

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RADYASYON ZIRHLAMA AMACIYLA**  
**İŞLEVSEL OLARAK**  
**KADEMELENDİRİLMİŞ ÇİMENTO**  
**ESASLI KOMPOZİTLERİN**  
**GELİŞTİRİLMESİ**

**Burak Ali ILIKSU**

**Ocak, 2023**

**İZMİR**

**RADYASYON ZIRHLAMA AMACIYLA  
İŞLEVSEL OLARAK  
KADEMELENDİRİLMİŞ ÇİMENTO  
ESASLI KOMPOZİTLERİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Yüksek Lisans Programı**

**Burak Ali ILIKSU**

**Ocak, 2023**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**BURAK ALİ ILIKSU** tarafından **DOÇ. DR. ÇAĞLAR YALÇINKAYA** ve **DOÇ. DR. SERDAR AYDIN** yönetiminde hazırlanan “**RADYASYON ZIRHLAMA AMACIYLA İŞLEVSEL OLARAK KADEMELENDİRİLMİŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı veniteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Çağlar YALÇINKAYA

Yönetici

Dr. Öğr. Üyesi

Ahsanollah BEGLARİGALE

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Halit YAZICI

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılardan dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Çağlar YALÇINKAYA'ya ve tez eş danışmanım Doç. Dr. Serdar AYDIN'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm değerli arkadaşlarım Ege Su Barlay'a ve Bayram Tutkun'a teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin temininde yardımcı olan Başer Madencilik'e ve Limak Çimento'ya (Sayın Ebru Sipahioğlu'nun ve Sayın Erdal Sarıtop'un destekleri özelinde) teşekkürü borç bilirim.

Burak Ali ILIKSU

# **RADYASYON ZIRHLAMA AMACIYLA İŞLEVSEL OLARAK KADEMELENDİRİLMİŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

## **ÖZ**

Radyasyon son derece tehlikeli ve halk sağlığını tehdit eden bir enerjidir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte radyasyon ile insanın ilişkisi gün geçtikçe daha da artmıştır. İnşaat sektöründe radyasyon zırhlama amacıyla kompozit malzemelerin kullanım sıklığı artmış, buna paralel olarak beton teknolojisi konusunda yenilikçi çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, iyileştirilmiş mekanik özelliklerin yanı sıra üstün radyasyon zırhlama özelliklerini sağlamak için işlevsel olarak kademelendirilmiş çimento esaslı kompozitleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Tez kapsamında normal harç (NH) numunelerine kıyasla mekanik özellikleri geliştirmek amacıyla ultra yüksek performanslı beton (UYPB) – NH kompozitleri ve UYPB numuneleri üretilmiştir. Her iki karışım da barit agregası kullanılarak üretilmiştir. Islak döküm yöntemiyle taze UYPB ve taze NH üst üste katmanlar halinde dökülmüştür. Çalışmada 40×40×160 mm’lik numunelerin ilk katmanına 5 mm kalınlığında UYPB, orta katmanında 30 mm kalınlığında NH, en üst katmanında 5 mm kalınlığında UYPB bulunmaktadır. İkinci kompozitte ise üst ve alt katmanlarda 10 mm kalınlığında UYPB, orta katmanda 20 mm kalınlığında NH bulunmaktadır. Geliştirilen kompozitlerin UYPB ve NH ile benzer radyasyon soğurma katsayılarına sahip olduğu ve radyasyon zırhlama amacıyla kullanılabileceği ortaya konmuştur. Katmanlardaki UYPB oranının artmasıyla mekanik özellikler önemli oranda artmıştır. Katmanlı karışımların NH’ye benzer radyasyon soğurma performansına ve NH’den daha yüksek mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle optimum çözüm olabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca yapılan maliyet analizine göre katmanlı karışımların UYPB’ye göre düşük maliyetli olması nedeniyle de tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Çimento esaslı kompozit, radyasyon zırhlama, barit agrega, ultra yüksek performanslı beton, işlevsel olarak kademelendirilmiş beton.

# DEVELOPMENT OF FUNCTIONALLY-GRADED CEMENTITIOUS COMPOSITES FOR RADIATION SHIELDING PURPOSES

## ABSTRACT

Radiation is an extremely dangerous energy that threatens public health. With the development of technology, the relationship between radiation and human has increased day by day. The frequency of use of composite materials for radiation shielding in the construction industry has increased, and parallel to this, innovative studies have been carried out on concrete technology. This study aims to develop functionally graded cement-based composites to provide superior radiation shielding properties as well as improved mechanical properties. In the scope of thesis, ultra-high performance concrete (UHPC) – normal mortar (NM) composites and UHPC specimens were produced to improve mechanical properties compared to NM specimens. Both mixtures were produced using barite aggregate. Fresh UHPC and fresh NH were poured in layers on top of each other by the wet casting method. In the study, 40×40×160 mm samples have 5 mm thick UHPC in the first layer, 30 mm thick NH in the middle layer, and 5 mm thick UHPC in the top layer. In the second composite, there is 10 mm thick UYPB in the upper and lower layers and 20 mm thick NH in the middle layer. It has been revealed that the developed composites have similar radiation absorption coefficients with UHPC and NH and can be used for radiation shielding. With the increase in the ratio of UHPC in the layers, mechanical properties significantly increased. It was concluded that layered mixtures could be the optimum solution due to their similar radiation absorption performance and higher mechanical properties compared to NH. In addition, according to the cost analysis, it was concluded that layered composites are preferable because of their lower cost compared to UHPC.

**Keywords:** Cement-based composite, radiation shielding, barite aggregate, ultra high-performance concrete, functionally graded concrete.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                | Sayfa         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....                                                     | ii            |
| TEŞEKKÜR.....                                                                                  | iii           |
| ÖZ .....                                                                                       | iv            |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                              | vi            |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                                         | ix            |
| TABLolar LİSTESİ.....                                                                          | xi            |
| SEMBOLLER LİSTESİ .....                                                                        | xii           |
| KISALTMALAR .....                                                                              | xiii          |
| <br><b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>                                                              | <br><b>1</b>  |
| <br><b>BÖLÜM İKİ - RADYASYON VE RADYASYON ZIRHLAMA.....</b>                                    | <br><b>3</b>  |
| 2.1 Radyasyon .....                                                                            | 3             |
| 2.2 Radyasyon Zırhlamada Kullanılan Malzemeler .....                                           | 5             |
| <br><b>BÖLÜM ÜÇ - AĞIR BETONLAR.....</b>                                                       | <br><b>7</b>  |
| 3.1 Ağır Betonun Karışım Özellikleri .....                                                     | 9             |
| 3.2 Ağır Betonda Kullanılan Agregaların Mekanik Özellikleri .....                              | 10            |
| 3.3 Ağır Agregalı Betonların Radyasyon Zırhlama Özellikleri .....                              | 11            |
| <br><b>BÖLÜM DÖRT - ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLAR VE ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER .....</b> | <br><b>16</b> |

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1 UYPB Genel Özellikleri.....                                               | 16        |
| 4.2 UYPB Hammaddeleri ve Tasarım Esasları .....                               | 17        |
| 4.3 UYPB Mekanik Özellikleri .....                                            | 19        |
| 4.4 UYPB Kullanım Alanları .....                                              | 21        |
| 4.5 UYPB’lerin Radyasyon Zırhlama Özellikleri .....                           | 23        |
| <b>BÖLÜM BEŞ - İŞLEVSEL OLARAK KADEMELENDİRİLMİŞ BETONLAR</b><br>.....        | <b>26</b> |
| <b>BÖLÜM ALTI - LİTERATÜRÜN TARTIŞILMASI</b> .....                            | <b>27</b> |
| <b>BÖLÜM YEDİ - DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....                                    | <b>29</b> |
| 7.1 Genel Bakış .....                                                         | 29        |
| 7.2 Kullanılan Malzemeler .....                                               | 29        |
| 7.3 Karışım Tasarımları.....                                                  | 31        |
| 7.4 Basınç Dayanımı Testi .....                                               | 35        |
| 7.5 Eğilme Dayanımı Testi.....                                                | 36        |
| 7.6 Sertleşmiş Hal Özelliklerinin Belirlenmesi .....                          | 37        |
| 7.7 Radyasyon Soğurma.....                                                    | 38        |
| <b>BÖLÜM SEKİZ - BULGULAR ve TARTIŞMA</b> .....                               | <b>41</b> |
| 8.1 Basınç Dayanımı .....                                                     | 41        |
| 8.2 Eğilme Dayanımı.....                                                      | 44        |
| 8.3 Radyasyon Soğurma Performansı .....                                       | 54        |
| 8.4 Radyasyon Soğurma Performansı ile Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkiler | 59        |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| 8.5 Maliyet Analizi.....        | 61        |
| <b>BÖLÜM DOKUZ - SONUÇ.....</b> | <b>64</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>          | <b>66</b> |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 Dünyadaki Radyasyon Kaynakları .....                                                       | 3  |
| Şekil 4.1 UYPB'lerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Oransal Olarak Karışımları .....            | 18 |
| Şekil 4.2 Basınç Gerilmesi Altında UYPB Davranışları .....                                           | 20 |
| Şekil 7.1 Barit agregasının elek analizi.....                                                        | 30 |
| Şekil 7.2 Tüm numunelere ait kesit görselleri .....                                                  | 32 |
| Şekil 7.3 NH karışım prosedürü.....                                                                  | 33 |
| Şekil 7.4 UYPB karışım prosedürü.....                                                                | 34 |
| Şekil 7.5 Karışımların hazırlanması ve test edilmesi .....                                           | 34 |
| Şekil 7.6 a) Normal harç kesiti b) UYPB kesiti c) 10-20-10 kesiti d) 5-30-5 kesiti..                 | 35 |
| Şekil 7.7 Katmanlara dik ve paralel yükleme .....                                                    | 36 |
| Şekil 7.8 Eğilme dayanımının belirlenmesi .....                                                      | 37 |
| Şekil 7.9 XCOM ana sayfasına kullanılan malzemelerin kimyasal içeriklerinin işlenmesi .....          | 39 |
| Şekil 7.10 XCOM yazılımında kütlece soğurma katsayıları (UYPB karışımı) .....                        | 40 |
| Şekil 8.1 Katmanlara paralel yüklemede 7 ve 28 günlük basınç dayanımları .....                       | 41 |
| Şekil 8.2 Katmanlara dik yüklemede 7 ve 28 günlük basınç dayanımları .....                           | 42 |
| Şekil 8.3 10-20-10 Numunesinin basınç dayanımı deneyi sonrası görünümü.....                          | 43 |
| Şekil 8.4 Katmanlara paralel ve dik kırım durumunda 7 günlük basınç dayanımları                      | 44 |
| Şekil 8.5 Katmanlara paralel ve dik kırım durumunda 28 günlük basınç dayanımları .....               | 44 |
| Şekil 8.6 Paralel yükleme durumunda 7 günlük numunelerin karşılaştırılması.....                      | 45 |
| Şekil 8.7 Dik yükleme durumunda 7 günlük numunelerin karşılaştırılması.....                          | 45 |
| Şekil 8.8 Paralel yükleme durumunda 28 günlük numunelerin karşılaştırılması.....                     | 46 |
| Şekil 8.9 Dik yükleme durumunda 28 günlük numunelerin karşılaştırılması.....                         | 46 |
| Şekil 8.10 Normal harç karışımının paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük eğilme davranışı .....  | 47 |
| Şekil 8.11 Normal harç karışımının paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük eğilme davranışı ..... | 47 |
| Şekil 8.12 UYPB paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük eğilme davranışı ....                      | 48 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 8.13 UYPB paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük eğilme davranışı ..                                   | 48 |
| Şekil 8.14 5-30-5 paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük eğilme davranışı ....                                | 49 |
| Şekil 8.15 5-30-5 paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük eğilme davranışı ..                                 | 49 |
| Şekil 8.16 10-20-10 paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük eğilme davranışı                                   | 50 |
| Şekil 8.17 10-20-10 paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük eğilme davranışı .....                            | 50 |
| Şekil 8.18 Paralel yükleme durumunda 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları.....                                      | 51 |
| Şekil 8.19 Dik yükleme durumunda 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları.....                                          | 51 |
| Şekil 8.20 Paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük eğilme dayanımları .....                                    | 52 |
| Şekil 8.21 Paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük eğilme dayanımları .....                                   | 52 |
| Şekil 8.22 Paralel yükleme durumunda 7 ve 28 günlük numunelerin tokluk değerleri .....                           | 53 |
| Şekil 8.23 Dik yükleme durumunda 7 ve 28 günlük numunelerin tokluk değerleri ..                                  | 53 |
| Şekil 8.24 Paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük numunelerin tokluk değerleri .....                          | 54 |
| Şekil 8.25 Paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük numunelerin tokluk değerleri .....                         | 54 |
| Şekil 8.26 XCOM'dan alınan lineer soğurma katsayıları .....                                                      | 55 |
| Şekil 8.27 Kütlece soğurma katsayıları.....                                                                      | 56 |
| Şekil 8.28 Kütlece soğurma katsayıları.....                                                                      | 56 |
| Şekil 8.29 Ortalama yol değerleri .....                                                                          | 57 |
| Şekil 8.30 Yarı değerli katman değerleri .....                                                                   | 58 |
| Şekil 8.31 Onuncu değerli katman değerleri.....                                                                  | 58 |
| Şekil 8.32 Kütlece soğurma katsayılarının basınç dayanımı ile ilişkisi.....                                      | 59 |
| Şekil 8.33 Kütlece soğurma katsayılarının eğilme dayanımı ile ilişkisi .....                                     | 60 |
| Şekil 8.34 Kütlece soğurma katsayılarının tokluk ile ilişkisi.....                                               | 60 |
| Şekil 8.35 Basınç dayanımının metreküp başına maliyet ile ilişkisi.....                                          | 61 |
| Şekil 8.36 Eğilme dayanımının metreküp başına maliyet ile ilişkisi .....                                         | 62 |
| Şekil 8.37 Tokluk değerlerinin metreküp başına maliyet ile ilişkisi.....                                         | 62 |
| Şekil 8.38 Dayanım ve toklukta azalmanın metreküp başına maliyette azalma ile ilişkisi (dik yükleme durumu)..... | 63 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Tablo 3.1 Ağır Betonlarda Kullanılan Agrega Türleri.....                                       | 8            |
| Tablo 4.1 Normal Dayanımlı Beton, Yüksek Dayanımlı Beton ve UYPB Kompozisyon Özellikleri ..... | 19           |
| Tablo 4.2 Dünyada tamamlanmış UYPB projeleri .....                                             | 22           |
| Tablo 7.1 Kullanılan bağlayıcıların özellikleri .....                                          | 29           |
| Tablo 7.2 Barit agregasının kimyasal kompozisyonu .....                                        | 30           |
| Tablo 7.3 Karışım tasarımları .....                                                            | 33           |
| Tablo 8.1 Karışımların yoğunluk, su emme ve boşluk oranları .....                              | 55           |

## SEMBOLLER LİSTESİ

|                    |                                         |
|--------------------|-----------------------------------------|
| $^{\circ}\text{C}$ | : Santigrat                             |
| $\mu\text{m}$      | : Mikrometre                            |
| $\text{dm}$        | : Desimetre                             |
| $\text{in}$        | : İnç                                   |
| $\text{J}$         | : Joule                                 |
| $\text{keV}$       | : Kiloelektron volt                     |
| $\text{kg}$        | : Kilogram                              |
| $\text{m}$         | : Metre                                 |
| $\text{MeV}$       | : Megaelektron volt                     |
| $\text{MPa}$       | : Megapaskal                            |
| $\text{t}$         | : Saat                                  |
| $X$                | : İyonizan radyasyon içeren ışın demeti |
| $\alpha$           | : Nükleer parçacık türü                 |
| $\beta$            | : Nükleer parçacık türü                 |
| $\gamma$           | : Gama ışını                            |

## KISALTMALAR

|      |                                           |
|------|-------------------------------------------|
| NH   | : Normal Harç                             |
| UYPB | : Ultra Yüksek Performanslı Beton         |
| YPB  | : Yüksek Performanslı Beton               |
| ACI  | : Amerikan Beton Enstitüsü                |
| YDB  | : Yüksek Dayanımlı Beton                  |
| İKB  | : İşlevsel Olarak Kademelendirilmiş Beton |
| LZK  | : Lineer Zayıflama Katsayısı              |
| NDB  | : Normal Dayanımlı Beton                  |
| MFP  | : Ortalama yol değeri                     |
| HVL  | : Yarı değerli katman                     |
| TVL  | : Onuncu değerli katman                   |

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Son birkaç on yılda teknolojiye yaşanan hızlı gelişmeler ile birlikte nükleer teknoloji oldukça önem kazanmıştır. Ayrıca, birçok bakımdan temiz enerji sayılabilecek bir enerji türüdür. Her ne kadar temiz sayılsa da nükleer enerji nedeniyle ortaya çıkan radyasyon ışınları insan hayatını tehdit etmektedir. Radyasyon denilen kavram, süreç içerisinde enerjinin parçacıklar veya dalgalar şeklinde yayılmasını içermektedir (Asal, 2017). Radyasyon ışınları kilometrelerce uzağa basit bir şekilde yayılabilme özelliğine sahiptir. Ayrıca, dünya üzerinde bulunan birçok canlı ve cansız varlık radyasyon üretebilir ve radyasyona maruz kalarak zarar görebilir (Yaren ve Karayılanoglu, 2005).

Radyasyon üretimine, enerji, tıp, silah endüstrisi, nükleer reaktörler ve nükleer araştırma gibi çeşitli araştırma alanları neden olabilmektedir. Bu alanlarda radyoaktif maddeler üretilmekte ve tüketilmekte olduğu için, nükleer teknolojinin ürettiği iyonlaştırıcı radyasyonun canlıların sağlığına tehdit oluşturmaması için özel anti-radyasyon korumasına ihtiyaç vardır (Bozbıyık ve diğer, 2001). Radyasyona karşı önlemler genel olarak iki yol ile alınabilir; i) radyasyon ışınlamayı yapan malzeme veya yöntemlerden kaçınmak ii) radyasyon ışınlamalarını canlı hayatına zarar vermeyecek şekilde soğurucu önlemler almak. Canlılar yüksek dozlara maruz kaldıktan kısa süre sonra ve hemen sonra oluşacak hasara erken etki (ışınlamanın akut etkisi), daha sonraki hasarlara ise kanser, çekilme gibi kısa ömür ve gecikmeli etki (radyasyonun kronik etkileri) olarak bilinen genetik bozukluk adı verilmektedir (Asal, 2017).

Radyasyonun insanlar üzerindeki zararlı etkilerinden korunulabilmesi için yukarıda da bahsedildiği üzere yapı malzemelerinde yeni kompozit malzemelere gereklilik olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle yapılan akademik ve sektör araştırmalarında çimento esaslı kompozitler geliştirilmeye çalışılmaktadır (Akkurt ve diğer., 2012). Teknolojinin gelişmesiyle birlikte modern mühendislik yapıları da karmaşık bir hâl almış ve hizmet biçimleri ile hızla değişmiş, uygulama teknikleri nedeniyle de bağlayıcı malzemenin tek başına sağladığı yük taşıma görevi artık yeterli görülmemektedir (Öztürk, 2021). Üretim kolaylığı, erişilebilirliğin artması ve göreceli olarak düşük maliyet nedeniyle, daha önce başka malzemelerin üstlendiği görevleri

artık beton üstlenmeye başlamıştır. Ayrıca, betonun üstlendiği ek görevlere ek olarak taşıyıcı görevini de sürdürmesi de oldukça büyük bir avantaj olarak sayılabilir. Yüksek performanslı beton (YPB) olarak bilinen dayanım özellikleri oldukça yüksek olan betonlar; yüksek binalarda, köprülerde, deniz yapılarında, nükleer reaktörlerde vb. inşaat projelerinde kullanılmaktadır (Kurt, 2006). Üstün mekanik özellikler sunan bu betonların radyasyon zırhlama açısından da kullanımı son yıllarda revaçta olan bir konudur.

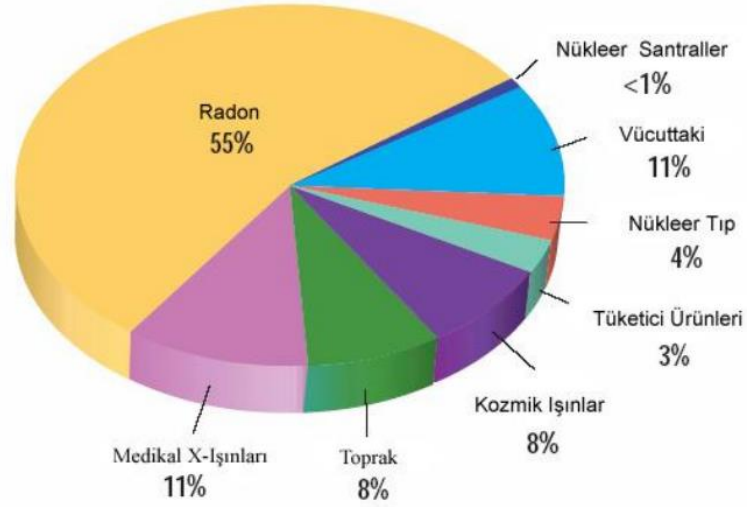
Bu tez çalışmasında özellikle nükleer enerji endüstrisinde hâlihazırda kullanılabilecek olan malzemelere alternatif olması için işlevsel olarak kademelendirilmiş çimento esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesine yönelik bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Radyasyon soğurma kapasitesinin yüksek olduğu bilinen barit agregalı normal harç (NH) ile mekanik özellikleri gelişmiş olan barit agregalı ultra yüksek performanslı beton (UYPB) işlevsel olarak kademelendirilmiştir. NH, UYPB ve işlevsel olarak kademelendirilmiş kompozitler arasındaki mekanik farklılığın ve radyasyon zırhlama performanslarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Numuneler 40×40×160 mm boyutlarındadır. İki çeşit kademelendirme ile 40×40 mm'lik prizma enkesiti doldurulmuştur; i) 5 mm üstte, 5 mm altta UYPB ve 30 mm ortada barit harcı (5-30-5 kompoziti), ii) 10 mm altta, 10 mm üstte UYPB ve 20 mm ortada barit harcı (10-20-10 kompoziti). NH ve UYPB yalın olarak da üretilmiş olup, karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Yedi ve yirmi sekiz günlük su kürü sonrası basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve tokluk değerleri, yoğunluk ve birim hacim ağırlık özellikleri araştırılmıştır. UYPB ile NH'nin yayılma çapları eşitlenmiş, ayrıca iki karışımın zamana bağlı kıvam kaybından faydalanarak katmanların birbirine karışmasına karşı önlem alınmıştır. Bu amaçla kompozitlerin üretimi sırasında her katmanın dökümü arasında 5'er dakika beklenmiştir. İşlevsel olarak kademelendirme işlemi ile mekanik özelliklerin geliştirilmesi, yüksek dayanımla beraber kullanılabilecek barit agregası hacminin artması, çimento kullanımının azalması, daha az UYPB kullanılarak maliyetin azaltılması hedeflenmiştir. Tezde radyasyon soğurma katsayılarının değişimi XCOM programı ile karşılaştırılmıştır.

## BÖLÜM İKİ

### RADYASYON VE RADYASYON ZIRHLAMA

#### 2.1 Radyasyon

Çekirdeklerinde eşit sayıda proton ve nötron bulunmayan atomlar, fazla enerjilerinden kurtulmak, yani atomsal olarak daha kararlı bir yapıya geçmek istemektedirler, dolayısıyla radyonüklidin kararlı bir yapı elde etmek için saldıdığı enerjiye radyasyon denebilir (Gökharman ve diğer., 2016). Başyiğit ve Kaçar, (2006) yaptıkları çalışmada, dünyadaki radyasyon kaynaklarının dağılımı arasında en büyük payın Radon'a ait olduğunu ve bilinenin aksine nükleer santrallerin çok küçük bir payı olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Dünyadaki Radyasyon Kaynakları (Başyiğit ve Kaçar, 2006)

Radyasyon kaynakları genel olarak doğal ve yapay olarak ikiye ayrılabilir. Doğal radyasyon, tanımından da anlaşılacağı üzere doğada ve evrende serbest halde bulunan ve dünyanın oluşumundan beri tüm canlılara etkiyen radyasyon olarak tanımlanabilir. Daha önce de belirtildiği üzere, radyasyondan korunmak için kabaca kaynağın kullanımından vazgeçilmesi veya kaynak etrafında radyasyon soğurucu malzemelerin kullanılması önlemleri alınabilir. Doğal radyasyon için kaynak kullanımından kaçınılması seçeneği doğal olarak söz konusu değildir. Helvacı (2011), doğal

radasyon kaynakları olarak radyoaktif izotopların solunum ve sindirim yoluyla emilmesiyle üretilen radyasyon, kozmik ışınlar, radon gazı, gama radyasyonlarını sıralamıştır.

Bir diğer radyasyon türü olan yapay radyasyon; doğada doğal olarak bulunmayan, insan faaliyetleri ve teknolojik gelişmenin etkisiyle ortaya çıkmış olan radyasyondur. Teknolojik ürünlerden insan yapımı olarak radyasyon kaynağı olanlar; nükleer santraller, duman dedektörleri, bilgisayarlar, nükleer silah testleri ve televizyon, radyolar vb.'dir. Bunlar arasında en büyük radyasyon üretimi tıbbi uygulamalarla olmaktadır (Gökoğlu ve diğer., 2020). Doğal radyasyona maruz kalma bir zamanlar radyasyona maruz kalmanın daha büyük bir oranını oluştururken, teknolojinin gelişmesinin ardından yapay radyasyona maruz kalma giderek daha büyük bir orana sahip olmuştur. Bunun en önde gelen sebebi ise yine tıp teknolojisinde yaşanan gelişmelerdir. Bilgisayarlı tomografi, girişimsel radyoloji ve nükleer tıp uygulamaları, örneğin kanser ve kalp hastalığının tanı ve tedavisinde son yirmi yılda popülerlik kazanmıştır ve bu teknolojilerin tamamı yoğun radyasyon açığa çıkarmaktadır (Gökharman ve diğer., 2016).

Radyasyon yayan cihaz sayısındaki artış ve ozon tabakasının incelmesinin kısa ya da uzun vadede yol açtığı hasar gibi birçok faktör göz önüne alındığında radyasyondan korunmanın önemi bir kez daha anlaşılmaktadır. Radyasyon hasarına karşı korunmak için dikkate alınması gereken üç ana şey vardır. Bunlar zaman, mesafe ve zırhtır (Seven, 2016). Bazı radyonüklidlerin yaydığı radyasyon o kadar güçlüdür ki, kilometrelerce uzaktan görülmese bile radyasyonu etkileyebilir (Selağzı, 2019). Yazar, bu kadar güçlü radyoaktif maddelerin etkilerinden ancak perdeleme ile korunabileceğini belirtmiştir.

Daha önce de belirtildiği gibi son zamanlarda betondan yalnızca yeterli mekanik özellikleri sağlamasından ziyade diğer malzemelerin görevlerini de üstlenmesi beklenmektedir. Bu alanlardan biri de radyasyon zırhlaması olarak sayılabilir. Özellikle yapay radyasyon kaynaklarının etrafında zırhlama için beton kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Radyasyon zırhlamasındaki en etkin yöntem ise, genellikle tek bir malzeme yerine birden çok malzemenin bir kombinasyonunu kullanarak sağlanabilmektedir (Yıldırım, 2018). Yukarıda da açıklandığı üzere

radasyon doğal ve yapay olarak farklı tiplerde olabilmektedir ve bu farklı tipteki radyasyonun etkileri de farklıdır. Radyasyon zırhlama amacı olan tasarımların gövdesini meydana getirecek yapı malzemelerinin seçimi, korunacak radyoaktif malzemedan yayılan radyasyonun tipine bağılı olarak değişiklik göstermektedir. Radyasyon lokal olarak atomik seviyede etki etmektedir. Radyasyon genellikle atomları iyonize eder veya yer değiştirir ve bir arayer atomu oluşturarak içi boş bir kafes köşesi oluşturmaktadır (Başyigit ve Kaçar, 2006).

## **2.2 Radyasyon Zırhlamada Kullanılan Malzemeler**

İnsanların iyonlaştırıcı radyasyonla karşılaşma ihtimalinin yüksek olduğu alanlarda, radyasyon maruziyetini azaltmak için özellikle koruyucu malzemelerle koruma sağlanması gerekmektedir. Zırhlama malzemeleri genel olarak kurşun, yüksek yoğunluklu beton vb. gibi ağır materyallerden oluşmaktadır (Rwashidi, 2017). Geleneksel zırhlama malzemelerinin yanı sıra çeşitli kompozit zırhlama malzemeleri de her geçen gün daha kullanışlı hale gelmektedir. Radyasyon zırhlama malzemeleri, her uygulama için dikkate alınması gereken birkaç önemli parametreye sahiptir. Maruziyete neden olan radyasyonun zayıflaması, radyasyon koruyucu malzeme ile etkileşime girdiğinde meydana gelmektedir. Bu nedenle, radyasyondaki zayıflama seviyesi, gelen radyasyonun enerjisine bağılıdır. Atom numarası, yoğunluk ve kalınlık ise perdeleme malzemesinin radyasyondan korunma özelliklerini belirleyen diğer önemli parametrelerdir (Sürücü, 2021).

Radyasyon zırhlamada kullanılan çok çeşitli malzeme bulunmaktadır. Genel anlamda radyasyon zırh malzemelerini gama radyasyonu zırh malzemeleri, nötron zırh malzemeleri ve beta radyasyonu zırh malzemeleri olarak üç grupta toplamak mümkündür (Akkaş, 2015). Yazar, gama zırhı için kurşun, demir, tungsten ve seyreltilmiş uranyum; nötron zırhı için su, polietilen, grafit, beton ve bor katkılı malzemeler; beta zırhı için ise atom numarası düşük olan farklı birçok malzeme seçilebileceğini belirtmiştir.

