



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PROFİLLİT KATKILI BETONLARIN RADYASYON
ZIRHLAMA, MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YEMEN KAVUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2024

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PROFİLLİT KATKILI BETONLARIN
RADYASYON ZIRHLAMA, MEKANİK VE
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YEMEN KAVUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

KAHRAMANMARAŞ 2024

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bilgilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

PİROFİLLİT KATKILI BETONLARIN RADYASYON ZIRHLAMA, MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YEMEN KAVUN

ÖZET

Bu tez çalışmasında, beton içerisine %10-%20-%30-%100 oranlarında eklenen kum ve agrega profillitin ikame edilmesiyle birlikte beton numuneleri hazırlanmıştır. Tez çalışmasında hem basınç hem de ultrasonik yöntemleri kullanılarak beton numunelerinin mekanik özellikleri, teknolojik özellikleri, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık (200°C-400-600-800-1000°C) koşullarındaki dayanıklılıkları incelenmiştir. Çalışmada hazırlanan beton numunelerinin mikro yapı özellikleri 7-28-90 günlük süre boyunca incelenmiştir. Üretilen bu betonların radyasyon geçirgenlikleri de incelenerek radyasyonlu alanlarda kullanılabilirliği ortaya konmaya çalışılmıştır.

Özellikle, profillit kumu ve agrega kullanımı, 7-28-90 gün sonra referans betona kıyasla numunelerin basınç dayanımını %21-63 oranında önemli ölçüde artırırken, donma-çözülme döngüleri sırasında kütle kaybını %4,6'ya kadar azaltmıştır. Hazırlanan numuneler farklı yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, hava soğutma rejimine sahip olanların referans betondan %45 daha yüksek bir basınç değerine ulaştığı keşfedilmiştir. Mikro yapı görüntüleri, 90 gün boyunca C—S—H, CH ve portlandit hidratasyon ürünlerinin oluşumunu ortaya koymuş ve tespit edilen basınç dayanım değerlerini desteklemiştir. Çalışma ayrıca radyasyon zırhlama özellikleri için incelenen 90 günlük beton numunelerinde etkin bir lineer soğurma katsayısına (LAC) sahiptir. LAC değerleri kullanılarak hesaplanan MAC, HVL, TVL ve MFP parametrelerine göre, bu beton numunelerinin uygun zırhlama malzemeleri olduğu ortaya konmuştur. Profillit ikameli numuneler, yüksek mukavemetli beton üretimi için potansiyel taşımanın yan sıra, yüksek sıcaklık ortamlarında kullanıma uygunluk ve radyasyon kaynaklarının olduğu alanlarda zırhlama etkinliği göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton, Agrega, Profillit, Radyasyon zırhlama, durabilite, mekanik özellikler, 60Co

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Fen Bilimler Enstitüsü
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Aralık/2024

Danışman: Doç. Dr. Yusuf KAVUN

İkinci Danışman: Doç. Dr. Mustafa EKEN

Sayfa Sayısı: 89



INVESTIGATION OF RADIATION SHIELDING, MECHANICAL, AND DURABILITY PROPERTIES OF PYROPHYLLITE-DOPED CONCRETES

(M.Sc. THESIS)

YEMEN KAVUN

ABSTRACT

In this thesis study, concrete samples were prepared by substituting sand and aggregate pyrophyllite added into the concrete at the rates of 10%-20%-30%-100%. In the thesis study, the mechanical properties, technological properties, freeze-thaw and high temperature (200°C-400-600-800-1000°C) durability of concrete samples were examined using both pressure and ultrasonic methods. The microstructural properties of the concrete samples prepared in the study were examined for a period of 7-28-90 days. The radiation permeability of these produced concretes was also examined and its usability in areas exposed to radiation was tried to be demonstrated.

In particular, the use of pyrophyllite sand and aggregate significantly increased the compressive strength of the samples by 21-63% compared to the reference concrete after 7-28-90 days, while reducing mass loss during freeze-thaw cycles by up to 4.6%. After the prepared samples were exposed to different high temperatures, it was discovered that those with an air cooling regime reached a pressure value 45% higher than the reference concrete. Microstructure images revealed the formation of C-S-H, CH and portlandite hydration products over 90 days and supported the determined compressive strength values. The study also demonstrates an effective linear absorption coefficient (LAC) in 90-day concrete samples examined for radiation shielding properties. According to the MAC, HVL, TVL and MFP parameters calculated using LAC values, it has been revealed that these concrete samples are suitable armoring materials. In addition to having potential for high-strength concrete production, pyrophyllite substituted samples have shown suitability for use in high temperature environments and shielding effectiveness in areas with radiation sources.

Keywords: Concrete, Aggregate, pyrophyllite, Radiation shielding, durability, mechanical properties, ^{60}Co .

Kahramanmaraş Sütçü Imam University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Materials Science and Engineering, December/2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yusuf KAVUN

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa EKEN

Page number: 89



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konumun belirlenmesinde, araştırılmasında, deneysel laboratuvar çalışmalarında ve tez yazım sürecimde sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile beni yönlendiren, her türlü sorularımı sabırla yanıtlayan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Yusuf KAVUN ve ikinci danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa EKEN'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda yer alan beton üretim süreçlerini yürüttüğüm İstiklal Üniversitesi Elbistan MYO İnşaat laboratuvarı çalışanı Sayın A. Selim AKDAĞ ve radyasyon ölçüm süreçlerinin yürütülmesini Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi ÜSKİM radyasyon ölçüm laboratuvarında takip eden Öğr. Gör. Selami EKEN'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Hayatımın her aşamasında her zaman yanımda olan, beni bu günlere getiren ve maddi manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen canım anne ve babama, oğullarım Ahmet Çağlar ve Ümit Rüzgar ile sevgili kızım Zübeyde Eylül'e en içten saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Yemen KAVUN

İÇİNDEKİLER

ÖZET	İ
ABSTRACT	İİİ
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR	İX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLO DİZİNİ.....	Xİ
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM	7
3.1. Beton.....	7
3.2. Betonu Oluşturan Hammaddeler	11
3.2.1. Çimento	11
3.2.2. Agregas	12
3.2.3. Su	13
3.2.4. Kimyasal Bileşenler.....	14
3.2.5. Mineral Katkıları	15
3.3. Beton Türleri	15
3.3.1. Hafif Beton	16
3.3.2. Normal Beton	17
3.3.3. Ağır Beton	17
3.3.3.1. Ağır Betonda Kullanılan Agregalar.....	19
3.3.3.1.1. Profilit	19
3.4. Durabilite ve Betonda Durabilitenin Özellikleri	21
3.5. Beton Basınç Dayanımı	23
3.5.1. Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler	23
3.5.1.1. Çimento Tipi ve Miktarı.....	23
3.5.1.2. Su/Çimento Oranı	23
3.5.2. Agregas Özellikleri	23
3.5.3. Katkı Maddeleri.....	24
3.5.4. Kür Koşulları	24
3.6. Betonda Durabiliteyi Etkileyen Özellikler	24
3.6.1. Yüksek Sıcaklık Direnci Deneyi	24

3.6.2.	Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri	25
3.6.2.1.	Fiziksel ve Kimyasal Değişimler.....	25
3.6.2.2.	Termal Genleşme ve Mikro Çatlaklar	25
3.6.2.3.	Gözeneklilik ve Sıcaklık.....	25
3.6.2.4.	Yüksek Sıcaklık Direncini Etkileyen Faktörler	25
3.7.	Ultrasonik Ses.....	26
3.8.	Donma Çözünme	27
3.9.	Radyasyon	27
3.9.1.	Radyasyonun Çeşitleri.....	28
3.9.1.1.	İyonlaştırıcı radyasyon	28
3.9.1.2.	İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar	30
3.9.2.	Radyasyondan Korunma Yolları	30
3.9.2.1.	Zaman	30
3.9.2.2.	Mesafe	30
3.9.2.3.	Zırhlama	31
3.9.2.4.	Gama (γ) Radyasyon Zırhlama.....	33
3.10.	Yöntem	35
3.10.1.	Beton Numunelerinin Basınç Dayanımı.....	37
3.10.2.	Ultrasonik Ses İletim Hızı	37
3.10.3.	Donma-Çözülme Deneyi	38
3.10.4.	Yüksek Sıcaklık Direnci.....	39
4.	ARAŞTIRMALAR VE BULGULAR.....	40
4.1.	Beton Numunelerin Basınç Dayanımı	40
4.2.	Ultrasonik Ses Geçirgenlik Testi.....	43
4.3.	Donma ve Çözülmeden Sonra Basınç Dayanımı	45
4.4.	Yüksek Sıcaklık Sonrası Beton Performansı.....	47
4.4.1.	Artık Basınç Dayanımı	47
4.4.2.	Kütle Kaybı Oranı	50
4.4.3.	Ultrasonik Darbe Hızı.....	52
4.5.	Görsel Değerlendirme.....	54
4.6.	Mikro Yapı Araştırmaları (SEM)	55
4.7.	Gamma Radyasyon (γ) Zırhlama Sonuçları	58
5.	SONUÇ.....	64
	KAYNAKÇA	67

ÖZ GEÇMİŞ.....	73
CURRICULUM VITAE	74



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklamalar
°C	santigrad derece
m ³	metreküp
mm	milimetre
cm	santimetre
mA	miliamper
V	volt
kN	kilonewton
MPa	megapascal
γ	gama ışını
keV	kilo elektron volt
LAC	(μ) Lineer soğurma katsayısı
MAC	kütle soğurma katsayısı
HVL	Yarı geçirgenlik değeri
TVL	Onda-bir geçirgenlik değeri
MFP	Ortalama serbest yol
GJ	Gigajoule
TS	Türk Standartları
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
UHPC	Ultra yüksek performanslı beton
SCC	Kendiliğinden sıkışan beton
MTA	Maden Tetkik ve Arama
BS	Beton sınıfı
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği (American Society for Testing and Materials)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3. 1. Profillit kum ve Agregada görselleri.....	13
Şekil 3. 2. Profillit	20
Şekil 3. 3. Profillitin Elde Edildiği Bölgenin Haritada Konumu.....	20
Şekil 3. 4. Farklı Radyasyon Tipleri İçin Giricilik Mesafeleri	28
Şekil 3. 5. Radyasyon ve Koruyucu Engel (Tenmark.gov.tr).....	32
Şekil 3. 6: Deneysel Radyasyon Ölçüm Şeması (Kavun and Eken, 2024).	35
Şekil 4. 1. Profillit Kum ve Agregada İkamelili Betonun 7-28-90 Günlük Basınç Değerleri	43
Şekil 4. 2. Ultrasonik Ses Geçirgenlik Veri Grafiği	45
Şekil 4. 3. Donma-Çözülme Sonrası Dayanım Verileri	46
Şekil 4. 4. Donma-Çözülme Sonrası Ultrasonik Ses Geçiş Verileri Grafiği.....	47
Şekil 4. 5. Yüksek sıcaklık sonrası profillit kum katkıli numunelerin basınç dayanım değer grafiği	49
Şekil 4. 6. Yüksek sıcaklık sonrası profillit agregada katkıli numunelerin basınç dayanım değer grafiği.....	50
Şekil 4. 7. Profillit Kum Katkıli Numunelerin Yüksek Sıcaklık Sonrası Kütle Kaybı Değerleri.....	51
Şekil 4. 8. Profillit Agregada Katkıli Numunelerin Yüksek Sıcaklık Sonrası Kütle Kaybı Değerleri.....	52
Şekil 4. 9. Profillit kum katkıli numunelerinin yüksek sıcaklık sonrası upv (Ultrasonik Darbe Hızı) değerleri.....	53
Şekil 4. 10. Profillit agregada katkıli numunelerinin yüksek sıcaklık sonrası upv (Ultrasonik Darbe Hızı) değerleri.....	54
Şekil 4. 11. Profillit kum katkıli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görselleri.....	54
Şekil 4. 12. Profillit agregada katkıli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görselleri	55
Şekil 4. 13. Profillit kum ve agregada katkıli numunelerin SEM görüntüleri	57
Şekil 4. 14. Profillit katkıli betonlara ait Lineer Soğurma Katsayıları (LAC).....	58
Şekil 4. 15. Profillit katkıli betonlara ait Kütle Soğurma Katsayıları (MAC)	59
Şekil 4. 16. Profillit katkıli betonlara ait Yarı Geçirgenlik Değeri (HVL)	60
Şekil 4. 17. Profillit katkıli betonlara ait Onda-Bir Geçirgenlik Değeri (TVL).....	61
Şekil 4. 18. Profillit katkıli betonlara ait Ortalama Serbest Yol Değeri (MFP).....	62

TABLO DİZİNİ

Tablo 3. 1. Betonun Tarihsel Gelişimi (Kocataşkın, 1991).....	8
Tablo 3. 2. Betonun Avantajları ve Dezavantajları	10
Tablo 3. 3. Profillit ve CEM I 42.5 R Çimentosunun Kimyasal ve Fiziksel Analizi (%)... ..	12
Tablo 3. 4. Kullanılan Agreganın özellikleri.....	12
Tablo 3. 5. Beton Türleri ve Yoğunluk Tablosu (TS EN 206-1)	15
Tablo 3. 6. TS EN 206-1/Nisan 2002'ye göre oluşturulan Hafif Beton Basınç Dayanım Tablosu	16
Tablo 3. 7. TS EN 206-1/Nisan 2002'ye Göre Normal ve Ağır Betonlar için Basınç Dayanım Tablosu.....	18
Tablo 3. 8. Beton Numunelerinin Karışım Oranları, Taze Betonun Özellikleri ve 1 m ³ Beton Karışımının Numune Adları	36
Tablo 3. 9. Ultrasonic Tes Cihaz Görsele	38
Tablo 3. 10. Donma-Çözülme Ölçüm Cihaz Görsele	38
Tablo 3. 11. Yüksek Sıcaklık Fırını.....	39
Tablo 4. 1. Profillit Kum ve Agregaya Katkılı Betonun 7-28-90 Günlük Basınç Değerleri	42
Tablo 4. 2. Ultrasonik Ses Geçirgenlik Veri Tablosu.....	44
Tablo 4. 3. Donma-çözülme	46
Tablo 4. 4. Yüksek sıcaklık sonrası profillit kum katkılı numunelerin basınç dayanım değerleri.....	49
Tablo 4. 5. Pirofillit agrega katkılı numunelerin bağıl artık basınç dayanımı değerleri.....	50
Tablo 4. 6. Profillit kum katkılı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası kütle kaybı değerleri	51
Tablo 4. 7. Profillit agrega katkılı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası kütle kaybı değerleri.....	51
Tablo 4. 8. Profillit Kum Ve Agregaya Katkılı Numunelerinin Yüksek Sıcaklık Sonrası Upv (Ultrasonik Darbe Hızı) Değerleri	53
Tablo 4. 9. Profillit katkılanmış betonların Radyasyon zırlama ölçüm sonuçları	63

1. GİRİŞ

Beton; su, çimento, agrega (kum, çakıl, kırma taş vb.) ve kimyasal katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılarak oluşturulan inşaat malzemesidir. Beton, sertleşme ve dayanıklılık özellikleri kazandıkça taş benzeri bir dokuya sahip olur ve çok güçlü, uzun ömürlü yapılar oluşturulur.

Bilimsel tanımıyla beton, çimento, su ve agregaların kimyasal reaksiyonları sonucu meydana gelen bağlayıcı bileşenlerin oluşturduğu bir kompozit malzemedir. Çimento, su ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) gibi kristal yapılar oluşturur. Bu süreç, hidrasyon olarak adlandırılır ve betonun sertleşmesini sağlar. Agregalar ise betonun dayanıklılığını ve hacmini artırır.

Çimento su ile reaksiyona girerek betonun sertleşmesini sağlar. Su hidrasyon reaksiyonunu başlatan ve betonu akışkan hale getiren bileşendir. Agregalar betonun yapısını oluşturan ve mekanik özelliklerini (dayanıklılık, yoğunluk vb.) belirleyen kum, çakıl veya kırma taş gibi malzemelerdir. Kimyasal katkı maddeleri betonun özelliklerini iyileştiren (süper akışkanlaştırıcılar, hızlandırıcılar, geciktiriciler vb.) ek bileşiklerdir.

Beton, farklı agregaların kullanımı ve çimento-su oranları gibi faktörlere bağlı olarak çeşitli türlerde ve dayanıklılıkta üretilebilir. Bu nedenle, yapıların gereksinimlerine göre betonun formülasyonu özelleştirilebilir.

Betonun sadece su ve çimento karışımından elde edilmesi fiziksel ve kimyasal bakımdan özellikle ekonomik değildir. Bu nedenle su-çimento karışımına ilave olarak beton içerisinde kullanılan agregalar bir diğer malzemedir. Beton sınıfına bağlı olarak, 1m³ betonun yaklaşık %75'ini agregalar oluşturur. Agregalar dane boyutuna göre sınıflandırılmaktadır. Dane çapı 2-8 mm aralığında ise ince agregalar, 8-32 mm aralığında ise iri agregalar olarak adlandırılmaktadır. Agregalar doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Betonda kullanılacak agregalar TS 706 EN 12620'ye uygun olmalıdır.

Betondan elde edilecek en yüksek değerlerde dayanım için betonu oluşturan malzemelere ek olarak farklı malzemeler kullanılabilir. Bunlardan bir taneside profillittir.

Profillit, 1829 yılında R. Harmen tarafından Yunanca kelimeler olan "pyro" ateş ve "Phyllite" kaya veya taş anlamındaki kelimelerden türetilmiştir. Profillit H₂Al₂(SiO₃)₄ teorik formülünü sahip hidrate olmuş bir Alüminyum Silikat malzemedir. Katkı olarak kullanılmış ve betona belirli oranlarda eklenmiş Profillit, betonun özelliklerini

eklenen katkı malzemesinin oranına göre geliştirmeyi amaçlamaktadır. Katkı maddelerinin kullanım amacı dahil edildikleri betonun mukavemetini ve diğer mekanik özelliklerini artırmak için kullanılmaktadır. Profillit katkılı betonun kullanım amaçları maruz kalabileceği dış faktörlere bağlı olan, aşınma, deformasyon vb. etkileri minimize etmek için kullanılır.

Profillit katkılı beton kullanımı, özellikle agresif ortamlar (örneğin, tuzlu suya maruz kalan bölgeler, sanayi tesisleri, köprüler) gibi betonun daha fazla aşındığı yerlerde önemlidir. Ancak, her tür beton katkı maddesinde olduğu gibi, kullanılan katkıının oranı ve tipi, betonun hangi koşullarda kullanılacağına göre değişiklik gösterebilir.

Beton, teknolojisinin ilerlemesiyle üzerinde yıllar boyunca çalışılan, basınç dayanımına ve taşıma gücüne en üst düzeyde dayanım gösterirken en önemli bileşenlerinden birisi de agregalardır. Günümüzde en çok tercih edilen yapı malzemesi betondur. Agregalar, betonun harikulade karakteristik özelliklerinden sorumlu olan yapısının ve kalitesinin önemli bileşenini oluşturur. Agregaların özellikleri, betonun mekanik dayanıklılığını ve radyasyon performansını belirler.

Bu tez çalışmasında, beton içerisine %10-%20-%30-%100 oranlarında eklenen kum ve agrega profillitin ikame edilmesiyle birlikte beton numuneleri hazırlanmıştır. Tez çalışmasında hem basınç hem de ultrason yöntemleri kullanılarak beton numunelerinin mekanik özellikleri, donma-çözölme ve yüksek sıcaklık (200°C-1.000°C) koşullarındaki dayanıklılıkları incelenmiştir. Çalışmada hazırlanan beton numunelerinin mikro yapı özellikleri 7-28-90 günlük süre boyunca incelenmiştir. Üretilen bu betonların radyasyon geçirgenlikleri de incelenerek radyasyonlu alanlarda kullanılabilirliği ortaya konulmaya çalışılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Dayanıklılığı artırmak ve uygulamalarda üstün performans sağlamak amacıyla geliştirilen modern yapı malzemelerinden olan katkılı betonlar hem çevresel koşullara karşı dayanıklılık (durabilite) sağlamak hem de radyasyona karşı koruma gereksinimlerini karşılamak için üretilir. Katkılı betonlar hem dayanıklılık hem de radyasyon zırhlama performansı açısından üstün özellikler sunmaktadır. Özellikle nükleer tesisler ve tıbbi radyoterapi odaları gibi radyasyon koruması gerektiren yapılarda, durabilite ve radyasyon zırhlama özelliklerini bir arada sağlayan beton karışımları kullanılmaktadır. Durabilite ve radyasyon performansı, betonun hizmet ömrü boyunca karşı karşıya kaldığı çeşitli zorluklara cevap verebilmesini sağlar. Radyasyon ortamlarında beton, hem radyasyonun diğer bölgelere geçişini engellemek hem de uzun vadeli yapısal bütünlüğünü korumak zorundadır.

Son yıllarda, radyasyondan korunma, giderek artan bir ilgiyle araştırılan önemli bir konu hâline gelmiştir. Özellikle betonun radyasyonu engelleme potansiyeli üzerine pek çok çalışma yapılmaktadır. Ayrıca betonun durabilite özellikleri ile ilgili pek çok bilimsel çalışma yapılmıştır.

Li ve ark. (2023) betondaki normal agrega yerine %0-%50 oranında atık porselen karo malzemelerini iri ve ince agrega olarak ikame etmiştir. Atık porselen karo takviyeli numuneler 25°C, 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C gibi yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler, atık porselen karo ince agregasının beton üretiminde kullanılabileceğini ve yüksek sıcaklıklarda performans etkisini artırabileceğini göstermiştir (Li ve ark. 2023).

Başka bir çalışmada, bazalt, diyabaz ve andezit ince agrega yerine %10-%20-%30-%40 oranlarında ikame edilerek beton performansına etkileri incelenmiştir. Bazalt, diyabaz ve andezit katkılı betonların dayanım-dayanım özellikleri incelenmiştir. Elde edilen verilere göre bazalt, diyabaz ve andezit katkılı numunelerin basınç dayanım değerleri referans (R) betondan sırasıyla %39, %35 ve %37 daha yüksek bulunmuştur. Katkılı betonların aşınma değerleri katkı oranına bağlı olarak referans betondan %26-%52 daha düşük bulunmuştur. Donma-çözülme dayanımında %63-%67 daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Sülfat etkisi altındaki numunelerin 180 günlük sülfat dayanımları %33,5-%32,5-%32,8 olmuş ve katkılı numuneler referans betondan daha yüksek sülfat dayanımı göstermiştir. Çalışma sonucunda bazalt, diyabaz ve andezitin normal ince agregaya alternatif olarak kullanılabileceği ortaya çıkmıştır (Eken, 2023).

Milasi ve ark. (2023) yılında Radyasyon ışınlarına karşı direnci artırmak amacıyla çimento yerine %10-%30 aralığında barit, hematit ve kurşun tozu kullanılarak beton numuneleri üretilmişlerdir. Üretilen beton numuneleri arasında %30 kurşun tozu katkılı numunenin en yüksek zayıflama katsayısı $0,2 \text{ cm}^{-1}$ ve en düşük yarı geçirgenlik katsayısı 3 cm olmuştur. Çalışma, %30 kurşun tozu ikameli karışımın gama ışınlarına karşı soğurucu özelliklere sahip olduğunu göstermiştir (Milasi ve ark. 2023).

Farklı çalışmalarda, beton numunelerinin performansı farklı agrega tipleriyle araştırılmış ve zararlı radyasyona karşı koruma sağlamak amacıyla beton numunelerinin zırlama özellikleri incelenmiştir (Akkurt ve ark. 2005; Çullu ve Ertaş, 2016; Demir ve ark. 2011; Kharita ve ark. 2011; Mostafaei ve ark. 2022).

Literatürde profillit harcı üretimi (Dündar ve ark. 2019; Kaplan, 2020), profillit agregalarıyla üretilen beton numunelerinin yüksek sıcaklıklara karşı direnci (Demez, 2017) seramik sırlarda katkı malzemesi olarak kullanımı (Mutlu, 2020) ve profillit agregalarıyla katkılanmış yapı malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması (Yapıcı ve ark. 2022) konularında çalışmalar yaptığı görülmüştür.

Dündar ve ark. (2019) çalışmalarında öğütülmüş profillit tozu ve polipropilen lifli harç numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada 0-4 mm tane büyüklüğüne sahip kırma kum agregası ve bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R Portland çimentosunu kullanmışlar, su/çimento oranını 0,5 olarak sabit tutmuşlar, mineral katkı olarak profillit tozunu çimento ile ağırlıkça %0,10,20,30 oranlarında ikame etmişler, ilave olarak hacimce %0, %0.1, %0.3, ve %0.5 oranlarında polipropilen lif ilave ederek beton numuneleri hazırlanmış, taze haldeki beton karışımının yayılma değerleri tespit edilerek 40x40x160 mm boyutlarına sahip numune kaplarına yerleştirmişlerdir. Kür havuzunda 7. Günü tamamlayan numunelerden eğilme ve basınç dayanımları, 28. Günü tamamlayan numunelerden su emme yüzdesi, porozite ve birim ağırlık gibi fiziksel özellikleri belirlenip, eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Profillit tozu ve polipropilen lif oranının betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Profillit tozunun beton içerisinde mineral katkı olarak kullanılabileceği ve betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine olumlu katkıda bulunduğu, polipropilen lif ilavesiyle birlikte bu özelliklerin daha da olumlu yönde etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Betonun iskeletini oluşturan ve betonun mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini etkileyen agrega talebi 2021'de %6,4 artarak 20,8 milyar ton agrega talebine ulaştı. Agrega talebinin 2021 ile 2031 arasında %6,8 artması bekleniyor (Horvath 2004; Ioannidou ve ark. 2017). Bu bağlamda, beton üretiminde farklı agrega kaynaklarının kullanılabilirliği

araştırılmaktadır. Nemade ve ark. (2023), normal iri agregalar yerine çelik cürufu agregaları kullanarak üç farklı çimento türünde beton numuneleri üretmiştir. Beton numuneleri üzerinde mekanik ve dayanıklılık testleri yapılmıştır. Cürufu ile ikame edilmiş beton numunelerinin referans betona kıyasla daha yüksek basınç dayanımına, daha düşük geçirgenlik-su emilimine ve daha düşük korozyon oluşumu riskine sahip olduğunu bildirmişlerdir (Nemade ve ark., 2023). Fares ve ark. (2009), Betonun termal, mukavemet ve yüksek sıcaklık direnci özelliklerini, ferrokrom cürufu (FCS) yerine doğal iri ve ince agregalar kullanarak araştırmışlardır.

