



Ağır Betonlardaki Güncel Gelişmelere Genel Bir Bakış

Current Progresses in Heavy-weights Concrete: An Overview

İlker Bekir Topçu¹, İsmail Hocaoğlu^{2*}, Fatmah Mohammed Adil Adil³¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir ilkerbt@ogu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2075-6361>²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bolvadin Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümü, Afyonkarahisar ihocaoglu@aku.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9294-1120>³Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir adilfatma47@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6779-9548>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Nisan 2023
Revizyon xxx
Kabul 16 Mayıs 2023
Online 20 Haziran 2023

Anahtar Kelimeler:

Ultra yüksek performanslı beton,
ağır beton, ağır agregalar,
radyasyon, zırhlama

ÖZ

Beton, bulunduğumuz yüzyılın en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Ağır beton ise özel üretilmiş bir beton çeşididir ve birim hacim ağırlığı yüksek olan betonları tanımlamaktadır. Ağır beton üretimi için ağır agregaların kullanılması gerekmektedir. Teknolojinin ilerlemesi ve artan insan nüfusu ile insanlar, radyoaktif ışın ve dalgalara daha çok maruz kalmaktadır. Üretilecek özel yapı malzemeleri ile bu etkiden kaçınmak mümkündür. Ağır betonlar bu tür ışınlar karşı oluşturdukları zırh etkisi ile canlıları korur. Hali hazırda birçok hastane ve askeri birimlerde kullanılan ağır betonlar üretimi kolay ve kesin çözüm sunan bir yöntemdir. Özellikle nükleer çalışmaların hız kazandığı bu dönemde, ağır betonlar yüksek birim ağırlıkları nedeniyle olası patlama, ışın yayılımı, ayrıca yüksek sıcaklık ve ses etkisinden yüksek korunma sağlar. Bu çalışmanın amacı son yıllarda ağır beton ve ultra yüksek dayanımlı ağır beton ile ilgili yapılan çalışmalarda gelişmeleri takip etmektir. Arama indekslerinde yakın tarihli yapılan literatür araştırması sonucunda ağır betonlar ile ilgili genel bir bakış açısı sunan çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürdeki bu eksikğin kapatılması adına bu çalışmanın yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 April 2023
Received in revised form xxx
Accepted 16 May 2023
Available online 20 June 2023

Keywords:

Ultra-high concrete (HWUHPC),
heavy-weight concrete,
heavyweight aggregates, barite,
radiation, shielding

ABSTRACT

Concrete is the most widely used building material of the current century. Heavy-weights concrete, on the other hand, is a specially produced type of concrete and defines concrete with a high unit volume weight. Heavy-weights aggregates must be used for heavy-weights concrete production. With the advancement of technology and the increasing human population, people are more exposed to radioactive rays and waves. It is possible to avoid this effect with special building materials to be produced. Heavy-weights concretes protect living things with the shield effect they create against such rays. Heavy-weights concrete, which is currently used in many hospitals and military units, is an easy and precise method to produce. Especially in this period when nuclear works accelerate, heavy-weights concretes provide high protection from possible explosion, radiation, and high temperature and sound effects due to their high unit weights. The aim of this study is to follow the developments in the studies on heavy-weights concrete and ultra-high strength heavy-weights concrete in recent years. As a result of the recent literature search in search indexes, no study has been found to provide a general perspective on heavy-weights concretes. This study was needed to close this gap in the literature.

DOI: 10.24012/dumf.1279171

* Sorumlu Yazar:

Giriş

Modern teknoloji çağının en temel unsurları radyasyon ve radyoaktivite olmuştur. Son zamanlarda radyasyonun sağlık alanında, temel bilimlerde, endüstri alanında, askeri amaçlarda ve tarımda kullanılışı ile ileri derecede gelişmeler gözlenmiştir. Radyoaktif ışınlar kanserojen olmakta ve canlı vücuduna zarar vermektedir. Bu nedenle araştırmacılar tarafından radyoaktif yapılarda olabilecek sızıntılara karşı tehlikeli ışınlardan korunmak amacıyla ağır betonlar geliştirilmiştir. Ağır betonlar röntgen odalarında, nükleer reaktörlerde, savunma amaçlı sığınaklarda, su altı petrol gaz ve petrol boru hatlarında, onkoloji hastanelerinde, köprü ayaklarında, beton ağırlıklı barajların gövde kısımlarında, istinat duvarları gibi devrilmeye ve kaymaya karşı güvensiz betonarme yapılarda ağırlık-devrilme ilişkisiyle devrilmeye karşı momenti artırmak amacıyla kullanılmaktadırlar [1].

Ağır beton, birim ağırlığı 2600 kg/m³'ün üzerinde olan ve genellikle özgül ağırlığı 3'den yüksek olan yoğunluklu kaba agrega kullanarak üretilen beton olarak sınıflandırılmaktadır. Ağır agregalarla üretilen betonlar normal agregalar kullanılarak üretilen betonlara göre yaklaşık %50-100 daha yüksek birim ağırlığa sahiptir ve hafif agregalı betonlara göre çok daha maliyetlidir. Ağır beton için kullanılan malzemelerin seçiminde en önemli faktör, yapıdaki bileşenlerin mevcudiyetidir. Ağır betonlarda yaygın olarak barit, manyetit, limonit, siderit, hematit gibi doğal agregalar da kullanılmaktadır. Ayrıca ağır metal oksit, demir, kurşun parçacıkları gibi sanayi atıkları olan yapay agregalarda kullanılabilir [2].

Hibrit bir kurşun-çelik fiber sistem ile ağır betonun birim ağırlığını arttırmaktadır. Çelik lifler, radyasyon kalkanına herhangi bir katkı yapmadan mekanik özellikleri iyileştirirken kurşun lifler ise betonun mekanik özelliklerini iyileştirmeden bir radyasyon kalkanı oluşturmaktadır [3]. Ağır agregalar kullanıldığı takdirde, lineer zayıflatma katsayısı ve yoğunluğu artarken basınç dayanımı ve çekme dayanımı azalmaktadır. Ağır betonun E-modülü normalden daha yüksektir [4]. Portland çimentosunun kısmen değiştirilmesi için demir atık malzemelerinin (nano boyutlu manyetit (Fe₃O₄), yüksek çinko oksit içerikli süper ince çelik tozu ve ferritik duman tozu gibi) kullanımı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ağır betondaki agrega bileşimi, değişkenlik nedeniyle radyasyon kalkanı özelliklerinde önemli bir değere sahiptir [5].

Radyasyondan korunmada kullanılacak betonlarda çimento içeriği, agregalar ve s/ç oranı gibi faktörler önemlidir. Bu nedenle yapılan bir çalışmada, ağır manyetit betonun en büyük agrega boyutu 12,5, 19 ve 25 mm, çimento içeriği (C=350, 400 kg/m³) ve s/ç oranı (s/ç=0,45, 0,65) olarak belirlenmiştir. Ağır manyetit betonun γ (gama) radyasyonuna da karşı koruma özelliklerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak agrega boyutu arttıkça ve s/ç oranı azaldıkça radyasyon iletim akısının azaldığı ve ağır manyetit betonun koruma kapasitesinin arttığı görülmektedir. Betonlara yüksek sıcaklık dayanımı

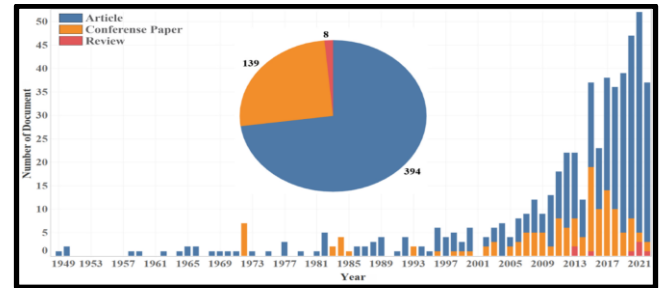
kazandırmak için manyetit ve silis kumu ilave edildiğinde radyasyondan korunma kapasiteleri açısından silis kumuna göre biraz daha iyi olduğu belirlenmiştir [6].

Günümüzde kromit (FeCr₂O₄), volframit [(20Fe, 80Mn) WO₄], hematit (Fe₂O₃), titanyum dioksit (TiO₂), alümina (Al₂O₃), limonit [FeO(OH)·nH₂O] ve barit (BaSO₄) kullanılarak hem yüksek sıcaklık dayanımı hem de iyi radyasyon kalkanı özelliğine sahip yeni tip ağır betonlar üretilmektedir. Hem benzeşim hem de deneysel sonuçlar parafin esaslı ve normal beton ile karşılaştırıldığında yeni ağır betonların, parafin esaslı ve konvansiyonel betona göre yüksek radyasyon zayıflatma kabiliyetine sahip olduğu gözlemlenmiştir [7]. Günümüzde kurşun, γ radyasyon kalkanı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurşunun toksik etkisi olduğundan sanayide zararlı maddelerin kullanımını kısıtlayan EU RoHS 1 direktifine göre kurşun kullanımını sınırlı olmaktadır. Bu nedenle alternatif malzeme araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Bu çalışmanın amacı son yıllarda ağır beton ve ultra yüksek dayanımlı ağır beton ile ilgili yapılan çalışmalarda gelişmeleri takip etmektir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ağır betonlar ile ilgili genel bir bakış açısı sunan çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürdeki bu eksiğin kapatılması adına bu çalışmanın yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur.

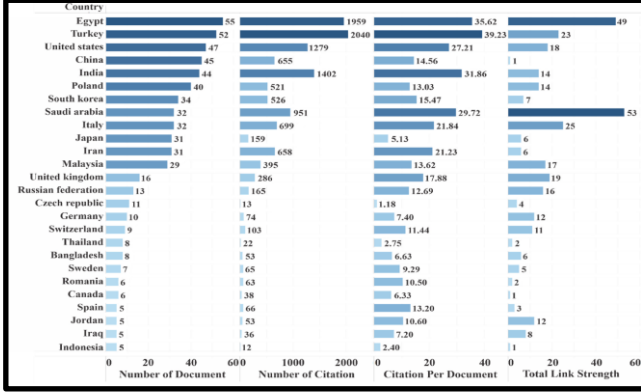
Literatür Araştırması

Günümüzde bilim insanları radyasyonun insan ve çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin daha çok farkına varmışlardır. Bunun sonucu olarak bilim dünyası beton kompozitlerin radyasyon kalkanı olarak kullanılabilirliğine dair güncel çalışmalara yönelmiştir. Şekil 1, 1949-2022 yılları arasında radyasyon kalkanı olarak beton kompozitlerin kullanımı hakkında yapılan bilimsel çalışma sayılarını göstermektedir. Şekil 1 incelendiğinde 1950'li yıllarda radyasyon zırhı olarak çimentolu sistemlerin kullanımı ile ilgili kısıtlı sayıda araştırma yapıldığı görülmüştür. Ancak son yıllarda özellikle radyasyon probleminin farkındalığının artması ile bilim insanları radyasyona karşı dayanıklı betonların üretilmesine yönelmişlerdir. 2023 yılı hariç 2022 yılına kadar çimento veya beton radyasyon kalkanı konularında toplam 541 araştırmanın yapıldığı gözlenmiştir [8]-[11].