Radyasyon perdeleme malzemesi olarak çeşitli yöntemler kullanılsa da kurşun levhalar ve beton en etkili yöntemlerdir (Bakırhan, 2017). Yazar, kurşun levhaların yüksek maliyeti, sınırlı şekillendirilebilirliği ve malzemenin bakım zorlukları

nedeniyle beton řu anda bu konuda en uygun fiyatlı malzeme olarak daha fazla tercih edilmekte olduđunu belirtmiřtir. Kurřun (Pb) yumuřak, toksik, iřlenmesi kolay, iletkenliđi dűřűk ve kararlı elementler arasında en yűksek atom numarasına sahip ağır bir metaldir ve az miktarda antimon veya diđer metallerle alařım yapması sađlandığında sertlik arttırılabilir (Uzun, 2021). Demirin, űzellikle yűksek enerjili proton hızlandırıcılarda, kalınlık sınırlamalarının olduđu yerlerde iyi bir zırh malzemesi olabileceđi űne sűrűlműřtir (Ekinci, 2019). Yazar, demirin toprak ve betondan daha iyi bir zırh malzemesi olduđunu belirtmiřtir. Ancak demirin dűřűk enerjili nűtronlar için koruyucu malzeme olarak kullanılması ise űnerilmemektedir (Sarıyer ve Kűer, 2015). Yazarlar, elastik olmayan çarpıřmalarla yűksek enerjili nűtronları yavaşlatmak için kullanılan demirin 1 MeV'nin altındaki nűtron enerjileri ile űnemli nűtron yakalama reaksiyonları olmadıđı için geçirgen bir űzellik sergileyebileyeceđini belirtmiřlerdir. Tungsten de yűksek atom numarasına sahip olan bir metal olduđu için gama ıřınlarının zırhlanmasında rahatlıkla kullanılabilir (Bűyűk, 2013). Yazar, tungstenin iřlenmemiř formdaki kırılğan yapı, uygulamalarda dezavantajlı olduđunu belirtmiřtir.

Uranyum ve bileřiklerinin radyasyon zırhlama alanında hem potansiyel hem de nűkleer yakıt, radyasyon perdeleme ve kinetik enerji penetratűrleri gibi uygulamalı birçok kullanımı vardır (Clark ve diđer., 2000). Ancak yazarlar uranyum son derece pahalı bir malzeme olması nedeniyle inřaat sektűrűnde pek sık tercih edilememekte olduđunu belirtmiřlerdir. Uranyum, elikten biraz daha yumuřaktır ve ince bűlűnműř halde bulunduđunda sođuk su ile reaksiyona girmektedir. Havada kolayca oksitlenebildiđi için dođada esas olarak oksitlenmiř halde bulunmaktadır (Bleise ve diđer., 2003).

Radyasyon zırhlamak için daha űnce anlatılan yűntem ve metotlara ek olarak beton da kullanılabilir (Ekinci, 2019). űzellikle ağır betonlar radyasyon zırhlamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu konuyla ilgili detaylı bilgi bir sonraki bűlűmde sunulmuřtur.

## BÖLÜM ÜÇ

### AĞIR BETONLAR

Beton; Çimento, iri agrega, ince agrega ve suyun kimyasal ve mineral katkıları ilaveli veya ilavesiz karıştırılması ve çimentonun hidratasyonu ile gerekli özelliklerini kazanmasıyla oluşan bir malzemedir (Türkel ve Tosun, 2022). Betonun son ürün şeklindeki imalinde çimento, agrega, su ve katkıları kullanılmaktadır. Eğer metreküp cinsinden bir ölçüm yapılırsa beton, dünyanın en ucuz yapı malzemesidir (Eren, 2011). Betonlar türlerine göre birçok sınıfa ayrılabilirler. Bunlar;

- Standart beton (EMC sınıfı),
- Zayıf beton (kaba, alt temel, düşük dereceli),
- Yüksek dayanımlı beton (baraj tüneli),
- Hafif beton ( $0,7-2,0 \text{ kg/dm}^3$ ),
- Ağır beton ( $2,8-5,0 \text{ kg/dm}^3$ ),
- Düz beton (çimento kumu),
- Püskürtme beton (püskürtme beton),
- Sülfata dayanıklı beton,
- Dona dayanıklı beton,
- Yol betonu,
- Su geçirmez beton,
- Deniz sualtı betonu,
- Renkli beton,
- Sıvı dökülen beton,
- Fiber beton (çelik, polipropilen),
- Beton perlit beton,
- Kendiliğinden yerleşen ve sıkışan beton,

- Geçirgen gözenekli beton (Doğan, 2020).

Betonların kendi aralarında yoğunluklarına göre üç temel gruba ayrılmaları mümkündür (normal, hafif ve ağır beton). Doğal veya yapay agregalardan yapılan ve susuz yoğunluğu  $2800 \text{ kg/m}^3$ 'ten fazla olan betona ağır beton adı verilmektedir. Ağır betonun ilk kullanım alanı devrilme tehlikesi olan yapılar için dengeleme desteği sağlamasıdır (Yılmaz, 2009). Daha sonra 1950'lerde ve 1960'larda, Birleşik Krallık ve ABD'deki nükleer enerji endüstrilerinin büyümesiyle birlikte gelişmiştir. Nükleer enerjinin gelişmesiyle birlikte bu alanlarda kullanılan ekipmanlarda ağır beton, bazı cisimlerin içinden geçebilen ve insanlara zararlı olan  $X, \alpha, \beta$  ve ışınlarına karşı koruyucu kalkan olarak kullanılmıştır. Radyasyon kalkanı olarak kullanılan ağır beton, karışım ve hidratasyon suyunda hafif elementler ve agregasında ağır elementler içerir (Karaca, 2022).

Tablo 3.1 Ağır Betonlarda Kullanılan Agregalar Türleri (Karaca, 2022)

| Agrega Türü              | Özgül Ağırlık | Kimyasal Kompozisyon                        | Betonun Birim Hacim Ağırlığı ( $\text{kg/m}^3$ ) | Kaynak       |
|--------------------------|---------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------|
| Geotit                   | 3,5-3,7       | $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$   | 2100-2250                                        | Doğal        |
| Limonit                  | 3,4-4,0       | $\text{Fe}_2\text{O}_3$                     | 2100-2400                                        | Doğal        |
| Magnetit                 | 4,2-5,2       | $\text{Fe}_3\text{O}_4$                     | 2400-3050                                        | Doğal        |
| Barit                    | 4,0-4,6       | $\text{BaSO}_4$                             | 2300-2550                                        | Doğal        |
| İlmenit                  | 4,3-4,8       | $\text{FeTiO}_3$                            | 2550-2700                                        | Doğal        |
| Hematit                  | 4,9-5,3       | $\text{Fe}_2\text{O}_3$                     | 2900-3200                                        | Doğal        |
| Ferrofosfor              | 5,8-6,8       | $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{P}_2\text{O}_3$ | 3200-4150                                        | Sentetik     |
| Demir-çelik parçacıkları | 6,2-7,8       | Fe                                          | 3700-4650                                        | Sanayi atığı |

Yukarıdaki tabloda (Tablo 3.1) sıralanan ağır betonlar günümüzde oldukça farklı alanlarda kullanılmaktadır. Bunlar; radyoaktif maddelerin muhafazasında kullanılan ön gerilmeli beton reaktör siloları, köprülerin ayakları, beton ağırlığı olan baraj gövdeleri, askeri mühimmat depoları, istinat duvarları, su altı petrol ve gaz boru hatları, nükleer enerji santralleri, batırma tüp tüneller, hastanelerin ışın tedavi ve radyografi tesisleridir (Karaca, 2022).

### 3.1 Ağır Betonun Karışım Özellikleri

Ağır betonlarda genel olarak ağır agregalar kullanılmaktadır. Birim hacim ağırlıkları  $3000 \text{ kg/m}^3$ 'ten daha fazla olan agregalar TS EN 1097-6'ya (TS, 2013) göre ağır agrega sınıfına konulmuştur. Ağır agregalar ise kendi aralarında doğal ve yapay agregalar olarak iki sınıfa ayrılmışlardır. Doğal agregalar barit, magnetit, hematit, limonit, geotit, ilmenit, viterit iken; yapay agregalar demir parçaları, ferrosilikon ve ferrofosfordur (Özalp, 2006). Farklı agregalarla üretilen ağır betonların birim hacim ağırlıkları da değişmektedir; manyetit ile üretilen bir ağır betonda BHA  $3500 \text{ kg/m}^3$  civarında iken, geotit ile üretilen ağır betonlarda ise BHA  $3000 \text{ kg/m}^3$ , lepidokrosit ile üretilmiş ağır betonlarda BHA  $3700 \text{ kg/m}^3$ , witeritte bu değer  $2450 \text{ kg/m}^3$ , ferrosilikonda bu değer  $5000 \text{ kg/m}^3$ 'e kadar yükselebilmektedir (Alpaslan, 2022).

Agregalar da kendi aralarında farklı alt gruplara ayrılabilirler ve TS EN 206'ya göre (TS, 2014) yoğunluğu  $3,00$ 'den büyük olanlar ağır agrega olarak nitelendirilmektedir. Genel bir bilgi olarak ağır betonlarda kullanılabilecek agregalar hakkındaki detaylı bilgiler ASTM C 637 (ASTM, 2003) ve ASTM C 638'de (ASTM, 2002) verilmektedir. Belirli standartlara uyum sağlayan ve ağır beton üretiminde kullanılan ağır agregaların seçimi, bileşimi, üretimi ve yerleşimi, geleneksel betona kıyasla farklı prosedürler içermektedir (Özen ve diğer., 2013). Yazarlar ayrıca bu agregaların üretiminde çimento ile bağ yapabilmesi için temiz kullanım, uygun şekil gibi birçok konuda agregaların kütlelerinin farklı olması nedeniyle gevşeme veya çökme görülebilmesi ihtimallerine karşı daha dikkatli olunması gerektiğini belirtmişlerdir. Tercih edilen agreganın kalitesi taze betonda segregasyona neden olmayacak ve sertleşmiş betonun boşluk oranı en aza indirilecek şekilde seçilmelidir (Özturan, 2013). Taze betonda gerekli olan en yüksek birim ağırlığı sağlamak ve ayrışmayı önlemek için, ince ve iri agregalar yüksek birim ağırlığa sahip kaya ve mineralleri içermelidir. Toz hâline getirilmiş agregaların geometrik yapısı genellikle düzensiz ve yüzeyleri çok pürüzlüdür, betona istenilen kıvamı vermek için kumun inceliği artırılmalı ve çimento dozajı  $350 \text{ kg/m}^3$ 'ten fazla olmalıdır. Süperakışkanlaştırıcıların kullanımı ile istenilen süneklik, su/çimento oranı  $0,40$ 'ın altında, boşluk oranı ve çatlama riski en düşük beton üretimi mümkündür (Bakırhan, 2017).

### 3.2 Ağır Betonda Kullanılan Agregaların Mekanik Özellikleri

Ağır betonlarda kullanılacak olan agregalardan öncelikle beklenen en temel özellik yoğunluk değerinin 3,00'dan büyük olmasıdır (TS, 2014). Dolayısıyla ağır agrega kullanılan betonun da yoğunluğu bu şekilde yükseltilebilecektir. Agregalarda aranan diğer özellikler ise; yüksek dayanım, yüksek aşınma direnci, çimento hamuruna yüksek aderans ve donatı dayanıklılığıdır (Farokhzad ve diğer., 2021). Ağır beton; doğal veya suni agrega kullanılarak üretilen ve etüv kurusu ağırlığı 2600 kg/m<sup>3</sup>'den fazla olan beton olarak tanımlanmaktadır (Yavaş, 2018). Ağır beton üretiminde ağır kristal, manyetit, ilmenit, hematit ve limonit gibi doğal ağır agregalar veya ferrosilikon, ferrosilikon ve demir pirit gibi yapay ağır agregalar kullanılır (Gümüş ve diğer., 2020). Barit, (BaSO<sub>4</sub>) baryum sülfattan oluşan bir mineraldir. Baritin içerdiği sülfat oldukça stabildir ve betona zarar vermez. Bu yüksek dayanımlı kayaç, Japonya'da ağır beton üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kaçar, 2006). Siderit ise özgül yoğunluğu 3800 kg/m<sup>3</sup> olan FeCO<sub>3</sub> içeren yoğun bir demir cevheridir.

Agregalar, kullanıldıkları betonun mekanik özelliklerini etkileyebilirler. Ağır beton imalatında kullanılacak olan agregalarda aranan ilk mekanik özellik basınç dayanımıdır. Yüksek kaliteli beton üretmek için kullanılan agreganın basınç dayanımı 100 MPa'dan fazla olmalıdır (Usta, 2012). Agregaların kabul edilebilir olmaları için çatlak, kusur ve yabancı kirlilik içermemeleri gerekir. Diğer bir deyişle ağır agregalar, donma-çözülme, ıslanma-kuruma, termal soğutma gibi olumsuz çevresel etkilere karşı oldukça dayanıklı agregalardır (Gürsel ve Erenson, 2017). Yazarlar, bu özelliklere sahip olmayan agregalar zayıf olarak kabul edildiğini ve ağır beton kullanımında kullanılamayacağını belirtmişlerdir.

Ağır betonların sıklıkla kullanıldığı yüksek trafik yükü gibi dinamik darbelere maruz kalan yollarda kullanılan agregalar için aşınma direnci önemlidir (Akkoç, 2002). Agreganın çimento pastası ile yaptığı aderans, çekme mukavemeti açısından basınç mukavemetinden daha etkilidir (Gürsel ve Erenson, 2017). Yazarlar, köşeli agrega ile çimento hamuru arasındaki aderansın, ince agregadan daha fazla olduğunu ve matris ile temas eden yüzey ne kadar büyük olursa, aderansın o kadar güçlü olacağını belirtmişlerdir.

### 3.3 Ağır Agregalı Betonların Radyasyon Zırhlama Özellikleri

Normal betondan yapılmış radyasyondan korunma perdelerinin kalınlığı büyüktür. Buna karşın ağır beton, yüksek birim ağırlığı nedeniyle duvar kalınlığını azaltmasına izin verdiği için çok önemli bir yere sahip olmuştur. Betonun yoğunluğunu artırmak, radyoaktif ışınlarla karşı direncini artırır (Gümüş ve diğer., 2020). Yazarlar, ağır beton ile normal betonu ayıran özelliğin kullanılan ağır agrega nedeniyle birim hacim ağırlığının artması ve dolayısıyla ağır betonun karışımında bulunan sudaki hidrojen ve oksijen atomları sayesinde düşük enerjili bir nötron ışını tutmakta etkili olduğunu belirtmişlerdir. Kullanılan ağır agrega sadece gama ışınlarını ve X ışınlarını değil, aynı zamanda  $\alpha$ ,  $\beta$  ve nötron parçacıklarını da bastırabilmektedir (Sevinç, 2011). Yukarıdakilerin tümü göz önüne alındığında, ağır betonun radyasyona karşı mükemmel bir kalkan görevi gördüğü çıkarımı yapılabilmektedir. Ağır beton, dünyada ve Türkiye'de uzun süredir kullanılmaktadır, ancak ilk kullanımı, kayma ve devrilmeye dayanacak şekilde tasarlanmış yapılara güvenlik sağlamak amacıyla olmuştur. Ancak nükleer enerjinin gelişimine eşlik eden nükleer ayrışmadan kaynaklanan  $\alpha$ ,  $\beta$ , nötron parçacıkları, gama ışınları ve X ışınlarının olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için radyasyonun etkilerine karşı somut bir zırhlama elemanı olduğu unutulmamalıdır.

Betonun radyasyona karşı en iyi koruma olduğu bilinmektedir (Gümüş, 2019). Daungwilailuk ve diğer. (2022), çalışmalarında gama ve nötron radyasyonu korumalarına karşı barit beton kullanımlarını incelemişlerdir. Çalışmada mineraller, barit ve çelik içeren betonun gama ışını ve hızlı nötron radyasyonuna karşı korunmadaki performansı analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda yüksek yoğunluklu numunelerin, foton enerjisini düşük yoğunluklu numunelerden daha etkili bir şekilde soğurduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar ayrıca doğrusal zayıflama katsayılarının artan foton enerjisi ile azaldığını göstermiştir. Ayrıca LZK'nın 662 keV'de büyük olduğu tespit edilmiştir. Sharifi ve diğer. (2013) ise çalışmasında barit, serpantin ve çelik-manyetit betonlar için zırhlama özelliklerinin karşılaştırılmasını sağlamışlardır. Zırhlama özellikleri 511, 662 ve 1332 keV gama ışını enerjilerinde incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda barit agrega kullanılan ağır betonda zırhlama özelliğinin sıradan ağır betona kıyasla daha gelişmiş olduğu tespit edilmiştir. Farklı bir çalışmada

ise agregata ve hematit katkılı serpantin bazlı betonların radyasyon koruyucu özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu betonların hızlı nötronların ve gama ışınlarını koruma özellikleri, kontrol beton ile kıyaslanmış ve betonların, nötron ve gama ışını zayıflama katsayıları  $\Sigma_R(E_n)$  ve  $\mu(E_\gamma)$ , farklı enerjilerdeki gevşeme uzunluğu ( $\lambda$ ) ve yarı değer uzunluğu (HVL) parametreleri belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda %50 barit katkısının hızlı nötronların ve gama ışınlarının korunmasını arttırmada en iyi oranı verdiği tespit edilmiştir (Masoud ve diğer., 2020).

Yapılan bir çalışmada perlit ve pomza agregalı polimer betonların zırhlama özelliklerinin araştırılması amaçlanmış ve polyester reçineyle hacimce %0, 15, 30 ve %45 oralarında karıştırılan perlit ve pomza agregaların radyasyon zırhlama konusundaki performanslarının ölçülmesi sağlanmıştır. Araştırma hem teorik hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Polimer betonun gama ışınlarının etkisi altındaki anti-radyasyon özellikleri  $^{60}\text{Co}$  ve  $^{152}\text{Eu}$  radyasyon kaynakları kullanılarak deneysel olarak hesaplanmış ve teorik olarak XCOM programı kullanılarak her bir polimer beton numunesinin radyasyon zayıflama katsayısına karar verilmiştir. Son olarak deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler ile teorik hesaplamalar arasındaki ilişki karşılaştırılmış ve elde edilen bilgilerin birbiriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır (Kaplan ve Özel, 2021). Bir başka çalışmada ise yine zırhlama özelliklerinin belirlenebilmesi için barit agregalı ağır betonlar seçilmiştir. Bu çalışmada belirli oranlarda barit ve düzenli agregata kullanılarak C20, C30 ve C40 dayanım sınıflarında üç farklı beton serisi üretilmiştir. Elde edilen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri ile radyasyon absorpsiyon katsayıları belirlenmiştir. Beton bileşiminin beton mukavemeti ve lineer absorpsiyon katsayısındaki değişiklikleri ve ayrıca agregadaki barit miktarındaki değişiklikleri incelenmiş ve bunların değişme hızı istatistiksel olarak tespit edilmiştir. Araştırma sonucunda barit agregata kullanımının karışımdaki barit oranı arttıkça lineer absorpsiyon katsayısının da arttığı, fiziksel ve mekanik mukavemet değiştiği görülmüştür (Kılınçarslan ve diğer., 2007). Gündüz ve Kalkan ise çalışmalarında diatomit agregaların çimento esaslı hafif harç özellikleri üzerinde ne gibi etkileri olduğunu araştırmıştır. Bu çalışmada, ana bileşen olarak yanmamış diatomitli toprak agregası içeren hafif harç numuneleri üzerinde bir dizi deneysel ve teknik inceleme yapılmış ve analiz sonuçları incelenmiştir. Ayrıca diatomitli toprak agregata boyutunun değiştirilmesinin hafif harç özelliklerine etkisi

sayısal olarak da incelenmiştir. Çalışmada diyatomit agreganın özellikle de sismik hız değerlerinde belirgin bir farklılık meydana getirdiği görülmüştür (Gündüz ve Kalkan, 2017). Ülkemizde kullanılan bazı inşaat malzemelerinin radyasyon geçirme katsayılarının ölçümlendiği farklı bir çalışmada PVC (polivinil klorür), Al bağlantı elemanları, çatı kaplama malzemeleri (çatı levhaları), duvar kâğıdı, alçıpan (vinil krom), zımpara kâğıdı, krom levhalar, laminat parke, fayans, silikon mantar, yağlı boya ve galvaniz sac, ahşap, yalıtım levhası, duralit, tuğla, gaz beton (Ytong), MDF ve andezit kaplama gibi malzemeler üzerinde incelemeler yapılmıştır. Hammaddelerin penetrasyon faktörü, dar giriş geometrisi kullanılarak ölçülmüştür. Deneyde, sayma sistemi olarak radyoaktif kaynak Am-241 (yoğunluk 100 mCi) ve EDXRF (enerjiyle ayrılmış X-ışını floresan) spektroskopisinden elde edilen 59,5 keV enerjili fotonlar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların radyasyon güvenliğine katkıda bulunacağı düşünülmektedir (Çoban ve diğer., 2014).

Barit agregalı betonların radyasyon absorpsiyon özelliklerinin araştırıldığı başka bir çalışmada, barit agrega kullanılan ağır betonun absorpsiyon özellikleri ve betonun radyasyon kalkanına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, üç farklı tane boyutunda baritten oluşan bir beton serisinde, 5-22 mm tanecik grubunun iri agregası sabit tutulmuştur ancak ve 0-5 tane grubunun iri agregası taş unu ile değiştirilmiştir. Bağlayıcı miktarı  $270 \text{ kg/m}^3$  ve su/çimento oranları 0,46 ve 0,50 olan seçilmiş karışımlarla işlenebilirliği sağlamak için %1,5 bağlayıcı yeni nesil yüksek performanslı su azaltıcı ajan kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde radyasyon absorpsiyon katsayıları, birim ağırlıklar, ultrasonik hızlar ve basınç dayanımı testleri yapılarak betonun özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, üretilen numunelerde taş unu miktarının azalmasıyla betonun absorpsiyonu azalırken birim ağırlığın artma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Buna ek olarak barit betonun mukavemetinin istenilen değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir (Ünal ve diğer., 2016).

Barit, 2.5-3.5 sertliğe ve  $3.9-4.6 \text{ kg/dm}^3$  özgül ağırlığa sahip, erime noktası  $1580^\circ\text{C}$ , kimyasal bileşimi  $\text{BaSO}_4$  formunda olup %65.7 BaO, %34.30  $\text{SO}_3$  içeren, ve metalik olmayan minerallerin en ağırıdır (Coşkun, 2010). Barit ilavesiyle yapılan ağır beton, gama radyasyonunu absorbe etme özelliğinden dolayı nükleer santrallerde büyük miktarlarda kullanılmaya başlanmıştır (Bouali ve diğer., 2020). Yazarlar, nükleer santrallerde kullanılan ve ağır beton yapılara eklenen baritin özgül ağırlığının en az 4

g/cm<sup>3</sup> ve kükürt mineralleri içermemesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Geleneksel betonlara kıyasla barit agregalı beton; düşük ortalama büzülme, yüksek aşınma direncine, %50 kadar daha yüksek ortalama birim kütle ve daha düşük donma-çözülme direncine sahiptir (Çullu ve Külekçi, 2019). Isıl iletkenlik, birim ağırlığa ve nem içeriğine bağlı olarak barit agregalı betonlarda değişiklik gösterir, ancak genellikle geleneksel betondan daha yüksektir (Coşkun, 2010). Belirli bir beton kıvamı için gereken nem değeri, ağır doğal agregalar kullanıldığında geleneksel betonun nem değerinden önemli ölçüde farklı değildir (Kılınçarslan ve diğer., 2011). Yazarlar, aynı su/çimento oranı uygulandığında barit agregalı betonun işlenebilirliği konvansiyonel betondan daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Yapılan çalışmalarda radyasyon önleyici barit agregalarla yapılan ağır betonun elastisite modülü, geleneksel agregalı betona göre daha yüksek bulunmasına rağmen, barit agrega kullanımı betonun ultrasonik hızını veya Schmidt sertlik değerlerini etkilemediği görülmüştür (Özturan, 2013). Yazar, barit agregalı betonun  $\gamma$ -ışını absorpsiyon katsayısının malzemeye ve karışım oranlarına göre değişimi birçok araştırmacı tarafından araştırıldığını ve  $\gamma$ -ışını absorpsiyon katsayısının betonun kütlesi ile doğrudan arttığını belirtmiştir.

Akkurt ve diğer. (2006), normal agrega içeren, farklı gradasyonlarda barit agregası içeren ve normal agrega ile barit agregası içeren 5 farklı karışım serisi hazırlamıştır. Bu karışımların deneysel yolla ve XCOM programı yardımıyla lineer zayıflama katsayılarını (LZK) belirlemiştir. Deneyde 0,66 MeV ve 1,33 MeV foton yayan kaynaklar kullanılmıştır. Gama ışınları 2,4 ve 6 cm'lik kalınlığa sahip hedefe gönderilmiştir ve Lambert yasası ile LZK'ları hesaplanmıştır. Yapılan deneyler ve XCOM sonuçlarına bakıldığında, barit agregasının radyasyon zırhlama aracı olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Akkurt ve El-Khayatt, (2013) %0, %50 ve %100 barit agregası içeren karışımların nötron ve gama ışını zayıflatma katsayılarını NXcom programı yardımıyla hesaplamıştır. Karışımındaki barit oranı arttıkça gama ışını zayıflatma katsayısı da yükselirken, nötron ışını zayıflatma katsayısı azalmıştır. Araştırmacılar, radyasyon geçirimsizliği açısından optimum baritli ağır betonun yoğunluğunu 3,02 g/cm<sup>3</sup> olarak hesaplamışlardır.

Barit kullanımının artması betonun basınç dayanımında ve eğilme dayanımında düşüşe sebep olmaktadır (Badarloo, Lehner ve Doost, 2022). Betonun mekanik özelliklerini koruyarak radyasyon geçirimsizlik özelliği sağlamak amacıyla UYPB ile normal harcın kademelendirilmiş olarak kullanılması düşünülmüştür. Hossain, Islam, Quasem ve Zaman, (2010) poliboron (PB) ve boraks içeren betonu (PX) nötron zırhlama özelliklerini belirlemek amacıyla iki katman halinde kullanmıştır. PB, BX, PB-PX (katmanlı) karışımları karşılaştırıldığında kademelendirilmiş betonun nötron geçirimsizlik performansının en iyi olduğu belirlenmiştir (Hossain, Islam, Quasem ve Zaman, 2010). Ayrıca kullanılan barit agregası iri gradasyonluysa ve su/bağlayıcı oranı yüksekse betonda segregasyon riski oluşmaktadır



## **BÖLÜM DÖRT**

### **ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLAR VE ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER**

#### **4.1 UYPB Genel Özellikleri**

Beton, agrega, çimento, su ve gerekirse bazı katkı maddeleri kullanılarak üretilen, başlangıçta plastik kıvamında olup zamanla sertleşen ve bu karışım haliyle yapı malzemesi olarak kullanılan kompozit bir malzemedir. Ultra yüksek performanslı betonlar (UYPB) ise bugün kullanımı hızla artan bir yapı malzemesidir ve özel betonlar arasında yer almaktadır (Doğan, 2017). Beton teknolojisinin gelişmesi ve dünyada betona olan talebin daha başka bir yöne gitmesi nedeniyle araştırmacılar da bu talepleri karşılamak üzere üstün mekanik özelliklere ve üstün durabilite özelliklerine sahip UYPB'yi geliştirmişlerdir. UYPB, 150 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımına, çok yoğun bir matrise ve ek herhangi bir işlem görmeden dayanım alma özelliğine sahip betonlar olarak da tanımlanabilir (Abbas ve diğer., 2016).

UYPB'ler genellikle çelik lif içeren ve geleneksel lifli betonlardan daha fazla bağlayıcının yer aldığı çimento esaslı bir karışımlardır. Bu ek malzemeler uçucu kül, silika dumanı, yüksek fırın granülü vb.'dir. Pek çok yönden avantajlı olarak bulunan bu malzemelerin temel tasarım ilkelerinin mekanik performansı ile dayanımı artırmaktadır. Yapılan çalışmalarda mikro yapının iyileştirilmesi ile matrise eklenen çelik liflerde aderans artırılması hedeflenir ve dolayısıyla mukavemet ve süneklik geleneksel betonlara göre oldukça yüksek olmaktadır (Tüfekçi, 2017). Buna ek olarak, UYPB'ler üstün dayanıklılık sergilerler çünkü yapı matrisleri karbondioksit, klorür, sülfat vb. için neredeyse geçirimsizdir (Meng ve diğer., 2017). Son otuz yıllık süreçte gelişim gösterip kullanıma geçen UYPB'lerin gelecekte de yapı sektöründe sürdürülebilir, esnek altyapıların sağlanması için umut verici inşaat malzemelerinden birisi olacağı düşünülmektedir (Du et al., 2021).

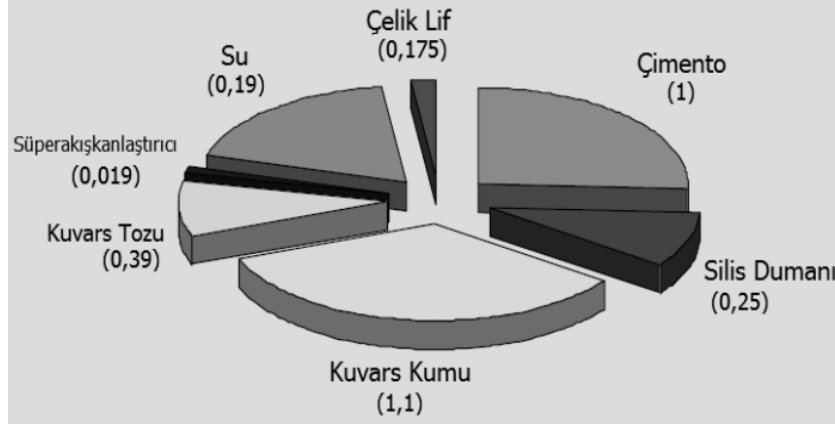
UYPB malzemelerinin kendi aralarında sınıflandırılabilmesi için araştırmacılar tarafından mekanik ve dayanım özellikleri açısından değerler belirlenmiştir ve bu değerler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- Eğilme dayanımı 50 MPa'dan büyüktür,
- Basınç dayanımı 150 MPa'dan fazladır,
- Direkt çekme dayanımı 10 MPa'dan fazladır,
- Kırılma enerjisi 40,000 J/m<sup>2</sup> dan büyüktür,
- Matrisin direkt çekme dayanımı 7 MPa'dan yüksektir (Tüfekçi, 2017).