Çam (2019), yaptığı çalışmada beton bileşenlerinden olan ince Agregaya yerine endsütriye yan ürün olan yüksek fırın cürufunu %25, %50, %75 ve %100 oranında beton numuneleri içerisinde ince agregaya yerine ikame etmiş ve numuneler oluşturmuştur. Elde ettiği numuneler haricinde ikamesiz ince Agregaya ile elde edilen beton numuneleri de oluşturmuş ve özelliklerini karşılaştırmıştır. Yaptığı inceleme ve testler sonucunda taze betonda slump, sertleşmiş betonda birim ağırlık, su emme, ultrasonik ses geçiş hızı, basınç ve çekme dayanımı testleri ile elastisite modülü ölçümlerini yapmış, test sonuçlarına göre ince Agregaya içeren betona ikame edilen yüksek fırın cürufu içeren betonun ikamesiz betona göre mekanik ve fiziksel özelliklerinin ikamesiz betona göre daha düşük olduğu sonucuna varmıştır.

Erdal ve Şimşek (2010), çalışmalarında Ahlat Taşının uygun boyutlara getirilerek elde edilen taş ununu beton içerisinde çimento yerine belli oranlarda ikame edilebilirliğini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada %0,5,10,15,20 ve 25 oranlarında ahlat taşı ununu çimento yerine ikame ederek beton numuneleri hazırlanmışlar, kıyaslama amacıyla andezit ve kalker taş unlarından da aynı oranda çimento yerine ikame ederek beton numuneleri hazırlanmışlardır. Yaptıkları inceleme ve testler sonucunda %5 oranında taş unu ilave edilerek hazırlanan tüm numunelerin çimento ile hazırlanan numuneler ile benzer basınç ve çekme dayanımına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Buna göre çimento yerine ikame ahlat taşı, andezit ve kalker taş unu kullanımının ekonomik olarak ve çevre verilen zararın azaltılmasına yönelik fayda sağlayabileceği sonucuna varmışlardır.

İsa Yüksel ve ark. (2007), öğütülmemiş yüksek fırın cürufu ve taban külünün ince agregaya olarak kullanıldığı betonun dayanıklılık özelliklerini incelemiş, çeşitli oranlarda hazırlanan numuneler referans betonla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, bu malzemelerin betona yüksek sıcaklık ve aşınmaya karşı direnç kazandırdığını, kılcallık, kurutma-ıslatma ve donma-çözülme gibi dayanıklılık testlerinde olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir. SEM

analizleri ve test sonuçları, bu malzemelerin beton dayanıklılığını artırabileceğini ortaya koyarak, atıkların ince agrega olarak kullanılmasının mümkün olduğunu göstermiştir.

Apaydın (2007), yaptığı “Farklı Kökenli Agregaların Beton Özelliklerine Etkisi” çalışmada, beş farklı kaynaklı agrega ve kırma kumun taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisini incelemiştir. Çeşitli bölgelerden elde edilen bazalt, kumtaşı, dolomit, beyaz ve mavi kalker agregaları ile üretilen betonlarda çökme, birim ağırlık, hava miktarı gibi taze beton özellikleri; basınç dayanımı, ultrasonik hız ve elastisite modülü gibi sertleşmiş beton özellikleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, bazalt agrega kullanılan betonların en yüksek birim ağırlık ve basınç dayanımına sahip olduğunu, ayrıca bazalt ve dolomit agregalarıyla üretilen betonların ultrasonik hızlarının diğer agregalara göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Basınç dayanımının artmasıyla elastisite modülünün de arttığı gözlemlenmiştir.

Kumar P. Mehta ve Manmohan'ın (2006), yaptıkları çalışmada portland çimentonun radyasyon dayaklığı üzerine değinmiştir. Portland çimento betonunun dayanıklılığı, malzemenin kimyasal saldırılar, aşındırıcı etkiler ve yapının hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı çevresel koşullar gibi faktörlere rağmen orijinal formunu ve kalitesini koruma yeteneği olarak tanımlanır. Bu dayanıklılık, betonun herhangi bir bozulma sürecine direnebilmesini ifade eder. Malzeme bir kez bozulma sürecine girdiğinde ise, dayanıklılık sorunları genellikle ortaya çıkar. Bu tür maddi bozulmalar başlangıçta doğrudan bir güvenlik riski yaratmasa da zamanla yapının genel dayanıklılığını tehdit eden yapısal hasarlara neden olabilir ve bu da potansiyel bir güvenlik sorununa dönüşebilir (Mehta ve Manmohan, 2006).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Beton

İngilizce’de “concrete” olarak adlandırılan betonun kökeni, Latince’de “büyümek” anlamına gelen “concretus” kelimesinden gelmektedir. Bu isim, betonun zamanla sertleşip dayanıklılığının artmasını vurgulayan anlamlı bir kökene sahiptir. (Sağlık ve Kocabeyler, 2019). Beton, çimento, su, agrega ve çeşitli kimyasal ya da mineral katkı maddelerinin bir araya getirilerek homojen bir şekilde karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Beton, doğası gereği diğer yapı malzemelerinden farklıdır ve adeta canlı bir sistem gibi davranır. Zamanla özelliklerinde gelişme gösteren bir malzemedir. Başlangıçta plastik bir kıvama sahip olan bu malzeme, şekil alabilir ve zamanla katılaşıp sertleşir, böylece dayanıklılık kazanır. Her beton türünde aranan üç temel özellik vardır. Bunlar; taze durumda kolayca işlenebilirlik, sertleştikten sonra mekanik dayanıklılık ve dış etkenlere karşı dirençtir (TMD, 2023).

Beton, taze halde plastik bir kıvama sahip olduğu için istenilen her türlü şekil verilebilir. Başka bir ifadeyle, henüz sertleşmemiş beton, döküldüğü kalıbın şeklini alır. Bu sayede, kiriş, kolon, karmaşık geometrik yapılar, döşeme, kazık ve kütle betonları gibi çeşitli yapı elemanlarının üretimi mümkün hale gelir (Sağlık ve Kocabeyler, 2019). Beton üretiminde çoğunlukla yerel malzemeler kullanılır ve bu durum, betonun maliyetini diğer yapı malzemelerine göre daha ekonomik kılan önemli bir faktördür. Ayrıca, iyi yapılmış beton oldukça dayanıklı bir yapı malzemesidir (Engin, 2023).

Beton, doğru şekilde tasarlanıp, üretimi, yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve bakımı düzgün yapıldığında, uzun yıllar boyunca bakım ya da onarım gerektirmeksizin işlevini sürdürebilir. Kalite kontrolüne dikkat edildiği takdirde, hazır beton santrallerinde olduğu gibi, ülkenin en uzak bölgelerinde de üretimi mümkündür. Örneğin, 1 metreküp alüminyum, çelik ve cam üretimi için sırasıyla yaklaşık 360 GJ, 300 GJ ve 50 GJ enerji gerekirken, aynı miktarda beton üretimi yalnızca yaklaşık 3,5 GJ enerjiye ihtiyaç duyar (Çağlayan, 2010). Enerji maliyetlerinin hızla arttığı günümüzde, betonun bu enerji verimliliği önemli bir avantajdır. Ayrıca, beton çok yönlü bir malzeme olup, farklı şekil, renk ve yüzey özellikleri ile çeşitli estetik görünümler elde edilebilir.

Betonun oluşumunda çimento hamuru, agrega parçacıklarının yüzeyini kaplayarak aralarındaki boşlukları doldurur ve bu parçacıkları bir arada tutarak bağlayıcı görevi görür. Bu nedenle, beton “çimento hamuruyla bir araya getirilmiş agregalardan oluşan kompozit bir malzeme” olarak tanımlanabilir (Erdoğan, 2003). TS 4834 standardına göre, beton; çimento, agrega, su ve gerekirse katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidrasyonu ile sertleşen bir yapı malzemesidir (TS 4834, 1986; Gökdemir, 1997).

İnsanlık, binlerce yıl önce taşları yapı malzemesi olarak kullanmaya başladığında, güçlü bir bağlayıcı malzeme olmadığı için kullanım alanı sınırlı kalmıştır. Antik Yunan, İyon ve Roma tapınaklarında belirli genişliklerdeki açıklıkları geçmek için tek parça taş kırışlar tercih edilmiştir. Ancak taşın düşük çekme dayanımı nedeniyle, bu açıklıklar sınırlı kalmış, ayrıca büyük kesitli elemanların ağırlığı, taşınması ve yerine yerleştirilmesi konusunda ciddi zorluklar yaratmıştır. Daha geniş açıklıkları aşma arayışı, insanlığı yeni yapı sistemleri geliştirmeye yöneltmiş ve bu çabanın sonucunda tüm kesitlerin basınca dayandığı kemer sistemleri ortaya çıkmıştır. Kireç ve doğal çimento gibi bağlayıcı malzemelerin keşfi sayesinde, daha sağlam ve dayanıklı yapıların inşa edilmesinin yolunu açmıştır (Türk ve Engin, 2024).

Doğal çimentonun, güçlü bir bağlayıcı olarak ilk kez Romalılar tarafından kullanıldığı düşünülmektedir. Ancak Romalılar döneminden 18. yüzyıla kadar bağlayıcı malzemeler konusunda büyük bir ilerleme kaydedilmemiştir. Betonun gelişimi uzun bir aşamadan geçmiştir (Tablo 3.1). İlk modern çimentoyu bulan kişi, İngiliz mühendis John Smeaton'dur. Kaynaklara göre, Smeaton, 18. yüzyılda inşa edilen Edystone Feneri'nde kireçtaşı ve kil karışımından elde ettiği bir çimento türünü kullanmıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan çimentoyu ise, İngiliz duvar ustası John Aspdin keşfetmiştir. Aspdin, ürettiği çimentoya Portland'daki taşlara benzediği için “Portland Çimentosu” adını vermiş ve bu ismi tescil ettirmiştir (Edoğan ve Erdoğan, 1999). İlk Portland çimentosu fabrikası 1848 yılında İngiltere'nin Kent şehrinde kurulmuş ve çimento üretimi, 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren birçok ülkeye yayılmıştır (Eriç, 1994).

Tablo 3. 1. Betonun Tarihsel Gelişimi (Kocataşkın, 1991).

Yıllar	Gelişmeler
1854	İlk Betonarme Yapı (François Coignet)
1860	Almanya'da ilk çimento standardının oluşturulması

1867	Betonarme ile ilgili ilk patentin alınması (Joseph Monier)
1880	Almanya ve Avusturya'da betonarmenin gelişim göstermesi
1890	Fransa'da betonarme yapım tekniklerinin yaygınlaşması (Hennebique)
1897	Betonun dayanıklılığına ilişkin formülün geliştirilmesi (Feret)
1903	Almanya'da hazır beton üretiminin başlaması (Jürgen H. Margens)
1904	İlk betonarme gökdelen (Ohio)
1906	Betonarme yapı tekniklerinde ilerleme
1911	Türkiye'de ilk çimento fabrikası kurulmuştur
1913	American Concrete Institute (ACI) kurulması ve standartların oluşturulması
1918	Agrega yüzey alanlarının hesaplanmasına yönelik yöntem geliştirilmesi (Edwards De Young)
1921	Türkiye'de ilk betonarme yapıların yapılması
1928	Granülometri ile ilgili Graf formülünün geliştirilmesi
1930	Betonun vibrasyon ile daha etkili uygulanması
1939-1949	ACI tarafından karışım hesap yöntemi geliştirilmesi (ACI-613)
1943	Alman DIN 1045 standardı ile beton yönetmeliği
1954	İlk Türk betonarme şartnamesinin yayınlanması
1956	Amerikan ACI 318 standardının kabul edilmesi
1957	Betonun kalite kontrolüne ilişkin istatistiksel yöntemlerin geliştirilmesi (ACI-214)
1962	Türk betonarme standardı TS 500'ün kabul edilmesi
1978	Alman DIN 1045 betonarme standardının taşıma gücüne ilişkin geliştirilmesi
1980	Türkiye'de beton kalitesinde ilerlemeler ve endüstriyel beton üretiminin başlaması
2000'li	Kendiliğinden yerleşen beton (Self-Compacting Concrete - SCC) teknolojisinin geliştirilmesi
2010	Ultra yüksek performanslı beton (Ultra-High-Performance Concrete - UHPC) teknolojisinin gelişimi
2015	3D baskı teknolojisi ile beton yapıların üretiminde ilk başarılı uygulamaların gerçekleştirilmesi

Betonun içine kum, çakıl ve su karıştırılarak elde edilen haliyle çekme ve darbe etkilerine karşı yeterince dayanıklı olmadığı anlaşıldığında, bu malzemenin daha sağlam hale getirilmesi için demir çubuklarla takviye edilmesi düşünülmüştür. 1848 yılında Lambot, betondan ürettiği tekneyi, demir çubuklarla destekleyerek dayanıklılığını artırmayı başarmıştır. Bu süreç, betonun demirle güçlendirilerek oluşturulduğu “betonarme” malzemenin temelini atmıştır. Bu yeni yapı malzemesiyle ilgili ilk patentler, 1855'te Coignet ve 1857'de Monier tarafından alınmıştır. Monier'in 1872'de inşa ettiği 130 metre küp kapasiteli betonarme su deposu, o dönemde önemli bir başarı olarak kabul edilmiştir. Betonarmenin yapısal avantajları, 1882'de Coignet'in Paris'in drenaj sisteminde 5 metre çapındaki tünel kaplamasında betonarme kullanmaya başlamasıyla daha da kanıtlanmıştır (Özkaynak, 2002).

Modern betonarme yapı sistemlerinin geliştirilmesinde ve bu sistemlere yönelik hesaplama yöntemlerinin oluşturulmasında öncülük eden isim, Fransız mühendis Coignet olmuştur. 19. yüzyılın sonlarına doğru betonarme yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu dönemde dikkat çeken örneklerden biri, 1892 yılında Percy tarafından inşa edilen Stanford Üniversitesi'ndeki müze binasıdır. 14 metreye kadar açıklıkların betonarme ile geçildiği bu yapı, 1906 yılında gerçekleşen Kaliforniya depreminden hiç hasar almadan çıkmayı başarmıştır (Özdemir, 2006). Bu durum, betonarmenin sismik dayanıklılık açısından ne kadar güçlü bir yapı malzemesi olduğunu göstermiştir. Betonun birtakım avantajları ve dezavantajları bulunmakta, Tablo 3.2.'de görülmektedir.

Tablo 3. 2. Betonun Avantajları ve Dezavantajları

Betonun Avantajları	Betonun Dezavantajları
Ekonomik bir malzemedir.	Beton, statik bir yapı sergilemez; zira üç fazından ikisi, yani çimento hamuru ve agrega-çimento hamuru geçiş bölgesi, zaman içinde değişim gösterir.
Kolayca istenilen şekle getirilebilir.	Belirli bir süre içerisinde sertleşmeden önce yerleştirilmesi gerekir.
Yüksek dayanıklılık sağlar.	Yıkımı oldukça zordur.
Bakım ihtiyacı minimum seviyededir.	Anında stok olarak bulunamaz, üretimi belirli bir zaman alır.
Yangına karşı yeterli direnç gösterir.	Ağırlığı fazladır.

Üretimi zahmetsiz ve pratiktir.	Diğer yapı malzemelerine kıyasla daha az homojen bir yapıya sahiptir.
Üretim sürecinde dışarıdan ek enerjiye ihtiyaç duymaz, çünkü ekzotermik özellik gösterir.	
Ham maddeleri doğada bolca bulunur.	
Isı ve ses yalıtımı konusunda yeterli performans sunar.	

3.2. Betonun Oluşturan Hammaddeler

Beton, yapı malzemeleri arasında yaygın olarak kullanılan bir bileşimdir ve temel bileşenleri olan çimento, su ve agregalar, betonun dayanıklılık ve işlenebilirlik gibi önemli özelliklerini belirler. Katkı maddeleri, betonun özel gereksinimlere uygun hale getirilmesinde önemli bir rol oynar ve yapının farklı koşullara dayanıklılığını artırmak için kullanılabilir.

3.2.1. Çimento

Çimento, su ve agrega ile betonu oluşturan ana malzemelerden biridir. Su ile reaksiyona giren çimento hem hava hem de su altında sertleşerek bağlayıcı özellik kazanır ve bu nedenle bağlayıcılar sınıfına girer. Portland çimentosu, yalnızca klinker ve alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilir (Eriç, 1994). Bu işlem sırasında, belirli katkı maddeleri eklenerek farklı türlerde katkılı çimentolar üretilebilir. Bu katkıları, enerji ve hammadde tüketimini azaltma yönünden ekonomik bir avantaj sağlarken, betonun kullanıldığı ortamlardaki sülfat ve klorür gibi zararlı maddelere karşı dayanıklılığını artırmada da önemlidir.

Örneğin, sülfat etkisine karşı dayanıklı beton elde etmek için, yüksek fırın cürufu veya puzolan içeren çimentolar ya da sülfata dayanıklı portland çimento (C3A oranı %5'ten düşük) tercih edilmelidir (Türk ve Engin, 2021). Ayrıca, büyük hacimli beton yapıların (örneğin barajlar) inşasında, düşük hidrasyon ısı ve suya karşı dayanıklılık sağlamak amacıyla cürufu ve puzolanik çimentolar kullanılmalıdır. Bu çimento türleri, özellikle yoğun su etkisi altında kalan yapılarda daha uzun ömürlü ve dayanıklı sonuçlar verir.

Bu tez çalışmasında KÇS Kipaş Çimento'dan elde edilen CEM I 42,5 R çimento tipi tercih edilmiştir. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal analizi Tablo 3.3'te, profilit kum ve agrega boyutları Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3. 3. Profilit ve CEM I 42.5 R Çimentosunun Kimyasal ve Fiziksel Analizi (%)

Kimyasal İçerik	Çimento	Profilit
SiO ₂	18,85	30–75
Al ₂ O ₃	4,80	20–74
CaO	62,80	0,08
Fe ₂ O ₃	2,40	0,08
MgO	2,50	-
SO ₃	3,69	0,08
K ₂ O + NaO ₂	1,14	0,21
Kızdırma Kaybı	3,50	3,71
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,12	2,8–2,9
Mohs Sertliği	—	1–2
Erime Sıcaklığı (°C)	—	1.700

3.2.2. Agrega

Betonun dayanıklılığına etki eden önemli unsurlardan biri, agregaların kalitesidir. Agregalar, doğal kaynaklardan elde edilen kum, çakıl veya kayaların kırılmasıyla üretilen malzemeler olup, betonun temel bileşenlerinden biridir. Beton üretiminde kullanılan kum, çakıl ve kırmataş gibi malzemeler genellikle “agrega” adı altında toplanır (Korkmaz, 2022).

Agregalar, genelde ince agrega (kum) ve iri agrega (çakıl) olarak sınıflandırılır. İri agrega, betonun basınca karşı dayanıklılığını artırırken, ince agrega iri agregalar arasındaki boşlukları doldurarak daha sıkı bir yapı sağlar (Çağlayan, Haberveren, İpekoğlu ve Kurşun, 1999). Çimento hamuru ise hem ince hem de iri agregalar arasındaki boşlukları doldurur ve agregaları birbirine bağlayarak betonun mukavemetini artırır. Tablo 3.4'te kullanılan agreganın özellikleri tabloda görülmektedir.

Tablo 3. 4. Kullanılan Agreganın özellikleri

Özellik	İnce Agrega	Kalın Agrega
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,73	2,66
Sıkıştırılmış Birim Ağırlık (g/cm ³)	1,95	1,59
Birim Ağırlık (g/cm ³)	1,73	1,44
Su Emme Kapasitesi (%)	1,09	0,24



Şekil 3. 1. Profillit kum ve Agregat görselleri

Sertleşmiş betonun hacim olarak yaklaşık %75'ini oluşturan agregalar, betonun dayanıklılığı ve mukavemeti üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Apaydın, 2007). Agregaların kalitesi, tanelerin yüzey yapısı, şekli, granülometrisi ve fiziksel özelliklerine göre değişir. Betonun mukavemetini artırmak için, agregalar ile çimento hamuru arasında güçlü bir bağ (aderans) olması gerekir (Binici, Çağatay, & Kaplan, 2000). Bu bağı güçlendiren en önemli faktörlerden biri, agreganın yüzeyinin pürüzlü olmasıdır. Pürüzlü yüzeyler, çimento hamurunun girinti ve çıkıntılara nüfuz etmesini kolaylaştırarak betonun ayrılmasını zorlaştırır ve dayanıklılığını artırır. Agregat tanelerinin küre veya küp biçiminde olması, betonun kompakt yapısına katkı sağlar; yassı ve uzun agregalar ise betonun sıkışmasını ve mukavemetini olumsuz yönde etkileyebilir (Apaydın, 2007).

Kaliteli beton elde edebilmek için, kullanılan agregaların özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilmelidir. Genelde daha ağır, özgül ağırlığı yüksek agregalar, betonun mukavemetini ve dayanıklılığını artırır. Eğer agregaların dayanımı çimentodan daha düşükse, betonun gücü agregaların kırılmasıyla sınırlı kalacak ve çimentonun tam potansiyeli kullanılmadan beton zayıf kalacaktır. Bu durumda, sadece çimento miktarını artırarak betonun mukavemetini iyileştirmek yeterli olmayacaktır (Usta, 2016).

3.2.3. Su

Su, betonun temel bileşenlerinden biri olup, karışımın hazırlanmasında önemli görevler üstlenir. Beton karışımında kullanılan su, belirli işlevleri yerine getirir. Bunları şu şekilde özetlemek mümkündür:

- a) Çimento ve agregat tanelerinin yüzeyini ıslatarak bir yağlayıcı görevi görür. Bu, betonun daha kolay karışmasını, yerleştirilmesini ve işlenebilirliğini sağlar.
- b) Çimento ile birleşerek, çimento hamurunun hidrasyon sürecini başlatır. Bu kimyasal reaksiyon, betonun sertleşmesi ve dayanıklılığını kazanması için kritiktir.

- c) Beton üretiminde kullanılacak suyun temiz, içilebilir, berrak ve kokusuz olması gerekmektedir.
- d) Betonun uzun ömürlü ve dayanıklı olması için kullanılan suyun asidik olmaması ve sülfat veya betonun yapısına zarar verebilecek kimyasal maddeler içermemesi önemlidir.

3.2.4. Kimyasal Bileşenler

İnşaat sektöründe yaygın kullanılan beton, uygun maliyetli olması ve kolay üretilmesi nedeniyle en çok tercih edilen yapı malzemesidir. Gelişen teknolojiyle birlikte kimyasal katkıları, betonun önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Kimyasal katkıları, betonun performansını artırarak daha dayanıklı ve ekonomik olmasını sağlar. Bu katkıları, taze betonun işlenebilirliğini artırır, priz sürelerini ayarlar ve sertleşmiş betonun dayanımını yükseltir. Farklı katkıları bir arada kullanıldığında, olası yan etkiler laboratuvar deneyleriyle belirlenmeli ve uyumlu olduklarından emin olunmalıdır (Topçu, Canbaz, & Karakurt, 2006).

Betonun performansını ve dayanıklılığını iyileştirmek amacıyla farklı kimyasal katkı türleri kullanılmaktadır. Bu katkıları genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir: priz süresini hızlandıran veya geciktiren maddeler, karışım suyunun miktarını azaltarak akışkanlığı artıran katkıları, betona hava kabarcıkları kazandırarak özelliklerini iyileştiren hava sürükleyiciler, don etkilerine karşı dayanıklılığını artıran katkıları ve su geçirimsizliği sağlamak için kullanılan özel maddeler (Çoşkun, 2004).

Akışkanlaştırıcıları, su/çimento oranını azaltarak işlenebilirliği artırmak, hidrasyon ısısını düşürmek ve betonun mukavemetini artırmak için kullanılır. 1930'larda ortaya çıkan bu katkıları, zamanla süper akışkanlaştırıcıları ve modifiye polikarboksilatları gibi yeni nesil ürünlerle beton teknolojisinde önemli gelişmelere yol açmıştır (Baradan, Yazıcı ve Aydın,, 2012). Taze betonun kıvam kaybını önlemek ve kolay yerleşebilirliğini sağlamak için akışkanlaştırıcıları kullanılır. Doğru miktarda katkı kullanılmadığında ise işlenebilme sorunları ortaya çıkabilir. Hava sürükleyici katkıları, donma-çözülme dayanıklılığını artırır ve eğilme dayanımını güçlendirir. Priz hızlandırıcı ve geciktirici katkıları ise farklı hava koşullarında beton dökümünü kolaylaştırır (Topçu, Canbaz, ve Karakurt, 2006). Sonuç olarak, beton katkıları kullanımının dikkatli planlanması ve test edilmesi, betonun istenen performansını elde etmek için hayati önem taşır.

