

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI
ÇİMENTO ESASLI AĞIR KOMPOZİT MALZEMELERİN
RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

MUZAFFER MANSUR TÜFEKÇİ

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. AHMET GÖKÇE**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI
ÇİMENTO ESASLI AĞIR KOMPOZİT MALZEMELERİN
RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Muzaffer Mansur TÜFEKÇİ tarafından hazırlanan tez çalışması 26/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÖKÇE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

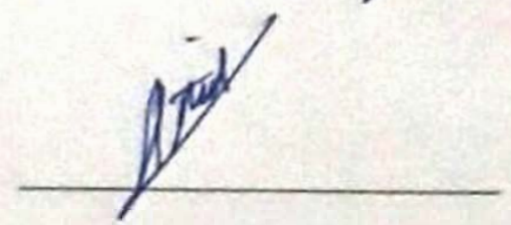
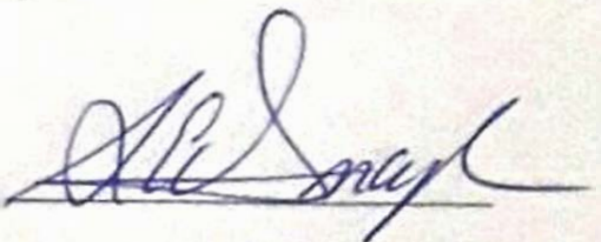
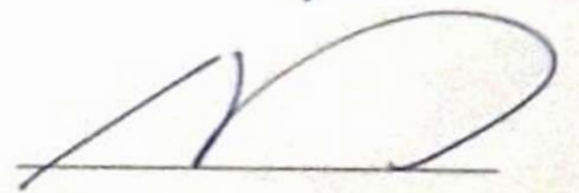
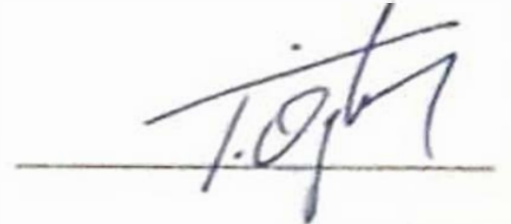
Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÖKÇE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Turan ÖZTÜREN
Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Nabi YÜZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Erdal OSMANLOĞLU
İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Nihat KABAY
Yıldız Teknik Üniversitesi



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2014-05-01-DOP04 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmasında, 3 farklı agrega, 3 farklı su/bağlayıcı oranı, 3 farklı çelik lif içeriği ve 2 farklı kür uygulama parametreleri tasarımıyla üretilen toplam 54 farklı ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozit (UHPC) malzemesinin fiziksel, mekanik ve radyasyon zırlama özelliklerinde meydana gelen değişimler hem deneysel hem de istatistiksel olarak araştırılmıştır. Özellikle, UHPC üretiminde farklı agregaların kullanılabilirliğine yönelik yapılan değerlendirmeler ile konu ile ilgili ileride yapılacak çalışmalara rehber olabilecek bilgiler de bu çalışmada yer almaktadır.

Tez çalışmalarım boyunca tez konusu seçimi, deneysel verilen incelenmesi ve sonuçların değerlendirilmesinde farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve her konuda beni destekleyen değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÖKÇE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin deneysel çalışmalarını, 2014-05-01-DOP04 numaralı araştırma projesi ile destekleyen Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne,

Tezimin deneysel çalışmalarında kullanılan malzemelerin ücretsiz teminine yardımcı olan OYAK Beton A.Ş., ve Barit Maden A.Ş.'ye,

Tezime bilgi ve birikimleri ile katkı sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Nabi YÜZER, Prof. Dr. Turan ÖZTURAN, Doç. Dr. Nihat KABAY, Yrd. Doç. Dr. Ahmet B. KIZILKANAT ve Prof. Dr. Ahmet E. OSMANLIOĞLU'na; çalışma arkadaşlarım Dr. Serhan ULUKAYA, Araş. Gör. Didem OKTAY ve Araş. Gör. Büşra AKTÜRK'e; laboratuvar teknisyenimiz Halil YAVAŞCI'ya,

Hayatımın her ânında sabır ve anlayışıyla her zaman yanımda olan en büyük destekçilerim sevgili annem Düriye TÜFEKÇİ'ye; çok kısa zaman önce kaybettiğimiz kıymetli babam Mustafa TÜFEKÇİ'ye; ilgi ve alakalarıyla beni destekleyen değerli kardeşlerime ve sevgili eşim Fatma Nur TÜFEKÇİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, kıymetli babam merhum Mustafa TÜFEKÇİ'ye ve 1 ay içinde dünyaya gelecek olan oğlum Mustafa Eymen TÜFEKÇİ'ye ithaf edilmiştir.

Mayıs, 2017

Muzaffer Mansur TÜFEKÇİ

*Kıymetli Babam,
Merhum Mustafa TÜFEKÇİ'nin
Aziz Hatırasına...*

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvi
ÖZET	xviii
ABSTRACT	xx
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	4
BÖLÜM 2	
ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER ve RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1 Çimento Esaslı Kompozitler	5
2.1.1 Kompozitlerin Tarihsel Gelişimi	6
2.1.2 Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı.....	8
2.1.3 Çimento Esaslı Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	12
2.2 Ultra Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitler (UHPC)	13
2.2.1 UHPC'nin Genel Özellikleri	14
2.2.1.1 UHPC Üretiminin Temel Prensipleri.....	15
2.2.1.2 UHPC'yi Oluşturan Malzemeler.....	16
2.2.1.3 UHPC Karışım Tasarımı.....	18
2.2.1.4 UHPC Üretim Yöntemleri	19
2.2.2 Kıvam ve İşlenebilirlik Özellikleri.....	20

2.2.3	UHPC'nin Mekanik Özellikleri.....	21
2.2.3.1	Basınç Dayanımı	21
2.2.3.2	Direkt Çekme Dayanımı	22
2.2.3.3	Eğilme Dayanımı ve Kırılma Tokluğu.....	24
2.2.4	Dayanıklılık Özellikleri	25
2.2.5	UHPC'nin Kullanım Alanları.....	26
2.3	Radyasyon.....	27
2.3.1	Alfa, Beta, Gama ve X-Işını Radyasyonu	28
2.3.1.1	Alfa (α) Radyasyonu	28
2.3.1.2	Beta (β) Radyasyonu.....	28
2.3.1.3	Gama (γ) Radyasyonu.....	28
2.3.1.4	X-Işını Radyasyonu.....	29
2.3.2	Fotonların (X ve Gama ışınları) Madde ile Etkileşimi	29
2.3.2.1	Fotoelektrik Olay	30
2.3.2.2	Compton Saçılımı	30
2.3.2.3	Çift Oluşum.....	31
2.3.3	Radyoaktif Atıklar	32
2.3.4	Radyoaktif Atık Yönetimi	32
2.3.5	Radyoaktif Atık Depolama Tanklarının Özellikleri	33
2.3.6	Radyasyondan Korunmanın Önemi	35
2.3.7	Radyasyondan Korunma Yöntemleri	36
2.3.8	Radyasyon Tipine Göre Zırhlama Malzemelerinin Seçimi	38
2.3.9	Radyasyon Zırhlama Malzeme Parametreleri	39
2.3.9.1	Lineer Soğurma Katsayısı	39
2.3.9.2	Kütle zayıflatma katsayısı.....	39
2.3.9.3	Yarı Değer ve Onda-Bir Değer Kalınlığı.....	39
2.3.10	Ağır Agregalı Betonların Radyasyon Zırhlama Özellikleri	40
2.3.10.1	Barit Agregalı Ağır Beton.....	40
2.3.10.2	Hematit Agregalı Ağır Beton	41
2.3.10.3	Magnetit Agregalı Ağır Beton	41
2.3.10.4	Demir Türevi Agregalı Ağır Beton.....	41
2.3.11	Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Radyasyon Zırhlama Özellikleri	42
2.3.12	Radyoaktif Atık Depolama Tanklarında Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Kullanılması.....	43
BÖLÜM 3		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		46
3.1	Ön Deneysel Çalışma.....	47
3.1.1	Çimento Tipi ve Miktarının Belirlenmesi	48
3.1.2	Mineral Katkının Tipi ve Miktarının Belirlenmesi	48
3.1.3	Kimyasal Katkının Belirlenmesi	49
3.1.4	Agrega Tipinin Belirlenmesi	49
3.1.5	Çelik Lif Oranının Belirlenmesi	50
3.2	UHPC Üretiminde Kullanılan Malzemeler.....	51
3.2.1	Çimento	51
3.2.2	Mineral Katkılar	52
3.2.3	Kimyasal Katkı	52

3.2.4	Agrega	53
3.2.5	Çelik Lif.....	55
3.3	UHPC Karışım Oranları.....	55
3.4	UHPC Üretimi ve Kür Tipi.....	57
3.5	Taze UHPC Özellikleri	59
3.5.1	Çökme-yayılma Deneyi.....	59
3.5.2	V-hunisi Akış Deneyi	60
3.6	Sertleşmiş UHPC Özellikleri	61
3.6.1	Birim Ağırlık Deneyi.....	61
3.6.2	Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi.....	61
3.6.3	Dört Noktalı Eğilme Deneyi.....	62
3.6.4	Kırılma Tokluğu	63
3.6.5	Direkt Çekme Deneyi	64
3.7	Radyasyon Zırhlama Özellikleri	65
3.7.1	Deneysel Hesaplanan Radyasyon Zırhlama Özellikleri	67
3.7.1.1	Lineer Zayıflatma Katsayısının Belirlenmesi	68
3.7.1.2	Kütle Zayıflatma Katsayısının Belirlenmesi.....	69
3.7.1.3	Yarı Değer ve Onda-Bir Değer Kalınlıklarının Belirlenmesi	70
3.7.2	Teorik Hesaplanan Radyasyon Zırhlama Özellikleri	70
3.7.2.1	XCOM Programı ile Zırhlama Özelliklerinin Belirlenmesi	70
3.7.2.2	XRF Analizi ile Kimyasal Kompozisyonun Belirlenmesi	73

BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ..... 75

4.1	Taze UHPC Özellikleri	75
4.1.1	Çökme-yayılma Deneyi.....	75
4.1.2	V-hunisi Akış Deneyi	76
4.2	Sertleşmiş UHPC Özellikleri	78
4.2.1	Birim Ağırlık Deneyi.....	78
4.2.2	Tek Eksenli Basınç Deneyi	79
4.2.3	Dört Noktalı Eğilme Deneyi.....	83
4.2.3.1	Eğilme Dayanımı	83
4.2.3.2	Yük-Deformasyon İlişkisi.....	87
4.2.3.3	Kırılma Tokluğu.....	90
4.2.4	Direkt Çekme Deneyi	91
4.2.4.1	Çekme Dayanımı.....	91
4.2.4.2	Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi	94
4.2.5	Radyasyon Zırhlama Özellikleri.....	96
4.2.5.1	Deneysel Hesaplanan Lineer ve Kütle Zayıflatma Katsayıları	96
4.2.5.2	Teorik Hesaplanan Lineer ve Kütle Zayıflatma Katsayıları	98
4.2.5.3	Deneysel ve Teorik Hesaplanan Lineer Zayıflatma Katsayılarının Karşılaştırılması.....	100
4.2.5.4	Deneysel ve Teorik Hesaplanan Kütle Zayıflatma Katsayılarının Karşılaştırılması.....	102
4.2.5.5	Karışım Parametrelerinin Lineer Zayıflatma Katsayına Etkisi..	105
4.2.5.6	Yarı Değer ve Onda-Bir Değer Kalınlıkları.....	107

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ VE KARIŞIMLARIN

OPTİMİZASYONU..... 110

5.1	İstatistiksel Analizi	110
5.1.1	Design Expert Programıyla Model Seçimi ve Regresyon Analizi ..	111
5.1.2	Taze UHPC Malzemesinin Deney Sonuçlarının Analizi	112
5.1.2.1	Çökme-yayılma Deney Sonuçlarının Analizi	113
5.1.2.2	V-hunisi Akış Deneyi Sonuçlarının Analizi	115
5.1.3	Sertleşmiş UHPC Malzemesinin Deney Sonuçlarının Analizi.....	117
5.1.3.1	Birim Ağırlık Deney Sonuçlarının Analizi	118
5.1.3.2	Basınç Dayanımı Sonuçlarının Analizi.....	120
5.1.3.3	Eğilme Dayanımı Sonuçlarının Analizi	123
5.1.3.4	Çekme Dayanımı Sonuçlarının Analizi	125
5.1.4	UHPC Malzemesinin Lineer Zayıflatma Katsayısı Sonuçlarının Analizi	128
5.1.4.1	0,200 MeV Enerji için Lineer Zayıflatma Katsayısının Analizi	128
5.1.4.2	0,662 MeV Enerji için Lineer Zayıflatma Katsayısının Analizi	131
5.1.4.3	1,250 MeV Enerji için Lineer Zayıflatma Katsayısının Analizi	133
5.2	Karışımların Optimizasyonu.....	136
5.2.1	Optimizasyon Amaç Koşulları	137
5.2.2	Optimum Karışım Çözümleri	139

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 141

KAYNAKLAR

EK-A

UHPC SERİLERİNİN İŞLENEBİLİRLİK DENEY SONUÇLARI..... 161

EK-B

UHPC SERİLERİNİN MEKANİK DENEY SONUÇLARI..... 162

EK-C

DENEY SONUÇLARINA AİT TEPKİ YÜZEYLERİ..... 165

ÖZGEÇMİŞ

SİMGE LİSTESİ

α	Alfa parçacığı
β	Beta parçacığı
γ	Gama radyasyonu
ρ	Yoğunluk
d	Çökme-yayılma çapı
eV	Elektron volt
G_f	Kırılma enerjisi
I	Etkileşim sonrası fotonun şiddeti
I_0	Gelen fotonun şiddeti
KeV	Kilo-elektron volt
MeV	Mega-elektron volt
V_f	Lif hacmi
V_{f-crit}	Kritik lif hacmi
W_f	Yük taşıma kapasitesine
t	V hunisi akış süresi
P_1	İlk çatlak yükü
P_p	Pik yükü
δ_1	İlk çatlak deformasyonu
δ_p	Pik yük deformasyonu
Z	Atom numarası
μ	Lineer soğurma katsayısı
μ_m	Kütle soğurma katsayısı
^{90}Sr	Strontium-90
^{32}P	Fosfor-32
^{137}Cs	Sezyum-132
^{60}Co	Kobalt-60

KISALTMA LİSTESİ

ACI	(İng) American Concrete Institute (Tr) Amerikan Beton Enstitüsü
AFGC	(Fra) Association Française de Génie Civil (Tr) Fransız İnşaat Mühendisleri Derneği
ASTM	(İng) American Society for Testing and Materials (Tr) Amerikan Test ve Malzeme Enstitüsü
BAR	Barit Agregalı Çimento Esaslı Kompozit Serisi
DFRC	Sünek Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozit
DEF	Gecikmiş Etrenjit Oluşumu
ECC	Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit
EFNARC	(İng) European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. (Tr) Özel Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Avrupa Federasyonu
EN	(Fra) Européennes Normes (İng) European Standard
FRC	Lif Donatılı Beton
FRCC	Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozit
FRM	Lif Donatılı Harç
GAD	Granüle Atık Demir Tozu Agregalı Çimento Esaslı Kompozit Serisi
GNB	(Alm) Gesellschaft fuer Nuklear-Behaelter (Tr) Alman Nükleer Hizmet Derneği
HPC	Yüksek Performanslı Beton
HPFRCC	Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozit
ICRP	(İng) International Commission on Radiological Protection (Tr) Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu
IAEA	(İng) International Atomic Energy Agency (Tr) Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
JCI	(İng) Japan Concrete Institute (Tr) Japon Beton Enstitüsü
JSCE	(İng) Japan Society of Civil Engineers (Tr) Japon İnşaat Mühendisleri Odası
NC	Normal Dayanımlı Beton
NCRP	(İng) National Council on Radiation Protection & Measurements (Tr) Radyasyondan Korunma ve Radyasyon Ölçümleri Ulusal Konseyi
ODK	Onda-Bir Değer Kalınlığı
REF	Silis Kumu ve Kuvars Tozu Karışımli Çimento Esaslı Kompozit Serisi

RILEM	(<i>Fra</i>) Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages (<i>İng</i>) International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
RPC	Reaktif Pudra Beton
RSM	(<i>İng</i>) Response Surface Methodology (<i>Tr</i>) Tepki Yüzeyi Yöntemi
s/b	Su/bağlayıcı oranı
SEM	(<i>İng</i>) Scanning Electron Microscopy (<i>Tr</i>) Taramalı Elektron Mikroskobu
SIFCON	Yüksek Oranda Kısa Kesilmiş Çelik Tel İçeren Çimento Bulamacı
SIMCON	Yüksek oranda Ağ Şeklinde çelik tel içeren çimento bulamacı
SCC	Kendiliğinden Yerleşen Beton
UHPC	Ultra Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozit
UHPFRC	Ultra Yüksek Performanslı Lif Donatılı Beton
VHSC	Çok Yüksek Dayanımlı Beton
TAEK	Türkiye Atom Enerji Kurumu
TS	Türk Standartları
YDK	Yarı Değer Kalınlığı
XRF	(<i>İng</i>) X-Ray Fluorescence (<i>Tr</i>) X-Işını Floresan Spektrometresi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 FRC kompozitlerin çekme gerilmesi altında davranışları [22].....	10
Şekil 2.2 FRC kompozitlerin çekme ve eğilme gerilmesi etkisindeki davranışına göre sınıflandırılması [23].....	11
Şekil 2.3 Çimento esaslı kompozitlerin sınıflandırılması [25].....	13
Şekil 2.4 UHPC üretiminde kullanılan malzemeler ve karışım oranları [30]	16
Şekil 2.5 Farklı narinlik oranına sahip çelik liflerle üretilen UHPC malzemesi [45].	21
Şekil 2.6 UHPC malzemesinin (lif katkısız ve lif katkılı) basınç gerilmesi altındaki davranışı [47]	22
Şekil 2.7 Çentikli ve çentiksiz UHPC deney numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri [53]	23
Şekil 2.8 Normal dayanımlı beton (NC), lif donatılı beton (FRC) ve UHPC malzemesinin direkt çekme gerilmesi altındaki davranışı [52]	23
Şekil 2.9 Normal beton ve UHPC malzemesinin eğilme gerilmesi altındaki tipik davranışı [1]	25
Şekil 2.10 Maddenin atom numarasına ve radyasyonun enerjisine göre fotonların madde ile etkileşmelerinin değişimi [77].....	30
Şekil 2.11 Fotoelektrik olayın şematik gösterimi [79].....	30
Şekil 2.12 Compton saçılmasının şematik gösterimi [79]	31
Şekil 2.13 Çift oluşumunun şematik gösterimi [79]	31
Şekil 2.14 Radyoaktif atık depolama tankı [84].....	34
Şekil 2.15 Radyasyondan korunmanın üç temel yolu [84]	37
Şekil 2.16 Radyasyon zırhlaması için kullanılan malzemeler [84].....	38
Şekil 2.17 Zırh malzemesinin kalınlığına bağlı olarak foton enerjisinin değişimi[79].	39
Şekil 3.1 Deneysel çalışma akış şeması	47
Şekil 3.2 UHPC üretimde kullanılan agregaların SEM görüntüleri.....	54
Şekil 3.3 UHPC üretimde kullanılan agregaların fotoğrafları	54
Şekil 3.4 Kullanılan agregaların tane boyut dağılımı.....	55
Şekil 3.5 Deneysel çalışma parametreleri ve parametrelerin kodlanması.....	56
Şekil 3.6 UHPC üretim yöntemi	58
Şekil 3.7 Buhar kürünün uygulandığı buhar tankı (solda) ve su kürünün uygulandığı havuzlar (sağda)	59
Şekil 3.8 Çökme-yayılma deney aparatı ve çökme-yayılma çapı ölçümü	60
Şekil 3.9 V-hunisi deney aparatı ve V hunisi akış süresi ölçümü.....	60
Şekil 3.10 UHPC malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı deneyi.....	61
Şekil 3.11 Dört noktalı eğilme deney düzeneği şematik gösterimi.....	62

Şekil 3.12	ASTM C1609’da verilen tipik yük – net deformasyon eğrisi [56].....	63
Şekil 3.13	Kırılma tokluğunun hesaplanması için kullanılan deney düzeneği	64
Şekil 3.14	Direkt çekme deneyi numune boyutu ve kullanılan kalıplar	64
Şekil 3.15	Direkt çekme deney düzeneği ve deney sonrası kırılan UHPC numunesi...	65
Şekil 3.16	Dar demet geometrisi koşulu ile hazırlanan radyasyon geçirgenlik deney düzeneğinin şematik gösterimi [119].....	67
Şekil 3.17	Radyasyon geçirgenlik ölçümü deney düzeneği: X-ray dozimetre cihazı (solda) ve gama ışını ölçüm cihazı (sağda).....	68
Şekil 3.18	Doğrusal regresyon analizi ile lineer zayıflatma katsayısının belirlenmesi.	69
Şekil 3.19	XCOM programının giriş sayfası.....	71
Şekil 3.20	XCOM programının veri giriş sayfası	72
Şekil 3.21	XCOM programının sonuç sayfası	72
Şekil 3.22	1 keV’den 1000 MeV’e kadar olan tüm enerjiler için teorik hesaplanan kütle azaltma katsayıları	73
Şekil 4.1	Çökme-yayılma deneyi sonuçları	76
Şekil 4.2	V-hunisi akış deneyi sonuçları.....	77
Şekil 4.3	UHPC malzemesinin birim ağırlık sonuçları.....	79
Şekil 4.4	Su kürü uygulanmış %1 çelik lif içeriğine sahip UHPC serilerin basınç dayanımının zamana bağlı gelişimi	82
Şekil 4.5	Su kürü uygulanmış %2 çelik lif içeriğine sahip UHPC serilerin basınç dayanımının zamana bağlı gelişimi	82
Şekil 4.6	Su kürü uygulanmış %3 çelik lif içeriğine sahip UHPC serilerin basınç dayanımının zamana bağlı gelişimi	82
Şekil 4.7	Çelik lif oranı %2 olan UHPC serilerinin basınç dayanımlarına kür tipinin etkisi	83
Şekil 4.8	Su kürü uygulanmış 0,18 s/b oranına sahip UHPC serilerin eğilme dayanımının zamana bağlı gelişimi.....	86
Şekil 4.9	Su kürü uygulanmış 0,24 s/b oranına sahip UHPC serilerin eğilme dayanımının zamana bağlı gelişimi.....	86
Şekil 4.10	Su kürü uygulanmış 0,36 s/b oranına sahip UHPC serilerin eğilme dayanımının zamana bağlı gelişimi.....	86
Şekil 4.11	Çelik lif oranı %2 olan UHPC serilerinin eğilme dayanımlarına kür tipinin etkisi	87
Şekil 4.12	REF serilerin eğilme etkisi altında yük-deformasyon ilişkisi.....	89
Şekil 4.13	GAD serilerin eğilme etkisi altında yük-deformasyon ilişkisi	89
Şekil 4.14	BAR serilerin eğilme etkisi altında yük-deformasyon ilişkisi.....	89
Şekil 4.15	0,18 s/b oranı ile üretilen UHPC serilerin tokluklarına lif oranının etkisi ...	91
Şekil 4.16	90 gün su kürü uygulanmış UHPC serilerin çekme dayanımları.....	93
Şekil 4.17	Buhar kürü uygulanmış UHPC serilerin çekme dayanımları	94
Şekil 4.18	REF serilerin çekme etkisi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	95
Şekil 4.19	GAD serilerin çekme etkisi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri	95
Şekil 4.20	BAR serilerin çekme etkisi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	955
Şekil 4.21	0,200 MeV enerji için deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayıları	101
Şekil 4.22	0,662 MeV enerji için deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayıları	101
Şekil 4.23	1,250 MeV enerji için deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayıları	101
Şekil 4.24	REF-18-2-B serisi için deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayıları	103
Şekil 4.25	GAD-36-2-B serisi için deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayıları ...	103
Şekil 4.26	BAR-36-2-B serisi için deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayıları....	104
Şekil 4.27	Ağır Beton için deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayıları	104

Şekil 4.28	%2 çelik lifli UHPC numunelerinin lineer zayıflatma katsayısına agrega tipinin ve s/b oranının etkisi	105
Şekil 4.29	%2 çelik lifli UHPC numunelerin lineer zayıflatma katsayısına kür tipinin etkisi	106
Şekil 4.30	%2 çelik lifli UHPC numunelerinin lineer zayıflatma katsayısına lif oranının etkisi.....	106
Şekil 4.31	0,200 MeV enerjili X ışını kaynağı için yarı ve onda-bir değer kalınlıkları	108
Şekil 4.32	0,662 MeV enerjili ¹³⁷ Cs izotop kaynağı için yarı ve onda-bir değer kalınlıkları	108
Şekil 4.33	1,250 MeV enerjili ⁶⁰ Co izotop kaynağı için yarı ve onda-bir değer kalınlıkları	109
Şekil 5.1	Çökme-yayılma çapının normal olasılık dağılımı.....	114
Şekil 5.2	REF serisi için çökme-yayılma çapı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi	115
Şekil 5.3	V-hunisi akış süresinin normal olasılık dağılımı	116
Şekil 5.4	REF serisi için V-hunisi akış süresi sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi	117
Şekil 5.5	Birim ağırlık deney sonuçlarının normal olasılık dağılımı	119
Şekil 5.6	GAD serisi için birim ağırlık sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	120
Şekil 5.7	Basınç dayanımı deney sonuçlarının normal olasılık dağılımı	121
Şekil 5.8	REF serisi için basınç dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi	122
Şekil 5.9	Eğilme dayanımı deney sonuçlarının normal olasılık dağılımı	124
Şekil 5.10	GAD serisi için eğilme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi....	125
Şekil 5.11	Çekme dayanımı deney sonuçlarının normal olasılık dağılımı.....	126
Şekil 5.12	GAD serisi için çekme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi	127
Şekil 5.13	0,200 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarının normal olasılık dağılımı	129
Şekil 5.14	BAR serisi için 0,200 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	130
Şekil 5.15	0,662 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarının normal olasılık dağılımı	132
Şekil 5.16	GAD serisi için 0,662 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	133
Şekil 5.17	1,250 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarının normal olasılık dağılımı	134
Şekil 5.18	GAD serisi için 1,250 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	136
Şekil C.1	GAD serisi için çökme-yayılma çapı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	165
Şekil C.2	BAR serisi için çökme-yayılma çapı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	165
Şekil C.3	GAD serisi için V-hunisi akış süresi sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	166
Şekil C.4	BAR serisi için V-hunisi akış süresi sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	166
Şekil C.5	REF serisi için birim ağırlık sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	166
Şekil C.6	BAR serisi için birim ağırlık sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi	167
Şekil C.7	GAD serisi için basınç dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	167
Şekil C.8	BAR serisi için basınç dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi	167
Şekil C.9	REF serisi için eğilme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi	168