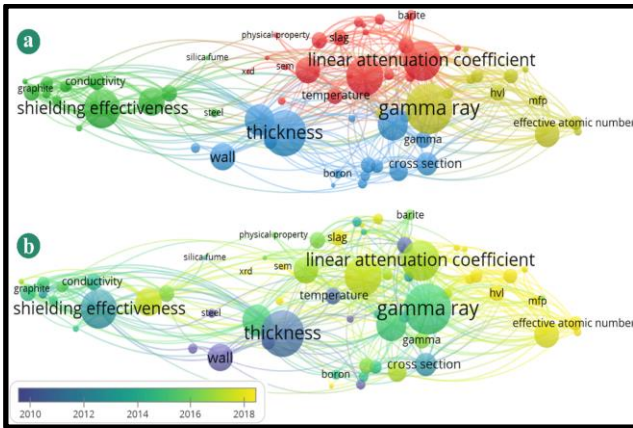
Şekil 1. Scopus tarafından taranan radyasyona dayanıklı betonlar ile ilgili yayınlanan araştırmalar [1].

Ülkemiz radyasyona dirençli beton üretimi üzerine en çok araştırma yapan ülkelerin başında gelmektedir (Şekil 2). Türkiye bilim insanları tarafından bu konuyla ilgili (2022 yılı sonuna kadar) toplam 52 araştırma yapılmış olup, ilgili çalışmalara toplam 2040 atıf yapılmıştır.



Şekil 2. Radyasyon kalkanı olarak beton kompozitlerin kullanımı konusundaki yayınlanan araştırmaların ülkelere göre değişimi [1].

Şekil 3 literatürde yapılan araştırmaların anahtar kelimelerini ve radyasyon kalkanı olarak çimento kompozit malzemelerinin kullanıldığı çalışmalarda anahtar kelimeleri karşılaştırmaktadır. Şekil 3 incelendiğinde en çok araştırma gama ışınları, doğrusal zayıflama katsayısı, kalkan katsayısı ve beton örtü kalınlığı üzerine yapılmıştır.

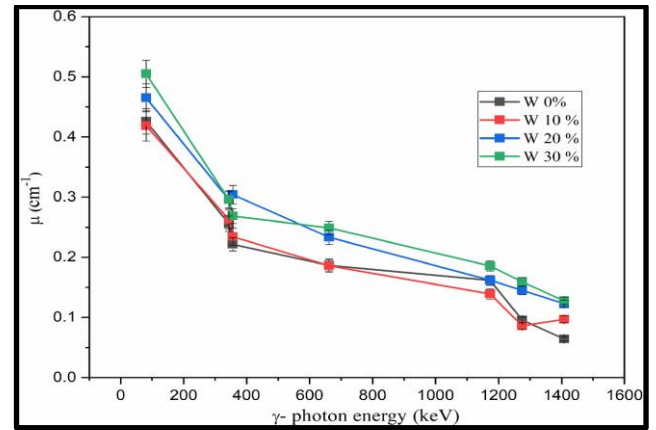


Şekil 3. Anahtar kelime haritası (a) ve radyasyon kalkanı olarak çimento kompozitlerinin kullanıldığı araştırmalarda anahtar kelimelerin (b) üst üste çakıştırılması ile meydana gelen görsel harita [1].

Farokhzad vd. [4], yaptıkları çalışmada Farklı yüzdelerde ferrosfosfor ve normal agregalar, çelik tozu ve nano silika tozu ile yapılan ağır beton numunelerinin basınç dayanımını incelemişlerdir. Belirtilen malzemelerin farklı yüzdelere sahip 60 adet 15 cm'lik küp beton numunesi üretilmiş ve

basınç dayanımları 28 günde aynı yükleme hızında ölçülmüştür. Basınç dayanımı belirlendikten sonra, numunelerin lineer zayıflama katsayısı sezyum-137 kaynağından γ ışını ve radyasyon ile belirlenmiştir. Sonuçlar, basınç dayanımını arttırmada en etkili faktörlerin sırasıyla ferrosfosfor agregaları, nano silika tozu ve çelik tozu olduğunu göstermektedir. Doğrusal zayıflama katsayısını arttırmada en etkili faktörler sırasıyla ferrosfosfor agregası, çelik tozu ve nano silika tozudur. En yüksek basınç dayanımları, 28 günde %100 ferrosfosfor, %20 çelik tozu ve %5 nano silika ile yapılan ve yaklaşık 52 MPa basınç dayanımı elde edilen numunelerde gözlemlenmiştir. En düşük basınç dayanımı, %25 ferrosfosfor, %10 çelik tozu ve nano silika olmadan elde edilen 25 MPa dayanıma sahip olan numunede elde edilmiştir. Ayrıca numunelerin lineer zayıflama katsayısı deneyi sonuçlarına göre, en yüksek lineer zayıflama katsayısı % 100 ferrosfosfor, % 30 çelik tozu ve % 5 nano silika ile yapılan numunelere ait olup, en düşük lineer zayıflama katsayısı 0,295 olup, % 8 nano silika ile ferrosfosfor ve çelik tozu kullanılmadan yapılan numune ise bu değer 0.1514'dir.

Mahmoud vd. [12], γ -ışını yayan fotonlar için birçok radyoaktif izotop (Ba-133, Na-22, Eu-152, Cs-137 ve Co-60) kullanarak 81 keV'den 1408 keV'ye genişletilmiş enerjinin beton üzerindeki etkilerini araştırmışlar, 662 keV'lik γ -foton enerjisinde metalik atık içeriğinin ağırlıkça %0 ila %30 arasında yükselmesi ile zayıflatma katsayısı (μ) değerinin yaklaşık olarak %33 oranında bir artış gösterebileceğini gözlemlenmişlerdir (Şekil 4) [12].



Şekil 4. Betonlarda metal atık oranı ile zayıflatma katsayısı arasındaki ilişki [12].

Azeez vd. [5], yaptıkları çalışmada çelik cürufu, çelik bilye ve demir cevheri içeren farklı yüksek yoğunluklu iri agregalar kullanılarak hazırlanan ağır beton karışımlarının radyasyondan korunma performansını incelemişlerdir. Normal ağırlıklı kireçtaşı agregası, bazı ağır beton karışımlarında yüksek yoğunluklu agregaların kısmen değiştirilmesinin yanı sıra kontrol karışımında da kullanılmıştır. Normal ve yüksek yoğunluklu iri agregaların

farklı kombinasyonları göz önünde bulundurularak ve çimento içeriği ve s/ç oranı sabit tutularak toplam 19 ağır beton karışımı hazırlanmış ve bunların kuru yoğunluğu, basınç dayanımı ve nükleer radyasyon tepkisi incelenmiştir. Normal ağırlıkta kireçtaşı agregası içeren kontrol karışımı dışında, 18 ağır beton karışımının tamamında kabul edilebilir (2600-3563 kg/m³ aralığında) kuru birim ağırlığa ulaşılmış, 26-45 MPa aralığında değişen karışımların basınç dayanımının, tümünün yapısal bir betonun gereksinimlerini karşıladığı görülmüştür. Radyasyon önleme performansı, iri agrega tipine ve beton karışımının dayanım sınıfına bakılmaksızın beton karışımlarının birim ağırlığından etkilenmektedir. Deneysel verilere dayalı olarak, radyasyon kalkanı performansının göstergesi ile betonun birim ağırlığı arasındaki korelasyonlar ile yüksek derecede uyum elde edildiği bildirilmiştir. Gasthi vd. [13], yüksek fırın cürufu ve normal betonların gama ve nötron radyasyonları uygulandığında etkilerini araştırmışlardır. Mineral katkılı betonlarda nötron ve gama ışınlarına karşı daha yüksek radyasyon direnci gözlemlenmiştir [13].

Mehrnejad [14], çalışmasında radyasyondan kaynaklanan çeşitli zararlı etkilerden korunmak için betonun zırhlanmasında kullanılacak en uygun malzemeleri belirlemiştir. Betonun x ve γ ışınları geçirmemesi için barit agregası (yüksek yoğunlukta), nötron parçacıklarının olumsuz etkilerini azaltmak için ise bor, bor-karbit ve galena malzemeleri kullanılmıştır.

Bakırhan [15], çalışmasında maden ocaklarından çıkan kurşun madeni atıklarından oluşan agregalar ile üretilen ağır betonların radyasyon zırhlama özelliğini incelemiştir. Beton karışımında kurşun madeni atıkları, manyetit, barit gibi agregalar %25 ve %75 değerler aralığında kullanılarak C16/20, C25/30 ve C35/45 sınıfı betonlar üretilmiştir. Araştırmasında radyasyon enerjisi artmasına karşılık olarak kütle azaltma katsayısında düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca manyetit-pasa agregası karışımı ile hazırlanan farklı dayanımlı betonlar üzerinde 4 farklı enerji seviyesinde radyasyon soğurma katsayıları incelenmiş ve tüm enerji seviyeleri için karışımda sadece manyetit agregasının kullanıldığı ve en yüksek radyasyon soğurma katsayısı C35/45 sınıfındaki betonda elde edilmiştir.

Demirci [16], çalışmasında s/ç oranının 0.4, 0.5 ve 0.6 olduğu, pirit, krom, manyetit ve normal agregayla üretilen ağır betonlar üzerinde araştırma yapmış, s/ç oranının arttığında; basınç dayanımı, E-modülü ve artan enerji ile soğurma katsayılarını azalttığı sonucunu elde etmiştir. Ayrıca manyetit agregalı betonların radyasyonu en iyi soğuran beton olduğunu bildirmiştir. Kharita, vd. [17], yaptığı çalışmada karbon tozu ilavesinin hematit radyasyon kalkanlı betonunun özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Koruyucu özellikler üzerindeki etkilerini araştırmak için hematit agregaları ile hazırlanan betona farklı yüzdelerde karbon tozu ilave edilmiş, hazırlanan betonların mekanik ve radyasyon zayıflama özellikleri belirlenmiştir. Betona %6 (ağırlıkça) karbon tozu ilavesinin beton üzerindeki dayanımı yaklaşık %15 artırabileceği

bulunmuştur. Artan karbon tozu içeriği ile hem γ hem de nötronlar için koruma etkinliği azalmıştır. Ancak hem γ ışınları hem de nötronlar için koruma etkinliğindeki bu kayıp, %6'lık karbon tozu ilavesi için ölçüm hataları aralığında olmaktadır. Deneysel ölçümler için simülasyonlar, karbon tozunun nötronlara karşı koruma etkinliği üzerindeki etkilerini araştırmak için Monte Carlo (MCNP) kodu kullanılmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum yakalandığı bildirilmiştir.

Nikbin, vd. [18] çimento esaslı kompozit malzemelerde çimento yerine %8 oranında nano-TiO₂ konulması ile gama radyasyonu ışınlarının önemli ölçüde engellenebileceği sonucuna ulaşmışlardır [18].