3.2.5. Mineral Katkılar

Çimento ve betona tarihsel süreç boyunca hem doğal hem de yapay (endüstriyel) kaynaklı mineral katkı maddeleri eklenmiştir. Mineral katkı maddeleri genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir: (Yeğinoğlu & Ertün, 2011)

- Bağlayıcı özellikte olanlar: Örneğin, granüle edilmiş yüksek fırın cürufu gibi maddeler bu gruba girer.
- Hem bağlayıcı hem de pozolanik özellikte olanlar: Alkers uçucu kül ve bitümlü şist külleri bu tür katkılara örnek verilebilir.
- Yüksek pozolanik aktiviteye sahip olanlar: Silis dumanı ve pirinç kabuğu külü bu özellikteki malzemeler arasındadır.
- Normal pozolanlar: Doğal ya da kalsine edilmiş pozolanlar ve silis içeren uçucu külleri kapsar.
- Düşük pozolanik aktiviteye sahip olanlar: Yavaş soğuyan yüksek fırın cürufu, belirli doğal pozolanlar ve bitkisel küller bu kategoriye dahil edilebilir.
- Atık malzemeler: İnce öğütülmüş kuvars, kalker ve bentonit bu gruba örnek olarak gösterilebilir.

3.3. Beton Türleri

Günümüzde en sık tercih edilen yapı malzemesi beton olarak öne çıkmaktadır. Betonun bu kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmasının nedeni, insan yaratıcılığına kolayca adapte edilebilmesidir. Yıllar boyunca insanlar, ihtiyaçlara göre betonun farklı özelliklerini geliştirerek bu malzemedeki maksimum verimi almayı başarmışlardır. Günümüzde TS EN 206-1 standartlarına göre beton üç farklı gruba ayrılmaktadır (Tablo 3.5.).

Tablo 3. 5. Beton Türleri ve Yoğunluk Tablosu (TS EN 206-1)

Beton Türü	Yoğunluk (kg/m ³)
Hafif Beton	800-2000
Normal Beton	2000-2600
Ağır Beton	>2600

3.3.1. Hafif Beton

İnşaat sektöründe, geçmişten günümüze kadar insanlar, yapı malzemelerinde hafifliği ön planda tutmayı hedeflemişlerdir. Özellikle Roma döneminde yapılarda sünger taşı gibi hafif malzemeler kullanılmıştır. Hafif malzemelerin beton üretiminde kullanımının yaygınlaşması ise 20. yüzyılın ortalarına dayanmaktadır. O dönemde Almanya'da sünger taşı agregası ile hafif beton üretimi başlamıştır (Kurugöl, 1997).

Yoğunluğu 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında olan betonlar, standartlara göre hafif beton olarak adlandırılır (Kaya, 2019). Hafif beton, klasik betona kıyasla bazı farklılıklar barındırmaktadır. Bu beton türü, daha düşük birim ağırlığa sahip agregalarla üretilir ve özellikle yüksek ısı yalıtımı sağlaması ile öne çıkar (Ceylan, 2005).

Ev ve iş yerlerinde normal betona alternatif olarak tercih edilen hafif betonlar, ısı yalıtımında sağladığı faydaların yanı sıra, ses yalıtımında da önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, hafif betonun yapıların toplam statik yükünü azaltması, daha ekonomik ve güvenli projelerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu gibi faydaları nedeniyle, hafif beton üretiminde kullanılan doğal ve yapay agregalarla ilgili çalışmalar son yıllarda önemli ölçüde artmıştır (Kaya, 2019). TS EN 206-1/Nisan 2002'ye göre oluşturulan Hafif Beton Basınç Dayanımları Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3. 6. TS EN 206-1/Nisan 2002'ye göre oluşturulan Hafif Beton Basınç Dayanım Tablosu

Basınç Dayanım Sınıfı	En düşük Karakteristik Silindir dayanımı F_{ck}, sil. N / mm^2	En düşük karakteristik Küp Dayanımı F_{ck}, küp N / mm^2
LC 8 9	8	9
LC 12 13	12	13
LC 16 18	16	18
LC 20 22	20	22
LC 25 28	25	28
LC 30 33	30	33
LC 35 38	35	38
LC 40 44	40	44
LC 45 50	45	50
LC 50 55	50	55
LC 55 60	55	60
LC 60 66	60	66
LC 70 77	70	77
LC 80 88	80	88

3.3.2. Normal Beton

Beton, etüv kurusu durumuna göre birim hacim kütlelerine bağlı olarak sınıflandırıldığında, yoğunluğu 2000 kg/m^3 ile 2600 kg/m^3 arasında olan ve basınç dayanımı 20 MPa ile 50 MPa arasında değişen betonlar “normal beton” olarak adlandırılır (Sağlık ve Kocabeyler, 2019). Bu tür betonlar, malzemelerin kolay temin edilmesi, uygulama pratikliği ve hızlı üretim süreci ile öne çıkar. Ayrıca, ekonomik olması ve seri üretim avantajı, bu betonların bina inşaatları, yol yapımı, köprü ve baraj gibi büyük ölçekli projelerde yaygın olarak kullanılmasını sağlar.

3.3.3. Ağır Beton

Ağır betonlar, yoğunlukları 2600 kg/m^3 'ten büyük olan betonlar olarak tanımlanır ve genellikle barit, limonit, magnetit, demir cevheri gibi doğal agregalarla üretilir (Davis ve ark. 1956). Bu tür betonlar, özellikle radyasyondan korunma amacıyla tercih edilmektedir. Radyasyon, hücrelerde α , β ve nötron parçacıkları ile γ ve x ışınları yoluyla hasarlara neden olabilir. Nötron hareketi, hidrojen açısından zengin malzemelerle durdurulabilir ve bu nedenle, hidrojen içeriği yüksek betonlar nötronların engellenmesi için ideal malzemeler arasında yer alır. Normal betonlar için hidrojen yoğunluğunun, karışım suyunun yaklaşık %4'ü oranında olması gerekmektedir (Kalyon, 2019).

Aynı birim yüzeye düşen ağırlık dikkate alındığında, hafif metalden yapılmış kalın bir kalkan ile ağır metalden yapılmış ince bir kalkan arasında çok az fark bulunur. Ancak, yoğunluğu yüksek agregaların kullanılmasıyla beton kalınlığı %50 ila %150 oranında azaltılabilir. Nötronlar, en iyi emilim malzemesi içerisinde soğurulduğunda, önemli bir sorun olan γ ışınları açığa çıkar. Bu bağlamda bor izotopları, nötron emme kapasitesi açısından oldukça etkilidir (Kaya, 2019).

Yoğunluk artışı sağlamak amacıyla beton üretiminde yüksek yoğunluklu agregalar tercih edilmektedir. Normal betonlardan farklı olarak, ağır betonlar bu tür agregalar içermekte olup, barit, magnetit, limonit ve bor gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu tür betonlar, ağırlıklarının avantajı nedeniyle kayma ve devrilme riski taşıyan yapılarda tercih edilmekte olup, radyoaktif maddelerin yaydığı zararlı nükleer radyasyonlardan, özellikle nötron ve gama ışınlarından korunma amacıyla kullanılmaktadır (Akyüz, 1977). Genellikle nükleer reaktörler ve hastanelerdeki radyoterapi odalarının duvarlarında zırh görevi görmektedir

Eğer yeterli alan mevcutsa, aynı koruma daha kalın bir normal betonla da sağlanabilir. Ancak, alan kısıtlıysa, yüksek yoğunluklu agregalarla üretilen ağır betonlar daha uygun bir tercih olabilir. Demir ve kurşun gibi agregalar ise özel koşullarda kullanılabilir. Bu betonlar, radyasyona karşı koruma sağlarken, aynı zamanda yeterli mekanik dayanıklılığa da sahip olmalıdır. Zırhlamanın sağlanacağı radyasyon türüne (alfa, beta, gama veya nötron) bağlı olarak betonun ısı iletkenliği gibi ek özellikler de dikkate alınmalıdır. (Güner, 1999).

Ağır betonlar arasında en yaygın kullanılan tür, barit agregalı betonlardır. Bu tür betonlar, radyasyon zırhlamasında sıklıkla tercih edilir ve sadece yoğunluk değil, aynı zamanda yüksek basınç dayanımı da gerektirir. Yeterli basınç dayanımına sahip olmayan betonlarda meydana gelebilecek çatlaklar, gama ve x-ışınlarının sızmasına yol açabilir, bu da zırhlamanın etkinliğini azaltarak koruma amacını boşa çıkarabilir. Bu nedenle, radyasyon zırhlaması için kullanılan betonların hem yüksek yoğunluklu agregalarla üretilmiş hem de yeterli mekanik dayanıklılığa sahip olması esastır. TS EN 206-1/Nisan 2002'ye Göre Normal ve Ağır Betonlar için Basınç Dayanımları Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3. 7. TS EN 206-1/Nisan 2002'ye Göre Normal ve Ağır Betonlar için Basınç Dayanım Tablosu

Basınç Dayanım Sınıfı	En düşük Karakteristik Silindir dayanımı $F_{ck,sil.}$ N / mm²	En düşük karakteristik Küp dayanımı $F_{ck,küp}$ N / mm²
C 8 10	8	10
C 12 15	12	15
C 16 20	16	20
C 20 25	20	25
C 25 30	25	30
C 30 37	30	37
C 35 45	35	45
C 40 50	40	50
C 45 55	45	55
C 50 60	50	60
C 55 67	55	67
C 60 75	60	75
C 70 85	70	85
C 80 95	80	95
C 90 105	90	105
C 100 115	100	115

Nötronların tutulmasında etkili olan bor tuzları, ağır beton üretiminde kullanılmaktadır. Ancak, suda çözünebilen bor tuzları betonda zamanla boşluklar oluşturarak mukavemet kaybına neden olabileceğinden, bu tür betonlar için suda çözünmeyen bor tuzları tercih edilmektedir. Ayrıca, demir cevheri içeren agregalar veya sanayi atıklarından elde edilen demir parçacıkları da ağır betonlarda agrega olarak kullanılabilir (Çoşkun, 2010). Ağır betonlar, zırhlama sırasında soğurdukları radyasyonu ısı enerjisine dönüştürerek ısınmaya neden olurlar. Bu süreçte betonun iç kısmındaki sıcaklık, dış yüzeyine göre daha yüksek olur (Akyol, 2015).

3.3.3.1. Ağır Betonda Kullanılan Agregalar

Ağır beton, yüksek yoğunluk gerektiren özel yapı projelerinde kullanılan bir beton türüdür ve bu tür betonların temel bileşeni, yüksek özgül ağırlığa sahip agregalardır. Barit, manyetit ve hematit gibi doğal agregalar, yoğunlukları sayesinde ağır betonlara istenen fiziksel özellikleri kazandırır. Bu betonlar özellikle nükleer santrallerde radyasyon koruması, su altı yapıları ve endüstriyel tesislerde tercih edilir. Profillit ise kimyasal olarak $Al_2SiO_4(OH)_2$ formülüne sahip bir kil mineralidir ve yoğunluğu $2,8-2,9 \text{ g/cm}^3$ arasında değişir (Uysal, 2018). Yüksek erime sıcaklığı (1.700°C) ve kimyasal dayanıklılığı nedeniyle profillit, ağır betonlarda yardımcı malzeme olarak kullanılabilir. Özellikle termal dayanım istenen betonlarda profillit, hem agregaya katkı sağlar hem de betonun refrakter özelliklerini destekler. Bu sayede, profillit içeren ağır betonlar, ısıya ve aşınmaya karşı daha dirençli hale gelirken, özel mühendislik projelerinde alternatif bir çözüm sunar.

3.3.3.1.1 Profillit

Profillit, alüminyum silikat içeren, kil benzeri yapıya sahip bir mineraldir (Şekil 3.2). İsmi Yunanca "pyro" (ateş) ve "phyllite" (taş veya kaya) kelimelerinden türetilmiştir ve 1829 yılında R. Harmen tarafından bu ad verilmiştir (Demiz, 2017). Kimyasal formülü $H_2Al_2(SiO_3)_4$ olan profillit, genellikle seramik ve refrakter ürünlerinde kullanılır. Talka benzeyen birçok özelliği olmakla birlikte, profillit daha serttir ve yüksek sıcaklıklarda akışkan hale gelmez. Bu özelliği, onu özellikle seramik ve refrakter malzemelerde vazgeçilmez yapar. Ayrıca kırma indisi 1.57 ve özgül ağırlığı 2.8 civarındadır (MTA, 2023).



Şekil 3. 2. Profillit

Türkiye'deki önemli profillit yataklarından biri, Malatya'nın Pütürge ilçesindedir (Şekil 3.3). Bu bölgedeki profillit yataklarının kimyasal analizleri sonucunda seramik, refrakter ve çimento hammaddesi olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir (Özkaya, 2011). Pütürge profillitinin ticari potansiyeli yüksek olup, beyaz çimento üretiminde de kullanılır. Özellikle düşük demir ve krom içerikleri sayesinde, bu mineral Mersin'deki Çimsa fabrikasında beyazlığı 90 civarında olan yüksek kaliteli “Superwhite” beyaz çimento üretiminde kullanılmaktadır (Uygun ve Solakoğlu, 2002). Türkiye’de 20 milyon ton civarında görünür profillit rezervi bulunmaktadır (Özata, Ceylantekin ve Eda Taşçı, 2024). Ancak bu değerli hammaddenin henüz yeterince değerlendirilemediği ve ekonomik olarak tam potansiyelinin kullanılmadığı görülmektedir. Eğer uygun politikalar üretilmezse, bu kaynakların tam anlamıyla değerlendirilmesi zor olacaktır.



Şekil 3. 3. Profillitin Elde Edildiği Bölgenin Haritada Konumu

Profillit, çeşitli sanayi dallarında önemli bir hammaddedir. Kimyasal bileşimine ve fiziksel özelliklerine göre farklı sektörlerde kullanılır (Demiz, 2017). Bunlar:

- a) Refrakter Ürünler: Profillit, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı, düşük ısıl genleşme katsayısı ve deformasyona karşı direnci nedeniyle refrakter malzemelerde tercih edilir. İzole edici ateş tuğlaları, döküm kalıpları ve monolitik refrakterlerde kullanımı yaygındır.
- b) Seramik Ürünler: Seramik endüstrisinde elektro porselen sırlar, yer ve duvar fayansları gibi ürünlerde kullanılır. Profillit, seramik karışımlarının daha düşük sıcaklıklarda pişirilmesine olanak tanır ve termal şok direncini artırarak ürünlerin mukavemetini yükseltir.
- c) Dolgu Malzemesi: Boya, kâğıt, plastik, kauçuk ve çimento üretiminde dolgu maddesi olarak kullanılır. Özellikle ince öğütülmüş profillit, yüzey düzgünleştirici özellikleriyle kâğıt ve duvar kaplamalarında yaygın olarak tercih edilir.
- d) Beyaz Çimento: Düşük demir ve krom içeriği sayesinde profillit, beyaz çimento üretiminde kullanılır. Türkiye’de üretilen yüksek kaliteli beyaz çimentoların hammaddelerinden biridir.

Profillit, endüstriyel ve ekonomik açıdan önemli bir mineral olup, seramik, refrakter ve çimento üretimi gibi alanlarda geniş kullanım alanlarına sahiptir. Türkiye’deki rezervlerinin daha etkin kullanılması durumunda, bu mineralin ülke ekonomisine büyük katkı sağlaması mümkündür. Profillit, talka benzeyen ancak ondan daha sert olan yapısıyla gelecekte de çeşitli sanayi dallarında değer kazanmaya devam edecek bir hammadde olarak öne çıkmaktadır (Haner, 2022).

3.4. Durabilite ve Betonda Durabilitenin Özellikleri

Yapı malzemelerinin ve yapıların, uzun yıllar boyunca bozulmadan ve işlevselliklerini kaybetmeden kullanıma elverişli kalmalarına “dayanıklılık”, “kalıcılık” veya “durabilite” denir (Baradan ve ark. 2010). Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), durabiliteyi yapının maruz kaldığı çevresel koşullar, kimyasal etkiler ve aşınma gibi faktörlere rağmen, yapının özgün özelliklerini koruması olarak tanımlar.

Bu tanım, yapının dayanıklılığının sadece fiziksel değil aynı zamanda kimyasal ve çevresel dirençle de bağlantılı olduğunu vurgular. Avustralya standartlarında ise, durabilite

kavramı, betondaki aşınma etkileri, sülfat saldırısına karşı direnç ve betonun geçirimsizlik ya da geçirimsizlik özellikleri gibi faktörlerin ön plana çıktığı bir dayanıklılık standardı olarak ele alınır (Özgen, 2006).

Bir yapının, uzun ömürlü ve işlevsel olması için belirli temel özelliklere sahip olması beklenir. Öncelikle, yapının servis ömrü boyunca maruz kalacağı fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkilere karşı dayanıklı olması, yani durabilite sağlaması gerekmektedir. Dayanım açısından, yapı yalnızca günlük servis yüklerini değil, aynı zamanda deprem gibi olağanüstü durumlarda ortaya çıkabilecek yükleri güvenli bir şekilde taşıyabilmelidir. İşlevsellik de önemlidir; yapı, kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde işlevsel bir biçimde planlanmalı ve kullanılabilirliği yüksek olmalıdır. Ekonomik açıdan bakıldığında, kaynak israfına neden olmayacak şekilde maliyet etkin bir yapıda olmalıdır. Son olarak, estetik değeri de göz ardı edilmemelidir; yapının, görsel açıdan estetik bir çekiciliğe sahip olması beklenir (Özgen, 2006). Bu özelliklere sahip yapıların inşa edilmesi, ancak projelendirme aşamasından başlayarak yapım süreçlerinin titizlikle planlanması, denetlenmesi ve kontrol altında tutulmasıyla mümkün olabilir (Baradan ve ark., 2010).

Betonarme yapılar, genellikle 100 yılı aşan bir hizmet ömrüne sahip olacak şekilde projelendirilir (Baradan ve ark. 2010). BS 7543:2003, TS EN 1991-1-1 ve TS EN 1994-2 standartlarına göre, yapı elemanları dayanıklılık ölçütlerine göre dört sınıfta sınıflandırılmıştır. Bu sınıflardan ilkinde, hizmet ömrü en az 1-5 yıl olarak öngörülen geçici yapılar yer alır. İkinci sınıfta, en az 5 yıl hizmet verecek şekilde tasarlanan değiştirilebilir taşıyıcı elemanlar, çatı makası ve kirişler bulunur. Üçüncü sınıfta ise en az 50 yıl dayanması beklenen bina ve kamu yapıları bulunmaktadır. Dördüncü sınıf, en az 100 yıl hizmet ömrüne sahip olması beklenen anıtsal yapılar, köprüler ve büyük inşaat mühendisliği projelerini kapsar (Özgen, 2006).

Hizmet ömrü terimi, yapının işlevini ne kadar süre boyunca sürdürebileceği anlamında geniş bir kapsama sahiptir; yapının veya elemanlarının kabul edilebilir bir hizmet seviyesinde çalışması beklenen süreyi ifade eder (Massazza, 2005). Bir yapının hizmet ömrünün uzun ve etkin olabilmesi, dört temel faktörün dengeli bir şekilde optimize edilmesine bağlıdır. Bu faktörler malzemenin dayanıklılığı, projelendirme süreci ve beton karışımının doğru şekilde tasarlanması, inşaat sürecinin doğru yönetilmesi ve yapının düzenli olarak bakımdan geçirilmesidir (Massazza, 2005).

3.5. Beton Basınç Dayanımı

Beton, inşaat sektörünün temel yapı malzemesi olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir ve bu malzemenin en kritik özelliklerinden biri basınç dayanımıdır.

Basınç dayanımı, betonun iç yapısındaki bağlanma kuvvetinin ve dış yüklere karşı direnç kapasitesinin bir göstergesidir. Beton su, çimento, agrega ve çeşitli kimyasal katkı maddelerinin karışımıyla elde edilen bir kompozit malzemedir. Betonun basınç dayanımı hem tasarım hem de yapım süreçlerinde belirleyici bir parametre olarak kabul edilir. Betonun basınç dayanımının iyileştirilmesi, yapıların ekonomik, güvenli ve uzun ömürlü olmasını sağlamak için büyük önem taşımaktadır.

3.5.1. Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler

Betonun basınç dayanımı birçok faktörden etkilenir. Bunlar; çimento tipi ve miktarı, su/çimento oranı, agrega özellikleri, katkı maddeleri ve kür koşullarıdır.

3.5.1.1. Çimento Tipi ve Miktarı

Çimento, betonun bağlayıcı malzemesidir. Çimento miktarının artışı, genellikle betonun dayanımını artırır. Bununla birlikte, fazla çimento kullanımı maliyetleri yükseltir ve bazı durumlarda çatlak riskini artırabilir.

3.5.1.2. Su/Çimento Oranı

Betonun dayanımını belirleyen en önemli faktörlerden biri de su/çimento oranıdır. Düşük su/çimento oranı, dayanımı artırırken, işlenebilirliği azaltabilir. Su/çimento oranı, betonun basınç dayanımını etkileyen en kritik parametrelerden biridir. Düşük su/çimento oranı, çimento ile su arasındaki bağlanma reaksiyonlarını artırarak dayanımı yükseltir. Ancak çok düşük su/çimento oranları işlenebilirliği azaltarak yerleştirme zorluklarına yol açabilir (Neville, 2011).

3.5.2. Agrega Özellikleri

Agregaların boyut, şekil, dağılım ve mineralojik yapısı beton dayanımını etkiler. Küçük ve düzgün dağılım gösteren agregalar daha iyi bir mekanik performans sağlar. Agregaların fiziksel ve mineralojik özellikleri, betonun mekanik performansını doğrudan etkiler. Kırmataş gibi açısız agregalar, betonda daha yüksek bağlanma ve mekanik kilitleme sağlayarak dayanımı artırır. Ancak yuvarlak taneli agregalar, işlenebilirliği iyileştirebilir (Mehta ve Monteiro, 2014).

3.5.3. Katkı Maddeleri

Katkı maddeleri, betonun dayanımını ve diğer özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Örneğin, süper akışkanlaştırıcılar, düşük su/çimento oranı ile işlenebilirliğin artırılmasını sağlar. Kimyasal ve mineral katkıları, betonun dayanımını ve işlenebilirliğini optimize etmek için yaygın olarak kullanılır. Süper akışkanlaştırıcılar, düşük su/çimento oranlarında bile betonun işlenebilirliğini koruyarak daha yüksek dayanım sağlar. Silis dumanı ve uçucu kül gibi mineral katkıları, betonun mikro yapısını iyileştirerek dayanımı artırır (Yılmaz ve diğerleri, 2020).

3.5.4. Kür Koşulları

Betonun kür sürecindeki sıcaklık ve nem koşulları dayanım üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Optimum kür koşulları, hidrasyon reaksiyonlarını destekler ve dayanımı artırır. Kür süresi boyunca sıcaklık ve nem koşulları, hidrasyon reaksiyonlarının tamamlanmasını destekleyerek betonun dayanım gelişimini etkiler. Özellikle yüksek sıcaklık ve nem altında kür edilen betonlar, daha yüksek dayanım göstermektedir (ACI Committee 308, 2001).

3.6. Betonda Durabiliteyi Etkileyen Özellikler

3.6.1. Yüksek Sıcaklık Direnci Deneyi

Günümüzde kullanılan çeşitli yapı malzemelerine göre beton, yüksek sıcaklık ve yangın etkisine karşı daha dayanıklı bir malzeme olarak göze çarpmaktadır. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış beton belli zaman aralığında zarar görmez ve ortama zehirli gaz ve duman salımı yapmaz (Baradan ve ark. 2002).

Beton ayrıca yüksek sıcaklık altında belirli bir süre içerisinde konumlu çeliği sıcaklığa karşı korur. Bu koruma belirli süreler ve belirli sıcaklık aralığı için geçerlidir. Bu belirli aralıkların dışına çıkılması halinde betonda çatlama ve parçalar halinde kabuk atma gözlenirken, aderansta da önemli kayıplar oluşur (Baradan ve ark. 2002; Lie and Irwin, 1993; Noumowe ve ark. 1994; Khoury, 1992).

Aşırı sıcaklık koşullarında betonun dayanıklılığı, yapı güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Betonda yüksek sıcaklık direncini etkileyen başlıca faktörler şunlardır:

- a) Betonun mineralojik ve kimyasal bileşimi,
- b) Çimento tipi ve hidrasyon ürünleri,
- c) Agregata türü ve termal genleşme özellikleri,

d) Betonun su içeriği ve porozitesi.

3.6.2. Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri

3.6.2.1. Fiziksel ve Kimyasal Değişimler

Beton, 100 °C'den başlayarak kademeli olarak fiziksel ve kimyasal değişikliklere uğrar:

- I. 100-200 °C: Kapiler boşluklardaki serbest su buharlaşır, beton içindeki mikro çatlaklar artmaya başlar.
- II. 300-500 °C: Çimento matrisindeki hidrasyon ürünleri bozunur. C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) yapısı parçalanmaya başlar ve dayanım kaybı gözlenir.
- III. 500-800 °C: Kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ayrışır ve serbest kireç (CaO) oluşur. Bu durum, termal genişleme farkları nedeniyle betonun iç gerilmelerini artırır.
- IV. 800 °C ve üzeri: Agregalar erimeye veya yapısal bütünlüklerini kaybetmeye başlar.

3.6.2.2. Termal Genleşme ve Mikro Çatlaklar

Yüksek sıcaklık, betonun bileşenleri arasında termal genişleme farkları yaratarak mikro çatlakların oluşmasına neden olur. Özellikle silis esaslı agregalar, termal genişlemeye bağlı olarak betonun dayanımını olumsuz etkiler.

3.6.2.3. Gözeneklilik ve Sıcaklık

Yüksek sıcaklıklar, betonun porozitesini artırır ve bu durum hem mekanik dayanımı hem de geçirimsizlik özelliklerini olumsuz etkiler.