Şekil C.10	BAR serisi için eğilme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi	168
Şekil C.11	REF serisi için çekme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	168
Şekil C.12	BAR serisi için çekme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	169
Şekil C.13	REF serisi için 0,200 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	169
Şekil C.14	GAD serisi için 0,200 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	169
Şekil C.15	REF serisi için 0,662 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	170
Şekil C.16	BAR serisi için 0,662 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	170
Şekil C.17	REF serisi için 1,250 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	170
Şekil C.18	BAR serisi için 1,250 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi.....	171

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Normal dayanımlı beton (NSC), yüksek dayanımlı beton (HSC) ve UHPC'nin tipik kompozisyonları ve özellikleri [35]	19
Çizelge 2.2 Çeşitli standartlara göre kırılma tokluğunun belirlenmesi için kullanılan deney parametreleri [59].....	24
Çizelge 2.3 Radyoaktif atık tanklarının performans parametreleri [5]	35
Çizelge 3.1 Ön deneysel çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri	50
Çizelge 3.2 Kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	51
Çizelge 3.3 Kullanılan mineral katkıların kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	52
Çizelge 3.4 Kullanılan agregaların kimyasal özellikleri.....	53
Çizelge 3.5 Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri ve karışım oranları	55
Çizelge 3.6 UHPC üretiminde kullanılan malzemelerin karışım oranları	57
Çizelge 3.7 Radyasyon geçirgenlik deney programının kapsamı	66
Çizelge 3.8 Deneysel çalışmada kullanılan radyoizotopların özellikleri [81]	68
Çizelge 3.9 Karışımların oksit cinsinden kimyasal bileşenleri.....	74
Çizelge 4.1 Deneysel olarak hesaplanan lineer zayıflatma katsayıları (μ , cm^{-1}).....	97
Çizelge 4.2 Deneysel olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları (μ_m , cm^2/g).....	97
Çizelge 4.3 Teorik olarak hesaplanan lineer zayıflatma katsayıları (μ , cm^{-1}).....	99
Çizelge 4.4 Teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları (μ_m , cm^2/g).....	99
Çizelge 4.5 Yarı değer (YDK) ve onda-bir değer kalınlıkları (ODK).....	109
Çizelge 5.1 Design Expert paket programında kullanılan modeller	112
Çizelge 5.2 Çökme-yayılma sonuçlarının kuadratik modele göre ANOVA analizi... 113	
Çizelge 5.3 Çökme-yayılma çapının (cm) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri	114
Çizelge 5.4 V-hunisi akış sonuçlarının kuadratik modele göre ANOVA analizi	116
Çizelge 5.5 V-hunisi akış süresinin (sn) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri	117
Çizelge 5.6 Birim ağırlık sonuçlarının kuadratik modele göre ANOVA analizi	118
Çizelge 5.7 Birim ağırlığın (kg/m^3) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri	119
Çizelge 5.8 Basınç dayanımı sonuçlarının 2FI modele göre ANOVA analizi	121
Çizelge 5.9 Basınç dayanımının (MPa) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri	122
Çizelge 5.10 Eğilme dayanımı sonuçlarının kuadratik modele göre ANOVA analizi	123
Çizelge 5.11 Eğilme dayanımının (MPa) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri	124
Çizelge 5.12 Çekme dayanımı sonuçlarının 2FI modele göre ANOVA analizi.....	126
Çizelge 5.13 Çekme dayanımının (MPa) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri	127
Çizelge 5.14 0,200 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının 2FI modele göre ANOVA analizi	129

Çizelge 5.15 0,200 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının (cm^{-1}) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri.....	130
Çizelge 5.16 0,662 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının 2FI modele göre ANOVA analizi	131
Çizelge 5.17 0,662 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının (cm^{-1}) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri.....	133
Çizelge 5.18 1,250 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının 2FI modele göre ANOVA analizi	134
Çizelge 5.19 1,250 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının (cm^{-1}) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri.....	135
Çizelge 5.20 UHPC malzemesinin optimizasyonu için belirlenen amaçlar	138
Çizelge 5.21 Arzu edilen amaçlar için optimizasyon kriterleri	138
Çizelge 5.22 Arzu edilen amaçlara ait optimum karışım çözümleri.....	140
Çizelge A.1 UHPC serilerin çökme-yayılma çapı ve V-hunisi akış süresi deney sonuçları	161
Çizelge B.1 UHPC serilerin basınç dayanımı deney sonuçları	162
Çizelge B.2 UHPC serilerin eğilme dayanımı deney sonuçları	163
Çizelge B.3 UHPC serilerin çekme dayanımı deney sonuçları.....	164

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO ESASLI AĞIR KOMPOZİT MALZEMELERİN RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Muzaffer Mansur TÜFEKÇİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÖKÇE

Çimento esaslı kompozitler üzerinde son yıllarda yapılan birçok çalışmalar sonucunda yüksek dayanımın yanında yüksek süneklik kapasitesine ve üstün dayanıklılık özelliklerine sahip ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozitler (UHPC) geliştirilmiştir. UHPC, çok düşük bir su içeriği ile birlikte içyapının geliştirilmesiyle elde edilen yoğun bir mikroyapıya sahiptir. Ayrıca, hem basınç hem de çekme gerilmesi altında UHPC malzemesinin sünekliği ve enerji yutma kapasitesini karışımında kullanılan çelik lifler arttırmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle UHPC malzemesinin, inşaat sektöründe birçok uygulamada meydana gelen problemlerin çözümüne yönelik uygun bir yapı malzemesi olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle farklı inşaat uygulamalarında UHPC malzemesinin kullanımı son yıllarda hızla yaygınlaşmıştır.

Diğer taraftan, son yıllarda nükleer teknolojinin kullanım alanlarının artması sonucu radyoaktif malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasıyla radyasyondan korunmanın önemi de artmıştır. Ayrıca, ülkemizde yapımı devam eden nükleer santral reaktörlerinden ileride oluşacak atıkların zırhllanması, taşınması ve depolanması amacıyla kullanılacak tankların gereksinimleri olacaktır. Radyasyon zırhlamada yaygın olarak kurşun ve ağır agregalı geleneksel betonlar kullanılmaktadır. Kurşun malzemesinin maliyetinin yüksek ve bünyesinde bulundurduğu ağır metaller ile çevreye zararlı olmasından ve ağır betonların dayanıklılık problemleri nedeniyle kısa servis ömürleri olmasından dolayı radyasyon zırhlama amacıyla kullanılacak yeni malzemelerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu nedenle radyasyon zırhlama

performansı geliştirilmiş UHPC malzemesinin önemli bir zırh malzemesi olabileceği düşünülmektedir.

Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen doktora çalışmasında, farklı agregalar ve karışım parametreleri ile üretilen UHPC malzemesinin fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama özellikleri incelenmiştir. UHPC malzemesinin üretiminde, yaygın olarak kullanılan kuvars kumunun dışında radyasyon zırhlama özelliği olan ağır agregalar kullanılmıştır. Deneysel çalışma, 3 farklı su/bağlayıcı oranı (0,18, 0,24 ve 0,36), 3 farklı çelik lif içeriği (%1, %2 ve %3), 3 farklı agrega tipi (silis ve kuvars kumu karışımı, barit kumu ve granüle atık demir tozu) ve 2 farklı kür uygulaması (su ve buhar kürü) olmak üzere 4 farklı parametre ile tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Üretilen UHPC serilerinde; çökme-yayılma deneyi ve V-hunisi akış deneyi ile reolojik özellikler, basınç deneyi, eğilme deneyi ve çekme deneyi ile mekanik özellikler incelenmiştir. Ayrıca, 0,200 MeV enerjili X-ışını kaynağı ile 0,662 MeV enerjili sezyum (^{137}Cs) ve 1,250 MeV enerjili kobalt (^{60}Co) radyoizotopları olmak üzere 3 farklı enerji kaynağı için radyasyon zırhlama özellikleri deneysel ve teorik olarak belirlenmiştir. Teorik radyasyon zırhlama özellikleri, XCOM bilgisayar programı yardımıyla tüm serilerin XRF analiz yöntemi ile belirlenen kimyasal içerikleri kullanılarak 1 keV'den 1000 MeV'e kadar olan tüm enerjiler için belirlenmiştir.

Elde edilen deney sonuçlarına bağlı olarak her bir seri için, Design-Expert bilgisayar programı yardımıyla matematiksel ve istatistiksel tekniklerin kullanılması ile deney sonuçları üzerinde tekli ve kombinasyon halinde agrega tipi, su/bağlayıcı oranı, çelik lif içeriği ve kür tipi etkilerini tanımlayabilecek matematiksel bağıntılar üretilmiştir. Daha sonra, belirlenen matematiksel bağıntılar optimizasyon amaç fonksiyonu olarak tanımlanmış ve işlenebilirlik, mekanik ve farklı enerji değerlerinde radyasyon zırhlama açısından üstün özellikler ile birlikte en ekonomik tasarım koşullarında UHPC malzemesinin optimum karışım tasarımlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Tezin sonuç bölümünde ise deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve ortaya çıkan bulgular hakkında sebep-sonuç ilişkisi kurulmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozit (UHPC), barit kumu, granüle atık demir tozu, XCOM, Design-Expert

ABSTRACT

INVESTIGATION OF RADIATION SHIELDING PROPERTIES OF ULTRA HIGH PERFORMANCE CEMENT BASED HEAVY COMPOSITE MATERIALS

Muzaffer Mansur TÜFEKÇİ

Department of Civil Engineering

Ph.D. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Ahmet GÖKÇE

As a result of numerous studies about cement based composites conducted in recent years, ultra high performance cement based composites (UHPC) with high strength, high ductility capacity and superior durability have been developed. UHPC has a dense microstructure obtained by the improvement of particle packing combined with a very low water content. Also, steel fibers are used to enhance the ductility and energy absorption capacity of UHPC material under both compressive and tensile stress. Due to these characteristics, UHPC material is considered to be a suitable building material for the solution of the problems in many applications in the construction sector. For this reason, the use of UHPC materials in different construction applications has become widespread in recent years.

On the other hand, with increasing areas of use for nuclear technology in recent years the utilization of radioactive materials has become widespread, as a result the radiation shielding has as well gained significant importance. Moreover, the nuclear facilities under construction in our country will be generating considerable amounts of radioactive waste in the future which will require suitable tanks for shielding, transportation and storage purposes. The lead and conventional concrete incorporating heavy aggregates are widely used for radiation shielding materials. However, since lead is not a cost-effective option and since it is not an environmentally friendly material owing to its heavy metal content and since heavy concrete has a short service life due to

its durability problems there is a need for the development of new materials for radiation shielding purpose. For this reason, it is considered that UHPC material with improved radiation shielding performance may be an important shielding material.

In this doctoral study, the physical, mechanical and radiation shielding properties of UHPC materials produced by different aggregates and mixing parameters were investigated. Besides the commonly used quartz sand the production of UHPC material included the utilization of heavy aggregates possessing radiation shielding properties. An experimental program involving four main variables, namely, the curing regime (standard water curing and steam curing), the aggregate type (silica sand-quartz powder blend, barite sand, granulated ferrous waste powder), the steel fiber volume fraction (1%, 2% and 3%), and the w/b ratio (0.18, 0.24 and 0.36) was designed and conducted. Rheological properties such as flow table and V-Funnel test; mechanical properties such as compressive strength, flexural strength, load–deflection response, flexural toughness and tensile strength of UHPCC series were investigated. In addition, the experimental and theoretical radiation shielding properties have been investigated via three separate radiation sources, an X-Ray source of 0.200 MeV energy, a cesium (^{137}Cs) radioactive isotope of 0.662 MeV energy and a cobalt (^{60}Co) radioactive isotope of 1.250 MeV energy. The theoretical shielding properties on the other side were investigated for the energy range of 1 keV and 1000 MeV by means of XCOM software by analyzing the data regarding the chemical composition determined through XRF analysis. Based on the experimental results obtained, mathematical correlations were generated for each series by using mathematical and statistical techniques with the help of the Design-Expert computer program, which can identify aggregate types, water/binder ratios, steel fiber contents and cure types which are effect on the test results in a single and combined manner. Then, the determined mathematical correlations are defined as the optimization objective function and aimed to determine the optimum mixture design of UHPC material in the most economical design conditions with superior properties in terms of workability, mechanical and radiation shielding in different energy values.

Based on the experimental results obtained, mathematical correlations identifying the single and combined effect of aggregate types, water/binder ratios, steel fiber contents and curing types were generated for each series by using mathematical and statistical techniques provided by the Design-Expert computer program. Then, the determined mathematical correlations were defined as the optimization objective function and they were aimed to be used for the determination of the optimum mixture design of UHPC material in the most economical design conditions with superior properties in terms of workability, mechanical and radiation shielding in different energy values.

In the conclusion part of the thesis, all the results obtained from experimental and theoretical studies were examined comparatively and cause-effect relationships were investigated about the findings.

Keywords: Ultra high performance cement-based composites (UHPC), barite sand, granulated ferrous waste powder, XCOM, Design-Expert

1.1 Literatür Özeti

Çimento esaslı kompozit olarak bilinen geleneksel beton, genellikle birçok altyapı ve üstyapı uygulamalarında yapı malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Geleneksel betonun üretiminin kolaylığı, istenilen şeklin verilebilmesi, yüksek basınç dayanımı ve ekonomik olmasına rağmen çekme dayanımı ve yorulma dayanımı gibi süneklik gerektiren özellikleri oldukça düşüktür. Ayrıca iyi tasarlanmamış betonun zararlı çevresel etkilere karşı dayanıklılığı da oldukça düşüktür. Bu nedenle, son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte çimento esaslı kompozitler üzerinde malzemelerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan çalışmalar neticesinde, yüksek dayanımın yanında yüksek süneklik kapasitesine ve yüksek dayanıklılık özelliklerine sahip ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozitler (UHPC) geliştirilmiştir. Reaktif pudra betonu (RPC) olarak da bilinen UHPC ile ilgili ilk çalışmalar Richard and Cheyrezy tarafından 1994 yılında Paris'te Bouygues laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir [1]. UHPC malzemesinin tasarımı yapılırken, kompozitin mümkün olan en yoğun ve homojen matrise sahip olması sonucu çelik liflerin matris ile aderansının artırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda çimento matrisinde çatlak oluşmasından sonra bile yüksek aderansa sahip çelik lifler ile yüksek dayanım ve yüksek süneklik özelliği gösterebilen UHPC malzemesi geliştirilmiştir. UHPC malzemesi, basınç dayanımı 150 MPa değerini aşır yaklaşık 250 MPa değerine ulaşan ve çelik lif içeriği ile çekme altında sünek davranış sergileyerek demir donatı ihtiyacını ortadan kaldıran yüksek çimento ve mineral katkı içeriğine sahip malzemeler olarak tanımlanmaktadır.

Günümüzde inşaat endüstrisinde yaşanan problemlerin çözümü için geliştirilen üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip UHPC, yapısal elemanların kesitlerini

küçültmesiyle malzeme tasarrufu sağlamak ve kendiliğinden yerleşen kıvamıyla işçilik maliyetlerini düşüren yeni bir yapı malzemesidir [2]. Ancak, UHPC'nin nispeten yüksek üretim maliyeti inşaat sektöründe daha yaygın kullanımını kısıtlamaktadır. Bu nedenle, UHPC'nin üretim maliyetini azaltarak daha yaygın kullanılmasını amaçlayan birçok araştırma yapılmaktadır. UHPC malzemesi yüksek maliyetli olmasına rağmen, yüksek katlı yapılar, yapısal iyileştirme işleri, uzun açıklıklı köprüler, açık deniz yapıları, makine parçaları, askeri binalar ve sığınaklar gibi özel uygulamalarda kullanımı mevcuttur. Ayrıca, ani oluşabilecek hortumlar, tsunamiler ve depremler gibi doğal felaketler ve terörist faaliyetlerden kaynaklanan patlamalar gibi olması muhtemel yüksek seviyeli yüklere karşı da yüksek süneklik, üstün enerji yutma kapasitesi ve düşük hasar oluşumu özellikleri nedeniyle UHPC'nin etkili olduğu düşünülmektedir. Bu kullanım alanlarına ilave olarak, içyapısı geliştirilmiş UHPC'nin çok düşük ve birbirleriyle bağlantısız boşluk yapısı ile yüksek dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahip olması nedeniyle radyasyon zırhlamada ve radyoaktif atıkların depolanması ve taşınmasında kullanılacak tankların üretiminde uygun bir malzeme olabileceği birçok araştırmacı tarafından belirtilmektedir [3],[4].

Son yüzyılda, radyasyon kaynağı olan radyoaktif elementlerin, araştırma merkezlerinde, hastanelerde, çeşitli endüstrilerde, tarım alanlarında ve nükleer tesislerde kullanım alanları hızla yaygınlaşmasıyla hayatımız içinde önemli bir yer almaktadır. Özellikle, pek çok ülkede başlıca enerji kaynağı olarak kullanılan nükleer enerji santral reaktörlerinden düşük ve orta aktivite seviyelerinde sıvı ve gaz radyoaktif atıklar meydana gelmektedir. Bu atıklar ara depolamadan sonra nihai depolama tesislerine götürülerek radyoaktif ömürlerinin bitimine kadar depolanırlar. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından yayınlanan radyoaktif atıkların taşınması ve depolanması amacıyla kullanılacak tanklar istenen güvenlik şartlarının karşılanabilmesi için yapısal bütünlüğü bozulmadan uzun süreli mekanik dayanım, darbe direnci ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığa sahip ve sızıntı olmayacak şekilde geçirimsiz olması gerektiği belirtilmiştir [5]. Kullanılmış nükleer yakıtın taşınması ve depolanması için döküm demirden ve ağır betondan yapılmış sandviç tank sistemleri geliştirilmiştir. Ancak, bu tankların imalat zorlukları ve yüksek maliyeti nedeniyle kullanılmış nükleer yakıt depolama tanklarına yeni bir alternatif geliştirilmesi gerekmektedir [6].

1.2 Tezin Amacı

UHPC malzemesinin farklı uygulamalarda kullanılabilirliğinin araştırıldığı birçok çalışma literatürde mevcuttur. Ancak, radyasyon zırhlama performansını geliştirmek amacıyla ağır agrega kullanılarak üretilen UHPC malzemelerin özelliklerinin incelendiği kapsamlı bir çalışma mevcut değildir. Literatür bölümünde ifade edildiği gibi radyoaktif atık depo tanklar için gerekli olan mekanik ve dayanıklılık özellikleri UHPC malzemesinin sahip olduğu üstün özellikler ile karşılanabilmektedir. Ancak, UHPC malzemesinin üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerini bozmadan üretiminde radyasyon zırhlama özelliği olan minerallerin kullanılması ile zırhlama performansının geliştirilmesi gerekmektedir. UHPC malzemesinin üretiminde yaygın olarak kullanılan kuvars kumunun dışında farklı malzemelerin kullanımının araştırıldığı çalışmalar sınırlı sayıdadır. Özellikle barit kumu ve granüle atık demir tozu gibi radyasyon zırhlama performansının geliştirilmesi amacıyla kullanılan ağır agregaların UHPC malzemesinin özelliklerine etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, kullanılan ağır agregaların farklı radyasyon kaynakları ve enerji seviyeleri için zırhlama performansının da belirlenmesi gerekmektedir. Bu gereksinimlere ilave olarak, UHPC malzemesinin direkt çekme dayanımının belirlenmesini tarif eden herhangi bir standardın mevcut olmaması nedeniyle numune boyutlarını, deney düzeneğini ve deney koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu gereksinimleri belirlemek amacıyla gerçekleştirilen bu tezde:

- Üç farklı agrega tipi (silis kumu-kuvars tozu karışımı, barit kumu ve granüle atık demir tozu), üç farklı su/bağlayıcı oranı (0,18, 0,24 ve 0,36), üç farklı lif içeriği (%1, %2 ve %3) ve 2 farklı kür tipi (buhar kürü ve su kürü) gibi farklı parametreler ile üretilen UHPC malzemesinin taze haldeki işlenebilirlik ve sertleşmiş haldeki fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişiminin belirlenmesi,
- Farklı karışım parametreleri ile üretilen UHPC malzemesinin, nükleer alanlarda yaygın olarak kullanılan 0,200 MeV enerjili X-ışını ile 0,662 MeV enerjili sezyum (^{137}Cs) ve 1,250 MeV enerjili kobalt (^{60}Co) gama radyoizotopları olmak üzere 3 farklı enerji kaynağı için radyasyon zırhlama performansının araştırılması,
- XCOM bilgisayar programı yardımıyla her bir karışımın radyasyon zırhlama performans özelliklerinin teorik olarak hesaplanması ve deneysel olarak belirlenen sonuçlar ile karşılaştırılarak anlamlılığının belirlenmesi,

- Farklı karışım parametrelerin, UHPC malzemesinin işlenebilirlik, mekanik ve radyasyon zırhlama performans özelliklerine etkisini ifade eden grafiksel ilişkiler ve regresyon modellerinin belirlenmesi,
- Tasarım optimizasyonu için Design Expert bilgisayar programı kullanılarak;
a)İşlenebilirlik ve mekanik özellikler açısından üstün özellikler ile birlikte en ekonomik tasarım, b)İşlenebilirlik, mekanik ve farklı enerji değerlerinde radyasyon zırhlama açısından üstün özellikler ile birlikte en ekonomik tasarım koşullarında UHPC malzemesinin optimum karışım tasarımlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip UHPC malzemesinin üretiminde, radyasyon zırhlama özelliği olan malzemeler kullanılmasıyla radyasyon zırhlamada ve radyoaktif atıkların depolanması ve taşınmasında kullanılacak tankların üretiminde UHPC'nin önemli bir malzeme olması beklenmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda, barit ve bor gibi farklı malzemelerin geleneksel betonlarda kullanılmasıyla gama ve nötron ışımlarında radyasyon zırhlama malzemesi olarak kullanılması kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Ancak radyasyon kalkanı olarak kullanılması düşünülen malzemelerin boşluk yapısı, geçirimsizlik, dayanım ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılık parametreleri düşünüldüğünde geleneksel betona kıyasla UHPC malzemesinin kullanılması daha uygun olduğu düşünülmektedir. Özellikle son yıllarda hızla artan nükleer santrallerde enerji üretimi sonrası oluşan kullanılmış nükleer atıkların taşınması ve depolanması amacıyla kullanılacak tanklar ile ilgili üretim teknolojisi nihai olarak gerçekleştirebilmiş değildir. Ayrıca ülkemizde son yıllarda radyoaktif malzemelerin kullanımının yaygınlaşması ve ülkemizde yapımı ve projelendirmesi devam eden nükleer santral reaktörlerinden oluşacak atıkların zırhlaması, taşınması ve depolanması amacıyla kullanılacak yeni malzeme üretimi ile ilgili çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu nedenle radyasyon zırhlama performansı geliştirilmiş UHPC malzemesinin bu alanda kullanılabilecek önemli bir malzeme olması beklenmektedir. Bu nedenle, farklı agregalar ve farklı parametreler ile üretilen UHPC malzemesinin fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama performansının belirlenmesiyle, ülkemizde bu konuda daha fazla çalışma yapılmasına öncülük edeceği ve deney sonuçlarının bu konuda yapılacak sonraki çalışmalara katkıda bulunması beklenmektedir.

ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER VE RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİ

2.1 Çimento Esaslı Kompozitler

Birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip malzemelerden veya fazlardan oluşan sisteme kompozit malzeme denir. Son yıllarda farklı sanayi dallarında özellikle inşaat, ulaşım ve enerji sektörlerinde meydana gelen teknolojik gelişmelerle doğan ihtiyaçların karşılanması sebebiyle kompozit malzemelerin gereklilikleri artmıştır. Bu nedenle, yeni kompozit malzemeler, uygun malzeme tasarımı ve uygun teknoloji ile elde edilen üstün özellikleriyle vazgeçilmezlerdir. Kompozit malzemeler bileşenler tarafından yerine getirilen işlevlere dayalı olarak bağlayıcılar, dolgu ve takviyeler (sırasıyla örnek olarak; çimento, uçucu kül ve çelik lif) olmak üzere basitçe üç ana bileşen olarak düşünülmektedir [7]. Bağlayıcılar matris olarak veya diğer bileşenlerle birlikte matrisi oluşturarak kullanılırlar. Bağlayıcı malzemeler diğer bileşenleri bağlayarak, oluşan bağlarla gerilmelerin kesitten kesite iletilmesini sağlayan malzemelerdir. Dolgu malzemeleri ise çeşitli şekil ve boyutlarda taneler olarak kompozit malzemelerde kullanılır. Dolgu malzemeleri mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, çatlak yayılımının kontrol edilmesi, malzeme maliyetinin düşürülmesi ve gözenekli yapısı ile ısı yalıtım özelliklerinin geliştirilmesi gibi farklı nedenlerden dolayı matris içerisinde kullanılırlar. Takviye malzeme olarak çeşitli biçim ve şekilde malzeme kullanılmaktadır. Beton gibi gevrek matrise sahip olan malzemelerde takviye, tokluğu arttırmak ve çatlak yayılımını engellemek için sünek lifler veya deformasyon özelliği olan tanelerin kullanılması şeklinde olmaktadır [8]. Beton genel olarak çimento, agrega ve su gibi üç malzemenin karışımından oluşan çimento esaslı kompozit malzemedir. Betonun maliyetini ve fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek amacıyla

betona farklı malzemeler ilave edilmektedir. Bu bağlamda betonun ilk olarak üretim maliyetini düşürmek için 1970’lerde çimentodan daha ucuz olan cüruf, uçucu kül ve silis dumanı gibi endüstriyel atık olan dolgu malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır [9]. Böylelikle, bir ton çimento üretiminden meydana gelen yaklaşık bir ton karbon dioksitin salınımı azaltılmış ve endüstriyel atıklar kullanılarak çevresel sistemin korunması da sağlanmıştır [10]. Dolgu malzemelerinin dışında betonun mekanik özelliklerini iyileştirerek daha uzun servis ömrüne sahip olması için 1960’lardan günümüze kadar farklı şekil ve boyutlarda çelik, cam, polipropilen, naylon vb. gibi birçok lif kullanılmıştır. Lif takviyeli betonlar genel olarak lif içeren çimento matrisine sahip çimento esaslı kompozitler olarak tanımlanırlar. Çimento esaslı kompozitlerde lif takviyesi, liflerin süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş olmasıyla kompozit hacmi içinde dağıtılmasıyla oluşturulur. Etkili bir kompozit oluşturmak için hem lifin hem de çimento matrisinin birlikte güçlü bir bağ ile çalışması gerekmektedir [11]. Lifler, kompozit malzeme matrisinin çatlamasından sonra daha fazla yük taşıyarak malzemenin tokluğunu arttırmaktadır. Ayrıca lifler betonun darbe direncini, yorulma özelliklerini ve aşınma direncini iyileştirmektedir [8]. Dolayısıyla ilave malzemelerle maliyeti düşürülmüş ve performansı iyileştirilmiş çimento esaslı kompozit malzemelerin son yıllardaki devrimsel gelişmeleri sonucunda malzemeden istenen yüksek mukavemet, işlenebilirlik, dayanıklılık, aşırı yükte süneklik, darbe direnci, patlama direnci ve deprem performansı gibi genel hedefler sağlanmıştır [2]. Yüksek performanslı çimento esaslı kompozit malzemeler birçok performans parametresini yerine getirdiği için yeni üretim teknolojileri geliştirilmiş ve ihtiyaçlar doğrultusunda yeni uygulama alanları bulunmuştur [8]. Böylelikle inşaat uygulamalarında meydana gelen birçok problem için, problemin çözümüne yönelik özel malzeme ilavesiyle üretilen yüksek performanslı çimento esaslı kompozit malzemelerin kullanılması çözüm olmaktadır.

2.1.1 Kompozitlerin Tarihsel Gelişimi

İnşaat endüstrisinde yüzyıllardır süre gelen malzeme mühendisliğinin gelişimi yapıların evriminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle eski zamanlardan günümüze kadar insanlar dayanıklı ve uzun servis ömürleri olan yapıların inşasında kullanmak için yüksek dayanımlı ve daha fazla performanslı malzemeler kullanmayı amaçlamışlardır. Malzemelerin zayıf yönlerini geliştirerek üstün özellikler elde etmek amacıyla binlerce yıldır kompozit malzemeler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Kompozit malzemelerin

gelişim sürecinin en başında çamur, saman ve ahşap gibi antik çağda elde edilmesi daha kolay olan malzemeler vardır. Kompozit malzemeler ile ilgili olarak tarihte ilk referans kaynak, Tevrat'ta bahsedilen saman takviyeli kerpiç tuğlaların kullanıldığının belirtilmesidir [7]. Daha sonra farklı malzemeler kullanılmasıyla üretilen kompozit malzemelerden elde edilen tuğla ve kerpiç gibi malzemeler halen dünyanın birçok yerinde yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Girit uygarlığı ve Yunanlılar M.Ö. 2000 yıllarında hidrolik olmayan kireç harcı kullanmaya başlamışlardır. Ancak bu malzeme sadece karbonatlaşma nedeniyle dayanım kazanmakta ve çevresel etkilere maruz kaldığı zaman bağlayıcılık özelliği zayıfladığı için çok performanslı olmadığı görülmüştür [2]. Bu nedenle kireç harcının zayıf yönünü geliştirmek için, M.Ö. 70–25 yılları arasında yaşamış olan Mimar Vitruvius'un kitabında, kirece Pozzuoli kasabasındaki volkanik tüf içeren toprağın ilave edilmesiyle elde edilen karışımın hidrolik özellikte olduğu ve bu nedenle nehir ve deniz kıyısında yapılacak olan yapılarda kullanılabileceği belirtilmiştir [12],[13]. Böylelikle günümüze kadar gelişme gösterecek bağlayıcı ve kompozit malzemelerin temeli o zamanlarda atılmıştır. Antik dünyanın birçok alanında kireç, kum, taş ve sudan oluşan bu karışımlar kullanılmış ve bugün bile gelişmiş olmayan pek çok ülkede benzer karışımlar halen kullanılmaktadır.

Günümüzde bağlayıcı olarak yaygın kullanılan Portland çimentosu ise Josepf Aspdin tarafından ince taneli kil ve kalker karışımının pişirilmesi ve daha sonra öğütülmesi ile elde edilmiş ve resmi olarak 1824 yılında İngiltere'de patentlenmiştir [14]. Bu gelişmenin ardından betonarme yapılar ise ilk olarak 1854 yılında W.B. Wilkinson tarafından İngiltere'de patentlenmiştir [2]. Bu resmi bilgilere göre betonarmenin günümüze kadar gelişim süreci yaklaşık 160 yıldır. 1950'lere kadar üretilen betonlar yaklaşık 15–20 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Daha sonraki yıllarda, teknolojinin gelişmesiyle üretilen su azaltıcı kimyasal katkıları, betonun su/bağlayıcı oranını azaltmasıyla betonun basınç dayanımı 40–50 MPa değerine ulaşmıştır [15]. Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı yanında çekme dayanımını arttırmak için matrise ilave olarak süreksiz lif takviyesinin düşünülmesi ilk olarak Romualdi ve Mandel'in [16] 1960'lı yılların başında araştırmaları sonrasında başlamıştır. 1980'lerde ise yüksek oranda su azaltabilen süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları betonun işlenebilirliği düzeltilmiş ve silis dumanı gibi puzolanik reaktif mineral katkıları kullanılmasıyla betonun basınç dayanımı 100 MPa değerini aşmıştır [17]. Bu gelişmelerin arkasından

kimyasal ve mineral katkılar üzerinde yapılan yoğun çalışmalar, bu katkıların özelliklerinin geliştirilmesine yol açmış ve böylece çok düşük su/bağlayıcı oranına ve yüksek kompasiteye sahip çimento esaslı kompozit malzemelerin üretimi hız kazanmıştır. Bu çalışmaların neticesinde “ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozit” diğer adıyla “reaktif pudra beton” 1994 yılında Fransa’da Bougues Laboratuvarı’nda Richard ve Cheyrezy tarafından yapılan çalışmalarda geliştirilmiştir [1]. Silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı, ince agrega ve çelik lif ilavesiyle üretilen kompozitlere farklı sıcaklıklarda ısıtılma işlemi uygulanarak basınç dayanımlarının 200 MPa ile 800 MPa’a ve çekme dayanımları 25 MPa ile 150 MPa’a kadar ulaşabildiği görülmüştür. Ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozit genel olarak yüksek dayanım, yüksek durabilite ve yüksek süneklik özellikleriyle tanımlanabilen ve özel uygulamalar başta olmak üzere ileride kullanımının yaygınlaşması beklenen bir kompozit türü olarak bilinmektedir.

2.1.2 Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı

Çimento esaslı kompozitlerde matrise ilave olarak süreksiz lif takviyesinin ilk olarak araştırıldığı Romualdi ve Mandel’in [16] 1960’lı yılların başında gerçekleştirdiği çalışmalarda, kırılma mekaniği yaklaşımı ile lif donatılı kompozitlerin çekme gerilmesi incelenmiş ancak kompozitin çekme gerilmesi altındaki gerilme-şekil değiştirme ve gerilme-deformasyon tepkileri hakkında çok az bilgi verilmiştir. Lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı ile ilgili olarak önceki yapılan çalışmalarda, ilk olarak çekme gerilmesi altındaki gerilme-deformasyon tepkileri hakkında derinlemesine araştırmalar 1972 yılında Naaman tarafından yapılmıştır [18]. Süreksiz liflerle takviye edilmiş çimento esaslı kompozitler çekme gerilmesi altında şekil değiştirme yumuşaması (strain-softening behavior) veya şekil değiştirme sertleşmesi (strain-hardening behavior) davranışı gösterdiği belirlenmiştir [19].

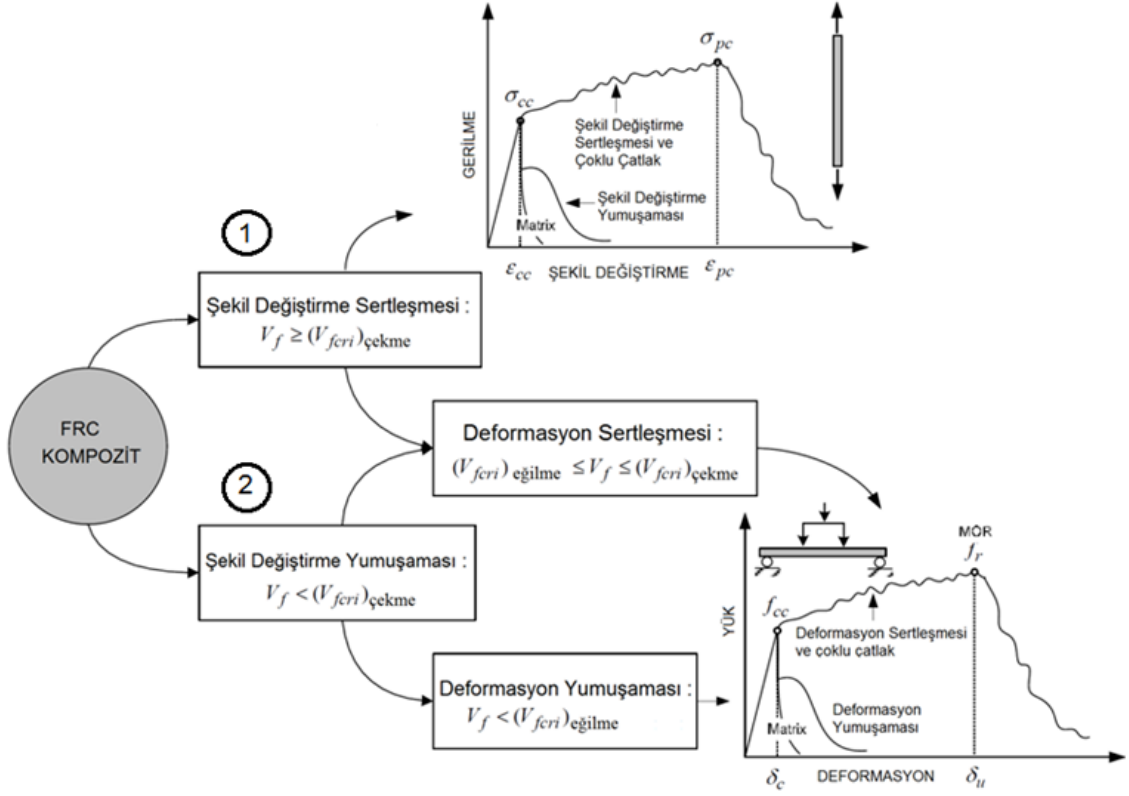
Çekme gerilmesi altındaki şekil değiştirme yumuşaması davranışında matris fazında oluşan ilk çatlaktan sonra gerilmenin düştüğü ve bu süreçte bir bölgede tek çatlak oluşumu olduğu görülmüştür. Ayrıca uzamanın devam etmesiyle oluşan çatlakların açıklığının arttığı belirlenmiştir. Şekil değiştirme yumuşaması davranışı, kompozit malzeme içerisinde bulunan lif hacminin (V_f) çekme gerilmesi kritik lif hacminden ($V_{f_{cri}}$) az olması durumunda meydana gelmektedir [19].

Lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin çekme gerilmesi altındaki diğer bir davranışı olan şekil değiştirme sertleşmesinde ise, matraste ilk çatlak oluşumundan sonra gerilmenin arttığı ve bu süreçte çoklu çatlakların oluştuğu görülmüştür [20]. Şekil değiştirme sertleşmesinde gerilmenin maksimum değere ulaşmasından sonra, gerilmenin düşmesiyle şekil değiştirme yumuşaması davranışı görülmektedir. Çoklu çatlak oluşumu, malzemenin çekme, basınç ve eğilme altında şekil değiştirme kapasitesi, süneklik, tokluk, kırılma enerjisi gibi özelliklerinin gelişmesine neden olmaktadır [21]. Şekil değiştirme yumuşaması davranışı kompozit malzeme içerisinde bulunan lif hacminin (V_f) çekme gerilmesi kritik lif hacminden (V_{fcri}) fazla olması durumunda meydana geldiği görülmektedir [19]. Şekil 2.1’de lif donatılı beton (FRC) malzemelerinde şekil değiştirmesi sertleşmesi ve şekil değiştirmesi yumuşaması davranışına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir [22].

Ayrıca Şekil 2.1’de, eğilme etkisi altındaki lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin davranışları yük-deformasyon eğrisi üzerinde gösterilmiştir. Lif donatılı çimento esaslı kompozitler eğilme gerilmesi altında deformasyon yumuşaması (deflection-softening behavior) veya deformasyon sertleşmesi (deflection-hardening behavior) davranışı göstermektedirler [19].

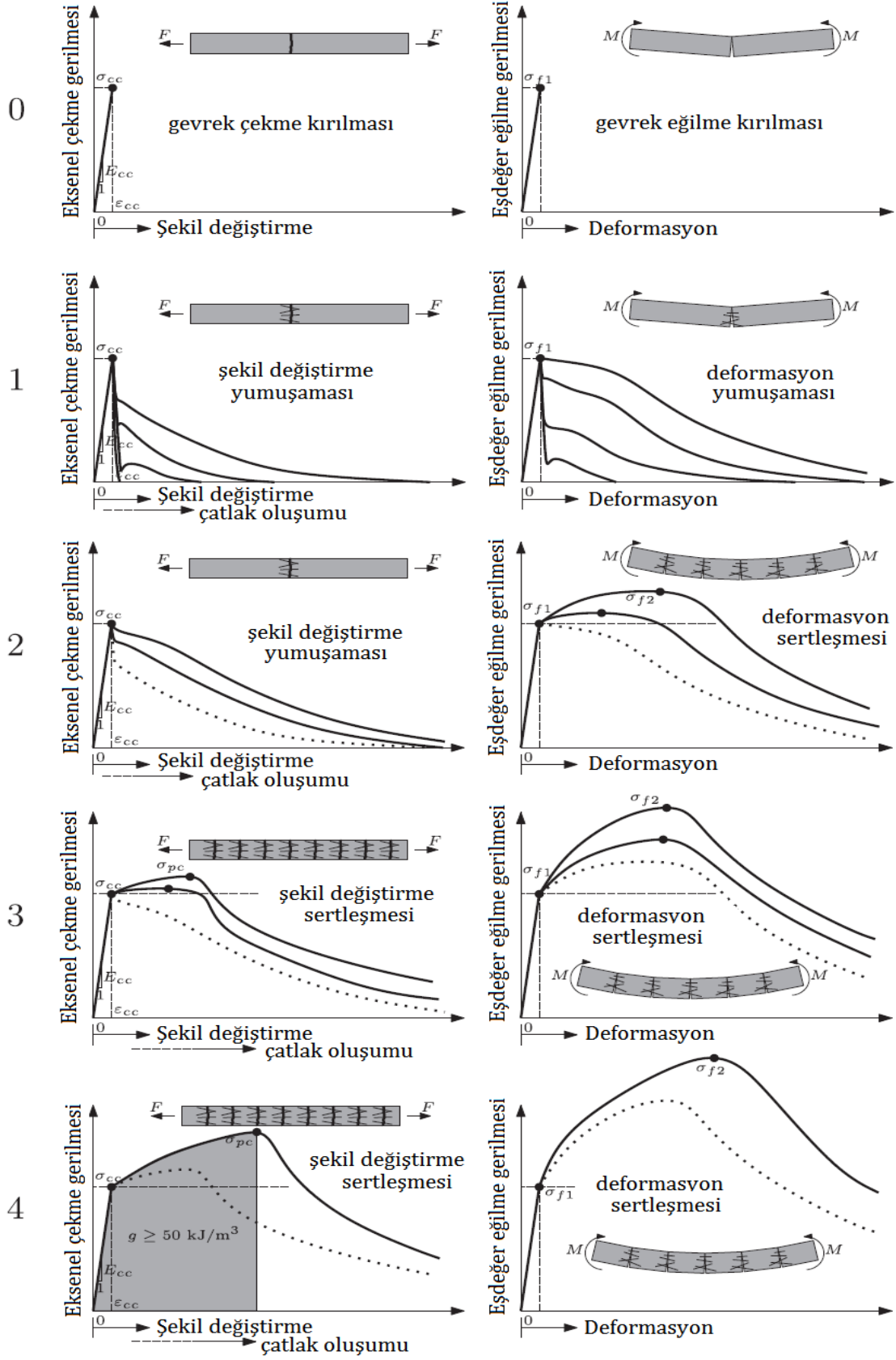
Deformasyon yumuşaması davranışı, kompozit malzeme içerisinde bulunan lif hacminin (V_f) eğilme gerilmesi kritik lif hacminden (V_{fcri}) az olması durumunda meydana gelmektedir [22]. Bu davranışta ilk çatlağın oluşumundan sonra yük azalmakta bir noktada çatlak oluşumu meydana gelmektedir. Deformasyon sertleşmesi davranışı ise kompozit malzeme içerisinde bulunan lif hacminin (V_f) eğilme gerilmesi kritik lif hacminden (V_{fcri}) fazla olması durumunda meydana geldiği görülmektedir [22]. Bu davranışta ilk çatlağın oluşumundan sonra yükün arttığı ve bölgesel çoklu çatlakların oluştuğu görülmüştür.

Şekil değiştirme yumuşaması davranışı gösteren lifli kompozitler, eşdeğer eğilme gerilmesi altında deformasyon yumuşaması ($V_f \leq V_{fcri-eğilme}$) veya deformasyon sertleşmesi ($V_{fcri-eğilme} \leq V_f \leq V_{fcri-çekme}$) davranışı gösterebilmektedir. Burada iki farklı davranışın oluşabilme nedeni bütünüyle kompozit malzeme içerisindeki lif hacminin kritik lif içeriğinden az veya fazla olmasıyla ilgilidir. Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösteren lifli kompozitlerde ise eşdeğer eğilme gerilmesi altında sadece deformasyon sertleşmesi davranışı gösterebilmektedir [22].



Şekil 2.1 FRC kompozitlerin çekme gerilmesi altında davranışları [22]

Şekil değiştirme yumuşaması davranışı gösteren lifli kompozitlerin, eğilme testleri ile özelliklerini belirlemek amacıyla birçok deney standardı (ASTM, JCI, RILEM) mevcuttur. Ancak şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösteren kompozitler için herhangi bir deney standardı mevcut değildir. Dolayısıyla, lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerin sınıflandırılması eksik bir biçimde ifade edilmektedir. Son yıllarda, birçok araştırmacı tarafından şekil değiştirme sertleşmesi gösteren kompozitler üzerinde çalışma yapılmakta ve bu malzemelerin direk çekme testlerinin sonuçlarına göre FRC kompozitlerinin şekil değiştirme sertleşmesi davranışının karakterize edilmesi ile literatürde bir sınıflandırılma yapılmıştır [22],[23]. Bu sınıflandırma, minimum bir elastisite modülü değeri, ilk çatlak oluşumu sonrası minimum pik şekil değiştirme değeri ve çekme gerilmesi seviyesi gibi çeşitli parametrelere dayandırılmıştır. Ancak gerçekçi ve anlamlı bir çekme testi standardı geliştirmek için minimum numune boyutları, lif boyutu ve agrega boyutu ile ilgili bazı şartların önerilmesi gerekmektedir [22]. Şekil 2.2’de çimento esaslı lifli kompozitler, lif seviyesine bağlı olarak aksenal çekme gerilmesi-şekil değiştirme ve bu çekme gerilmesine eşdeğer eğilme gerilmesi-deformasyon davranışı gösterilmiştir [23].



Şekil 2.2 FRC kompozitlerin çekme ve eğilme gerilmesi etkisindeki davranışına göre sınıflandırılması [23]

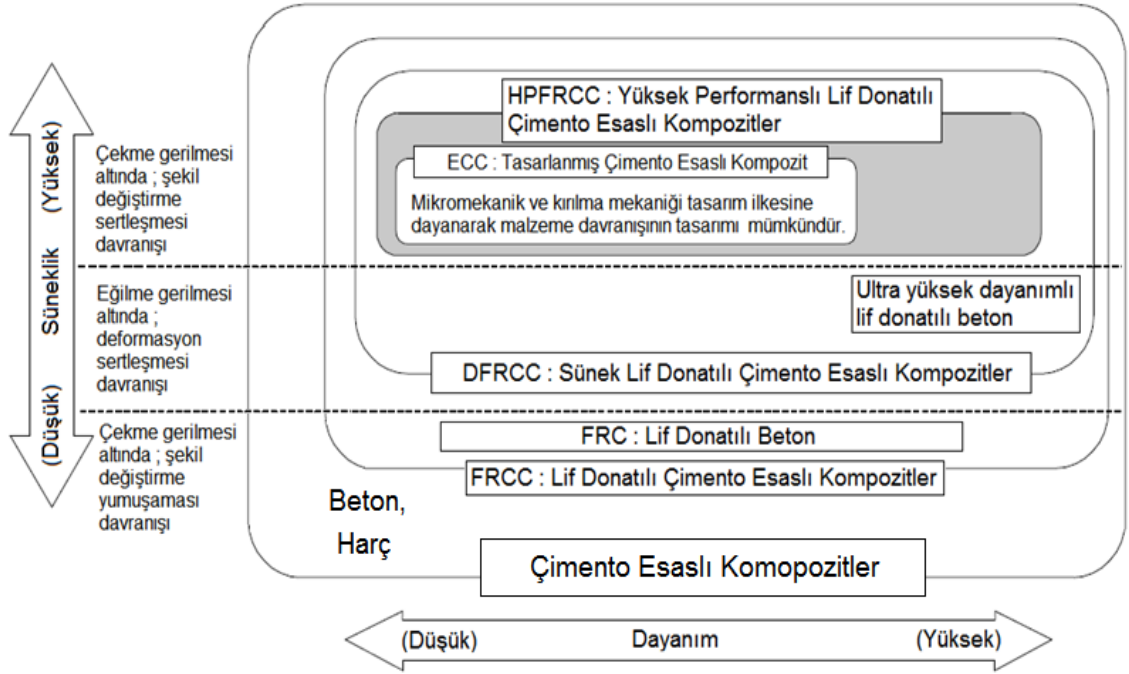
2.1.3 Çimento Esaslı Kompozitlerin Sınıflandırılması

Son yıllarda beton teknolojisinde yaşanan büyük gelişmeler ile çimento esaslı kompozitlerin farklı yapısal elemanlarda kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda betonun zayıf olan mekanik özelliklerinin (çekme dayanımı, eğilme dayanımı vb.) geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çimento esaslı kompozitler aşağıda verildiği gibi basınç dayanımı seviyelerine göre literatürde beş sınıfa ayrılmıştır.

- Geleneksel beton, 60 MPa'a kadar,
- Yüksek dayanımlı beton, 60–90 MPa,
- Çok yüksek dayanımlı beton, 90–130 MPa,
- Reaktif pudra beton, 200–800 MPa,
- Yüksek performanslı hafif beton, 55 MPa'dan fazla [24].

Çimento esaslı kompozitler üzerinde bugüne kadar yapılan araştırmalarda kullanılan mineral katkı tipi, lif tipi, lif içeriği, su/bağlayıcı oranı vb. gibi parametrelerle yüksek basınç dayanımının yanında zayıf olan mekanik özelliklerinin geliştirilmesi sağlanmıştır. Bu nedenle çimento esaslı kompozitlerin sadece basınç dayanımını dikkate alarak yukarıda yapılan sınıflandırmaya göre değil, özel uygulamalardaki problemleri çözmek için gerekli olan performans kriterleri esas alınarak sınıflandırılması gerektiği anlaşılmıştır. Çimento esaslı kompozitlerin sınıflandırılması dayanım ve süneklik kapasitesine göre Şekil 2.3'te gösterildiği gibi Japonya Beton Enstitüsü tarafından yapılmıştır [25]. Mekanik özellikler bakımından bu sınıflandırma incelendiğinde, basınç dayanımı normal ancak yüksek çekme ve eğilme dayanımına sahip olan malzemeler sünek lif donatılı çimento esaslı kompozitler (DFRCC) olarak tanımlanmaktadır. DFRCC malzemesi çekme ve basınç gerilmesi altında önemli derecede süneklik davranışı ile eğilme altında deformasyon sertleşmesi ve çoklu çatlak oluşumu göstermektedir [21]. Yüksek çekme ve eğilme dayanımının yanında yüksek basınç dayanımına sahip malzemeler ise yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozit (HPFRCC) olarak sınıflandırılma yapılmıştır [26]. Ayrıca lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin bir diğer sınıfı olan tasarlanmış çimento esaslı kompozit (ECC) malzemeler, geçtiğimiz on yılda geliştirilen mikromekanik temele göre özel hazırlanmış içyapıya sahip, basınç dayanımı normal ancak yüksek çekme ve süneklik özelliğine sahip HPFRCC türüdür [27]. Lif donatılı çimento esaslı kompozit sınıfları arasından en

yüksek mekanik ve durabilite özellikleri ile en yüksek süneklik kapasitesiyle çekme gerilmesi altında şekil değiştirme sertleşmesi gösteren ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozitler (UHPC), son yıllarda yapı malzemeleri arasında en üstün özelliklere sahip en önemli kompozit türüdür.