Japonya İnşaat Mühendisleri Odası Beton Komitesi tarafından sünek çimento esaslı kompozitler için yaptıkları sınıflandırmada çekme ve eğilme gerilmeleri altındaki karakteristik davranışları göz önünde bulunulurken, ABD Federal Karayolları İdaresi tarafından yayınlanan bir raporda, minimum dayanım sınıfı olarak 150 MPa'dan bahsedilmiştir (Yalçinkaya, 2015). Yazar, sınıflandırma konusunda küresel bir fikir birliği olmamasının başlıca nedenlerini standardizasyon eksikliği, sınırlı UYPB uygulamaları ve üretici sayısının azlığı olarak sıralamıştır.

#### **4.2 UYPB Hammaddeleri ve Tasarım Esasları**

UYPB'lerde sıkı bir tane düzeninin geliştirilmesi ve mümkün olduğu kadar mikro bir yapının elde edilmesi için su içeriği son derece düşük tutulmaktadır (Wnag ve diğer., 2018). Geleneksel anlamda beton yapı malzemeleri kullanarak bu yapıya ulaşmak mümkün değildir (Hamad ve diğer., 2021). Yazarlar, bu nedenle amaçlanan özelliklerin elde edilebilmesi için farklı malzemeler ve farklı modellerin kullanılması gerekmekte olduğunu ve üretilen UYPB'lerin bağlayıcı olarak yüksek miktarda çimento, mineral etkisi elde etmek için silis dumanı ve uçucu kül, kimyasal katkı maddesi olarak bir süper akışkanlaştırıcı ve bağlayıcı olarak az miktarda su ile ince öğütülmüş kuvars tozundan oluşması gerektiğini belirtmişlerdir. Tüfekçi (2017), tarafından yapılan çalışmada ise klasik bir UYPB için karışım oranları Şekil 4.1'de sunulduğu gibi verilmiştir.



Şekil 4.1 UYPB'lerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Oransal Olarak Karışımları (Tüfekçi, 2017)

UYPB tasarımında malzeme seçimlerine bağlı olarak hedeflenen ana parametreler yüksek işlenebilirlik, harç stabilitesi, yüksek mukavemet olarak sayılabilir (Shafieifar ve diğer., 2017). Yüksek işlenebilirlik ve harç stabilitesi bir beton karışımı için erişilmesi oldukça güç taze hal özellikleridir. Bu taze hal özelliklerini sağlamak için çok ince toz malzeme miktarının artırılması, düşük su/çimento oranları ve yüksek oranda süperakışkanlaştırıcı kullanılması gerekir (Yu ve diğer., 2014). UYPB'de "paketleme yoğunluğu" olarak bilinen ve iç yapının minimum boşluk oranına inmesi için kullanılan kavram için maksimum agrega boyutunun küçültülmesi ve ince filler malzemesi kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla çok ince toz malzemeler kullanılmaktadır. Bunlardan en bilineni ve en etkin olanlarından birisi silika dumanıdır. Silika dumanı ilavesi ile çimento taneleri arasındaki gözeneklerin doldurulmasıyla paketleme yoğunluğu artırılabilir ve silika dumanının puzolanik karakteri ayrıca yoğun yapının oluşumuna katkıda bulunur, dolayısıyla çimento hidrasyonu sırasında çökelmiş portlanditin tüketilmesini ve Portland çimento hidrasyonunun sağlananlara benzer yapılar oluşturmasını sağlar (Koutný ve diğer., 2018).

UYPB için karışım tasarım yöntemlerine dair daha küçük parçacıkların daha büyük parçacıklar arasındaki boşlukları doldurduğu, böylece boşluk hacmini azalttığı ve katı bileşenlerin paketleme yoğunluğunu arttırdığının tespit edilmesi üzerine, farklı yöntemler geliştirilmiştir. İkili karışım için Furnas modeli 1931'de ortaya atıldıktan sonra (Furnas, 1931), Tufar modeli, Doğrusal paketleme yoğunluğu modeli (LPDM) ve Sıkıştırılabilir paketleme modeli (CPM) geliştirilmiştir. LPDM beton için uygulanabilmektedir. Geliştirilmiş CPM de 200 MPa'nın üzerinde basınç dayanımına

sahip UYPB'yi başarıyla geliştirmektedir (Wille ve diğer., 2011). Hoang ve diğer. UYPB'nin karışım tasarımını optimize etmek için farklı optimizasyon yöntemleri de önerilmiştir (Hoang ve diğer., 2016; Wang ve diğer., 2019; Dingqiang ve diğer., 2020). Tablo 4.1'de tipik UYPB, Normal dayanıma sahip beton ve yüksek dayanıma sahip beton tasarımları sunulmuştur (Tüfekçi, 2017). Daha önce de değinildiği üzere UYPB'nin diğer beton türlerinden en önemli farkının yüksek dozajda filler malzeme (kuvars tozu ve silis dumanı) ve yüksek dozajda çimento içermesi olduğu söylenebilir.

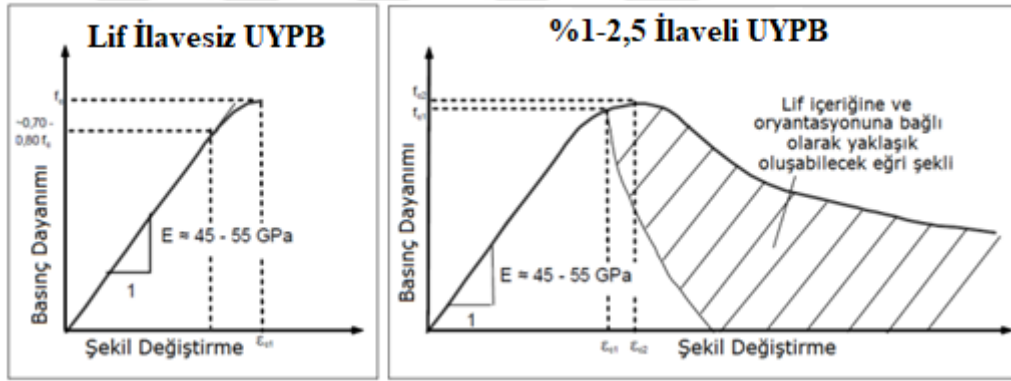
Tablo 4.1 Normal Dayanımlı Beton, Yüksek Dayanımlı Beton ve UYPB Kompozisyon Özellikleri (Tüfekçi, 2017)

|                              | <b>UYPB</b> | <b>Normal Dayanıma Sahip Beton (NDB)</b> | <b>Yüksek Dayanıma Sahip Beton (YDB)</b> | <b>Bileşen (kg/m<sup>3</sup>)</b>    |
|------------------------------|-------------|------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|
| Bileşen (kg/m <sup>3</sup> ) | 700-1000    | < 400                                    | ≈ 400                                    | Çimento                              |
|                              | 110-200     | > 200                                    | 100- 150                                 | Su                                   |
|                              |             |                                          |                                          | İri Agrega                           |
|                              | 200-300     | -                                        | 40                                       | Silis Dumanı                         |
|                              | -           | ≈ 700                                    | ≈ 600                                    | İnce Agrega (0-4 mm)                 |
|                              | 1000-2000   | -                                        | -                                        | Kuvars Tozu (150-600 µm)             |
|                              | 10-40       | -                                        | 5                                        | Süperakışkanlaştırıcı                |
|                              | > 150       | -                                        | -                                        | Çelik Lif (L=12 mm)                  |
|                              | < 0,22      | > 0,35                                   | < 0,38                                   | Su-Bağlayıcı Oranı                   |
|                              | < 0,24      | > 0,35                                   | 0,28-0,38                                | Su-Çimento Oranı                     |
| Özellikler                   | >2500       | 2000-2800                                | 2000-2800                                | Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )   |
|                              | > 150       | <60                                      | 60-100                                   | Basınç Dayanımı (MPa)                |
|                              | > 8         | < 3                                      | < 5                                      | Çekme Dayanımı (MPa)                 |
|                              | 50-70       | ≈ 30                                     | < 45                                     | Elastisite Modülü (GPa)              |
|                              | > 10000     | 30-200                                   | < 150                                    | Kırılma Enerjisi (J/m <sup>2</sup> ) |

### 4.3 UYPB Mekanik Özellikleri

UYPB'lerin mekanik özellikleri incelenirken belli başlı üç özelliğe dikkat edilmektedir. Bunlar; basınç dayanımı, direkt çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğudur. UYPB malzemelerinde en önemli tasarım özelliği basınç dayanımı olarak görülmektedir. Basınç dayanımında sağlanan artışın kürleme yönteminden önemli derecede etkilendiği bilinmektedir. UYPB malzemesine 20°C'lik oda

sıcaklığında normal sertliğin uygulanması hâlinde yaklaşık olarak 200 MPa'lık bir basınç dayanımı elde edilmektedir. Eğer kürleme sıcaklığı 100°C'ye yükseltirse de basınç dayanımının 250 MPa'a ulaştığı görülmektedir (Fehling ve diğer., 2004). Çelik lif eklentisinin dayanıma katkısı hakkında literatürde birçok görüş ve çalışma bulunmaktadır. Çelik lif içermeyen UYPB malzemeleri, nihai basınç dayanımına ulaşıldıktan sonra çatlama olarak tanımlanabilecek gevrek kırılma özellikleri sergileyebilir (Erten ve diğer, 2017). Buna ek olarak çelik liflerin ilavesi durumunda son basınç dayanımı üzerinde küçük bir etki meydana gelir ve gerilme gerilimi üzerinde de önemli etki meydana gelir. Lif ilaveli ve ilavesiz UYPB malzemelerinin sıkıştırma gerilimine maruz kalmaları durumunda stres durumları Şekil 4.2'de gösterilmektedir (Tüfekçi, 2017). Görüldüğü üzere çelik lif katkısı basınç dayanımında doğrudan bir artışa sebep olmasa da gevrek kırılma oluşmaması ve sünekliliğin artması gibi çok önemli katkıları bulunmaktadır.



Şekil 4.2 Basınç Gerilmesi Altında UYPB Davranışları (Tüfekçi, 2017)

UYPB geleneksel betonla karşılaştırıldığında, çekme dayanımında yaklaşık dört kat artış görülmektedir, konvansiyonel betonarme ile elemanların tasarımında, dayanımı çok düşük olduğu için çekme dayanımı ihmal edilmektedir (Bagersad ve diğer., 2017). UYPB'lerin çekme mukavemetindeki diğer bir fark, çatlamadan sonra yük taşıyamayan geleneksel betonun aksine, ilk çatlama sonrası da kayda değer bir performans sergilemesidir (Graybeal, 2006). Literatürde yapılan çalışmalar UYPB'lerdeki çekme dayanımlarının 7-15 MPa aralığında olduğunu kanıtlamıştır (Sağır ve Tanarşlan, 2019; Yalçınkaya ve diğer., 2020; Hasgöl ve Bıçakçıoğlu, 2022). Çelik liflerin çatlak köprüleme etkisi, UYPB'nin gerilim altında yüksek mukavemet elde etmesini sağlamaktadır (Cengiz, 2015). Bu nedenle, geliştirilmiş mikro yapı,

homojenlik, sıkı tane dizilimi ve yüksek lif içeriği ilkeleriyle üretilen UYPB malzemeleri, çekme gerilimi altında deformasyon sertleşmesi davranışı sergilerler. UYPB malzemelerinin bir diğer üstün performans gösterdikleri alan eğilme dayanımıdır. UYPB'nin eğilme dayanımı performansı, çekme dayanımı performansına benzer olarak normal betonlara göre çok üstündür. Bu üstünlüğü sağlayan UYPB bileşeni şüphesiz ki liflerdir. Ancak geleneksel lifli betonlardan farklı olarak UYPB'nin yoğun iç yapısı liflerin matrisle çok daha iyi aderans yapmasını ve liflerin gerilme altında matristen daha zor sıyrılmasını sağlar. Dolayısıyla benzer lif oranlarında geleneksel betona göre UYPB'de çok daha iyi sonuçlar alınmaktadır.

UYPB'lerin mekanik özellikleri zaten diğer betonlara kıyasla oldukça gelişmiş bulunmaktadır. Kademelendirme yöntemiyle geliştirilen lif yönlendirmeleri ise UYPB'lerin mekanik davranışlarında daha da üstün performans göstermelerini sağladığı yapılan çalışmalarca belirlenmiştir. Huang ve diğer. (2021), yaptıkları çalışmada fiber hizalama ile UYPB'lerin mekanik davranışlarında bir gelişme olup olmadığını incelemişlerdir. Çalışmada elektromanyetik ortam uygulaması ile fiber değişiklikler yapılmış ve çalışma sonucunda mekanik performansın %20-50 aralığında artırılabilceği tespit edilmiştir. Bir başka çalışmada yine UYPB'lerin mekanik özellikleri incelenmiş ve mekanik özelliklerin betonların hidrasyon ısısı, hidrasyon ürünleri ve gözenek yapısı ile ilişkili olduğu bildirilmiştir. Çalışmada bu özelliklerin daha da geliştirilmesi, yani yüksek basınç dayanımı ve çekme mukavemetinin sağlanabilmesi için kireçtaşı kullanımının faydalı olacağı görülmüştür (Mo ve diğer., 2020).

#### **4.4 UYPB Kullanım Alanları**

UYPB üzerine yapılan yoğun çalışmalar sonrasında UYPB piyasada kullanılabilir bir beton haline gelmiştir. Bilindiği üzere, 2001 yılından bu yana, yıllık fiber beton üretimi önemli ölçüde artmıştır ve üretilen lifli betonun %5'inin betonarmede, %5'inin prefabrike elemanlarda ve geri kalanının çeşitli özel uygulamalarda kullanılmaktadır (Türk ve Kına, 2017). UYPB'nin uygulamada kullanılmaya başlamasındaki en önemli parametrelerden birinin yeterli işlenebilirlik ile sahada ek bir işçilik gerekmeden uygulanabilmesi olarak sayılabilir. Ayrıca UYPB'nin üstün mekanik özellikleri sayesinde geleneksel beton tasarımları ile devasa kesit alanları ile inşa edilecek bir

yapı, çok daha düşük kesit alanları ile inşa edilebilmektedir. Ancak, UYPB'nin aşırı üretim maliyeti, endüstride kullanımını düşük tutmuştur (Özalp, 2006). UYPB'nin ilk maliyeti yüksek olsa da hem düşük kesit alanları hem de üstün durabilite özellikleri sayesinde uzun dönem maliyetlerinin düşük olacağı bilinmektedir. Tablo 4.2'de dünyada tamamlanmış UYPB projelerine ait çeşitli veriler sunulmuştur (Azme & Shafiq, 2018). Görüldüğü üzere UYPB kullanımı daha çok geniş açıklıkları geçmek üzere köprülerde ve özgün tasarım elde etmek için kaplamalarda kullanılmıştır.

Tablo 4.2 Dünyada tamamlanmış UYPB projeleri (Azme & Shafiq, 2018)

| Lokasyon                             | Uygulama               | Yıl  | Avantajlar                                                                                         |
|--------------------------------------|------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sherbrooke, Kanada                   | Yaya Köprüsü           | 1997 | - İlk UYPB yapı                                                                                    |
| Bourg-les-Valence, Fransa            | Otoyol Köprüsü         | 2005 | - Çelik donatı Kullanımında %90 azalma<br>- Geleneksel betona göre %66 daha hafif yapı ağırlığı    |
| Seonyu, Seul, Güney Kore             | Yaya Köprüsü           | 2004 | - Azaltılmış segmentlere sahip kemer köprü                                                         |
| Mars Hill Bridge, Birleşik Devletler | Otoyol Köprüsü         | 2006 | - Birleşik Devletler'deki ilk UYPB köprü<br>- Basit inşa süreci<br>- Kesme donatısı kullanılmaması |
| Foundation Louis Vuitton, Fransa     | UYPB Panel Kaplama     | 2014 | - İnovatif tasarım                                                                                 |
| MUCEM, Marseille, Fransa             | Kolon ve Cephe Kaplama | 2013 | - Özgün tasarım<br>- Y şeklinde kolonlar<br>- Transparan cephe tasarımı                            |
| Shawnessy LRT Station, Kanada        | Çatı                   | 2004 | - Düşük bakım gerektirmesi<br>- Hafiflik<br>- Kolay inşa                                           |
| Jean Bouin Stadyumu, Paris           | Çatı ve Cephe          | 2013 | - Prefabrik UYPB elemanlar<br>- Su geçirimsiz yapı<br>- Özgün ve narin yapı                        |

#### 4.5 UYPB'lerin Radyasyon Zırhlama Özellikleri

Önceki bölümlerde de değinildiği üzere ağır beton, çoğunlukla nükleer santrallerde, ilaç ve radyasyon ortamında  $x$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  ve nötron ışınlarına direnmek için sıklıkla kullanılmaktadır (Alkayış, 2021). Bir malzemenin radyasyona karşı sağladığı korumanın ana nedeni sahip olduğu yüksek yoğunluğudur (Khan ve diğer., 2020). UYPB'lerin de yoğun iç yapıları, karışımda kullanılan çimento dozajlarının yüksek olması ve çelik lif kullanılması nedeniyle yüksek yoğunluğa sahip oldukları düşünülürse radyasyon zırhlama için kullanılabilecekleri sonucuna ulaşılabilir. Azreen ve diğer. (2018), yaptıkları çalışmada UYPB'lerde silika kumu, amang ve kurşun cam kullanılmasının radyasyon özelliklerini ve özellikle de  $\gamma$  ışınları geçirimini nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Bahsedilen katkı malzemelerini ayrı ayrı uyguladıkları çalışma sonucunda amang ve kurşun camının geliştirdiği radyasyon zırhlama işlevinin silika kumundan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Rashid ve diğer. (2020), tarafından yapılan bir başka çalışmada ise UYPB'lerde silika kumu, manyetit ve sıcaklığın radyasyon zırhlama üzerindeki etkisi araştırılmıştır. UYPB'lerin radyasyon zırhlama özelliklerinin  $800^{\circ}\text{C}$ 'de %76-82 aralığında bozulduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak maruz kalınan şiddetli çatlama ve parçalanma gibi mekanik hasarların da radyasyon zırhlamayı yüksek oranda azalttığı tespit edilmiştir. Yine bu çalışmada da radyasyon zırhlamada manyetit silika kumundan daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Zeyad ve diğer. (2022), ise çalışmalarında agrega ve lif tiplerinin UYPB'lerin radyasyon korumasına olan etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada özelliklerin geliştirilmesi için kum, manyetit, hematit ilmenit ve barit gibi ağır ve ince olan agregalar kullanılmıştır. Lif özelliklerinin gözlenebilmesi açısından kullanılan lif türü ise çelik elyafı, kurşun elyaf ve bazalt elyafı olmuştur. Çalışma sonucunda en iyi radyasyon zırhlama özelliğinin manyetit agrega ve çelik elyaf ile sağlandığı belirlenmiştir.

Azreen ve diğer. (2020), çalışmalarında hematit ve barit agrega kullanımının etkilerini bir simülasyon üzerinde incelemişlerdir. Çalışmada her UYPB'nin kopma modülü, basınç dayanımı ve çekme dayanımı gibi sertleşmiş özellikleri araştırılmıştır. UYPB'lerin radyasyon emme özelliklerini ölçmek için ölçümler yapılmıştır. 1.33 MeV ve 0.66 MeV ile yapılan incelemelerde karışımların radyasyon emme kapasitesini

incelemek için yazılım kullanılarak UYPB'lerden hematit agregasının barit agregaya göre daha küçük gözenek çapına sahip olduğu tespit edilmiştir. Böylece geniş bir yüzey alanı sergileyerek su emilimi ve işlenebilirliğinde azalma olacağı bildirilmiştir. Barit agregalı UYPB'ler, Si ve Fe elementlerinin daha az yüzdesi nedeniyle en düşük sıkıştırma mukavemetini göstermiştir. Bununla birlikte, tüm UYPB örnekleri 28 günde yüksek sıkıştırma mukavemeti ( $>130$  MPa) elde etmiştir. UYPB'lerde radyasyon koruması ve bazı özellikler üzerindeki etkilerin nano ferrosilikon ve ağır ince agrega katkısı üzerinden araştırıldığı bir çalışmada, nanoferrosilikon, ilmenit ve manyetit beton karışımlarına dahil edilmiştir. Çalışmada UYPB'nin mikroyapısı, gama ışını zayıflama katsayısı, mekanik özellikleri ve yoğunluğu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İnce kumun ilmenit ve manyetit ile değiştirilmesi, beton karışımlarının zayıflama verimliliğini 28 gün sonra sırasıyla %18.9 ve %24.2 oranında artırmış, %3'lük nanoferrosilikon ilavesi ise sırasıyla 7, 28 ve 91 gün sonra 130.5, 167.2 ve 189.8 MPa'lık en yüksek basınç dayanımı sağlamıştır (Ashraf ve diğer., 2022). Jou ve diğer. (2021), çalışmalarında Osmiyum, İridyum ve Barit nanopartikülleri ile yüklü UYPB'lerde doğrusal zayıflama katsayıları ve foton saçılma özelliklerini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda betona uygulanan İridyum, Osmiyum ve Barit nanopartikülleri eklendiğinde, doğrusal zayıflama katsayılarının arttığı, İridyum ve Osmiyum'a göre daha düşük bir yoğunlukta olmasına rağmen, Barit içeren nano-betonların, daha yüksek elektron yoğunluklarından dolayı daha yüksek bir doğrusal zayıflama katsayısı sergiledikleri belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada, saçılan foton akısı ile ilave edilen nanopartiküllerin atom numaraları arasında bir ilişki olduğu bildirilmiştir. Atomik doldurucu sayısı arttıkça, saçılan foton akısının yoğunluğu genişlemiş, ayrıca saçılma akısı, diğer açılara göre 180 derecede tüm beton türleri için daha yüksek olmuştur.

Han ve diğer. (2022), yaptıkları bir çalışmada UYPB'lerde radyasyon zırhlama özelliğinin geliştirilebilmesi adına beton karışımında manyetit ince agrega kullanmışlardır. İlave sonrasında gözlenen değişikliğin sıradan betona kıyasla mikro gözeneklerde %56,8 oranında bir değişiklik olduğu ve böylece zırhlama özelliğinin gelişmesi olmuştur. Çalışma sonucunda belirtilen oranlarda manyetit agrega kullanımının endüstride de sağlanması tavsiye edilmiştir. Bir başka çalışmada ise yine UYPB'lerde radyasyon zırhlama özelliklerinin geliştirilmesinin sağlanması adına

hematit kullanımının etkileri incelenmiştir. Çalışmada yapılan mikro gözenek ve radyasyon direnci testleri sonucunda hematit ilavesinin UYPB’lerde, eğilme ve darbe mukavemetini artırdığı, yüksek sıcaklıklarda yapının korunmasına yardımcı olduğu ve yüksek radyasyon koruma direncini sağlamaya yardımcı olduğu ortaya çıkarılmıştır (Lv ve dir., 2022). Barit agregaların radyasyon geçirgenliğinin artırılmasında etkin olan bir diğer katkı malzemesi olduğu bilinmektedir. Janković ve diğer. (2016), çalışmalarında nano-silika ve barit agregası katkısının UYPB’lerin özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada çimento ve agregası tipinin özellikleri nasıl geliştireceğinin gözlenmesi amaçlanmıştır. Yapıda meydana gelen değişiklikler sonucunda; nano-silika kullanımının porozite azaltıcı bir etkisinin bulunduğu, %50 barit kumu ilavesi ile %2’lik nano-silika ilavesinin mukavemeti artırdığı ve baritin radyasyon direncini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir.

## **BÖLÜM BEŞ**

### **İŞLEVSEL OLARAK KADEMELENDİRİLMİŞ BETONLAR**

İşlevsel olarak kademelendirilmiş betonda (İKB), malzeme bileşimi, bir yapısal elemanın bölgeleri arasında farklılık gösteren performans taleplerini karşılamak için pek çok şekilde çeşitlendirilebilmektedir. Bu şekildeki uygulamalar, çimento tüketimini azaltmak için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Günümüzde inşaat sektöründeki ihtiyaca yönelik olarak betonlar farklı malzemelerin katılması veya katmanlandırılması ile işlevsel bir hâle getirilmektedir (Torelli ve diğer., 2020). Malzeme özelliklerinin konuma göre kademeli olarak geçişini sağlayan ve kompozitlere kıyasla daha üstün davranışlar gösterebilen betonlar olarak açıklanabilen İKB'lerin kendilerine has özellikler ile (dayanım, yoğunluk, sertlik, darbe direnci, termal ve akustik yalıtım, iletkenlik vb.) tasarlanabileceği görülmektedir. Fonksiyonelliğin katılması, farklı katmanlardaki malzemelerin yapısındaki mikro değişiklikler ile sağlanabilmektedir (Liu ve diğer., 2018). İKB'lerin fikir olarak doğuşu Werner Sobek tarafından gerçekleştirilmiştir. İşlevsel olarak kademelendirme tekniği farklı pek çok endüstride uygulanmaktayken beton teknolojisinde kullanımı henüz çok yaygın değildir. Betonlarda kademelendirmenin sağlanarak iyi bir İKB'nin elde edilmesi için çeşitli lif türleri ya da agregaların kullanıldığı bilinmektedir. Bu iki yöntem de evrensel olarak kullanılır (Ahmed ve diğer., 2020).

İşlevsel olarak kademelendirmenin çok sayıda farklı örneği bulunur ve ilk örnekleri çelik lif donatılı betonlar olarak bilinmektedir (Aksu ve Acar, 2010). İşlevsel olarak kademelendirilmiş betonlarda yapısal olarak hangi özelliğin hangi katmanda yer alması gerektiği belirlenmelidir (Aylin vd., 2015). Herrman ve Sobek, (2017)'e göre sınır koşulları olarak belirlenen iki uçtan yapısal olarak geçirimsiz olan uç, belirli yapısal gereksinimlere bağlı olarak normal dayanımlı, yüksek dayanımlı veya ultra yüksek dayanımlı karışımlar ile tasarlanabilir. Gözenekliliği en aza indirmek betonun yapısal özelliklerini ve kalıcılığını iyileştirirken, gözenekliliği en üst düzeye çıkarmak ısı yalıtım özelliklerini iyileştirmektedir. Bu iki farklı karışım arasında, gözenekliliği ayarlamak, özellikleri tanımlanan sınırlar içinde serbestçe değişiklik yapılabilmesini ve böylece gözeneklilik özelliğinin de değiştirilebilmesini sağlamaktadır.

## **BÖLÜM ALTI**

### **LİTERATÜRÜN TARTIŞILMASI**

Radyasyondan korunma bir amaç olarak son dönemde popülerliğini artıran bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Betonun radyasyon zırhlama özelliği üzerine birçok çalışma gerçekleştirilerek hem maliyet hem pratik kullanım açısından avantajlı bulunmuştur (Gümüş, (2019); Kaplan ve Özel, (2021)). Radyasyon zırhlama için en önemli beton özelliklerinden biri olan yüksek yoğunluğu sağlamak amacıyla serpantin (Sharifi ve diğer. (2013)), diatomit (Gündüz ve Kalkan, (2017)), hematit (Azreen ve diğer., (2020)) ve barit (Kılınçarslan ve diğer., (2007); Daungwilailuk ve diğer., (2022)) gibi birçok agrega kullanılmaktadır. Barit agregası kullanılan karışımların oldukça başarılı bir radyasyon zırhlama performansı olduğu bilinmektedir. Bunlara ek olarak radyasyon zırhlama amacıyla UYPB kullanımına dair de birçok çalışmaya rastlanmıştır (Azreen ve diğer., (2018); Zeyad ve diğer., (2022)). UYPB'lerin yoğun iç yapıları, karışımda kullanılan çimento dozajlarının yüksek olması ve çelik lif kullanılması nedeniyle yüksek yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle radyasyon zırhlama performansları yüksektir. UYPB karışımlarında da bu bahsedilen özelliklere ek olarak silika kumu (Azreen ve diğer., (2018)), hematit (Azreen ve diğer., (2020)), manyetit (Zeyad ve diğer. (2022)), ve barit (Janković ve diğer., (2016); Han ve diğer., (2022)) gibi ağır agregalar ile radyasyon zırhlama performansı geliştirilebilmektedir.

İşlevsel olarak kademelendirilmiş betonlar ise son yıllarda maliyet düşürücü ve hedefe yönelik tasarım amaçları ile araştırma konusu olmuştur (Torelli ve diğer., 2020). Elemanın maruz kalacağı yüklere göre iki veya daha fazla betonun birlikte dökülerek üretilen elemanlarda genellikle yüksek ve düşük maliyetli iki betonun birleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda geliştirilen kompozitlerde özellikle çekme ve eğilme gerilmeleri altında nispeten düşük maliyet ile yüksek dayanım elde edilebilmektedir (Chan ve diğer., (2020); Othman ve diğer., (2021)). İşlevsel olarak kademelendirilmiş betonun radyasyon zırhlayıcı olarak kullanımına dair literatürdeki çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Barit agregası içeren UYPB ile barit agregalı normal harç karışımlarının radyasyon zırhlama, mekanik özellikler ve maliyet açısından işlevsel olarak kademelendirildiği bir çalışma literatürde bulunmamaktadır.

Tez çalışması kapsamında barit agregalı UYPB ve barit agregalı normal harçların işlevsel olarak kademelendirilmiş çimento esaslı kompozit üretiminde kullanımı literatürde ilk kez araştırılmıştır. Geliştirilen kompozitlerin radyasyon zırhlama, mekanik özellikler ve maliyet açısından kıyaslaması yapılmıştır.



## BÖLÜM YEDİ

### DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 7.1 Genel Bakış

Doğal ya da yapay agrega kullanılarak üretilen, birim hacim ağırlığı  $3000 \text{ kg/m}^3$ 'ten büyük olan betonlara ağır beton denmektedir (Kilincarslan ve diğer., 2006). Birim hacim ağırlığı yüksek agregalarla üretilmeleri sebebiyle normal betondan daha ağır olmaktadır. Ağır betonlar önceleri devrilmeye karşı hassas yapılarda denge unsuru olarak kullanılsa da gama ve nötron ışınlarına karşı zırhlama alanında kullanımı yakın zamanlarda yaygınlaşmaya başlamıştır. Gama ( $\gamma$ ) ışınları birim hacim ağırlığı yüksek malzemeler tarafından tutulurken, nötron ışınları atom ağırlığı küçük elementler tarafından durdurulmaktadır. Bu nedenle ağır agregalar radyasyon zırhlamada kullanılabilir.