3.6.2.4. Yüksek Sıcaklık Direncini Etkileyen Faktörler

Çimento Tipi ve Katkı Maddeleri

- Portland çimentosu, yüksek sıcaklıklarda hidrasyon ürünlerinin bozulması nedeniyle dayanım kaybına uğrar.
- Yüksek alumina çimentolar, refrakter özelliklerinden dolayı yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklıdır.
- Mineral katkıları (silis dumanı, uçucu kül, metakaolin), matris yoğunluğunu artırarak yüksek sıcaklık dayanımını iyileştirir.

Agrega Türü

- Kireçtaşı ve bazalt agregalar, yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır.
- Silis esaslı agregalar, termal genişleme nedeniyle mikro çatlak oluşumunu artırır.

Parça atmalarını en aza indirmek amacıyla, termal bariyerlerin yanı sıra polipropilen lifler, hava sürükleyici katkıları, büyük boyutlu elemanlar ve düşük termal genişleme özelliklerine sahip agregaların kullanılması önerilmektedir (Khoury, 2003a).

Su/Çimento Oranı ve Porozite

- Düşük su/çimento oranı, daha az boşluklu bir yapı oluşturarak yüksek sıcaklık dayanımını artırır.
- Yüksek porozite, sıcaklık altında daha hızlı bozulmaya yol açar.

Lif Takviyeleri

- Polipropilen ve çelik lifler, termal genişleme sırasında çatlak oluşumunu sınırlayarak yüksek sıcaklık dayanımını artırır.

3.7. Ultrasonik Ses

Beton teknolojisinde ultrasonik ses yöntemleri, betonun iç yapısını değerlendirmek ve malzeme kalitesini belirlemek için kullanılan tahribatsız muayene tekniklerinden biridir (Erdoğan, 2003). Bu yöntem, beton içindeki ses dalgalarının yayılma hızını ölçerek çatlakların, boşlukların ve yapısal kusurların tespit edilmesini sağlar. Ses dalgalarının hızlı yayılması betonun yoğun ve homojen olduğunu, yavaş yayılması ise iç yapıda kusurlar veya ayrışmalar bulunduğunu gösterir. ASTM C597 ve TS EN 12504-4 gibi standartlar, bu testlerin doğru ve tutarlı bir şekilde uygulanmasını sağlar (Erkuş, 2013). Özel katkı malzemeleriyle üretilen betonlarda, örneğin profillit kullanıldığında, ultrasonik testler malzemenin homojenliğini ve mekanik performansını değerlendirmek için önemli bir araçtır. Profillitin yüksek erime sıcaklığı ve kimyasal dayanımı, betonun refrakter özelliklerini geliştirirken, ultrasonik testler sayesinde iç yapı kusurlarının tespiti kolaylaşır ve yapı güvenliği sağlanır.

3.8. Donma Çözünme

Betonların donma-çözülme dayanımı, özellikle soğuk iklim koşullarında beton yüzeylerinin uzun ömürlü olmasını sağlayan kritik bir özelliktir. Donma-çözülme olayları, beton içerisindeki suyun düşük sıcaklıklarda donarak hacimce genişmesi ve çözülme sırasında daralmasıyla meydana gelir (Türkmen 2007). Bu süreç, betonun içyapısında mikro çatlaklara ve zamanla dayanım kaybına neden olabilir. Betonun donma-çözülme dayanıklılığı, çimento oranı, su/çimento oranı, agreganın yapısı, hava katkısı ve betonun kür koşulları gibi faktörlere bağlıdır (Türkmen, 2007). Özellikle hava katkısı, beton içerisinde mikroskobik hava boşlukları oluşturarak donan suyun genişleme basıncını hafifletir ve çatlak oluşumunu engeller. Bu sayede hava katkılı betonlar, donma-çözülme olaylarına karşı daha dirençli hale gelir.

Donmaya dayanıklılığı artırmak için kullanılan bir diğer yöntem ise uygun agrega seçimidir (Aydeniz, 2012). Düşük su emme kapasitesine sahip agregalar, betonun bünyesinde fazla su tutmayarak donma sırasında oluşabilecek iç gerilmeleri sınırlar. Gözenekli yapıya sahip bazı agregalar ise, bünyelerinde bulunan suyun donma-genleşme etkisini azaltarak betonun dayanımını destekler. Ayrıca betonun su/çimento oranı düşük tutulduğunda ve sıkı bir yapı oluşturulduğunda, beton daha az su geçirir, bu da donma-çözülme etkilerini minimize eder.

Donma-çözülme dayanımını sağlamak, özellikle köprü kirişleri, barajlar, yol döşemeleri ve havaalanı pistleri gibi atmosfer etkilerine açık yapı elemanları için hayati bir öneme sahiptir (Keskinateş, 2015). Bu tür yapılar, laboratuvar ortamında tekrarlı -20°C 'de dondurma ve $+20^{\circ}\text{C}$ 'de çözme testleriyle kontrol edilmektedir (Keskinateş, 2015). Ayrıca, betonun kürlenmesi sırasında nem oranının uygun seviyede tutulması, dayanıklılığın artmasına katkı sağlar. Beton dökümünün kış aylarında yapılması gerektiğinde, priz sırasında oluşan ısının muhafazası sağlanarak betonun soğuk hava koşullarında zarar görmesi engellenir.

3.9. Radyasyon

Radyasyonun keşfi, elektromanyetik spektrumun anlaşılmasında büyük bir dönüm noktasıdır. Herschel ve Ritter'in yaptığı keşifler, görünür ışığın ötesinde kalan kızılötesi ve ultraviyole ışınlarını ilk kez ortaya koyarak, radyasyonun geniş bir spektrumda var olduğunu göstermiştir (Tuncel ve Tuncel, 2016). Kızılötesi radyasyonun keşfi, özellikle

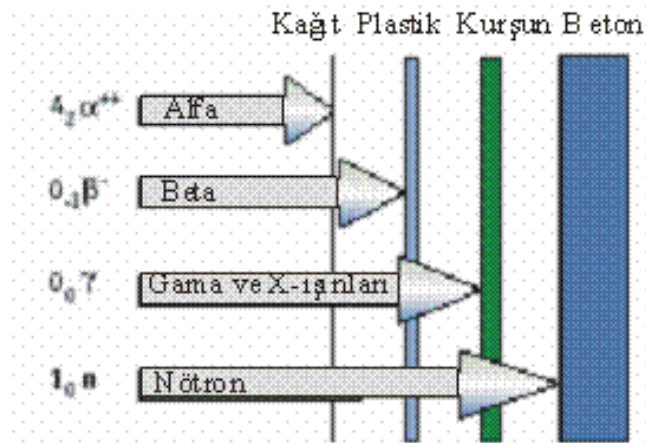
astronomi ve termal görüntüleme alanında önemli bir buluşken, UV ışınlarının keşfi kimyasal reaksiyonlar ve biyolojik etkiler açısından önemli sonuçlar doğurmuştur. Hertz'in deneysel çalışmaları ise, radyo dalgalarının yapay olarak üretilebileceğini ve elektromanyetik dalgaların teorik olarak varlığını doğrulamış olması açısından bilim dünyasında büyük yankı uyandırmıştır (Yıldırım, 2019).

Radyasyonun bu farklı türlerinin keşfi, bilim dünyasında yeni araştırma alanları açmış ve modern teknolojilerin temelini oluşturmuştur (Akyıldırım, 2011). Örneğin, radyo dalgalarının yapay üretimi, radyo ve televizyon gibi iletişim araçlarının temelini oluştururken, kızılötesi ve ultraviyole radyasyonun keşfi, optik ve tıbbi alanlarda yeni uygulamalara kapı açmıştır. Radyasyonun farklı biçimlerinin anlaşılması, teknolojik gelişmeleri hızlandırmış ve bu dalga boylarının farklı alanlarda kullanılmasıyla modern bilim ve mühendislik alanlarına büyük katkılar sağlamıştır (Akyıldırım, 2011).

3.9.1. Radyasyonun Çeşitleri

3.9.1.1. İyonlaştırıcı radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon, girdiği ortamda atomları iyonlaştıran, yani atomlardan elektron kopararak onları yüklü hale getiren radyasyon türüdür (Kıpçak, 2009). İyonlaştırıcı radyasyonlar iki ana kategoriye ayrılır: elektromanyetik radyasyonlar ve parçacıklı radyasyonlar (Kıpçak, 2009).



Şekil 3. 4. Farklı Radyasyon Tipleri İçin Giricilik Mesafeleri
(<https://www.tenmak.gov.tr>)

İyonlaştırıcı radyasyon, alfa ve beta parçacıkları, nötronlar, gama ve X-ışınları gibi çeşitli formlarda olabilir (Hacıismailoğlu, 2016). Bu radyasyon türleri, madde ile

etkileşime geçtiğinde atomlardan elektronları kopararak iyonlaşmaya neden olur. Her bir radyasyon türü, farklı malzemelerle etkin bir şekilde durdurulabilir (Kalyon, 2019). Örneğin, alfa parçacıkları kâğıt ile engellenebilirken, beta parçacıkları plastik ile durdurulabilir (Erdoğan, 2017). Gama ve X-ışınları için kurşun gibi daha yoğun malzemeler gerekirken, nötronları durdurmak için beton gibi kalın yapılar kullanılabilir (Erdoğan, 2017) (Şekil 3.4).

Elektromanyetik radyasyonun bir türü olan gama (γ) ve X ışınları, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalardır (Çimen, 2019). Gama ışınları, elektromanyetik radyasyonlar arasında en yüksek frekansa ve en kısa dalga boyuna sahip radyasyon türüdür (Çimen, 2019). Bu ışınlar, atom çekirdeğindeki enerji seviyelerinin değişiminden kaynaklanır. Çekirdek, bir alfa veya beta parçacığı yaydıktan sonra kararlı bir duruma ulaşamayabilir ve bu fazla enerjiyi elektromanyetik radyasyon olarak dışa vurur. Elektrik yükü taşımadıkları için elektrik ve manyetik alanlardan etkilenmezler ve yoğunlukları madde içerisinde üstel olarak azalır. Alfa ve beta ışınlarına kıyasla daha enerjik ve daha girici olan gama ışınlarının engellenmesi için kurşun tuğlalar gibi yoğun malzemelerle koruma sağlanır. X ışınları ise yüksek enerjili elektronların atom çekirdeklerine yaklaşp yavaşlamasıyla oluşur (Akyol, 2015).

Alfa (α) ışınları, pozitif yüklü helyum çekirdeklerinden (He^{++}) oluşan parçacıklardır. Çalışmalar, bu ışınların basit bir kâğıt parçası veya insan cildi tarafından durdurulabileceğini göstermiştir. Beta (β) ışınları ise hem pozitif (+) hem de negatif (-) elektrik yüklü parçacıklardan oluşur. Beta parçacıkları, ince bir su tabakası, metal levha veya cam ile kolayca durdurulabilir. Alfa ve beta ışınları, atom çekirdeklerinden yayılan radyoaktif parçacıklardır ve belirli bir kütleye sahiptirler. Ancak, X ışınları ve gama ışınlarına kıyasla daha düşük penetrasyon yeteneğine sahip olmalarına rağmen, iyonlaştırıcı etkileri oldukça güçlüdür (Akyıldırım, 2011).

Nötronlar ve protonlar, nükleer reaksiyonlar sırasında atom çekirdeğinden yayılan ve alfa ışınlarına göre daha küçük kütleli nükleer parçacıklardır (Filiz, Gençel, Özel, ve Sancak, 2008). Özellikle nötronlar, elektrik yükü taşımadıkları için maddelere çok daha fazla nüfuz ederler ve insan sağlığı açısından en tehlikeli radyasyon türlerinden biri olarak kabul edilirler. Bu radyasyonlar, girdikleri maddeyle etkileşime girerek daha fazla iyonlaşmaya neden olabilir (Kıpçak, 2009).

3.9.1.2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar

İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar, çevremizde sıklıkla karşılaştığımız ve genellikle zararsız kabul edilen radyasyon türlerini içerir. Optik radyasyonlar, özellikle ultraviyole (UV) ışınları, güneş kaynaklı olup, maruz kalma durumunda deri ve gözlerde hasara neden olabilir (Turhan, 2008). Elektromanyetik radyasyon (EMR) nitelikli radyasyonlar ise radyo dalgaları, mikrodalgalar, cep telefonları ve televizyon vericileri gibi modern cihazlardan yayılan radyasyonlardır (Akın, 2019). Bu radyasyon türleri iyonlaştırıcı olmadıkları için DNA'ya doğrudan zarar vermezler, ancak uzun süreli ve yoğun maruziyet bazı sağlık riskleri taşıyabilir (Eren, 2014).

3.9.2. Radyasyondan Korunma Yolları

Literatürde radyasyonun zararlı etkilerinden korunmanın üç temel yöntemi, zaman, mesafe ve zırhlama kuralı olarak belirtilmektedir (Akyıldırım, 2011). Bu üç temel ilke, kişinin radyasyona maruz kalma süresini minimize etmek, radyasyon kaynağı ile kişi arasındaki mesafeyi artırmak ve uygun zırhlama ile radyasyonun etkisini azaltmak üzerine odaklanmaktadır (Akyıldırım, 2011).

3.9.2.1. Zaman

Radyasyondan korunmanın en temel ve en basit kuralı, maruziyet süresini mümkün olduğunca kısa tutmaktır (Sunar, 2022). ALARA (As Low As Reasonably Achievable) ilkesine göre (ICRP, 1997), radyoaktif kaynaklarla gerçekleştirilen işlemler en kısa sürede tamamlanmalıdır (Sunar, 2022). Radyasyona maruz kalan bir maddenin emdiği doz zaman içinde değişkenlik gösterir. A aktivitesine sahip bir kaynağın, kendisinden r mesafedeki doz hızı ve Γ spesifik gama-ışını sabiti ile ilişkilendirilen denklem:

$$\Delta X = \Gamma \frac{A}{r^2} \Delta t \quad (3.1)$$

Şeklinde ifade edilir (Krane, 1988). Bu denkleme göre, emilen doz ile maruziyet süresi arasında doğru orantı bulunmaktadır.

3.9.2.2. Mesafe

Alfa ve beta radyasyonları gibi yüklü radyasyonların havadaki ortalama serbest yolları oldukça kısa olup, bu radyasyonlar kısa mesafede zayıflarlar (Turhan, 2008). Buna karşılık, nötron ve gama ışınları daha uzun mesafeler kat edebilseler de mesafe arttıkça bu radyasyonların şiddeti azalır (Sunar, 2022). Bu yüzden, bir radyasyon kaynağından

korunmanın etkili yöntemlerinden biri, kaynaktan olabildiğince uzak durmaktır (Sunar, 2022). Radyasyona maruz kalınan miktar, mesafenin artmasıyla ters kare yasasına göre azalmaktadır (Eaves, 1964). Bunu açıklamak için, bir radyasyon kaynağından çıkan ışınların t süresi sonra r uzaklığında küresel dalga cephelemi oluşturduğunu varsaymak yeterlidir. Bu varsayım, ışınların yoğunluğunun kaynağın A_0 şiddetiyle doğru, küre yüzeyinin alanıyla ise ters orantılı olduğunu göstermektedir.

$$A \propto \frac{A_0}{4\pi r^2} \quad (3.2)$$

Burada A, r mesafesindeki radyasyonun şiddetini ifade eder. Ayrıca, d_2 mesafesindeki doz hızı D_2 , daha yakın bir d_1 mesafesindeki ($d_1 < d_2$) doz hızına D_1 oranla, mesafelerin kareleriyle ters orantılı olacak şekilde daha düşük olacaktır. Yani, doz hızı mesafeyle ters kare yasasına göre azalır; bu da d_2 'deki doz hızının, d_1 'deki doz hızına göre şu şekilde ifade edilmesini sağlar:

$$D_2 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 D_1 \quad (3.3)$$

3.9.2.3. Zırlama

Radyasyondan korunmanın en etkili yöntemlerinden biri, kaynak ile kişi arasında veya kaynağın çevresine zırlama yapılmasıdır (Şekil 3.5) (Knoll and Kraner, 1981). Bu zırlama, kişinin maruz kalacağı radyasyon miktarını en aza indirerek, izin verilen güvenli seviyelere çekmek amacıyla yapılır (James E. Martin and Tanır G, 2013). Zırh oluşturulurken beton, ağır beton, kurşun ve çelik gibi malzemeler kullanılabilir (Knoll and Kraner, 1981). Zırlama, aynı tür malzemelerle yapılabileceği gibi, farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle de sağlanabilir (Konings and Stoller, 2020).



Şekil 3. 5. Radyasyon ve Koruyucu Engel (Tenmark.gov.tr)

Radyasyon maruziyetini azaltan malzemeler, radyasyon zırhlama malzemesi olarak adlandırılır ve bu malzemeler tuğla, beton ve duvar gibi yapı elemanlarını içerebilir (Krane and Lynch, 1989). Radyasyonlu tanı ve tedavi merkezlerinde yapılan radyasyon zırhlama, cihazın veya odanın korunması şeklinde iki farklı yöntemle uygulanabilir (Knoll and Kraner, 1981). Yüksek yoğunluklu malzemeler kullanılarak yapılan zırhlama, özellikle X ve gama ışınlarına karşı güçlü bir koruma sağlar (Krane, 1991).

Her malzeme, temel düzeyde bir radyasyon zırhlama kapasitesine sahiptir; ancak bu özelliğin yanında başka nitelikler de aranır (Murray, 2000). Bir zırhlama malzemesi, yalnızca radyasyonu soğurmakla kalmamalı, aynı zamanda radyasyonun yaydığı ısı ve yayımladığı enerji ile diğer fiziksel etkiler karşısında da belirli dayanıklılık seviyelerine sahip olmalıdır (James E. Martin and Tanır G, 2013). Malzemenin sahip olduğu bu özellikler, onu dünya çapında radyasyon zırhı olarak yaygın kullanıma uygun hale getirmektedir (Krane and Lynch, 1989). Bir malzemenin radyasyon koruyucu olarak seçilebilmesi için dikkate alınması gereken bazı ana parametreler bulunur (Knoll and Kraner, 1981).

Bu parametreler arasında ilk sırada, malzemenin radyasyonu etkin bir şekilde zayıflatabilme yeteneği gelir; bu özellik, radyasyonun maddeye nüfuzunu sınırlandırarak zararlı etkilerini azaltmada önemlidir (Krane, 1991). Ayrıca, malzemenin ısı iletkenlik katsayısı da kritiktir, çünkü yüksek radyasyon yoğunluğu genellikle malzeme ile etkileşirken malzemeye aktardığı enerji nedeniyle önemli miktarda ısı açığa çıkarır ve bu ısının malzeme tarafından iyi yönetilmesi gerekir (Knoll and Kraner, 1981).

Malzemenin radyasyona bağılı hasarlara karşı direnci, uzun süre dayanıklı bir koruma sağlayabilmesi açısından önemlidir (Knoll and Kraner, 1981).

Bunun yanında, yoğunluk ve kalınlık gibi fiziksel özellikler, radyasyon zırhlamanın etkinliğini doğrudan etkiler; genellikle yoğun ve kalın malzemeler daha iyi koruma sağlar (Krane, 1991). Malzemenin radyasyon altında uzun süre bozunmadan kullanılabilmesi ve zamanla yapısal bütünlüğünü koruyabilmesi de göz önünde bulundurulmalıdır (Krane and Lynch, 1989). Zırhlama malzemesinin her bölgede homojen bir koruma sağlaması, güvenilir bir koruma için önemlidir (James E. Martin and Tanır G, 2013). Ayrıca, kolay bulunabilir ve ekonomik olması, özellikle büyük ölçekli uygulamalarda avantaj sağlar (Low ve Noor Azman, 2020).

3.9.2.4. Gama (γ) Radyasyon Zırhlama

Tıp, nükleer enerji ve sanayi radyasyonun etkili bir şekilde kullanıldığı başlıca alanlar arasında yer almaktadır. Tedavi merkezlerinde radyasyon zırhlama gerçekleştirilirken γ radyasyonunun zararlı etkilerinden korunmak için beton en çok kullanılan zırhlama malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu betonun çeşitli malzemeler ile karıştırılarak daha etkin zırhlama sağlaması amacıyla betona çeşitli katkı malzemeeri eklenebilir. Burada temel prensip betonun yoğunluğunun artırılması ve boşluklu yapının azaltılmasıdır. Günümüzde birçok katkı malzemesi betona katılanmıştır. Bu tez çalışmasında beton içerisine temel beton oluşturucu bileşenler haricinde profillit malzemesi kum ve agrega şeklinde ikame edilmiş ve kum ve agrega profillitin hangisinin daha etkin radyasyon zırhlama sağladığı ortaya konmaya çalışılmıştır. Bu amaçla şekil 3.6'da verilen radyasyon deney düzeneği hazırlanmış ve kum ve agrega katkılı profillit beton türlerinin radyasyon zırhlamadaki etkinliği deneysel olarak ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak denklem (3.4)'de verilen Lambert-Beer yasası vasıtasıyla Lineer Soğurma Katsayıları (LAC) (μ) elde edilmiştir (Krane, 1991). Burada, x beton kalınlığını, I_0 beton ölçüm sistemine yerleştirilmeden önce dedektör tarafından ölçülen gama sayısını (Şekil 3.6), I ise betonlar yerleştirildikten sonra ölçülen gama sayısını temsil etmektedir. Ayrıca, μ bu profillit katkılı betonların doğrusal zayıflatma katsayısını (LAC) ifade eder.

$$\mu = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) / (-x) \text{ (cm}^{-1}\text{)} \quad (3.4)$$

Bu ölçümlere ait standard sapma μ aşağıdaki denklem (3.5) vasıtasıyla hesaplanmıştır (Yorulmaz ve ark. 2024):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\mu_i - \bar{\mu})^2}{N-1}} \quad (3.5)$$

burada μ_i her bir ölçüm ifade ederken $\bar{\mu}$ ise ölçümlerin ortalamasını ifade eder. Ayrıca, N ise ölçüm sayısıdır.

Denklem (3.6)'te verilen Kütle Soğurma Katsayısı (MAC) ise birim beton kütesinin soğurabileceği radyasyon miktarını ifade eder. Burada, w_i kütle kesri ve ρ ise yoğunluktur (Yorulmaz ve ark. 2024).

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (\text{cm}^2/\text{g}) \quad (3.6)$$

Lineer soğurma katsayısı kullanılarak hesaplanan Yarı Geçirgenlik Değeri (HVL) denklem (3.7)'te verilmiştir. Malzeme ile etkileşen radyasyonun yarısını geçirebilen gerekli malzeme kalınlığını ifade eden bu değer temel radyasyon zırhlama parametrelerinden birisidir (Yorulmaz ve ark. 2024).

$$\text{Yarı Geçirgenlik Değeri (HVL)} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (\text{cm}) \quad (3.7)$$

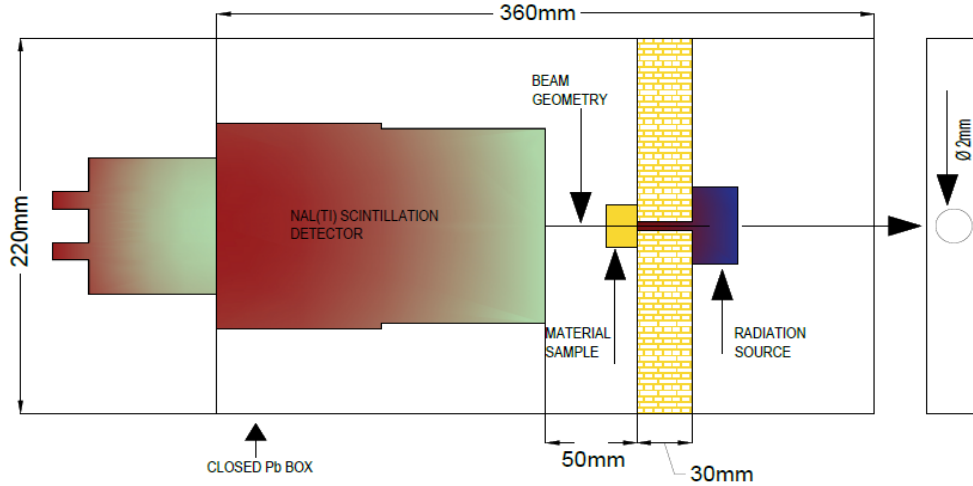
Denklem (3.8)'te verilen Onda-Bir Geçirgenlik Değeri (TVL) ise malzeme ile etkileşen gama radyasyonlarının onda birinin (1/10) geçmesi için gerekli malzeme kalınlığıdır (Yorulmaz ve ark. 2024):

$$\text{Onda - Bir Geçirgenlik Değeri (TVL)} = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (\text{cm}) \quad (3.8)$$

Denklem (3.9)'da verilen Ortalama Serbest Yol (MFP) ifadesi ise gama radyasyonunun malzeme içerisinde alabileceği yolu ifade eder (Yorulmaz ve ark. 2024):

$$\text{Ortalama Serbest Yol (MFP)} = \frac{1}{\mu} \quad (\text{cm}) \quad (3.9)$$

Çeşitli oranlarda (0%, 10%, 20%, 30% ve 100%) kum ve agrega Profillit katkı betonlara ait lineer soğurma katsayısını (LAC) elde etmek için şekil 3.5'te gösterilen deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu düzenekte NaI(Tl) (ORTEC® 905-4) (Yorulmaz ve ark. 2024) dedektörü ve 1 mCi aktiviteli ⁶⁰Co (SPECTRUM TECHNIQUES®) (Kavun ve Eken, 2024) kaynağından yayımlanan 1173 keV ve 1333 keV enerjili gama ışınları kullanılmıştır.



Şekil 3. 6: Deneysel Radyasyon Ölçüm Şeması (Kavun and Eken, 2024).

