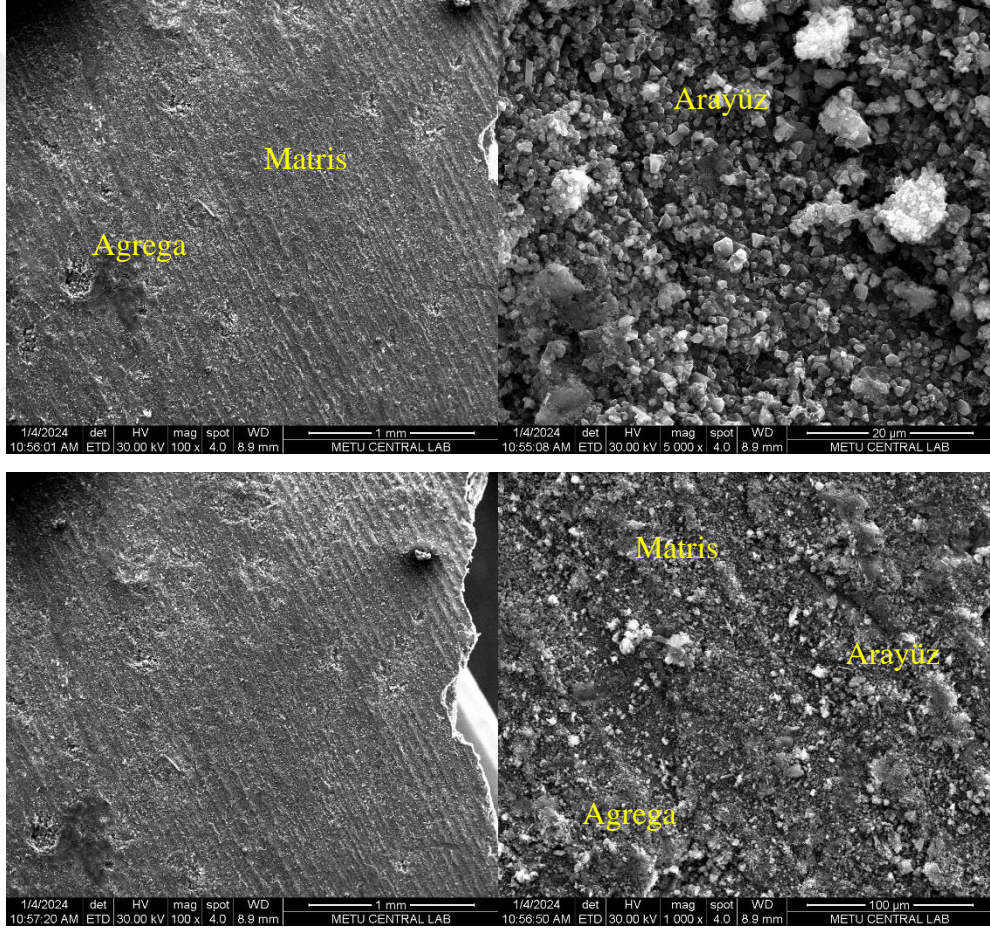


Şekil 4.14. SEM görüntüleme öncesinde kullanılan numunelerin makro fotoğrafları.



Şekil 4.15. B1 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.

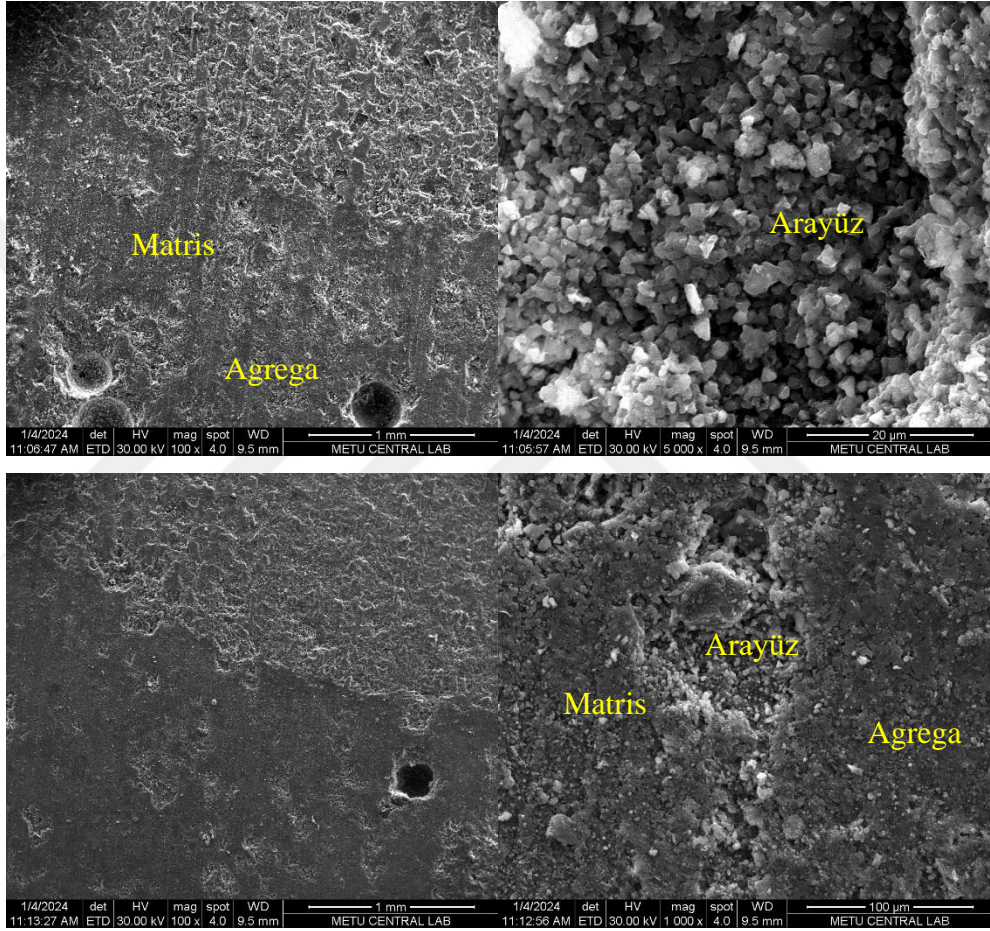
Şekil 4.15'te B1 tip hafif betonların SEM görselleri sunulmuştur. Soldaki görseller makro görüntüler olup muhtemel agregaya ve matris alanları işaretlenmiştir. Sağdaki mikro görseller ise tamamen arayüz bölgelerinden elde edilmiş yapıları göstermektedir. Soldaki yapılar yüksek oranda çimento bileşenlerini gösterirken, sağdaki mikro yapı görselinde yoğun portlandit ve CaCO_3 ile az miktarda etrenjit gözlenmiştir. Böylece arayüz kesitlerinde çimentonun yan ürünleri olan portlandit ve etrenjit yerine karbonatlı yapıların oluşmasının temel sebebi, numunelerin ortam koşullarında serbest halde bekletilmelerinden dolayı olduğu düşünülmüştür. SEM görüntülerinden elde edilen arayüz kesitlerinin ölçüleri 20 – 120 mikron arasındadır.