#### 7.2 Kullanılan Malzemeler

Özgül yüzey alanı  $395 \text{ m}^2/\text{kg}$  olan CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu Limak Çimento'dan temin edilmiştir. Ayrıca,  $20.000 \text{ m}^2/\text{kg}$  nitrojen absorpsiyon inceliğine ve %92,25  $\text{SiO}_2$  içeriğine sahip silis dumanı (MasterRoc® MS 610) BASF'den temin edilmiştir. Çimento ve silis dumanının kimyasal özellikleri Tablo 7.1'de sunulmuştur.

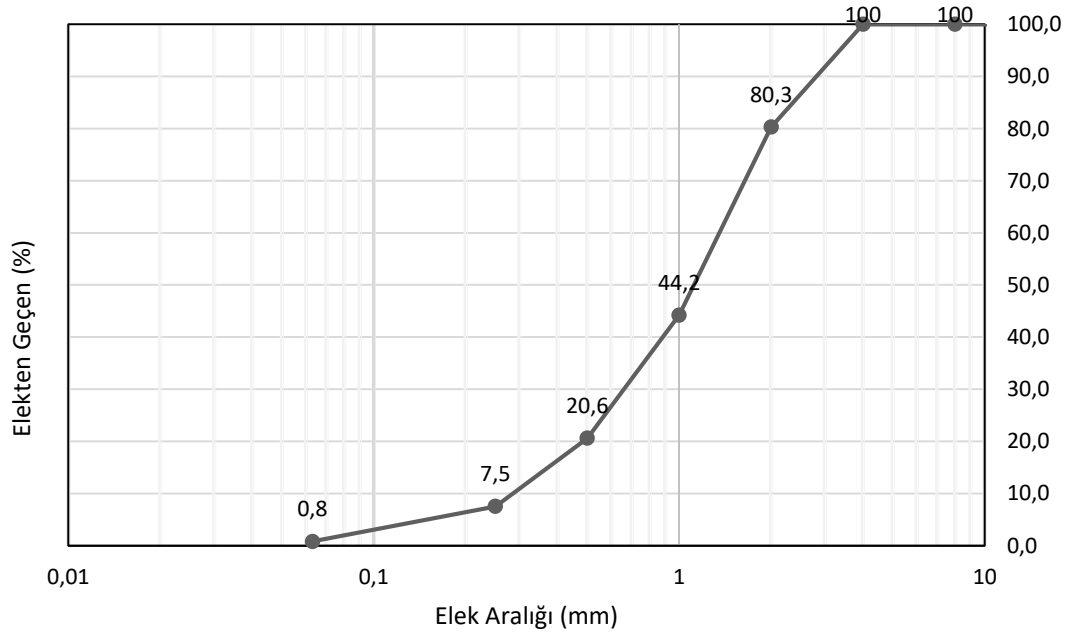
Tablo 7.1 Kullanılan bağlayıcıların özellikleri

| Kimyasal Kompozisyon (%) | Çimento | Silis Dumanı |
|--------------------------|---------|--------------|
| $\text{SiO}_2$           | 19,79   | 92,25        |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$  | 4,78    | 0,88         |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$  | 3,39    | 1,98         |
| CaO                      | 63,71   | 0,51         |
| MgO                      | 1,78    | 0,96         |
| $\text{Na}_2\text{O}$    | 0,32    | 0,45         |
| $\text{K}_2\text{O}$     | 0,78    | 0,12         |
| $\text{SO}_3$            | 2,84    | 0,33         |
| $\text{Cl}^-$            | 0,0098  | -            |
| Serbest CaO              | -       | -            |
| Kızdırma Kaybı           | 2,09    | -            |

Deneysel çalışmalarda agregası olarak Başer Madencilik'ten temin edilen 0-4 mm elek aralığında barit agregası kullanılmıştır. Agregaya ait su emme ve özgül ağırlık değerleri sırasıyla %1,00 ve 3,99'dur. Agreganın kimyasal kompozisyonu Tablo 7.2'de ve elek analizi Şekil 7.1'de sunulmuştur.

Tablo 7.2 Barit agregasının kimyasal kompozisyonu

| Kimyasal Kompozisyon           | %     |
|--------------------------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 9,07  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,06  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,17  |
| CaO                            | 0,86  |
| MgO                            | 0,98  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,29  |
| BaSO <sub>4</sub>              | 79,08 |
| SrSO <sub>4</sub>              | 1,86  |
| Kızdırma Kaybı                 | 2,45  |



Şekil 7.1 Barit agregasının elek analizi

Kimyasal katkı olarak süper akışkanlaştırıcı MasterGlenium ACE 450 kullanılmıştır. ACE 450'nin kullanılması ile betonun işlenebilirliği, dayanım gelişim sürecinin en kısa sürede başlamasını sağlayacak biçimde optimize edilmiştir.

Kullanılan bu katkının özel moleküler yapısı, su ile reaksiyona giren çimento yüzey alanını arttırarak hidrasyonu hızlandırır.

Mikro çelik lif olarak Bekaert tarafından üretilen OL 13/20 kodlu, 13 mm uzunluğunda ve 0,20 mm çapında pirinç kaplı lifler kullanılmıştır. Lifin çekme dayanımı 2750 MPa ve elastisite modülü 200 GPa olarak verilmiştir.

### 7.3 Karışım Tasarımları

Bu çalışmada barit agregalı iki farklı çimento esaslı karışım kullanılarak ıslak döküm yoluyla işlevsel olarak kademelendirilmiş beton (İKB) üretimi gerçekleştirilmiştir. Burada radyasyon zırlama amacına yönelik olarak iki ağır harç karışımı kullanılmıştır; barit agregalı normal harç (NH) ve barit agregalı ultra yüksek performanslı beton (UYPB). UYPB, yüksek eğilme performansı ve basınç dayanımının yanı sıra içerdiği yüksek bağlayıcı, akışkanlaştırıcı ve lif miktarı ile maliyeti de yüksek bir malzemedir. Tez çalışması kapsamında işlevsel kademelendirme yöntemi ile geliştirilen kompozitlerde sadece çekme ve basınç bölgesinde farklı kalınlıklarda UYPB kullanılmış, orta bölgede ise daha uygun maliyetli ve daha yüksek barit agregası hacmine sahip olan NH kullanılarak radyasyon zırlama özelliği yüksek, mekanik özellikleri üstün kompozitlerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Kompozitlerde farklı doğrultuda yüklemenin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. İKB kompozitlerinin sergilediği radyasyon soğurma performansı ve mekanik özellikler, sadece NH ve sadece UYPB ile üretilmiş numuneler ile kıyaslanmıştır.

İşlevsel olarak kademelendirme işleminde eğilme yüklemesi doğrultusu esas alınarak sırasıyla basınç bölgesi UYPB kalınlığı (mm)- orta bölge NH kalınlığı (mm) - çekme bölgesi UYPB kalınlığı (mm) olmak üzere 5-30-5 ve 10-20-10 olarak isimlendirilen kompozitler geliştirilmiştir. Bu üretimlerde 40×40×160 mm<sup>3</sup> numuneler kullanıldığından toplam kalınlık 40 mm olmuştur.

UYPB ve NH için karışım oranları Tablo 7.3'te sunulmaktadır. Bu karışım oranları gerçekleştirilen çok sayıda deneme dökümleri ile belirlenmiştir. Bu deneme dökümlerinde İKB üretimi sırasında katmanların birbirini taşıması ve yerleştirme işleminin başarılı olması için gerekli işlenebilirlikler ASTM C 230 (ASTM, 2014)

standardına göre, 25 düşürme sonucu ölçülen yayılma çapları ile belirlenmiştir. Akışkanlaştırıcı miktarları hedef yayılma çapına (215 mm) göre ayarlanmıştır. NH ve UYPB karışımlarına ait karıştırma prosedürleri sırasıyla Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te sunulmaktadır. Karıştırma işlemi aynı anda iki Hobart mikserin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiş, karışım sonları aynı ana denk gelecek şekilde planlanmıştır.

UYPB ve NH karışımlarının taze birim hacim ağırlıkları belirlenerek katman kalınlıkları bu birim hacim ağırlıklara göre ağırlıkça istenilen hacimde olacak şekilde dökülmüştür. Tüm numunelere ait kesit görselleri Şekil 7.2'de sunulmuştur.

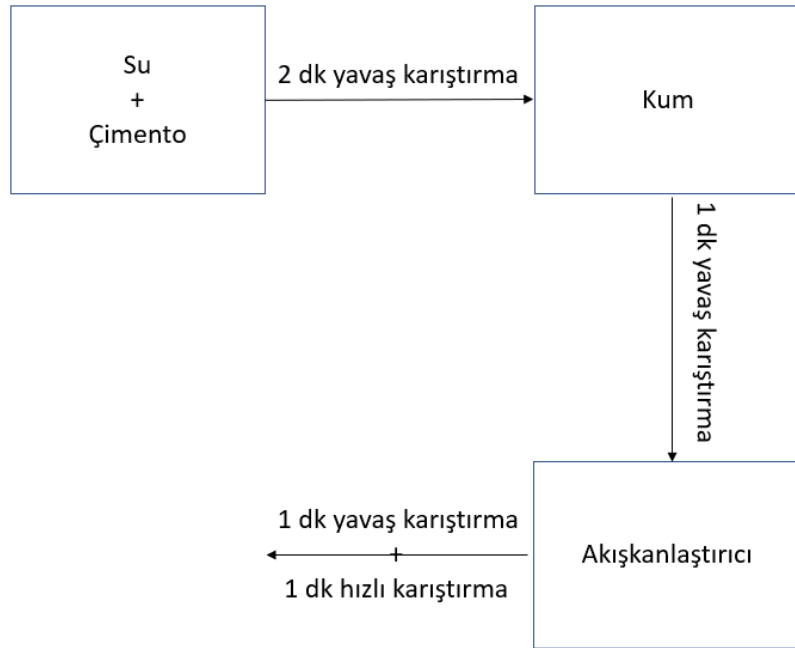


Şekil 7.2 Tüm numunelere ait kesit görselleri

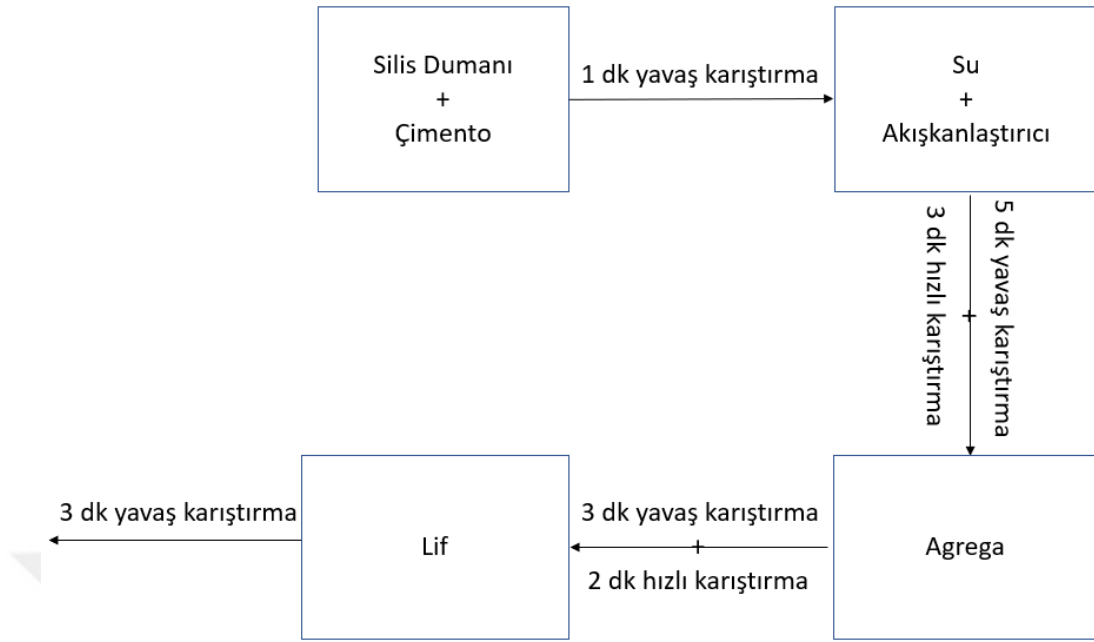
Radyasyon soğurma özelliğini arttırmak için hem UYPB hem NH tasarımlarında sadece barit agregası kullanılmıştır. Her iki karışımın da işlenebilirliğinin aynı olması hedeflenmiş ve 215 mm yayılma çapına sahip olacak şekilde akışkanlaştırıcı dozajı ayarlanmıştır. Karışım tasarımları Tablo 7.3'te sunulmuştur. Karışımların hazırlanmasında izlenen karıştırma prosedürleri Şekil 7.3'te ve Şekil 7.4'te, deneysel çalışmanın farklı aşamalarından fotoğraflar Şekil 7.5'te sunulmaktadır.

Tablo 7.3 Karışım tasarımları

|                                                         | UYPB  | NH   |
|---------------------------------------------------------|-------|------|
| <b>Çimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>                       | 985   | 560  |
| <b>Silis Dumanı (kg/m<sup>3</sup>)</b>                  | 200   | 0    |
| <b>Su (kg/m<sup>3</sup>)</b>                            | 194   | 224  |
| <b>Barit (kg/m<sup>3</sup>)</b>                         | 1274  | 2289 |
| <b>Çelik Lif (kg/m<sup>3</sup>)</b>                     | 143,4 | 0    |
| <b>Süperakışkanlaştırıcı (kg/m<sup>3</sup>)</b>         | 40    | 1,5  |
| <b>Su/Bağlayıcı (ağırlıkça)</b>                         | 0,20  | 0,40 |
| <b>Akışkanlaştırıcı/Toz (%)</b>                         | 0,30  | 0,30 |
| <b>Toplam Bağlayıcı (kg/m<sup>3</sup>)</b>              | 1185  | 560  |
| <b>Toplam Hamur Oranı (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b> | 0,72  | 0,48 |
| <b>Teorik Hava Yüzdesi (%)</b>                          | 2     | 2    |



Şekil 7.3 NH karışım prosedürü



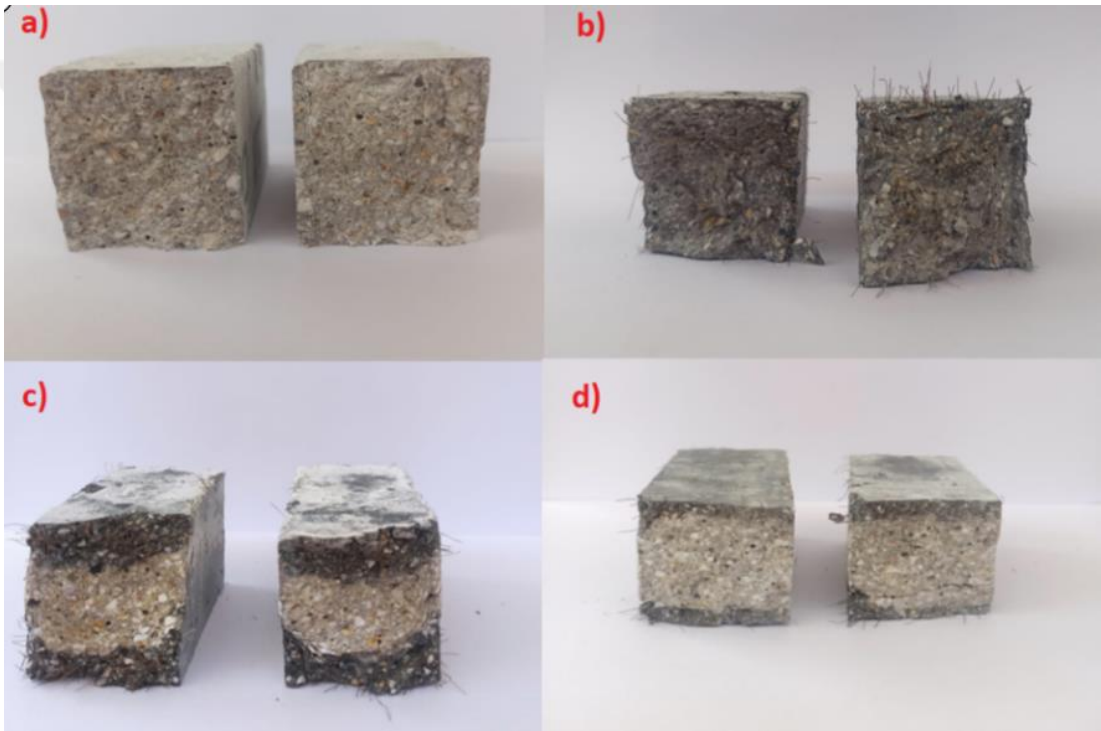
Şekil 7.4 UYPB karışım prosedürü



Şekil 7.5 Karışımların hazırlanması ve test edilmesi

Kompozitlerin üretiminde öncelikle UYPB karışımı yerleştirilmiş, vibrasyon sehpasında 5 saniye titreşime maruz bırakılmıştır. Ardından 5 dakika sonunda orta bölgeye NH karışımı dökülmüştür. Son olarak da 10 dakika sonunda en üst bölgeye UYPB karışımı yerleştirilmiş ve yine vibrasyon sehpasında 5 saniye titreşim edilmiştir.

Islak döküm yöntemiyle katmanlar üst üste işlevsel olarak kademelendirilerek soğuk derz oluşumunun önüne geçilmesi, yükler altında yekpare çalışan kompozitlerin üretilmesi hedeflenmiştir. Sırf NH ve UYPB karışımlarından numune üretiminde ise taze harçlar üç kademedede 10 saniye vibrasyon ile yerleştirilmiştir. Yerleştirme işlemi sonunda kalıpların üzeri naylonla kapatılarak numuneler  $22 \pm 2$  °C sıcaklıktaki döküm odasında bekletilmiş, 24 saat sonra kalıplar açılarak kür işlemi başlatılmıştır. Kür işlemi 7 ve 28 günlük standart su kürü şeklinde uygulanmıştır. Üretilen numunelerde katman kalınlıklarının kabul edilebilir oranda (1 ~ 2 mm) değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Numunelerin kesitlerine ait örnek görseller Şekil 7.6'da sunulmaktadır.

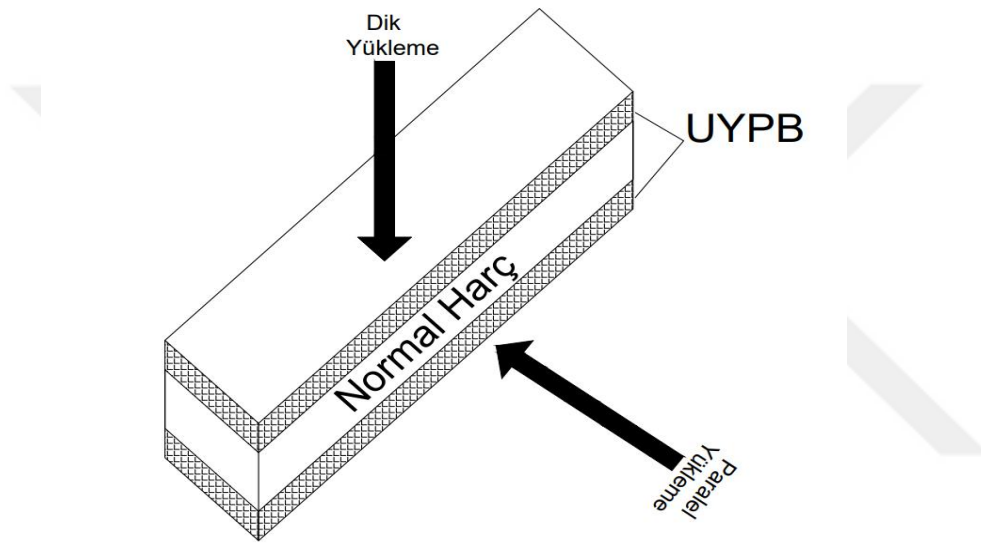


Şekil 7.6 a) Normal harç kesiti b) UYPB kesiti c) 10-20-10 kesiti d) 5-30-5 kesiti

#### 7.4 Basınç Dayanımı Testi

UYPB numune türü için 12'si 7 gün, diğer 12'si 28 gün su küründe bekletilen toplam 24 adet, NH numune türü için 12'si 7 gün, diğer 12'si 28 gün su küründe bekletilen toplam 24, 5-30-5 numune türü için 12'si 7 gün, diğer 12'si 28 gün su küründe bekletilen toplam 24, 10-20-10 numune türü için 12'si 7 gün, diğer 12'si 28 gün su küründe bekletilen toplam 24 adet numune üretilmiştir. Basınç dayanımları, ASTM C 349 standardına (ASTM, 2002) göre eğilme deneyi sonrası oluşan parçalarda

40×40 mm<sup>2</sup> alana yükleme yapılarak belirlenmiştir. Numuneler kuru yüzey doymun (KYD) olarak test edilmiştir. Numunelerin yükleme yapılacak perdah yüzeyleri kür süresinin sonunda zımparalanarak düzleştirilmiştir. Basınç yüklemesi, yükleme yönüne bağlı olarak mekanik performansın incelenmesi amacıyla katmanlara dik ve paralel şekilde yapılmıştır (Şekil 7.7). Basınç yüklemeleri 2,40 kN/sn hız ile yapılmıştır. Su kürü süreleri olan 7 ve 28 günün sonunda her bir kür süresi için 12'şer parçaya basınç yüklemesi yapılmıştır. Bu parçaların 6 adeti katmanlara dik, diğer 6 adeti ise katmanlara paralel yükleme altında test edilmiştir.



Şekil 7.7 Katmanlara dik ve paralel yükleme

### 7.5 Eğilme Dayanımı Testi

7 ve 28 günlük kür sonrası 24 adet numune eğilme dayanımı testine tabii tutulmuştur. Eğilme dayanımı Şekil 7.8'de görüldüğü üzere 40×40×160 mm<sup>3</sup> prizmatik numuneler üzerinden belirlenmiştir. Numuneler deformasyon kontrollü test presinde, 130 mm mesnet açıklığında, üç noktalı eğilme altında yüklenmiştir (Şekil 7.8). Yükleme yönüne dik ve paralel yükleme durumunda numunelerin davranışlarının incelenmesi amacıyla her iki yönde de yükleme yapılmıştır. Yalın NH numuneleri lifsiz olduğundan 0,05 mm/saniye, diğer numuneler ise 0,5 mm/saniye hızında yüklenmiştir. Tokluk değerleri yük-deformasyon (orta nokta sehim) grafiklerinin altında kalan alan ile hesaplanmıştır.



Şekil 7.8 Eğilme dayanımının belirlenmesi

### 7.6 Sertleşmiş Hal Özelliklerinin Belirlenmesi

Karışımların radyasyon soğurma performanslarının belirlenmesi için XCOM programına girilmek üzere yoğunluk değerleri TS EN 12390-7 (TS, 2000) standardı uyarınca Bağıntı 1'e göre hesaplanmıştır.

$$D = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Burada;

D, numunenin yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>)

m, numunenin kütlesi (g)

V, numunenin hacmi (cm<sup>3</sup>)'dir.

Karışımların sertleşmiş hal özelliklerinin belirlenmesi için boşluk oranı ve toplam su emme oranları da elde edilmiştir. Boşluk oranı Bağıntı 2'ye (Gökçe vd., 2018) göre, su emme oranı ise Bağıntı 3'e göre hesaplanmıştır.

$$V = \frac{W_s - O_d}{W_s - M_w} \times 100 \quad (2)$$

Burada;

V, numunenin boşluk oranı (%)

W<sub>s</sub>, KYD numunenin ağırlığı (g)

O<sub>d</sub>, kuru numunenin ağırlığı (g)

M<sub>w</sub>, KYD numunenin sudaki ağırlığı (g)'dir.

$$S_t = \frac{W_s - O_d}{O_d} \times 100 \quad (3)$$

Burada;

S<sub>t</sub>, numunenin toplam su emme oranı (%)

W<sub>s</sub>, KYD numunenin ağırlığı (g)

O<sub>d</sub>, kuru numunenin ağırlığı (g)'dir

Katmanlı numunelerde döküm sırasındaki hatalar, dış yüzeylerin törpü hataları gibi birçok parametre olduğu için, yoğunluk, boşluk oranı ve su emme oranı değerleri yalnızca UYPB ve NH için hesaplanmıştır. Daha sonra bu değerler kullanılarak katmanlı numunelerin yoğunluk, boşluk oranı ve su emme oranı değerleri teorik olarak hacimce dağıtılarak hesaplanmıştır.

## 7.7 Radyasyon Soğurma

Bu çalışmada radyasyon soğurma özellikleri literatürde sıklıkla kullanılan XCOM yazılımı aracılığıyla hesaplanmıştır (Akkurt vd., 2006; Gökçe vd., 2018; Kavaz vd., 2020). Programa karışım tasarımları, kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri ve yoğunluk değerleri girilmiştir. XCOM programı katmanlı yapıları dikkate almadığından katmanlı numuneler tek bir beton tasarımı gibi programa girilmiştir. Yani, 5-30-5 numunesinde hacimce %25 UYPB ve %75 yalın barit bulunduğu için karışım reçeteleri bu hacimler oranında birleştirilmiştir. Daha sonra 662 keV, 1,172 keV ve 1,332 keV enerji seviyesindeki soğurma değerleri elde edilmiştir. Numunelerin XCOM programı aracılığıyla hazırlanan 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV

değerlerindeki radyasyon soğurma katsayıları hesaplanmıştır. XCOM programında UYPB ve barit harcının (NH) karışım tasarımları, kullanılan agreganın, çimentonun ve silis dumanının kimyasal kompozisyonları kullanılmıştır. Şekil 7.9'da XCOM programının giriş sayfası, kimyasal kompozisyon değerlerinin girildiği sekme gösterilmiştir.

Fill out the form to select the data to be displayed:

[Help](#)

Enter the formulae and relative weights separated by a space for each compound. One compound per line. For example:

H2O 0.9  
NaCl 0.1

Note: Weights not summing to 1 will be normalized.

SiO2 18.19  
Fe2O3 2.83  
Al2O3 2.94  
CaO 23.15  
MgO 0.96

Optional output title:

**Graph options:**

☒ Total Attenuation with Coherent Scattering  
☐ Total Attenuation without Coherent Scattering  
☐ Coherent Scattering  
☐ Incoherent Scattering  
☐ Photoelectric Absorption  
☐ Pair Production in Nuclear Field  
☐ Pair Production in Electron Field  
☐ None

**Additional energies in MeV: (optional)** (up to 100 allowed)

Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored.

0.662  
1.172  
1.332

☐ Include the standard grid

**Energy Range:**

Minimum:  MeV

Maximum:  MeV

Şekil 7.9 XCOM ana sayfasına kullanılan malzemelerin kimyasal içeriklerinin işlenmesi

5-30-5 ve 10-20-10 numunelerinde kullanılan barit agregası, çimento, silis dumanı ve çelik lifin oksit bileşen toplamları kimyasal analizlerine göre belirlendikten sonra bu değerler XCOM programı arayüzüne girilmiştir. Gama ışınlarının soğurma katsayılarını bulmak amacıyla 0,662 keV, 1,172 keV ve 1,332 keV enerji seviyeleri kullanılmıştır.

Zoom in on energy range: (must be between 0.001 - 100000 MeV)

Note: If all data are not displayed in the graph, modify the energy range to view graphed data in the region of interest. Energy range must cover at least one factor of ten (e.g., 100 to 1000 MeV).

Minimum:  MeV Maximum:  MeV

[Change Energy Range](#)

Constituents (Atomic Number : Fraction by Weight)

Z=1 : 0.007967  
Z=8 : 0.363741  
Z=11 : 0.002300  
Z=12 : 0.005789  
Z=13 : 0.015560  
Z=14 : 0.085026  
Z=16 : 0.056548  
Z=19 : 0.003072  
Z=20 : 0.165451  
Z=24 : 0.000700  
Z=26 : 0.070394  
Z=38 : 0.004150  
Z=56 : 0.218002  
Z=74 : 0.001300

To download data in spreadsheet (array) form, choose a delimiter and use the checkboxes in the table heading. After downloading, save the output by using your browser's Save As feature.