3.10. Yöntem

Beton karışımı TS EN 802 (Türk Standardları Enstitüsü 2016) (Tablo 3.7) uyarınca hazırlanmıştır. Kum ve agrega boyutlarından ikame edilecek pirofilit malzemesi, homojen bir karışım elde edilene kadar beton mikseri kullanılarak karıştırılmıştır.

Beton numuneleri Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi yapı malzemeleri laboratuvarında 10 cm × 10 cm × 10 cm kalıplara dökülmüş ve laboratuvar tipi vibratörle yerleştirilmiştir. W=C oranı 0,40 olarak belirlenmiş ve R(Referans) numunesi ile dokuz farklı numune serisi üretilmiştir. Üretilen numuneler karışım oranlarına ve içeriklerine göre adlandırılmış ve Tablo 3.8'de verilmiştir. Örneğin P10-K olarak adlandırılan numunede P kodu profilliti, rakamlardan oluşan bölümü karışımın % oranını ve K ise kum ikameli olduğunu, A ise agrega katkılı olduğunu ifade etmektedir.

Pirofilit katkılı taze beton numunelerinin işlenebilirliği, yoğunluğu ve beton sıcaklıkları da belirlenmiştir.

R ve profillit ikameli numuneler 24 saat boyunca laboratuvar ortamında ve daha sonra sertleştirilmiş beton test günlerine kadar 22°C'lik bir kür havuzu sıcaklığında tutulmuştur. Üretilen bir numunenin görseli şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3. 7. Üretilen Örnek Numune Görseli

Tablo 3. 8. Beton Numunelerinin Karışım Oranları, Taze Betonun Özellikleri ve 1 m³ Beton Karışımının Numune Adları

Numune Adı	Çimento Kg/m ³	Su Kg/m ³	Kum Kg/m ³	İri agrega Kg/m ³	Profillit Kum Kg/m ³	Profillit Agrega Kg/m ³	Slump Cm	Yoğunluk Kg/m ³	Taze beton sıcaklık (°C)
R	400	160	800	1150	-	-	7.4	2312	22
P10-K	400	160	720	1150	80	-	7.6	2360	21.4
P20-K	400	160	640	1150	160	-	7.7	2342	21.3
P30-K	400	160	560	1150	240	-	7.8	2324	21.5
P100-K	400	160	-	1150	800	-	7.9	2286	21.4
P10-A	400	160	800	-	1035	115	7.7	2308	21.5
P20-A	400	160	800	-	920	230	7.8	2352	21.3
P30-A	400	160	800	-	805	345	7.9	2367	21.4
P100-A	400	160	800	-	-	1150	8	2388	21.5

3.10.1. Beton Numunelerinin Basınç Dayanımı

Betonun kazandığı mukavemeti ölçmek için kullanılan deney yöntemlerinden biri de basınç dayanım testidir. Numunenin herhangi bir şekil bozukluğu olmadan belirli bir yüke maruz bırakılması ve bu yük altında gösterdiği ölçülebilir maksimum dayanım, test edilen numunenin basınç dayanım değerini ifade eder. Basınç dayanımı, teste tabi tutulan numunenin bileşenlerine, bileşenlerin numune içerisindeki oranlarına ve bulunduğu fiziksel ortama göre değişim gösterebilmektedir. Tez çalışmasında pirofilit katkılı 10 cm × 10 cm küp numunelerin TS 12390-3(TS EN 12390-3) (Türk Standartları Enstitüsü 2010) 7-28-90 günlük basınç dayanımları standarda uygun olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı testleri, üretilen numune gruplarından her seri için üç numunenin ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Basın dayanım testinin yapıldığı cihaz Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3. 8. Beton Basınç Dayanım Test Cihazı

3.10.2. Ultrasonik Ses İletim Hızı

7-28-90 günlük pirofilit katkılı küp numuneler için ASTM C 597 ultrasonik ses iletim testi (Naik ve ark. 2004) standartla uyumludur (Şekil 3.9). Ultrasonik ses iletim hızı, ses dalgalarının izlediği yol ve geçen zamanın ölçümüyle ilişkilidir.



Tablo 3. 9. Ultrasonic Tes Cihaz Görself

3.10.3. Donma-Çözölme Deneyi

9 farklı numune 0 cm × 10 cm × 10 cm boyutlarında profillit katkılı beton için 90 günlük kütleme periyodundan sonra, ASTM C 666 (ASTM, t.y.) standardına uygun olarak bir donma-çözölme testi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10). Donma-çözölme testinin çevrim süresi, toplam 4 saat ve 50 çevrim için -18°C'de 3 saat dondurma ve ±4°C'de 1 saat çözmeydi.



Tablo 3. 10.Donma-Çözölme Ölçüm Cihaz Görself

3.10.4. Yüksek Sıcaklık Direnci

Profillitli ve profillitsiz referans numuneler kül fırınında 25°C, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldı (Şekil 3.11). Yüksek sıcaklıktan sonra, numuneler bir hava soğutma rejimine tabi tutuldu. Numunelerin basınç dayanımı değerleri, ağırlık kaybı ve ultrasonik ses geçirgenliği hava soğutma rejiminden sonra belirlendi.



Tablo 3. 11. Yüksek Sıcaklık Fırını

4. ARAŞTIRMALAR VE BULGULAR

4.1. Beton Numunelerin Basınç Dayanımı

Pirofilit kumu ve agrega takviyeli numunelerin 7-28-90 günlük basınç dayanımı değerleri Tablo 4.1'de, değer grafikleri ve Şekil 4.1'de verilmiştir. 7 günlük basınç dayanımı değerleri pirofilit katkı maddesinin türüne ve oranına göre 23,2 ile 35,02 MPa arasında elde edilmiştir. Pirofilit kumu katkılı 7 günlük numunelerin basınç dayanımı değerleri 29,15 ile 35,02 MPa arasında elde edilmiştir.

En yüksek basınç dayanımı değerine sahip numune, referans betona ve 35,02 MPa'ya kıyasla %50,94'lük bir orana sahip olan P30-K'dir. En düşük dayanım değerine sahip numune ise 23,2 MPa'lık takviyesiz referans (R) numuneden elde edilmiştir.

Diğer profillit kum katkılı numuneler P10-K %30,47, P20-K %39,74 ve P100-K %25,64 referans betondan daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahipti. Profillit agrega boyutu katkılı 7 günlük numunelerin basınç dayanımı değerleri 28,11 ile 34,08 MPa arasında elde edildi. En yüksek basınç dayanımı değerine sahip numune, 34,08 MPa olan referans betona kıyasla %46,89'lük bir oranla P30-A oldu.

En düşük dayanım değerine sahip numune ise 23,2 MPa olan karıştırılmamış referans (R) numunesinden elde edildi.

Diğer profillit agrega boyutlarına sahip numuneler P10-A %24,82, P20-A %34,35 ve P100-A %21,16 referans betondan daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahipti. 28 günlük profillit kum takviyeli numunelerin basınç dayanımı değerleri 33,2 ile 50,08 MPa arasında elde edildi.

28 günlük profillit kum takviyeli numunelerin basınç dayanımı değerleri 44,44 ile 50,08 MPa arasında elde edildi. En yüksek basınç dayanımı değerine sahip numune, referans betona göre %50,84 oranında 50,08 MPa ile P30-K idi. En düşük dayanım değerine sahip numune ise 33,2 MPa ile takviyesiz referans (R) numuneden elde edildi. Diğer profillit kum katkılı numuneler P10-K 37,89%, P20-K 41,95% ve P100-K 33,85% referans betondan daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahipti. Profillit agrega takviyeli numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri 43,21 ile 49,27 MPa arasında elde edildi.

En yüksek basınç dayanımı değerine sahip numune, referans betona göre 48,40% oranında 49,27 MPa ile P30-A olarak adlandırıldı. En düşük dayanım değerine sahip numune, 33,2 MPa'lık katkı maddesi içermeyen referans (R) numuneden elde edildi.

Diğer profillit agrega boyutlarına sahip numuneler P10-A 30,15%, P20-A 39,51% ve P100-A 30,18% referans betondan daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahipti. Profillit kum takviyeli numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri 38,4 ile 62,76 MPa arasında elde edildi.

90 günlük profillit kum takviyeli numunelerin basınç dayanımı değerleri 49,14 ile 62,76 MPa arasında elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değerine sahip numune, referans betona göre %63,43'lük bir oranla 62,76 MPa ile P30-K olmuştur.

En düşük dayanım değerine sahip numune, 38,4 MPa ile katkısız referans (R) numuneden elde edilmiştir. Diğer profillit kum katkılı numuneler P10-K %51,40, P20-K %56,90 ve P100-K %27,96 referans betondan daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahipti. Profillit agrega takviyeli numunelerin 90 günlük basınç dayanımı değerleri 48,76 ile 61,11 MPa arasında elde edilmiştir.

En yüksek basınç dayanımı değerine sahip numune, referans betondan %59,14 daha yüksek olan 61,11 MPa ile P30-A'dır.

En düşük dayanım değerine sahip numune, 38,4 MPa ile karıştırılmamış referans (R) numunesinden elde edilmiştir.

Diğer profillit agrega boyutlarına sahip numuneler P10-A %48,46, P20-A %54,14 ve P100-A %24,97 referans betondan daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahipti.

Elde edilen veriler, profillitin betonda agrega olarak kullanılmasının mekanik özelliklerini iyileştirdiğini gösteren önceki araştırmalarla tutarlıdır (Demez, 2017).

Özellikle, kum boyutunda kullanıldığında profillit boşluk oranını azaltır ve betonun tokluğunu artırır. Agrega boyutunda kullanıldığında, çimento-agrega arayüzünde daha güçlü bir bağlayıcı kuvvet oluşturur.

Betonun basınç dayanımı, çimento-agrega arayüzünün alanından önemli ölçüde etkilenir. Profillit takviyeli numuneler, çimento macunu arayüz bölgesinin düşük boşluk oranı nedeniyle normal betona kıyasla daha yüksek basınç dayanımı gösterir.

Normal betonda, zayıf ve içi boş arayüz bölgesi nedeniyle çatlaklar agrega etrafında oluşma eğilimindedir. Ancak, yüksek dayanımlı betonda çatlaklar agregadan geçer. Ayrıca, agrega yüzeyinin pürüzlülüğü, girinti ve çıkıntı dokularının varlığı, arayüz bölgesi, agrega temas yüzey alanı ve kohezif kuvvetteki artış, mekanik kenetlenmenin oluşumuna katkıda bulunur (Gündüz ve Uğur 2005). Bu nedenle, pürüzlü, girintili ve çıkıntılı dokulara sahip profillit agregasının kullanılmasının, normal beton agregasına kıyasla çimento-agrega arayüz bölgesine daha iyi yapışma sağladığına inanılmaktadır.

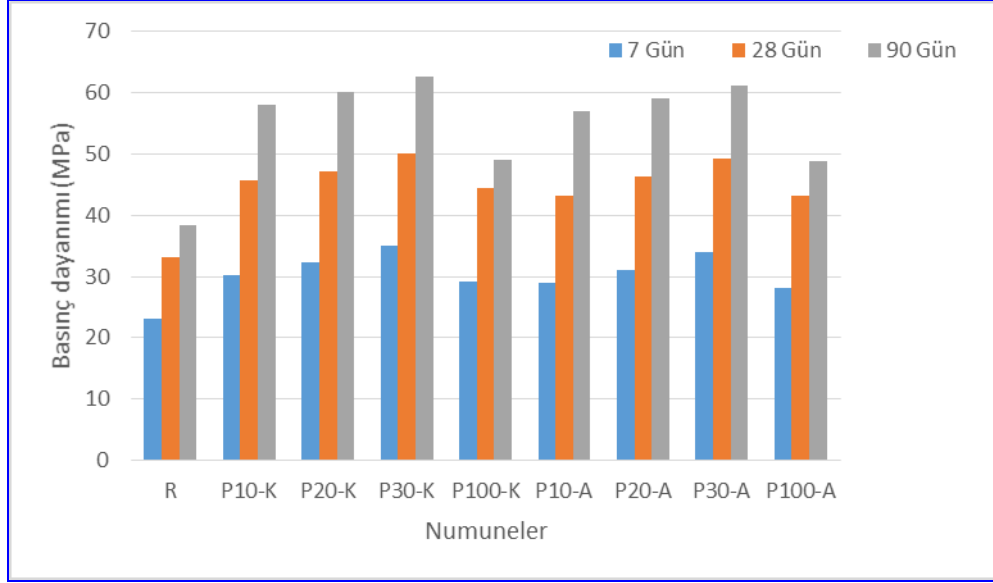
Betonun sürdürülebilirliğine katkıda bulunmak ve mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek için çimento, kum ve agrega gibi alternatif malzemelerin kullanımının araştırılması büyük önem taşımaktadır. Profillit, 1990'larda Mersin ÇİMSA çimentosu tarafından beyaz çimento üretiminde kullanılmış ve süperbeyaz adı altında Avrupa'nın en kaliteli beyaz çimentolarından biri haline gelmiştir (Uygun ve Solakoğlu 2002).

Dündar ve arkadaşları çalışmalarında profillit tozunu %10-%20-%30 oranında çimento ve %0,1-%0,5 aralığında elyaf takviyesiyle değiştirerek harç numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elde edilen verilerde, P20 takviyeli numunelerin yayılma çapı 13,50 cm'de ölçülmüştür, P10 takviyeli numuneler referans betondan %0,04 daha az su emme oranına sahiptir, P10 takviyeli numune 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarında 6,80 MPa ile referans betondan daha yüksek olmuştur ve P10 takviyeli numune referans betona kıyasla 48,54 MPa ile daha yüksek bir basınç değerine sahiptir. Çalışmanın sonucunda, profillit tozunun harç üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilmesi ve üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunduğu belirtilmiştir (Dündar ve ark. 2019).

Demez, yüksek dayanımlı beton üretiminde %25-%50-%75-%100 oranında profillit agregası kullanmıştır. Üretilen beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımlarının referans betondan %83-%104 daha yüksek olduğunu ve 90 günlük basınç dayanımı değerlerinin referans betona kıyasla %93 ile %134 arasında bir dayanım artışı sağladığını tespit ettiler (Demez, 2017).

Tablo 4. 1. Profillit Kum ve Agrega İkameli Betonun 7-28-90 Günlük Basınç Değerleri

Numune	Basınç Değerleri (MPa)		
	7 Gün	28 Gün	90 Gün
R	23.2	33.2	38.4
P10-K	30.27	45.78	58.14
P20-K	32.42	47.13	60.25
P30-K	35.02	50.08	62.76
P100-K	29.15	44.44	49.14
P10-A	28.96	43.21	57.01
P20-A	31.17	46.32	59.19
P30-A	34.08	49.27	61.11
P100-A	28.11	43.22	48.76



Şekil 4. 1. Profillit Kum ve Agregalı İkameli Betonun 7-28-90 Günlük Basınç Değerleri

4.2. Ultrasonik Ses Geçirgenlik Testi

7, 28 ve 90 günlük profillit takviyeli beton numunelerinin ultrasonik ses iletim hızı (UPV) verileri Şekil 4.2'de verilmiştir. Pirofillit katkı ve katkısız referans (R) numunelerinin 7 günlük UPV değerleri 3.554 ile 3.711 m/s arasında ölçülmüştür. Pirofillit kum katkıli numunelerin 7 günlük UPV değerleri 3.602 ile 3.711 m/s arasındadır. Kum takviyeli profillit numuneleri arasında en yüksek UPV değerine sahip numune 3.711 m/s ile P30-K adlı numunedir. Profillit agregalı takviyeli numunelerin UPV değerleri 3.588 ile 3.621 m/s arasındadır. Agregalı takviyeli profillit numuneleri arasında en yüksek UPV değerine sahip numune 3.621 m/s ile P30-A adlı örnektir.

Tüm profillit kum ve agregalı katkıli numunelerin 7 günlük UPV değerleri R numunesinden daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Profillit katkıli ve katkısız referans (R) numunelerinin 28 günlük UPV değerleri 3.710 ile 4.312 m/s arasında ölçülmüştür. Profillit kum katkıli numunelerin 28 günlük UPV değerleri 4.065 ile 4.312 m/s arasındadır. Kum takviyeli profillit numuneleri arasında en yüksek UPV değerine sahip numune, 4.312 m/s ile P30-K adlı numunedir.

Profillit agregalı takviyeli numunelerin UPV değerleri 4.015 ile 4.298 m/s arasındadır. Agregalı takviyeli profillit numuneleri arasında en yüksek UPV değerine sahip numune, 4.298 m/s ile P30-A adlı numunedir.

Tüm profillit kum ve agregalı katkıli numunelerin 28 günlük UPV değerleri R (referans) numuneden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Profillit katkıli ve katkısız referans (R) numunelerin 90 günlük UPV değerleri 3.987 ile 4.789 m/s arasında ölçülmüştür. Profillit kum katkıli numunelerin 90 günlük UPV değerleri 4.321 ile 4.789

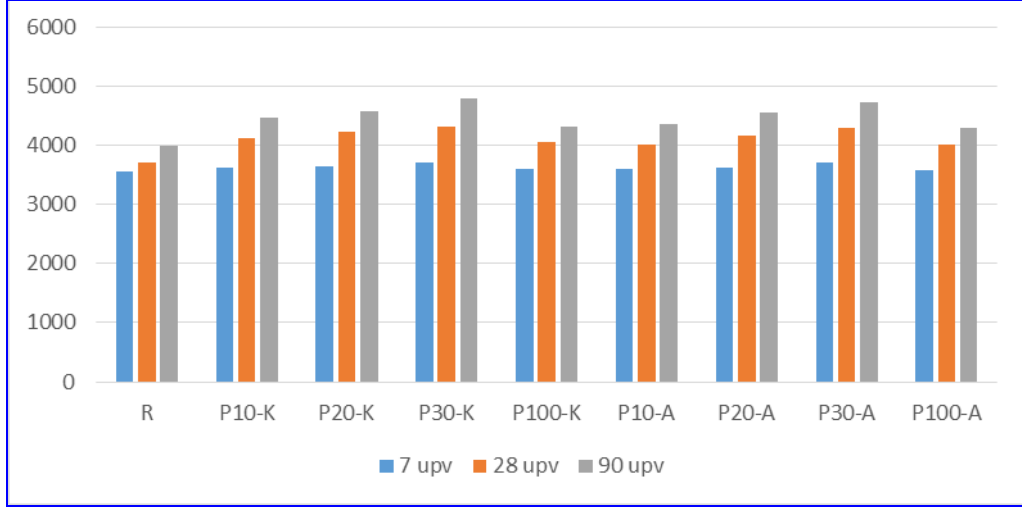
m/s arasındadır. Kum takviyeli profillit numuneleri arasında en yüksek UPV değerine sahip olan numune 4.789 m/s ile P30-K adlı numunedir. Profillit agrega takviyeli numunelerin UPV değerleri 4.301 ile 4.722 m/s arasındadır. Agrega takviyeli profillit numuneleri arasında en yüksek UPV değerine sahip olan numune 4.722 m/s ile P30-A adlı numunedir. Tüm profillit kum ve agrega takviyeli numunelerin 90 günlük UPV değerleri R numunesinden daha yüksektir. Profillit kum ve agrega katkılı ve katkısız R numunesinin UPV değerleri Şekil 4.2 'de verilmiştir. Elde edilen veriler profillit katkısının betonun UPV değerlerine katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Betonun UPV sınıflandırmasına göre, profillit takviyeli numunelerin “çok iyi ve iyi” [IS 13311 (Bölüm 1)] (BIS 1992) olarak sınıflandırıldığı görülmektedir. UPV dalga hızları, agrega türü, karışımdaki kullanım oranı, boşluk miktarı, numunedeki dağılım ve tane boyutu gibi faktörlere bağlı olarak değişir.

Profillit eklenmiş beton numunelerinin tüm günlerdeki yüksek UPV değerleri, numunelerin yoğunluğunun, homojenliğinin ve kusur seviyelerinin normal betondan daha üstün olduğunu göstermektedir. Ayrıca, UPV değerleri doğrudan hidratlanmış C—S—H jel boşluğu yapısı ve CH kristalleriyle bağlantılıdır ve üretilen betonun kalitesini vurgular. Ultrasonik ses iletim hızı, numunelerin homojenliği ve basınç dayanımı değerleri hakkında tahribatsız bilgi sağlar. Mevcut dayanıklılık ve gözeneklilik gibi betonun diğer özellikleri dalga iletim hızını etkiler (Shariq ve ark. 2013).

Tablo 4. 2. Ultrasonik Ses Geçirgenlik Veri Tablosu

Numune	7 Günlük upv	28 Günlük upv	90 Günlük upv
R	3554	3710	3987
P10-K	3614	4115	4456
P20-K	3648	4233	4572
P30-K	3711	4312	4789
P100-K	3602	4065	4321
P10-A	3597	4016	4352
P20-A	3621	4164	4547
P30-A	3703	4298	4722
P100-A	3588	4015	4301



Şekil 4. 2. Ultrasonik Ses Geçirgenlik Veri Grafiği

4.3. Donma ve Çözülmeden Sonra Basınç Dayanımı

90 günlük referans numunelerinin profillit kum ve agregat katkı ve katkısız donma-çözülme dayanımları 50 çevrimden sonra -18°C ve $+4^{\circ}\text{C}$ 'de Şekil 5'te, donma-çözülme sonrası UPV değerleri ise Şekil 4.3'te verilmiştir. Donma-çözülme sonrası basınç dayanımı ve UPV korelasyonu Tablo 4.3'te verilmiştir.

Profillit katkı ve R numunelerinin 90 günlük donma-çözülmeden önce ve sonra basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, profillit kum ve agregat katkı tüm numuneler %5,63-%8,62 basınç kaybına maruz kalırken, referans numune %11,56 basınç kaybına uğramıştır.

Profillit kum ve agregat takviyeli numunelerin donma-çözülme sonrası kütle kaybı %4,6 ile %6,5 arasındayken, R numunesinin kütle kaybı %11,2 oranında değişti. Tüm profillit takviyeli numunelerin donma-çözülme sonrası basınç ve kütle kaybı değerleri R numunesinin değerlerinden daha düşüktür. Donma-çözülme hasarı, betonun mikro yapısından kaynaklanan karmaşık bir fiziksel ve kimyasal olgudur (Qiu ve ark. 2020; Wang ve ark. 2018).

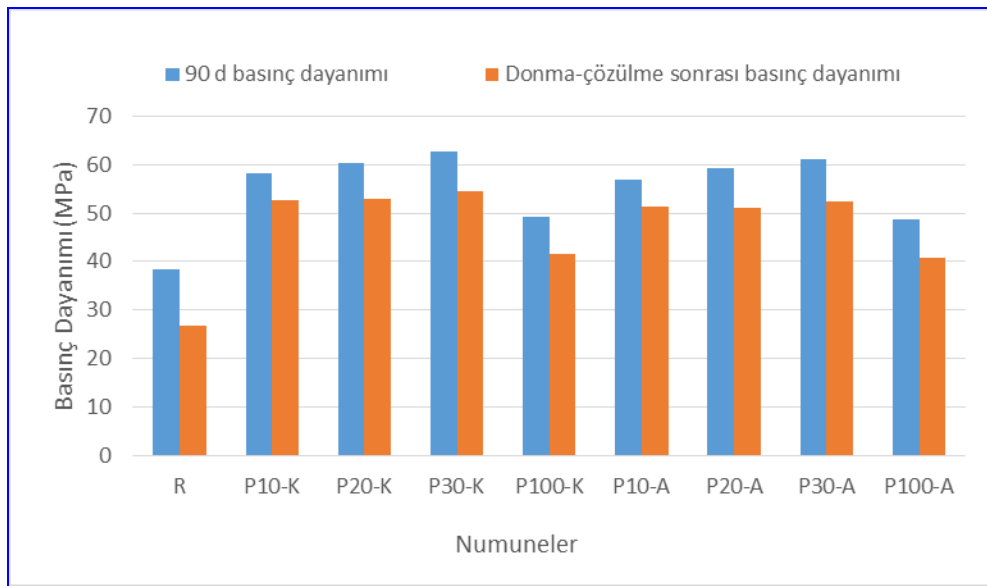
Numunelerin boşluk yapısı, boşluk çapı ve kullanılan katkı maddelerinin su emme oranları donma-çözülme direncini önemli ölçüde etkiler (Binici ve Aksogan 2018). Donma-çözülme hasarı, betonun mikro yapısından kaynaklanan karmaşık bir fiziksel ve kimyasal olgudur. Numunelerin boşluk yapısı, boşluk çapı ve kullanılan katkı maddelerinin su emme oranları donma-çözülme direncini önemli ölçüde etkiler (Binici ve Aksogan 2018).

Donma-çözülme döngüleri beton numunelerinde kütle kaybına (Ren ve Lai 2021) ve çatlak oluşumu nedeniyle mukavemet kaybına (Dong ve diğerleri 2021) neden olur. Suyun buza dönüşmesi hacim artışına neden olur ve bu da gözeneklilik oluşumuna ve hasara yol açar (Liu ve Wang 2012). Belirtilen hasarlar, üretilen numunelere uygulanan donma-çözülme döngüleri sırasında açıkça meydana gelmiştir.