Rezaei Ochbelagh, vd. [19], yaptığı çalışmada 59,5 ve 661 keV foton enerjilerinde toplam kütle zayıflama ve doğrusal zayıflama katsayıları, yarı değer kalınlıkları, etkin atomik sayıları, etkin elektron yoğunlukları ve atom kesitlerini ölçülmüştür. Ölçülen ve hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. Kaydedilen değerlerin enerji ve beton bileşimi ile bir değişim gösterdiği de bildirilmiştir. Ayrıca; kurşunun mekanik özellikleri ve radyasyona etkisi betonun korunması da incelenmiştir. γ ışını radyasyonunun beton basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemek için çeşitli numuneler hazırlanmıştır. Geliştirilen betonun yoğun yapısı SEM mikroskobu ile doğrulanmıştır. Farklı kurşun yüzdeleri ile karıştırılan konik giritin γ ışını koruması da incelenmiş, %90 kurşun tozu ve %10 çimento içeren betonun en yüksek dayanım ve γ ışını koruyucu özelliklerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

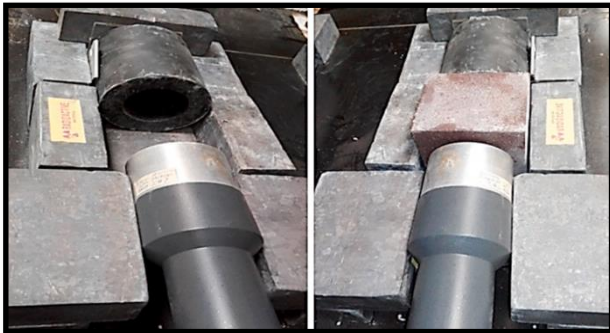
Akkurt, vd. [20], çalışmasında farklı karışımlarda (%0, %10, %30 ve %50) agrega olarak zeolit içeren beton için doğrusal zayıflama katsayısı ölçülmüştür. Dört beton blok üzerinde ölçülen doğrusal zayıflama katsayısı, zeolit miktarının artmasıyla azalmıştır. Betonda agrega olarak zeolit ilavesinin radyasyondan korunma amacıyla kullanılacak alternatif bir seçenek olmadığı görülmüştür.

Korkut, vd. [21], yaptıkları çalışmada kolemanit, üleksit ve tinkal cevherlerinin nötron koruyucu özelliğini incelemiştir. Numuneler mikroskobik kesitlerle incelenmiş ve ayrıca toplam makroskobik kesitleri simüle etmek için FLUKA Monte Carlo kodu kullanılmıştır. Artan bor atomu konsantrasyonlarının seçilen cevherlerin nötron koruyucu özelliğini güçlendirebileceği bildirilmiştir. Revuelta, vd. [22], yaptıkları çalışmada ağır betonun üretiminde ayrışmayı incelemiştir. Farklı oranlarda akışkanlaştırıcı ve barit agregası kullanarak ağır beton üretmişlerdir. Yaptıkları araştırmada %1,8 kimyasal katkı konularak kendiliğinden yerleşen beton özelliği gösteren ağır beton üretmişlerdir. Sadece taze betonda kusmalar gözlemlenmiştir. Yine ağır beton üretiminde ayrışma oluşmaması için ince taneli malzeme miktarının 160-240 lt/m³ olması gerektiği sonucuna da ulaşmıştır. Çakı [23], çalışmasında ağır betonların E-modülünü incelemiştir. Barit agregası kullanılarak, en büyük dane çapı 16 mm olan farklı s/ç (0.63, 0.54 ve 0.46) oranlarına sahip 3 farklı ağır beton üretmiş, üretilen ağır betonların basınç dayanımlarının

sırasıyla 46.69 MPa, 63.69 MPa ve 62.24 MPa olduğu gözlenmiştir [23]. Üretilmiş ağır betonların E-modüllerinin ACI, TS 500 ve CEB’de tanımlanan E-modülü değerlerine oldukça yakın olduğu, bu nedenle barit agregalı beton tasarımında ACI 318-95, TS 500 ve CEB’deki E-modülü formülüyle hesaplanabileceği gözlenmiştir.

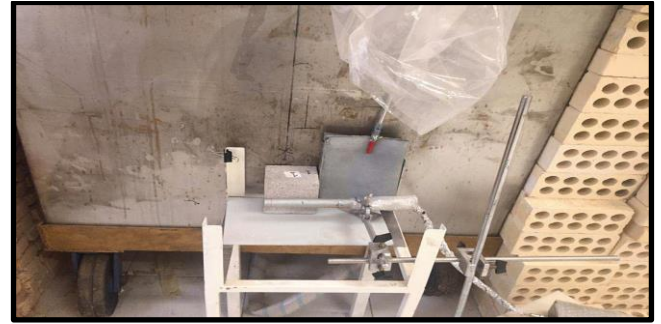
Güreş [24], çalışmasında, Kahramanmaraş Şekeroba yöresinde bulunan barit agregasının ağır beton üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ağır beton üretiminde kullanılacak olan Şekeroba barit agregalarının yoğunluğu 4.0 kg/m^3 ’ün üzerinde olup su emme değerleri sırasıyla %0.4 ve %0.3 olarak belirlenmiştir. Bu özelliklere sahip barit agregalarının ağır beton üretiminde kullanılmasında uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Karışımda kullanılan agregaların aşınmaya karşı direncinin düşük olması nedeniyle betonun kalıplara düzgün yerleştirilmesine dikkat edilmesi gerektiğini, ayrıca taze betonun işlenebilirliğinde olumsuz bir etkinin olmaması için karışım tasarım ve üretimde önlemler alınması gerektiği ifade edilmiştir. Khan, vd. [25], yaptıkları çalışmada kumun kısmen ultra ince parçacıkları olan ve kumdan yaklaşık iki kat daha ağır olan hematit tozuyla değiştirilmesiyle beş ağır ultra yüksek performanslı beton karışımını değerlendirmiştir. Bu karışımların kuru yoğunluğu, yaklaşık 2600 kg/m^3 ila 2900 kg/m^3 arasında değişmiştir ve bunların tümü, ağır ağırlık kategorisi altında değerlendirilmek için en düşük kuru yoğunluk gerekliliğini karşılamaktadır.

Ultra yüksek dayanımlı ağır beton karışımları farklı kuru yoğunluklara sahip olmalarına rağmen, mekanik özellikleri önemli ölçüde değişmemiş ve kum ikamesinin olumsuz bir etkisi görülmemiştir. Radyasyon kalkanı, karışımların kuru yoğunluğundaki artışla birlikte artmıştır. Bununla birlikte, ultra yüksek dayanımlı ağır betonun γ radyasyon kalkanı, aynı kuru yoğunluğa sahip olan geleneksel ağır betonuna göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu da mikro yapı yoğunluğunun, beton yoğunluğunun yanı sıra radyasyon kalkanlamasını da geliştirdiğini göstermektedir. γ radyasyon kalkanı deney düzeneğinin numune içeren ve içermeyen durumu Şekil 5’de gösterilmiştir.



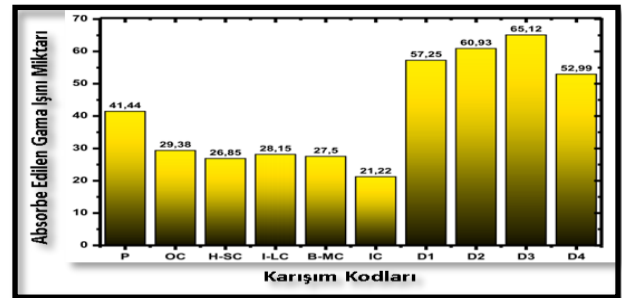
Şekil 5. γ radyasyon kalkanı deneyi, numune konmamış (sol) ve numune konulmuş hali (sağ) [25].

Son yıllarda ağır beton mekanik özelliklerini iyileştirmek, radyasyon koruması sağlamak, iyi işlenebilirlik, yüksek dayanım ve dayanıklılık, yüksek çatlama direnci, düşük geçirgenlik ve düşük büzülme için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu belirtilen özelliklerin geliştirilmesi adına El-Sayed [26], yaptığı çalışmada %15 pirinç kabuğu külü, %3 polietilen, %0.3 borik asit, %3 nano silika ve yüksek oranda su azaltıcı yerine, manyetit kaba ve ince agregası kullanılarak altı karışım hazırlanmıştır. Tüm karışımlar 0.4’lük bir s/ç oranı ve 440 kg/m^3 çimento dozajı kullanarak ultra yüksek dayanımlı ağır betonun taze haldeki ve sertleşmiş haldeki mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuç olarak, %3 polietilen ile manyetit agrega karışımının mekanik özellikleri benzer beton karışımlarına göre iyileştirdiği ancak %15 pirinç kabuğu külü içeren manyetit basınç dayanımının, çimento ikame malzemeleri olarak kullanılan %3 polietilen ile manyetitten daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, %3 polietilen içeren manyetit, radyasyondan koruma için ağır betonun mekanik özelliklerini geliştirdiği anlaşılmıştır. Bu çalışmada, genel olarak, %3 polietilenli manyetit nötron radyasyon kalkanı (Şekil 6) için optimum beton karışımı olduğu bulunmuştur.



Şekil 6. Betonlardaki nötron radyasyon deneyi [13].

Aygün, vd. [27] yaptıkları çalışmada, farklı tipte mineraller (krom cevheri, hematit (Fe_2O_3), titanyum oksit (TiO_2), limonit [$\text{FeO}(\text{OH})\text{nH}_2\text{O}$] ve siderit (FeCO_3), krom oksit (Cr_2O_3) ve mangan oksit (MnO_2)) nötron ve γ kalkanlama etkinliği açısından incelemiş, geliştirilen betonların mekanik deneylerinde 30 MPa’ya kadar dayanıma sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ve dayanım deneylerinde sonuçların istenilen seviyeye kadar çıktığı bildirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Karışımların emdiği γ ışını miktarları [27].

Elde edilen sonuçlar parafin esaslı beton, sıradan betonlar ve bazı ağır betonlar ile karşılaştırılmıştır. Hem teorik hem de deneysel hesaplamalar, tüm yeni ağır betonların, referans numunelerden daha yüksek oranlarda γ ve nötron radyasyonu emdiğini göstermektedir. Özellikle, D3 numunesi, %55 krom cevheri içeren maksimum nötron zayıflatma doz değerine sahiptir. D2 ise üstün γ koruyucu betondur ve bu karışım %60 krom cevheri, %10 hematit ve %5 TiO_2 içermektedir. Bu çalışma ile yeni geliştirilen ultra yüksek dayanımlı ağır betonların, nükleer enerji uygulamaları için alternatif koruyucu malzemeler olabileceği tespit edilmiştir.