Delimiter:

- ☒ space  
☐ | (vertical bar)  
☐ tab  
☐ newline

[Download data](#)

[Reset](#)

| Edge | (required)<br>Photon<br>Energy<br>MeV | Scattering                        |                                     | Photoelectric<br>Absorption | Pair Production                              |                                               | Total Attenuation                                    |                                                         |
|------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|      |                                       | <input type="checkbox"/> Coherent | <input type="checkbox"/> Incoherent |                             | <input type="checkbox"/> In Nuclear<br>Field | <input type="checkbox"/> In Electron<br>Field | <input type="checkbox"/> With Coherent<br>Scattering | <input type="checkbox"/> Without Coherent<br>Scattering |
|      |                                       | cm <sup>2</sup> /g                | cm <sup>2</sup> /g                  | cm <sup>2</sup> /g          | cm <sup>2</sup> /g                           | cm <sup>2</sup> /g                            | cm <sup>2</sup> /g                                   | cm <sup>2</sup> /g                                      |
|      | 6.620E-01                             | 1.049E-03                         | 7.388E-02                           | 2.804E-03                   | 0.000E+00                                    | 0.000E+00                                     | 7.773E-02                                            | 7.668E-02                                               |
|      | 1.172E+00                             | 3.389E-04                         | 5.642E-02                           | 8.346E-04                   | 2.613E-05                                    | 0.000E+00                                     | 5.762E-02                                            | 5.728E-02                                               |
|      | 1.332E+00                             | 2.627E-04                         | 5.284E-02                           | 6.559E-04                   | 1.440E-04                                    | 0.000E+00                                     | 5.391E-02                                            | 5.364E-02                                               |

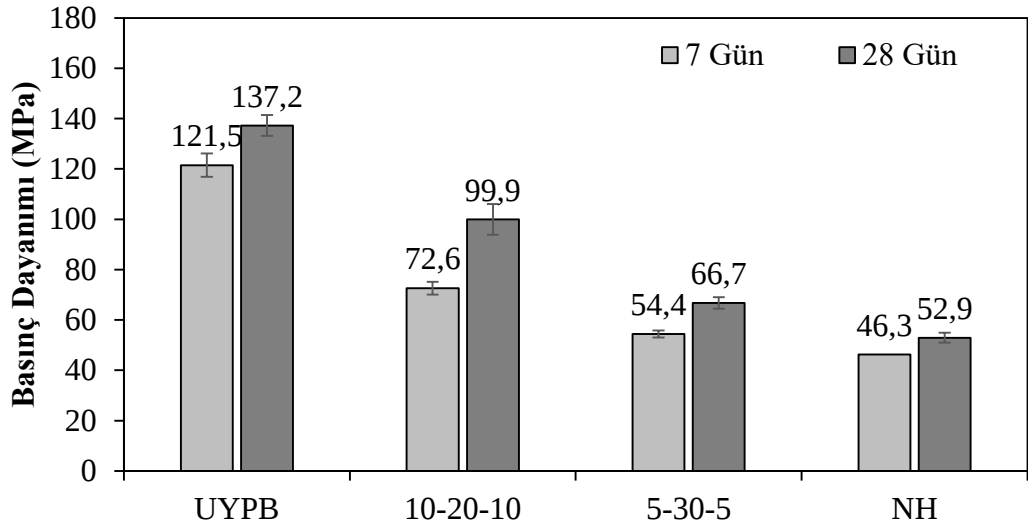
Şekil 7.10 XCOM yazılımında kütlece soğurma katsayıları (UYPB karışımı)

## BÖLÜM SEKİZ

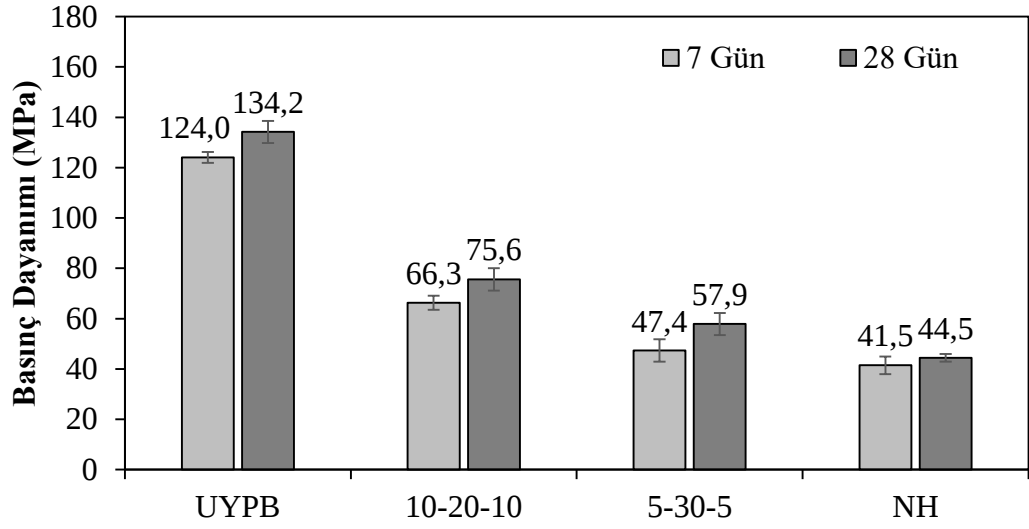
### BULGULAR ve TARTIŞMA

#### 8.1 Basınç Dayanımı

Numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları katmanlara paralel ve dik yükleme durumu için sırasıyla Şekil 8.1 ve Şekil 8.2’de sunulmuştur. Kompozit numunelerde kullanılan UYPB katman kalınlığı arttıkça basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir. Kür süresinin 7 günden 28 güne uzatılmasıyla dayanımlarda sınırlı da olsa gelişme sağlanmıştır. Kür süresinin uzatılmasına bağlı olarak dayanımdaki artışlar UYPB, 10-20-10, 5-30-5 ve NH için katmanlara paralel yüklemede sırasıyla %13, %38, %23 ve %14, dik yükleme için ise sırasıyla %8, %14, %22 ve %7 mertebesinde. Paralel yükleme durumunda kür süresinin dayanıma olan katkısının dik yükleme durumuna göre daha belirgin olduğu görülmektedir. Paralel yükleme durumunda 10-20-10 kompoziti 28 günlük kür süresi sonunda 99 MPa dayanım sergilemiştir (Şekil 8.1). Bu değer dik yükleme için 75,6 MPa’dır. Bu sonuç, katmanlara paralel yükleme durumunda zorlanma altında kalan katmanlar arası arayüzey bölgesinde soğuk derz oluşumunun veya kaynaşma problemlerinin oluşmadığını göstermektedir.



Şekil 8.1 Katmanlara paralel yüklemede 7 ve 28 günlük basınç dayanımları



Şekil 8.2 Katmanlara dik yüklemde 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

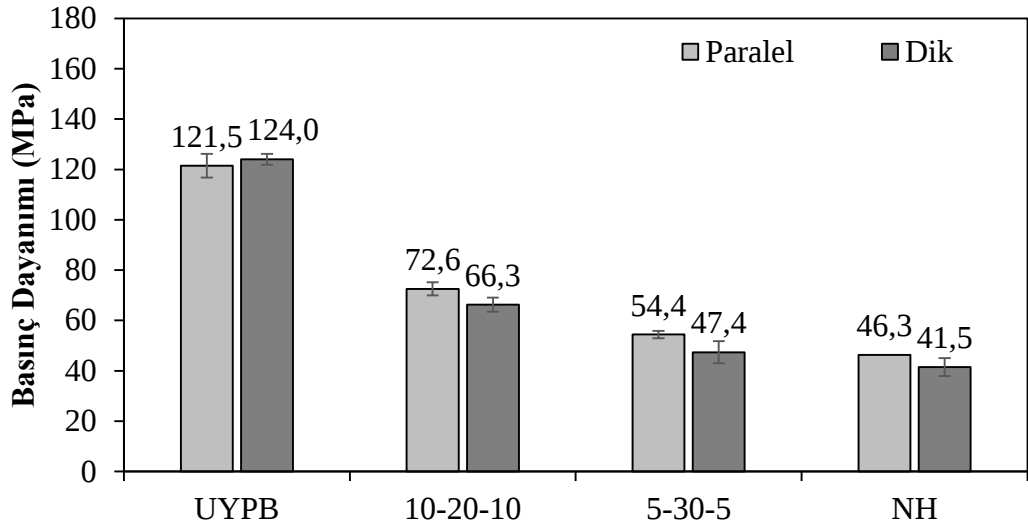
Kırılan numuneler incelendiğinde göçmeye sebep olan çatlakların katmanlar arasında ilerlemediği, kompozitin yekpare çalıştığı görülmüştür (Şekil 8.3). Ayrıca sandviç olarak oluşturulan numunede UYPB katmanlarının katmanlara paralel yükleme durumunda fiçılanma etkisini azaltarak enine birim deformasyonları kısıtladığı, böylelikle dayanımları geliştirdiği söylenebilir. Geliştirilen kompozitlerin basınç yükleri altında anizotrop olarak davrandığı, anizotropi derecesinin UYPB katman kalınlığı ve kür süresi arttıkça belirginleştiği görülmüştür.



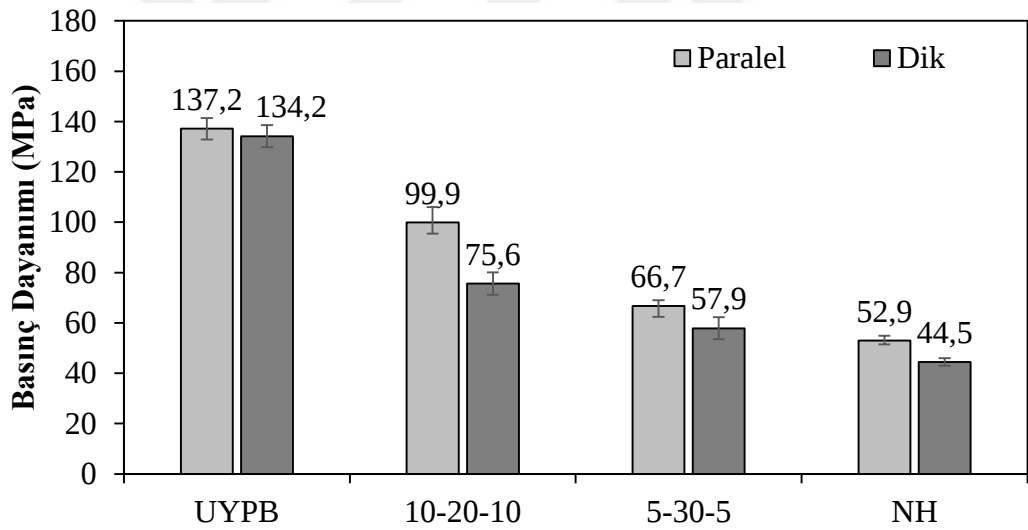
Şekil 8.3 10-20-10 Numunesinin basınç dayanımı deneyi sonrası görünümü

Aynı numunelerin katmanlara paralel ve dik kırımında 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması sırasıyla Şekil 8.4 ve Şekil 8.5’te sunulmuştur. Yalın UYPB numunesi hariç tüm numunelerin tüm yaşlarda paralel kırımında daha yüksek sonuç verdiği söylenebilir. Yalnızca yalın UYPB numunesinin dik ve paralel kırımında benzer dayanımlar elde edilmiştir. Paralel kırımında katmanlı numunelerde yüksek sonuç elde edilmesi daha önce açıklandığı üzere fiçılama etkisindeki azalma ile ilişkilendirilebilir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde tüm katmanları aynı malzeme ile yapılmış numunelerde dik yükleme yönündeki basınç dayanımının yüksek olduğu görülmektedir (Sanjayan ve diğer., 2018; Medicis ve diğer., 2022). İlgili çalışmalarda bu durumun sebebi döküm sırasında üst katmanların alt katmanları sıkıştırarak daha yoğun bir yapı ortaya çıkarması ve aderans ile açıklanmaktadır. Bir diğer yandan, katmanların farklı malzeme ile üretilmesi durumunda dış katmanın çekme dayanımında önem kazandığı söylenebilir (Toader ve diğer., 2017). Bu durum, yazarlar tarafından dayanımı yüksek olan katmanın düşük dayanımlı olan katmandaki çatlakları durdurması ile açıklanmıştır. Benzer şekilde bu çalışmada UYPB

katmanlarının çekirdek bölgesinde oluşan çatlakların yan yüzeylere geçişini sınırlandırdığı ve fıçılama etkisini azalttığı söylenebilir.



Şekil 8.1 Katmanlara paralel ve dik kırım durumunda 7 günlük basınç dayanımları

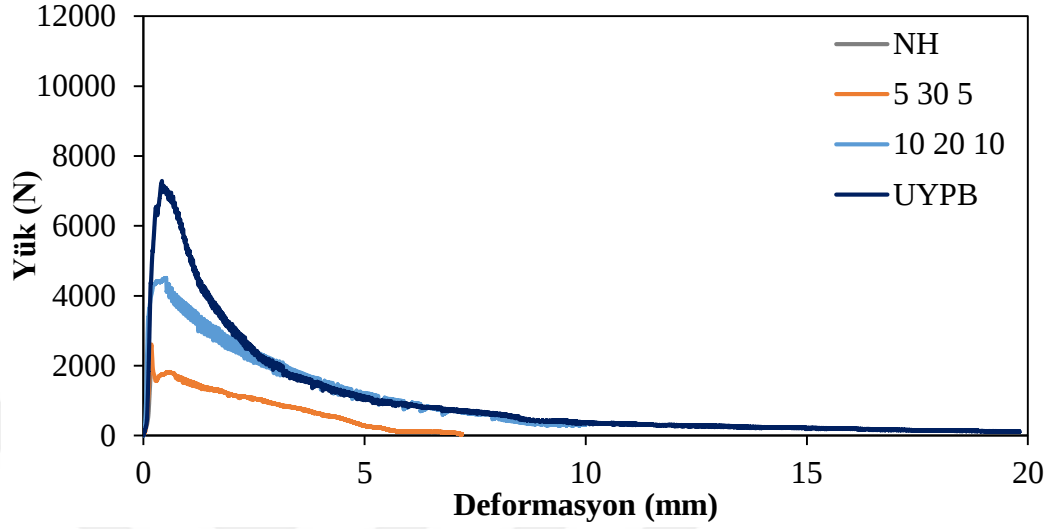


Şekil 8.2 Katmanlara paralel ve dik kırım durumunda 28 günlük basınç dayanımları

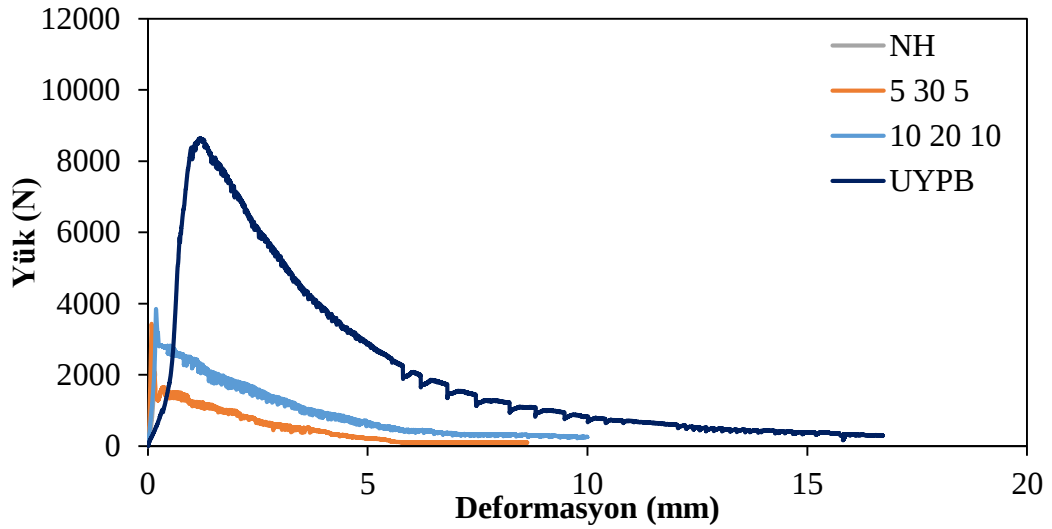
## 8.2 Eğilme Dayanımı

Yalın UYPFB, 5-30-5 ve 10-20-10 numunelerinin 7 günlük eğilme davranışları paralel ve dik yükleme durumlarında sırasıyla Şekil 8.6 ve Şekil 8.7’de ve 28 günlük eğilme davranışları paralel ve dik yükleme durumlarında Şekil 8.8 ve Şekil 8.9’da verilmiştir. NH hariç tüm numunelerin deformasyon yumuşaması yaptığı görülmektedir. Bu durum UYPB içeren üç karışımda da kritik lif oranının altında

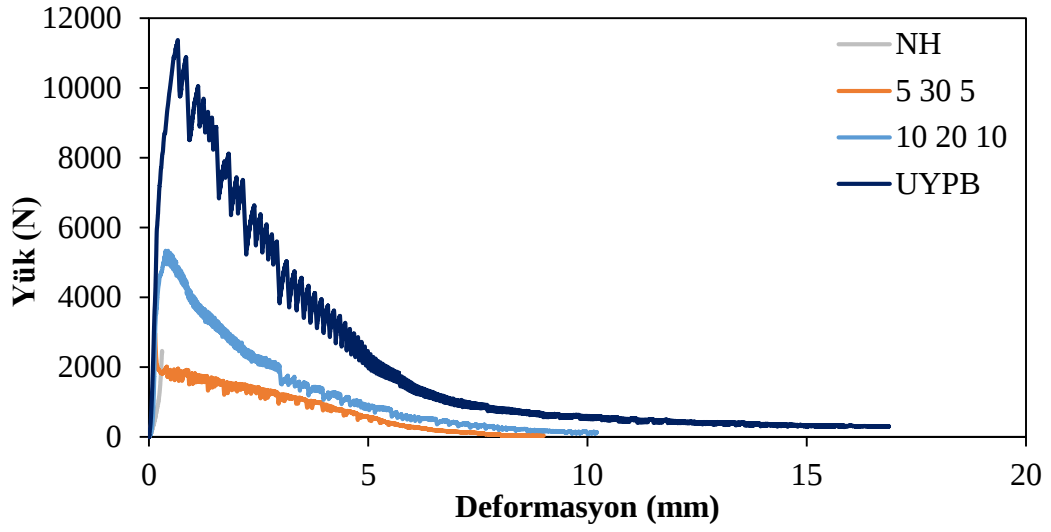
kalındığını göstermektedir. Oldukça küçük bir katman boyutunda dahi (5-30-5) NH numunesine göre çok daha yüksek deformasyon seviyelerine ulaşılması mekanik açıdan katmanlı beton uygulamasının faydalarını ortaya koymaktadır.



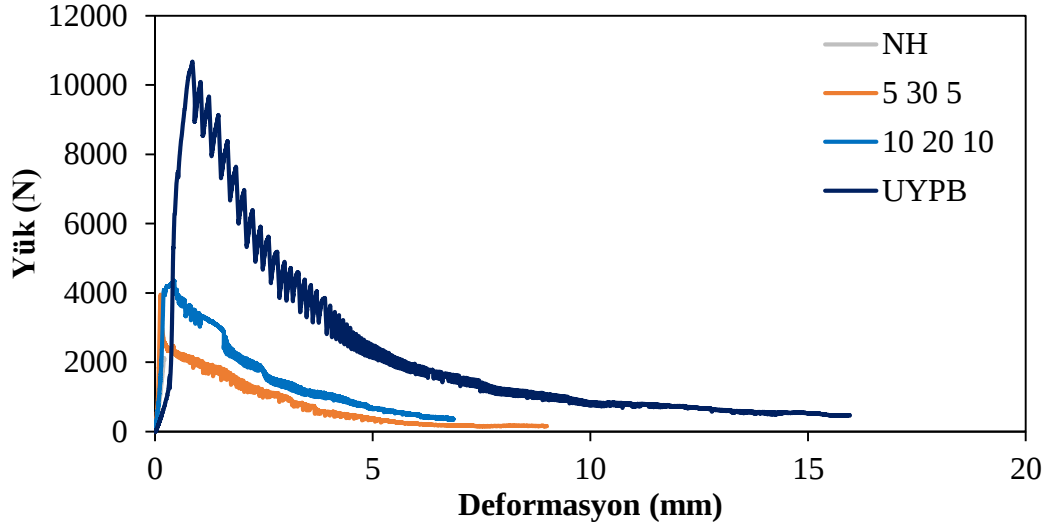
Şekil 8.3 Paralel yükleme durumunda 7 günlük numunelerin karşılaştırılması



Şekil 8.4 Dik yükleme durumunda 7 günlük numunelerin karşılaştırılması



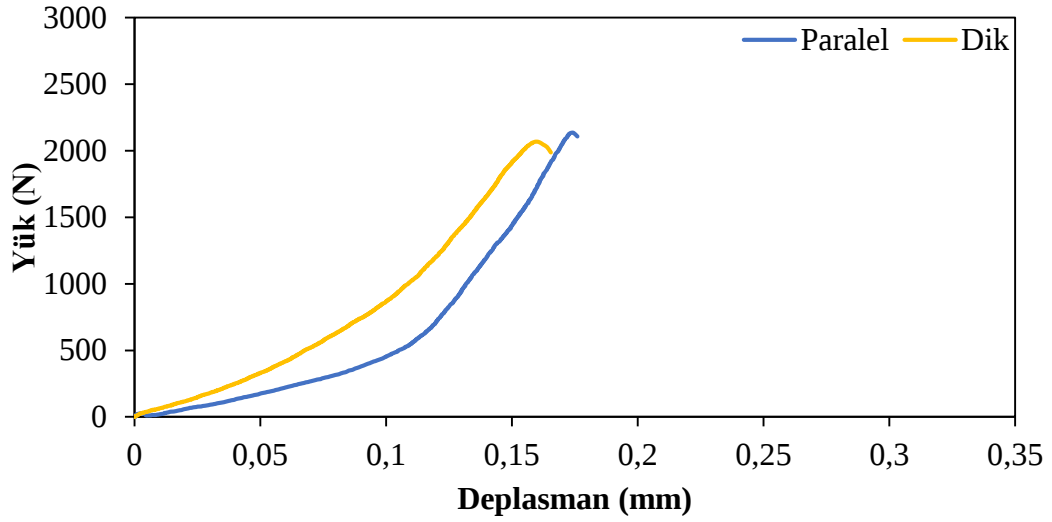
Şekil 8.5 Paralel yükleme durumunda 28 günlük numunelerin karşılaştırılması



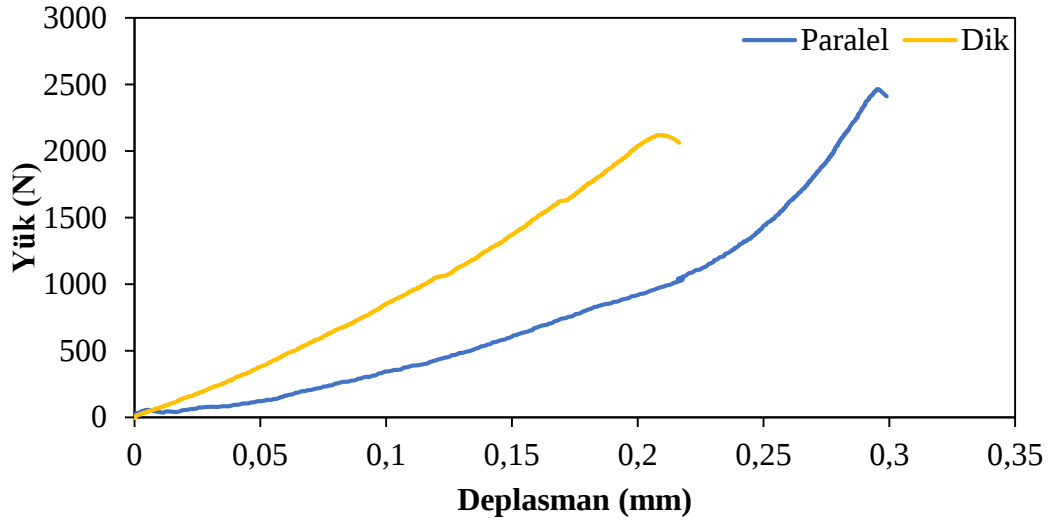
Şekil 8.6 Dik yükleme durumunda 28 günlük numunelerin karşılaştırılması

Şekil 8.10 ve Şekil 8.11’de görüldüğü gibi normal harç karışımlarının taşıdığı yük 7 günlük su kürü sonrası paralel yükleme halinde 2133,93 Newton, 28 günlük su kürü sonrası paralel yükleme halinde 2440,02 Newton bulunmuştur. Normal harç karışımlarının taşıdığı yük 7 günlük su kürü sonrası dik yükleme halinde 2055 Newton, 28 günlük su kürü sonrası dik yükleme halinde 2121,27 Newton bulunmuştur. Bu değer 5-30-5 ve 10-20-10 karışımlarında 5000 Newton civarındadır ancak asıl gelişme deformasyonda görülmüştür. Normal harcın gevrek şekilde kırılana kadar olan uzaması paralel yüklemede 7 günlük su kürü sonucu 0,17 mm iken, 28 günlük su kürü

sonucu 0,30 mm bulunmuştur. Dik yükleme durumunda ise 7 günde 0,15 mm uzama görülürken, 28 günde 0,21 mm uzama görülmüştür.



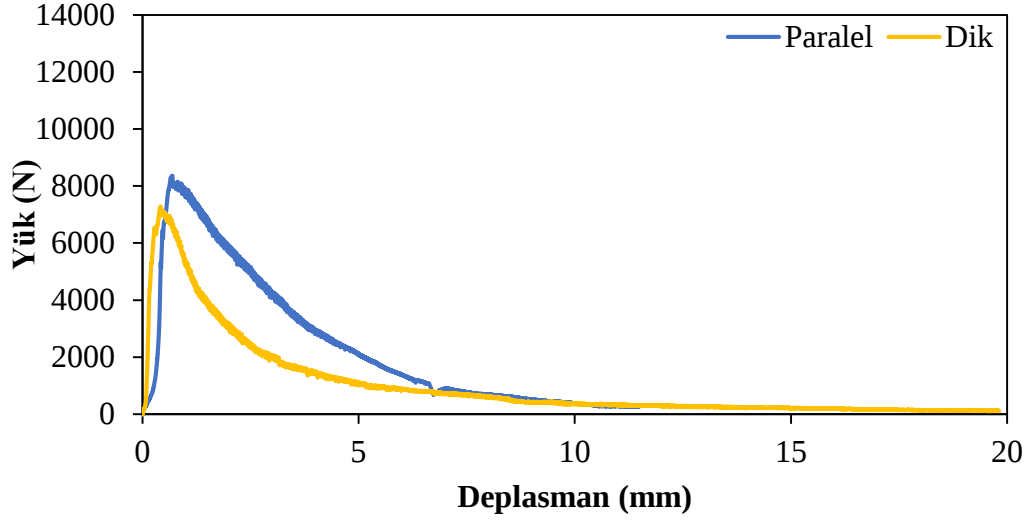
Şekil 8.7 Normal harç karışımının paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük eğilme davranışı



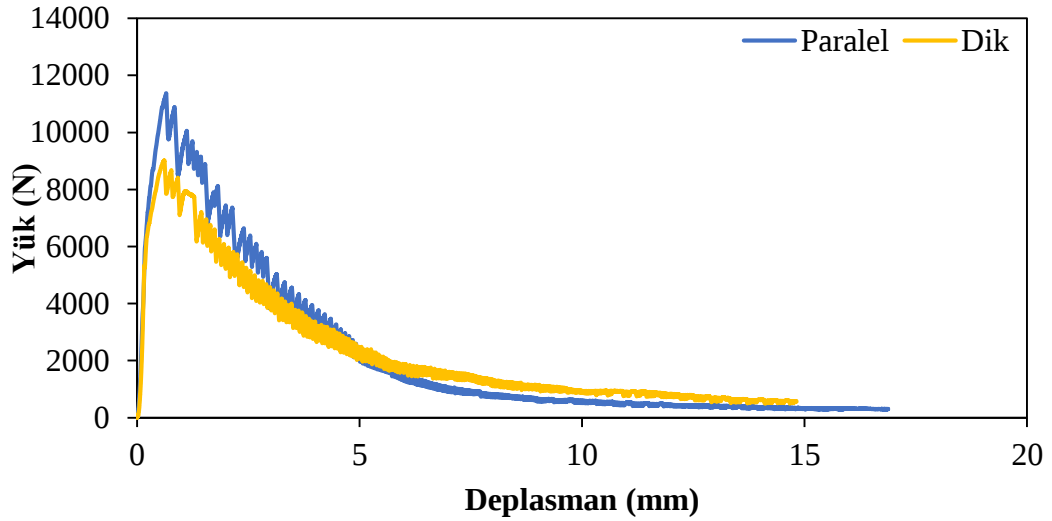
Şekil 8.8 Normal harç karışımının paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük eğilme davranışı

Yalın UYPB numunesinin 7 ve 28 günlerde paralel yükleme durumundaki eğilme davranışlarının karşılaştırılması Şekil 8.12'de ve dik yükleme durumundaki eğilme davranışlarının karşılaştırılması Şekil 8.13'te sunulmuştur. Her iki beton yaşı için de paralel yüklemede eğilme davranışının geliştiği görülmektedir. Xiao ve diğer. (2020), katmanlı betona benzer bir yapıya sahip olan üç boyutlu yazdırılmış betonda yaptıkları mekanik testlerde paralel yüklemenin dik yüklemeye göre daha yüksek dayanım

sergilediğini belirtmişlerdir. Yazarlar ayrıca yükleme yönünün değişiminden en çok eğilme dayanımının etkilendiğini de belirtmişlerdir.

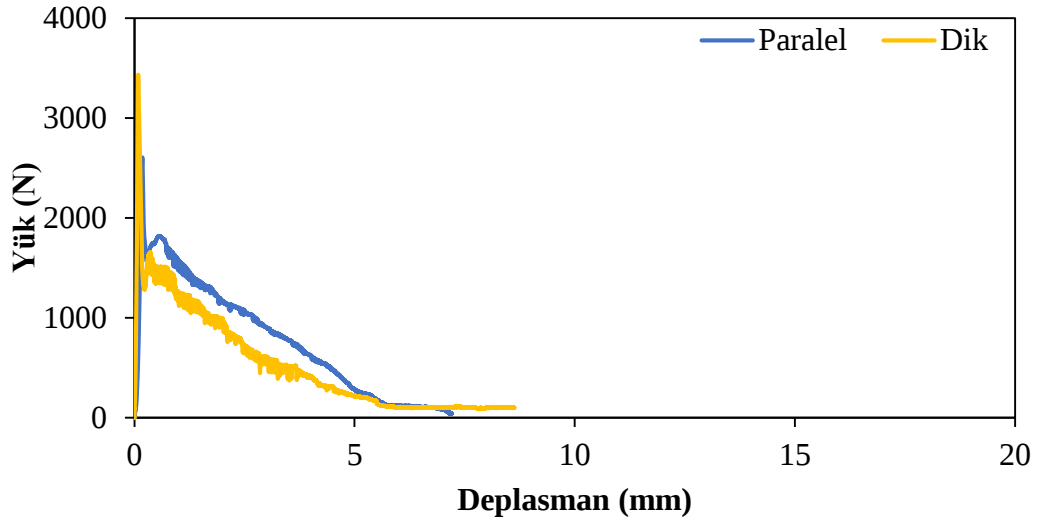


Şekil 8.9 UYPB paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük eğilme davranışı

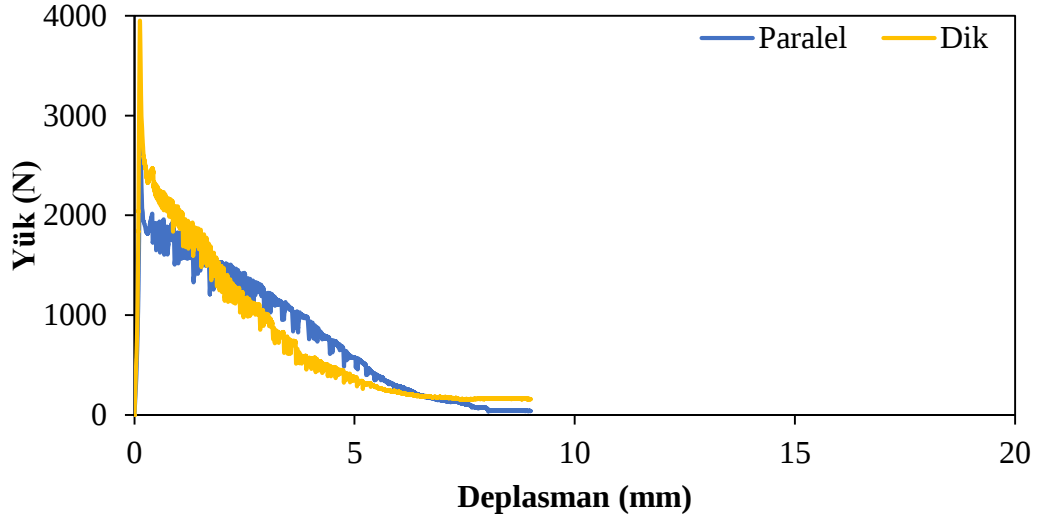


Şekil 8.10 UYPB paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük eğilme davranışı

Şekil 8.14'te 7 günlük 5-30-5 numunesinin paralel ve dik yükleme durumlarda eğilme davranışlarının karşılaştırılması, Şekil 8.15'te ise aynı karışıma ait 28 günlük dik ve paralel yükleme durumları için eğilme davranışlarının karşılaştırılması sunulmuştur.