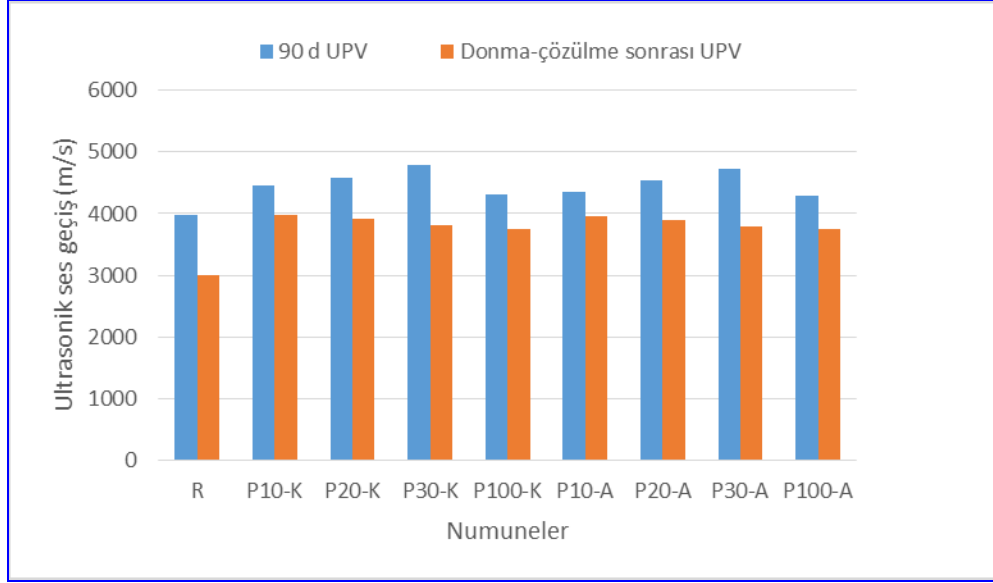
Profillit eklenmiş numunelerin yüzey incelemesi sonucunda, parçacık dökülmesinin normal betondan önemli ölçüde daha az olduğu ve bunun da önemli ölçüde daha düşük kütle kayıplarına yol açtığı kesin olarak belirlenmiştir. Profilit eklenmiş betonlarda gözeneklilik oluşumları, donma-çözülme döngülerinin neden olduğu içyapıdaki bozulma nedeniyle normal betona kıyasla daha az yaygındır.

Tablo 4. 3. Donma-çözülme

Numune	90 Gün	Kütle kaybı	50	Basınç
			çevrim	kayıbı
			Basınç	Donma
			dayanımı	çözülme
R	38.4	11.2	26.83	30.11
P10-K	58.14	4.6	52.53	9.64
P20-K	60.25	5.2	52.94	12.13
P30-K	62.76	5.6	54.57	13.04
P100-K	49.14	6.2	41.64	15.26
P10-A	57.01	4.9	51.37	9.89
P20-A	59.19	5.6	51.15	13.58
P30-A	61.11	5.9	52.48	14.11
P100-A	48.76	6.5	40.82	16.27



Şekil 4. 3. Donma-Çözülme Sonrası Dayanım Verileri



Şekil 4. 4. Donma-Çözülme Sonrası Ultrasonik Ses Geçiş Verileri Grafiği

4.4. Yüksek Sıcaklık Sonrası Beton Performansı

4.4.1. Artık Basınç Dayanımı

Pirofilit kumu, agrega katkılı ve referans numunelerin 25°C–200°C–400°C–600°C–800°C ve kül fırınında 1.000°C sıcaklıklara maruz bırakılıp ardından hava soğutma rejimine tabi tutulmasıyla elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'te verilmiştir.

Literatür çalışmaları, numunelerin 100°C'de bile mekanik dayanımlarını koruduğunu açıkça göstermiştir (Savva ve diğerleri, 2005). Ayrıca, 200°C'ye ısıtıldığında, numunelerde bulunan nem buharlaşır, jel katmanlarının birbirine daha yakın olmasına ve aralarında sağlam Vander Waals bağlarının oluşmasına neden olur, böylece basınç dayanımında önemli bir artışa yol açar (Aydin ve Baradan 2007; Khoury 1992; Hossain 2006).

Profilit kum katkılı numunelerin bağıl artık basınç dayanımı değerleri Şekil 4.5'te, profilit agrega katkılı numunelerin basınç dayanımı değerleri ise Şekil 4.6'da verilmiştir. 25°C'deki basınç dayanımı değerleri %100 olarak kabul edilmiş ve diğer sıcaklıklarda elde edilen basınç değerleri bu şekilde değerlendirilmiştir.

Profilit kum katkılı numunelerin ve yüksek sıcaklıktan sonra hava soğutma rejimine sahip agrega katkılı numunelerin basınç dayanımı değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Referans numuneler de dahil olmak üzere tüm katkılı numunelerde 200°C'lik sıcaklıklarda %0,9-%5,14'lük basınç dayanımı artışları elde edilmiştir. Bu artış, numunelerde bulunan suyun

buharlaşmasına atfedilmektedir. Bu, buharlaşma ile jel tabakaları arasındaki mesafenin azalması ve çok daha güçlü Van der Waals bağlarının oluşmasıyla açıklanmaktadır (Hossain, 2006; Aydın ve Baradan 2007; Khoury, 1992). Mukavemet kayıpları 200°C'deki sıcaklıklardan sonra başlamıştır.

400°C'lik sıcaklıklarda, profillit kum takviyeli numunelerde P10-K-%36, P20-K-%34, P30-K-%27 ve P-100-K-%7 basınç dayanımı kaybı meydana gelirken, profillit agrega takviyeli numunelerde P10-A-%38, P20-A-%35, P30-A-%29 ve P-100-A-%8 basınç dayanımı kaybı meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı kaybı %40 ile referans numunede meydana gelmiştir.

600°C'de, profillit kum takviyeli numunelerde basınç dayanımı kaybı P10-K-58%, P20-K-56%, P30-K-55% ve P-100-K-34% oranlarında meydana gelirken, profillit agrega takviyeli numunelerde basınç dayanımı kaybı P10-A-59%, P20-A-57%, P30-A-56% ve P-100-A-35% oranlarında meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı kaybı %40 ile referans numunede meydana geldi.

800°C'lik sıcaklıklarda, profillit kum takviyeli numunelerde P10-K-63%, P20-K-62%, P30-K-60% ve P-100-K-57% oranlarında basınç dayanımı kaybı meydana gelirken, profillit agrega takviyeli numunelerde P10-A-64%, P20-A-63%, P30-A-61% ve P-100-A-58% oranlarında basınç dayanımı kaybı meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı kaybı %65 ile referans numunede meydana gelmiştir.

1.000°C sıcaklıklarda, profillit kum takviyeli numunelerde P10-K-66%, P20-K-64%, P30-K-63% ve P-100-K-59% basınç dayanımı kaybı meydana gelirken, profillit agrega takviyeli numunelerde P10-A-67%, P20-A-65%, P30-A-64% ve P-100-A-60% basınç dayanımı kaybı meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı kaybı %72 ile referans numunede meydana gelmiştir.

Profillit agrega takviyeli numunelere kıyasla profillit kum takviyeli numunelerin daha yüksek basınç dayanımı ve daha düşük basınç kaybı, kumun çatlakları ve boşlukları doldurması ve betonun iç yapısının daha yoğun hale gelmesiyle açıklanmaktadır. Ezilmiş kireç taşı ve silika kökenli agregalar kullanılarak üretilen numuneler 100°C–300°C–600°C gibi yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış ve hava soğutma rejimi uygulanmıştır.

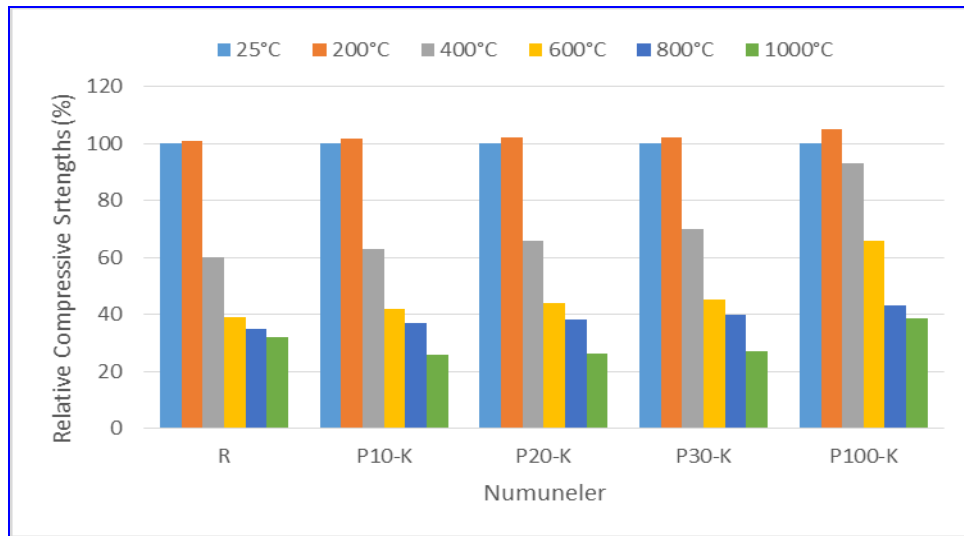
Numunelerin 100°C'de basınç dayanımını kaybetmediği belirtildi. 300°C'de, ezilmiş kireç katkılı numunelerde %8–14 basınç dayanımı değişimi ve silika agrega katkılı numunelerde %5–39 basınç dayanımı değişimi meydana gelmiştir. 600°C'de, ezilmiş kireç agregalı numunelerde basınç dayanımı kayıpları %47–60 ve silika agrega katkılı numunelerde %51–68 olmuştur (Savva ve ark. 2005).

İnce agrega olarak demir atık kumu ve kaba agrega olarak geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılarak üretilen betonların yüksek sıcaklık performansı araştırılmıştır. Numuneler 20°C ile 900°C arasındaki yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Numunelerin basınç dayanımının 200°C'de hafifçe arttığı, 300°C ile 700°C arasındaki sıcaklıklarda dayanım kayıplarının hızla başladığı ve numunelerin 900°C'de mekanik özelliklerini kaybettiği bildirilmiştir (Zhu ve diğerleri, 2022).

Çalışmada kullanılan tüm profillit katkılı numuneler 1.000°C'lik yüksek sıcaklıklarda 14,81 ile 18,99 MPa arasında basınç dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Profillit katkı oranı arttıkça basınç dayanımı kaybının azaldığı görülmektedir. Ancak, sıcaklık değerindeki artış aynı zamanda dayanım kayıplarında da artışa yol açmaktadır. Yüksek sıcaklık değeri arttıkça basınç dayanımı kayıplarının arttığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerdeki yüksek basınç dayanımı kaybının C—S—H jellerinin dehidratasyonu sonucu meydana geldiği belirtilmektedir (Chan ve ark. 1999). Çalışmada elde edilen sonuçlar literatür taramasında yapılan çalışmaya benzer sonuçlar verilerek desteklenmektedir (Demez 2017).

Tablo 4. 4. Yüksek sıcaklık sonrası profillit kum katkılı numunelerin basınç dayanım değerleri

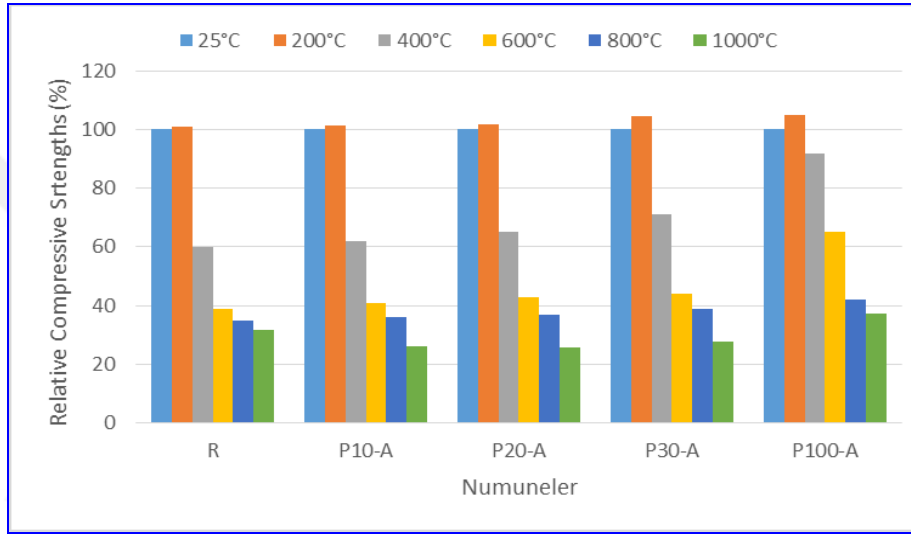
Numune	Sıcaklık					
	25°C	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
R	38.4	38.76	23.04	14.98	13.44	12.21
P10-K	58.14	59.02	36.63	24.42	21.51	14.95
P20-K	60.25	61.47	39.77	26.51	22.9	15.69
P30-K	62.76	64.03	43.93	28.24	25.1	17.02
P100-K	49.14	51.67	45.7	32.43	21.13	18.99



Şekil 4. 5. Yüksek sıcaklık sonrası profillit kum katkılı numunelerin basınç dayanım değer grafiği

Tablo 4. 5. Pirofillit agrega katkılı numunelerin bağıl artık basınç dayanımı değerleri

Sıcaklık	25°C	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
R	38.4	38.76	23.04	14.98	13.44	12.21
P10-A	57.01	57.86	35.35	23.37	20.52	14.81
P20-A	59.19	60.22	38.47	25.45	21.9	15.23
P30-A	61.11	63.85	43.39	26.89	23.83	16.87
P100-A	48.76	51.12	44.86	31.69	20.48	18.14



Şekil 4. 6. Yüksek sıcaklık sonrası profillit agrega katkılı numunelerin basınç dayanım değer grafiği

4.4.2. Kütle Kaybı Oranı

Yüksek sıcaklıktan sonra profillit kumu, agrega ve referans numunesinin kütle kaybı oranları (MLR'ler) Şekillerde verilmiştir. 9 ve 10. Katkılı ve katkısız üretilen tüm numunelerde 200°C'de önemli bir kütle kaybı meydana gelmediği görülmüştür (Tablo 4.6). 400°C'de profillit kum katkılı numunelerde %3,351–%3,821 kütle kaybı meydana gelirken, profillit agrega katkılı numunelerde %3,353–%3,827 kütle kaybı meydana gelmiştir. 600°C–800°C ve 1.000°C sıcaklıklarında kütle kayıpları sırasıyla %5,467–%7,035, %5,831–%7,052, %9,435–%9,732, %9,486–%9,741, %17,41–%23,11 ve %17,22–%23,14 olarak tespit edilmiştir. Referans numunesi 400°C'de %3,43, 600°C'de %7,11, 800°C'de %9,83 ve 1.000°C'de %21,98 kütle kaybı göstermiştir.

Pirofillit katkı maddesi oranındaki artış, kütle kaybı oranında bir artışa yol açar. Bu, pirofillitin yüksek su emme oranı ile açıklanmaktadır. Farklı bir çalışmada elde edilen veriler bu yorumu desteklemektedir (Demez 2017). Yüksek sıcaklıktan sonra beton numunelerinin kütle kaybı, kullanılan sıcaklığa ve agreganın kökenine bağlıdır. Kütle

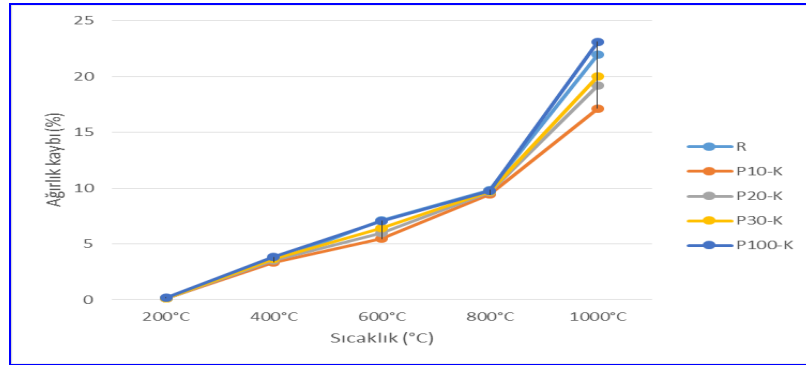
kaybındaki artış, betonun iç kısmındaki boşlukların sayısında ve çapında bir artış anlamına gelir (Janotka ve Nürnbergrová 2005). Yüksek sıcaklıktan sonra, 200°C'de kütle kaybı suyun buharlaşmasından kaynaklanır ve 400°C–600°C'de kütle kaybı CaCO₃ ve C–S–H jellerinin bozulmasından kaynaklanır (Xie ve diğerleri 2019). 800°C ve üzeri sıcaklıklarda betondaki su tamamen buharlaşır.

Termal dekarbonizasyon sistemi tarafından CaCO₃'ün ayrışması, beton numunelerinin kütle kaybının ana nedeni olarak belirtilmektedir (Şekil 4.7).

CO₂ gazının buharlaşmasıyla oluşan iç stres, içyapıda artan hasara neden olur (Huang ve ark. 2021; Itoh ve ark. 2014).

Tablo 4. 6. Profilit kum katkılı numuneleirn yüksek sıcaklık sonrası kütle kaybı değerleri

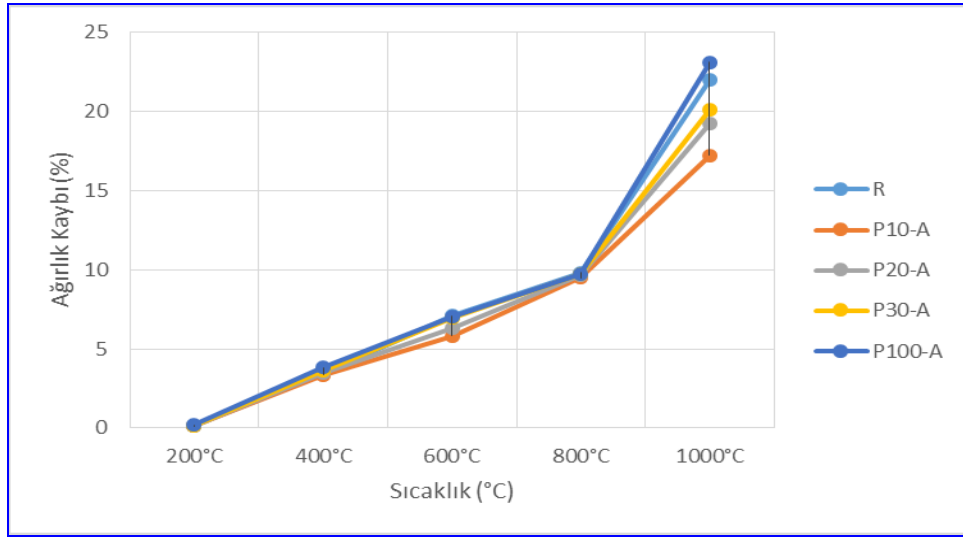
Kütle Kaybı					
	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
R	0.1263	3.4321	7.1108	9.8346	21.98
P10-K	0.1304	3.3516	5.4672	9.4351	17.14
P20-K	0.1396	3.5124	5.9768	9.6282	19.22
P30-K	0.1478	3.6507	6.4035	9.6963	20.02
P100-K	0.1985	3.8215	7.0354	9.7327	23.11



Şekil 4. 7. Profilit Kum Katkılı Numuneleirn Yüksek Sıcaklık Sonrası Kütle Kaybı Değerleri

Tablo 4. 7. Profilit agrega katkılı numuneleirn yüksek sıcaklık sonrası kütle kaybı değerleri

Kütle Kaybı					
	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
R	0.1263	3.4321	7.1108	9.8346	21.98
P10-A	0.1316	3.353	5.8316	9.4861	17.22
P20-A	0.1402	3.5147	6.3435	9.6371	19.28
P30-A	0.1499	3.6582	6.9781	9.7025	20.09
P100-A	0.2001	3.8279	7.0524	9.7415	23.14



Şekil 4. 8. Profillit Agerga Katkılı Numunelerin Yüksek Sıcaklık Sonrası Kütle Kaybı Değerleri

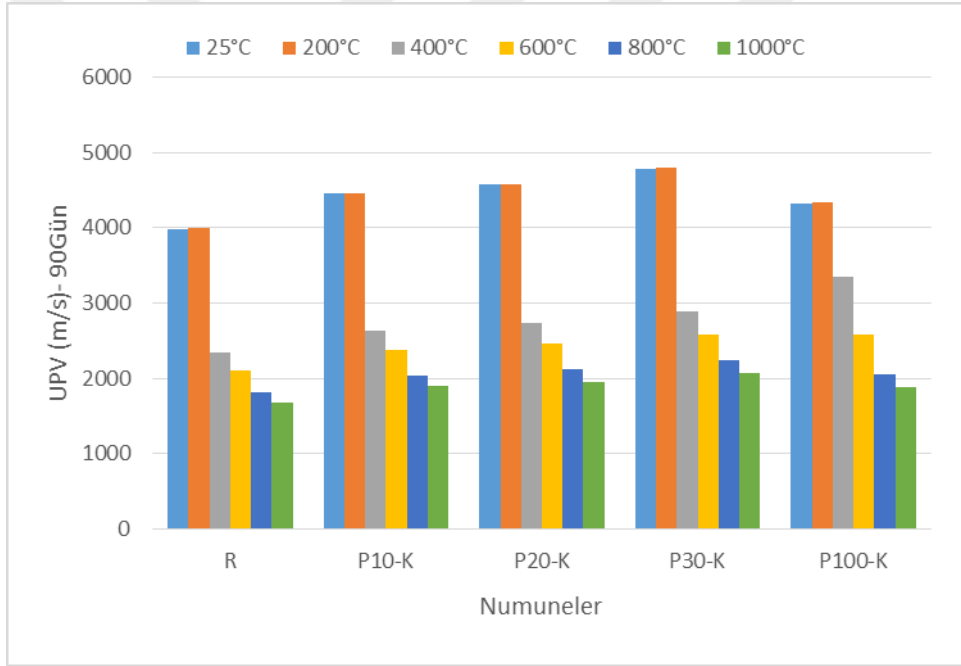
4.4.3. Ultrasonik Darbe Hızı

Yüksek sıcaklıktan önce ve sonra profillit katkı ve katkısız referans numunesinin ultrasonik darbe hızı (UPV) değerleri Şekil 4.10 ve 4.11’de verilmiştir. 200°C sıcaklıktan sonra profillit kum katkı numunelerin UPV değerleri 4.462–4.796 m/s, profillit agrega katkı numunelerin UPV değerleri 4.361–4.731 m/s ve referans numunenin UPV değeri 3.999 m/s olmuştur. 200°C sıcaklıktan sonra tüm numunelerde UPV değerlerinde hafif bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış basınç dayanımı artışının yorumlanmasıyla desteklenmektedir. 400°C’den sonra profillit kum takviyeli numunelerin UPV değerleri 2.636–3.358 m/s, profillit agrega takviyeli numunelerin UPV değerleri 2.569–3.345 m/s ve referans numunenin UPV değeri 2.344 m/s idi. 600°C’den sonra profillit kum katkı numunelerin UPV değerleri 2.371–2.592 m/s, profillit agrega katkı numunelerin UPV değerleri 2.315–2.575 m/s ve referans numunenin UPV değeri 2.107 m/s idi. 800°C’den sonra, profillit kum katkı numunelerin UPV değerleri 2.045–2.247 m/s, profillit agrega katkı numunelerin UPV değerleri 1.191–2.202 m/s ve referans numunenin UPV değeri 1.809 m/s idi. 1.000°C’den sonra, profillit kum katkı numunelerin UPV değerleri 1.895–2.065 m/s, profillit agrega katkı numunelerin UPV değerleri 1.851–2.035 m/s ve referans numunenin UPV değeri 1.674 m/s olarak tespit edilmiştir. Betonda çatlak hasarlarının 300°C’de başladığı, 500°C’de %33’lük büzülmenin meydana geldiği ve 800°C–900°C–1.000°C’de betonun tahrip olmaya başladığı belirtilmektedir. Bu hasarlar UPV değerlerindeki düşüşün nedeni olarak açıklanmaktadır. Profillit katkı ve katkısız tüm numunelerde yüksek sıcaklık değeri arttıkça ultrason hızlarının azaldığı görülmektedir.

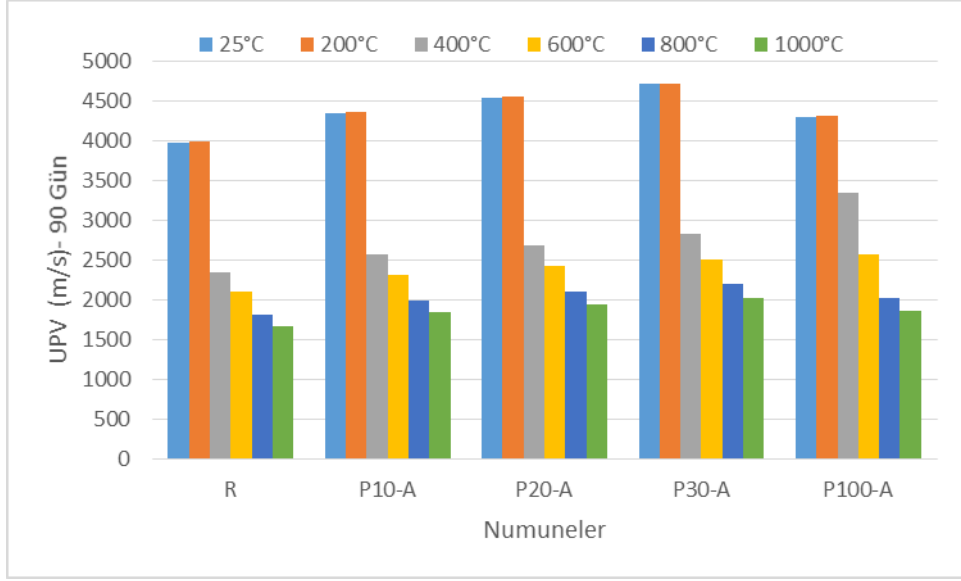
UPV değerleri numunelerin yoğunluğuna, gözenek yapısına ve çatlak genişliğine bağlıdır (Benaicha ve ark. 2015).