Şekil 4.16. B2 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.

Şekil 4.16'te B2 tip hafif betonların SEM görselleri sunulmuştur. Soldaki görseller makro görüntüler olup muhtemel agregaya ve matris alanları işaretlenmiştir. Sağdaki mikro görseller ise tamamen arayüz bölgelerinden elde edilmiş yapıları

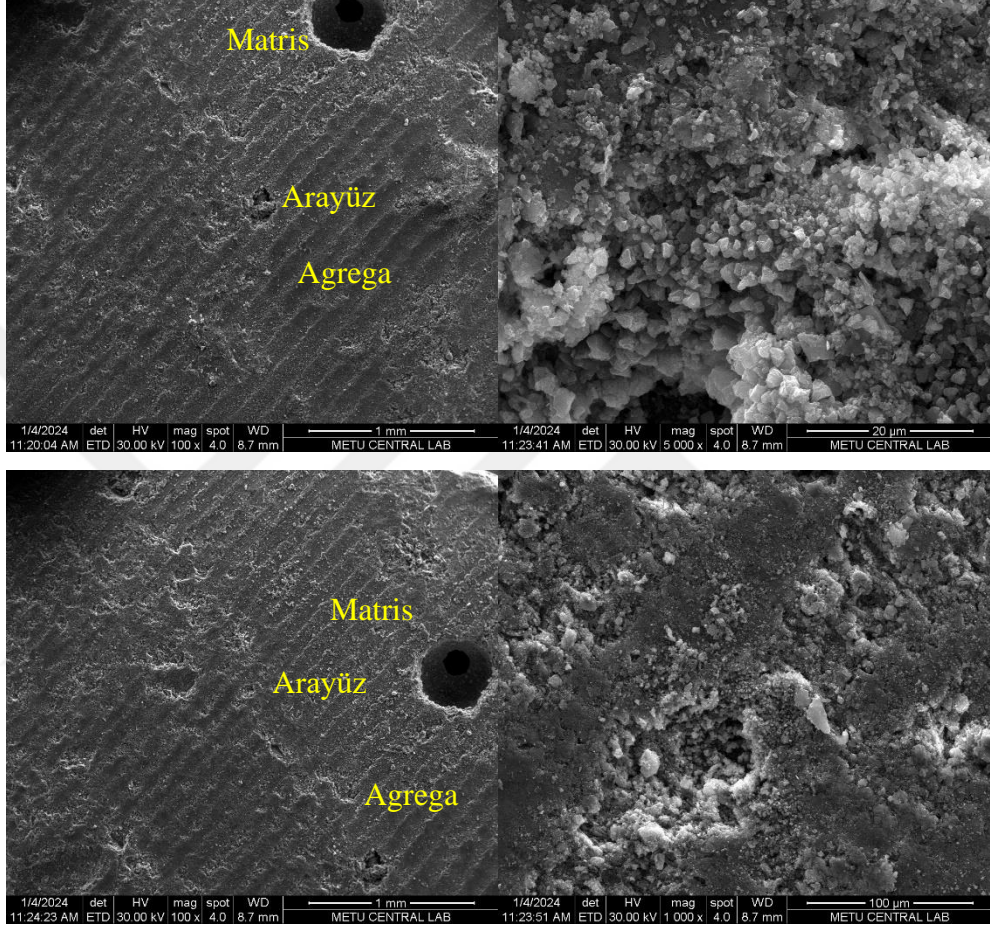
göstermektedir. Soldaki yapılar yüksek oranda CSH gösterirken, sağdaki mikro yapı görselinde $\text{Ca}(\text{OH})_2$, etrenjit ve yüksek oranda CaCO_3 gözlenmiştir. Böylece arayüz kesitlerinde çimentonun yan ürünleri olan portlandit ve etrenjit yerine karbonatlı yapıların oluşmasının temel sebebi, numunelerin ortam koşullarında serbest halde bekletilmelerinden dolayı olduğu düşünülmüştür. SEM görüntülerinden elde edilen arayüz kesitlerinin ölçüleri 5 – 40 mikron arasındadır.



Şekil 4.17. B3 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.