Şekil 2.3 Çimento esaslı kompozitlerin sınıflandırılması [25]

2.2 Ultra Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitler (UHPC)

Son yıllarda çimento esaslı kompozitler üzerinde yapılan birçok çalışma neticesinde, yüksek dayanımın yanında yüksek süneklik kapasitesine sahip ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozitler (UHPC) geliştirilmiştir. UHPC, bir ya da daha fazla tamamlayıcı malzeme (örneğin uçucu kül, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu vb. gibi) ve çelik lifler içeren, sıradan FRCC'den daha fazla bağlayıcıya sahip bir çimento esaslı kompozittir. UHPC'nin temel tasarım ilkesi, geliştirilmiş mekanik ve dayanıklılık performanslarını sağlamaktadır. Reaktif pudra betonu (RPC) olarak da bilinen UHPC ile ilgili ilk çalışmalar Richard ve Cheyrezy tarafından 1994 yılında Paris'te Bouygues laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir [1]. Bu araştırmalarda kompozitin mümkün olan en yoğun matris ve agrega-matris ara yüzeyinde iyi bir aderans elde edilmesi amaçlanmıştır. Mikroyapısının iyileştirilmesi ile ilave edilen çelik liflerin matris ile aderansı artırılmış ve bu sayede çimento matrisinde çatlak

gelişimi olduktan sonra çelik lif takviyesiyle yüksek dayanım ve yüksek süneklik özelliği gösteren kendiliğinden yerleşen UHPC malzemesi tasarlanmıştır [28].

2.2.1 UHPC'nin Genel Özellikleri

Son zamanlarda birçok araştırmacı ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozit (UHPC) ile ilgili çalışmalar yapmakta ve dünya genelinde bu malzemenin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Literatürde UHPC malzemesi, ultra yüksek performanslı lif donatılı beton (UHPFRC), reaktif pudra beton (RPC) ve çok yüksek dayanımlı beton (VHSC) gibi isimlendirilerek tanımlanmaktadır. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) şu ana kadar UHPC malzemesini terim olarak tanımlamamıştır. Ancak UHPC malzemesine terim olarak en yakın olan yüksek performanslı beton (HPC) ACI'ye göre, geleneksel kompozisyon, karıştırma ve kürleme prosedürleri kullanılarak elde edilemeyen özelliklerin ve gereksinimlerin, farklı kompozisyon ve özel üretim tekniği ile üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin elde edildiği beton olarak tanımlanmıştır. Diğer yandan, Fransız inşaat mühendisleri derneği (AFGC) tarafından 2002 yılında yayınlanan yönetmelikte ultra yüksek performanslı lif donatılı betonların (UHPFRC) tanımı yapılmıştır [29]. Bu tanıma göre UHPFRC, basınç dayanımı 150 MPa değerini aşır muhtemelen 250 MPa değerine ulaşan ve çelik lif içeriği ile çekme altında sünek davranış sergileyerek demir donatı ihtiyacını ortadan kaldıran malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Birçok araştırmacı tarafından UHPC malzemesinin sınıflandırılabilmesi için mekanik ve dayanıklılık özellikleri bakımından bazı değerler belirlenmiştir. Aşağıda araştırmacılar tarafından verilen bu değerler UHPC malzemesinin tarifinde genel bir çerçeve belirlemiştir [1], [29],[30],[31],[32],[33].

- Basınç dayanımı 150 MPa'dan daha yüksek,
- Matrisin direkt çekme dayanımı 7 MPa'dan daha yüksek,
- Kompozitin direkt çekme dayanımı 10 MPa'dan daha yüksek,
- Kompozitin eğilme dayanımı 50 MPa değerini aşan,
- Kırılma enerjisi 40,000 J/m² değerini aşan,

2.2.1.1 UHPC Üretiminin Temel Prensipleri

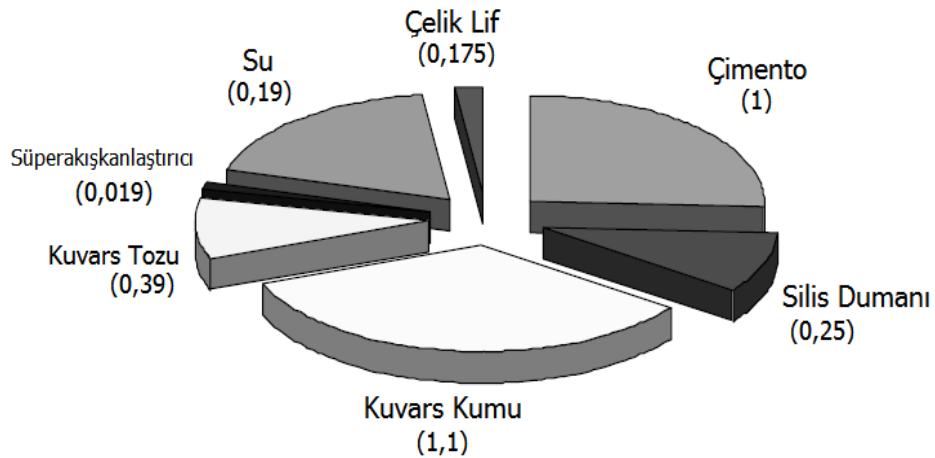
Çok düşük su içeriğine sahip UHPC'nin üretiminde en önemli amaç, sıkı tane düzeninin geliştirilmesiyle mümkün olan en yoğun içyapının elde edilmesidir. Bu amaca ulaşmak geleneksel betonları oluşturan malzemelerin kullanılması ile mümkün olmayacaktır. Bu nedenle mümkün olan en yoğun içyapının elde edilmesi için daha farklı malzemelere ve daha farklı tasarımlara ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda tasarlanan UHPC malzemesi, bağlayıcı olarak yüksek miktarda çimento, mineral katkı olarak silis dumanı ve uçucu kül, kimyasal katkı olarak süperakışkanlaştırıcı ve agrega olarak ise ince öğütülmüş kuvars tozunun çok az miktarda su ile karışımı ile oluşmaktadır. Bu karışım, akıcı kıvama ulaşana kadar karıştırıldıktan sonra çelik lif takviyesiyle elde edilen yüksek dayanım ve süneklik kapasitesine sahip bir kompozit malzeme olarak ifade edilmektedir [1]. UHPC malzemesinin üretiminde kullanılan temel prensipler birçok araştırmacı tarafından belirlenmiş ve aşağıda verilmiştir [1],[28],[30],[34];

1. İri agregaların kullanılmasıyla oluşan heterojen yapının mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisinin giderilmesi için, ince agreganın ($d_{\max} = 600 \mu\text{m}$) kullanılmasıyla homojenliğin artırılması,
2. Mümkün olan en yoğun içyapının ve en sıkı tane düzeninin elde edilmesi amacıyla geniş tane boyut dağılımlı toz dolgu malzemelerin kullanılması,
3. Silis dumanı gibi bir puzolanik katkı maddesi ilave edilerek matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi,
4. Su/bağlayıcı oranını azaltarak matris özelliklerinin iyileştirilmesi,
5. Numunenin priz bittikten sonra ısıtma işlemiyle kür uygulamasıyla içyapısının iyileştirilmesi,
6. Küçük boyuttaki çelik liflerin takviyesiyle çekme dayanımının ve sünekliğin artırılması.

Yukarıda verilen ilk beş temel prensibin uygulanması, UHPC malzemesinin içyapısının iyileştirilmesiyle çok yüksek basınç dayanım değerine ulaşmasına neden olur. Çelik liflerin takviyesi ise kompozitin zayıf olan özelliklerinden çekme dayanımını ve sünekliği arttırmaya katkıda bulunmaktadır.

2.2.1.2 UHPC'yi Oluşturan Malzemeler

Özel uygulamalara bağlı olarak UHPC malzemesi bir takım farklı malzeme kompozisyonlarına sahip olabilir. Ancak UHPC üretiminde genel olarak çimento, silis dumanı, kuvars tozu, doğal kum, çelik lif, su ve kimyasal katkı kullanılmaktadır. UHPC tasarımını ilk olarak yapan araştırmacılar tarafından kullanılan karışım oranları Şekil 2.4'te verilmiştir. UHPC karışımındaki her bileşenin rolü daha ayrıntılı bir şekilde aşağıdaki bölümlerde sunulmaktadır.



Şekil 2.4 UHPC üretiminde kullanılan malzemeler ve karışım oranları [30]

- **Çimento**

UHPC üretiminde yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanıldığı için, üretimde kullanılacak çimentonun seçiminde süperakışkanlaştırıcı ile uyumu önemlidir. Çimentonun kimyasal bileşim açısından, düşük trikalsiyum alüminat (C_3A) içeriğine sahip çimentolar daha az miktarda su gereksinimi olduğundan dolayı daha iyi performans göstermektedir. Ayrıca, UHPC üretim tekniğinde uygulanan yüksek sıcaklıklardaki kür işleminde, gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) riski açısından da düşük C_3A içeriği avantajlıdır [35]. Çimento tanelerinin inceliği açısından, yüksek Blaine inceliğine sahip çimentoların su ihtiyacının yüksek olması nedeniyle fiziksel ve mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir [30]. UHPC üretiminde kullanılan çimento miktarı geleneksel betonda kullanılan miktara göre yaklaşık iki katıdır. UHPC üretiminde düşük su/bağlayıcı oranı kullanılması nedeniyle çimento parçacıklarının hepsi reaksiyona girmeyebilir. Reaksiyona girmeyen çimento taneleri dolgu malzemesi olarak görev almakta ve sıkı tane düzenine katkıda bulunmaktadır [33].

- **Mineral Katkı (Silis Dumanı)**

İnce taneli mineral katkıların kullanılması betonun birçok özelliğini iyileştirmeye yardımcı olmaktadır. Mikron boyutundaki mineral katkılar çimento ve agrega taneleri arasındaki boşlukların verimli bir şekilde doldurulmasıyla mümkün olan en sıkı tane düzeni sağlanmaktadır [36]. Mineral katkıların kullanılmasının UHPC üzerindeki en önemli etkisi, çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan reaksiyon ürünü olan serbest kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği olan yeni ürünler oluşturmaktadır. Oluşan bu ürünler sayesinde içyapısı iyileştirilen UHPC malzemesinin porozitesi azalmakta ve bu nedenle fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı artmaktadır. Ayrıca mineral katkıların tane yapılarının küreselliklerinden kaynaklanan tanelerin birbiri üzerinde oluşturduğu kayma etkisi ile malzemenin reolojik özelliklerin geliştirilmesine katkı sağladığı görülmüştür. Bütün bu özelliklere sahip çok ince tane yapıli silis dumanı, puzolan olarak UHPC üretiminde çimento miktarının %25 oranında kullanılmaktadır [30]. Aslında çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan serbest kirecin tamamen tüketilmesi için gerekli olan silis dumanı miktarı, çimentonun %18'i olarak belirlenmiştir [37]. Ancak karışımda en yoğun içyapının elde edilmesi için en uygun silis dumanı içeriği yaklaşık %25 olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [1],[30].

- **Agrega (Kuars Kumu)**

UHPC malzemesinin mümkün olan en yoğun içyapıya sahip olabilmesi için üretiminde kullanılan agregaların tane boyu dağılımı önemlidir [35]. Geleneksel beton üretiminde iri agregaların kullanılması kompozit malzemenin heterojen bir yapıda olmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla homojenliği arttırmak için kullanılacak agreganın maksimum tane boyutu UHPC üretiminde 1 mm ve reaktif pudra betonu üretiminde 600 µm olarak sınırlandırılmıştır. Agregaların minimum tane boyutu olarak ise agreganın çimento taneleri ile etkileşimini önlemek için 150 µm'den küçük agrega tane boyutlarından kaçınılmaktadır [30]. UHPC üretiminde kullanılan yüksek miktarda bağlayıcı nedeniyle malzemenin bağlayıcı matrisi yüksek dayanıma ulaşmakta ve bu nedenle, UHPC malzemesinde agreganın zayıf kısmı haline gelmemesi için yüksek dayanım özelliklerine sahip agrega kullanılmalıdır [32]. Kırılmış kristal kuvars tozunun yüksek dayanım özelliğine sahip olması ve yüksek sıcaklıklarda çimento reaksiyonu sonucu oluşan serbest kireçle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliği olan yeni ürünler (C-S-H)

oluşturmaktadır [35]. Bundan dolayı, kristal kuvars tozu genellikle ısıtılmış kuru uygulamalarıyla üretilen UHPC malzemelerinde kullanımı uygundur [30].

- **Kimyasal Katkı (Süperakışkanlaştırıcı)**

Düşük su/bağlayıcı oranından dolayı, UHPC malzemesinin yeterli işlenebilirliğe sahip olabilmesi için süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıların kullanılması çok önemlidir. UHPC malzemesinin yeterli işlenebilir hale gelebilmesi için, polikarboksilat eter esaslı üçüncü nesil süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları yeterli miktarda su azaltmaktadır [38].

- **Çelik Lif**

UHPC malzemesinin matris fazı yüksek dayanımlı ve çok gevrek [30]. Ancak ultra yüksek performanslı ismindeki "performans" kısmı aslında liflerin ilavesiyle oluşmuştur [33]. UHPC malzemesinin hem basınç hem de çekme gerilmesi altında sünekliğini arttırmak için çelik lif ilavesi yapılmaktadır. Çelik lifler malzemenin eğilme ve çekme dayanımını oldukça artırırken, basınç dayanımını ise çok az arttırmaktadır. UHPC üretiminde kullanılan çelik lifler genellikle kısa, pürüzsüz ve düz iken, kanca şeklindeki lifler ise daha çok yüksek veya normal dayanımlı betonlarda kullanılmaktadır. Lif içeriği (V_f), tüm hacmin içerisindeki kapladığı hacim olarak ifade edilir. UHPC üretiminde %2- %6 oranında 13 mm uzunluğunda, çapı 0,15 mm ve çekme dayanımı yaklaşık 2000 MPa olan düz çelik lifler yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretimin maliyeti ve mekanik özellikler aynı anda düşünüldüğünde hacimce % 2 oranında çelik lif kullanılması en uygun çözüm olarak önerilmiştir [30].

2.2.1.3 UHPC Karışım Tasarımı

UHPC karışımın tasarımı için henüz yerli ve yabancı herhangi bir standart mevcut değildir. Ancak bu konu ilgili olarak çalışma yapan araştırmacılar tarafından farklı karışım oranları önerilmektedir. Normal dayanımlı beton (NSC), yüksek dayanımlı beton (HSC) ve UHPC'nin tipik kompozisyonları ve özellikleri karşılaştırma amacıyla, Çizelge 2.1'de verilmiştir. UHPC malzemesi çok yüksek bağlayıcı içeriği ve çok düşük bir su/bağlayıcı oranına sahip olması nedeniyle diğer beton türlerine göre karışımları farklılık gösterir. Ayrıca UHPC malzemesinin karışım oranları, kullanılacak malzemelerin çeşidine göre farklılık göstermektedir.

Çizelge 2.1 Normal dayanımlı beton (NSC), yüksek dayanımlı beton (HSC) ve UHPC'nin tipik kompozisyonları ve özellikleri [35]

	Bileşen (kg/m ³)	Normal Dayanımlı Beton (NSC)	Yüksek Dayanımlı Beton (HSC)	UHPC
Bileşen (kg/m ³)	Çimento	< 400	≈ 400	700-1000
	Silis dumanı	-	40	200-300
	İri agrega	≈ 1000	≈ 900	-
	İnce agrega (0–4 mm)	≈ 700	≈ 600	-
	Kuvars tozu (150–600 µm)	-	-	1000-2000
	Süperakışkanlaştırıcı	-	5	10-40
	Su	> 200	100 - 150	110-200
	Çelik lif (L=12 mm)	-	-	> 150
	Su/çimento oranı	> 0,35	0,28-0,38	< 0,24
	Su/bağlayıcı oranı	> 0,35	< 0,38	< 0,22
Özellikler	Birim Ağırlık (kg/m ³)	2000-2800	2000-2800	>2500
	Basınç Dayanımı (MPa)	<60	60-100	> 150
	Çekme Dayanımı (MPa)	< 3	< 5	> 8
	Elastisite Modülü (GPa)	≈ 30	< 45	50-70
	Kırılma Enerjisi (J/m ²)	30-200	< 150	> 10000

2.2.1.4 UHPC Üretim Yöntemleri

UHPC malzemesinin içyapısının iyileştirilmesinden dolayı üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahiptir. Bu nedenle UHPC malzemesine en yoğun içyapı kazandırılması için geleneksel betondan farklı olarak UHPC üretiminde ve tasarımında birçok önlem alınmaktadır. UHPC karışımının düşük su/bağlayıcı oranı ve yüksek çelik lif içeriğine sahip olması nedeniyle polikarboksilat eter esaslı üçüncü nesil süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanılarak yeterli işlenebilirlik elde edilebilir. Ancak kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıları etkisini gösterebilmesi için uzunca bir karıştırma süresine (yaklaşık 10-12 dk.) ihtiyaç duyulmaktadır [39]. Karışım süresinin azaltılması için yapılan araştırmalar sonucunda, karıştırmayı yüksek devirde yapabilen karıştırıcıların kullanılması, kullanılan çimento ve kuvars tozunun bir kısmını silis dumanı ile değiştirerek tane büyüklüğü dağılımının optimize edilmesi ve kullanılan süperakışkanlaştırıcı ile çimentonun uyumuna dikkat edilmesi gerektiği belirtilmiştir [39],[40],[41].

Karışım yönteminin yanı sıra kür tipi de kompozitin mekanik ve dayanıklılık özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. UHPC üretiminde birçok farklı kür yöntemi kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılan 90°C’de 48 saat boyunca süren ısıl kür işlemidir. Isıl kür işleminin UHPC üzerindeki temel etkileri aşağıda sıralanmıştır [29],[30].

- UHPC malzemesi kısa süreli ısıl kür işleminden sonra nihai olgunluğa ulaşmakta ve bu nedenle geleneksel betonlarda olgunluğa erişmesi için gereken kür süresi (28 gün veya daha fazla) beklenmemektedir.
- 90°C’de ısıl kür işlemi puzolanik reaksiyonu hızlandırarak içyapıyı iyileştirmektedir.
- Isıl kür işlem sonrası basınç ve çekme dayanımları, 28 gün boyunca su içinde kür işlemi uygulanan numunelere göre yaklaşık %10 daha yüksektir.
- Isıl kür işlem sonrası malzemede rötre olmamakta ve sünme önemli ölçüde azalmaktadır.
- Isıl kür işlem sonrası UHPC malzemesinin porozitesi azalmakta ve dolayısıyla dayanıklılığı artmaktadır.

Gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) riskini ortadan kaldırmak için 90°C’de 48 saat boyunca süren ısıl kür işlemi beton prizini bitirdikten sonra uygulanmalıdır. Eğer prizini tamamlamamış kompozite ısıl işlem uygulanacaksa 65°C’den fazla ısıl işleme maruz bırakılmayarak gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) riski ortadan kaldırılmalıdır [42].

2.2.2 Kıvam ve İşlenebilirlik Özellikleri

UHPC malzemesinin sahip olduğu üstün özelliklerin korunması için üretim aşamasında işlenebilir olması gerekmektedir. İşlenebilirlik, üretim için gereken maliyeti ve süreyi etkilemektedir. Bu nedenle UHPC malzemesinin üretildikten sonra kalıba kolaylıkla yerleştirilebilmesi için kendiliğinden yerleşen kıvamda olması gerekmektedir. Kendiliğinden yerleşen UHPC malzemesi içerdiği yüksek miktarda ince taneli bileşeni ve süperakışkanlaştırıcıdan dolayı taze haldeki reolojik özellikleri kendiliğinden yerleşen betonlara (SCC) benzemektedir. Ancak UHPC malzemesinin içyapı özelliği bakımından yoğun tane dizilimi nedeniyle taze haldeki kohezif ve viskoz özellikleri SCC’den daha fazladır. UHPC malzemesinin reolojik özellikleri üzerine yapılan

çalışmalarda, tane dñzen yoğunluğu ve kullanılan liflerin narinlik oranının işlenebilirlik ۆzerinde ۆnemli etkisi olduğu bildirilmiştir [43]. UHPC karışımının ince tane iğeriğinin arttırılmasıyla elde edilen en uygun sıkı tane yoğunluğu ve işlenebilirlik ۆzellikleri ile karışımda daha yۆksek oranda lif kullanılabileceği belirtilmiştir [44]. Kullanılan elik liflerin en/boy oranının artması, liflerin karışım içerisinde homojen dağılımını ve malzemenin işlenebilirliğini olumlu yۆnde etkilemektedir [35]. Farklı narinlik oranına sahip elik liflerle ۆretilen UHPC malzemelerinin kıvamı şekil 2.5'te gۆsterilmiřtir [45].



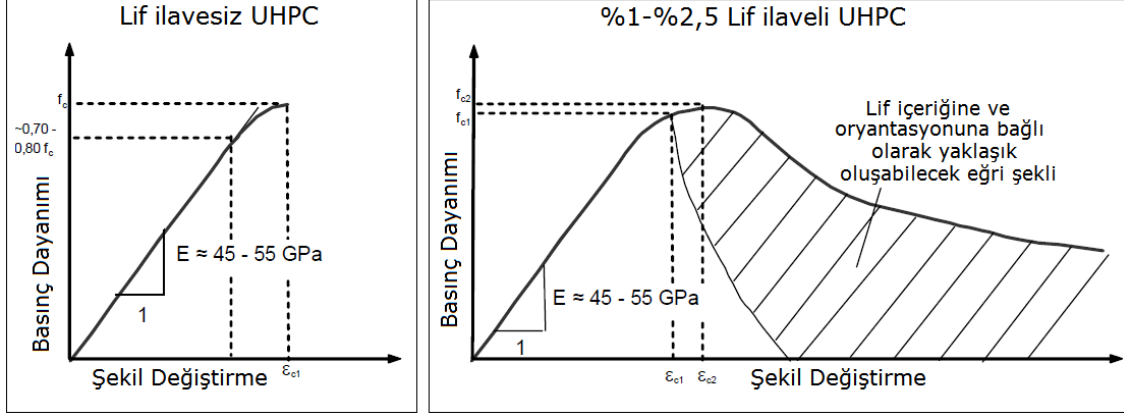
şekil 2.5 Farklı narinlik oranına sahip elik liflerle ۆretilen UHPC malzemesi [45]

2.2.3 UHPC'nin Mekanik ۆzellikleri

2.2.3.1 Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı, UHPC malzemesinin tasarımımda dikkat edilen en ۆnemli ۆzelliklerden birisidir. UHPC'nin tipik basınç dayanımı 150 ila 250 MPa aralığındadır [29]. UHPC'nin basınç dayanımı ve dayanım kazanma hızı, yařa bağlı olmasının yanı sıra, kűr yۆnteminden de ۆnemli ۆlűde etkilenir [46]. UHPC malzemesine 20° C'lik oda sıcaklığında normal bir kűrleme uygulanırsa, basınç dayanımı yaklaşık 200 MPa değerine ulaşılabilir. Kűrleme sıcaklığı 100° C'ye kadar yۆkseltilirse, basınç dayanımı yaklaşık 250 MPa'a kadar ulaşabilir [35]. UHPC malzemesi, nihai basınç dayanımının yaklaşık %70 - %80'ine kadar doğrusal elastik davranış gۆstermektedir. elik lif ilavesiz ve ilaveli UHPC malzemelerinin basınç gerilmesi altındaki davranışı birbirinden çok farklıdır. elik lif ilavesiz UHPC malzemeleri nihai basınç dayanımına ulaştıktan sonra patlama olarak tanımlanabilen çok gevrek bir kırılma davranışı gۆstermektedir. elik lif ilavesi ise nihai basınç dayanımı ۆzerinde genel olarak dűřűk bir etkiye sahip olmasına rağmen gerilme-deformasyon davranışını ۆnemli derecede

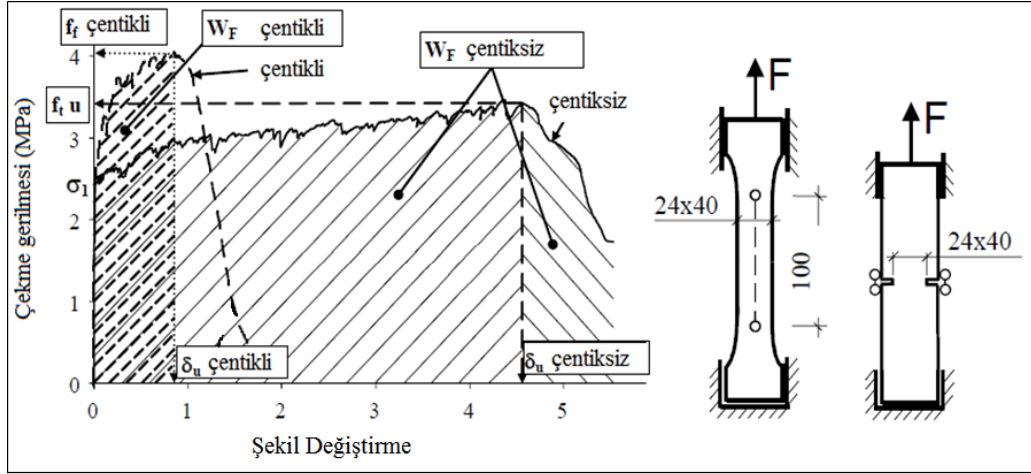
etkilemektedir. Lif katkısız ve lif katkılı UHPC malzemesinin basınç gerilmesi altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 2.6’da verilmiştir [47]. UHPC malzemeleri nihai basınç dayanımına ulaştıktan sonra çelik lif ilavesinin sergilemiş olduğu süneklik kapasitesi lif içeriğine, geometrisine (uzunluk ve çap), sertliğine ve dağılımına bağlı olarak değişmektedir [47].