Tablo 4. 8. Profillit Kum Ve Agerga Katkılı Numunelerinin Yüksek Sıcaklık Sonrası Upv (Ultrasonik Darbe Hızı) Değerleri

	25°C	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
R	3987	3999	2344	2107	1809	1674
P10-K	4456	4462	2636	2371	2045	1898
P20-K	4572	4583	2732	2463	2117	1960
P30-K	4789	4796	2890	2590	2247	2065
P100-K	4321	4345	3358	2592	2054	1885
P10-A	4352	4361	2569	2315	1991	1851
P20-A	4547	4559	2695	2434	2102	1944
P30-A	4722	4731	2841	2506	2202	2035
P100-A	4301	4328	3345	2575	2030	1872



Şekil 4. 9. Profillit kum katkıli numunelerinin yüksek sıcaklık sonrası upv (Ultrasonik Darbe Hızı) değerleri



Şekil 4. 10. Profilitit agrega katkılı numunelerinin yüksek sıcaklık sonrası upv (Ultrasonik Darbe Hızı) değerleri

4.5. Görsel Değerlendirme

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin görsel muayenesinde, artan sıcaklıkla birlikte çatlakların oluştuğu ve renk değişimleri gözlemlendi (Şekil 4.11).



Şekil 4. 11. Profilitit kum katkılı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görselleri

Yüzer ve arkadaşları, beton basınç dayanımı ile renk değişimi arasındaki ilişkiyi belirlemek için yüksek sıcaklıktan sonra puzolan katılmış ve katılmamış numunelerin görüntülerini kaydettiler. Çalışmanın sonucunda, kimyasal içerikteki C—S—H jellerinin ve kalsiyum, silisyum ve oksijen gibi elementlerin oranlarında değişimler meydana geldiğini ve bu değişimin beton yüzeyindeki renk değişimine neden olduğunu belirttiler. Ayrıca, renk değişimi ile betonun basınç dayanımı değişimi arasında bir bağlantı olduğunu belirttiler (Yüzer 2007). Aynı zamanda, yüksek sıcaklıktan sonra betonun basınç dayanımı kaybında [sıcaklık grafiği (Şekil 4.12)] (Neville ve Brooks 1987), beton numunesinin 600°C'de dayanımının %50'si ve 800°C'de %80'i gibi çok yüksek bir oranda tahrip olduğu görülmektedir. Bu verilerle, yüksek sıcaklıktan sonra beton numunesinin renginin, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve basınç dayanımı hakkında bilgi verebileceği anlaşılmıştır (Yüzer 2007). Yüksek sıcaklıktan sonra profilit kumu, agrega ve referans numunelerinin renk değişimleri ve basınç dayanımı kayıpları, literatürdeki sonuçlarla tutarlıdır (Demez 2017).



Şekil 4.12. Profilit agrega katkılı numunelerin yüksek sıcaklık sonrası görselleri

4.6. Mikro Yapı Araştırmaları (SEM)

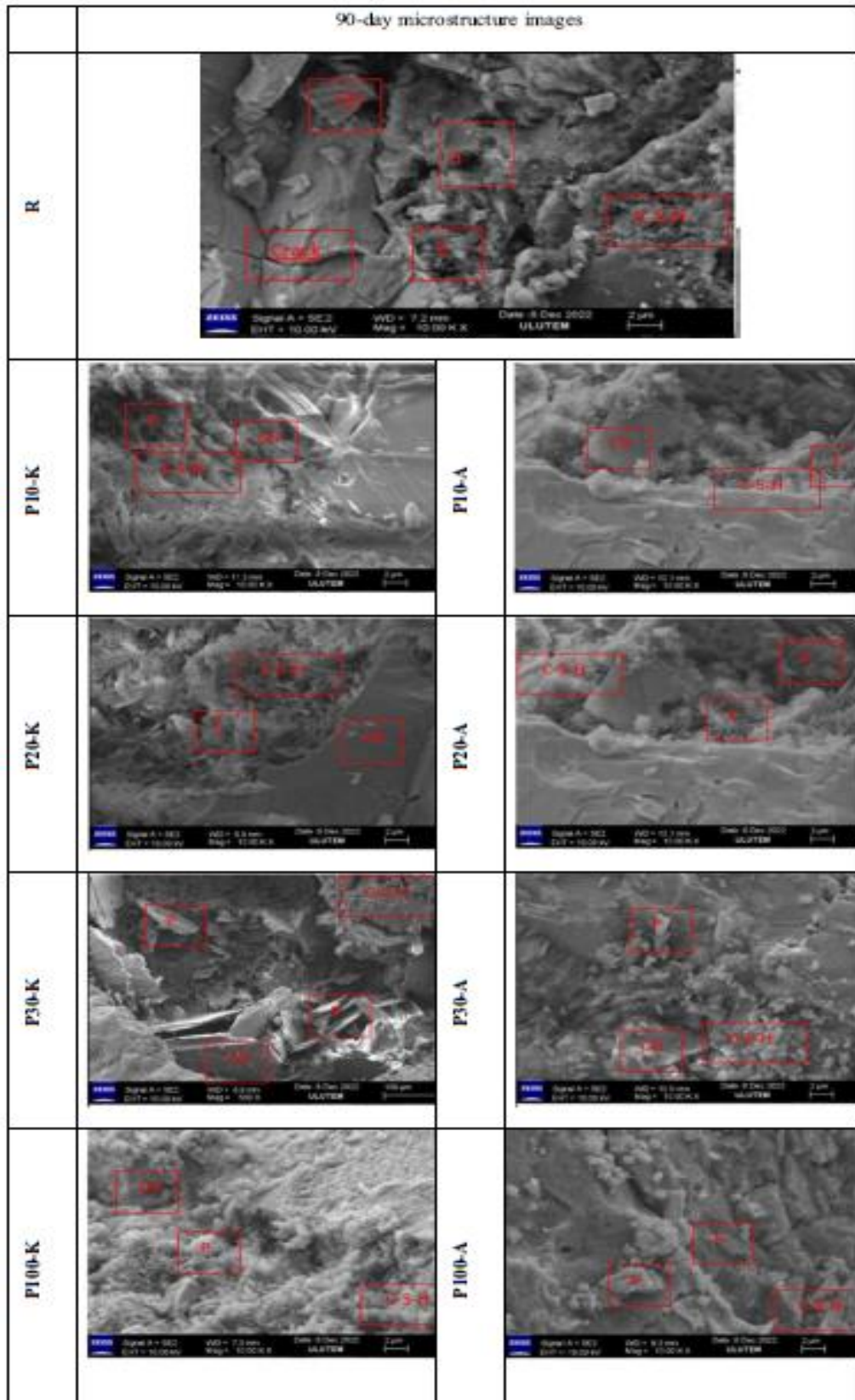
Pirofilit katkılı ve referans numunenin 90 günlük SEM görüntüleri Şekil 4.13'te verilmiştir. 90 günün sonunda, R numunesinin mikro yapısı boşlukların ve çatlakların varlığını göstermektedir. Ayrıca C—S—H, etringit ve CH hidratasyon ürünlerinin de olduğu görülmektedir. P10-K katkılı numunelerin görüntüsü C—S—H, CH ve etringit

ürünlerinin oluşumunu göstermektedir. P10-A karıştırılmış numunelerin görüntüsü de C—S—H, CH ve etringit ürünlerinin oluşumunu göstermektedir. R betonunda çatlak ve boşluk görülmediği belirtilmektedir.

Ayrıca kum takviyeli numunelerin agrega takviyeli numunelere göre daha yoğun etringit oluşumu gösterdiği belirtilmektedir. P20-K takviyeli numunelerin görüntüsünde C—S—H, CH, etringit ve portlandit hidratasyon ürünleri oluşmuştur. P20-A katkıli numunelerin görüntüsünde C—S—H, CH ve portlandit hidratasyon ürünleri oluşmuştur. P20-A-K katkıli numuneler R betonunda görülen içi boş yapıyı göstermemiştir. C—S—H, CH ve portlandit hidratasyon ürünleri P30-K-A katkıli numunelerin görüntüsünde oluşmaya devam etmektedir. R betonuna kıyasla daha yoğun bir tabaka olduğu belirtilmektedir. P100-K-A katkıli numunelerin görüntüsü çok yoğun bir yapının oluştuğunu göstermektedir. C—S—H, CH ve portlandit hidratasyon ürünlerinin oluştuğu görülmektedir.

Mikro yapı incelemesinde gösterilen C—S—H hidratasyon ürünü, mukavemete katkıda bulunan en önemli hidratasyon ürünüdür. Kalsiyum hidroksit (CH) düz, masif, altıgen prizma ve uzun kristal şekilleri gibi farklı şekil ve boyutlarda görülür. CH ürünü, çimento ve agrega arasındaki arayüzün gelişimine katkıda bulunur (Bilici ve ark. 2023; Uzbas ve Aydın 2020).

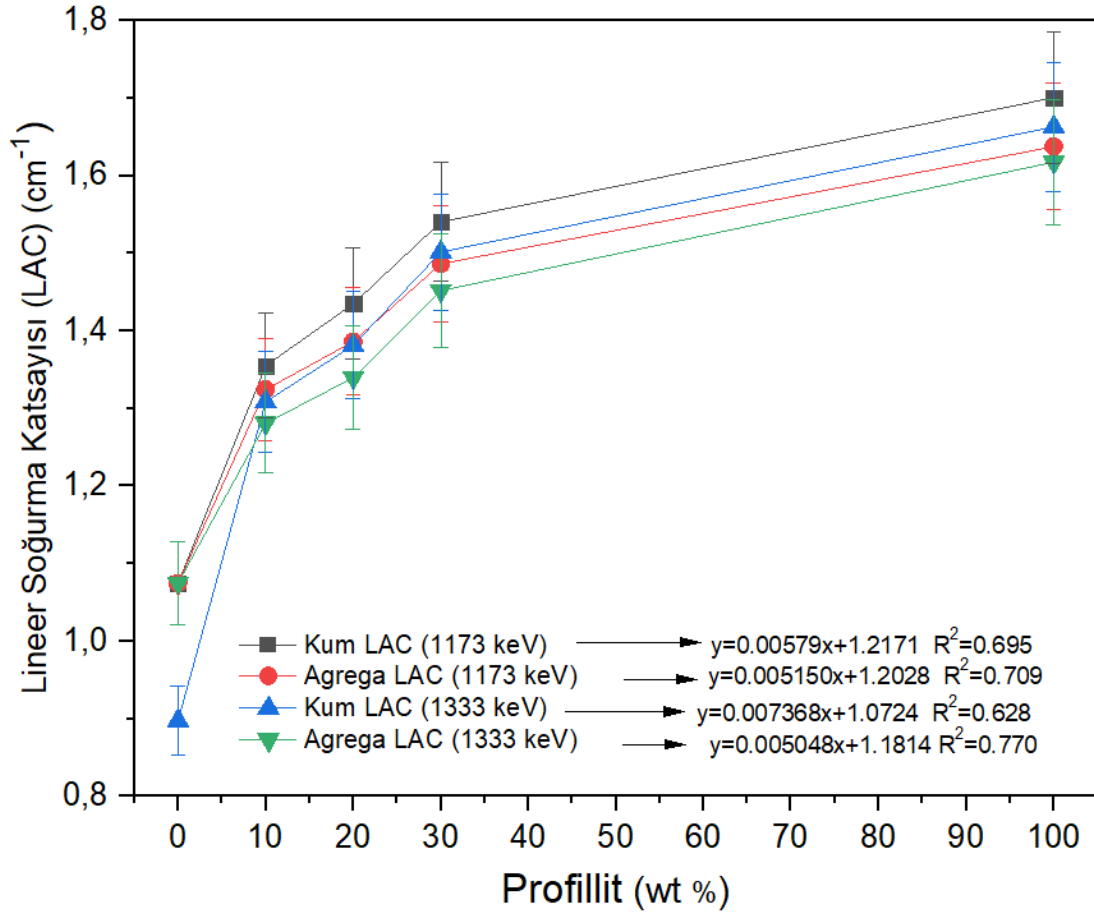
Etringit, iğne şeklindeki yapısıyla betonun mekanik özelliklerine katkıda bulunan bir ürün olarak tanımlanır. Üretilen numunelerin mikro yapı incelemesi sonucunda, basınç mukavemeti değerlerini destekleyen hidratasyon ürünlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 13. Profilit kum ve agrega katkılı numuneleirn SEM görüntüleri

4.7. Gamma Radyasyon (γ) Zırlama Sonuçları

Bu çalışmada, profillit kumu ve agrega profillitiyle hazırlanan 90 günlük beton numunelerinin radyasyon soğurma özellikleri şekil 4.14'te görüldüğü gibi incelenmiştir.



Şekil 4. 14. Profillit katkılanmış betonlara ait Lineer Soğurma Katsayıları (LAC)

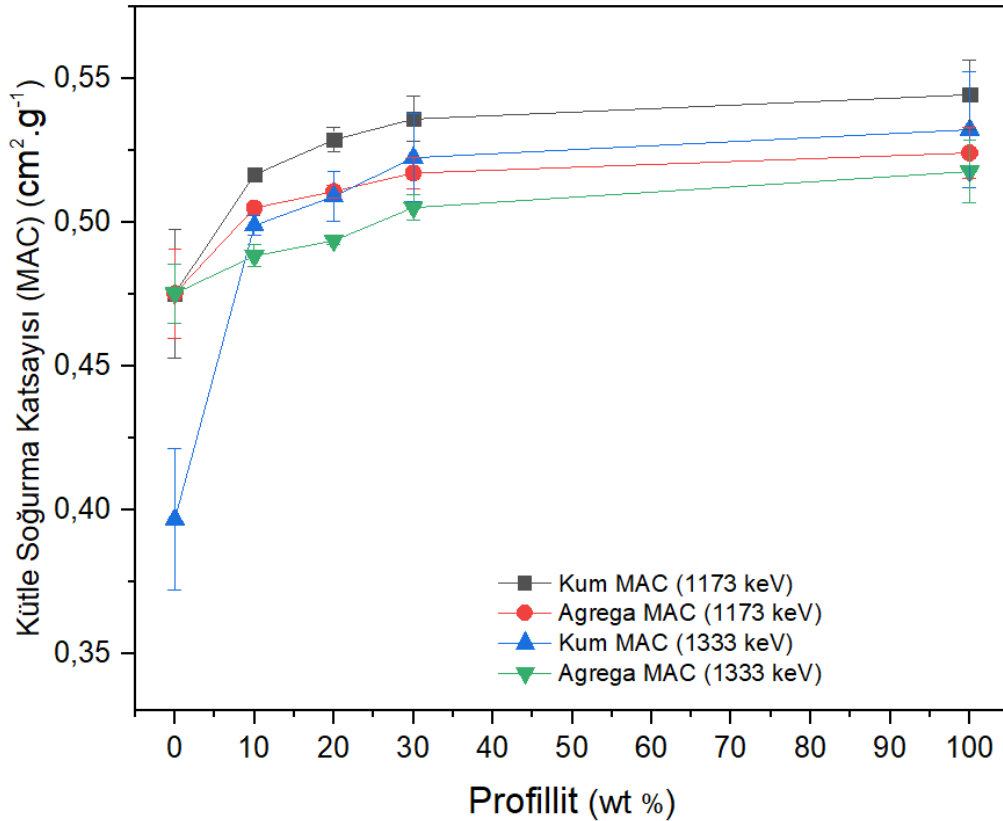
Buna göre, kum profillit katkılanarak hazırlanan beton kalıplarının radyasyon zırlama özelliklerini ortaya koymak için 1173 keV enerjili gama ışınlarıyla yapılan ölçümlerde lineer zayıflama katsayısı (LAC) %10 kum profillit katkısında $1,3550 \pm 0,0678 \text{ cm}^{-1}$ iken, %100 kum profillit katkısında $1,7008 \pm 0,0850 \text{ cm}^{-1}$ olmuştur. Aynı enerji değerindee agrega profillit ile hazırlanan beton örneklerinde bu değerler %10 agrega profillit için $1,3247 \pm 0,0662 \text{ cm}^{-1}$ 'den %100 agrega profillit için $1,6376 \pm 0,0819 \text{ cm}^{-1}$ 'e çıkmıştır.

1333 keV enerjili gama ışınlarıyla yapılan ölçümlerde LAC değerleri %10'luk kum profillit katkısında $1,3088 \pm 0,0654 \text{ cm}^{-1}$ iken, %100 kum profillit katkısında $1,6630 \pm 0,0831 \text{ cm}^{-1}$ 'e çıkmıştır. Agrega profillit ile oluşturulan betonlarda ise bu değerler

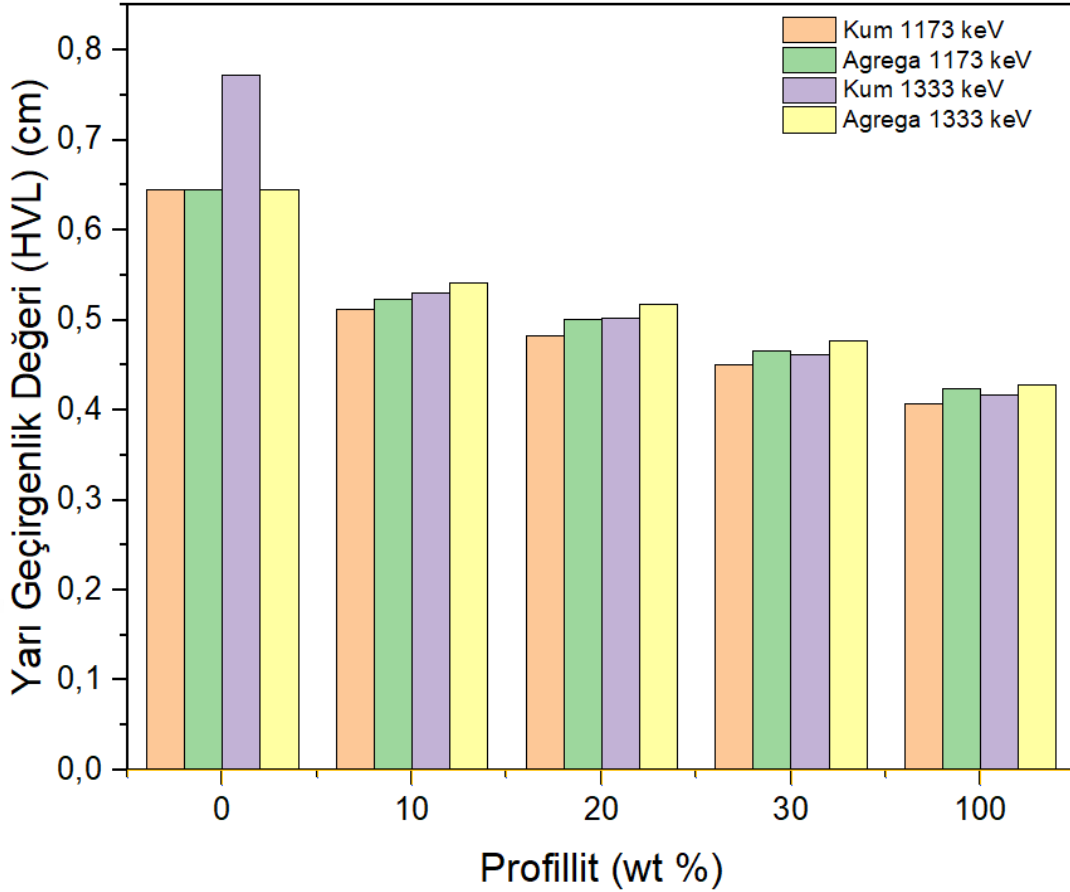
%10 agrega profillit katkısında $1,2809 \pm 0,0640 \text{ cm}^{-1}$ iken %100 agrega profillit katkısında $1,6174 \pm 0,0809 \text{ cm}^{-1}$ 'e yükselmiştir.

Öte yandan, şekil 4.15'de, profillit katkılı bu betonların kütle soğurma katsayıları (MAC) görülmektedir. Buna göre, 1173 keV'lik bir gama enerjisinde, kum profillitinin katkısı %10 iken elde edilen MAC değeri $0,5166 \pm 0,0018 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ elde edilmiş olup bu oran %100'e çıktığında ise MAC değeri $0,5444 \pm 0,0121 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ olarak elde edilmiştir. Yine aynı enerjide (1173 keV), MAC değerleri agrega profillit katkılı betonlarda katkı oranı 10% iken $0,5050 \pm 0,0007 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ve katkı oranı 100%'e yükseldiğinde ise $0,5242 \pm 0,0089 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ olarak elde edilmiştir.

1333 keV enerjili gama ışınlarından elde edilen MAC değerlerinde %10 kum profillit ilavesinde ölçülen MAC değeri $0,4990 \pm 0,0035 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ iken, %100 kum profillit ilavesinde ise $0,5323 \pm 0,0202 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 'e yükselmiştir. MAC değerleri agrega profillit katkılı betonlarda katkı oranı 10% iken aynı enerjide (1333 keV) elde edilen MAC değeri $0,4883 \pm 0,0038 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ve oran 100% iken elde edilen MAC değeri $0,5177 \pm 0,0108 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ olarak ölçülmüştür.



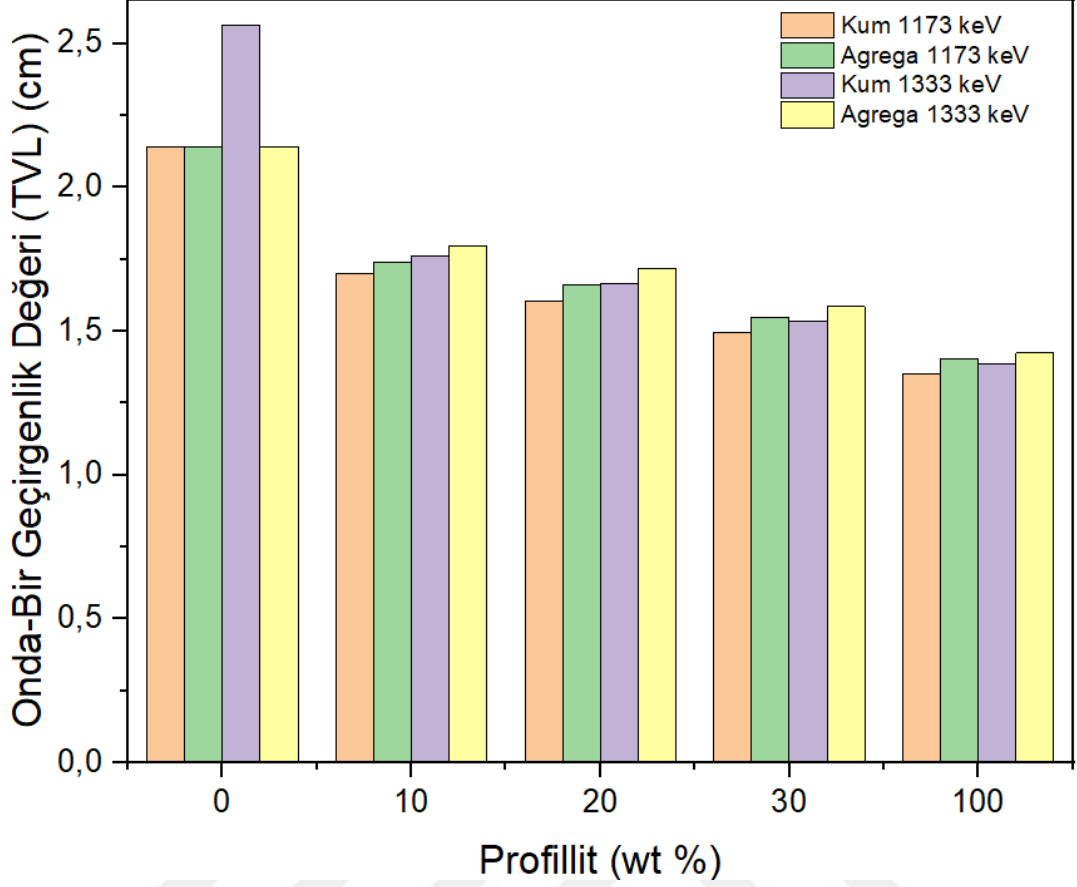
Şekil 4. 15. Profillit katkılanmış betonlara ait Kütle Soğurma Katsayıları (MAC)



Şekil 4. 16. Profilit katkılanmış betonlara ait Yarı Geçirgenlik Değeri (HVL)

Şekil 4.16'da, profilit katkılı betonların yarı geçirgenlik değeri (HVL) ölçümlerini göstermektedir. Burada görülebileceği gibi, 1173 keV enerjili gama ışınları kullanılarak kullanılarak, %10 kum profilit katkılı betonlarda elde edilen HVL değeri 0,5115 cm olarak elde edilirken, %100 kum profilit katkılı betonlardada bu değer 0,4075 cm'ye düşmüştür. Benzer şekilde, 10% agrega profilit katkılı betonlarda elde edilen HVL değeri 0,5232 cm iken oran 100%'e ulaştığında ise HVL değeri 0,4233 cm'e düşmüştür.