Şekil 4.17’de B3 tip hafif betonların SEM görselleri sunulmuştur. Soldaki görseller makro görüntüler olup muhtemel agrega ve matris alanları işaretlenmiştir. Sağdaki mikro görseller ise tamamen arayüz bölgelerinden elde edilmiş yapıları göstermektedir. Soldaki yapılar yüksek oranda çimento bileşenlerini gösterirken, sağdaki mikro yapı görselinde az miktarda portlandit ve etrenjit ile yoğun miktarda CaCO_3 gözlenmiştir. Böylece arayüz kesitlerinde çimentonun yan ürünleri olan

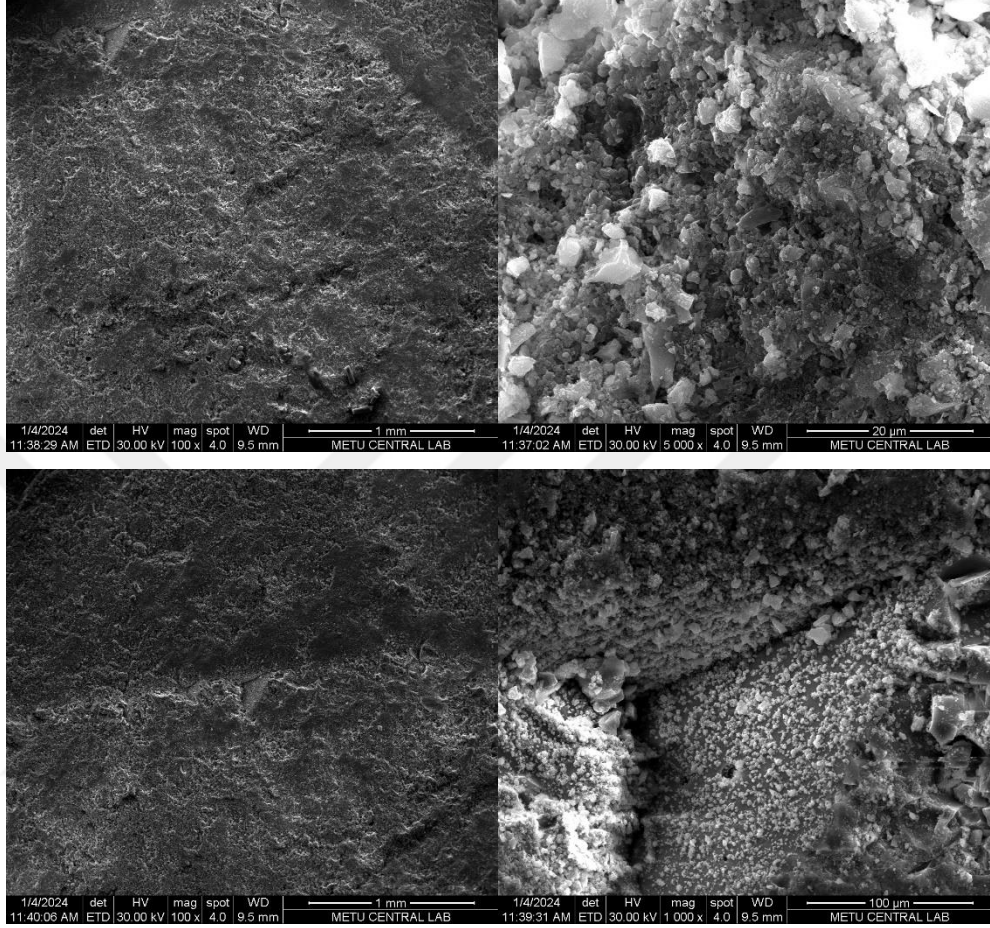
portlandit ve etrenjit yerine karbonatlı yapıların oluşmasının temel sebebi, numunelerin ortam koşullarında serbest halde bekletilmelerinden dolayı olduğu düşünülmüştür. SEM görüntülerinden elde edilen arayüz kesitlerinin ölçüleri 35 – 100 mikron arasındadır.



Şekil 4.18. B4 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.

Şekil 4.18’de B4 tip hafif betonların SEM görselleri sunulmuştur. Soldaki görseller makro görüntüler olup muhtemel agregata ve matris alanları işaretlenmiştir. Sağdaki mikro görseller ise tamamen arayüz bölgelerinden elde edilmiş yapıları göstermektedir. Soldaki yapılar yüksek oranda çimento bileşenlerini gösterirken, sağdaki mikro yapı görselinde yoğun olarak portlandit ve CaCO_3 ile çok az etrenjit gözlenmiştir. Böylece arayüz kesitlerinde çimentonun yan ürünleri olan portlandit ve etrenjit yerine karbonatlı yapıların oluşmasının temel sebebi, numunelerin ortam