Ultra Yüksek Performanslı Beton

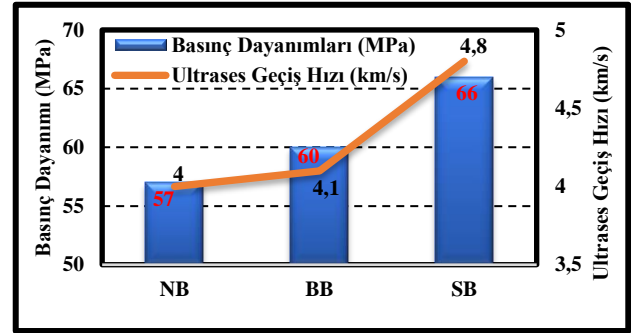
Son zamanlarda, ultra yüksek performanslı beton (UHPC), özel bileşimi nedeniyle çok yüksek dayanıma (150 MPa'nın üzerindeki basınç dayanımı), yüksek E-modülüne, kırılma tokluğuna ve mükemmel dayanıklılık özelliklerine sahip yeni bir yapı malzemesi olarak ortaya çıkmaktadır. UHPC'nin mekanik özellikleri ve dayanıklılık açısından sağlamlığının anahtarı, çok miktarda çimento ve ultra ince mineral dolgu, çok ince kuvars kumu, çelik lifler kullanılarak elde edilen yüksek yoğunluklu mikro yapısıdır. Düşük su/bağlayıcı oranı ve matristen kaba agregaların çıkarılması UHPC'nin yüksek performanslı betondan (HPC) çok daha üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olduğu rapor edilmiştir. HPC ile karşılaştırıldığında, UHPC'nin basınç dayanımı 2-3 kat daha yüksek, eğilme dayanımı 2-6 kat daha yüksek, E-modülü 1.5 kat daha yüksek, permabilitesi 50 kat daha düşük, klorür iyonu difüzyonu 25 kat daha düşük ve korozyon oranı 8 kat daha düşüktür. UHPC, mükemmel mekanik özelliklere ve dayanıklılık performansına sahip akıllı bir yapı malzemesi olarak nükleer santrallerde yapı elemanlarının yapımında kullanılmaktadır. Bununla birlikte, UHPC nükleer radyasyonlara maruz kalmaya karşı hassastır. Bir malzemenin nükleer radyasyona karşı korunmasını etkileyen ana faktör, daha önce açıklandığı gibi yoğunluğu olduğundan, bir nükleer santralde kullanılabilecek UHPC karışımının HWC kriterlerini karşılaması gerekmektedir. Kapsamlı bir literatür araştırması, UHPC'nin radyasyon zırhlamadaki etkinliğinin yanı sıra mekanik özellikler ve dayanıklılık özellikleri açısından performansı hakkında çok az sayıda çalışmanın rapor edildiğini göstermektedir [3].

Gökçe [28], yaptığı çalışmada ağır, yüksek performanslı fiber takviyeli çimento esaslı kompozit (HPFRCC) karışımları geliştirmiştir. HPFRCC karışımları, bir durumda ince agrega olarak barit kullanılarak ve başka bir durumda ince agrega olarak granüle demirli atık kullanılarak ayrı ayrı hazırlanmıştır. HPFRCC karışımlarının mekanik özellikleri, ince bir agrega olarak silika kumu-kuvars tozu karışımından oluşan referans UHPC karışımınıninkine karşılaştırılmıştır. Granüle demirli atık agrega içeren HPFRCC karışımın, reolojik ve mekanik özellikler açısından gelişme göstermekte olduğu bildirilmiştir. Ancak HPFRCC karışımında ince agrega olarak barit kullanılması mekanik özellikleri

azaltmaktadır. Çalışmada sonuç olarak tüm HPFRCC karışımları için radyasyon korumasına yönelik performansta önemli bir artış olduğu belirlenmiştir.

Ağır Betonların Özellikleri ve Kullanım Alanları

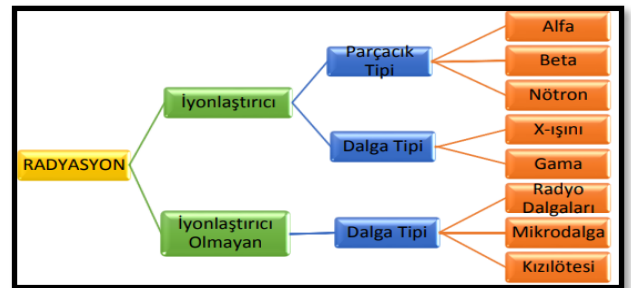
Bu başlık altında ağır betonların son yıllarda keşfedilen, araştırılan ve literatüre kazandırılan bazı özelliklerinden bahsedilecektir. Yapısal anlamda birçok farklı işlevi olan ağır betonların, bilinmeyen özellikleri ve genişleyen kullanım alanları bu kısımda incelenecektir. Gümüş, vd. [29] çalışmalarında ağır betonların gözenek boşluklarını incelemede ultrases geçiş hızı deneyi uygulamıştır. Bu kapsamda, normal beton (NB), barit içeren ağır beton (BB), siderit içeren ağır beton (SB) üretilerek basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde basınç dayanımı arttıkça ultrases geçiş hızının arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısı ile ağır agregalı betonların basınç dayanımı yüksek, boşluk oranı ise düşük olmaktadır.



Şekil 8. Basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızı [29].

Radyasyon

Radyasyon en genel anlamıyla, maddenin elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılmasıdır. Madde ile etkileşimlerine göre radyasyon çeşitleri Şekil 9'da gösterilmiştir [30]. Parçacık tipi radyasyonu Alfa (α), Beta (β) ve nötron kozmik ışınlarından oluşmaktadır. Dalga tipi radyasyon ise titreşim yoluyla ilerleyen kütesiz enerjilerin yayılmasıdır. İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan dalga tipi radyasyonlar ışık hızıyla eşdeğer hızda yayılmaktadır [31].



Şekil 9. Madde ile etkileşimine göre radyasyonlar [30].

Burada hedeflenen radyasyonla insanlar üzerinde oluşabilecek zararlı etkileri azaltmaktır. Zararlı etkileri azaltmak için radyasyona neden olan kaynak ile insan arasına radyasyon emici yerleştirilerekdir. Zararlı ışınlarının diğer cisimlere çarpması sonucu ortaya çıkan nötron ışınları ise küçük atom ağırlıklı elementler ile olumsuz etkileri azaltılmaktadır [32].

Zırhlamadaki Zararlı Işınlar

Radyoaktif ortamlarda zırhla korunması gereken zararlı ışınların özellikleri aşağıda açıklanmaktadır:

Alfa (α) Parçacıkları

α parçacığı, nötron-proton oranı çok düşük olduğu durumda yüksek enerjiye sahip helyum çekirdekleridir. Çoğunlukla atom numarasının yüksek olduğu izotroplarda gözlenen bu olay çekirdekten α parçacıklarının kopmasıyla oluşur. Günümüz teknolojisinde α parçacıklarının çok ince tabakalı maddeler ile durdurulabilmektedir. α parçacıklarının enerjilerini kolay kaybetmeleri nedeniyle dış radyasyon tehlikeleri bulunmamakta olup 10 cm'lik bir hava tabakası yeterli zırh olarak kabul edilmektedir [29].

Beta (β) Parçacıkları

β parçacıkları α parçacıkları gibi geçtikleri maddeler içerisinde iyonlaşmaya neden olmaktadır. β parçacıkları α parçacıklarından daha hafiftirler. Bu nedenle iyonlaşma kapasiteleri de α parçacıklarına göre daha düşüktür. β parçacıklarının bir diğer özelliği ise bir madde içerisine oldukça yüksek oranda nüfuz edebilme kapasitesine sahip olabilmeleridir. Günümüzde β parçacıklarının olumsuz etkilerinden korunmak için alüminyum levhalar kullanılmaktadır [29].

Nötronlar

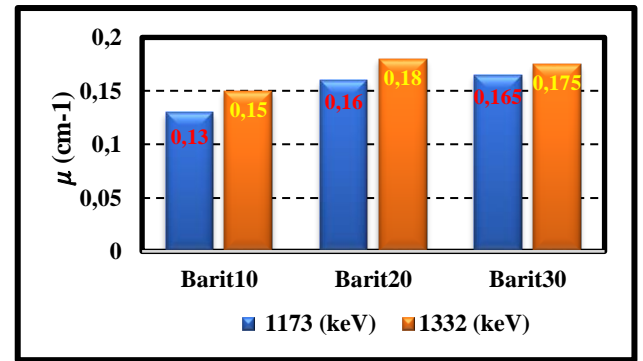
Yüksüz durumdaki nötron parçacıkları maddeler içerisine yüksek oranda nüfuz edebilmektedirler. Nötronlar doğrudan iyonlaşma özelliğine sahip olmasalar da atomlar ile etkileştiklerinde β , α , γ ve x ışınları gözlemlenmektedir. Nötronları parafin, su ve beton kütleleri ile durdurulabilmektedir [29].

Gama (γ) ve Röntgen (x) Işınları

Elektromanyetik ışınlar olan γ ve x ışınlarının dalga boyları (0.1-100 Å) arasında oldukça düşük seviyededir. x-ışınlarının frekansı görünür ışığın frekansından 1000 kat daha büyüktür. x-ışınları dalga ve tanecik özellikleri göstermeleri nedeniyle çift karakterlidirler. Tanecik özellik gösteren radyasyona foton denilmektedir. Gama ışınları ise

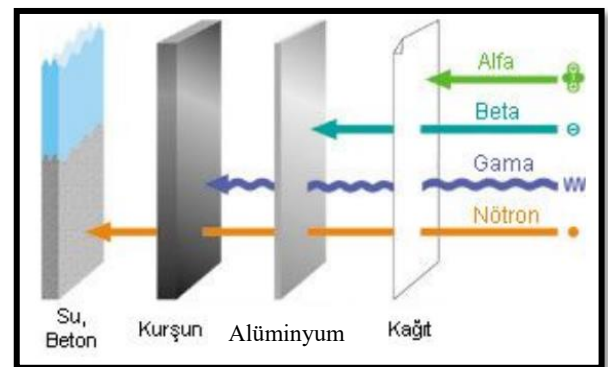
radyoaktif izotropların ayrışmasıyla ortaya çıkmaktadır. Zırlamanın amacı γ ve x ışınları ile nötronlara karşı korumadır.

Kullanılacak zırhın seçimi ve zırh kalınlığı; malzemenin radyasyon zayıflatma katsayısı ve malzemenin kimyasal bileşimine, radyasyon türü ve enerjisine bağlı olmaktadır [33]. Radyasyon zırlamasında ağır agrega kullanımının radyasyon zırlamaya etkileri incelenmiş, ağır agrega olarak farklı oranlardaki katsayıları Şekil 10'da yer almaktadır ve beton içerisinde bulunan barit arttıkça betonun radyasyon soğurma özelliği de artmaktadır [23],[33].



Şekil 10. Zayıflatma katsayılarının enerji grafiği [33].

Şekil 11'de α , β , γ ve nötron gibi radyoaktif ışınların geçebildiği ve etki edebildiği elementler gösterilmektedir. Alfa ışınları insan teninden geçemezken beta ışınları insan tenini geçerek alüminyumda soğurulmaktadır. γ ışınları ise alüminyumu geçerken kurşun elementini geçememektedir. Nötronlar ise bütün bu elementlerden geçerken ağır agrega içeren ağır betondan geçememektedir [34].



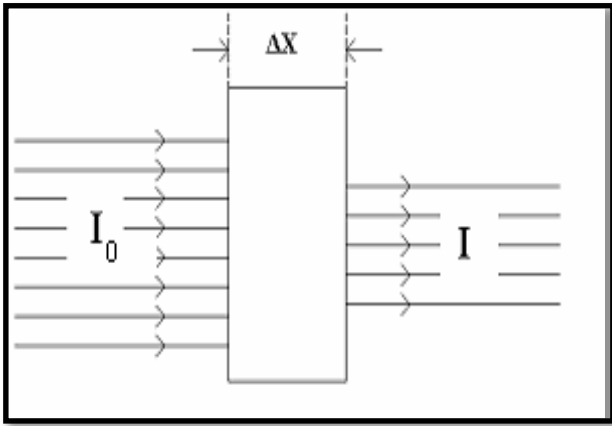
Şekil 11. α , β , nötron, γ ve x ışınının etkileri [34].

x ve γ ışınları madde ile etkileşimi üç farklı yolla gerçekleşmektedir. Bunlar; foto elektrik olayı, Compton olayı ve çift oluşum olaylarıdır. Bu olayların oluşma olasılıkları, x ve γ ışınları ile etkileşen maddenin atom

numarasına göre değişkenlik göstermektedir [35]. Radyasyon şiddetinde azalma olmasına radyasyonun zayıflaması, x ve γ ışınları ile etkileşen maddeden uzaklaştırılan enerjiye ise soğrulma denilmektedir.