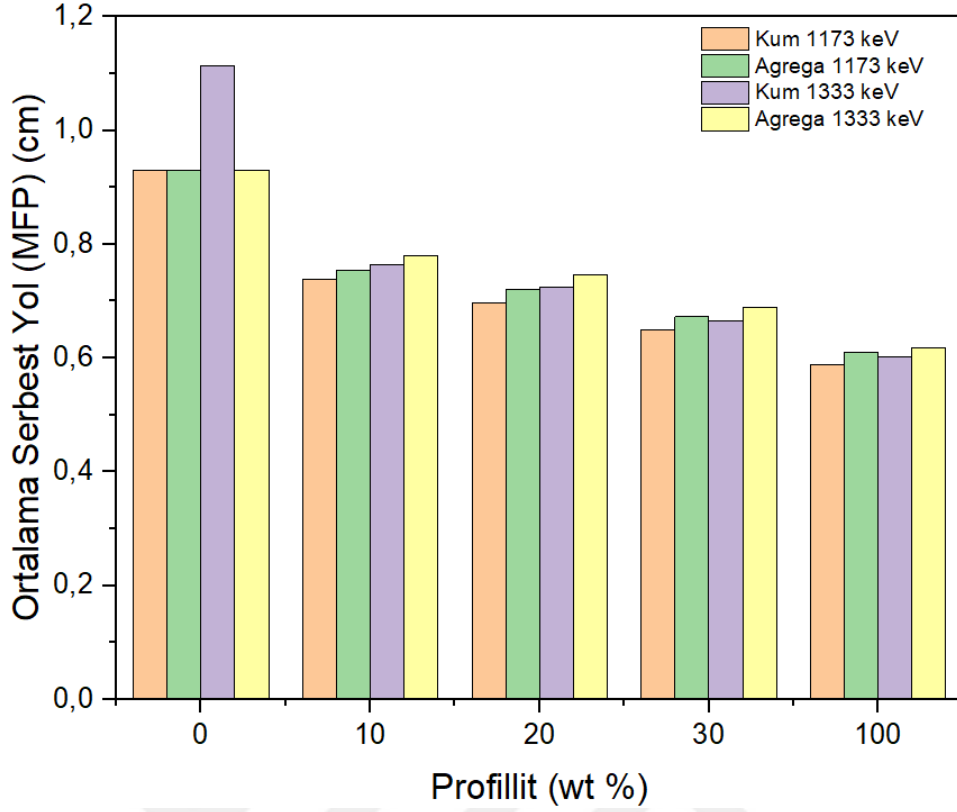
1333 keV gama enerjisinde ise, bu HVL değerleri %10 kum profilitte 0,5296 cm iken %100 kum profilit katkılı betonda 0,4168 cm'ye düşmüştür. Yine %10 agrega profilitte elde edilen HVL değeri 0,5411 cm iken %100 agrega profilitte 0,4286 cm'ye düşmüştür.



Şekil 4. 17. Profillit katkılanmış betonlara ait Onda-Bir Geçirgenlik Değeri (TVL)

Şekil 4.17'de profillit katkılı betonların onda-bir geçirgenlik değerleri (TVL) verilmiştir. 1173 keV'deki TVL değeri %10 kum profillit katkılı betonda 1,6993 cm iken, %100 kum profillit katkılı betonda 1,3538 cm'ye düşmüştür. Yine 1173 keV gama enerji değerinde 10% agrega profillit oranı için elde edilen TVL değeri 1,7381 cm'den 100% agrega profillit oranı için 1,4061 cm'ye düşmüştür.

1333 keV gama enerjisinde, TVL değerleri %10 kum profillit katkılı betonda 1,7593 cm iken %100 kum profillit katkısında 1,3846 cm'ye düşmüştür. Yine 1333 keV gama enerji değerinde 10% agrega profillit oranı için elde edilen TVL değeri 1,7976'dan 1,4236 cm'ye düşmüştür.



Şekil 4. 18. Prophyllit katkılanmış betonlara ait Ortalama Serbest Yol Değeri (MFP)

Şekil 4.18'de, prophyllit katkılı betonların ortalama serbest yol (MFP) değerleri verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre %10 kum prophyllit katkılı betonda 1173 keV'de MFP değeri 0,7380 cm iken, %100 kum prophyllit katkılı betonda 0,5880 cm'ye düşmüştür. Bu veriler, 10% agrega prophyllit katkılı betonlarda ise 0,7549 cm iken 100% agrega prophyllit katkılı betonlarda 0,6106 cm'ye düşmüştür. 1333 keV'de, MFP değeri %10 kum prophyllit katkılı betonda 0,7641 cm ve %100 kum prophyllit katkılı betonda 0,6013 cm'ye düşmüştür. MFP değeri %10 Agrega prophyllit katkılı betonda 0,7807 cm iken %100 Agrega prophyllit katkılı betonda 0,6183 cm'ye düşmüştür. Prophyllit katkılanmış betonların Radyasyon zırlama ölçüm sonuçları Tablo 4.9'da toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 4. 9. Profillit katkılanmış betonların Radyasyon zırhlama ölçüm sonuçları

Kum 1173 keV	LAC (μ)	$\Delta\mu$	Yoğunluk	HVL	TVL	MFP	MAC	Δ_{MAC}
0%	1,0751	0,0538	2,2620	0,6447	2,1418	0,9302	0,4753	0,0225
10%	1,3550	0,0678	2,6230	0,5115	1,6993	0,7380	0,5166	0,0018
20%	1,4351	0,0718	2,7140	0,4830	1,6045	0,6968	0,5288	0,0043
30%	1,5404	0,0770	2,8740	0,4500	1,4948	0,6492	0,5360	0,0079
100%	1,7008	0,0850	3,1240	0,4075	1,3538	0,5880	0,5444	0,0121
Agrega 1173 keV								
0%	1,0751	0,0538	2,2620	0,6447	2,1418	0,9302	0,4753	0,0156
10%	1,3247	0,0662	2,6230	0,5232	1,7381	0,7549	0,5050	0,0007
20%	1,3863	0,0693	2,7140	0,5000	1,6610	0,7213	0,5108	0,0021
30%	1,4864	0,0743	2,8740	0,4663	1,5491	0,6728	0,5172	0,0053
100%	1,6376	0,0819	3,1240	0,4233	1,4061	0,6106	0,5242	0,0089
Kum 1333 keV								
0%	0,8975	0,0449	2,2620	0,7723	2,5655	1,1142	0,3968	0,0246
10%	1,3088	0,0654	2,6230	0,5296	1,7593	0,7641	0,4990	0,0035
20%	1,3816	0,0691	2,7140	0,5017	1,6666	0,7238	0,5091	0,0086
30%	1,5017	0,0751	2,8740	0,4616	1,5333	0,6659	0,5225	0,0153
100%	1,6630	0,0831	3,1240	0,4168	1,3846	0,6013	0,5323	0,0202
Agrega 1333 keV								
0%	1,0751	0,0538	2,2620	0,6447	2,1418	0,9302	0,4753	0,0104
10%	1,2809	0,0640	2,6230	0,5411	1,7976	0,7807	0,4883	0,0038
20%	1,3398	0,0670	2,7140	0,5174	1,7186	0,7464	0,4937	0,0012
30%	1,4519	0,0726	2,8740	0,4774	1,5859	0,6888	0,5052	0,0046
100%	1,6174	0,0809	3,1240	0,4286	1,4236	0,6183	0,5177	0,0108

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, çeşitli oranlarda (0%, 10%, 20%, 30% ve 100%) profillitin kum ve agrega şeklinde betonlarda ikame edilmesinin beton numunelerinin mukavemeti, bazı dayanıklılık özellikleri ve radyasyon zırhlama özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırmanın temel bulguları aşağıda listelenmiştir:

- Profillit kum ve agrega katkı maddeleri içeren P30-K ve P30-A numunelerinin Referans betona göre boşluksuz ve daha güçlü arayüz bağları içeren beton üretmek için en uygun orana sahip olduğu belirlenmiştir. Bu numuneler 7, 28 ve 90. günlerde en yüksek basınç dayanımı değerlerini göstererek profillit katkısının etkinliğini göstermiştir.
- Profillit kum ve agrega katkılı beton numunelerinin basınç dayanımı ve UPV değerleri arasında güçlü bir korelasyon olduğu belirlendi. Farklı günlerde en yüksek basınç dayanımına sahip olan P30-K ve P30-A numunelerinin UPV değerlerinin de yüksek olduğu görülmektedir.
- Profillit katkılı beton numunelerinin donma-çözülme döngüleri sonrasında referans betona kıyasla daha az çatlak ve gözenek oluşmasıyla sonuçlandı. Profillit eklenmiş numunelerin basınç ve kütle kaybı değerleri, donma ve çözülmeden sonra R(referans) numunenin değerlerinden daha düşüktü. Bu nedenle profillit, kum ve agrega eklenmiş numunelerin referans betondan daha geçirimsiz olduğu sonucuna varılabilir.
- Profillit kumu ve agrega ikameli numuneler, yüksek sıcaklıklara maruz kalan alanlarda beton üretiminde oldukça etkilidir. Daha az basınç kaybı, daha az kütle kaybı, daha yüksek UPV değerleri ve yüksek sıcaklık koşullarında daha yüksek basınç dayanımı değerleriyle R numuneden daha iyi performans gösterirler. Profillit, verilerin gösterdiği gibi, benzersiz yapısı ve kimyasal bileşimi nedeniyle yüksek sıcaklıklarda normal betondan daha iyi performans gösterir.
- Profillit ile katkılanmış numunelerin mikro yapı görüntüleri, katkılama oranı arttıkça yoğunlukta ve jel oluşumunda bir artış olduğunu açıkça göstermektedir. C—S—H ve CH'nin reaksiyon ürünlerinin oluşumu gözlemlenmiştir. Reaksiyon ürünlerinin ve profillit eklenmiş numunelerin yüksek mukavemet ve dayanım değerleri, güçlü arayüz bağlarıyla birlikte, elde edilen sonuçları açıkça desteklemektedir. Profillit, numunelerin mikro yapısal analizini destekleyen görsellerle gösterildiği gibi, beton örneklerinin yüksek basınç dayanımı ve dayanıklılık özelliklerine önemli ölçüde katkıda bulunur.

- Kum ve agregaya olarak %10-%20-%30-%100 profillit katkılanmış 90 günlük beton numunelerinin lineer soğurma katsayıları (LAC) değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Kum profillit katkılı betonların 1173 keV enerjili gammalarla elde edilen LAC sonuçları $1.0751 \pm 0,0538 \text{ cm}^{-1}$ ile $1.7008 \pm 0,0850 \text{ cm}^{-1}$ arasında değiştiği belirlenmiştir. 1333 keV enerjili gammalarla elde edilen ölçüm sonuçlarının ise $0.8975 \pm 0,0449 \text{ cm}^{-1}$ ile $1.6630 \pm 0,0831 \text{ cm}^{-1}$ arasında değiştiği belirlenmiştir. Agregaya profillit katkılı betonların 1173 keV enerjili gammalarla elde edilen LAC sonuçları $1,0751 \pm 0,0538 \text{ cm}^{-1}$ ile $1,6376 \pm 0,0819 \text{ cm}^{-1}$ arasında değiştiği belirlenmiştir. 1333 keV enerjili gammalarla elde edilen ölçüm sonuçlarının ise $1,0751 \pm 0,0538 \text{ cm}^{-1}$ ile $1,6174 \pm 0,0809 \text{ cm}^{-1}$ arasında değiştiği belirlenmiştir.

Birim beton kütlelerinin soğurduğu radyasyon miktarını ifade eden Kütle Soğurma Katsayı (MAC) değerleri LAC değerlerinin betonların yoğunluğa bölünmesi ile elde edilmiş olup Kum profillit katkılı betonların 1173 keV enerjili gammalarla elde edilen MAC sonuçları $0,4753 \pm 0,0225 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ile $0,5444 \pm 0,0121 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ arasında değişmiştir. 1333 keV enerjili gammalarla elde edilen ölçüm sonuçlarının ise $0,3968 \pm 0,0246 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ile $0,5323 \pm 0,0202 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ arasında değişmiştir. Agregaya profillit katkılı betonların 1173 keV enerjili gammalarla elde edilen MAC sonuçları $0,4753 \pm 0,0156 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ile $0,5242 \pm 0,0089 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ arasında değişmiştir. 1333 keV enerjili gammalarla elde edilen ölçüm sonuçlarının ise $0,4753 \pm 0,0104 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ile $0,5177 \pm 0,0108 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ arasında değişmiştir.

- Betonlar ile etkileşen gama ışınlarının yarısını geçirmek için gerekli beton kalınlığını ifade eden Yarı Geçirgenlik Değerleri (HVL) değerleri LAC değerleri kullanılarak hesaplanmış ve kum profillit katkılı betonların 1173 keV enerjili gammalarla elde edilen MAC sonuçları 0,6447 cm ile 0,4075 cm arasında değiştiği belirlenmiştir. 1333 keV enerjili gammalarla elde edilen ölçüm sonuçlarının ise 0,7723 cm ile 0,4168 cm arasında değişmiştir. Agregaya profillit katkılı betonların 1173 keV enerjili gammalarla elde edilen HVL sonuçları 0,6447 cm ile 0,4233 cm arasında değiştiği belirlenmiştir. 1333 keV enerjili gammalarla elde edilen ölçüm HVL sonuçlarının ise 0,6447 cm ile 0,4286 cm arasında değiştiği belirlenmiştir.
- Beton ile etkileşen gamaların sayısını onda bire indirmek için gerekli beton kalınlığı TVL ile verilmiştir. Kum profillit katkılı betonların 1173 keV enerjili gammalarla elde edilen TVL sonuçları 2,1418 cm ile 1,3538 cm arasında değiştiği belirlenmiştir. 1333 keV enerjili gammalarla elde edilen ölçüm sonuçlarının ise

2,5655 cm ile 1,3846 cm arasında değiştiği belirlenmiştir. Agregada profillit katkılı betonların 1173 keV enerjili gammalarla elde edilen TVL sonuçları 2,1418 cm ile 1,4061 cm arasında değiştiği belirlenmiştir. 1333 keV enerjili gammalarla elde edilen ölçüm sonuçlarının ise 2,1418 cm ile 1,4236 cm arasında değiştiği belirlenmiştir.

- Beton içerisinde gamaların alabileceği yolu ifade eden Ortalama Serbest Yol (MFP) değerleri de LAC değerlerinin 1'e bölünmesi ile hesaplanmış ve kum profillit katkılı betonların 1173 keV enerjili gammalarla elde edilen MFP sonuçları 0,9302 cm ile 0,5880 cm arasında değiştiği belirlenmiştir. 1333 keV enerjili gammalarla elde edilen ölçüm sonuçlarının ise 1,1142 cm ile 0,6013 cm arasında değiştiği belirlenmiştir. Agregada profillit katkılı betonların 1173 keV enerjili gammalarla elde edilen MFP sonuçları 0,9302 cm ile 0,6106 cm arasında değiştiği belirlenmiştir. 1333 keV enerjili gammalarla elde edilen ölçüm sonuçlarının ise 0,9302 cm ile 0,6183 cm arasında değiştiği belirlenmiştir.
- Elde edilen tüm radyasyon zırhlama parametresi sonuçlarına göre, kum profillit katkılı betonların agregada profillit betonlardan daha iyi ve 1173 keV enerjili γ elde edilen ölçüm sonuçlarının 1333 keV enerjili γ elde edilen sonuçlardan daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

- ACI Committee 216 (2007). Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction.
- Akın, O. (2019). Ağrı İl Merkezinde Bulunan Liselerde Elektromanyetik Alan Ölçümünün Yapılması, Ağrı: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi.
- Akyıldırım, H. (2011). Ağır Betonların Nükleer Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması. Isparta: Yayınlanmamış Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Akyol, B. (2015). Radyoterapi Merkezi İnşaatlarında Malzeme Seçiminin Tasarıma Etkisinin Araştırılması. Isparta: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Apaydın, M. S. (2007). Farklı Kökenli Agregaların Beton Özelliklerine Etkisi. İstanbul: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Aydeniz, S. (2012). Agrega Dane Boyutunun Beton Dayanımına Etkisi Ve Su Emmesine Etkilerinin Araştırılması, Sakarya: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Baradan, B.; Yazıcı, H. & Aydın. S. (2012). Beton, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Binici, H., Çağatay, İ. H., & Kaplan, H. (2000). Değişik Faktörlerin Beton Mukeymetine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, s. 203-209.
- Ceylan, H. (2005). Farklı Pomza Agrega Türlerinden Elde Edilen Hafif Betonun Sıcaklık Etkisindeki Karakteristiği. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Çağlayan, M. (2010). Sürdürülebilir Beton Üretimi için CO₂ Emisyon Miktarlarının Belirlenmesi, İstanbul: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi,
- Çağlayan, M., Haberveren, S., İpekoğlu, B., & Kurşun, İ. (1999). Beton Yapımında Kullanılan Agregaların Özellikleri ve Örnek Bir Kuruluş "İsyon". 2. *Ulusal Kırmataş Sempozyumu'99*, (s. 69-79). İstanbul.

- Çimen, B. (2018) İyonlaştırıcı Radyasyon ve Çevre Güvenliği, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi.
- Çoşkun, A. (2010). Ağır Betonlarda Barit Agregasının Kullanımı ve Beton Özelliklerinin Araştırılması. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Çoşkun, U. (2004). Agregada Granülometrisinin Yüksek Performanslı Beton Özelliklerine Etkisi. Afyon: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Demiz, A. (2017). Profilit Agregada Kullanılarak Üretilen Yüksek Dayanımlı Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması. Malatya: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
- Eaves, G., 1964. Principles of Radiation Protection. London: Iliffe Books L.T.D.
- Engin, Y. (2023). Beton Uygulamaları ve Kimyasal Katkıların Etkisi Rehberi, İstanbul: Katkı Üreticileri (KÜB) Yayınları.
- Erdoğan, S. & Erdoğan, T. (1999). Portland Çimentosunu Joseph Aspdin Tarafından İcadı Ve Çimento Üretiminde Aspdin Ailesinin Rolü.
- Erdoğan, T. Y. (2003). Beton, Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, METU Press, Ankara.
- Erdoğan, M. G. (2017). Muğla İl Merkezindeki Evlerde Radon Konsantrasyonunun Ve Denize Kıyısı Olan İlçelerinde Çevresel Gama Radyasyonunun Ölçümü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- Eren, S. (2014). Emr (Elektromanyetik Radyasyon) Koruma Amaçlı Bikomponent Polyester İplik Üretimi, Bursa: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi.
- Eriç, M. (1994). Yapı Fiziği ve Malzemesi, İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Erkuş, P. (2013). Pvc Katkıların Betonun Mekanik Ve Fiziksel Özelliklerine Etkileri, Gümüşhane: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi.
- Fares H., Noumowe A., Remond S., 2009. Self-Consolidating Concrete Subjected to High Temperature: Mechanical and Physicochemical Properties. Cement and Concrete Research, 39, (12): 1230-1238

- Filiz, M., Gençel, O., Özel, C., & Sancak, E. (2008). Hematit Agregalı Betonun Radyasyon Önlemede Kullanımının Araştırılması. *Hazır Beton Kongresi*, (s. 635-644). İstanbul.
- Hacıismailoğlu, E. (2016). Radyasyon Güvenliği El Kitabı, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Haner, S. (2022). Toprak Sanayi Hammaddeleri: Pirfillit ve Talk. S. Haner içinde, *Yapı Sektöründe Endüstriyel Hammaddeler* (s. 87-110). Ankara: İksad Publishing House.
- James E. Martin and Tanır G, 2013. Radyasyon ve radyasyondan korunma fiziği : sağlık fiziği uygulamalı, 2020th ed. Palme Yayıncılık.
- Kalyon, M. (2019). Radyasyon İçeren Birimlerin Zırhlamasında Kullanılan Farklı Tipteki Betonların Radyasyon Güvenliği ile İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından İncelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi.
- Kavun, Y., Eken, M., 2024. Investigation of thermal, acoustic, mechanical, and radiation shielding performance of waste and natural fibers. *Appl. Radiat. Isot.* 214, 111539. <https://doi.org/10.1016/J.APRADISO.2024.111539>
- Kavun, Y., Mustafa E., and Kavun, Y., (2024). Effect of Pyrophyllite Grain Size on the Mechanical Durability and Radiation-Shielding Properties of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36 (11), <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-18079>
- Kaya, D. Ç. (2019). Normal Beton ve Özel Amaçlı Betonların Gama Radyasyonunu Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi .
- Keskinateş, M. (2015). Çimento Esaslı Kompozitlerde Donma-Çözülme Etkisinin Çelik Lifmatris Aderansına Etkisinin İncelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Khoury G.A., (1992), “Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: A Reassessment”, *Magazine of Concrete Research*, sayı 44, sayfa 291-309.
- Khoury G.A., (2003a), “Spalling”, *International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy*.

- Kıpçak, A. S. (2009). Bazı Bor Bileşiklerinin Nötron Zırhlamasında Kullanılabilirliğinin Araştırılması. İstanbul: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Knoll, G.F., Kraner, H.W., 1981. Radiation Detection and Measurement. Proc. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PROC.1981.12016>
- Kocataşkın, F. (1991). Betonun Dünü, Bugünü, Yarını. 2. *Ulusal Beton Kongresi* (s.23-41), Ankara.
- Konings, R.J.M., Stoller, R.E., 2020. Comprehensive Nuclear Materials. Compr. Nucl. Mater. Second Ed. 1–4653. <https://doi.org/10.1016/c2017-1-02873-8>
- Korkmaz, S. (2022). Agregas. Haner içinde, *Yapı Sektöründe Endüstriyel Hammaddeler* (s. 111-125). Ankara: İksad Publishing House.
- Krane, K.S., 1991. Introductory nuclear physics. John Wiley & Sons.
- Krane, K.S., Lynch, W.G., 1989. Introductory Nuclear Physics <https://doi.org/10.1063/1.2810884>
- Krane, S.K., (1988). Nuclear Physics Vol 1, New York: John Wiley & Sons.
- Kuyumcu, H.M., (2006). “Deniz Suyu Ve Sülfatlı Suların Beton Dayanımına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Low, I.M. and Noor Azman, N.Z. (2020). Polymer Composites and Nanocomposites for X-Rays Shielding (Composites Science and Technology), Editor : Jawaid, M., Springer, Singapore.
- Mehta, P. K., & Manmohan, D. (2006). *Sustainable High-Performance Concrete Structures*. Concrete international, 28(7), 37-42
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill Education.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill.
- MTA. (2023). *Profillit*. Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/profillit> adresinden alındı
- Murray, R.L., 2000. Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes, Butterworth Heinemann.
- Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete. Pearson Education.
- Özata, F., Ceylantekin, M. C., & Eda Taşçı, R. C. (2024). Porselen Kargo Üretiminde Profillit Kullanımı. Y. Aşçı, & A. Polat içinde, *Mühendislik Bilimlerinde Modern Araştırmalar-2024* (s. 125-136). Lyon: Livre Le Lyon.

- Özdemir, M. (2006). Kayaç Mukavemetinin Beton Dayanımına Etkileri, Adana: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi.
- Özgen, M.M., (2006), “Betonarme Yapılarda Bozulma Süreçleri Ve Beton Sınıfının Yapının Durabilitesine Ve Maliyetine Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,
- Özkaya, H. (2011). Malatya Pütürge Yöresinde Çıkarılan Profillit Malzemesinin Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Elazığ: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi.
- Özkaynak, H. (2002). Deprem Bölgelerindeki Betonarme Yapılarda Donatı Düzenleme İlkeleri, İstanbul: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Sağlık, A. & Kocabeyler, M. Fatih (2019). Beton ve Özellikleri, Ankara: T.C. Tarım ve Orman bakanlığı Devlet Su İşleri Müdürlüğü Yayınları.
- Sunar, B. (2022). Bazı Grafen Katkılı Betonların Gama Işınlarnı Soğurma Özellikleri, Konya: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi.
- TMD Teknik Komide, (2023). Derin Temeller İçin Tremi Beton Klavuzu, Temel Mütahitler Derneği Yayınları.
- Topçu, İ. B., Canbaz, M., & Karakurt, C. (2006). Beton Üretiminde Kimyasal Katkı Kullanımı. *Politeknik Dergisi*, 9(1), s. 59-63.
- TS EN 12390-3: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Basınç dayanımı tayini.
- TS EN 12390-3: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3:• Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete. Pearson Education.
- Tuncel, N. Y. ve Tuncel, B. (2016). Kızılıötesi Teknolojisi Ve Gıda İşlemedeki Kullanımı. Akademik Gıda 14, sy. 2 s:196-203.
- Turhan, A. (2008). Borlamanın Paslanmaz Çeliğin Radyasyon Zırhlama Özelliğine Etkisinin Araştırılması, Isparta: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Türk, S. & Engin, Y. (2021). Çimento ve Mineral Katkı Standartları, Türkçimento Yayınları.
- Türk, S. & Engin, Y. (2024). Porland Çimentosu: 200 Yıllık Serüven, Türkçimento Yayınları.
- Türkmen, İ. (1997). Van-Erciş Pomzasından Üretilen Hafif Betonun Donma-Çözülme Dayanıklılığının Araştırılması, Erzurum: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi.

- Usta, S. (2016). Agrega Granülometrisinin Beton Bileşimindeki Teorik Malzeme Miktarları ile Betonun Kompasite ve Porozite Değerleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), s. 1-15. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/yted/issue/22208/238458> adresinden alındı
- Uygun, A., & Solakoğlu, E. (2002). Pütürge (Malatya) Masifindeki Profillit Yataklarının Jeolojisi ve Kökeni. *MTA Dergisi*, s. 13-19.
- Yeğınobalı, A., & Ertün, T. (2011). *Çimentoda Standartlar ve Mİneral Katkılar*. Ankara: Türkiye 8Çimento Müstahsilleri Birliği.
- Yıldırım, K. A. (2019), Yttrium-90 Mikro Küre Tedavisinde Internal Dozimetrinin Monte Carlo Yöntemi İle Belirlenmesi, Yayınlanmamış Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- Yorulmaz, N., Yasar, M.M., Acikgoz, A., Kavun, Y., Demircan, G., Kamislioglu, M., Aktas, B., Ulas, E.O., 2024. Influence of Gd₂O₃ on structural, optical, radiation shielding, and mechanical properties of borate glasses. *Opt. Mater. (Amst)*. 149,115032.