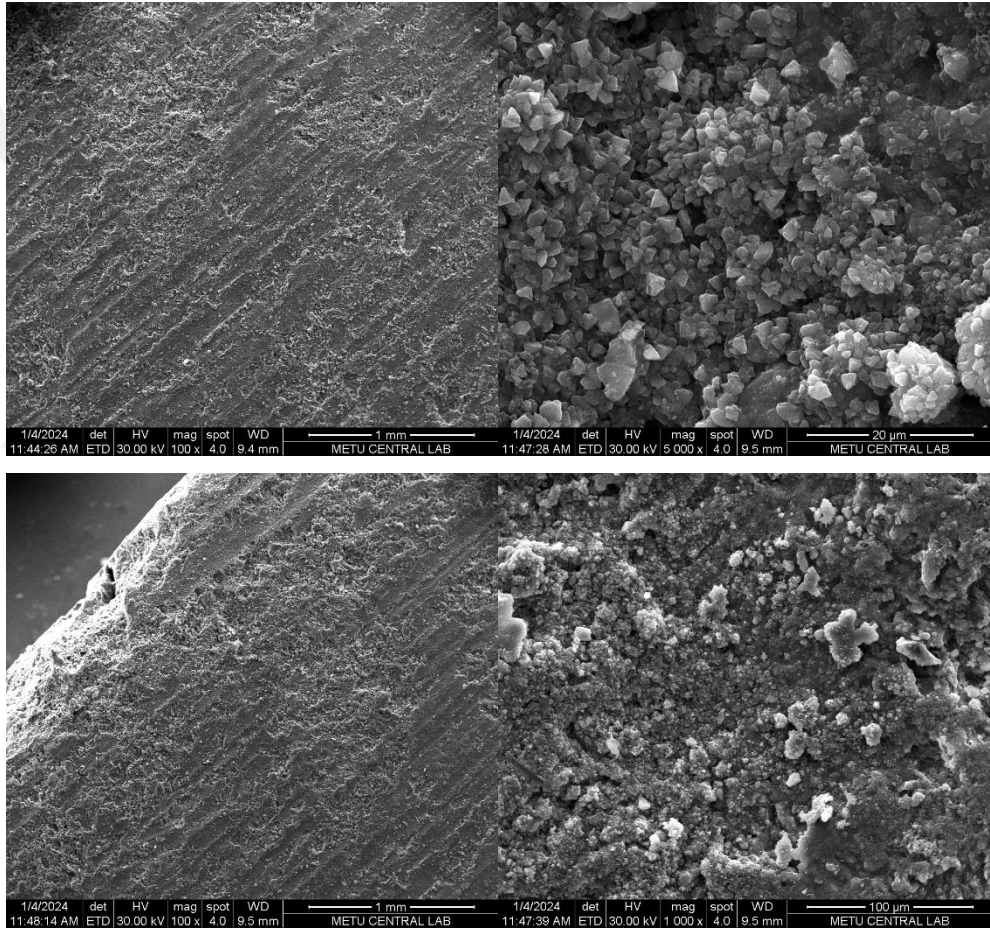
koşullarında serbest halde bekletilmelerinden dolayı olduğu düşünülmüştür. SEM görüntülerinden elde edilen arayüz kesitlerinin ölçüleri 30 – 100 mikron arasındadır.



Şekil 4.19. C1 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.

Şekil 4.19’da C1 tip hafif betonların SEM görselleri sunulmuştur. Soldaki görseller makro görüntüler olup kullanılan seramik atığı agregalarının çimento kimyasal yapısına çok yakın olması sebebiyle agrega, matris ve arayüz alanları hassas şekilde ayrıştırılamamıştır. Sağdaki mikro görseller ise tamamen arayüz bölgelerinden elde edilmiş yapıları göstermektedir. Soldaki yapılar yüksek oranda çimento bileşenlerini gösterirken, sağdaki mikro yapı görselinde yoğun olarak portlandit ve etrenjit gözlenmiştir. SEM görüntülerinden elde edilen arayüz kesitlerinin ölçüleri net olarak ölçülememiştir.

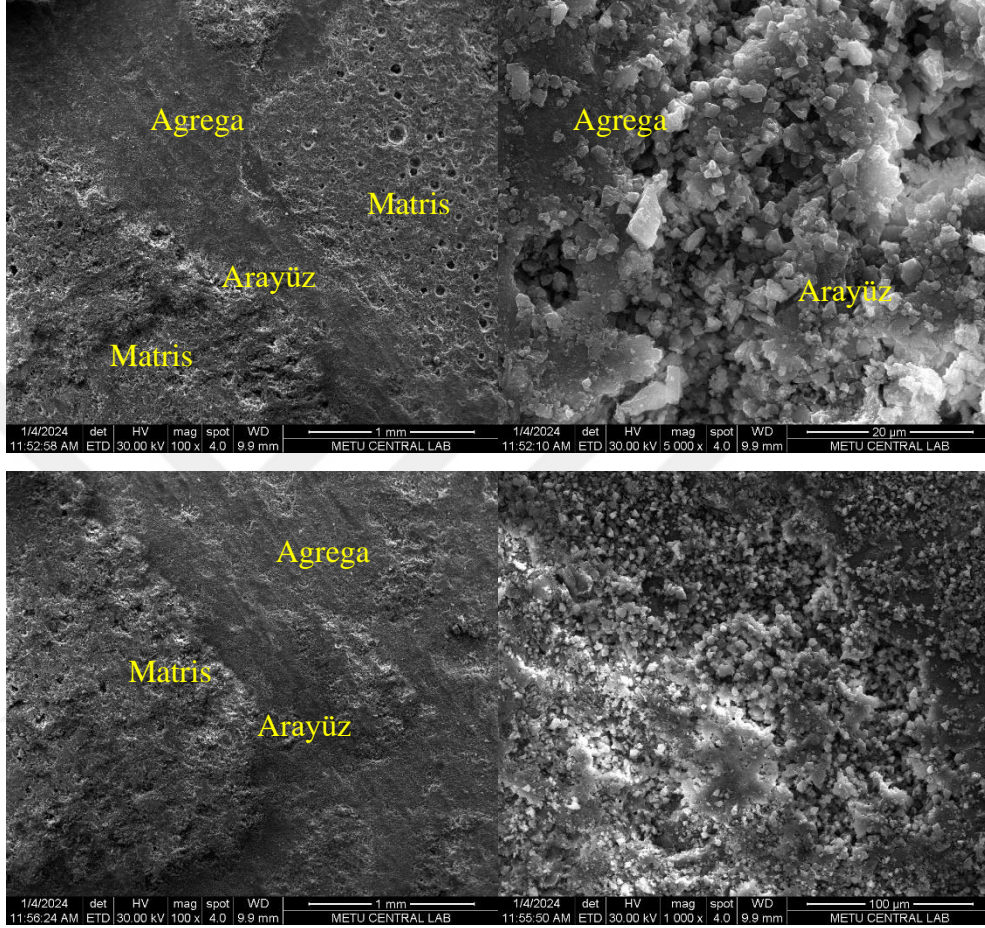
Şekil 4.20’de C2 tip hafif betonların SEM görselleri sunulmuştur. Soldaki görseller makro görüntüler olup kullanılan seramik atığı agregalarının çimento kimyasal yapısına çok yakın olması sebebiyle agrega, matris ve arayüz alanları hassas şekilde ayrıştırılamamıştır. Sağdaki mikro görseller ise tamamen arayüz bölgelerinden elde edilmiş yapıları göstermektedir. Soldaki yapılar yüksek oranda çimento bileşenlerini gösterirken, sağdaki mikro yapı görselinde yoğun olarak portlandit ve etrenjit gözlenmiştir. SEM görüntülerinden elde edilen arayüz kesitlerinin ölçüleri net olarak ölçülememiştir.