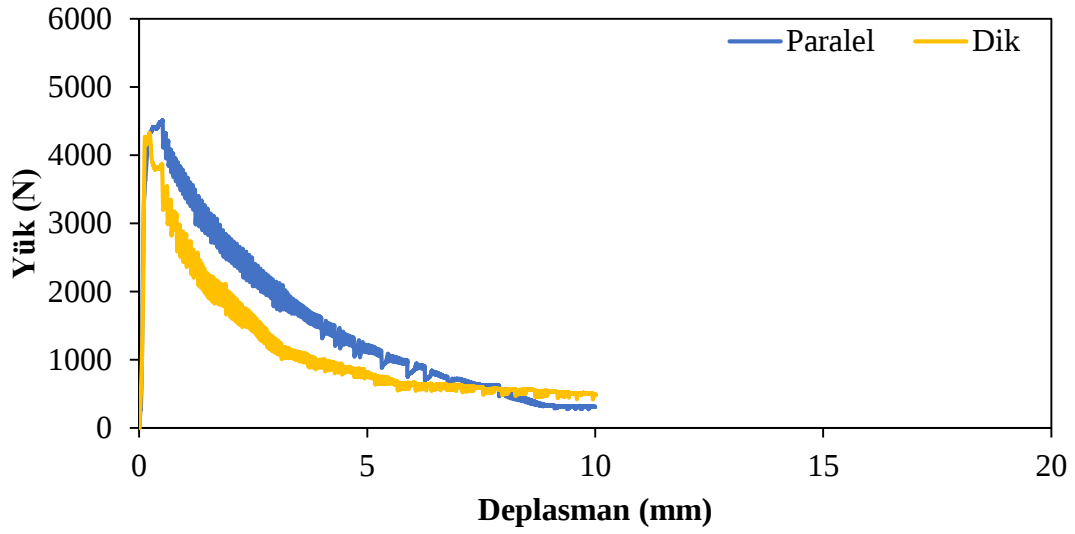


Şekil 8.11 5-30-5 paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük eğilme davranışı

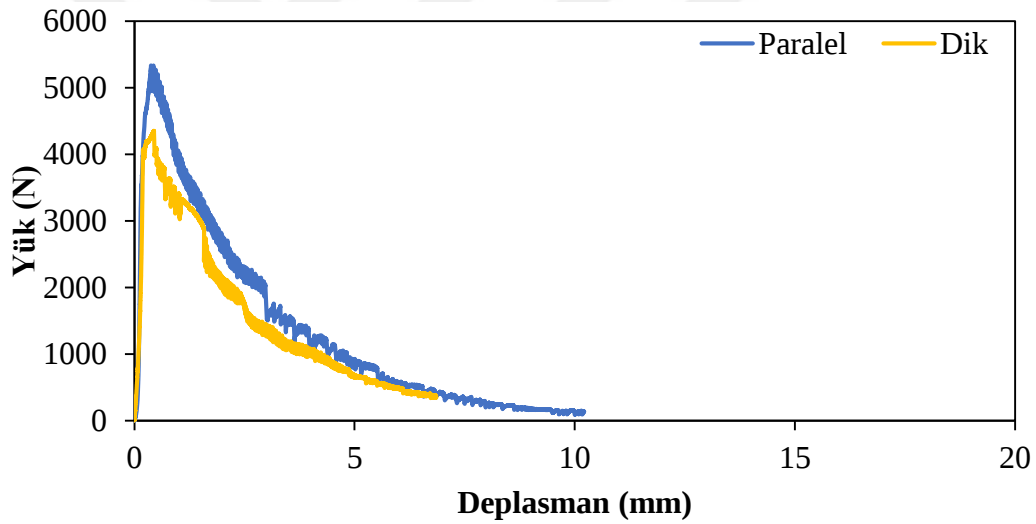


Şekil 8.12 5-30-5 paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük eğilme davranışı

10-20-10 numunesinin 7 ve 28 günlerde paralel ve dik yükleme durumlarda eğilme davranışlarının karşılaştırılması sırasıyla Şekil 8.16 ve Şekil 8.17’de sunulmuştur. Yükleme durumuna göre 7 günlük eğilme davranışlarında bir fark görülmezken, 28 günlük eğilme davranışlarında UYPB ve 5-30-5 numunelerinde olduğu gibi paralel yükleme durumunda, dik yükleme durumuna göre gelişme görülmektedir.

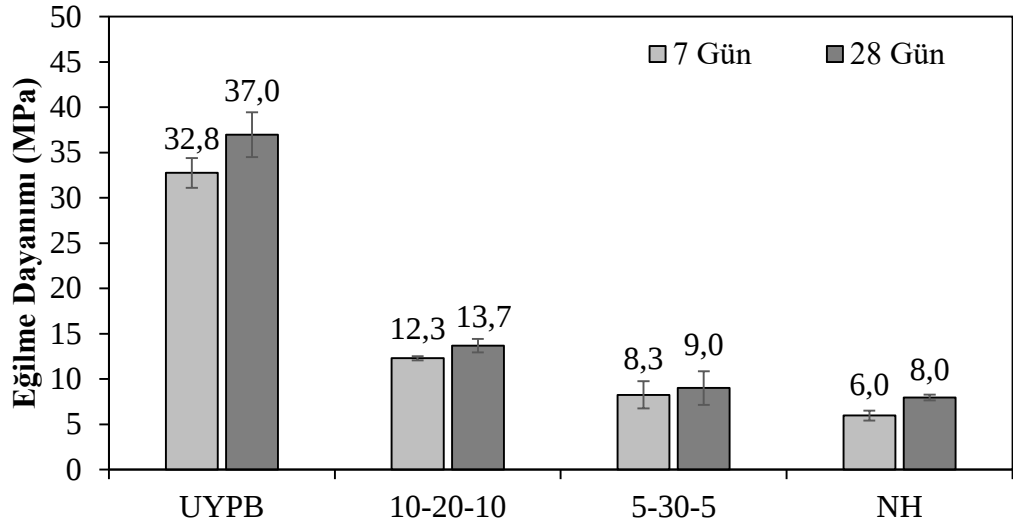


Şekil 8.13 10-20-10 paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük eğilme davranışı

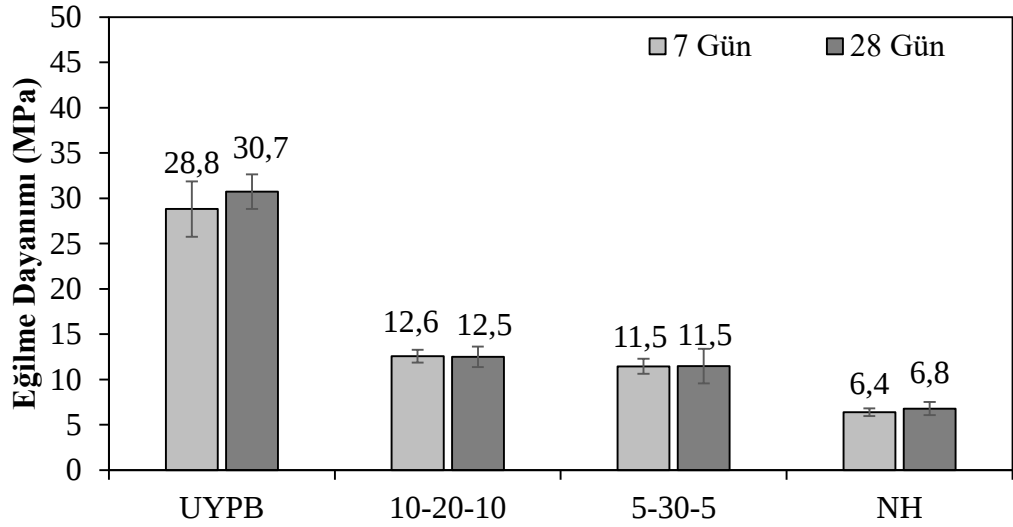


Şekil 8.14 10-20-10 paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük eğilme davranışı

Eğilme grafiklerinin maksimum yüklerinden elde edilen paralel ve dik yükleme durumundaki 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı verileri Şekil 8.18 ve Şekil 8.19’da sunulmuştur. Beklenildiği üzere yalın UYPB’nin diğer numunelere göre çok daha yüksek yük değerine ulaştığı ve katman kalınlığının artmasıyla maksimum yükün arttığı görülmektedir. Ayrıca, UYPB hariç diğer tüm numunelerde her iki yükleme durumu için de 7 günden 28 güne geçerken kayda değer bir artış yaşanmadığı söylenebilir.



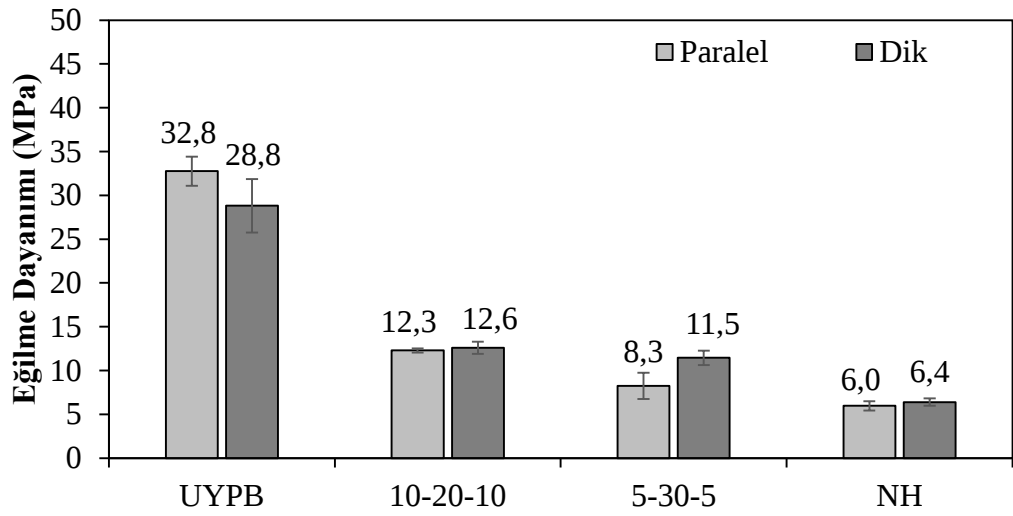
Şekil 8.15 Paralel yükleme durumunda 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları



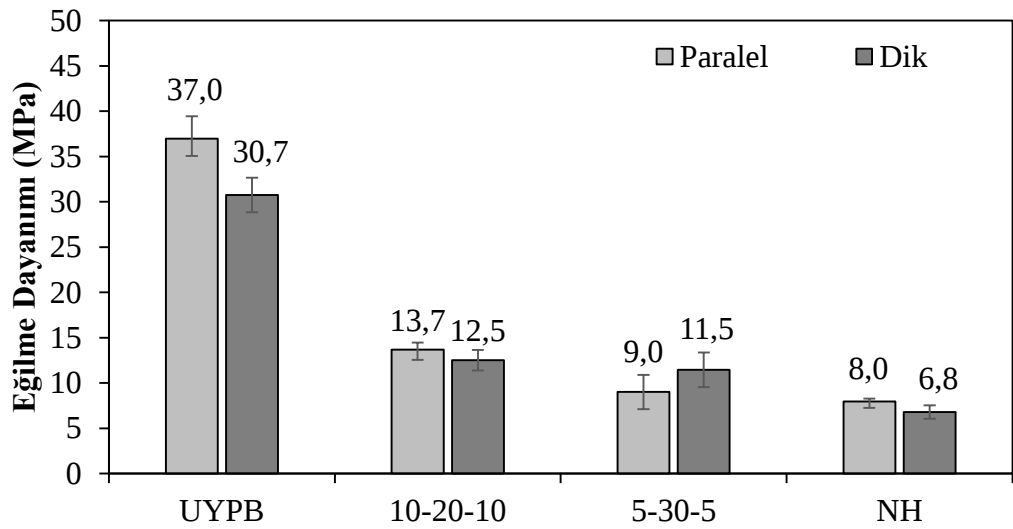
Şekil 8.16 Dik yükleme durumunda 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları

Paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük eğilme dayanımlarının karşılaştırılması Şekil 8.20’de, 28 günlük eğilme dayanımlarının karşılaştırması ise Şekil 8.21’de sunulmuştur. Paralel ve dik yükleme durumuna göre yapılan karşılaştırmada her iki kür süresi için de yalnızca 5-30-5 numunesinin dik yükleme durumunda paralele göre bir miktar artış gösterdiği söylenebilir. NH ve 10-20-10 numuneleri yükleme durumundan etkilenmemiş ve benzer dayanım sergilemiştir. UYPB numunesinin her iki kür süresi için de paralel yükleme durumunda daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Sridhar ve Prasad (2019), çekme bölgesindeki katmanların eğilme davranışına katkısının daha fazla olduğunu belirtmiştir. UYPB

katman kalınlığı arttıkça eğilme dayanımları artmaktadır. Benzer şekilde katmanlara dik yüklemede çekme bölgesinde eğilme dayanımı yüksek UYPB katmanı kalınlığındaki artışın kompozit dayanımına katkıda bulunduğu söylenebilir. Paralel yükleme durumunda dik yükleme durumuna göre çekme bölgesi içinde kalan UYPB katmanını kesitinin atalet momenti artışı da eğilme dayanımlarına katkı sunabilir (örneğin 10-20-10 kompoziti durumu). Kompozitlerin eğilme dayanımları, UYPB katmanlarının yukarıda sıralanan iki etkisine bağlı olarak değişmektedir.



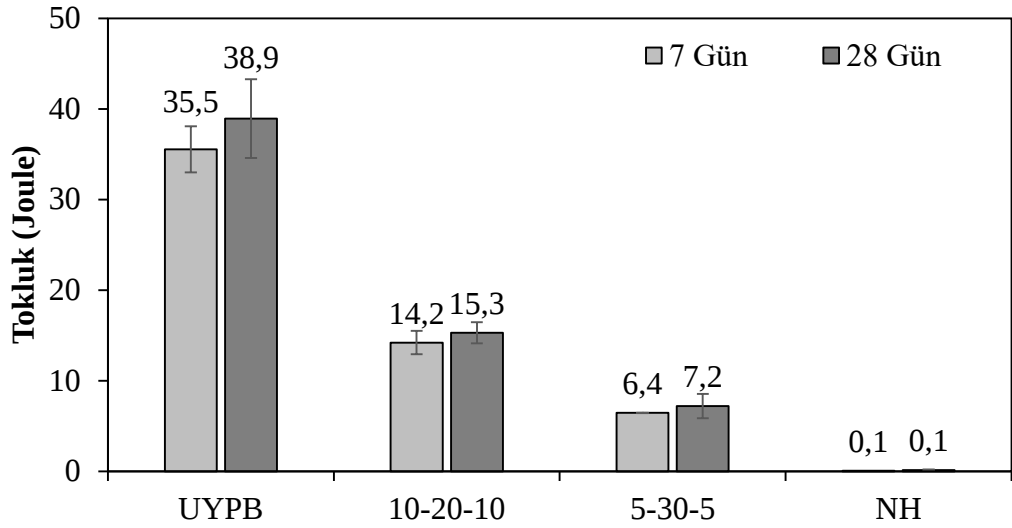
Şekil 8.17 Paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük eğilme dayanımları



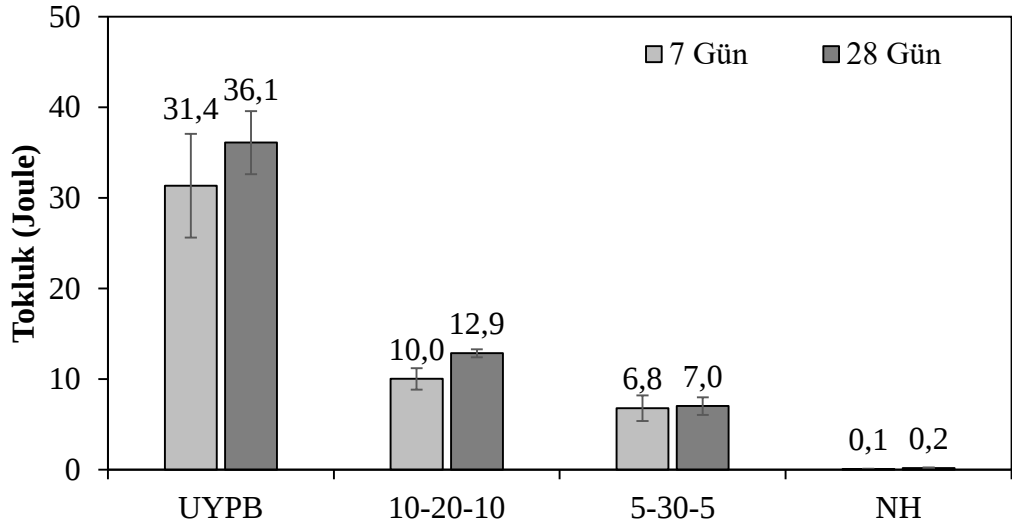
Şekil 8.18 Paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük eğilme dayanımları

Eğilme grafiklerinin altında kalan alandan elde edilen tokluk değerleri Şekil 8.22, Şekil 8.23, Şekil 8.24 ve Şekil 8.25'te sunulmuştur. Numunelerin yaşlarına göre

karşılaştırma yapılan Şekil 8.22, Şekil 8.23'te beklendiği üzere yaş artışıyla beraber tokluk değerleri de bir miktar artmıştır. Ayrıca, NH numunesi lif içermemesi sebebiyle diğer numunelere göre oldukça düşük tokluk değerine sahiptir.

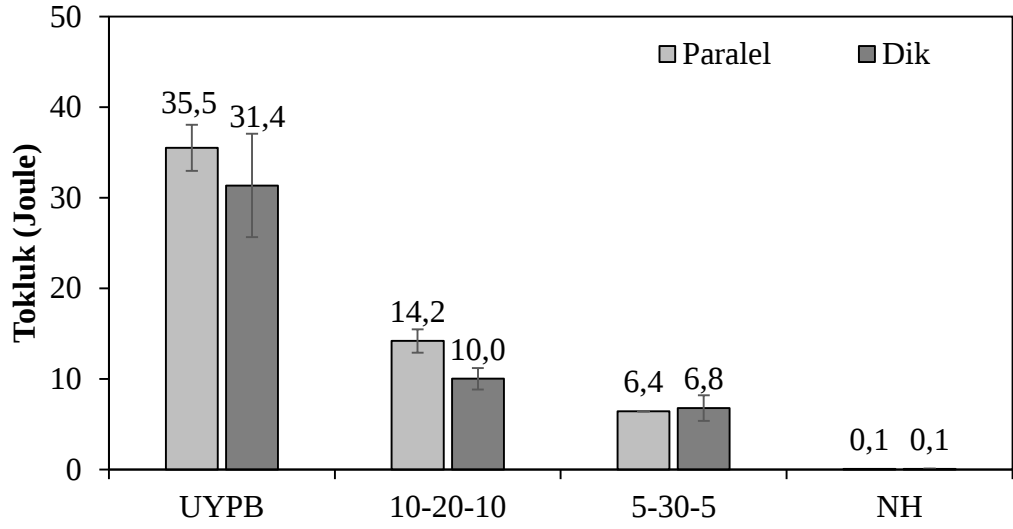


Şekil 8.19 Paralel yükleme durumunda 7 ve 28 günlük numunelerin tokluk değerleri

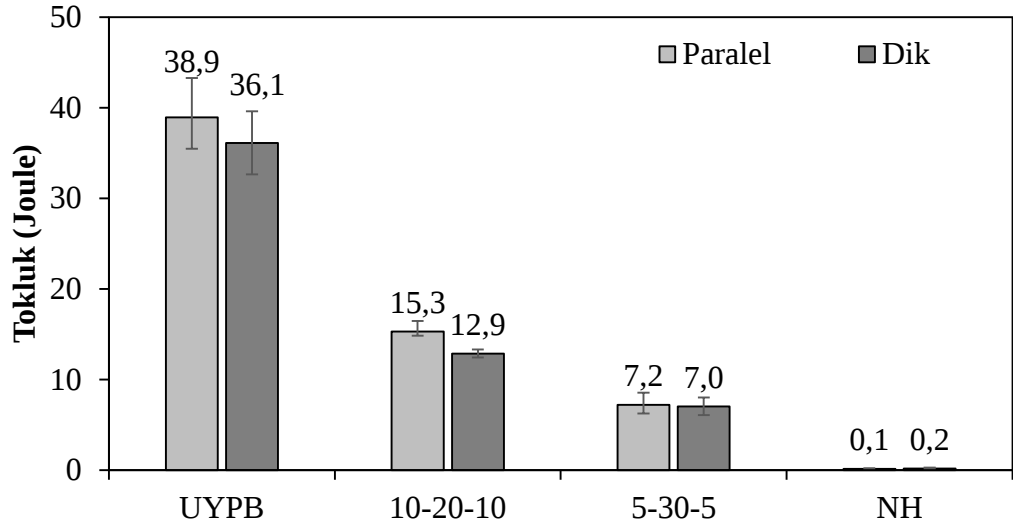


Şekil 8.20 Dik yükleme durumunda 7 ve 28 günlük numunelerin tokluk değerleri

Numunelerin dik veya paralel yüklenme durumunun karşılaştırıldığı Şekil 8.24 ve Şekil 8.25'te UYPB ve 10-20-10 numuneleri için paralel yükleme durumunda tokluğun arttığı söylenebilir. Katmanlara paralel yükleme durumunda kompozit numunelerdeki UYPB katmanlarının uzun kenarlarının yükleme doğrultusunda konumlanması sebebiyle eğilme çatlağının lifler tarafından daha uzun bir yol boyunca köprülendiği söylenebilir.



Şekil 8.21 Paralel ve dik yükleme durumunda 7 günlük numunelerin tokluk değerleri



Şekil 8.22 Paralel ve dik yükleme durumunda 28 günlük numunelerin tokluk değerleri

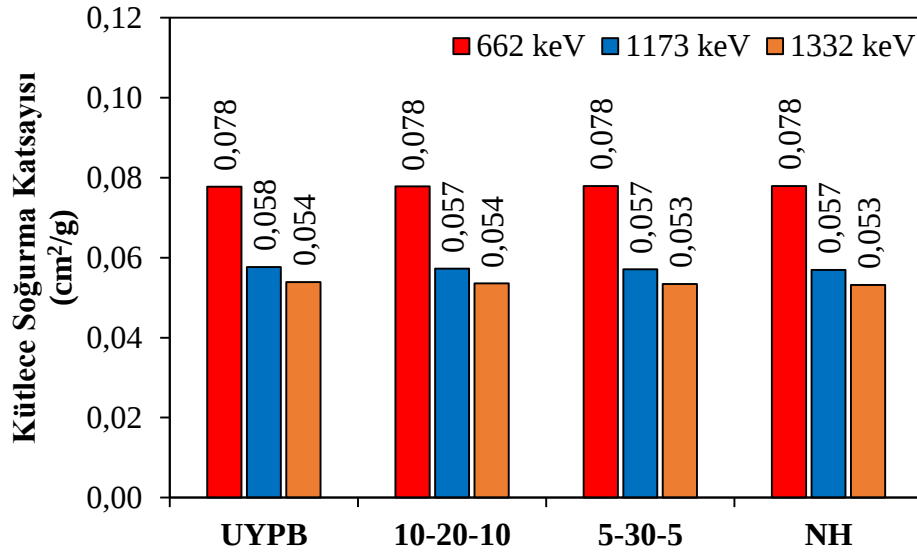
### 8.3 Radyasyon Soğurma Performansı

Tüm karışımların yoğunluk, su emme ve boşluk oranı değerleri Tablo 8.1’de sunulmuştur. Karışımın içerdiği NH miktarındaki artışla boşluk oranı ve su emme oranında artış meydana gelmiştir. Bu durum UYPB’nin yoğun bir iç yapıya sahip olması nedeniyle anlaşılabilir. Ayrıca benzer şekilde, karışımın içerdiği NH oranındaki artışla yoğunluk da düşmüştür.

Tablo 8.1 Karışımların yoğunluk, su emme ve boşluk oranları

| Karışım  | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Su Emme (%) | Boşluk Oranı (%) |
|----------|-------------------------------|-------------|------------------|
| UYPB     | 2,782                         | 2,1         | 5,9              |
| 10-20-10 | 2,770                         | 3,6         | 9,9              |
| 5-30-5   | 2,766                         | 4,1         | 11,2             |
| NH       | 2,757                         | 5,0         | 13,9             |

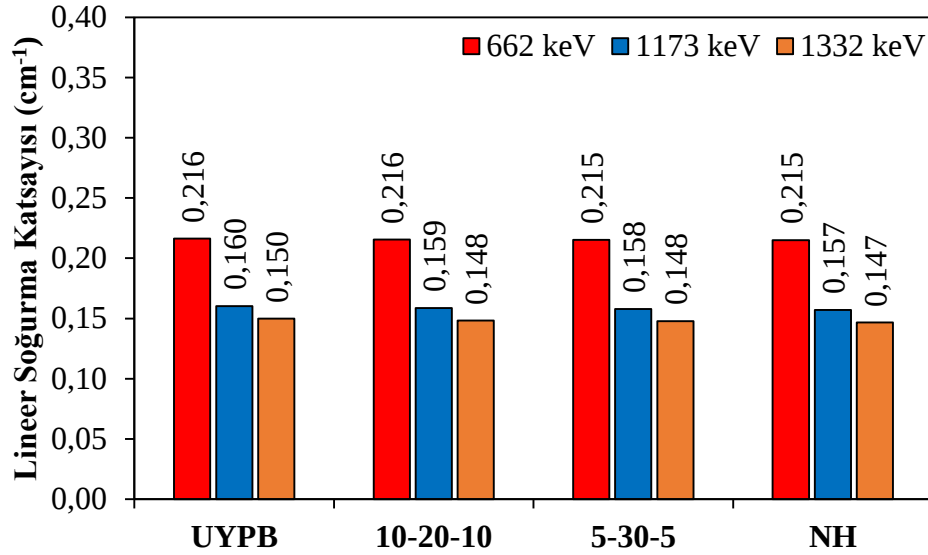
XCOM'dan elde edilen kütlece soğurma katsayıları Şekil 8.26'da sunulmuştur. Enerji seviyelerinin artmasıyla tüm karışımlarda kütlece soğurma katsayısında azalma görülmektedir. Yalnızca 662 keV enerji seviyesi için karışımdaki UYPB oranının artmasıyla kütlece soğurma katsayısı azalırken, 1173 keV ve 1332 keV enerji seviyeleri için bu durum tam tersi şeklindedir.