Lineer ve Kütle Zayıflatma Katsayıları

x ve γ ışınları malzeme üzerinden geçtiği esnada fotoelektrik olayı, Compton saçılması, ışın demetlerinin şiddetlerinde azalma meydana gelmesidir. İlk aşamada I_0 şiddetindeki bir foton, Δx kalınlığındaki bir malzemenin içinden geçtiği esnada şiddeti I kadar azalmaktadır. Işın şiddetindeki bu azalma, doğrudan malzemenin kalınlığı ile ilişkilidir (Şekil 12) ve denklem (1) ile bulunmaktadır [34].



Şekil 12. x ve γ ışını soğurmaları [20].

$$dI/\Delta x = -\mu dx \quad (1)$$

Denklem 1'de x 'e göre (kalınlığına) integrali alındığında, bir ışın demetinin soğurucudan geçtiği sıradaki foton şiddetinin değişimi Denklem 2 yardımıyla hesaplanabilir [34].

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

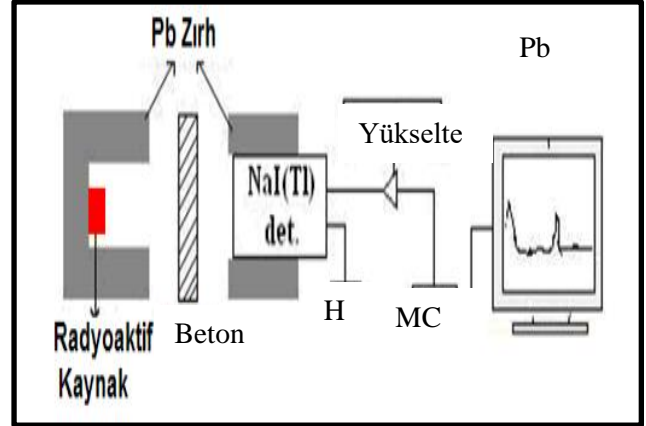
Denklemden μ katsayısı (birimi cm^{-1}) soğurma katsayısıdır [36],[37]. Lineer zayıflatma katsayısı (LZK) soğurulan şartlarda birim uzunluğun etkileşmesi olasılığıdır. Compton, Fotoelektrik ve çift oluşum etkileşimleri σ , τ ve κ sembolleriyle gösterilirler. Kısmi zayıflama katsayısı ve toplam zayıflama katsayısı σ , τ ve κ etkileşmesi sonucu meydana gelen zayıflatma katsayısı toplamıdır (Denklem 3) [38],[39].

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (3)$$

Fotonun ne kadar soğurulduğunun belirlenmesinde kullanılan bu bağıntı, bir foton ışın demetinin tamamen soğurulmasının mümkün olmadığını belirlemiştir. Ancak uygulamada soğurma çok yüksek oranda (algılanılamayan düzeyde) olabilmektedir. Bu oran kütle zayıflama katsayısı (KZK) μ_m ile gösterilmektedir. KZK, denklem (4) ile hesaplanmaktadır [34].

$$\mu_m = \mu/\rho \quad (4)$$

Şekil 13, kullanılan fotoçoğaltıcı tüp (içinde bir fotokatod ile kademeli olarak artan voltaj olan bir dizi elektrot bulunan havası boşaltılmış cam bir tüp), yükselteç, çok kanallı analizörden ve önyükselteçten oluşan sistemin şematik olarak gösterilmektedir. Ölçüm öncesinde γ spektrometre cihazının kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir.



Şekil 13. Fotoçoğaltıcı tüp ve yükselteç [40].

Elde edilen ölçümler neticesinde KZK Beer-Lambert eşitliği yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I} \quad (5)$$

Burada x mineral katkı (YFC) betonun kalınlığını, I_0 detektör ve kaynak arasındaki pik alanını (beton bulunmadığı durumda) ve I detektör ve kaynak arasında beton bulunduğu durumdaki pik alanı temsil etmektedir [40].

Zararlı Işınlara Kalkan Kullanımı

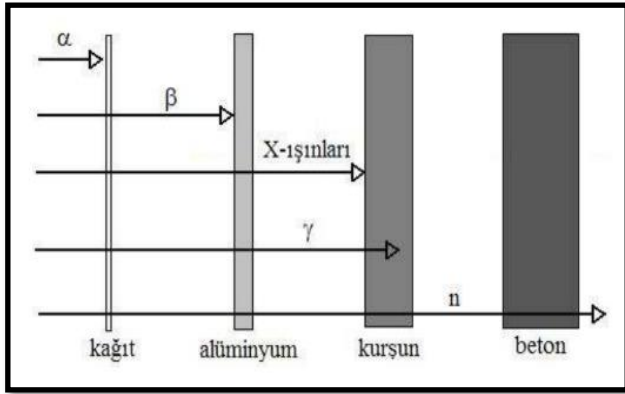
Yarı değer kalınlık (YDK) bir malzemenin üzerine gelen ışın demetlerinin yarısının kalınlığıdır. Malzeme üzerinden geçen ışın demetlerini %90 oranında düşüren kalınlık ise 10^2 'de bir değer kalınlığıdır (ODK). Malzemelerin yarı değer kalınlıkları ve onda bir değer kalınlıkları Denklem 6 ve Denklem 7 yardımıyla hesaplanabilir ve bu denklemler yüksek zırhlama yapmak için kritik öneme sahiptirler [34]. Bu denklemler γ ışınlarının zırhlamasında da etkilidir [34]. Bir malzeme içerisinden geçen radyasyon malzemenin atom numarası, öz kütlesi ve foton enerjileri ile yakından ilişkilidir. YDK bir radyasyon çeşidinin malzeme içerisine ne derecede nüfuz ettiğini belirlemek için en sık tercih edilen yöntemdir. Şöyle ki YDK ve ODK değerleri doğru belirlendiğinde radyasyonun malzemenin diğer kalınlıklarındaki nüfuz etme oranları da belirlenebilmektedir [34]. Radyasyonun bir diğer şekli de herhangi bir elektrik yükü taşımayan nötronlardır. Nötronlar, yalnızca atom çekirdekleri ile çarpışmaları sonucu yavaşlarlar. Malzemelerde nötron zırhlaması yapmak için üç sınıf malzemenin birleştirilmesi gerekmektedir. Oluşturulması gereken zırh atom numarası yüksek elementlerden meydana

gelmelidir. Böylece hızlı hareket eden nötronlar çarpışma sonucu yavaşlatılabilmektedir [29].

$$YDK=ln2/\mu \quad (6)$$

$$ODK=ln10/\mu \quad (7)$$

Radyasyona karşı malzeme giriciliklerinin karşılaştırılması Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 14. Radyasyona karşı malzeme giriciliklerinin karşılaştırılması [35],[41].

Ağır Betonda E-Modülü

Yapısal beton çok bileşenli (kompozit) bir malzeme olduğundan dolayı betonun E-modülünü, yoğunluğunu ve hacmini bileşimine giren malzemelerin özellikleri belirlemektedir. E-modülüne etkileyen bütün faktörler aslında betonun basınç dayanımını etkileyen faktörlerin kendisi olmaktadır. Ağır beton tasarımı yapılırken kullanılan yüksek E-modüllü iri agregalar, betonun E-modülünü de arttırmaktadır. Ayrıca E-modülüne etkileyen diğer unsurlar; çimento hamurunun boşluklu yapısı, agregaların D_{maks} değeri, agregaların dağılımı ve yüzey şekli olmaktadır.

Ağır Beton Agregaları

Başlıca beton bileşenleri çimento, agrega ve su'dur [42]. Beton üretiminde maliyeti düşürmek ve dayanımı arttırmak için yaklaşık %60-80 oranında agrega (kıyma kum, kıymataş, çakıl vb.) kullanılmaktadır. Ağır beton üretmek için kullanılması gereken agreganın özgül ağırlıkları 4.0 gr/cm^3 'ün üzerinde olmalıdır. Ağır beton üretiminde kullanılan başlıca agregalar limonit ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), barit (BaSO_4), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), viterit (BaCO_3), ilmenit (FeTiO_2), geotit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) vb. doğal agregalardır. Yapay agrega olarak ise kurşun parçacıkları, demir saçmaları, ferrosilikon ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$) ve ferrosilikon kullanılabilmektedir. Ağır beton üretiminde genellikle birim ağırlığını 3600 kg/m^3 'e kadar çıkarabilen barit (baryum sülfat) kullanılmaktadır [34].

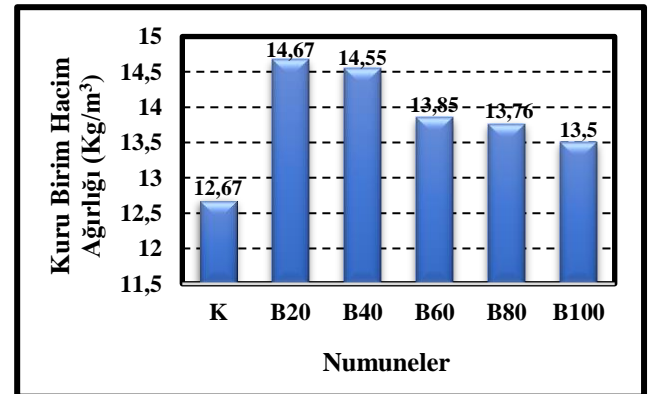
Barit Özellikleri

Ağır beton üretiminde sıklıkla tercih edilen baritin özgül ağırlığı $4.2-4.6 \text{ kg/dm}^3$ arasında olup, erime noktası yaklaşık olarak $1580 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Barit soğuk asit ve su içerisinde erimez. Ancak kaynayan sülfürik asit içerisinde az miktarda eriyebileceği belirlenmiştir. Yaklaşık olarak %90 saflıktaki bu kayaç kırma taş olarak kullanılabilmektedir. Baritin kimyasal bileşimi en çok baryum mineralinden oluşmaktadır. Baritin içerisinde demir ve karbon bulunması nedeniyle farklı renklerde (kırmızı, kahverengi, sarı, siyah, mavi) olabilmektedir. Baritin içeriğini yaklaşık %94'ü saf BaSO_4 oluşturmakta olup, ayrıca demir oksit, silis ve pirit mineralleri bulunmaktadır. Ağır beton üretmek için kullanılan baritin içeriğinde (daha yüksek dayanım elde edebilmek için) %3-5 oranında silis minerali içeren kayalar tercih edilmektedir [43]. Barit özgül ağırlığı yüksek olmasına rağmen kolayca ufalanabildiğinden beton üretiminde karıştırma aşamasında özenli olmak gerekmektedir. Doğal durumdaki barit cevheri Şekil 15'de gösterilmiştir. Barit kayaları ülkemizde kolay ulaşılabilir olmaları nedeniyle ağır agregalı beton üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır [44],[45].