Şekil 4.20. C2 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.

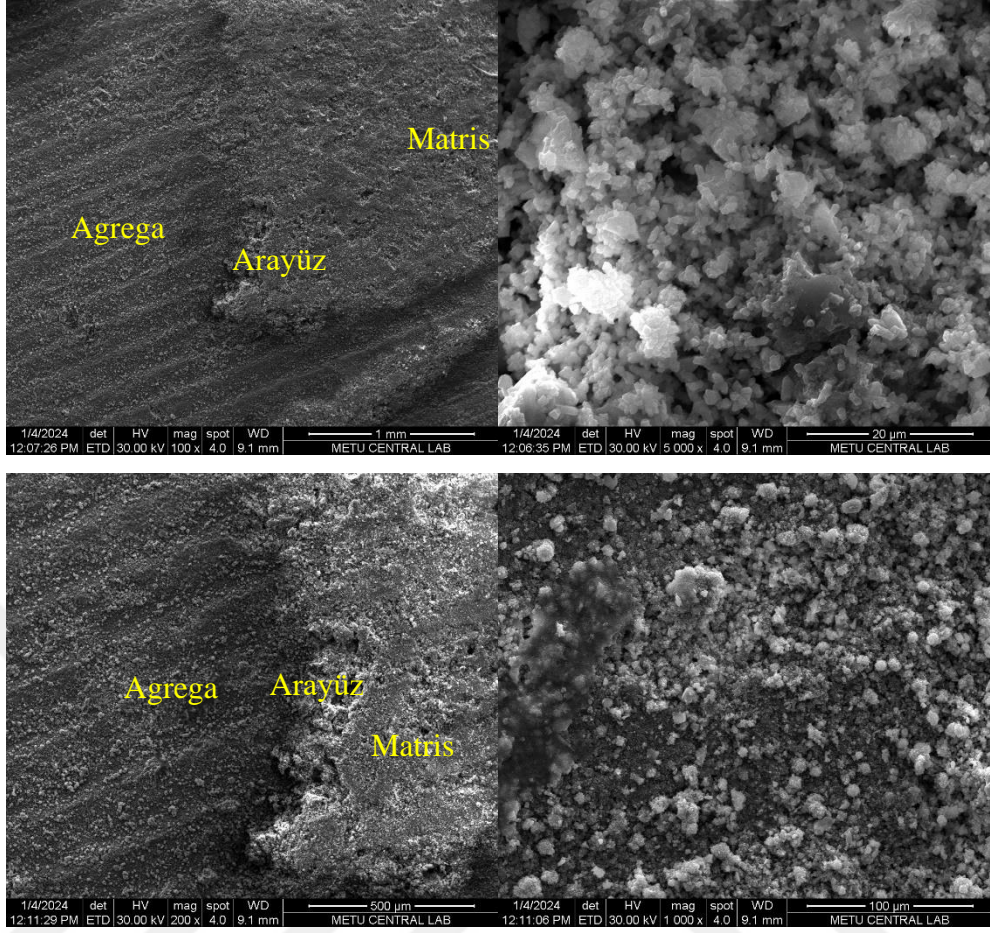
Şekil 4.21’de C3 tip hafif betonların SEM görselleri sunulmuştur. Soldaki görseller makro görüntüler olup kullanılan seramik atığı agregaları net bir şekilde ayrıştırılabilmektedir. Sağdaki mikro görseller ise tamamen arayüz bölgelerinden elde edilmiş yapıları göstermektedir. Soldaki yapılar yüksek oranda çimento bileşenlerini

gösterirken, sağdaki mikro yapı görselinde yoğun olarak portlandit ve az miktarda karbonatlı yapılar gözlenmiştir. SEM görüntülerinden elde edilen arayüz kesitlerinin ölçüleri 10 – 100 mikron arasındadır.



Şekil 4.21. C3 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.

Şekil 4.22’de C4 tip hafif betonların SEM görselleri sunulmuştur. Soldaki görseller makro görüntüler olup kullanılan seramik atığı agregaları net bir şekilde ayrıştırılabildiği görülmüştür. Sağdaki mikro görseller ise tamamen arayüz bölgelerinden elde edilmiş yapıları göstermektedir. Soldaki yapılar yüksek oranda çimento bileşenlerini gösterirken, sağdaki mikro yapı görselinde yoğun olarak portlandit ve az miktarda etrenjit yapıları gözlenmiştir. SEM görüntülerinden elde edilen arayüz kesitlerinin ölçüleri 10 – 100 mikron arasındadır.