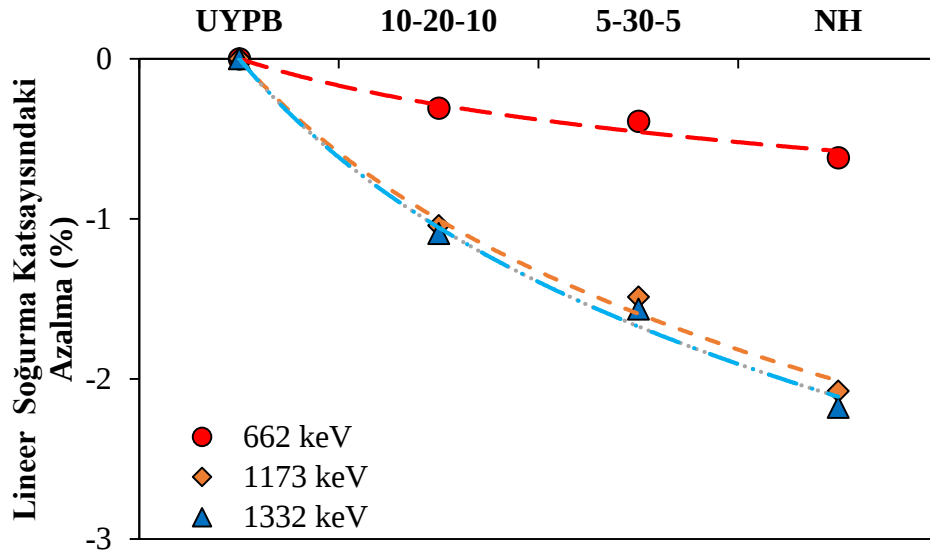
Şekil 8.26 XCOM'dan alınan kütlece soğurma katsayıları

Kütlece soğurma katsayılarının numunelerin yoğunluklarıyla çarpılmasıyla elde edilen lineer soğurma katsayıları Şekil 8.27'de sunulmuştur. Kütlece soğurma katsayılarından farklı olarak, tüm karışımlar ve tüm enerji seviyelerinde karışımdaki UYPB oranının artmasıyla lineer soğurma katsayıları da artmıştır. Lineer soğurma katsayısındaki yüzdece azalma Şekil 8.28'de sunulmuştur. Bu durum UYPB'nin yoğunluğunun NH'den yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla,

radasyon soğurma performansı açısından karışım bileşenlerinin öneminin yanı sıra karışımın yoğunluğunun önemi de görülmektedir. Ayrıca, bulunan lineer soğurma katsayılarının literatürde barit agregası kullanılan karışımlar ile elde edilen lineer soğurma katsayıları ile oldukça benzer olduğu görülmektedir (Shirmardi ve diğer., 2013; Şensoy ve Gökçe, 2020)



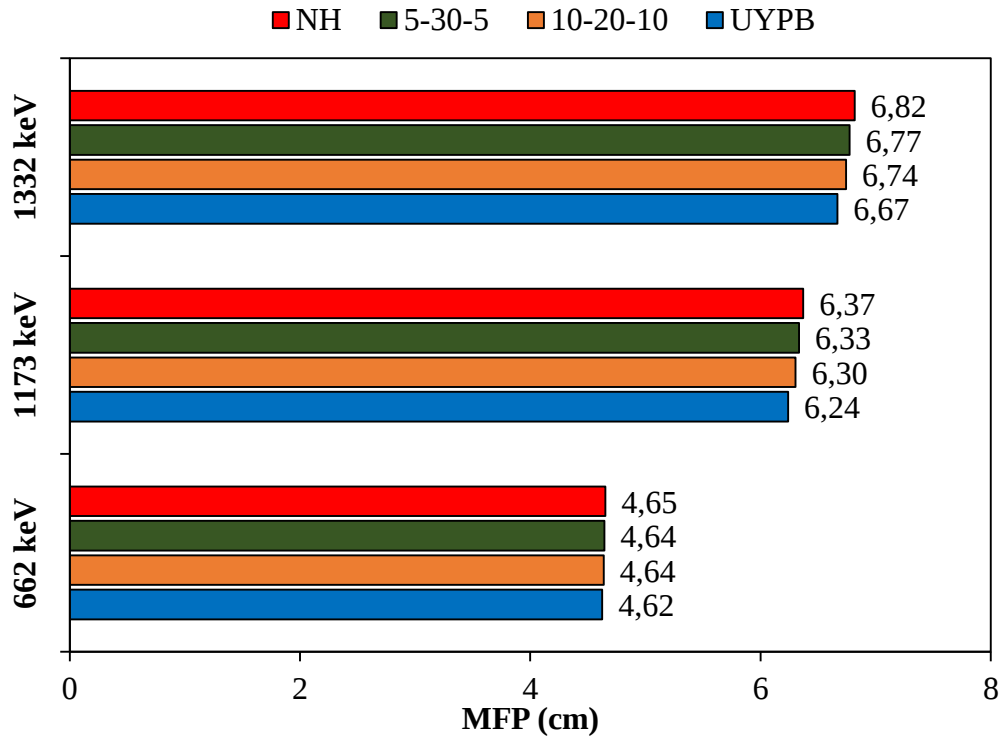
Şekil 8.27 Lineer soğurma katsayıları



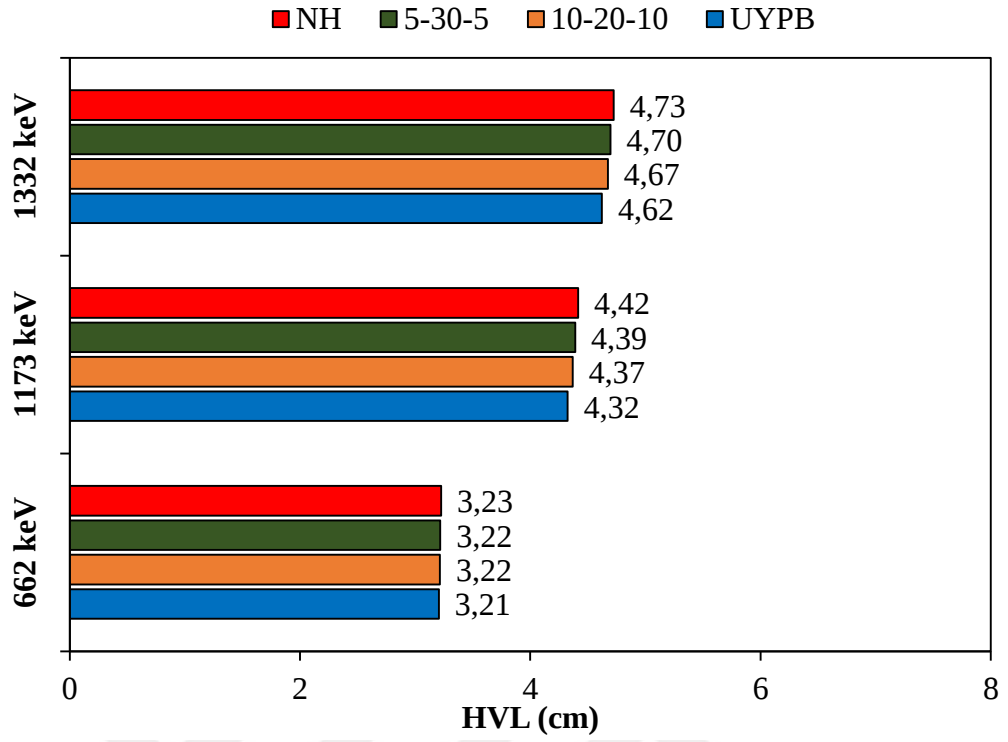
Şekil 8.28 Lineer soğurma katsayılarındaki azalma

Gama radyasyonun ilk değerinin, yarıya düştüğü kalınlığa yarı değerli katman (HVL), onda birine düştüğü kalınlığa onuncu değerli katman (TVL) denir. Foton

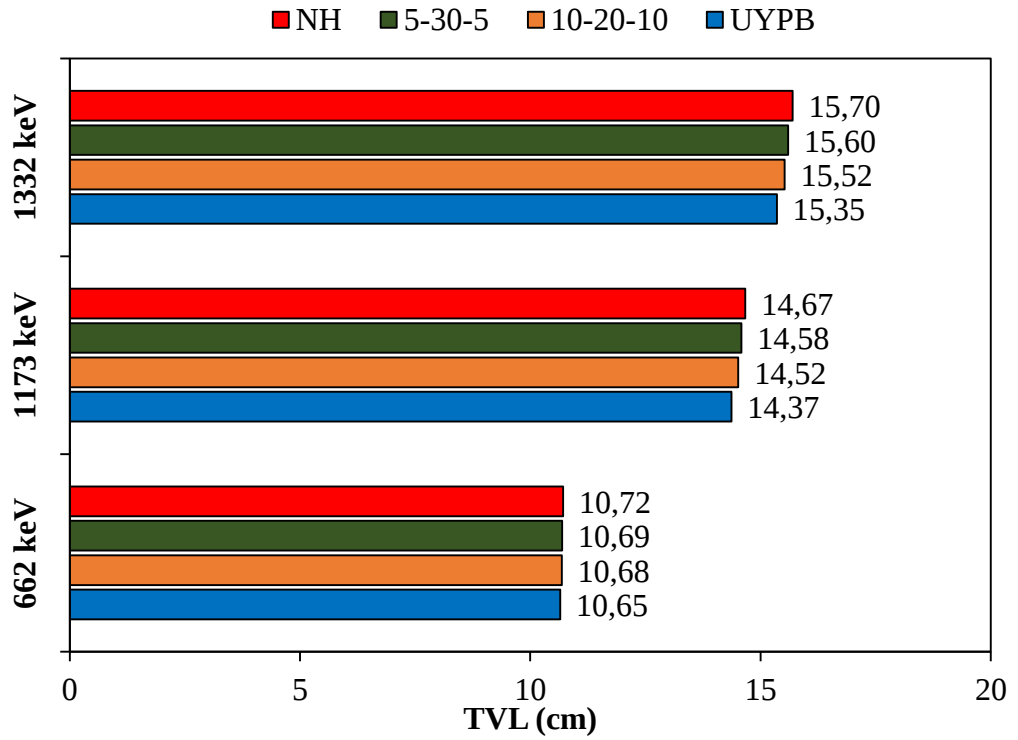
enerjisinin numunede yaşadığı çarpışmalar arasında hareket eden bir molekülün kat ettiği ortalama mesafeye ise ortalama yol değeri (MFP) denir. Bu değerler zırhlama malzemelerinin gama ışınlarından ne kadar etkilendiğini belirlemek için kullanılır ve teorik olarak hesaplanabilir. HVL değeri TVL değerinin 0,301 katı olarak hesaplanabilir. Şekil 8.29, Şekil 8.30 ve Şekil 8.31’de görüldüğü üzere MFP, HVL ve TVL değerleri uygulanan foton enerjisinin artmasıyla artış göstermektedir. Karışımın içerdiği UYPB oranının artmasıyla fotonun enerjisinin düşeceği mesafe çok az bir miktar da olsa kısalmıştır. Dolayısıyla, UYPB kullanımı ile daha küçük kesitli zırhlama malzemeleri hazırlanabileceği veya aynı kesit kalınlığında koruyuculuğun arttırılabileceği çıkarımı yapılabilir.



Şekil 8.29 Ortalama yol değerleri



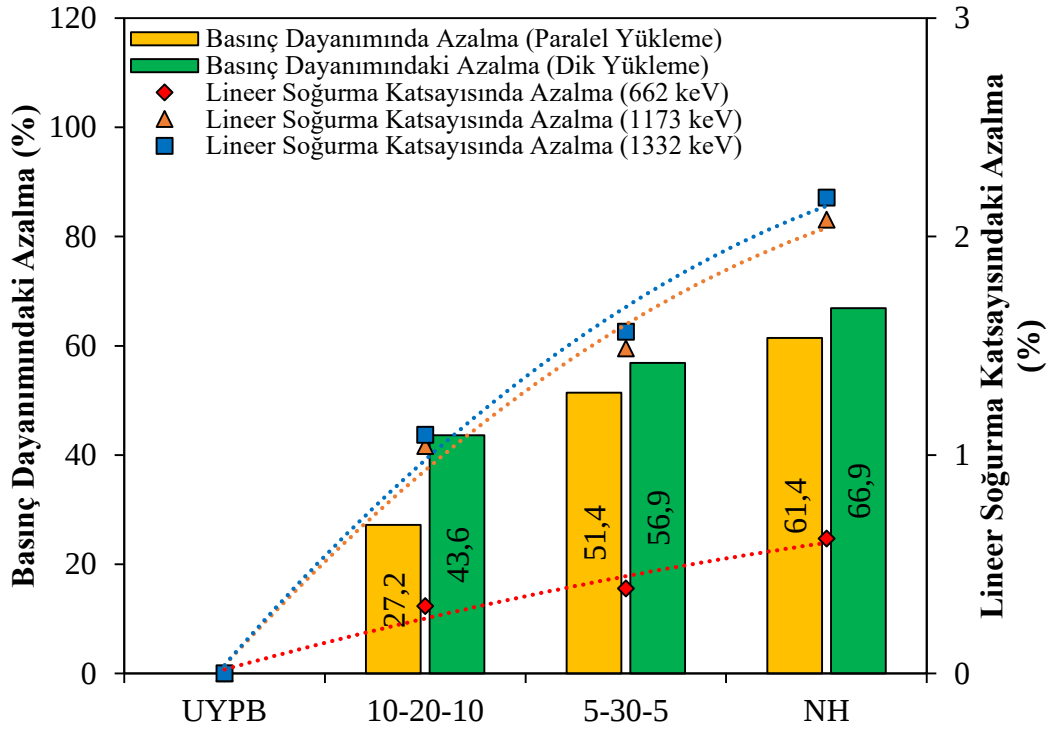
Şekil 8.30 Yarı değerli katman değerleri



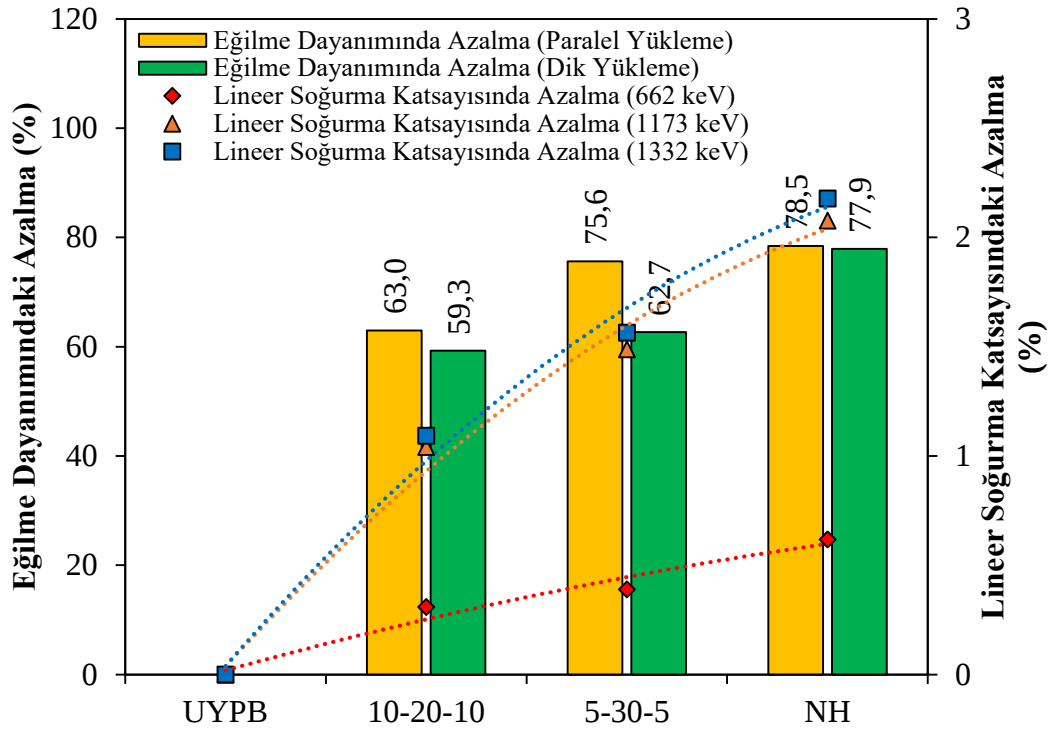
Şekil 8.31 Onuncu değerli katman değerleri

#### 8.4 Radyasyon Soğurma Performansı ile Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkiler

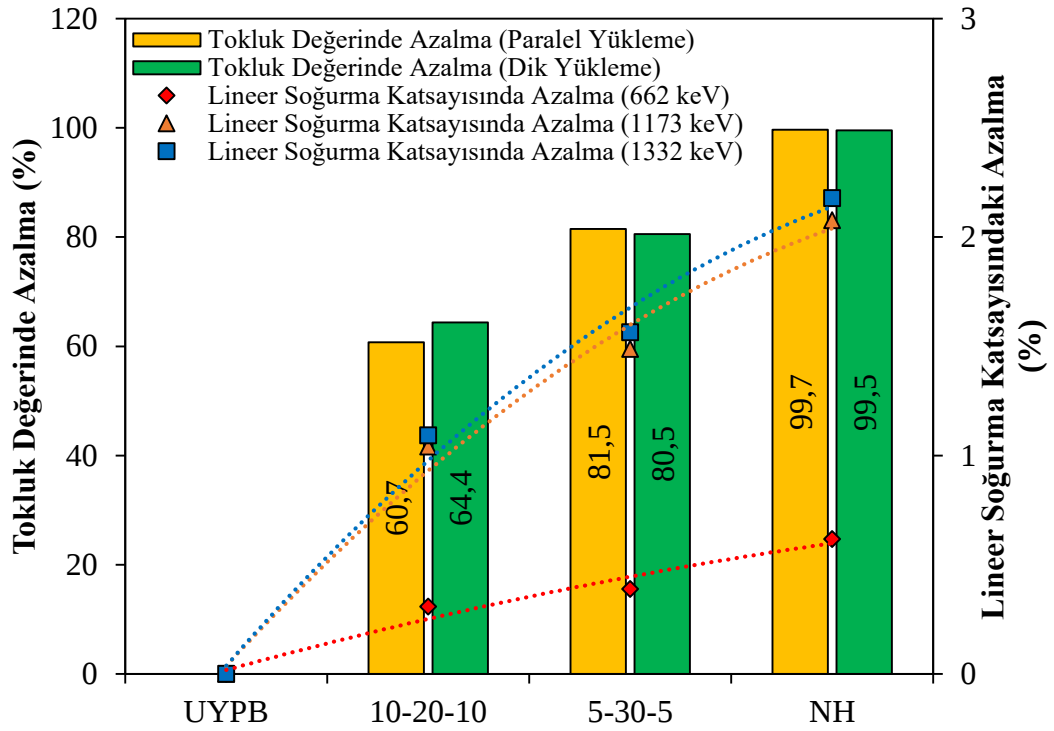
Lineer soğurma katsayısının UYPB'ye göre diğer karışımlarda gösterdiği azalma ile 28 günlük verilerden elde edilen UYPB'ye göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk değerlerindeki azalmanın ilişkisi sırasıyla Şekil 8.32, Şekil 8.33 ve Şekil 8.34'te sunulmuştur. Tüm karışımlarda lineer soğurma katsayısında kayda değer bir değişim olmadığı söylenebilir. Diğer yandan, karışımdaki UYPB oranının azalmasıyla basınç dayanımında %66,9'a kadar, eğilme dayanımında %78,5'e kadar ve toklukta %99,7'a kadar rölatif düşüşler olmuştur. Bu noktada radyasyon soğurması istenen yapıda aranacak mekanik özelliklerin baskın olduğu görülmektedir. Bir diğer deyişle, yalnızca soğurma performansı değerlendirilecekse NH karışımı radyasyon soğurma açısından gerek ulaşılabilirlik gerek maliyet açısından uygun olacaktır. Ancak, eğer mekanik özellikler de değerlendirmeye alınacaksa UYPB veya katmanlı karışımların yüksek süneklik, yüksek mikro çatlak hassasiyeti, çatlak oluşuktan sonra ilerlemesinin engellenmesi gibi ek faydaları nedeniyle öne çıktığı söylenebilir.



Şekil 8.32 Lineer soğurma katsayılarının basınç dayanımı ile ilişkisi



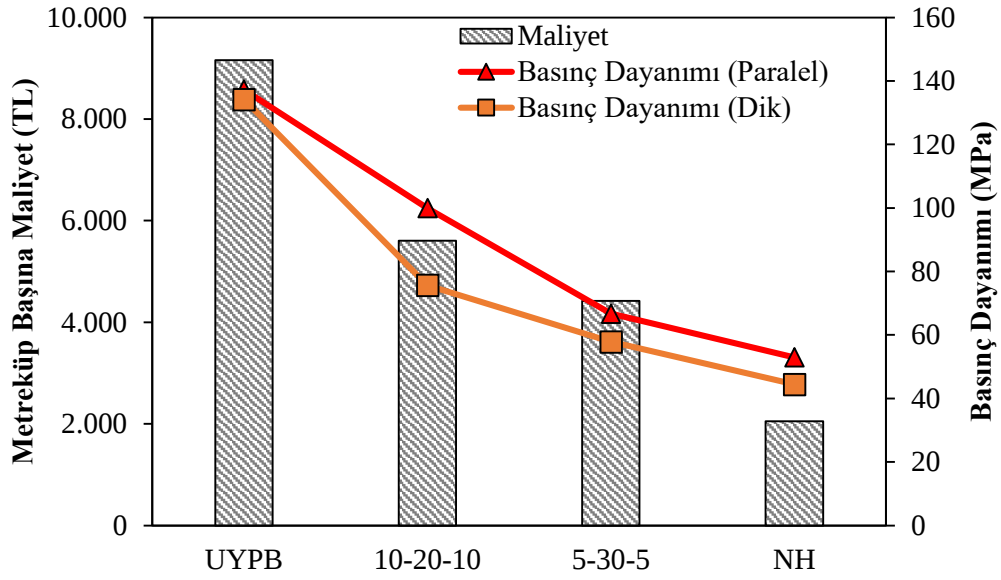
Şekil 8.33 Lineer soğurma katsayılarının eğilme dayanımı ile ilişkisi



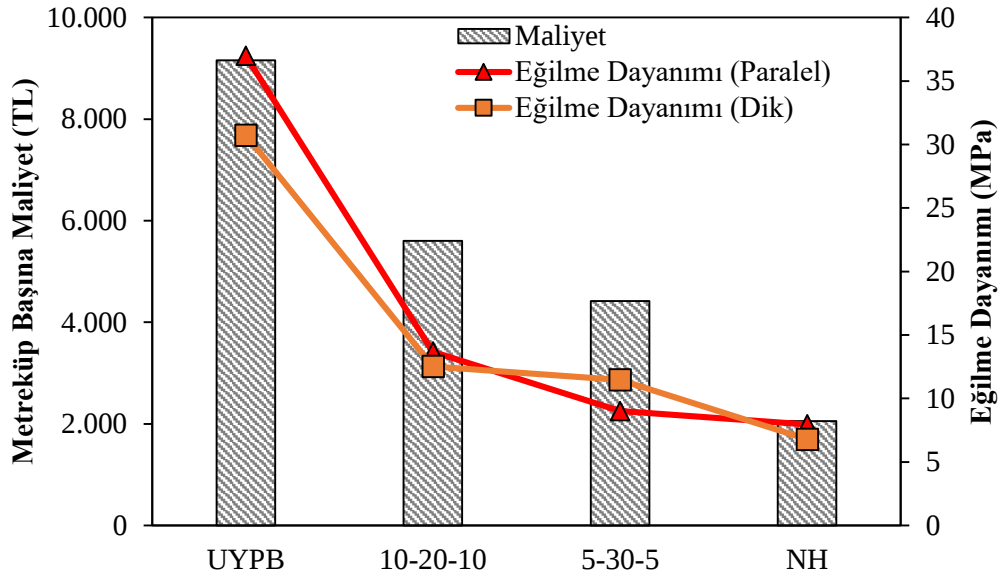
Şekil 8.34 Lineer soğurma katsayılarının tokluk ile ilişkisi

## 8.5 Maliyet Analizi

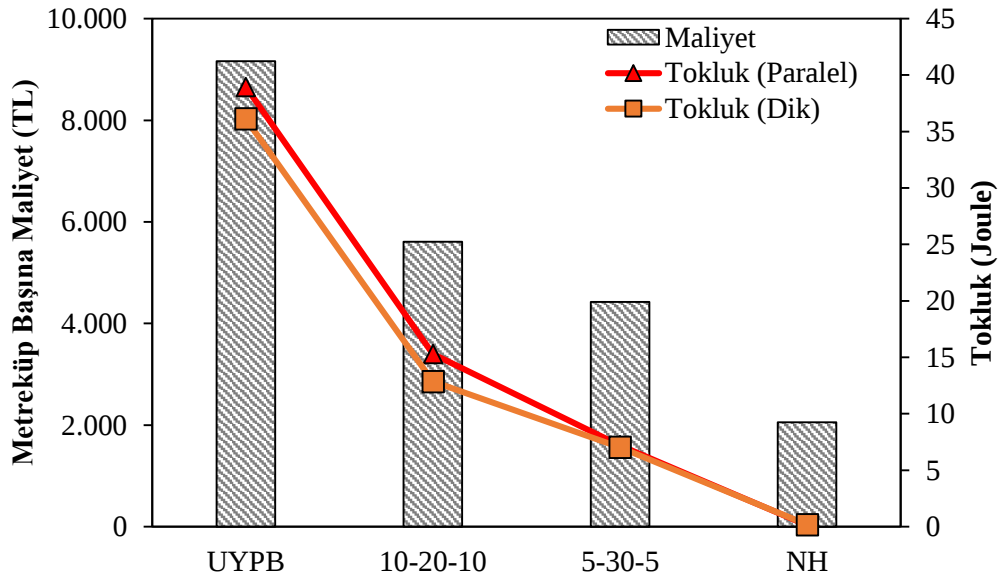
Piyasadan alınan veriler ile hazırlanan metreküp başına yaklaşık maliyet (TL- ₺) ile 28 günlük verilerden elde edilen basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk değerlerinin ilişkisi sırasıyla Şekil 8.35, Şekil 8.36 ve Şekil 8.37’de sunulmuştur. Basınç dayanımının maliyete paralel olarak azaldığı görülmektedir. Bir diğer yandan, eğilme dayanımında UYPB karışımından sonra yaşanan keskin düşüş ile maliyette yaşanan düşüş benzer değildir. NH karışımının tokluk bakımından çok zayıf performans sergilediği ve katmanlı karışımların nispeten maliyeti ile tokluk değerlerinin oransal olduğu söylenebilir.



Şekil 8.35 Basınç dayanımının metreküp başına maliyet ile ilişkisi



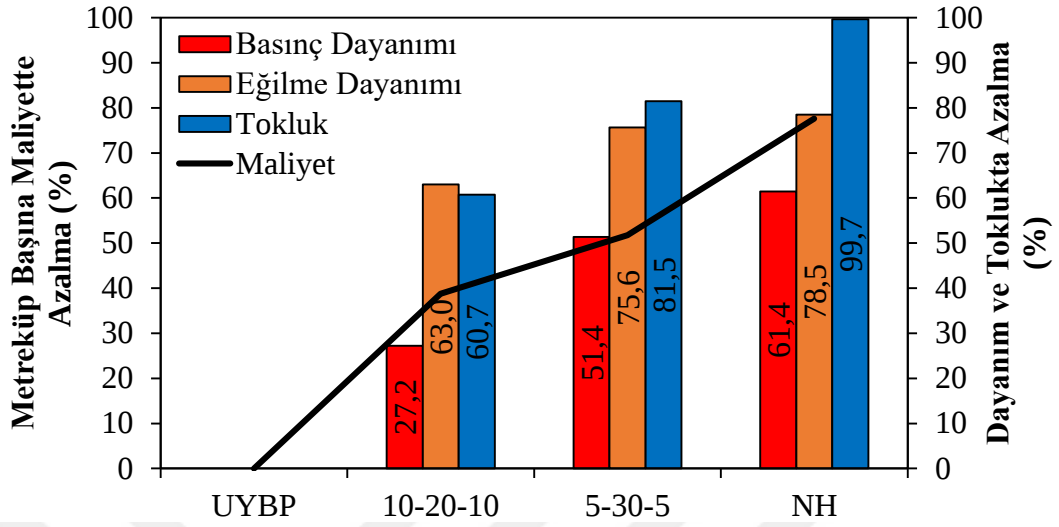
Şekil 8.36 Eğilme dayanımının metreküp başına maliyet ile ilişkisi



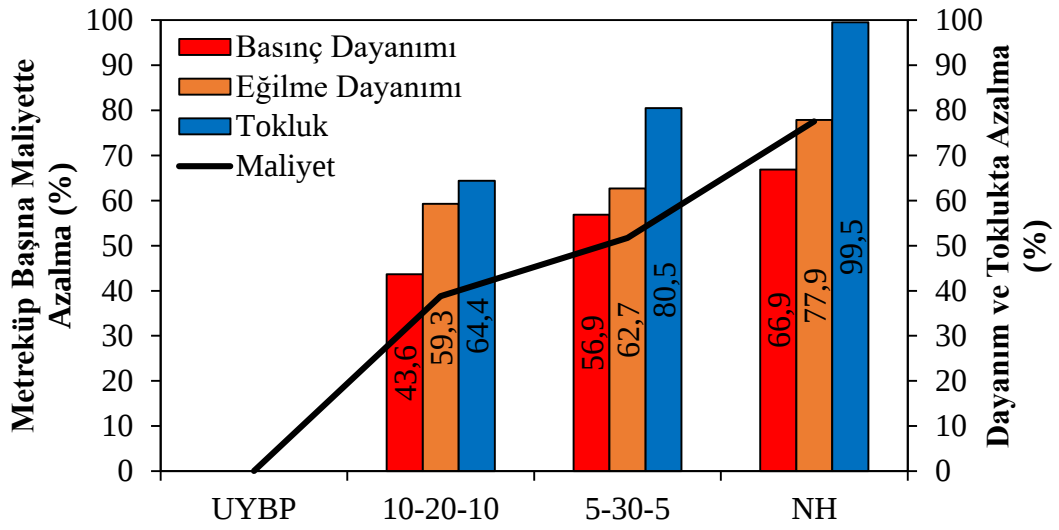
Şekil 8.37 Tokluk değerlerinin metreküp başına maliyet ile ilişkisi

Mekanik özellikler ile maliyet değerlerinin UYPB'ye göre rölatif olarak değişimi ve birbirleri ile olan ilişkisi paralel yükleme durumu için Şekil 8.37'de, dik yükleme durumu için Şekil 8.38'de sunulmuştur. UYPB'ye göre tüm karışımlar mekanik özelliklerde ciddi kayıplar yaşamıştır. Ancak en dikkat çekici olan NH karışımının tokluk değerlerinde yaşadığı kayıptır. Daha önce de belirtildiği üzere, radyasyon soğurma performansları açısından benzer olan bu dört karışımın seçim yapılırken

ilgili yapıda aranan mekanik özellikler ve bütçe baskın olacaktır.