Şekil 2.6 UHPC malzemesinin (lif katkısız ve lif katkılı) basınç gerilmesi altındaki davranışı [47]

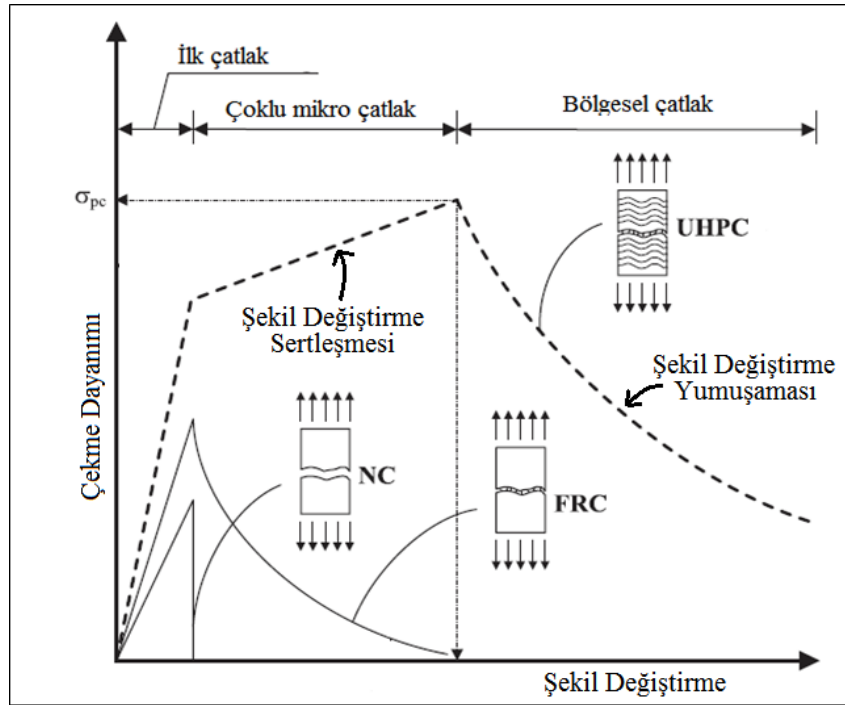
2.2.3.2 Direkt Çekme Dayanımı

Çimento esaslı kompozitlerin direkt çekme dayanımı belirlenmesi amacıyla deney koşullarını, numune boyutlarını ve analitik prosedürleri tanımlayan herhangi bir standart mevcut değildir. Ancak, üstün süneklik kapasitesine sahip UHPC malzemesinin direkt çekme dayanımının belirlenmesi için literatürde birçok araştırma yapılmıştır [23],[48],[49],[50],[51],[52]. Genel olarak yapılan bu çalışmalar, AFGC-SETRA [29] ve JSCE [25] yönetmeliklerinde belirtilen direkt çekme deney yöntemleri esas alınarak tasarlanmıştır. UHPC malzemesinin direkt çekme dayanımının belirlenmesi amacıyla aynı kesit alanına sahip çentikli ve çentiksiz deney numuneleri üzerinde yapılan çalışmalarda, çekme dayanımı değerleri ve gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin farklı olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.7) [53]. Çentikli numunelerin çentiksiz numunelere göre daha fazla şekil değiştirme sertleşmesi ve daha yüksek dayanıma sahip olması, çentik etrafında gerilme yığılmasının oluşmasından kaynaklanmaktadır [53]. Bu nedenle deney numunesinin çekmeye maruz kalacak alanının daha da azaltılarak çatlak oluşumunun numunenin orta noktasında meydana gelmesi ile gerçeğe daha uygun deney sonuçları elde edilebilmesi mümkündür.



Şekil 2.7 Çentikli ve çentiksiz UHPC deney numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri [53]

Yapılan çalışmalar sonucunda UHPC'nin direkt çekme dayanımı 7 ila 15 MPa aralığında olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.8'de normal dayanımlı beton (NC), lif donatılı beton (FRC) ve UHPC malzemesinin çekme gerilmesi altındaki tipik davranışı gösterilmiştir [52]. Normal dayanımlı beton çekme gerilmesi altında düşük çekme dayanımına ulaşmakta ve gevrek kırılma davranışı göstermektedir. Lif donatılı beton ise lifin çekme gerilmesi altında sergilediği olumlu etki ile daha fazla çekme dayanımına ulaşmakta ve maksimum dayanımdan sonra sünek davranış göstermektedir.



Şekil 2.8 Normal dayanımlı beton (NC), lif donatılı beton (FRC) ve UHPC malzemesinin direkt çekme gerilmesi altındaki davranışı [52]

UHPC malzemesinin direkt çekme dayanımı kullanılan çelik lifin içeriğine, geometrisine ve dağılımına bağlı olarak değişmektedir [47]. Kullanılan çelik liflerin çatlak köprüleme etkisinden dolayı UHPC'nin çekme etkisi altında yüksek süneklik kapasitesine sahip olmasına neden olmaktadır [54]. Bu nedenle iyileştirilmiş içyapı, homojenlik, sıkı tane düzeni ve yüksek lif içeriği ilkeleri ile üretilen UHPC malzemesi çekme gerilmesi altında şekil değiştirme sertleşmesi davranışı göstermektedir.

2.2.3.3 Eğilme Dayanımı ve Kırılma Tokluğu

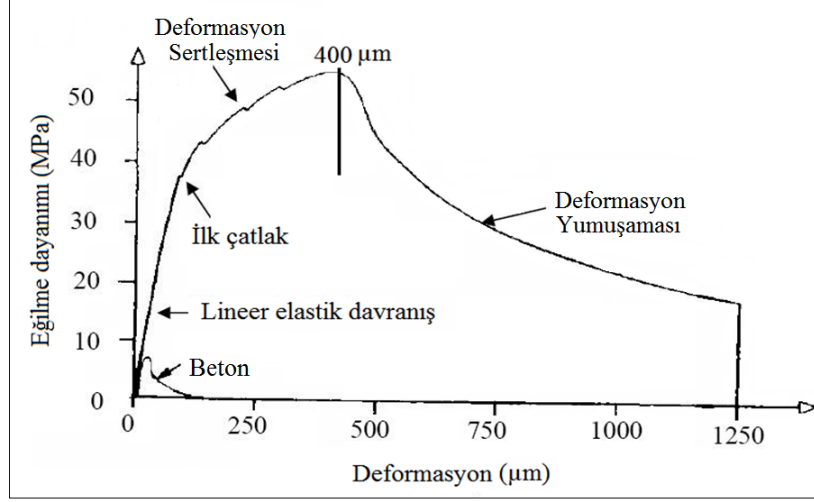
Çelik lif takviyeli UHPC malzemesi çekme gerilmesi etkisinde olduğu gibi eğilme gerilmesi etkisinde de üstün performans göstermektedir. UHPC malzemesinin en önemli özelliklerinden birisi yüksek enerji yutma kapasitesidir. Çelik liflerin, yoğun ve homojen matrise katkısıyla, malzemenin tokluğu, kırılma enerjisi, çatlak oluşumuna karşı direnci ve çekme dayanımında büyük artışlar sağlamaktadır. Kırılma tokluğu malzemenin deformasyonun ve çatlak oluşumuna karşı direncini gösteren en önemli parametredir [48]. Deformasyon ölçüm sistemi, yükleme sistemi, numune tipi gibi deney parametreleri ve lif içerik yüzdesi, lif tipi ve karışım parametreleri kırılma tokluğunu etkileyen önemli parametrelerdir. Çimento esaslı lifli kompozitlerin tokluğunu ve kırılma tokluğunu hesaplamak için literatürde ASTM C1018 [55], ASTM C1609 [56], JSCE-SF4 [57] ve RILEM TC 50-FMC'da [58] belirtilen yöntemler kullanılmıştır. Bu standartlara göre kırılma tokluğunun belirlenmesi için deney parametrelerinin karşılaştırılması Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Çeşitli standartlara göre kırılma tokluğunun belirlenmesi için kullanılan deney parametreleri [59]

Standart	Numune boyutu (L*b*h) mm	Yükleme hızı mm/dk	Yükleme tipi	Tokluğun ölçülmesi
ASTM C-1018 (1997) [55]	300*100*100	0.05 - 0.10	Üç noktalı eğilme	İlk çatlakla göre I_5 , I_{10} , ve I_{20} tokluk indisleri
ASTM C1609 (2012) [52]	300 x 100 x 100 500 x 150 x 150	Maks. 0.05	Dört noktalı eğilme	L/150 mm sehime kadar
JSCE-SF4 (1984) [57]	300 x 100 x 100	L/1500 - L/300	Üç noktalı eğilme	L/150 mm sehime kadar
RILEM TC 50 (1985) [58]	B>50, d<25, L	0.25	Üç noktalı eğilme	3 mm sehime kadar

Üç noktalı deney düzeneği ile çentikli numuneler üzerinde yapılan ilk çalışmalarda %2 ila %6 oranında çelik lif içeren ısıtılma işlemi uygulanan UHPC malzemesinin eğilme

dayanımı 30 MPa ila 60 MPa arasında ve kırılma enerjisinin ise 20 000 J/m² ila 40 000 J/m² arasında olduğu belirtilmiştir [30]. Normal beton ve UHPC malzemesinin eğilme gerilmesi etkisi altındaki yük-deformasyon eğrileri Şekil 2.9’da karşılaştırılmıştır [1]. Normal beton ve UHPC malzemesinin kırılma enerjisi sırasıyla 100 -150 J/m² ve 30000 -40000 J/m² olduğu, bu sonuçlara göre UHPC’nin normal betona göre yaklaşık 300 kat daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu belirlenmiştir.



Şekil 2.9 Normal beton ve UHPC malzemesinin eğilme gerilmesi altındaki tipik davranışı [1]

2.2.4 Dayanıklılık Özellikleri

Kompozit bir malzemenin dayanıklılığı, mikroyapı ve gözenek yapı özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Normal dayanımlı betonlarda, klorür ve sülfat gibi zararlı maddelerin su ile beton içerisine taşınması esas olarak kılcal gözenekler yoluyla meydana gelmektedir. UHPC malzemesi çok düşük porozite ve birbirine bağlı olmayan gözenek yapısına sahiptir [54]. Aynı karışıma sahip ısıtılmış ve uygulanmamış UHPC malzemesinin boşluk yarıçapı ve toplam porozitesinin farklı olduğu belirlenmiştir. Isıtılmış işlemi uygulanmamış numunelerde gözenek yarıçapı maksimum 10 µm, ısıtılmış işlemi uygulanmış numunelerde ise bu değer maksimum 1,5 µm olarak hesaplanmıştır [60]. Malzemenin mikroyapısı, toplam gözenekliliği ve gözenek yarıçapı dağılımı göz önüne alındığında, su geçirirliiği, hava geçirgenliği, klorür-iyon ve sülfat difüzyon direnci gibi dayanıklılık parametreleri açısından sıradan veya yüksek dayanımlı betonlara kıyasla UHPC oldukça üstün bir performans sağlar [32]. Bu nedenle UHPC, agresif dış ortamlara maruz kalan tüm yapılar için uygun bir malzemedir. Çelik lif içeriğinin ve geometrisinin UHPC'nin dayanıklılık özellikleri üzerinde etkisinin

araştırıldığı çalışmalarda, yüksek lif içeriğine sahip UHPC karışımları nispeten gelişmiş dayanıklılık özellikleri sergilemiş ancak lif geometrisinin ise dayanıklılık özellikleri üzerinden belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte farklı şiddetli klorür iyonlarına maruz kalan UHPC malzemelerinin mekanik özelliklerinde herhangi bir değişme olmadığı gözlemlenmiştir [61]. UHPC malzemesinin dayanıklılık özelliklerinin kapsamlı olarak araştırıldığı birçok çalışma literatürde mevcuttur [4],[105],[129],[132]. Genel olarak bu çalışmalar incelendiğinde, UHPC malzemesi diğer çimento esaslı kompozit malzemelere göre çok üstün dayanıklılık özelliklerine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında UHPC malzemesinin dayanıklılık özellikleri araştırılmamış ve bu başlık altında dayanıklılık özellikleri ile ilgili daha fazla ayrıntıya girilmemiştir.

2.2.5 UHPC'nin Kullanım Alanları

Çimento esaslı kompozitlerin performansını arttırmak amacıyla son yüzyılda birçok araştırma yapılmıştır. Çimento esaslı kompozitlerde lif takviyesi 1960'lı yıllardan sonra kullanılmaya başlanmasıyla günümüze kadar kullanımı istikrarlı bir şekilde artmıştır. Özellikle son yıllarda, kompozitlerin tasarımını iyileştirmek için birçok araştırma yapılmış ve nihayetinde birçok yenilik gerçekleştirilmiştir. 2001 yılı itibarıyla, yıllık lif takviyeli beton üretimi yaklaşık 80 milyon m³ hacmine ulaşmıştır. Bu hacmin %60'ı saha betonunda, %25'i lif donatılı püskürtme betonunda, %5'i prefabrik elemanlarda ve geri kalan kısımda özel uygulamalarda kullanılmıştır [8].

Lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerin performansı zamanla geliştirilerek elde edilen UHPC, günümüzde inşaat endüstrisinde yaşanan problemlerin çözümünde kullanılması amaçlanmıştır. Geliştirilmiş mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip UHPC, yapısal elemanların kesitlerini küçültmesiyle malzeme tasarrufu sağlamakta ve işçilik maliyetlerini düşüren yeni bir yapı malzemesidir [2]. UHPC'nin nispeten yüksek üretim maliyeti inşaat sektöründe daha yaygın kullanımını kısıtlamıştır. Bu nedenle, UHPC'nin üretim maliyetini düşürerek daha yaygın kullanılmasını amaçlayan birçok araştırma devam etmektedir [31],[54],[62],[63]. Ancak yapı elemanlarının maruz kalabileceği beklenen veya beklenmedik yüksek yük koşullarını karşılamak için uygun olan UHPC'nin sağlamış olduğu mükemmel süneklik, üstün enerji yutma kapasitesi ve düşük hasar oluşumu özellikleri nedeniyle bu malzemelerin inşaat sektöründe kullanımı önem kazanmıştır [64]. Bununla birlikte UHPC, yüksek katlı yapılarda, yapısal

iyileştirme işlerinde, uzun açıklıklı köprülerde, açık deniz yapılarında, makine parçalarında, askeri binalar ve sığınaklarda kullanımı uygun hale gelmiştir [65],[66],[67]. Ani oluşabilecek hortumlar, tsunamiler ve depremler gibi doğal felaketler ve terörist faaliyetlerden kaynaklanan patlamalar gibi insan yapımı felaketler nedeniyle olması muhtemel yüksek seviyeli yüklere karşı da UHPC'nin etkili olduğu düşünülmektedir.

Nükleer ve radyoaktif atıkların depolanması amacıyla kullanılan tanklar, patlama, terör saldırısı, doğal afetler ve taşınma sırasında devrilmesi gibi dış etkenler nedeniyle oluşabilecek hasarlardan dolayı herhangi bir hasar ve dışarıya sızıntı olmayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir [4]. Bu nedenle, içyapısı geliştirilmiş UHPC'nin çok düşük gözenekli yapı ile sahip olduğu yüksek dayanım ve dayanıklılık nedeniyle nükleer ve radyoaktif atıkların depolanması ve taşınması için uygun bir malzeme olduğu belirlenmiştir [31],[68],[69].

2.3 Radyasyon

Kararsız durumda bulunan atomlar, yayınladıkları hızlı parçacıklar ve foton olarak adlandırılan elektromanyetik dalgalar ile kararlı duruma geçebilmek için dönüşüme uğrarlar. Yayınladıkları bu dalgalara “radyasyon”, bu tür elementlere “radyoaktif element” ve bu dönüşüm süreci ise “radyoaktif bozunma” olarak adlandırılmaktadır. Bazı elementlerin doğal olarak radyoaktif olduğunun belirlenmesi ilk olarak Becquerel tarafından 1896 yılında yapılan çalışmalarda belirlenmiştir. Bu çalışmalarda uranyum bileşiğinin çevresinde yayılan radyasyon dalgalarının olduğu gözlemlenmiştir. Takip eden 10 yıl içinde, Rutherford ve Soddy, Pierre ve Marie Curie tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, bazı çekirdek türlerinin tamamen kararlı olmadığı gerçeği ortaya konulmuştur. Bu dengesiz çekirdeklerin kararlı duruma geçebilmek için radyoaktif bozunmaya uğradığı ve alfa, beta ve gama radyasyonu adı verilen üç temel radyasyon yaydığı belirlenmiştir [70]. Radyasyon, türüne göre parçacık radyasyonu ve elektromanyetik radyasyon olarak sınıflandırılmaktadır. Yüklü alfa ve beta parçacıkları, parçacık radyasyonu türünde ve gama, X-ışını, görünür ışık, morötesi, kızılötesi, mikrodalga, radyo/televizyon dalgalarının tamamı elektromanyetik radyasyon sınıfındadır [71]. Radyasyon enerjisinin temel birimi elektron volt (eV) olarak ifade edilmektedir. Bir elektron volt, bir elektron tarafından 1 voltluk bir elektrik potansiyelinden geçerken kazandığı enerjidir. Radyasyon enerjisi için elektron volt çok

küçük bir birimdir, bu nedenle radyasyon enerjileri genellikle kilo-elektron volt (1 KeV = 1000 eV) veya mega-elektron volt (1 MeV = 1000000 eV) ile ifade edilmektedir [70].

2.3.1 Alfa, Beta, Gama ve X-Işını Radyasyonu

2.3.1.1 Alfa (α) Radyasyonu

Rutherford tarafından yapılan çalışmalarda alfa (α) radyasyonu, uranyum, toryum, polonyum ve radyum gibi çeşitli radyonüklitlerden yayınlanan 4–9 MeV enerjilerinde bulunan iki proton ve iki nötrondan oluşan helyum çekirdekleri olduğu belirlenmiştir [72]. Kararsız durumda bulunan çekirdek alfa parçacığı yayımlayarak daha küçük ve kararlı bir çekirdeğe bozunur [70]. Alfa parçacığı madde içinden geçerken ortamdaki atomların elektronları ile etkileşerek iyon çiftleri meydana getirirler ve enerjilerini kaybederler. Maddeye nüfuz etme özellikleri azdır, bir kâğıt parçası tarafından bile durdurulabilirler. Sağlıklı deriden geçip insan vücuduna giremez. Ancak alfa ışıması yapan radyoaktif elementler solunum ve sindirim yoluyla veya bir yaradan vücuda girdiklerinde tehlikeli olurlar [73].

2.3.1.2 Beta (β) Radyasyonu

Radyoaktif ışınımın arasında yapısı ilk belirlenen beta radyasyonlarıdır. Beta parçacıkları kararsız atom çekirdeklerinden yayınlanan yüksek enerjili elektron (β^-) ve pozitronlardır (β^+). β^- radyasyonları yüksek hızlı elektronlardan oluşur. Bu elektronlar, atom çekirdeğinin yörüngesindeki elektronlara özdeş özelliklere sahiptirler. β^+ radyasyonları ise alfa parçacıkları gibi pozitif yüklü olmalarına rağmen beta parçacıklarına benzemekte ve pozitron olarak adlandırılmaktadır. Beta radyasyon terimi genel olarak β^- parçacıkları için kullanılmaktadır [71]. Beta parçacıkları, alfa parçacıklarından kütleye daha hafif olduklarından dolayı madde içerisine giricilikleri ve menzilleri daha yüksektir.

2.3.1.3 Gama (γ) Radyasyonu

Gama (γ) radyasyonu α veya β parçacıklarına biraz benzer olmasına rağmen, doğada fotonlar olarak adlandırılan radyoaktif bir elementten salınan yüksek enerjili elektromanyetik parçacıklar olarak tanımlanmaktadır [70]. Foton parçacıklarının herhangi bir kütle veya elektrik yükü yoktur. Ancak bunun yerine dalga hareketi şeklinde iletilen

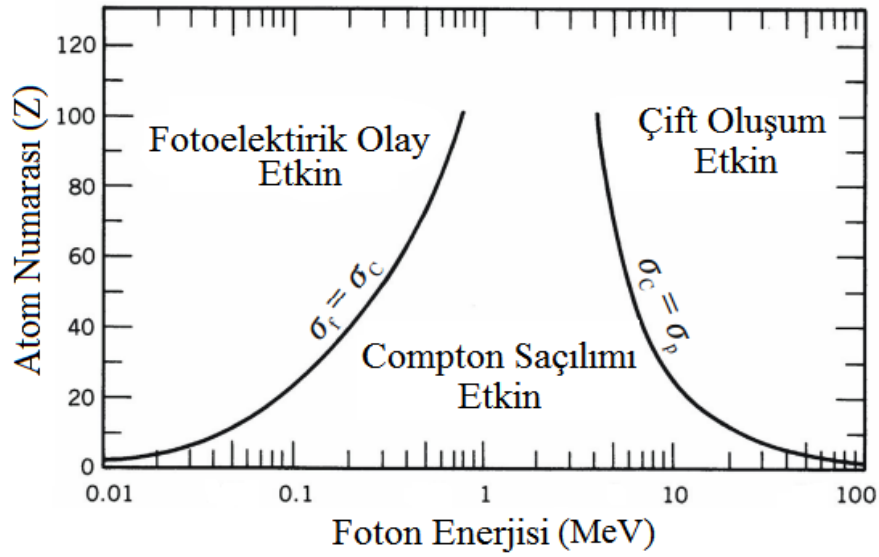
enerji paketleri oluştururlar. Foton parçacıkların enerji miktarı radyasyonun dalga boyuyla doğrudan ilişkilidir. Dalga boyunun kısa olması enerji miktarının daha da artmasına neden olmaktadır [70]. Gama radyasyonu, madde içerisine yüksek giricilik özelliğinden dolayı ancak zırlama yöntemleriyle durdurulabilir.

2.3.1.4 X-Işını Radyasyonu

Birçok bakımdan γ radyasyonu ile özdeş olan X-ışınları, diğer bir adıyla röntgen ışınları elektromanyetik radyasyon ailesindendir. İki radyasyon türü arasındaki temel fark başlangıçtaki yayınlandıkları yerlerden kaynaklanmaktadır. γ radyasyonu çekirdekteki değişikliklerden kaynaklanırken, X-ışınları atomların elektron uzayında yayınlanırlar [70].

2.3.2 Fotonların (X ve Gama ışınları) Madde ile Etkileşimi

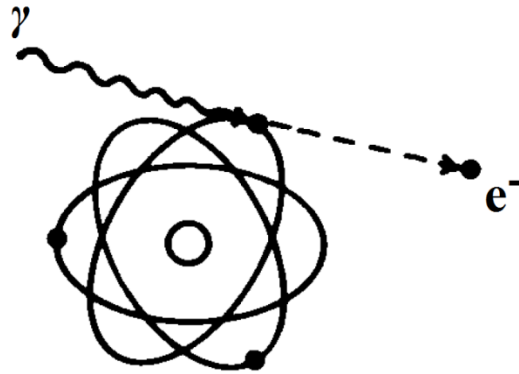
Radyasyonları, madde üzerinde oluşturdukları etkilere göre, iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar olmak üzere iki sınıfta toplayabiliriz. İyonlaştırıcı radyasyonlar; madde içerisinden geçerken enerjisini ortama aktarmak suretiyle, ortamdaki atomları doğrudan veya dolaylı yollarla iyonlaştıran radyasyon türüdür. X-ışınları ve radyoaktif maddelerden çıkan alfa, beta, nötron, gama ışınları gibi çeşitli türdeki radyasyonları kapsamaktadır. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar ise madde ile etkileşmesinde iyonizasyon meydana getirmeyen radyasyonlara denir. Ultraviyole ışık (morötesi ışık), güneş ışınları, radyo dalgaları, cep telefonlarından yayılan elektromanyetik dalgalar, elektrikli ev aletlerinden (mikrodalga fırınlar, tıraş makinesi, saç kurutma makinesi vb.) yayılan radyasyonlardır. Fotonların (X-ışını ve gama radyasyonu) enerjisinin büyüklüğüne göre madde ile etkileşmeleri genellikle olarak 3 bölüme ayrılabilir [74],[75],[76]; Fotoelektrik etkileşme, Compton saçılması ve çift oluşumdur. Bunlardan fotoelektrik etkileşme ve çift oluşumu fotonların soğurulmasına, Compton etkileşmesi ise saçılmasına dayalı fiziksel olaylardır. Şekil 2.10'da soğurucunun atom numarasına ve radyasyonun enerjisine göre fotonların madde ile etkileşmelerinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Maddenin atom numarasına ve radyasyonun enerjisine göre fotonların madde ile etkileşmelerinin değişimi [77]

2.3.2.1 Fotoelektrik Olay

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi düşük enerjilerde ($<0,1$ MeV) fotoelektrik olayı baskındır. Gelen fotonlar tüm enerjisini atomun en dış yörüngesinde bulunan elektrona aktarır. Elektron bu enerjinin bir kısmını atomla olan bağını koparmada kullanırken geriye kalan kısmı ise elektrona kinetik enerji olarak aktarılır (Şekil 2.11) [78],[79]. Fotoelektrik olayın olma olasılığı, foton ışınına maruz kalan elementin atom numarası (Z) ile orantılı ve foton ışınının enerjisiyle ters orantılıdır.