Şekil 4.22. C4 tip beton ince kesitinden elde edilmiş SEM görüntüleri soldaki görsel 100x, sağdaki görsel 1000x büyütme.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Bu çalışmada kil tuğla atıkları ve karo seramik atıkları ayrı ayrı hafif beton üretmek amacıyla 0 – 8 mm boyutlarında agrega olarak kullanılmıştır. Üretilen betonların mekanik özelliklerini iyileştirmek ve çimento miktarını azaltmak amacıyla 8 – 16 mm boyutlu agrega grubu kireçtaşı agregası seçilmiş ve Dmax: 16 mm agrega boyutuna göre Fuller eğrisi dikkate alınarak agrega gradasyonu oluşturulmuştur. Toplam agrega miktarının %15'i olarak 8 – 16 mm boyutlu kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Üretilen tüm betonlarda %1,2 sabit oranda polikarboksilat esaslı bir kimyasal süper akışkanlaştırıcı ile arayüz iyileştirici olarak bilinen %8 oranında lateks (stiren bütadien) katkısı bazı gruplarda kullanılmıştır. Tüm hafif betonlarda kirece doymuş su kürü ile laboratuvar koşullarında bekletilecek şekilde ortam kürü gerçekleştirilmiştir. üretilen betonlarda taze hal ve sertleşmiş hal deneyleri gerçekleştirilerek, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. BHA değerleri dozajlara göre değişiklik göstermektedir. Tuğla atığı agregalı sertleşmiş betonlarda 1740 – 1820 kg/m³ ve seramik atığı agregalı sertleşmiş betonlarda 1710 – 1790 kg/m³ kuru BHA elde edilmiştir.
2. Böylece üretilen tüm betonların hafif beton olduğu belirlenmiştir.
3. Tuğla atığı agregalı sertleşmiş betonlarda 7 günlük basınç dayanım değerleri 23 – 33 MPa arasındadır.
4. Seramik atığı agregalı sertleşmiş betonlarda 7 günlük basınç dayanım değerleri 30 – 45 MPa arasındadır.
5. 28 günlük basınç dayanım değerleri su havuzunda bekletilmiş numuneler için 30 – 39 MPa, ortam küründe bekletilmiş 28 günlük beton numunelerin basınç dayanım değerleri ise 30 – 45 MPa arasındadır.

6. En yüksek basınç dayanımı tuğla atığı agregalı sertleşmiş betonlarda 45,08 MPa yani C30 basınç dayanım sınıfında beton, seramik atığı agregalı sertleşmiş betonlarda 57,66 MPa yani C35 basınç dayanım sınıfında beton üretilmiştir.
7. En yüksek basınç dayanımları lateks içeren hafif betonlarda gözlenmiştir.
8. Basınç altında su işleme derinlikleri tüm serilerde 19 – 22 mm arasında olup benzer sonuç göstermiştir.
9. Su emme oranları tuğla atığı agregalı betonlarda %6,32 – 9,50 arasında iken, seramik atığı agregalı sertleşmiş betonlarda %4,34 – 5,35 arasında olmuştur.
10. Klor geçirimsizliği seramik atığı agregalı sertleşmiş betonlarda daha düşük seviyede elde edilmiştir.
11. Lateks katkısı klor geçirimsizliğini azaltmıştır.
12. Üretilen tuğla ve seramik atığı agregalı hafif betonların 28 gün yaşındaki agrega-çimento arayüz ölçüleri geleneksel agregalı betonlara göre daha küçük olduğu (10 – 20 mikron) belirlenmiştir.
13. Tuğla atığı agregalı sertleşmiş betonlardaki agrega-çimento arayüzleri 14 – 18 mikron arasında ölçülürken, seramik atığı agregalı sertleşmiş betonlarda agrega-çimento arayüzleri 18 – 20 mikron olarak ölçülmüştür.
14. Lateks katkısı tuğla atığı agregalı betonlarda arayüz ölçülerini azaltacak şekilde bir etki gösterirken, seramik atığı agregalı betonlarda arayüz ölçülerini artıracak şekilde bir etki göstermiştir.

Çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçlar ve gözlemler neticesinde bazı öneriler ve yapılması gerekenler belirlenmiştir. Bunlara göre, kireçtaşı agregasının oranı, boyutları ve kaynağı ile ilgili değişimler, lateks oranındaki değişimler, su/çimento oranında oluşturulacak değişimler ile SA katkıda oluşturulacak değişimlerin çalışmanın üst seviyede değerlendirilebilmesini sağlayacağı düşünülmektedir. bunun yanı sıra elde edilen veriler doğrultusunda tasarımların endüstride uygulanabilmesi için dayanıklılık deneylerinin de sonuçlarının alınması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Akçaözoğlu, S., “Atık Pet Şişe Kırıklarının Hafif Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği”, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana 24-25 (2008).

Aksoy, H.S., “Hafif Betonların Dayanım Dayanıklılık Ve Ekonomik Yönden Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ 33 (1995).

Aktaş, Ö.U., “Polimer katkılı çimento esaslı kaplama malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 16 (2014).

Atabey, İ. İ. ve Öztürk, Z. B., “Seramik sağlık gereci atıklarının geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması” *Uluslararası Mühendislik Arastırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(1), 212–219. doi:10.29137/umagd.782733, (2021).

Atalar, O., “Kayısı Çekirdeği Kabuğunun İlave Edilmesi İle Elde Edilen Hafif Betonun Karakteristik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 21-22 (2006).