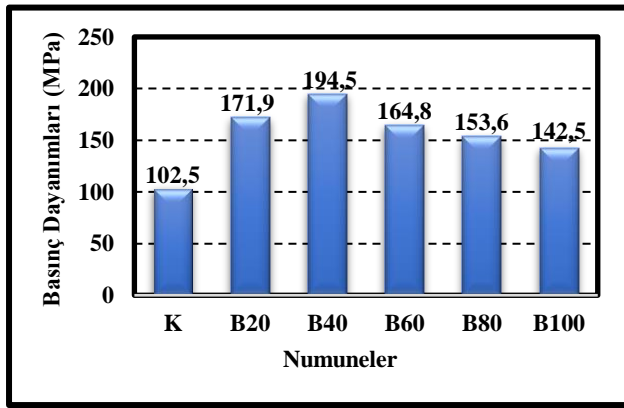
Şekil 15. Barit cevheri [1].

Radyasyona dirençli bir beton üretmek, yüksek basınç dayanımı ve yüksek dayanıklılık ile mümkün olabilmektedir.



Şekil 16. Barit oranı kuru birim hacim ağırlıkları [43].

Çünkü beton bünyesinde çatlaklar meydana gelmesi durumunda x ve γ ışınları beton içerisinden kolaylıkla geçebilmektedir. Şekil 16 beton sınıfına göre kuru birim hacim ağırlıklarını karşılaştırmaktadır. Yukarıdaki şekilde, K ile kontrol numunesi gösterilmiş, devamında ise karışımdaki baritin artması ile birlikte sırasıyla %20, 40, 60, 80 ve 100 oranındaki karışımların değerleri verilmiştir. Şekil 17'de kuru birim hacim ağırlık barit kullanımı ile kontrol numunesine göre artmış fakat barit yüzdesi arttıkça düşmüştür [43]. Şekil 17'de görüleceği üzere karışımdaki barit yüzdesinin artması ile basınç dayanımında kayda değer artışlar gerçekleşmiştir. Fakat barit oranının %100 kullanılması, %40'a göre daha az basınç dayanım değeri sağlamıştır, bunun nedeni kullanılan barit tozunun dayanıma olumsuz etki etmesidir [43].



Şekil 17. Öğütülmüş barit oranı basınç dayanımları [43].

Hematit Özellikleri

Hematit agregasının kimyasal bileşimi Fe_2O_3 'tür. Hematit madeni çelik grisi-siyah, pak siyah renklidir. Sertlik derecesi 5-6 arasında değişmekle beraber özgül ağırlıkları 5.26'dır. Bir demir minerali olan hematit agregası hidrotermal damarlarda ve magmatik kayalarda aksesuar minerali olarak bulunmaktadır [1].

Limonit Özellikleri

Limonit ($Fe_2O_3 \cdot xH_2O$), genellikle sarı renkli, yumuşak veya kahverengi, sert bir demir minerali olup, demir cevheri içerdiği için pigment olarak da kullanılmakta, %60 demir cevheri içeriğinden ağır beton üretiminde de kullanılmaktadır. Sertliği 5-5.5 değerleri arasında olup yoğunluğu $3.8-4.3 \text{ gr/cm}^3$ arasında olmaktadır. Saf limonit %60 oranında demir %14 oranında ise su içermektedir. Rengi demir siyahıdır [1]. Limonit, manyetit ve hematit'den daha düşük kalitede olarak başlıca Fransa, Küba ve Kanada'da bulunmaktadır. Esen [46] normal ve limonit donatılı betonun radyasyon zırlama özellikleri ve bazı fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu amaçla standartlara göre hazırlanan normal betonlar yerine aynı oranlarda limonit eklenmesi ile

agregalar hacimce yaklaşık olarak %20, 40, 60, 80 ve 100 oranlarında azaltılmış ağır beton karışımları hazırlamıştır. Limonit takviyesi ile üretilen betonun su emme miktarı artmış, basınç ve eğilme dayanımı ise azalmıştır. Ayrıca radyasyon geçirgenliği de önemli ölçüde azalmıştır.

İlmenit Özellikleri

$Fe^{+2}TiO_3$ formülü olan ilmenit cevheri birçok magmatik ve metamorfik kayalarda bulunan bir aksesuar minerali olup, masif, tanesel bir kristal biçimine sahip olmaktadır. Sertlik indeksi 5-6 değerleri arasında, özgül ağırlığı ise 4,72'dir. İlmenit cevheri siyah-kahverengimsi renge sahiptir. İlmenit cevheri hematitten çizgilerinin renkleriyle ayrıştırılmaktadır. Pegmatitlerde, kuvars damarlarında ve bazı gnaylarda kalkopirit ve hematit ile bulunmuştur [1].

Manyetit Özellikleri

Manyetit kimyasal bileşimi Fe_3O_4 , kristal kafes yapısı kübik, 5,5-6,5 derecesinde sertliğe sahiptir. Metalik bir parlaklığa sahip olan bu agreganın yoğunluğu $5,175-5,197 \text{ gr/cm}^3$ değerleri arasındadır. Manyetit agregasını diğer agregalardan ayıran en önemli özelliği kuvvetli çekme kabiliyeti ve siyah çizgi rengine sahip olmasıdır. Manyetitler metamorfik kayalarda, sülfid yataklarında, pegmatitlerde vb. kayalarda oluşmaktadır [1].

Ferrosfor Özellikleri

Ferrosfor, yüksek özgül ağırlığı nedeniyle ağır beton yapımında kullanılan bir mineraldir. Bu mineral fosfor üretiminde meydana gelmekte, doğal ve yapay agrega olarak zırlı betonu üretmek için kullanılmaktadır. İçeriğinde yaklaşık olarak %70 oranında demir bulunmaktadır. Özgül ağırlığı yaklaşık olarak 5,72-6,8 arasındadır. Ferrosfor cevherleri sıkıştırıldığında yüksek basınçlı gazlar oluşturmaktadır. Bu nedenle bu agregalar betonda kullanılmadan önce laboratuvarında test edilmelidir [15].

Siderit Özellikleri

Kimyasal bileşimi $FeCO_3$ olan siderit cevheri, hegzagonal kristal kafes yapısına sahiptir. Sertliği 3,5-4, özgül ağırlığı 3,96'dır. Siderit cevheri genellikle açık sarı, sarı gri karışımı, açık yeşil, sarımsı kahverengi, gri, koyu kahverengi renklere sahip olmasının yanı sıra nadiren beyaz ya da renksiz de olabilmektedir. Ayrıca saf halde %48'e kadar demir içermektedir [1].

Kolemanit Özellikleri

Kolemanit, nötron radyasyon zırlı betonlarında agrega olarak kullanılabilen doğal bir borattır. Kimyasal formülü $CaB_3O_4(OH)_3H_2O$, kristal kafes yapısına sahiptir. Şekil

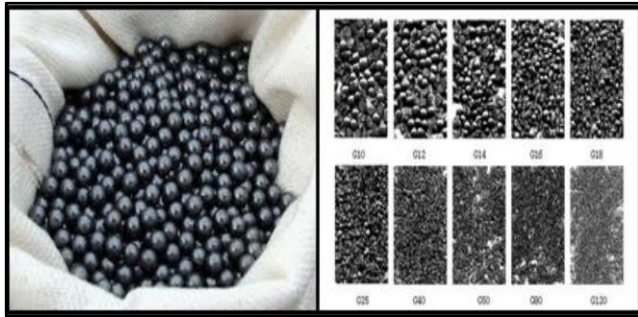
18'de görülen kolemanitin sertliği 4.5, yoğunluğu ise 2.42 g/cm³'dür. Renksiz bir yapıya sahip olan kolemanit, kristal yapısı ve dizilimi mükemmeldir. Genellikle kurak iklim bölgelerindeki tuz göllerindeki boraks ile birlikte oluşan kolemanitin görünümü Şekil 18'de gösterilmiştir [15].



Şekil 18. Kolemanit görünümü [15].

Çelik Saçma ve Parçaları

Çelik saçma ve parçaların yoğunluğu 6,2-7,8 g/cm³ arasında olup, ağır beton üretiminde yapay agrega olarak kullanılmaktadır. Çelik saçma ve parçalarına ait görünüm Şekil 19'da verilmiştir [15].



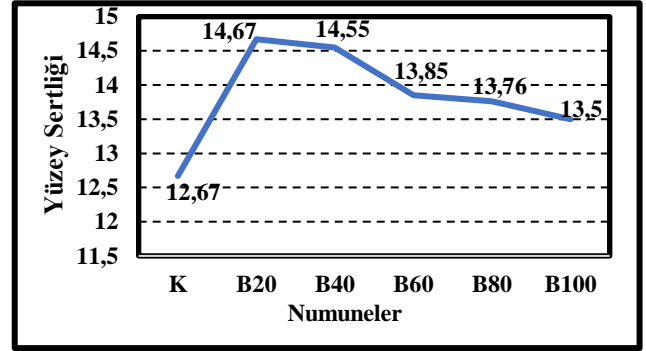
Şekil 19. Çelik saçma ve parçaların görünümü [15].

Ağır Agregaların Kullanımı

Ağır agregalar, köşelinin keskin olmaları nedeniyle beton üretiminde kullanılmaları bazı problemlerle karşılaşılmasına neden olabilmektedir. Bu sorunları bertaraf edebilmek için incelik modülü düşük agregaların tercih edilmesi gerekmektedir. Ayrıca betonun yeterli işlenebilirliği kazanabilmesi amacıyla ek tedbirlerin de alınması büyük önem arz etmektedir. Ayrışma oluşmaması için karışım tasarlanırken kaba ve ince agregaların yüksek yoğunlukta olmasına özen gösterilmelidir. Önceki yapılan araştırmalarda ağır beton üretiminde, iki aşamalı olarak (ön agrega yerleştirilmesi ve gömülü parçaların etraflarına beton dökümü) ayrışmanın azaltılabileceği belirlenmiştir [29].

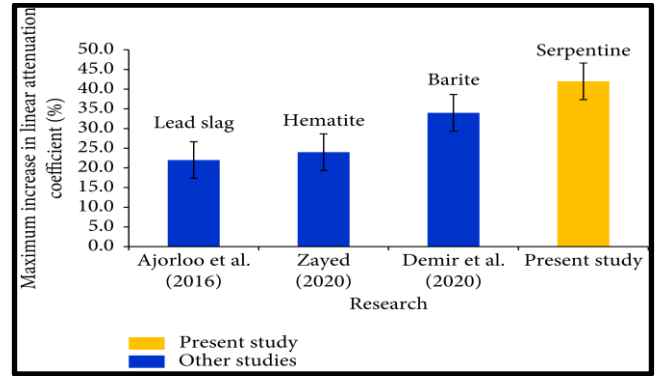
Ağır betonların aşınmalarının normal betonlara göre yüksek olması da ağır betona avantaj sağlamıştır (Şekil 20). Ancak

ağır beton ortalama büzülmesi geleneksel betonlarınkinden %30 daha fazladır. TS 3440 [47] kriterlerine göre üretilen geleneksel betonların dayanıklılıklarının yüksek olması istenmektedir. Radyasyona dirençli bir beton üretmek için ise zararlı su, zemin ve gazlara karşı önlem alınmasına gerek bulunmaz. Ancak; radyasyona dirençli ağır beton 28 günlük basınç dayanımı en az 60 MPa olmalıdır [34].