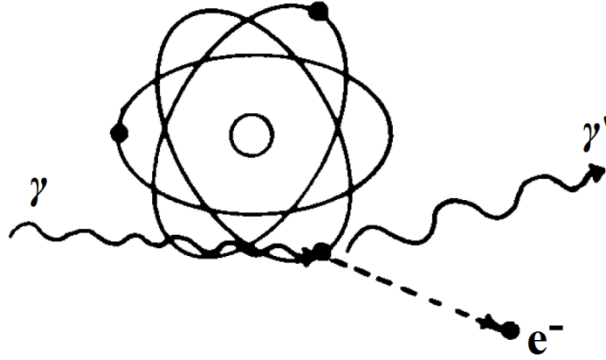


Şekil 2.11 Fotoelektrik olayın şematik gösterimi [79]

2.3.2.2 Compton Saçılımı

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi orta enerjilerde (0,1 MeV - 1 MeV arası) Compton saçılması olayı baskındır. Fotonun madde ile etkileşmesinde en iyi anlaşılan

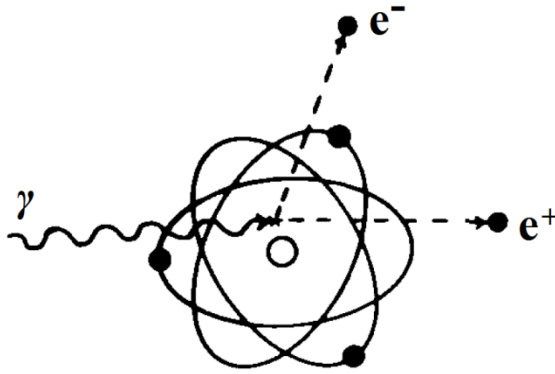
mekanizmalardan birisi Compton saçılmasıdır. Bu olay fotonun serbest bir elektronda esnek saçılmasıdır. Gelen fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden yüksek olduğunda ve elektron serbest kabul edildiğinde Compton saçılması meydana gelmektedir (Şekil 2.12) [76],[79]. Fotoelektrik olayında olduğu gibi Compton saçılması olayı olma olasılığı, gama ışınına maruz kalan elementin atom numarası (Z) ile orantılı ve gama ışınının enerjisiyle ters orantılıdır [74].



Şekil 2.12 Compton saçılmasının şematik gösterimi [79]

2.3.2.3 Çift Oluşum

Çift oluşumu, fotoelektrik etki veya Compton saçılmasından daha az yaygındır ve Şekil 2.10'da gösterildiği gibi yalnızca çok yüksek enerjili ($>1,022$ MeV) gama ışınlarında oluşur. Foton yeterli enerjiye sahip olduğunda, emici atom tarafından soğurulur ve kinetik enerji olarak çekirdeğinin yakınında elektron-pozitron çiftine dönüştürülür (Şekil 2.13) [79]. $1,022$ MeV'den daha büyük enerjili gama ışınları için çift üretim olasılığı emici atomun atom sayısının karesi ve o andaki gama enerjisinin logaritması ile orantılıdır [74].



Şekil 2.13 Çift oluşumunun şematik gösterimi [79]

2.3.3 Radyoaktif Atıklar

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından yapılan tanıma göre radyoaktif atık, muafiyet sınırlarından daha fazla radyoizotop konsantrasyonu içerdiğinden dolayı çevreye zararlı iyonizasyona neden olan ve kullanım dışı kalmış olan atıklardır. Radyoaktif atıklar nükleer uygulamalar sonucunda meydana gelen ve içerdiği radyoizotopun yarılanma sürecine bağlı olarak yüzlerce, binlerce yıl veya kısa süreli bir depolama ile bozunum süreci sonucunda zararsız hale gelmektedir.

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) ve Radyasyondan Korunma ve Ölçümler Ulusal Konseyi (NCRP), radyoaktif atıkların sınıflandırılması için genel olarak aktivite düzeyleri ve ısı içeriklerini kapsayan bir sınıflama yapmıştır. Bu sınıflandırmada belirtilen her bir atık sınıfı, kamu sağlığını korumada genel olarak kabul edilmesi beklenen imha sistemi (teknoloji) tipine göre aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır [80].

- Muaf Atıklar (MA): Radyolojik etkileri ihmal edilebilir düzeyde olduğundan nükleer denetim dışında bırakılacak kadar düşük radyoaktif madde içeren atıklardır. Bu tür atıkların aktivitelerinin yarılanma süresi çoğunlukla 100 günden azdır [81].
- Düşük Düzeyli Atık (DDA): Kısa ve uzun dönemde çevresini etkileyecek kadar radyoaktif madde içeren atıklardır. Bu sınıf atıklara, zırlama yapılması ve bazı durumlarda soğutmayı gerektirecek düzeyde radyoaktivite içerebilmektedir. Bu tür atıkların aktivitelerinin yarılanma süresi 30 yılı aşabilmektedir [81].
- Yüksek Düzeyli Atık (YDA): Bu sınıftaki atıklar derin bir gömü tesisinde uzun bir zaman yeryüzünden izole edilmesini gerektirecek düzeyde tehlikeli radyoaktif madde içermektedirler. Bu atıklar için özel zırlama ve soğutma gereklidir [81].

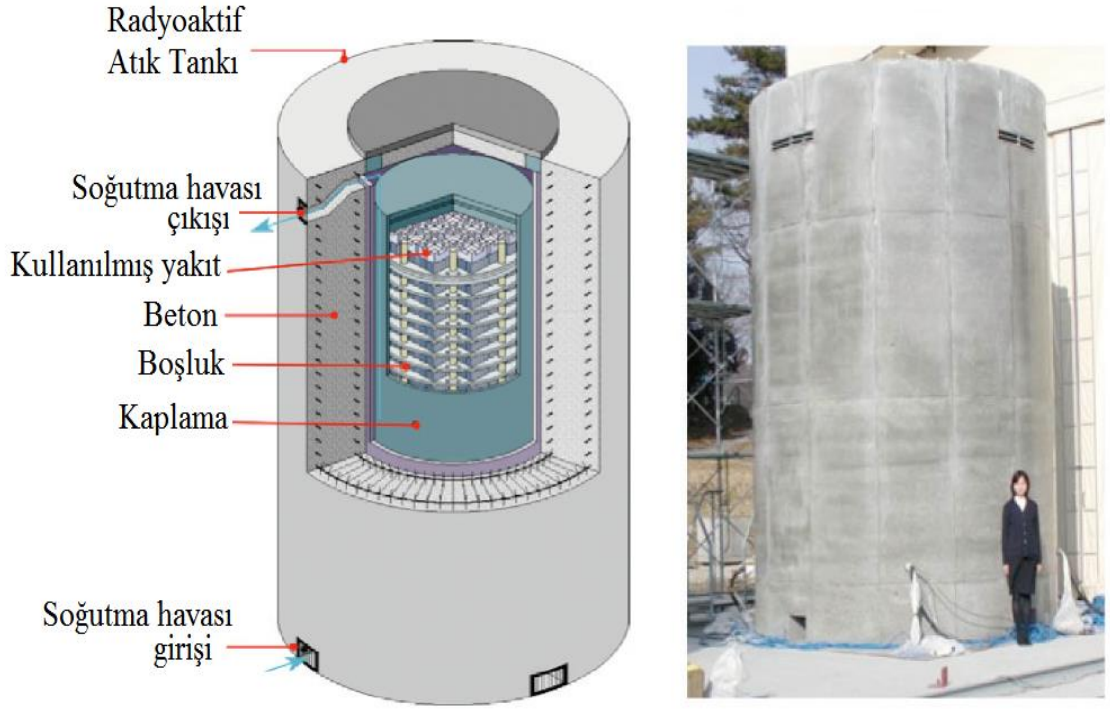
2.3.4 Radyoaktif Atık Yönetimi

Radyoaktif atık yönetimi her türlü kullanım dışı kalmış olan radyoaktif kaynakların veya radyoaktif madde bulaşmış malzemelerin oluşturduğu radyoaktif atıkların, toplanması, sınıflandırılması, işlenmesi, paketlenmesi, taşınması, geçici depolanması, kalıcı depolanması ve kalite kontrol deneyleri gibi işlemleri kapsamaktadır. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından radyoaktif atık yönetiminde gerekli tüm

işlemler için belirlediği temel prensipler, gelecekteki insan sağlığının ve çevrenin korunması için birçok ülke tarafından amaç ve ilke edinilmektedir [82]. Radyoaktif atık yönetiminin temel hedefi, insanları ve bulundukları çevreleri radyoaktif atıkların potansiyel zararlı etkilerine karşı korumaya ve gelecek nesillere bırakılacak yükü en aza indirmektir. Radyoaktif atıkların güvenli bir şekilde imha durumu atık yönetiminin son adımı olarak kabul edilir. Radyoaktif atıkların bertarafı ulusal otoriteler veya atık depo sorumluları tarafından güvenlik hedefini karşılamak amacıyla tanımlanmalıdır. Atık yönetim kuruluşları tarafından genel atık kabul şartları, atık depolama tank özelliklerini içine alacak şekilde ayrıntılı olarak belirlenmesi önemli bir görevdir. Radyoaktif atık depolama tankları radyoaktif atıkların güvenli bertaraf yönetimini sağlayabilecek özellikteki bileşenlerden tasarlanmış olmalıdır [5].

2.3.5 Radyoaktif Atık Depolama Tankların Özellikleri

Radyoaktif atık depolama tankları, iyonlaştırıcı radyasyondan korunmada ve radyoaktif maddelerin depolanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle radyoaktif atık yönetiminde atık tankları, atıkların paketlenmesi, taşınması, geçici depolanması ve kalıcı depolanması sürecinde emniyet sağlanmaktadır. Radyoaktif atıkların depolanması, taşınması ve bertarafı kapsamında kullanılacak tankların üretim teknolojileri henüz yeterli seviyeye erişmediğinden dolayı ticari tank firmaları henüz gerekli teknolojiyi nihai olarak gerçekleştirebilmiş değillerdir. Bu tür teknoloji üreten firmaların en büyük endişeleri üretim maliyetleri ve uluslararası yönetmeliklere uygunluğu ile ilgilidir. Kullanılmış radyoaktif yakıtların depolanması için hızlı büyüyen talebe karşılık verme amacıyla kullanılacak tanklarda, temel malzeme olarak kullanılan betonun daha ekonomik olmasından dolayı, metal tanklara göre daha iyi bir alternatif olduğu düşünülmektedir. Yüksek düzeyli radyoaktif atıklar genellikle metal tanklar içerisinde depolanmaktadır. Beton kullanılarak üretilen tanklar genellikle düşük veya orta düzeyli atıkların depolanmasında kullanılmaktadır. Beton tank üretiminde kullanılan paslanmaz çelik donatılar, uzun süreli depolama sürecinde mekanik ve dayanıklılık kararlılık sağlamaktadır. Kullanılan çelik donatının paslanmaya uğramaması için betonun geçirimsiz bir yapıda olması gerekmektedir [5]. Şekil 2.14'te ana bileşeni beton olan radyoaktif atık depolama tankının yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Radyoaktif atık depolama tankı [84]

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından yayınlanan yönetmelikte, atıkların uygun bir şekilde taşınması, depolanması ve bertaraf edilmesi için kullanılan radyoaktif atık tanklarının fiziksel ve mekanik özellikler olarak bazı parametreleri sağlaması gerektiği belirtilmiştir. Atık dolu tanklar istiflenmesinden dolayı oluşacak gerilmeleri karşılayabilecek dayanıma sahip olması gerekmektedir. Ayrıca olası dış etkenlere bağlı olarak oluşabilecek darbe etkisi gibi ani gerilme artışları altında beklenen dayanım koşullarını sağlayarak yapısal bütünlüğün korunmasında kararlı olmalıdır. Radyoaktif maddelerin uzun bir bozunma süresi olduğundan dolayı, radyoaktif atık tankları sahip olduğu bu dayanım özelliğini uzun süre sürdürebilmelidir. Bu uzun depolama sürecinde, atık tanklarının yapısal bütünlük ve radyasyon soğurma yeteneği, dayanıklılık özelliklerini anlamak için önemlidir. Düşük ve orta düzeyli radyoaktif atıkların yüzlerce yıl sürebilecek depolama sürecinde tankların tasarımda esas alınan temel prensipleri yerine getirebilmesinin araştırılması için Çizelge 2.3'te verilen fiziksel, mekanik, dayanıklılık ve zırhlama özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Çizelge 2.3 Radyoaktif atık tanklarının performans parametreleri [5]

Özellikler	Karakteristik Parametreler
Fiziksel	Yoğunluk
	Priz süresi
	Mikroskobik porozite
Mekanik	Basınç dayanımı
	Çekme dayanımı
	Young modülü
Dayanıklılık	Isı iletkenliği
	Su geçirgenliği
	Gaz geçirgenliği
	Boyutsal stabilite
	Korozyon direnci
	Yangın performansı
	Donma-çözülme direnci
	Termal genleşme
Zırhlama	Radyoaktif sızıntı oranı
	Radyasyon soğurma katsayısı

Atık tipi, depolama süresi, depo ortamı, tank malzemesini oluşturan malzemeler ve tasarım ömrü gibi parametreler atık paketinin dayanıklılığını etkileyen parametreler olarak incelenmelidir. IAEA tarafından radyoaktif atık tanklarının tasarımında dikkat edilecek temel prensipler aşağıda verilmiştir [83].

- Mekanik etkilere karşı kararlılık
- Kimyasal etkilere karşı dayanıklılık
- Mikrobiyolojik etkilere karşı dayanıklılık
- Radyoaktif salınımın sınırlanma kararlılığı
- Termal etkilere karşı kararlılık

2.3.6 Radyasyondan Korunmanın Önemi

Gelişen teknolojiyle birlikte araştırma merkezlerinde, hastanelerde, endüstride, tarım alanlarında ve nükleer tesislerde doğal ve yapay radyoaktif maddelerin kullanım alanları hızla artmıştır. Uzaydan gelen kozmik ışınlar, vücudumuzda bulunan radyoaktif elementler, yaşadığımız evlerin yapı malzemelerinin içerdiği radyoaktif radon ve toron

gazları, tarım alanlarında kullandığımız fosfor içeren suni gübreler, yiyecek ve içeceklerimizdeki radyoizotoplar, hastalıklarımızın teşhis ve tedavisinde kullanılan radyoaktif madde içeren cihazlar ve nükleer tesisler nedeniyle radyasyon hayatımızın içinde yer almaktadır [84]. Bu nedenle, radyoaktif madde içeren kaynaklardan yayılan doz miktarının kontrol edilmesi ve canlılara zarar vermeyecek seviyelere indirilmesi gerekmektedir. Bu işlemin tamamına radyasyondan korunma ve bu amaç için kullanılan malzemeye de zırhlama malzemesi denir.

Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP), Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) ve benzeri bağımsız kuruluşlar, iyonlaştırıcı radyasyondan korunma ile ilgili olarak tavsiye niteliğinde yayınlar yapmaktadırlar. Bu tavsiyelerin yaptırım gücü olmamasına rağmen, ülkeler bu tavsiyeleri kendi koşullarına göre uyarlayarak yürürlüğe koymaktadırlar. Ülkemizde Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK), ICRP önerilerini de göz önüne alarak hazırladığı radyasyon güvenliğine ilişkin ilke, önlem ve hukuki sorumluluk sınırlarını belirleyen tüzük ve yönetmelikleri hükümete sunmakta, bunların yasallaştırılmasını sağlayarak uygulanmalarını da denetlemektedir.

Türkiye Atom Enerji Kurumu (TAEK) kayıtlarına göre, 2015 yılı sonu itibarıyla ülke genelinde X-ışını cihazları, kapalı ve açık radyoaktif madde kullanılan cihazlar toplam 20570 kuruluştaki kullanılmaktadır. Kanser tedavisinde kullanılan radyolojik tekniklerin gelişmesi ve cihazların değişimi ile yüksek enerjili radyasyon demetlerinin tedavi amaçlı kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu nedenle, bu tesislerdeki radyasyon kaynaklarının zırhlanmasında ve bu tesislerdeki kaynaklar nedeni ile çalışanlar ve halkın alacağı dozun kabul edilebilir seviyede sınırlandırılmasında düzenlemeler yapılması gerekmektedir.

2.3.7 Radyasyondan Korunma Yöntemleri

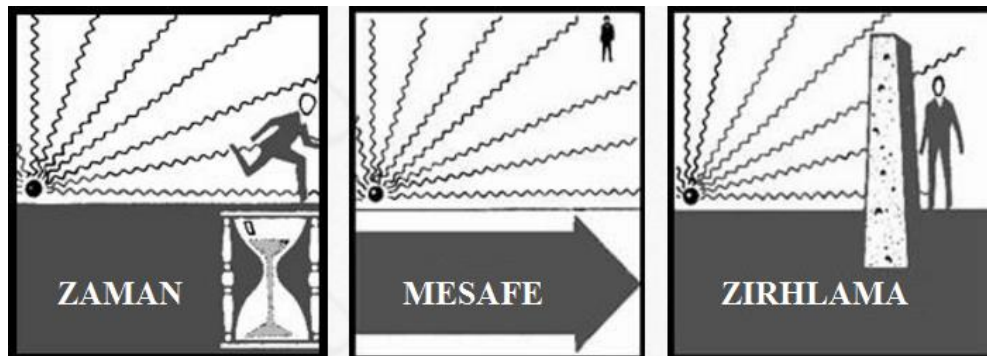
Radyasyon ışıma sonucunda çevredeki insanların yüksek radyasyona maruz kalma tehlikesi her zaman bulunmaktadır. Radyasyonda tamamen korunmamız mümkün olmayabilir, ama bu ışımalardan alacağımız radyasyon dozunu minimum değerde tutmamız gerekmektedir. Beta (β), gama (γ) ve X ışını canlıların cildinden içeri giricilik özelliği olduğundan dolayı büyük tehlikedir. Ancak alfa (α) radyasyonu cildin içerisine nüfuz edemediğinden dış radyasyon tehlikesi olarak kabul edilmez [70].

Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP) tarafından 1997 yılında yayınlanan raporda radyasyon kaynağının kullanıldığı uygulamalarda işçilerin radyasyondan korunma prensipleri ele alınmıştır. Bu raporda belirtilen ALARA (As Low As Reasonably Achievable) prensipleri, radyasyondan korunma, radyasyon kaynaklarının tasarımı ve ışınlama sonucundaki ekonomik ve sosyal faktörleri göz önüne alarak ışınlamanın mümkün olan en düşük düzeyde tutulmasını kapsamaktadır [85]. ALARA ilkesine göre radyasyon dozunu minimum değerde tutmak için Şekil 2.15'te gösterildiği gibi zaman, mesafe ve zırhlama olmak üzere üç temel prensip vardır [84].

Radyasyon kaynağı bulunan bir bölgede çalışan bir kişi tarafından toplanan doz, bölgede geçirdiği zaman miktarı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle radyasyon kaynağı bulunan bölgede harcanan süre sınırlandırarak radyasyona maruz kalan maddenin emdiği doz kontrol edilecektir [70].

Radyasyon kaynağına olan uzaklık arttıkça maruz kalınan radyasyon miktarı da azalmaktadır. Radyasyona maruz kalan maddenin kaynağına olan mesafesi arttıkça, radyasyon kaynağının şiddetinde mesafeye bağlı azalma mesafenin karesiyle ters orantılıdır [70].

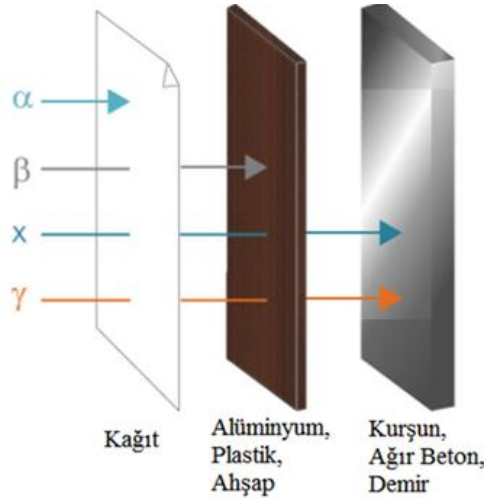
Radyasyon tehlikesinin kontrol edilmesi için kullanılan en önemli ve kullanılan yöntem zırhlama yöntemidir. Radyasyon parçacıklarının veya elektromanyetik dalgalar, zırhlama amacıyla kullanılan malzemenin içerisinden geçerken bu malzemenin atomlarıyla etkileşmesi sonucu enerjilerinin tamamını veya bir kısmını kaybederek soğurulmaktadır. Bu şekilde radyasyon dozu zırhlama ile kontrol edilerek canlılar için zararsız seviyelere indirilmektedir.



Şekil 2.15 Radyasyondan korunmanın üç temel yolu [84]

2.3.8 Radyasyon Tipine Göre Zırhlama Malzemelerinin Seçimi

Radyasyon madde içerisinde geçerken maddeyi oluşturan atom ve moleküllerle etkileşir. Bu etkileşme sonucunda maddenin özelliklerine göre radyasyon enerjisini, maddeye aktararak kaybeder. Radyasyonu engellemek için, radyasyon kaynağı ile korunacak nesne arasına zırhlama malzemesi konulmasına zırhlama denir. Zırhlama radyasyon türüne uygun yapılmalıdır. Farklı radyasyon kaynaklarının zırhlaması için kullanılan malzemeler Şekil 2.16’da verilmiştir.



Şekil 2.16 Radyasyon zırhlaması için kullanılan malzemeler [84]

Alfa (α) radyasyonu elektrik yüklü parçacıklar olup, ağır olduklarından madde içinde çok az yol katederler. Yüksek enerjili α parçacıkları hava ortamında sadece 3 cm kadar yol alabilirler. Bu nedenle α radyasyonu için özel bir zırhlama gerekmez.

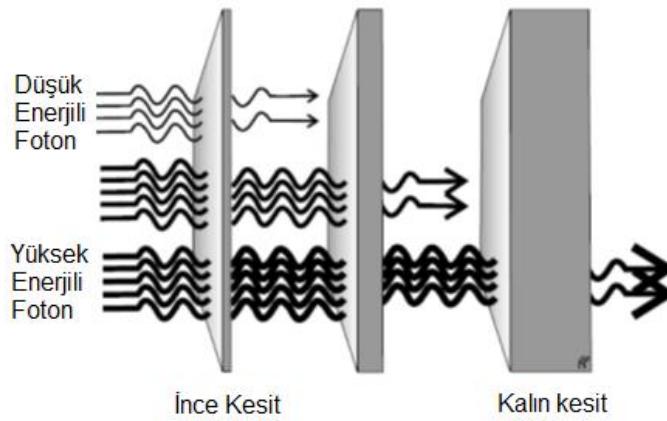
Beta (β) radyasyonu, alfa radyasyonundan farklı olarak çok düşük kütleye sahip olmaları nedeniyle madde içerisine giricilik özelliği daha fazladır. Örneğin, Sr^{90} ve P^{32} gibi 0,6 MeV’lik ortalama bir enerjiye sahip β radyasyonu canlı dokusuna yüzeyinden 3 mm içeriye girebilir. Bu nedenle β radyasyonun zırhlaması gerekmektedir. B radyasyonun zırhlamasında düşük atom numaralı malzemeler kullanılması uygundur. Alüminyum ucuz ve kolay işlenebilir olması nedeniyle genellikle β parçacıkları için zırhlama malzemesi olarak tercih edilir.

X ve gama (γ) radyasyonları madde içerisinde fotoelektrik olay, Compton saçılımı ve çift oluşumu gibi etkileşimlere neden olmaktadır. Bu tür radyasyonların zırhlamasında yoğun malzemeler (kurşun, baritli beton vb.) kullanılmaktadır [81].

2.3.9 Radyasyon Zırhlama Malzeme Parametreleri

2.3.9.1 Lineer Soğurma Katsayısı

Elektromanyetik radyasyonun maddeyle etkileşimi sonucu madde içerisinde bir x yolu boyunca Şekil 2.17’de görüldüğü gibi fotonun şiddeti azalır. Bu fiziksel olay Lambert-Beer soğurma kanunu ile açıklanmaktadır. Malzemenin lineer zayıflatma katsayısı (μ , cm^{-1}) gelen fotonun enerjisine ve etkileşim yaptığı maddenin atom numarasına (Z) bağlıdır. Fotonun malzeme içerisinde zayıflamasıyla hesaplanan lineer zayıflatma katsayısı Denklem 3.4 ile hesaplanır [79].



Şekil 2.17 Zırhlama malzemesinin kalınlığına bağlı olarak foton enerjisinin değişimi [79]

2.3.9.2 Kütle zayıflatma katsayısı

Fotonların soğurulmasında, zırhlama malzemenin kalınlığının yanı sıra yoğunluğu da soğurulma açısından önemli bir parametredir. Farklı yoğunluktaki zırhlama malzemelerinin karşılaştırılması yapılırken yoğunluğa bağlı olarak oluşabilecek farklılıkları ortadan kaldırmak için literatürde kütle zayıflatma katsayıları malzeme özelliklerinin belirlenmesinde sıkça kullanılmaktadır [79]. Kütle zayıflatma katsayısı (μ_m , cm^2/g) Denklem 3.5’te gösterildiği gibi malzemenin lineer zayıflatma katsayısının yoğunluğuna oranlanmasıyla hesaplanan malzeme özelliğidir [79].