Bakırhan, M., “Pomza ve Perlit Kullanılarak Üretilen Kompozit Hafif Beton Tasarımı ve Özelliklerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Bitlis Eren Üniversitesi ve Dicle Üniversitesi*, Bitlis, Diyarbakır, 17-18 (2019).

Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., “Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, Yayın No:298 (2002).

Baş, B., “Lateks katkılı sıva harçlarının özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 107 (2009).

İnternet: Beşergil, B., “Endüstri Polimerleri”, <http://www.bayar.edu.tr/besergil/endustri-polimerleri.pdf>, (2010).

Berra, M. ve Ferrara, G., “Normal Weight and Total Lightweight High Strength Concretes”, *ACI SP*, 121: 215-238 (1990).

Bideci, A., “Polimer kaplı pomza agregalarla elde edilen betonların özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ 128 (2011).

Canbakış, B., “Gelenekselden Moderne Sürdürülebilir Mimari Mekan Üretimi” Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Bursa, 19 (2021).

Ceran A., “Polimer Esaslı Lateks Katkının Çimento Harç Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 23 (2008).

Chandra, S. ve Berntsson, L., “Lightweight Aggregate Concrete”, *Noyes Publications*, USA, 1-430 (2003).

Chee Lum Wonga, Kim Hung Mo., Soon Poh Yap, U. Johnson Alengaram, Tung-Chai Ling, “Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review” *Journal of Cleaner Production* 195: 226-239, doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.193 (2018).

Copeland, L.E., Bragg, R.H., “Determination of Ca(OH)₂ in Hardened Pastes with X-ray Spectrometer”, *Port. Cem. Assoc. Rep.*, Chicago (1953).

Çam, A., “İnce Agregaya Yerine Kullanılan Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bartın, 18 (2019).

Demir, İ., “İnşaat yıkıntı atıklarının beton üretiminde kullanımı ve beton özelliklerine etkisi” *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 105–114 (2009).

Derrick J. Andersona, Scott T. Smithb, Francis T.K. Aua., “Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate”, *Construction and Building Materials*, 117:20-28, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.153 (2016).

Doğan C., “Mermer tozu ve endüstriyel atık içeren harçların mekanik özelliklerinin deneysel yöntemlerle incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyonkarahisar, 15-16 (2019).

Doğan Ş., “Polimer latekslerin betondaki performanslarının saptanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 22 (2021).

İnternet: Engin, Y., “Beton ve Çimento. Sıfır Karbon Hedefinde Yapısal Beton” <https://www.betonvecimento.com/beton-2/sifir-karbon-hedefinde-yapisal-beton-2> (2020).

Erkek, S., “Karbon siyahı/yağ ve karbon siyahı/dolgu maddesi oranının farklı vulkanizasyon sistemlerinde EPDM, NBR ve SBR elastomerlerinin fiziko-mekaniksel özellikleri üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 156 (2007).

Faust, T. ve Gert König, E.H., “Stres-Strain Curves of High Strength Lightweight Concrete”, *LACER*, 2: 103-109 (1997).

Gao, Y., Jing, H., Yu, Z., Li, L., Wu, J. ve Chen, W., “Particle size distribution of aggregate effects on the reinforcing roles of carbon nanotubes in enhancing concrete ITZ”, *Construction and Building Materials*, 327, 126964. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126964 (2022).

Gökçe, H.S., “Hafif Beton Üretiminde Ham ve Genleştirilmiş Perlitin Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 25-26 (2010).

Gül, M., “Hafif beton agregası olarak atık plastiklerin ve PET’İN kullanımının araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 20-21 (2018).

Gülgül, S., “Genleştirilmiş camın hafif beton agregası olarak değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 19 (2019).

Güneş, O., “Genleştirilmiş Kil Agregası İle Taşıyıcı Hafif Beton Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kütahya, 17-18 (2019).

Hassan M. Magbool, “Utilisation of ceramic waste aggregate and its effect on Eco-friendly concrete: A review”, **Journal of Building Engineering** 47:103815, doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103815 (2022).

Hasdemir, S., “Marmara bölgesindeki farklı kökenli doğal kumların beton özelliklerine etkisi”, Doktora Tezi, **İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 23 (2007).

Hatungimana, D., “Polimerle Modifiye Edilmiş Geri Dönüşüm Agregası İçeren Betonların Özellikleri”, Doktora Tezi, **Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 29-31 (2019).

Işık, A., “Farklı mineral katkı içeren harç numunelerinin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 17 (2018).

Jennings, H.M., “Design Of High Strength Cement Based Materials, Part2: Microstructure”, **Materials Science And Technology**, (1998)

Jagadeesh Bommisettya, Tirukovela Sai Keertana, A. Ravithejab, K. Mahendra, “Effect of waste ceramic tiles as a partial replacement of aggregates in concrete” **Materials Today: Proceedings** 19:875-877, doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.230 (2019)

Kabay, N., “Hafif agregalı betonun boşluk yapısının mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi”, Doktora Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 25-26 (2009).

Kale, M.O., “Pomza Agregası Kullanılarak Üretilen Hafif Beton Özelliklerinin Uçucu Kül İkamesi İle İyileştirilmesi Üzerine Deneysel Bir Araştırma”, Yüksek Lisans Tezi, **Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 21 (2020).

Kocataşkın, F., “Betonun Dünü Bugünü Yarını, 2. Ulusal Beton Kongresi Yüksek Dayanımlı Beton”, *Kardesler Matbaası, TMMOB _İnşaat Mühendisleri Odası* s.23–42. (1991).

Koman, H., “Soğuk Bağlama Yöntemi İle Elde Edilen Yapay Agregalar İle Taşıyıcı Hafif Beton Üretimi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 23-25 (2015).