Şekil 20. Schmidt sertliğinin barit oranı ile değişimi [43].

Şekil 21, ağır betonda kullanılan kurşun cüruf, hematit, barit ve serpantin agregalarının doğrusal zayıflama katsayılarındaki artış oranlarını karşılaştırmaktadır. Serpantit ve barit agregalarıyla üretilen betonların radyasyon ışınlarını korumada daha etkili olabileceği belirlenmiştir [48]-[51].

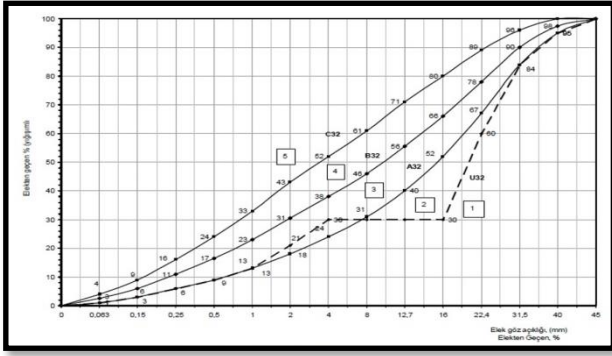


Şekil 21. Ağır beton üretiminde kullanılan kurşun cüruf, hematit, barit ve serpantin agregalarının doğrusal zayıflama katsayılarındaki artış oranlarının karşılaştırılması [8].

Ağır Betonların Karışım Yöntemleri

Ağır beton karışım hesap yöntemlerinde TS 802 [52]'de belirtilen yöntemlerle uygulanmaktadır. Ağır beton tasarımında kullanılan özel ve yoğunluğu yüksek olan agrega daneleri arasında boşluk oranı ve çatlama riskinin en az düzeyde olacak şekilde tasarlanmasına dikkat edilmelidir. Homojen ve dayanıklı ağır beton elde etmek için agrega granulometri eğrisinin Şekil 22'de belirtilen standartlarda verilen eğriler arasında kalmasına özen gösterilmelidir.

Ayrıca ağır beton üretimi sırasında karışım düzgün bir şekilde karıştırılmalı, sonra yerleştirilme işlemlerinin doğru yapılmasına, çimentonun hidrasyon reaksiyonunun sağlanması için uygun miktarda karışım suyu kullanılmasına dikkat edilmelidir. Beton tasarımındaki en önemli husus s-ç oranının seçimi olmaktadır. Seçilen çimento dozajının hem radyoaktif geçirimsizlik için yüksek olması hem de rötreten kaynaklanan çatlakların oluşmaması için çimento dozajı 350 kg/m^3 'den büyük ve s/ç oranı 0.50'nin altında olmalıdır [1].



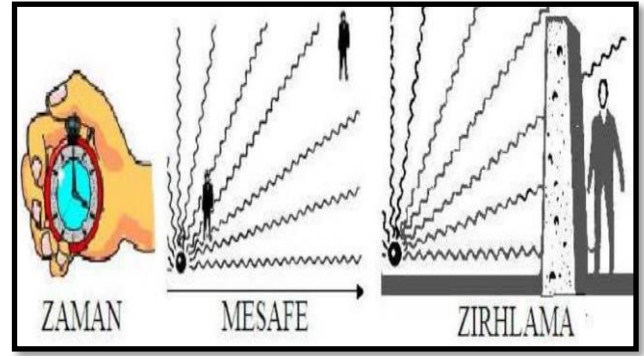
Şekil 22. D_{maks} . 16 mm agrega granülometri eğrisi [1].

Ağır Betonun Yerine Yerleştirilmesi

Bilinen yöntemler karıştırma ve yerleştirme için kullanılabilir. Bununla birlikte mikserin aşırı yüklenmesine genellikle çelik türü ağır agregalar yol açmaktadır. Betonun yerleşmesi vibrasyon ile sağlanmaktadır. Ağır beton içerisinde kullanılacak olan karışım suyunun ise temiz ve berrak olmasına dikkat edilmeli ve içinde kil, yağ, alkali ve asitler bulunmamalıdır [1]. Ağır beton üretim aşamasında mikserin tamamen doldurulmaması gerekmektedir. Aşırı karıştırma iri agreganın dibe çöküp taze betonun ayrışmasına yol açmaktadır. Ağır agregaların, temel sorunlarından biri ayrışma oluşturmalarıdır. Beton tabakası en fazla 25 cm kalınlığında olması gerekmektedir [43]. Ağır betonların iletilmesinin zor olan yapılarda enjeksiyon ya da prepaqt teknikleri uygulanmalıdır [15]. Bu amaçla harçlarda özgül ağırlığı 3.0-3.5 arası olan barit kumu ve yaklaşık 0.8 s-ç oranı kullanılır. Bu yöntem normal beton yerleştirilmesinde de kullanılmaktadır.

Radyasyondan Korunma

Günümüzde radyasyonun insanlar üzerindeki olumsuz etkileri oldukça fazla olduğundan radyasyona olabildiğince az maruz kalınmalıdır. Radyasyondan kaçınılması imkânsız olduğu durumlarda ise birtakım önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu sürecin tamamına radyasyondan korunma denir. Serbest ve dış kaynaklı radyasyon etkisinden kaçınmanın 3 önemli yolu Şekil 23'de gösterilmiştir [23],[29]. Radyasyonun zırhlaması; radyasyonun nasıl oluştuğunu, malzemede nasıl değişiklikler gösterdiğini ve alınması gereken önlemleri inceleyen bir bilim dalıdır.



Şekil 23. Dış radyasyondan korunmanın kuralları [29].

Zaman Kuralı (Time Rule)

Radyasyon yayınının olduğu tehlikeli bir bölgede vücudun maruz kaldığı radyasyon etkisi zamanla doğru orantılıdır, yani bulunulan bölgede ne kadar fazla kalınırsa maruz kalınan doz da o derece artmaktadır. Dolayısıyla böyle bir tehlike durumunda bölgeden acilen uzaklaşılmalı ve bölge tecrit edilmelidir. Tehlikeli hal bitene kadar hiçbir canlının bölgeye girilmesine izin verilmemelidir [23],[29].

Uzaklık Kuralı (Distance Rule)

Radyasyonu oluşturan kaynaktan uzaklaştıkça radyasyonun oluşturabileceği olumsuz etki de azalabilmektedir. Bu nedenle radyasyondan korunmanın en etkili yolu radyasyon kaynağından uzaklaşmaktır [34].

Zırhlama Kuralı (Shielding Rule)

Radyasyon oluşturan merkez ile diğer canlılar arasında, bu etkiyi azaltacak engeller konulması zırhlamadır. Bu engeller ağır betonlar ve kurşun levhalar ile olmaktadır [53].

Radyolojik Olaylar ve Kazalar

Teknolojik gelişmeler ile artan radyoaktif madde kullanımı nükleer kazaların meydana gelmesine neden olabilmektedir. Bilim insanları oluşabilecek nükleer kazaların boyutunu belirlemek için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen ölçeğe göre iki seviye arasında 10 kat önemli olayların olduğu belirlenmiştir.



Şekil 24. Uluslararası nükleer ve radyolojik ölçeği [29].

Uluslararası nükleer ve radyolojik olay ölçeği Şekil 24’de gösterilmiştir. Şekil 24 incelendiğinde radyasyonun çok geniş bir alana etki edebileceği belirlenmiştir. Örnek olarak Ukrayna’da meydana gelen nükleer kaza (Çernobil) çok geniş bir bölgeyi etkilemiştir. Verilebilecek bir diğer örnek ise Japonya’da 2011’de meydana gelen deprem sonrası tsunami oluşması ve Fukushima Daiichi Nükleer Enerji Santrali’nde büyük hasar oluşturmasıdır. Bu nükleer hasar yaklaşık 500 bin kişinin evlerinden olmasına neden olmuştur [29].

Sonuç ve Öneriler

Bu araştırma ile ağır betonlar ve ultra yüksek dayanımlı ağır betonlar üzerine yapılmış son yıllardaki çalışmalar derlenmiştir. Araştırma sonucunda ağır betonlar hakkında genel bilgiler verildikten sonra, bu konu hakkındaki yenilikler ve gelişmeler gözden geçirilmiştir. Çalışmadan çıkarılacak genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Ağır betonda dozaj 350 kg/m^3 ’den fazla ise hidrasyon ısı düşük çimentolar kullanılmalıdır. Ağır betonlarda agreganın ağırlığı nedeniyle ayrışma riski bulunmaktadır. Bunu önlemek için karıştırma süresi olabildiğince az tutulmalı ve agreganın dağılımında ince taneler seçilmelidir

- Ağır betonlar normal betonlara göre oldukça yüksek miktarda radyasyon ışınlarını soğurabilmektedir. Siderit agregalarıyla üretilen ağır betonlarda en iyi ultrases değerleri elde edilmiştir. Kırmataş agregası ile üretilen normal betonların ve barit agregası kullanılarak üretilen ağır betonların ultrases değerlerinin birbirine yakın oldukları gözlenmiştir.
- Ağır betonlarda %40 oranında barit kullanılması, radyasyon güvenliği açısından optimum sonucu vermektedir. Kendiliğinden yerleşen ağır betonun özellikle deprem riski yüksek olan bölgelerde yapı ağırlığının artırılmasıyla beraber yapıya gelecek deprem kuvvetinin artmasına neden olacağından konut tipi yapılarda kullanılmamalıdır.
- Ağır beton üretiminde barit ve serpantin agregalarının kullanılması önerilmektedir.
- Nükleer açıdan tehlikeli yapılarda (nükleer santral vb.) ve radyasyon açısından yalıtım yapılması gereken yapı elemanlarında (hastanelerde radyoaktif zırh gereken kısımlarda) ağır betonların kullanılması insan ve çevre sağlığı açısından büyük önem arz etmektedir.

Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde, ülkemizin bilim insanları radyasyona dirençli beton üretimi üzerine en çok araştırma yapan ülkeler arasındadır. Türkiye bilim insanları tarafından bu konuyla ilgili 2022 yılı sonuna kadar toplam 52 araştırma yapılmış olup, çalışmalarına toplam 2040 atıf almıştır. Radyasyonun etkileri ve korunması için ağır betonlar hakkında daha kapsamlı çalışmalar yapılması ile insan sağlığı ve çevre sağlığı korunabilir.