2.3.9.3 Yarı Değer ve Onda-Bir Değer Kalınlığı

Yarı değer kalınlığı (YDK), gelen foton ışın şiddetini, yarısına düşürebilmek için gereken malzeme kalınlığıdır. Onda-bir değer kalınlığı (ODK) ise gelen foton ışın şiddetini, onda birine düşürebilmek için gereken malzeme kalınlığıdır. Yarı değer ve

onda-bir değer kalınlıkları sırasıyla Denklem 3.6 ve 3.7’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

2.3.10 Ağır Agregalı Betonların Radyasyon Zırhlama zellikleri

Beton, kolay şekil verilebilir yapısı, ekonomik olması, dayanım ve dayanıklılık özellikleri, üretiminde az enerji tüketilmesi, her yerde üretilebilir olması ve estetik özelliklere sahip olmasından dolayı son yıllarda birçok araştırmacı tarafından radyasyon zırhlama, nükleer reaktör koruyucu duvarı ve radyoaktif depolama tank malzemesi olarak kullanılması düşünülmüştür [86]. Beton, yüksek oranda içerdiği hidrojen ve ağır elementler ile oldukça iyi bir zırhlama malzemesidir. Ayrıca beton karışımında kullanılan normal agregalar yerine ağır agregalar kullanılmasıyla üretilen ağır betonlar yüksek gama soğurma özelliklerine sahip olmaktadır. Bu amaç için literatürde genel olarak barit, hematit, magnetit ve limonit gibi doğal ağır agregalar ve demir içerikli bilyeler gibi yapay agregalar kullanılmıştır [87]. Ağır agregalarının alkalilerden arındırılarak herhangi bir tepkimeye girmeden kalması ve yüzeyinde zararlı tozlar bulundurmuyarak agrega-matris ara yüzeyini zayıflatmaması istenir. Radyasyon zırhlama amacıyla üretilen betonların karışımında kullanılabilecek agregalar ve bu agregaların gereksinimleri ASTM C637 [88] ve ASTM C638’de [89] ayrıntılı olarak verilmiştir.

2.3.10.1 Barit Agregalı Ağır Beton

Akkurt ve diğerleri [90], ^{137}Cs ve ^{60}Co gama kaynaklarını kullanarak barit agregası kullanarak ürettikleri betonlarda radyasyon zırhlaması deneyi yapmışlardır. Barit agregalı betonun birim ağırlığının artmasıyla lineer zayıflatma katsayısının aynı doğrultuda arttığı belirlenmiştir.

Shirmardi ve diğerleri [91], ^{137}Cs ve ^{60}Co gama kaynaklarından çıkan 0,662, 1,173 and 1,332 MeV değerindeki enerjileri kullanarak, üretmiş oldukları barit agregalı betonların lineer zayıflatma katsayılarını hesaplamışlardır. Agregalar olarak barit kullanılan serilerin birim ağırlığı 3463 kg/m^3 değerine ulaşmış ve aynı serinin 0,662, 1,173 ve 1,332 MeV değerindeki foton enerjilerini lineer zayıflatma katsayıları sırasıyla 0,274, 0,200 ve 0,184 olarak hesaplamışlardır.

2.3.10.2 Hematit Agregalı Ağır Beton

Kharita ve diğerleri [92], hematit, dolomit ve serpentin agregalarını kullanarak ürettikleri farklı beton serilerinde, ^{137}Cs ve ^{60}Co gama kaynaklarını kullanarak zırhlama kabiliyetlerini araştırmışlardır. Farklı agregalar arasından en iyi zırhlama kabiliyetinin hematit agregalı beton serisinde olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmanın devamında Kharita ve diğerleri [93] tarafından yapılan çalışmada hematit agregası ile üretilen betona farklı oranlarda karbon tozu katılmıştır. Karbon tozunun ikame oranı arttıkça birim ağırlık azalmış ve bu nedenle betonun radyasyon zırhlama özelliği olumsuz etkilenmiştir.

Sharifi ve diğerleri [94] normal, barit, serpantin ve çelik-magnetit agregası kullanarak üretilen betonların 0,511, 0,662 ve 1,332 MeV gama enerji değerlerinde radyasyon zırhlama özellikleri araştırılmıştır. Birim ağırlığı 5100 kg/m^3 değeri ile en yüksek olan çelik-magnetit agregalı beton, en yüksek lineer ve kütle zayıflatma katsayılarına ve en düşük yarı ve onda-bir değer kalınlıklarına sahip olduğu belirlenmiştir.

2.3.10.3 Magnetit Agregalı Ağır Beton

Oto ve diğerleri [95] tarafından farklı oranlarda magnetit agregası kullanarak üretmiş oldukları betonların Co^{60} gama kaynağından çıkan 1,250 MeV değerindeki enerjiye karşı kütle zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır. Magnetit agregasının kullanım oranı arttıkça radyasyon zırhlama performansının arttığı görülmüştür. Magnetit mineralinin radyasyon zırhlama malzemesi olarak çok etkili olduğu belirlenmiştir.

Abdo ve diğerleri [96], magnetit ve bor kullanarak üretmiş oldukları çimento esaslı lifli kompozitlerin nötron ve gama radyasyonu için zayıflatma katsayılarını deneysel ve teorik olarak XCOM programı ile hesaplamışlardır. Deneysel ve teorik sonuçların birbirleriyle uyumlu oldukları belirlenmiştir. Bor minerali kullanılan serilerin nötron zırhlamasında ve magnetit minerali kullanılan betonların gama zırhlamasında etkin oldukları saptanmıştır.

2.3.10.4 Demir Türevi Agregalı Ağır Beton

Kan ve diğerleri [97], demir cevheri ve çelik bilyeleri kum ile farklı oranlarda yer değiştirerek ürettikleri ağır betonların birim ağırlığı en fazla 3600 kg/m^3 değerine ulaşmıştır. Demir cevheri ve çelik bilye yer değiştirme oranı arttıkça basınç dayanımı

artmış, eğilme dayanımları pek fark etmemiş ve çekme dayanımı azalmıştır. Ayrıca en yüksek demir cevheri ve çelik bilye içeren betonun kırılma tokluğunun ve basınç dayanımının en fazla olması nedeniyle çatlak oluşumuna karşı dirençli olduğu belirlenmiştir. Bu beton, nükleer atık depolama tank betonlarında oluşabilecek çatlaklar nedeniyle meydana gelecek sızıntıların engellenmesi için önerilmiştir.

Huang ve diğerleri [98] tarafından yapılan çalışmada, farklı boyuttaki demir cevheri atıklarını agrega olarak kullanarak ürettikleri tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin (ECC) mekanik özellikleri araştırılmıştır. İnce taneli demir cevheri atıkları ile üretilen ECC malzemesinin iri taneli demir cevheri atıkları ile üretilenlere göre işlenebilirliği artmış ve bu nedenle lif dağılımları daha homojen olduğu için çekme dayanımı artmıştır. İnce taneli demir cevheri atıkları ile üretilen ECC malzemesinin mekanik özellikleri genel olarak standart ECC malzemesine benzer olduğu görülmüştür.

Shettima ve diğerleri [99] farklı oranlarda demir cevheri atıklarının doğal agrega ile yerleştirilmesiyle üretilen betonların reoloji, mekanik ve dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Demir cevheri atıklarının kullanılması işlenebilirliği azalttığı ancak basınç dayanımını ve elastisite modülünü arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan demir cevheri atık oranının artmasıyla, betonun kuruma rötresinin azaldığı, karbonatlaşma, su emme ve klor iyon penetrasyon direncinin arttığı görülmüştür.

2.3.11 Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Radyasyon Zırhlama Özellikleri

Literatürde yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırıldığı çalışmalar son yıllarda yaygınlaşmıştır. Genel olarak bu çalışmalarda, radyasyon zırhlama özelliği olan minerallerin agrega olarak kullanılmasıyla üretilen yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin sahip oldukları mekanik ve dayanıklılık özelliklerin nispeten korunması amaçlanmıştır.

Jankovic ve diğerleri [100] tarafından yapılan çalışmada bariti agrega olarak ve nano-silisi ise çimento ile düşük oranda yer değiştirilmesiyle ürettikleri ultra yüksek performanslı betonların mekanik ve radyasyon zırhlama özellikleri araştırılmıştır. Barit agregasıyla üretilen betonların basınç dayanımının değişmediği ancak eğilme dayanımının ve kütle zayıflatma katsayı değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

Al-Humaiqani ve diğeri [101] tarafından yapılan çalışmada, normal, barit ve hematit gibi ağır agregalı yüksek performanslı betonların (HPC) 0,662 MeV enerji seviyesindeki lineer zayıflatma katsayıları incelenmiştir. Bu çalışmada s/ç oranı 0,3 olarak kullanılmış ve üretilen HPC'lerin basınç dayanımı yaklaşık 100 MPa olarak bulunmuştur. Demir mineraline sahip hematit agregası kullanılarak üretilen HPC serilerin, 0,662 MeV enerji için hesaplanan lineer zayıflatma katsayısı değerleri en fazla olduğu belirlenmiştir.

Ouda [87], magnetit, barit, serpentin ve goethit minerallerinin yüksek performanslı beton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu mineraller arasında birim ağırlığı en fazla olan 4,0 gr/cm³ değeri ile barittir. Bu nedenle barit agregası kullanılarak üretilen yüksek performanslı betonların birim ağırlığı en fazla 3510 kg/m³ değerine ulaşmıştır. Mekanik özellikler açısından magnetit agregalı beton en iyi performans ve barit katkılı beton ise en düşük performans göstermiştir.

2.3.12 Radyoaktif Atık Depolama Tanklarında Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Kullanılması

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından yayınlanan radyoaktif atık tankların teknik özellikleri ile ilgili yönetmelikte [5], istenilen güvenlik şartlarının karşılanabilmesi için kullanılacak tankların yapısal bütünlüğü bozulmadan uzun süreli mekanik dayanım, darbe direnci ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığa sahip olması gerektiği belirtilmiştir. İstenilen şartları sağlayabilecek şekilde tasarlanan metal tank sistemleri radyoaktif atıkların taşınması ve depolanması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, DUCRETE ve CONSTOR isimli sistemler geliştirilmiştir.

Quapp ve Lessing [102] tarafından 1995 yılında patenti alınan seyreltilmiş uranyum dioksitin (DUO₂) agrega olarak kullanılmasıyla üretilen betonların yeterli derecede gama zırlamasıyla birlikte seyreltilmiş uranyum dioksit içinde yüksek oksijen içeriği nedeniyle hızlı nötronların yavaşlamasının sağlanabildiği “DUCRETE” isimli yüksek zırlama özelliği olan çimento esaslı kompozit malzeme geliştirilmiştir. DUCRETE'in basınç dayanımı yaklaşık 60 MPa ve çekme dayanımı yaklaşık 5 MPa'dır. DUCRETE kompozit malzemeler ile üretilmiş radyoaktif ve nükleer atık taşıma ve depolama amacıyla kullanılacak tankların geleneksel malzemeler ile üretilen tanklara göre daha

hafif ve daha küçük olmasından dolayı daha uygun bir malzeme olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan, DUCRETE malzemesinin uzun süreli yapısal bütünlüğe ve dayanıklılığa sahip olabilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, uranyum dioksitin (DUO_2) camsı yapısı ve içermiş olduğu yüksek alkali miktarı nedeniyle alkali agrega reaksiyonun oluşumu gerçekleşebilir. Bu nedenle, DUCRETE'in beklenen hizmet koşulları ve düşük maliyetli üretim süreçleri altında yapısal bütünlüğünü uzun süre sağlayabilecek şekilde dayanıklı olduğunun araştırılması gerekmektedir [103].

Alman Nükleer Hizmet Derneği (GNB) kullanılmış nükleer yakıtın depolama ve nakliyesi için döküm demirden yapılmış CASTOR tank sistemlerini geliştirmiştir ve bu dernek tarafından uluslararası pazarda dağıtımı yapılmıştır. Ancak, CASTOR tanklarının imalat özellikleri ve mali kaynakların daha sınırlı olduğu Doğu Avrupa pazarları için kullanılmış nükleer yakıt tanklarında yeni bir alternatif geliştirmenin gerekli olduğunu fark etmişlerdir. Böylece, GNB daha ucuz bir maliyetle CASTOR sistemin avantajlarını birleştirerek CONSTOR (çelik-betonarme-çelik sandviç tank) sistemini geliştirmişlerdir [6].

Ancak metal tankların maliyetinin çok fazla olması nedeniyle tank malzemesi olarak daha ekonomik ve yüksek performans özelliklerine sahip betonların iyi bir alternatif olduğu düşünülmektedir [104]. Bu nedenle, üstün mekanik ve dayanıklılık özellikleri ile yapısal bütünlüğü uzun süre koruyabilecek UHPC malzemesiyle üretilen tankların radyoaktif atıkların taşınması ve depolanmasında kullanılabilirliği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Matte ve Moranville [4] tarafından yapılan çalışmada, UHPC malzemelerin sahip oldukları gelişmiş içyapı ve üstün mekanik özellikleri sayesinde nükleer atıkların depolanması için tasarlanacak tankların üretiminde kullanılabileceği belirtilmiştir. Uzun süre depolanması gereken atıklar için kullanılacak olan tankların yapısal bütünlüğü bozulmadan çevresel etkilere karşı dayanıklı olması gerektiğinden dolayı UHPC malzemesinin tank malzemesi olarak önerilmektedir.

Torrenti ve diğerleri [3] tarafından yapılan çalışmada, UHPC ile üretilen tankların kullanılmasıyla zararlı atıkların yol açabileceği çevresel kirlenmenin önüne geçilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, yüksek düzeyli radyoaktif atıkların depolanması

için kullanılacak tankların retiminde UHPC malzemesinin uygun olduğu yapılan çalışmalarla saptanmıştır.

Chuang ve Huang [105] tarafından düşük düzeyli radyoaktif atıkların depolanması için bariyer malzemesi olarak UHPC malzemelerin kullanılabilirliği klorür ve gaz geçirimsizliği gibi dayanıklılık deneyleri ile araştırılmıştır. Araştırma sonucunda 164 MPa basıncı dayanımına sahip UHPC malzemesinin çok düşük gaz geçirimsizlik katsayısına sahip olduğu ve ayrıca klorür geçirimsizlik deneyinde ise malzemenin yüzeyinde çok ince bir katmana klor iyonlarının girebildiği belirlenmiştir.

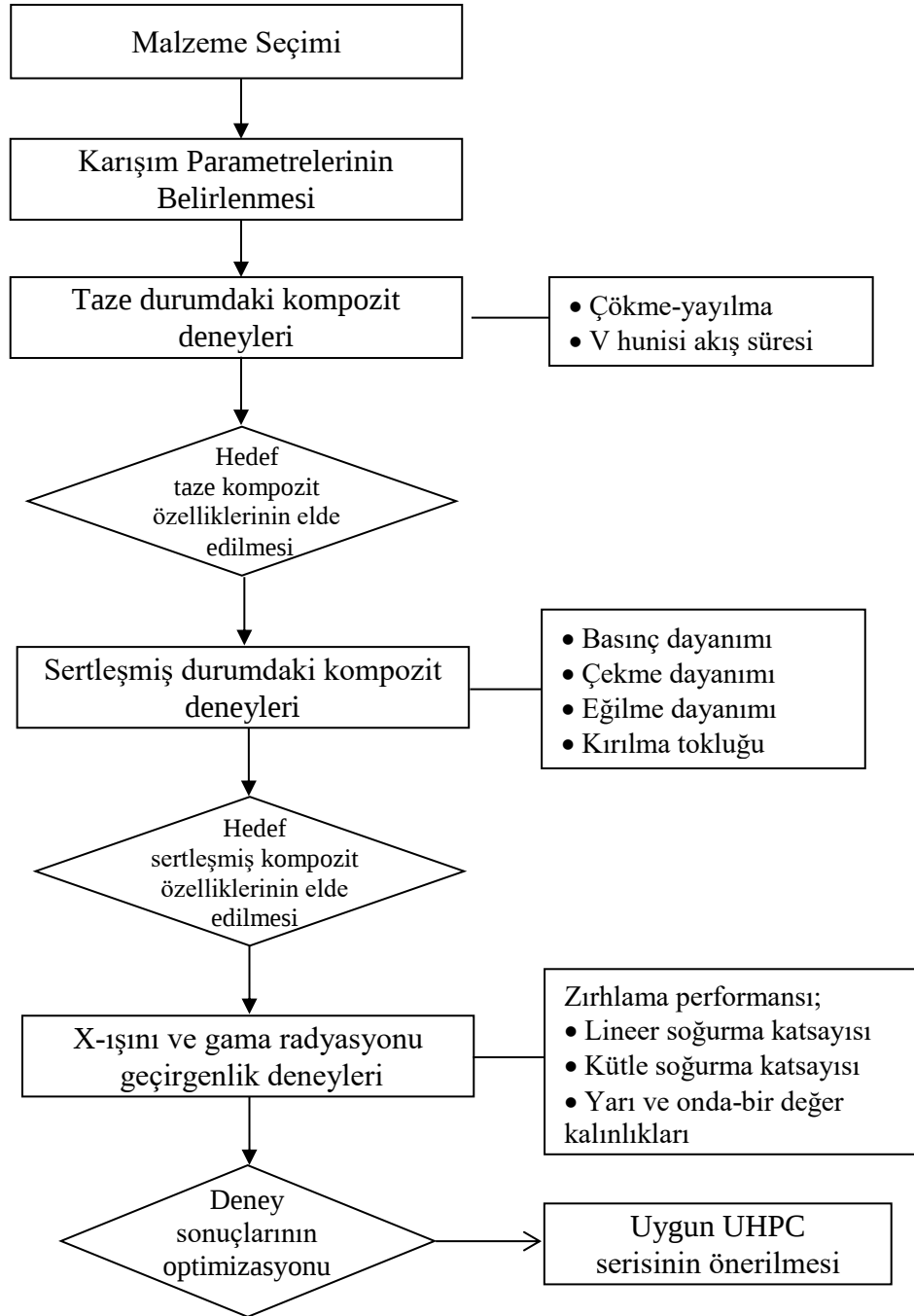
UHPC malzemesinin farklı uygulamalarda kullanılabilirliğinin araştırıldığı birçok çalışma literatürde mevcuttur. Ancak, radyasyon zırhlama performansını geliştirmek amacıyla ağır agrega kullanılarak üretilen UHPC zelliklerinin incelendiği kapsamlı bir çalışma mevcut değildir. Radyasyon zırhlama amacı doğrultusunda literatürde yaygın olarak ağır agregalı geleneksel betonlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Geleneksel betonun, literatür bölümünde ifade edildiği gibi radyoaktif atık depo tankları için gerekli olan üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerini karşılayamadığı bilinmektedir. Bu nedenle UHPC malzemesinin üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerini bozmadan üretiminde radyasyon zırhlama özelliği olan minerallerin agrega olarak kullanılması ile hem yüksek zırhlama performansı hem de yüksek mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip bir malzemenin geliştirilebileceği düşünülmektedir.

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında farklı ağır agrega, farklı bağlayıcı miktarı, farklı çelik lif içeriği ve farklı kür tipi uygulaması ile üretilen ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozit (UHPC) malzemelerin fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama özelliklerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. UHPC malzemesinin X-ışını ve gama radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılması amacıyla planlanan bu deneysel çalışma; ön deneyler, UHPC üretimi, fiziksel ve mekanik kontrol deneyleri, radyasyon geçirgenlik deneyleri ve deney sonuçlarının optimizasyonu olmak üzere beş aşamada gerçekleştirilmiş ve çalışmaya ait deneysel akış şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.

UHPC malzemesinin üretiminde, kullanılan çimentonun tipi ve miktarı, mineral katkının tipi ve miktarı, kimyasal katkı, agrega tipi ve tane boyutu, çelik lif oranı gibi birçok karışım parametresi vardır. Kullanılacak malzemelerin tipi, miktarı ve birbirleriyle uyumu ön deneyler ile araştırılmış ve UHPC’nin sahip olması gereken reolojik ve mekanik özellikler üzerinde en iyi performansı gösterecek şekilde malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen UHPC malzemesinde taze durumda çökme-yayılma ve V-hunisi akış süresi; sertleşmiş durumda birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, çekme dayanımı, gerilme-şekil değiştirme davranışı ve radyasyon soğurma özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca XRF analizi ile üretilen UHPC numunelerin oksit cinsinden element bileşenleri ve bunların ağırlıkça yüzdesi belirlenmiştir. XRF analiz sonuçları XCOM bilgisayar programında kullanılarak radyasyon soğurma özellikleri teorik olarak hesaplanmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.1 Deneysel çalışma akış şeması

3.1 Ön Deneysel Çalışma

UHPC malzemesinin üretiminde yaygın olarak çimento, silis dumanı, kuvars tozu, doğal kum, su, kimyasal katkı ve çelik lif kullanılmaktadır. Ancak özel uygulamalarda kullanılacak UHPC malzemesi bir takım farklı malzeme kompozisyonlarına sahip olabilir. Bu nedenle, radyasyon zırhlama ve radyoaktif atık depolama tank üretiminde kullanılması düşünülen UHPC malzemesi kendiliğinden yerleşen kıvamda, homojen içyapı, düşük porozite, yüksek mekanik ve radyasyon soğurma özelliklerine sahip olması gerektiği literatürde belirtilmiştir. Bu amaca yönelik üretilecek UHPC

malzemesinde, çimentonun, mineral katkının ve kimyasal katkının tipi, miktarı ve birbirleriyle uyumu ile kullanılacak çelik lifin oranı ön deneyler ile araştırılmış ve UHPC'nin sahip olması gereken üstün reolojik, içyapı ve mekanik özellikler açısından en iyi performansı gösterecek şekilde malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. Radyasyon soğurma özelliği ise malzemenin yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, UHPC malzemesinin yoğunluğunun arttırılması kullanılacak agreganın tipine ve hacmine bağlıdır. UHPC'nin yoğunluğunu arttırmak için birinci olarak radyasyon zırhlama özelliği olan ağır agregaların kullanılması ve ikinci olarak ise agreganın hacmini arttırmak için bağlayıcı miktarının azaltılması gerekmektedir.

Ön deneyler kapsamında bütün karışım parametrelerinin belirlenmesi amacıyla taze halde çökme-yayılma ve V hunisi akış süresi deneyleri ile sertleşmiş halde basınç ve eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.1.1 Çimento Tipi ve Miktarının Belirlenmesi

Ön deneyler kapsamında üretilen UHPC malzemesinde CEM I 52,5 R, CEM I 42,5 N ve CEM III B 32,5 N çimentoları kullanılmıştır. Kullanılmış olan çimentolar arasından taze ve sertleşmiş durumda yapılan deneyler birlikte değerlendirildiğinde en iyi performans gösteren çimento tipinin CEM III B 32,5 N olduğu belirlenmiştir. Bu çimento tipinin dayanım yönünden %20'ye kadar kayıp oluşturmaya rağmen işlenebilirlik açısından değerlendirildiğinde daha az kimyasal katkı kullanılmasıyla istenen işlenebilirliği sağladığı görülmüştür. Çimento tipinin seçilmesinden sonra, UHPC üretiminde kullanılacak CEM III B 32,5 N çimentosunun miktarının belirlenmesi amacıyla yapılan ön deneylerde, 700, 800 ve 900 kg/m³ çimento dozajına sahip seriler üretilmiştir. Bu seriler arasında işlenebilirlik ve dayanım açısından en iyi performans gösteren çimento dozajı 800 kg/m³'tür. Ancak radyasyon soğurma özelliği ise malzemenin yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olması nedeniyle agrega hacmini arttırabilmek için bağlayıcı miktarının azaltılması gerekmektedir. Bu nedenle mekanik özelliklerden taviz vererek istenen işlenebilirliği sağlayacak şekilde, UHPC üretiminde 400, 600 ve 800 kg/m³ çimento dozajı seçilmiştir.

3.1.2 Mineral Katkının Tipi ve Miktarının Belirlenmesi

UHPC üretiminde yaygın olarak kullanılan mineral katkı silis dumanıdır. Ancak diğer mineral katkıların da UHPC özellikleri üzerinde etkisinin araştırıldığı birçok çalışma

mevcuttur. Bu çalışma kapsamında üretilen UHPC malzemelerinin radyasyon zırhlama ve radyoaktif atık depolama tankı üretiminde kullanılması düşünüldüğünden UHPC malzemesi kendiliğinden yerleşen kıvamda, düşük porozite ve yüksek mekanik özelliklere sahip olmalıdır. Ön deneysel çalışma kapsamında, çimento dozajının %12,5 ve %25 oranında sırasıyla silis dumanı ve uçucu külün UHPC üretiminde kullanılması işlenebilirlik ve dayanım yönünden en iyi performansı göstermiştir.