Korouzhdeh, T., Eskandari-Naddaf, H. ve Kazemi, R., “The ITZ microstructure, thickness, porosity and its relation with compressive and flexural strength of cement mortar; influence of cement fineness and water/cement ratio”, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. doi:10.1007/s11709-021-0792-y (2022).

Liao, K.-Y., Chang, P.-K., Peng, Y.-N. ve Yang, C.-C., “A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete”, *Cement and Concrete Research*, 34(6), 977–989. doi:10.1016/j.cemconres.2003.11.019 (2004).

Miguel C.S. Nepomucenoa, Rui A.S. Isidorob, José P.G. Catarino, “Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste”, *Construction and Building Materials* 165:284-294, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.052 (2018).

Mohammed T.U., Aziz H.M., Md. Rubayet I.K., S.M. Yashina, Zia U.A.Z. *Construction and Building Materials* 134: 713-726, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.164 (2017).

Mohamed A., Bassam A. Tayeh, Ibrahim Saad Agwa, “Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete”, *Construction and Building Materials* 273: 123073, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123073 (2020).

Neville, A. M., “Properties Of Concrete, Pitmann Publishing”, *NT. Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments (NT BUILD 492)* London (1999).

Özturan, T., “Özel betonlar”, *Hazır Beton Dergisi*, 70-83 (2013).

Pei Ge, Wei Huang, Jiarui Zhang, Wenli Quan, Yuting Guo, “Concrete Materials, Properties, Specifications and Testing, Second Edition” *Construction and Building Materials* 304: 124584, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124584 Popovics, S., 1992. (2021).

Postacıoğlu, B., “Bağlayıcı Maddeler”, *Beton, Cilt 1*, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul (1986).

Postacıoğlu, B., “Bağlayıcı Maddeler, Agregalar”, *Beton-Cilt 2*, Matbaa Teknisyenleri Basımevi. İstanbul (1987).

İnternet: Seramik Üretimi, Sektörel Uygulama Kılavuzu 2020
<https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/plan-program/SeramikSektorRaporu2020.pdf>,
2020

Sadrekarimi, A., “Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(3), 409-417. doi.org/10.3151/jact.2.409 (2004).

Shaodan Houa, Zhenhua Duana, Jianzhuang Xiaoa, Long Lic, Yuhang Baia, “Effect of moisture condition and brick content in recycled coarse aggregate on rheological properties of fresh concrete”, *Journal of Building Engineering* 35:102075, doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102075 (2021).

Sundaramoorthy G. ve Meyyappan P., “Role of self-curing mechanism in lightweight concrete”: *A state-of-the-art report, International Review of Applied Sciences and Engineering*, V.15, Issue: 2, pp. 200–210, doi.org/10.1556/1848.2023.00695 (2024).

Şaşmaz, Ç., “Kendiliğinden yerleşen betonlarda çimento, mineral katkı ve agrega cinsinin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bayburt, 35-36 (2015).

Şimşek, O., *Beton ve Beton Teknolojisi*, Seçkin Yayıncılık 3. Baskı, Ankara, 1-293. (2009).

Topal, Ö., “Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların yangın dayanımına geri dönüştürülmüş agreganın etkisinin araştırılması”, Orphanet Journal of Rare Diseases, Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya, 27 (2020).

Topçu İ.B., Bilir T., Baylavlı H., “Kendiliğinden Yerlesen Betonun Özellikleri” *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi* C.XXI, S.1. (2008).

TS EN 12350-2, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, (2019).

TS EN 12350-6, 2019. Beton – Taze beton deneyleri – Bölüm 6: Birim hacim kütlesi, (2019).

TS EN 12350-8, 2019. Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 8: Kendiliğinden yerleşerek sıkışan beton - Çökme yayılma deneyi, (2019).

TS EN 12390-2, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması, (2019).

TS EN 12390-3, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, (2019).

TS EN 12390-6, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, (2019).

TS EN 12390-7, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini, (2019).

TS EN 12390-8, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini, (2019).

Tuyan, M., “Doğal ve atık malzemelerle geopolimer harç ve beton geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir (2017).

Tutan, E., “Lateksin Agresif Ortamlardaki Sertleşmiş Beton ve Harç Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir (2015).

İnternet: Türkiye Hazır Beton Birliği. (y.y.) Hazır beton sektörü istatistikleri. <https://www.thbb.org/sector/istatistikler/> (2022).

İnternet: Türkiye İstatistik Kurumu “Atık istatistikleri 2020”. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2020-37198> (2021).

Türkmenoğlu, Z. F., “Endüstriyel atık katkılı kendiliğinden yerleşen hafif beton üretilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 19 (2017).

Yüksel, C., “Atık cam agregasının beton özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 31 (2009).

Zahra Keshavarz and Davood Mostofinejad, “Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete”, *Construction and Building Materials* 195:218-230 doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.033 (2019).

Zhang, M.H and Gjorj, O.E., “Mechanical Properties of High Strenth Lightweight Concrete”, *ACI Materials Journal*, 88(3): 240-247 (1991).

ÖZGEÇMİŞ

Harun YANPINAR 1997 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği Bölümünde lisans eğitimine başlamış ve 2001 yılında mezun olmuştur. 2014 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne başlamış ve 2016 yılında Mühendislik eğitimini tamamlamıştır. 2021 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2004 - 2023 yılları arasında İstanbul'da bulunan Türkiye Hazır Beton Üreticileri Birliği Derneği Kalite Güvence Sistemi İktisadi İşletmesinde Ürün Denetimi Müdürü olarak çalışmıştır. Halen İstanbul'da hazır beton üretimi yapan özel bir şirkette Kalite Müdürü Yardımcısı olarak görev yapmaktadır.