Şekil 8.37 Dayanım ve toklukta azalmanın metreküp başına maliyette azalma ile ilişkisi (paralel yükleme durumu)



Şekil 8.38 Dayanım ve toklukta azalmanın metreküp başına maliyette azalma ile ilişkisi (dik yükleme durumu)

## BÖLÜM DOKUZ

### SONUÇ

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- UYPB'nin katman olarak kullanılmasının kompozitlerin eğilme dayanımını %84,2'ye, basınç dayanımını %88,7'ye ve tokluk değerini %11754'e kadar arttırdığı tespit edilmiştir.
- UYPB numunesi tüm mekanik özelliklerde en yüksek, NH numunesi en düşük performansı göstermiştir.
- Basınç dayanımında paralel yüklemde elde edilen sonuçların çoğunlukla dik yüklemde elde edilen sonuçlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum dış katmanlardaki UYPB'nin yüklem altında oluşan fıçılama etkisini azaltmasına atfedilebilir. Diğer yandan UYPB katmanlarının kalınlığının ve doğrultusunun farklı yüklem doğrultuları altında kompozitlerin eğilme performansını belirleyici olduğu görülmüştür.
- Yirmi sekiz günlük kür süresi sonunda UYPB'nin katmanlara paralel yüklenmesi durumunda dik yüklenmesi durumuna göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk değerleri sırasıyla %2,3, %20,3 ve %7,8 daha yüksektir. Bu oranlar 10-20-10 kompozitinde sırasıyla %32,1, %9,3 ve %18,9, 5-30-5 kompozitinde %15,3, %21,5 ve %2,4, NH kompozitinde ise %19,1, %17,2 ve %26,7 olarak bulunmuştur.
- Yapılan teorik radyasyon soğurma katsayısı hesaplarına göre tüm enerji seviyeleri için karışımların tümü benzer radyasyon soğurma katsayısına sahiptir. Diğer bir ifadeyle geliştirilen kompozitlerin radyasyon zırlama malzemesi olarak kullanımı mümkündür.
- Geliştirilen kompozitlerin duvar veya panel olarak kullanımında UYPB katmanlarının radyasyon kaynağını bulunduran odanın iç ve dış hacminde yer alacak şekilde konumlandırılması önerilmektedir. Böylece UYPB'nin zırlama özelliğinden faydalanılabilir. Aksi taktirde lineer soğurma katsayısı en düşük olan NH'den sızmalar gerçekleşebilir.
- Bu çalışmada üretilen kompozitler arasından radyasyon soğurma malzemesi seçimi yapılırken ilgili yapıdan beklenen özellikler göz önünde

bulundurulmalıdır. Yapı yüksek mekanik yükler altında kalacaksa mekanik özellikleri yüksek olan ve içerdği lifler sayesinde çatlak ilerlemesini sınırlayıcı özelliğe haiz UYPB'nin veya UYPB katmanı içeren kompozitlerin seçilmesi önerilebilir.

- UYPB'nin yüksek maliyeti ve karışımların benzer radyasyon soğurma özellikleri göz önünde bulundurulursa, katmanlı karışımların gerek maliyeti düşürmesi gerekse NH karışımına oranla gelişmiş eğilme ve tokluk performansı nedeniyle optimum çözüm olacağı söylenebilir.

Yapılan deneylerin ardından elde edilen sonuçlara göre sonraki çalışmalar için öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

- Yükleme yönüne göre oluşan farkların sebeplerinin daha derinlemesine araştırılması önerilir.
- Katmanlar arasındaki aderansın çeşitli deneyler ile belirlenmesi ve taze hal özelliklerinin aderansa etkisinin araştırılması önerilir.
- Barit agregası içeren NH karışımı yerine geleneksel beton karışımları denenerek piyasada rahatlıkla bulunabilecek karışımlar ile oluşturulmuş katmanlı betonun mekanik ve radyasyon soğurma performansları incelenebilir.
- Elde edilen kompozit malzemelerin radyasyon soğurma performanslarının geleneksel radyasyon soğurma malzemeleri ile kıyaslanması önerilir.

## KAYNAKLAR

- Abbas, S. M. L. N., Nehdi, M. L., & Saleem, M. A. (2016). Ultra-high performance concrete: Mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(3), 271-295.
- Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., Van Brunschot, M. C. A. J., & Salet, T. A. (2020). On-demand additive manufacturing of functionally graded concrete. *Virtual and Physical Prototyping*, 15(2), 194-210.
- Akçaözoğlu, S., & Akçaözoğlu, K. (2016). Atık kil pestili ve atık pet şişe kırıklarının kompozit malzeme üretiminde değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 218-226.
- Akkaş, A. (2015). Alüminyum-Bor-Karbür kompozit malzemelerin radyasyon karşısındaki davranışının belirlenmesi, XCOM bilgisayar programı ile incelenmesi ve yeni bir hibrit kompozit radyasyon zırh malzemesi önerisi (Doctoral dissertation, Enerji Enstitüsü).
- Akkoç, E. (2002). Agregaların Mekanik Özellikleri ile Dokusal Özellikleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Akkurt, I. ve El-Khayatt, A. M. (2013). The effect of barite proportion on neutron and gamma-ray shielding. *Annals of Nuclear Energy*, 51, 5-9. doi:10.1016/j.anucene.2012.08.026
- Akkurt, İ., Başıyigit, C., Akkaş, A., Mavi, B. ve Kadir, G. (2011). Yüksek fırın cürufllu betonların radyasyon soğurma karakteristiklerinin belirlenmesi. *Engineering Sciences*, July 2011.
- Akkurt, İ., Günoğlu, K., Başıyigit, C., Kılınçarslan, Ş., & Akkaş, A. (2012). Farklı çimentolarla üretilen çimento pastalarının radyasyon zırhlama özellikleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(2), 135-140.

- Aksu, Ö. V., & Acar, C. (2010). Kent İçi İstinat Duvarlarının Peyzaj Mimarlığı Açısından İrdelenmesi: Trabzon Kenti Örneği. Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 11(2), 1-11.
- Alkayış, M. H., & Başıyigit, C. (2021). Lif Katkısının Beton Darbe Dayanımına Etkisi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (24), 455-462.
- Apaslan, E. (2022). Ağır Beton Üretimi-Kullanım Alanları ve Geleneksel Hafif Betonla Karşılaştırılması. Erişim Tarihi: 01.01.2023 URL: <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/emre.alpaslan/70279/Hafta%208.pptx>
- Anonim. (10 Temmuz 2022). İçsel ve dışsal radyasyondan korunma. <https://www.afad.gov.tr/kbrn/icsel-ve-dissal-radyasyondan-korunma>.
- Asal, S. (2017). Seramik matrisli radyasyon zırh malzemelerinin hazırlanması ve zırhlama performanslarının araştırılması [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- ASTM C 230 (2014). Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C 349 (2002). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C 637 (2003), Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C 638 (2002). Standard Descriptive Nomenclature of Constituents of Aggregates for Radiation-Shielding Concrete. ASTM International, West Conshohocken.
- Aylie, H., Gan, B. S., As'ad, S., & Pratama, M. M. A. (2015). Parametric study of the load carrying capacity of functionally graded concrete of flexural members. International Journal of Engineering and Technology Innovation, 5(4).

- Azmee, N. M., & Shafiq, N. (2018). Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. *Case Studies in Construction Materials*, 9.
- Azreen, N. M., Rashid, R. S., Haniza, M., Voo, Y. L., & Amran, Y. M. (2018). Radiation shielding of ultra-high-performance concrete with silica sand, amang and lead glass. *Construction and Building Materials*, 172, 370-377.
- Azreen, N. M., Rashid, R. S., Amran, Y. M., Voo, Y. L., Haniza, M., Hairie, M., ... & Alabduljabbar, H. (2020). Simulation of ultra-high-performance concrete mixed with hematite and barite aggregates using Monte Carlo for dry cask storage. *Construction and Building Materials*, 263, 120161.
- Badarloo, B., Lehner, P. ve Doost, R. B. (2022). Mechanical Properties and Gamma Radiation Transmission Rate of Heavyweight Concrete Containing Barite Aggregates. *Materials*, 15(6). doi:10.3390/ma15062173
- Baqersad, M., Sayyafi, E. A., & Bak, H. M. (2017). State of the art: mechanical properties of ultra-high performance concrete. *Civil Engineering Journal*, 3(3), 190-198.
- Bakırhan, E. (2017). Kurşun maden atığı katkılı ağır betonların radyasyon soğurma katsayılarının 662-1460 kev enerji aralığında incelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Gümüşhane Üniversitesi.
- Başığit, C. ve Kaçar, A. (2006). Bazı yapı malzemelerinin radyasyon tutuculuk özellikleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 310.
- Bleise, A., Danesi, P. R., & Burkart, W. (2003). Properties, use and health effects of depleted uranium (DU): a general overview. *Journal of environmental radioactivity*, 64(2-3), 93-112.
- Bouali, E., Ayadi, A., Kadri, E. H., Kaci, A., Soualhi, H., & Kallel, A. (2020). Rheological and mechanical properties of heavy density concrete including barite powder. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(5), 3999-4011.

- Bozbıyık, A., Hancı, İ. H., Özdemir, Ç., & Demirkan, Ö. (2001). Nükleer silahlar: Üretimi ve etkileri. *Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi*, 10(10), 386-387.
- Büyük, B. (2013). Tungsten, Titanyum, Bor İçeren Bazı Malzemelerin Gama ve Nötron Radyasyonu Karşısındaki Davranışının İncelenmesi, Xcom Bilgisayar Programı ile İrdelenmesi ve Yeni Bir Radyasyon Zırh Malzeme Önerisi (Doctoral dissertation, Enerji Enstitüsü).
- Cengiz, A. (2015). İnşaat Endüstrisine Yönelik Doğal Elyaf Katkılı Kompozit Malzemelerin Hazırlanması.
- Chan, R., Liu, X., & Galobardes, I. (2020). Parametric study of functionally graded concretes incorporating steel fibres and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 242, 118186.
- Choi, W. C., Yun, H. D., Kang, J. W., & Kim, S. W. (2012). Development of recycled strain-hardening cement-based composite (SHCC) for sustainable infrastructures. *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 627-635.
- Clark, D. L., Keogh, D. W., Neu, M. P., & Runde, W. (2000). Uranium and uranium compounds. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.
- Coşkun, A. (2010). Ağır betonlarda barit agregasının kullanımı ve beton özelliklerinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Afyonkarahisar: Afyonkocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Coşkun, A. (2015). Radyoloji birimlerinin ortam radyasyon doz dağılımlarının belirlenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Amasya Üniversitesi.
- Çabuk, T. (2010). Radyasyon terapilerinde çeşitli radyoizotopların doz eşdeğerinin hesaplanması [Yüksek Lisans Tezi]. Çukurova Üniversitesi.
- Çam, S. T. (2011). Keratin içeren biyolojik örneklerin değişik tür ve enerjilerdeki radyasyon maruziyetinde dozimetre olarak kullanım potansiyellerinin araştırılması [Doktora Tezi]. Gazi Üniversitesi.

- Çoban, M., Akça, B. ve Erzeneoğlu, S. (2014). Türkiye’de kullanılan çeşitli inşaat malzemelerinin geçirme katsayılarının ölçülmesi. EÜFBED- Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(2), 191–198.
- Çullu, M., & Külekçi, G. (2019) Ağır Agrega İçeren Betonların Farklı Dayanım Sınıflarındaki Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi.
- Daungwilailuk, T., Yenchai, C., Rungjaroenkitti, W., Pheinsusom, P., Panwisawas, C., & Pansuk, W. (2022). Use of barite concrete for radiation shielding against gamma-rays and neutrons. *Construction and Building Materials*, 326, 126838.
- Demir, F. (2009). Bor ve barit agregalı ağır betonların nötron parçacıkları X-ve  $\gamma$ -ışınları için radyasyon soğurganlıklarının belirlenmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Dingqiang, F., Rui, Y., Zhonghe, S., Chunfeng, W., Jinnan, W., & Qiqi, S. (2020). A novel approach for developing a green Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with advanced particles packing meso-structure. *Construction and Building Materials*, 265, 120339.
- Doğan, R. (2017). Farklı kayaç türlerinin sifcon bulamacında agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).
- Du, J., Meng, W., Khayat, K. H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., Abu-obeidah, A., Nassif, H., ve Wang, H. (2021). New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering*, 224(August), 109220.
- Ekinci, C. E. (2019). Savunma ve sığınma yapılarında KBRN tehditlerine karşı betonların zırhllanması. *Engineering Sciences*, 14(3), 119-153.
- Elmekahal, S. M. (2021). Hafif yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesi [Doktora Tezi]. Kastamonu Üniversitesi.
- Eren, Ö. (2011). İyi Beton Nedir. Doğu Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Ders Notları.

- Erten, E., Yalçinkaya, Ç., Beglarigale, A., Yiğiter, H., & Yazıcı, H. (2017). Erken yaş büzülme çatlaklarının lif içeren/içermeyen ultra yüksek performanslı betona gömülü donatı korozyonuna etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4), 1347-1364.
- Farokhzad, R., Dadashi, A., & Sohrabi, A. (2021). The effect of ferrophosphorus aggregate on physical and mechanical properties of heavy-weight concrete. *Construction and Building Materials*, 299, 123915.
- Fehling, E., Bunje, K. ve Leutbecher, T. (2004). Design relevant properties of hardened ultra high performance concrete. In *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 1, 327-338. Kassel, Germany.
- Filiz, M., Nazıroğlu, M., Sancak, E., Özel, C. ve Gençel, O. (2009). Ağır ve kolemanit agregalı betonun radyasyon önlemede kullanımının araştırılması [Yüksek Lisans Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Furnas, C. C. (1931). Grading aggregates-I.-Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. *Industrial & Engineering Chemistry*, 23(9), 1052-1058.
- Ginés, O., Chimenos, J. M., Vizcarro, A., Formosa, J., & Rosell, J. R. (2009). Combined use of MSWI bottom ash and fly ash as aggregate in concrete formulation: Environmental and mechanical considerations. *Journal of hazardous materials*, 169(1-3), 643-650.
- Gökçe, H. S., Yalçinkaya, Ç., & Tuyan, M. (2018). Optimization of reactive powder concrete by means of barite aggregate for both neutrons and gamma rays. *Construction and Building Materials*, 189, 470-477.
- Gökharman, D.F., Aydın, S. ve Koşar, P.N. (2016). Radyasyon güvenliğinde mesleki olarak bilmemiz gerekenler. *SDÜ Sağlık Bilimleri Dergisi*, 7(2), 35–35.
- Gökoğlu, E., Ekin, M., Özgenç, E., İlem-Özdemir, D. ve Aşıkoğlu, M. (2020). Effects of radiation on human health. *Anadolu Kliniği Tıp Bilimleri Dergisi*, 0–3.

- Graybeal, B. A. (2006). *Material property characterization of ultra-high performance concrete* (No. FHWA-HRT-06-103). United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development.
- Güler, G. (2020). Nano malzeme içeren çimento esaslı kompozitlerin dayanıklılığının araştırılması [Yüksek Lisans Tezi]. Fırat Üniversitesi.
- Gümüş, M. (2019). Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan polipropilen lifli ağır betonların gama ışını ve nötron soğurma performansları [Yüksek Lisans Tezi]. Kırıkkale Üniversitesi.
- Gümüş, M., Demir, Ş. ve Sevim, O. (2020). Effects of aggregate type on radiation attenuation properties in heavyweight concretes. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, June, 777–786.
- Gündüz, L. ve Kalkan, Ş.O. (2017). Diatomit Agregaların Çimento Esaslı Hafif Harç Özelliklerinin Gelişimine Etkisi. In Kütahya (Ed.), 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu Bildiriler Kitabı (Issue October 2016).
- Güneş, B.E. (2014). Bazı inşaat betonlarında doğal radyoaktivite seviyelerinin ölçülmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi.
- Gürsel, E., & Erenson, C. (2017). Agregat Türü ve Mekanik Özelliklerinin Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi.
- Hamad, M. A., Nasr, M., Shubbar, A., Al-Khafaji, Z., Al Masoodi, Z., Al-Hashimi, O., ... & Hashim, K. (2021). Production of Ultra-High-Performance Concrete with Low Energy Consumption and Carbon Footprint Using Supplementary Cementitious Materials Instead of Silica Fume: A Review. *Energies*, 14(24), 8291.
- Han, J., Xi, Z., Yu, R., Guan, J., Lv, Y., & Li, G. (2022). Preparation and Comprehensive Properties of a High-Radiation-Shielding UHPC by Using Magnetite Fine Aggregate. *Materials*, 15(3), 978.

- Hasgöl, U., & Bıçakcıoğlu, N. (2022). Ultra yüksek performanslı betonda çimento yerine cam tozu ve/veya yüksek fırın cürufunun kullanılabilirliği. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 37(4), 2241-2258.
- Helvacı, M. (2010). Edirne’de iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları ile çalışan sağlık personelinin radyasyon güvenliği konusunda bilgi düzeyleri ve tutumlar [Yüksek Lisans Tezi]. Trakya üniversitesi.
- Heniegal, A. M., Amin, M., Nagib, S. H., Youssef, H., & Agwa, I. S. (2022). Effect of nano ferrosilicon and heavyweight fine aggregates on the properties and radiation shielding of ultra-high performance heavyweight concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01543.
- Herrmann, M., & Sobek, W. (2017). Functionally graded concrete: Numerical design methods and experimental tests of mass-optimized structural components. *Structural Concrete*, 18(1), 54-66.
- Hoang, K. H., Hadl, P., & Nguyen, V. T. (2016). A new mix design method for UHPC based on stepwise optimization of particle packing density. In *First International Interactive Symposium on UHPC*.
- Hossain, M. S., Islam, S. M. A., Quasem, M. A. ve Zaman, M. A. (2010). Study of shielding behaviour of some multilayer shields containing PB and BX. *Indian Journal of Pure & Applied Physics (C)*. 48).
- Huang, H., Gao, X., & Teng, L. (2021). Fiber alignment and its effect on mechanical properties of UHPC: An overview. *Construction and Building Materials*, 296, 123741.
- İşlek, H.İ. (22 Haziran 2020). Kompozit malzemeler ve kısa tarihi. <https://kompozithayalleri.com/kompozit-malzemeler-ve-kisa-tarihi/>.
- Janković, K., Stanković, S., Bojović, D., Stojanović, M., & Antić, L. (2016). The influence of nano-silica and barite aggregate on properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 147-156.

- Jou, S. K., Mesbahi, A., Zamiri, R. E., & Seyednejad, F. (2021). Monte Carlo Calculation of linear attenuation coefficients and photon scattering properties of novel concretes loaded with Osmium, Iridium and Barite nanoparticles. *Polish Journal of Medical Physics and Engineering*, 27(4), 291-298.
- Kaçar, A. (2006). Yapılarda radyasyon kalkanı olarak kullanılan barit agregalı ağır beton elemanların zırh kalınlık hesaplarının belirlenmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi).
- Kaplan, A.N. ve Özel, C. (2021). Perlit ve pomza agregalı polimer betonların radyasyon zırhlama performanslarının araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 16(1), 287–300.
- Karaca, Z. (24 Haziran 2022). Ağır beton üretimi, kullanım alanları ve hafif geleneksel beton ile karşılaştırılması. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ders Notları. <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/zekikrc/70279/A%C4%9F%C4%B1r%20betonla%20%C3%BCretilmi%C5%9F%20yap%C4%B1%20elemanlar%C4%B1yla%20ilgili%20deneysel%20%C3%A7al%C4%B1%C5%9Fmalar%C4%B1n%20incelenmesi.pptx>.
- Karihaloo, B.L., Benson, S.D.P., Didiuk, P.M., Fraser, S.A., Hamill, N. ve Jenkins, T.A. (2000). Retrofitting damaged RC beams with high-performance fibre-reinforced concrete. In Proc., Concrete Communication Conf., British Cement Association, Birmingham, UK, 153-164.
- Khan, M. U., Ahmad, S., Naqvi, A. A., & Al-Gahtani, H. J. (2020). Shielding performance of heavy-weight ultra-high-performance concrete against nuclear radiation. *Progress in Nuclear Energy*, 130, 103550.
- Kılınçarslan, Ş., Başyigit, C. ve Akkurt, İ. (2007). Barit agregalı ağır betonların radyasyon zırhlama amacıyla kullanımının araştırılması. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fakültesi Dergisi, 22(2), 393–399.
- Kılınçarslan, Ş., Başyigit, C., Molla, T. ve Sancar, S. (2011). Radyoaktif ışınlardan korunaklı ekolojik yapılar. *Politeknik Dergisi*, 93–99.

- Kına, C., ve Türk, K. (2017). Mikromekanik olarak tasarlanmış çimento esaslı kompozitin kendiliğinden iyileşmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 22(3), 115–126.
- Kilincarslan, S., Akkurt, I. ve Basyigit, C. (2006). The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete. *Materials Science and Engineering A*, 424(1-2), 83-86. doi:10.1016/j.msea.2006.02.033
- Koutný, O., Snoeck, D., Van Der Vurst, F., ve De Belie, N. (2018). Rheological behaviour of ultra-high performance cementitious composites containing high amounts of silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 88, 29–40.
- Kurt, G. (2006). Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Liu, X., Yan, M., Galobardes, I., & Sikora, K. (2018). Assessing the potential of functionally graded concrete using fibre reinforced and recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 171, 793-801.
- Lukkassen, D. ve Meidell, A. (2003). Advanced materials and structures and their fabrication processes. Narrik University College, Hin.
- Lv, Y., Qin, Y., Wang, J., Li, G., Zhang, P., Liao, D., ... & Yang, L. (2022). Effect of incorporating hematite on the properties of ultra-high performance concrete including nuclear radiation resistance. *Construction and Building Materials*, 327, 126950.
- Masoud, M. A., Kansouh, W. A., Shahien, M. G., Sakr, K., Rashad, A. M., & Zayed, A. M. (2020). An experimental investigation on the effects of barite/hematite on the radiation shielding properties of serpentine concretes. *Progress in Nuclear Energy*, 120, 103220.
- Medicis, C., Gonzalez, S., Alvarado, Y. A., Vacca, H. A., Mondragon, I. F., García, R., & Hernandez, G. (2022). Mechanical Performance of Commercially Available Premix UHPC-Based 3D Printable Concrete. *Materials*, 15(18), 6326.

- Meng, W., Valipour, M., & Khayat, K. H. (2017). Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete. *Materials and structures*, 50(1), 1-16.
- Mo, Z., Wang, R., & Gao, X. (2020). Hydration and mechanical properties of UHPC matrix containing limestone and different levels of metakaolin. *Construction and Building Materials*, 256, 119454.
- Othman, M. A., El-Emam, H. M., Seleem, M. H., Sallam, H. E. M., & Moawad, M. (2021). Flexural behavior of functionally graded concrete beams with different patterns. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(4), 1-16.
- Öner, B. (2013). Lif takviyeli çimento esaslı kompozit üretiminde polimer atıkların değerlendirilmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Özalp, F. (2006). Ultra yüksek performanslı betonların mekanik davranışı [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Özavcı, S. (2017). Farklı katkılanmış betonların radyasyon zırhlama üzerine etkileri [Yüksek Lisans Tezi]. Amasya Üniversitesi.
- Özen, S., Şengül, C., Taşdemir, M. A., Erenoğlu, T., Ekim, H., & Ilıca, T. (2013). Farklı agregalarla üretilen ağır betonların tasarımı ve mekanik özellikleri.
- Özturan, T. (2013). Özel betonlar. *Hazır Beton*, 118(2), 70–83.
- Öztürk, M. (2021). Yeni nesil yapılar için elektromanyetik dalga soğurma özelliği kazandırılmış çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesi [Doktora Tezi]. İskenderun Teknik Üniversitesi.
- Rashid, R. S., Salem, S. M., Azreen, N. M., Voo, Y. L., Haniza, M., Shukri, A. A., & Yahya, M. S. (2020). Effect of elevated temperature to radiation shielding of ultra-high performance concrete with silica sand or magnetite. *Construction and Building Materials*, 262, 120567.

- Rwashidi, Q.A.D. (2017). Investigation of radiation shielding properties of some steels [Yüksek Lisans Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Sağır, E. G., & Tanarşlan, H. M. (2019). Farklı kalınlıkta UYPB laminelerin eğilme kapasitesine katkısının incelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 21(63), 1015-1026.
- Sarıyer, D., & Küçer, R. (2015). Farklı Yoğunluktaki Malzemelerin Nötron Zayıflatma Özelliklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 10(1), 49-53.
- Selağzı, P. (2019). Radyoterapide Kullanılan Lineer Hızlandırıcı Cihazların Gözetimli Alandaki Ortam Dozlarının Termoluminesans Dozimetre ile Ölçülmesi (Doctoral dissertation, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü).
- Seven, A. (2016). Günlük hayatta maruz kalınan doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının öğrencilerin yaşam kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri ve korunma önerileri. Kesit Akademi Dergisi, (4), 322-335.
- Sevinç, A. H. (2011). Barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların ve betonların mühendislik özellikleri (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Sanjayan, J. G., Nematollahi, B., Xia, M., & Marchment, T. (2018). Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. Construction and Building Materials, 172, 468-475.
- Shafieifar, M., Farzad, M., & Aziznamini, A. (2017). Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). Construction and Building Materials, 156, 402-411.
- Sharifi, S., Bagheri, R., & Shirmardi, S. P. (2013). Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel–magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental results. *Annals of Nuclear Energy*, 53, 529-534.

- Shirmardi, S. P., Shamsaei, M., & Naserpour, M. (2013). Comparison of photon attenuation coefficients of various barite concretes and lead by MCNP code, XCOM and experimental data. *Annals of Nuclear Energy*, 55, 288-291.
- Sridhar, R., & Prasad, D. R. (2019, August). Damage assessment of functionally graded reinforced concrete beams using hybrid fiber engineered cementitious composites. *Structures* 20, 832-847.
- Sürücü, A.M. (2021). Nanomalzemelerle güçlendirilmiş radyasyon zırhlama özelliğine sahip polimer kompozit üretilmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Düzce Üniversitesi.
- Şengül, C. (2005). Kendiliğinden yerleşen çelik lif donatılı betonların mekanik davranışına su/ince malzeme oranı ve lif dayanımının etkisi [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Şensoy, A. T., & Gökçe, H. S. (2020). Simulation and optimization of gamma-ray linear attenuation coefficients of barite concrete shields. *Construction and Building Materials*, 253, 119218.
- Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F. (2002). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. *İTÜ Dergisi*, 2(212), 125–144.
- Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt ; Ünal, Y., Yılmaz, Ö. ve Çoşkun, İ. (2014). Ağır Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Filler Malzemenin Etkisi. *Electronic Journal of Construction Technologies*
- Toader, N., Sobek, W., & Nickel, K. G. (2017). Energy absorption in functionally graded concrete bioinspired by sea urchin spines. *Journal of Bionic Engineering*, 14(2), 369-378.
- Torelli, G., Fernández, M. G., & Lees, J. M. (2020). Functionally graded concrete: Design objectives, production techniques and analysis methods for layered and continuously graded elements. *Construction and Building Materials*, 242, 118040.

TS EN 1097-6, (2013). "Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini". Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12390-7 (2009). "Beton, Sertleşmiş beton deneyleri, Bölüm, 7". Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 206-1, (2002). "Beton, Özellik, Performans, İmalat, Uygunluk" Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

Tüfekçi, M.M. (2017). Ultra yüksek performanslı çimento esaslı ağır kompozit malzemelerin radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılması [Doktora Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.

Türk, K., & Kına, C. (2017). Çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(6), 671-678.

Türkel, S., & Tosun, K. (2022). TS EN 206-1 ile TS 500 ve TS11222 standartlarının beton açısından değerlendirilmesi.

Türkkan, A., & Pala, K. (2009). Çok düşük frekanslı elektromanyetik radyasyon ve sağlık etkileri. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 14(2).

TS, (2002). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini. Erişim Tarihi: 01.01.2023 URL: <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?053107106111065067115113049116090107100056052055108081090071086075069085047110067109075073081116103090081086073108065117084119100066102110056108068078079071052079120081085082075109104078049074>

TS, (2014). Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk. Erişim Tarihi: 01.01.2023 URL: <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073088071105107074082112069079088117>

- Usta, S. (2012). Agregada granülometrisinin beton bileşimindeki teorik malzeme miktarları ile betonun kompasite ve porozite değerleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 1-15.
- Uzun, A. S. (2021). Radyasyonun ve Radyasyon Zırhlamasında Kullanılan Kurşunun İnsan Sağlığına Etkileri Üzerine Bir Araştırma. *DÜSTAD Dünya Sağlık ve Tabiat Bilimleri Dergisi*, 4(2), 65-74.
- Ünal, O., İçağa, Y. ve Coşkun, A. (2016). An investigation of radiation absorption properties of barite aggregate concrete. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 16(1), 125–131.
- Wang, X., Yu, R., Shui, Z., Zhao, Z., Song, Q., Yang, B., & Fan, D. (2018). Development of a novel cleaner construction product: Ultra-high performance concrete incorporating lead-zinc tailings. *Journal of Cleaner Production*, 196, 172-182.
- Wang, X., Yu, R., Song, Q., Shui, Z., Liu, Z., Wu, S., & Hou, D. (2019). Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density. *Cement and Concrete Research*, 126, 105921.
- Wille, K., Naaman, A. E., & Parra-Montesinos, G. J. (2011). Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. *ACI materials journal*, 108(1).
- Yalçinkaya, Ç. (2015). Yüksek performanslı çimentolu kompozitlerin erken ve ilerlemiş yaşlarda boyutsal stabilitesinin araştırılması. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Yalçinkaya, Ç., Felekoğlu, B., & Yazıcı, H. (2020). Agregada hacminin ultra yüksek performanslı betonun büzülme, reolojik ve mekanik özelliklerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1701-1718.
- Yaren, H., & Karayılanoğlu, T. (2005). Radyasyon ve insan sağlığı üzerine etkileri. *TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni*, 4(4), 199-208.

- Yaşar, D. (2011). Naylon lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Yavaş, H. (2018). Pirit, krom ve magnetit agregalı harçların mekanik ve radyasyon soğurma özelliklerinin tayini (Master's thesis, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı).
- Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., Aydın, S. ve Karabulut, A.Ş. (2009). Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1223–1231.
- Yıldırım, G. (2018). Atık kül dolgulu üretilen yapı panellerinin radyasyon sönümleme durumlarının belirlenmesi (Master's thesis, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yılmaz, B. (2009). Muş yöresinden temin edilen baritin kullanımı ile elde edilen ağır betonun fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin araştırılması/Researching physical and mechanical properties of heavy concrete produced using barite obtained from Muş.
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2014). Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Cement and concrete research*, 56, 29-39.
- Xiao, J., Zou, S., Yu, Y., Wang, Y., Ding, T., Zhu, Y., ... & Li, L. (2020). 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing. *Journal of Building Engineering*, 32, 101779.
- Zeyad, A. M., Hakeem, I. Y., Amin, M., Tayeh, B. A., & Agwa, I. S. (2022). Effect of aggregate and fibre types on ultra-high-performance concrete designed for radiation shielding. *Journal of Building Engineering*, 58, 104960.
- Zhou, M., Wu, Z., Ouyang, X., Hu, X., & Shi, C. (2021). Mixture design methods for ultra-high-performance concrete-a review. *Cement and Concrete Composites*, 124, 104242.