Kaynaklar

- [1] Z. Topçuoğlu, “Barit Agregası Kullanılarak Kendiliğinden Yerleşen Ağır Beton Üretebilirliğinin Araştırılması,” YL Tezi, Fırat Üniv., FBE, 78s, 2021.
- [2] M. H. Lai, K. J. Wu, X. Cheng, J. C. M. Ho, J. P. Wu, J. H. Chen, A. J. Zhang, “Effect of fillers on the behaviour of heavy-weight concrete made by iron sand,” *Progress in Nuclear Energy*, 332, 127357, May. 2022.
- [3] M.U. Khan, S. Ahmad, A. A. Naqvi, H. J. Al-Gahtani, “Shielding performance of heavy-weight ultra-high-performance concrete against nuclear radiation,” *Progress in Nuclear Energy*, 130, 103550, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103550>
- [4] R. Farokhzad, A. Dadashi, A. Sohrab, “The effect of ferrophosphorus aggregate on physical and mechanical properties of heavy-weight concrete,” *Progress in Nuclear Energy*, 299, 123915, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123915>
- [5] M. O. Azeez, A. Shamsad, U. Salah, M. M. Al-Dulajjan, A. N. Akhtar, “Radiation shielding performance of heavy-weight concrete mixtures,” 284-291, 224, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.077>
- [6] O. Lotfi-Omran, A. Sadrumontazi, I.M. Nikbin, “The influences of maximum aggregate size and cement content on the mechanical and radiation shielding characteristics of heavyweight concrete,” *Progress in Nuclear Energy*, 121, March 2020. 103222. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103222>
- [7] B. Aygün, “Neutron and gamma radiation shielding properties of high-temperature-resistant heavy concretes including chromite and wolframite,” *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 352-359, Jan. 2019. <https://doi.org/10.1080/16878507.2019.1672312>
- [8] A. Ardiansyah, T. Dahlang, H. Heryanto, A. Bidayatul, S. Hassan, S. Abdelmoneim, A. B. David, “Science mapping for concrete composites as radiation shielding: A review,” *Radiation Physics & Chemistry*, Vol.207, 110835., 2023, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110835>

- [9] C. Chen, C. Li, G. Reniers, F. Yang, "Safety and security of oil and gas pipeline transportation: a systematic analysis of research trends and future needs using WoS," *J. Clean. Prod.*, Vol. 279, 123583, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123583>
- [10] M. Ding, H. Zeng, "A bibliometric analysis of research progress in sulfate-rich wastewater pollution control technology," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, Vol. 238, 113626, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113626>
- [11] Z. Pei, S. Chen, L. Ding, J. Liu, X. Cui, F. Li, F. Qiu, "Current perspectives and trend of nanomedicine in cancer: a review and bibliometric analysis," *J. Contr. Release* vol. pp. 352, 211-241. Dec. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2022.10.023>
- [12] K. G. Mahmoud, M. S. Alqahtani, O. L. Tashlykov, V. S. Semenishchev, M. Y. Hanfi, "The influence of heavy metallic wastes on the physical properties and gamma-ray shielding performance of ordinary concrete: Experimental evaluations," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 206 110793, May. 2023.
- [13] M. F. Gashti, S. H. G. Mousavinejad, S. J. Khaleghi, "Evaluation of gamma and neutron radiation shielding properties of the GGBFS based geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 367, 130308, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130308>
- [14] R. Mehrnejad, "Nötron Radyasyona Karşı Zırhlama Amacıyla Karma Lifli Ağır Beton Üretimi," FBE, Atatürk Üniv., Erzurum, Doktora Tezi, 2015.
- [15] E. Bakırhan, "Kurşun Maden Atığı Katkılı Ağır Betonların Radyasyon Soğurma Katsayılarının 662-1460 Kev Enerji Aralığında İncelenmesi," YL Tezi, Gümüşhane Üniv., FBE, Gümüşhane, 2017.
- [16] M. Demirci, "Pirit, Krom ve Magnetit Agregalı Ağır Betonların Mekanik ve Radyasyon Soğurma Özelliklerinin Tayini," YL Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniv., FBE, Rize, 2018.
- [17] M.H. Kharita, S. Yousef, M. AlNassar, "The effect of carbon powder addition on the properties of hematite radiation shielding concrete," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 51, pp. 388-392, March 2009. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.10.002>
- [18] I.M. Nikbin, R. Mohebbi, S. Dezhampahan, S. Mehdipour, R. Mohammadi, T. Nejat, "Gamma ray shielding properties of heavy-weight concrete containing Nano-TiO₂," *Radiat. Phys. Chem.*, Vol. 162, pp. 157-167, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.05.008>
- [19] D. Rezaei Ochbelagh, S. Azimkhani, H. Gasemzadeh Mosavinejad, "Effect of gamma and lead as an additive material on the resistance and strength of concrete," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, No. 6, pp. 2359-2363, Jun. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.03.001>
- [20] İ. Akkurt, H. Akyıldırım, B. Mavi, S. Kılınçarslan, C. Başyigit, "Yüksek fırın curüflü betonların radyasyon soğurma karakteristiklerinin belirlenmesi," *Eng. Sci.*, Vol. 6, No. 4, 2011.
- [21] T. Korkut, A. Karabulut, G. Budak, B. Aygun, O. Gencel, A. Hancerliogullari, "Investigation of neutron shielding properties depending on number of boron toms for colemanite, ulexite and tinal ores by experiments and FLUKA Monte Carlo simulations," *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 70, no.1, pp. 341-345, 2012. <https://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.09.006>
- [22] D. Revuelta, A. Barona, D. Navarro, "Measurement of Properties and of The Resistance to Segregation in Heavyweight, Self-Compacting Barite Concrete," *Materiales de Construcción*, Vol. 59, pp. 31-44, July 2009.
- [23] S.İ. Çakı, "Ağır Betonların Elastisite Modülünün Modellenmesi," S. Demirel Üniv., FBE, Isparta, 2013.
- [24] B. Güreş, "Kahramanmaraş (Şekeroba) Baritinin Ağır Beton Tasarımında Paketleme Modeliyle Değerlendirilmesi," İTÜ, FBE, İstanbul, 2018.
- [25] M. U. Khan, S. Ahmad, A. A. Naqvi, H. J. Al-Gahtani, "Shielding performance of heavy-weight ultra-high-performance concrete against nuclear radiation," *Progress in Nuclear Energy*, Vol.103, 103550, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103550>
- [26] T.A. El-Sayed, "Performance of heavy weight concrete incorporating recycled rice straw ash as radiation shielding material," *Progress in Nuclear Energy*, Vol.135, 103693, May. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103693>
- [27] B. Aygün, E. Şakar, O. Agar, M. I. Sayyed, A. Karabulut, V. P. Singh, "Development of new heavy concretes containing chrome-ore for nuclear radiation shielding applications," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 133, 103645, March 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103645>
- [28] H. S. Gökçe, "Yüksek Kıvama Sahip Barit Agregalı Ağır Betonların Segregasyon Özellikleri ve Γ Işını Soğurma Katsayılarının Belirlenmesi," Doktora Tezi, Ege Üniv., FBE, İzmir, 2018.
- [29] M. Gümüş, "Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılan Polipropilen Lifli Ağır Betonların Γ Işını ve Nötron Soğurma Performansları," YL tezi, Kırıkkale Üniv., FBE, Kırıkkale, 2019.
- [30] D. Erdek "Yüksek kıvamlı barit agregalı ağır betonların radon salınım hızlarının ölçülmesi," YL tezi, Ege Üniv., Nükleer Fizik Yüksek Bölümü, İzmir, 2021.
- [31] H. E. Johns, J. R. Cunningham, "The Physics of Radiology," 4th ed., C. Thomas, 1983. <http://moreauhupet.hopto.org>
- [32] B. T. Price, C. C. Horton, K. T. Spinney, "Radiation Shielding, Pergamon Press," London-NewYork, 1957.
- [33] İ. Akkurt, H. Akyıldırım, A. Calık, O. B. Aydar, N. Uçar, "Gamma Ray Attenuation Coefficient of Microalloyed Stainless Steel," *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 36, pp. 145-149, Jan. 2011. <https://doi.org/10.1007/s13369-010-0013-9>

- [34] D. Kaya, "Normal Beton ve Özel Amaçlı Betonların Γ Radyasyonunu Zırlama Özelliklerinin İncelenmesi," YL Tezi, İTÜ, Enerji Enst., İstanbyl, 2019.
- [35] J. E. Martin, "Physics for Radiation Protection," 2nd Ed., in *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.*, Weinheim, USA, 2006, pp. 84.
- [36] R. G. Jaeger, E. P. Blizard, A. B. Chilton, A.B., M. Grotenhuis, A. Hönl, T. A. Jaeger, H. Eisenlohr, "Engineering Compendium on Radiation Shielding," *Springer-Verlag*, pp. 537, New York, 1968.
- [37] I.I. Bashter, "Calculation of radiation attenuation for shielding concrete," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 24, No. 17, pp. 1389-1401, 1997.
- [38] J. Shapiro, "Radiation Protection," *A Guide for Scientists, Regulators, and Physicians, Fourth Edition*, Harvard University Pres. Cambridge, pp. 688, 1972.
- [39] J. H. Hubbell, "Photon Mass Attenuation and Energy Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV," *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 33, pp. 1269, 1982.
- [40] H. Akyıldırım, "Ağır Betonların Nükleer Radyasyon Zırlama Özelliklerinin Araştırılması," Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniv., FBE, Isparta, 2011.
- [41] K. Arshak, O. Korostynska, "Advanced Materials and Techniques for Radiation Dosimetry," *Artech House*, pp. 220, London, 2006.
- [42] İ.B. Topçu, T. Uygunoğlu, Yapı Malzemesi, Nobel Akademik Yayıncılık, 396s, 2021.
- [43] B. Yılmaz, "Muş Yöresinden Temin Edilen Baritin Kullanımı İle Elde Edilen Ağır Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması," FBE, Fırat Üniversitesi, Elazığ, YL Tezi, 2009.
- [44] İ.B. Topçu, "Properties of heavyweight concrete produced with barite," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 6, pp. 815-822, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01063-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01063-3)
- [45] İ.B. Topçu, A. Uğurlu "Barit ile üretilen ağır betonlar üzerine bir çalışma," *Beton Prefabrikasyon*, vol. 67, pp. 51-57, Tem. 2003.
- [46] Y. Esen, A. Kurt, E. Orhan, "Öğütülmüş Barit İle Üretilen Betonun Basınç Dayanımı ve Fiziksel Özelliklerinin Deneysel Olarak Araştırılması," *Eng. Sci.*, Vol. 6, No. 4, pp. 1281-1290, 2011.
- [47] TS 3440, Betona zararlı etkileri olan su, zemin ve gazların değerlendirilmesi - Prensipler, sınır değerler, su ile zemin numunelerinin alınması ve analizleri, TSE, Ankara, 2019.
- [48] A. Sayyadi, Y. Mohammadi, M. R. Adlparvar, "Mechanical, Durability, and Gamma Ray Shielding Characteristics of Heavyweight Concrete Containing Serpentine Aggregates and Lead Waste Slag," *Advances in Civil Engineering*, pp. 1-11, 7873637, 11. 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/7873637>
- [49] A. Ajourloo, A. Yadolahi, A. Zolfaghari, "Protection against gamma rays with heavy concrete application of lead slag-containing," *Journal of Engineering Geology*, Vol. 9, No. 4, pp. 3193-3206, 2016. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.9.4.3193>
- [50] A. M. Zayed, M. A. Masoud, A. M. Rashad, A. M. El-khayatt, K. Sakr, W. A. Kansouh, M. G. Shahien, "Influence of heavyweight aggregates on the physico-mechanical and radiation attenuation properties of serpentine-based concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 260, 120473, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120473>
- [51] F. Demir, G. Budak, R. Sahin, A. Karabulut, M. Oltulu, A. Un, "Determination of radiation attenuation coefficients of heavyweight and normal-weight concretes containing colemanite and barite for 0.663 MeV c-rays," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38, No. 6, pp. 1274-1278, 2011.
- [52] TS 802 "Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları" TSE, Ankara, Mart 2016.
- [53] İ. Akkurt, C. Başığit, S. Kılınçarslan, B. Mavi, "The shielding of γ -rays by concretes produced with barite," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 1-11, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2004.09.015>