3.1.3 Kimyasal Katkının Belirlenmesi

UHPC üretiminde çok düşük su/bağlayıcı oranı ($s/b < 0,20$) ile üretim yapılacağı için istenen işlenebilirliğin sağlanabilmesi amacıyla iki farklı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ve farklı katkı miktarları kullanılarak ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde daha önceden seçilen CEM III B 32,5 N çimentosu kullanılarak kimyasal katkının bu çimento tipi ile uyumu araştırılmıştır. Kullanılan süperakışkanlaştırıcılarda bir tanesi modifiye fosfonat, diğeri ise polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltan kimyasal katkılardır. İstenen işlenebilirliğin sağlanabilmesi için yüksek oranda kullanılan modifiye fosfonat esaslı kimyasal katkılı UHPC serilerinin uzun süre priz almadığı ve dayanım kazanmadığı görülmüştür. Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkının CEM III B 32,5 N çimentosu ile daha uyumlu olduğu, işlenebilirlik ve dayanım açısından incelendiğinde daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

3.1.4 Agregat Tipinin Belirlenmesi

UHPC üretiminde yaygın olarak kuvars unu ve silis kumu kullanılmaktadır. Ancak, X-ışını ve gama radyasyon soğurma özelliklerinin araştırıldığı bu çalışma kapsamında UHPC malzemesinin zırhlama performansının artırılabilmesi için yoğunluğunun artırılması gerekmektedir. UHPC malzemesinin yoğunluğunun artması kullanılacak agreganın tipine ve hacmine bağlıdır. UHPC'nin yoğunluğunu arttırmak için ilk olarak radyasyon zırhlama özelliği olan ağır agregaların kullanılması ve ikinci olarak ise agreganın hacmini arttırmak için bağlayıcı miktarının azaltılması gerekmektedir. Bu nedenle, X-ışını ve gama radyasyon zırhlama amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan ağır agregaların UHPC'nin kıvam ve dayanım özelliklerine etkisi ön deneyler ile incelenmiştir. Ağır agregat olarak barit, magnetit, saf demir tozu ve atık demir tozu kullanılmış ve bu agregaların fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Ön deneysel çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Agrega	Tane Boyutu (µm)	Özgül Ağırlık (kg/dm ³)
Kuvars Tozu	0-400	2,67
Silis Kumu	0-1000	2,64
Barit Kumu	0-1000	4,28
Manyetit Kumu	0-4000	4,51
Saf Demir Tozu	0-125	7,16
Atık Demir Tozu	0-1000	4,99

Kuvars tozu ve silis kumunun birlikte kullanılmasıyla üretilen referans UHPC karışımına göre diğer agregalar ile üretilen karışımların özellikleri karşılaştırılmıştır. Ön deneysel çalışmanın sonuçlarına göre barit agregasının kullanılması işlenebilirliği çok az olumsuz etkilemekle birlikte basınç dayanımını yaklaşık %20 azaltmaktadır. Magnetit agregası ile üretilen karışımların işlenebilirlik ve dayanım yönünden çok düşük sonuçlar verdiğinden dolayı bu agreganın UHPC malzemesi üretiminde uygun olmadığı görülmüştür. Yüksek inceliğe ve yoğunluğa sahip saf demir tozunun agrega olarak kullanıldığı karışımların işlenebilirlik ve dayanım açısından referans UHPC karışımına göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Ancak saf demir tozunun yüksek maliyetinden dolayı UHPC üretiminde kullanılması uygun olmamaktadır. Bu nedenle, demir çelik fabrikalarından yan ürün olarak elde edilen daha düşük maliyetli atık demir tozu UHPC üretiminde kullanılmıştır. Atık demir tozunun kullanıldığı UHPC karışımlarında, saf demir tozunun kullanılmasıyla elde edilen özelliklere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda kuvars tozu ve silis kumunun birlikte kullanılmasıyla üretilen referans seri, barit agregalı seri ve atık demir agregalı seri olmak üzere üç farklı agrega tipi UHPC üretiminde kullanılmıştır.

3.1.5 Çelik Lif Oranının Belirlenmesi

UHPC üretiminde kullanılacak lif içeriğinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ön deneyler kapsamında, çapı 0,15 mm, boyu 13 mm ve çekme dayanımı 3000 MPa olan yüksek dayanıma sahip düz çelik lifler hacimce %1, %1,5, %2, %2,5, %3 oranlarında kullanılmıştır. En yüksek basınç ve eğilme dayanımı, çelik lif oranı %2,5 olan UHPC serisinde görülmüştür. Ancak işlenebilirlik açısından incelendiğinde, en uygun serinin %2 lif oranına sahip serilerin olduğu belirlenmiştir. Lif oranı arttıkça işlenebilirliğin

azaldığı ve ayrışma olduğu ön deneyler sonucunda görülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda, UHPC malzemesinin süneklik kapasitesinin detaylı bir şekilde inceleyebilmek amacıyla %1, %2 ve %3 oranında çelik lif kullanılmasına karar verilmiştir.

3.2 UHPC Üretiminde Kullanılan Malzemeler

UHPC malzemesinin X-ışını ve gama radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılması planlanan bu deney çalışmada, amaca yönelik malzeme tipi ve miktarının seçilmesi ön deneyler ile belirlenmiştir. Ayrıca malzeme seçiminde, öncelikle UHPC'nin sahip olduğu üstün fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkilemeyecek ve ekonomik bir tasarıma engel olmayacak malzemelerin seçimi gerçekleştirilmiştir.

3.2.1 Çimento

UHPC üretiminde Çizelge 3.2'de kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri verilen CEM III/B 32,5 N-SR tipi çimentosu kullanılmıştır. Bu çimento TS EN 197-1'de [106], %20-34 oranında klinker ve %66-80 oranında yüksek fırın cürufu içeren sülfata dayanıklı çimento olarak tarif edilmiştir.

Çizelge 3.2 Kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Analiz	Standartlar (%)	Analiz Sonuçları (%)	Fiziksel Deneyler	Deney Sonuçları
SiO ₂	-	32,78	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,00
Al ₂ O ₃	-	9,25		
Fe ₂ O ₃	-	2,21	Özgül Yüzey (cm ² /g)	5547
CaO	-	48,11		
MgO	-	3,96	Priz Başlangıç	180 dk
Na ₂ O	-	0,50	Priz Başlangıç	345 dk
K ₂ O	-	0,79	Basınç Dayanımı (MPa)	
SO ₃	Maks. 4,0	1,68		
Cl ⁻	Maks. 0,1	0,014	Gün	Deney Sonuçları
Kızdırma Kaybı	Maks. 5,0	0,35		
Çözünmeyen Kalıntı	Maks. 5,0	0,64		
Mineral Katkı Miktarı	66-80	68,01	28	35,4

3.2.2 Mineral Katkılar

UHPC üretiminde mineral katkı olarak, Norveç Elkem tesislerinden temin edilen silis dumanı ve Akçim Madencilik AŞ'ye ait Tunçbilek/Kütahya santralinden elde edilen uçucu kül olmak üzere iki tür puzolan malzeme kullanılmıştır. Söz konusu malzemelerin kimyasal analiz neticesinde belirlenen oksit cinsinden temel bileşenleri ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Silis dumanı, TS EN 13263-1'de [107] verilen uygunluk kriterlerine göre Sınıf 1'de, uçucu kül ise ASTM C618'de [108] verilen sınıflandırmaya göre F sınıfına ve TS EN 197-1'de [106] verilen sınıflandırmaya göre V sınıfındadır.

Çizelge 3.3 Kullanılan mineral katkıların kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler		
Bileşen (%)	Silis Dumanı	Uçucu Kül
SiO ₂	90,7	57,39
Al ₂ O ₃	-	20,37
Fe ₂ O ₃	-	9,64
CaO	0,04	3,49
MgO	1,21	-
Na ₂ O	1,84	0,17
K ₂ O	-	1,88
SO ₃	0,81	0,45
Cl ⁻	0,083	0,0046
Kızdırma Kaybı	3,46	0,89
Fiziksel Özellikler		
Özgül Ağırlık (kg/m ³)	2253	2200
Birim Ağırlık (kg/m ³)	681	780
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	240000	-

3.2.3 Kimyasal Katkı

UHPC üretiminde istenen işlenebilirliğin sağlanması amacıyla katı madde oranı %21 olan polikarboksilat esaslı yeni nesil süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkının kullanılması ön deneyler ile belirlenmiştir. Tüm serilerde kendiliğinden yerleşen kıvam hedeflendiğinden dolayı, kimyasal katkı miktarı hedeflenen kıvamı elde edebilecek şekilde farklı oranlarda kullanılmıştır.

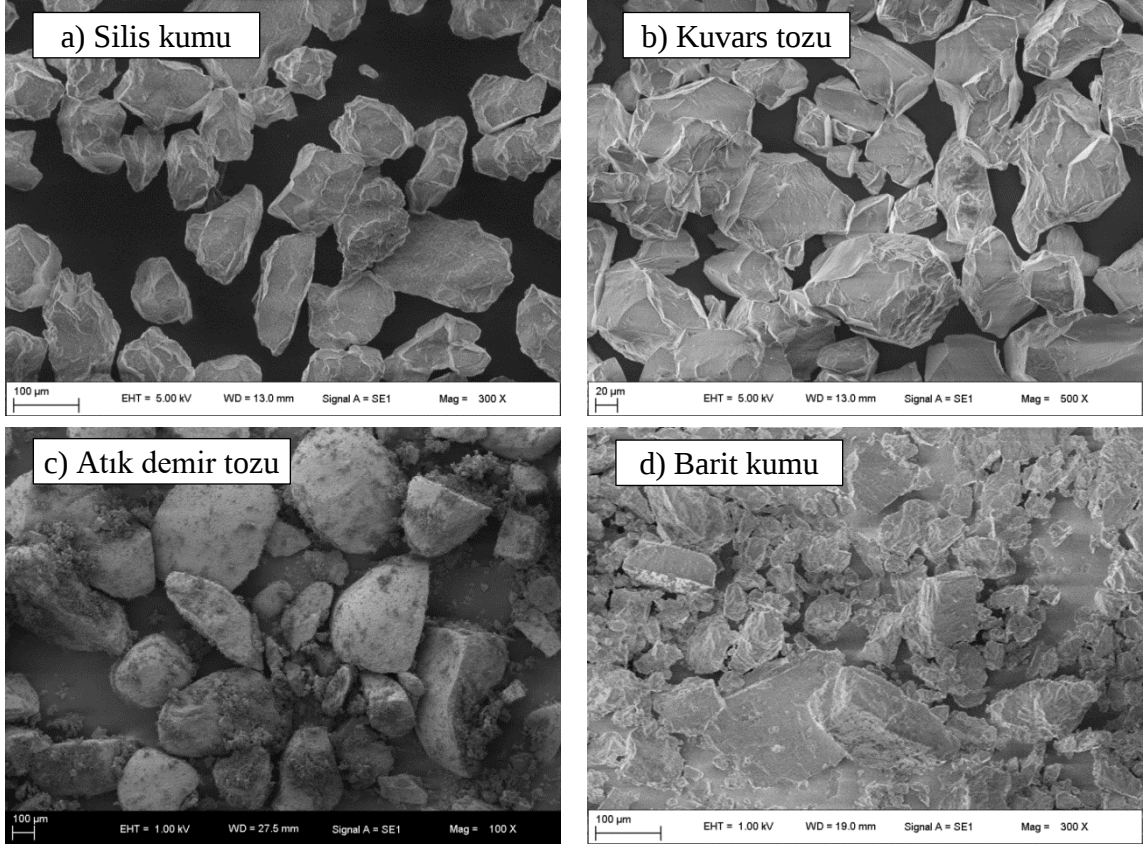
3.2.4 Agrega

UHPC malzemesinin radyasyon zırlama özelliğinin araştırılması amacıyla yapılan deneysel çalışma asıl olarak yüksek özgül ağırlıktaki agregaların UHPC üretiminde kullanılmasını kapsamaktadır. Bundan dolayı kullanılacak farklı özgül ağırlıktaki agregaların, UHPC malzemesinin hem taze özelliklerine hem de sertleşmiş özelliklerine olumsuz etkiye sebep olmayan silis kumu ve kuvars tozu karışımı, barit kumu ve atık demir tozu kullanılarak 3 farklı agrega iskeleti ön deneyler ile belirlenmiştir. Silis kumu olarak, Kırklareli Pınarhisar Limak Çimento Fabrikası tarafından üretilen standart CEN kumu kullanılmıştır. Kuvars tozu, Çatalca/Yeniköy’de bulunan Şişecam AŞ’ye ait madenden temin edilmiştir. Barit agregası, Osmaniye’de bulunan Barit AŞ’ye ait madenden temin edilmiştir. Atık demir tozu olarak ise, Borçelik demir çelik fabrikasında yıllık 6300 ton endüstri atığı olarak oluşan malzeme kullanılmıştır.

Kullanılan agregaların kimyasal özellikleri Çizelge 3.4’te, fiziksel özellikleri ve karışım oranları Çizelge 3.5’te, SEM görüntüleri Şekil 3.2’de, fotoğrafları Şekil 3.3’te ve her bir agrega ve karışım agregasına ait granülometri eğrileri Şekil 3.4’te verilmiştir. Üretilcek UHPC serilerinde agrega granülometrilere sabit tutularak maksimum dane boyutu 1 mm olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.4 Kullanılan agregaların kimyasal özellikleri

Bileşen (%)	Silis Kumu	Kuvars Tozu	Atık Demir Tozu	Barit Kumu
SiO ₂	88,66	97,33	0,19	2,14
Al ₂ O ₃	5,71	0,32	0,12	0,48
Fe ₂ O ₃	0,40	1,12	97,52	0,76
MgO	0,07	0,04	0,04	0,39
K ₂ O	2,47	0,06	-	0,06
CaO	0,25	0,01	0,07	1,49
TiO ₂	0,21	0,08	0,02	0,10
Cr ₂ O ₃	-	0,59	0,23	-
MnO	0,02	-	0,25	0,03
Na ₂ O	-	-	0,44	0,45
SrO	-	-	-	1,40
BaSO ₄	-	-	-	91,65
Kızdırma Kaybı	0,73	0,40	0,47	0,99



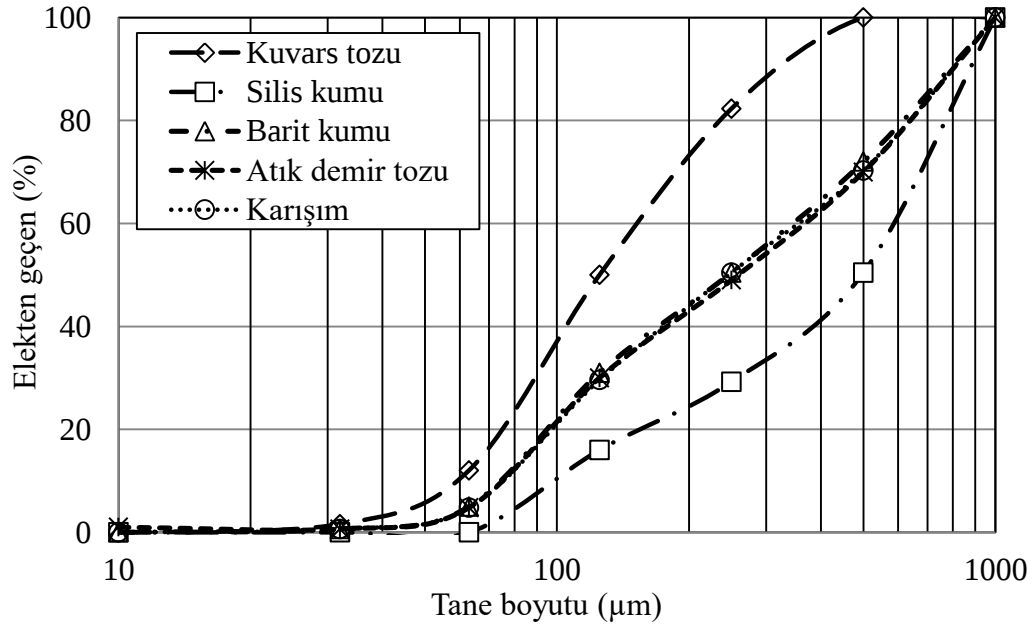
Şekil 3.2 UHPC üretimde kullanılan agregaların SEM görüntüleri



Şekil 3.3 UHPC üretimde kullanılan agregaların fotoğrafları

Çizelge 3.5 Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri ve karışım oranları

Agrega İskeleti	Agrega	Karışım Oranı (%)	Tane Boyutu (μm)	Özgül Ağırlık (kg/dm^3)
1: Referans	Silis kumu	60	0-1000	2,64
	Kuvars tozu	40	0-500	2,67
2: Barit	Barit kumu	100	0-1000	4,28
3: Demir	Demir tozu	100	0-1000	4,99



Şekil 3.4 Kullanılan agregaların tane boyut dağılımı

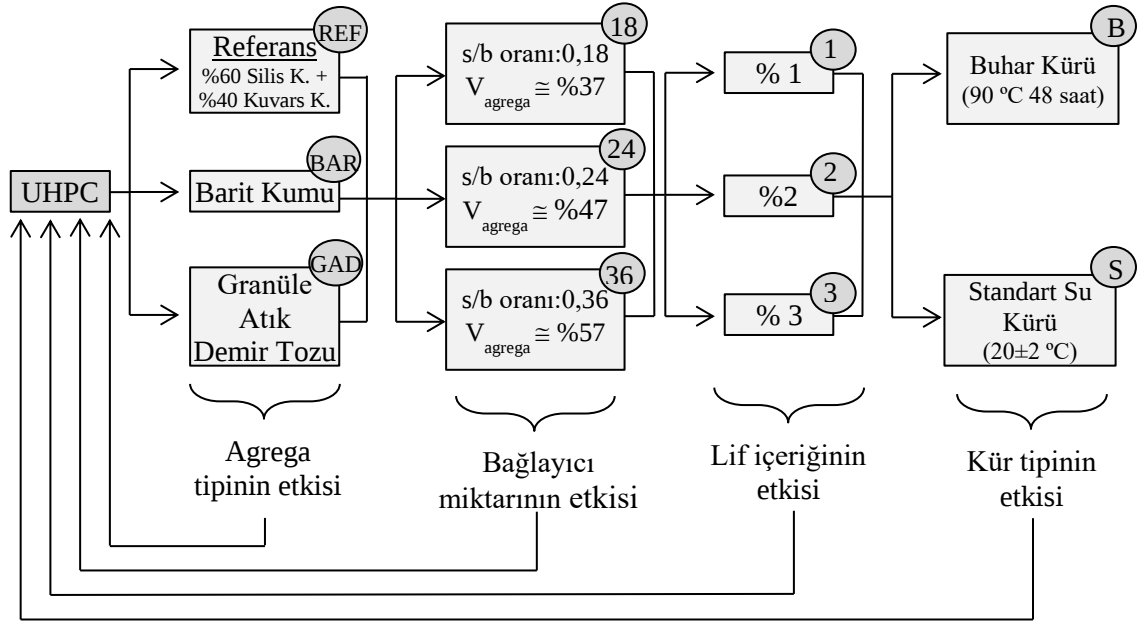
3.2.5 Çelik Lif

UHPC üretiminde istenen süneklik özelliklerinin sağlanabilmesi amacıyla çapı 0,15 mm, boyu 13 mm, narınlığı 87, çekme dayanımı 3000 MPa ve elastisite modülü 200 GPa olan yüksek dayanıma sahip düz çelik lifler farklı oranlarda kullanılmıştır.

3.3 UHPC Karışım Oranları

Ultra yüksek performanslı çimento esaslı ağır kompozitin (UHPC) X-ışını ve gama radyasyon zırlama özelliklerinin araştırılması amacıyla yapılan deneysel çalışma kapsamında 3 farklı agrega iskeleti, 3 farklı su/bağlayıcı oranı ve 3 farklı çelik lif içeriği olmak üzere toplam 27 farklı UHPC serisi üretilmiştir. Çimento, silis dumanı ve uçucu külün bağlayıcı olarak kullanılmasıyla, toplam 550 kg/m^3 , 825 kg/m^3 ve 1100 kg/m^3 bağlayıcı miktarı olmak üzere üç farklı tasarım düşünülmüştür. Tüm serilerde toplam su

(karışım suyu ve kimyasal katkıdan gelen su) sabit tutulmasından dolayı bağlayıcı miktarının değişmesiyle su/bağlayıcı oranları; 0,18, 0,24 ve 0,36 olarak belirlenmiştir. Ayrıca bağlayıcı miktarının 550 kg/m^3 , 825 kg/m^3 ve 1100 kg/m^3 olarak kullanılmasıyla karışım içerisindeki agrega hacmi sırasıyla 570, 470 ve 370 olarak hesaplanmıştır. Farklı agrega iskeleti olarak kullanılan; silis kumunun %60 ve kuvars tozunun %40 oranında karışımı (REF), barit kumu (BAR) ve granüle atık demir tozu (GAD) için maksimum tane boyutu 1mm olacak şekilde granülometri değerleri sabit tutulmuştur. İlave olarak karışımlarda hacimce %1, %2 ve %3 oranında olmak üzere üç farklı çelik lif içeriği kullanılmıştır. Üretilen UHPC numuneleri kalıptan çıkarıldıktan sonra buhar kürü ve 1, 3, 7, 14, 28, 56 ve 90 gün boyunca su kürü uygulanmıştır. Uygulanan buhar kürü ve su kürü işlemleri bir sonraki bölümde detaylı olarak açıklanmıştır. Böylelikle, UHPC malzemesinin fiziksel, mekanik ve radyasyon zırlama özelliklerine agrega tipinin, bağlayıcı miktarının, çelik lif içeriğinin ve kür tipinin etkisi araştırılacaktır. Farklı tasarımlara sahip olan UHPC malzemesine ait deneysel çalışma parametreleri ve bu parametrelerin kodlanması Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5 Deneysel çalışma parametreleri ve parametrelerin kodlanması

Her bir karışım parametresinin kullanılmasıyla üretilen toplam 27 farklı UHPC karışımı için gerekli olan malzeme miktarları hesaplanmış ve Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6 UHPC üretiminde kullanılan malzemelerin karışım oranları

KOD	s/b oranı (%)	Lif oranı (%)	Çimento miktarına göre relatif malzeme oranları								
			Çimento	Silis Dumanı	Uçucu Kül	Silis Kumu	Kuvars Tozu	Granüle Atık Demir	Barit Kumu	Su**	SA*
REF	18	1	1	0,25	0,13	0,75	0,50	-	-	0,19	0,08
		2				0,73	0,49	-	-		
		3				0,71	0,48	-	-		
GAD		1				-	-	2,35	-		
		2				-	-	2,29	-		
		3				-	-	2,23	-		
BAR		1				-	-	-	2,02		
		2				-	-	-	1,96		
		3				-	-	-	1,91		
REF	24	1	1	0,25	0,13	1,26	0,85	-	-	0,27	0,08
		2				1,23	0,83	-	-		
		3				1,21	0,81	-	-		
GAD		1				-	-	3,99	-		
		2				-	-	3,91	-		
		3				-	-	3,82	-		
BAR		1				-	-	-	3,42		
		2				-	-	-	3,35		
		3				-	-	-	3,28		
REF	36	1	1	0,25	0,13	2,31	1,56	-	-	0,44	0,08
		2				2,27	1,53	-	-		
		3				2,23	1,50	-	-		
GAD		1				-	-	7,27	-		
		2				-	-	7,15	-		
		3				-	-	7,02	-		
BAR		1				-	-	-	6,24		
		2				-	-	-	6,13		
		3				-	-	-	6,03		

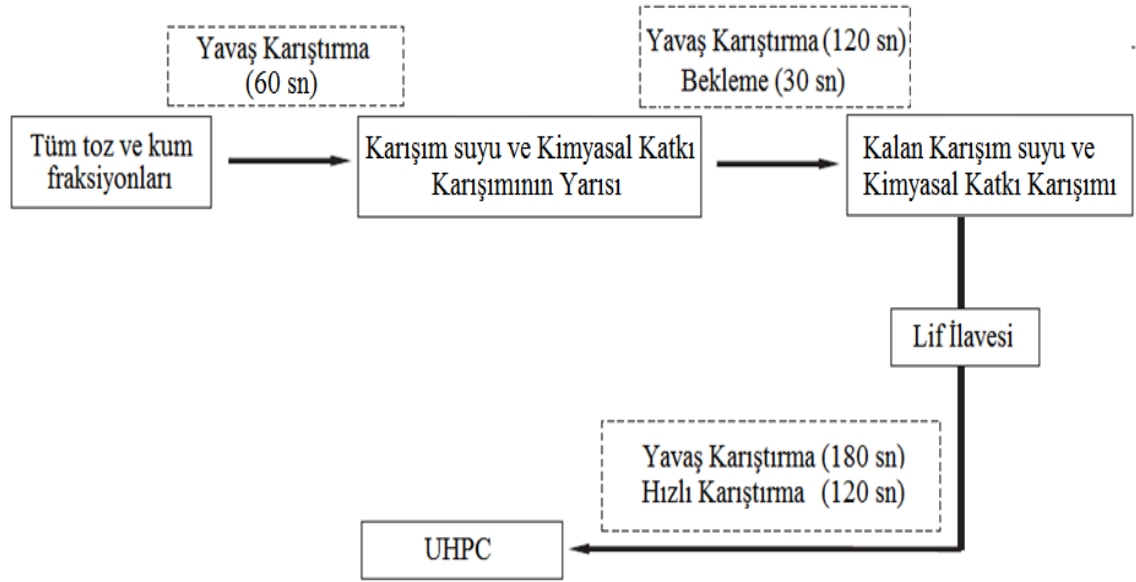
* SA: Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı

** Tüm karışımlarda, toplam su miktarı (karışım suyu ve kimyasal katkıdan gelen su) sabit tutulmuştur.

3.4 UHPC Üretimi ve Kür Tipi

UHPC karışımının düşük su/bağlayıcı oranı ve yüksek çelik lif içeriğine sahip olması nedeniyle istenen işlenebilirliğin sağlanması amacıyla yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılması gerekmektedir. Ancak kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıların etkisini gösterebilmesi için uzunca bir karıştırma süresine ve karıştırmayı yüksek devirde yapabilen mikserlerin kullanılmasına ihtiyaç vardır.

UHPC üretiminde karışıma giren malzemelerin mikserle konulma sırası, karıştırma hızı ve süresi belli bir düzen içerisinde olmalıdır. Aksi takdirde aynı malzemeler ile çok yüksek dayanımlı bir beton elde edilebileceği gibi çok düşük dayanımlı bir beton da elde edilebilir. UHPC karışım yöntemini belirten herhangi bir standart mevcut değildir. Ancak bu konu ile ilgili araştırma yapan birçok çalışmada karışım yöntemi belirtilmiştir [48],[66],[109],[110],[111]. Yapılan bu çalışmalarda, tüm toz ve kum fraksiyonlarının mikserle konulmasından sonra homojenliğin elde edilebilmesi için belirli bir süre kuru karışım yapılması ve sonrasında su ve kimyasal katkının karışıma eklenmesi gerektiği ve karışımın istenen işlenebilirliği sağlamasından sonra çelik lif ilavesinin yapılması gerektiği belirtilmiştir. Bu doğrultuda belirlen karışım yöntemi Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6 UHPC üretim yöntemi

Kendiliğinden yerleşen kıvamda üretilen UHPC karışımlarının taze haldeki deneyleri yapıldıktan sonra vibrasyon uygulanmadan kalıplara yerleştirilmiş ve 24 saat 20 °C’de oda sıcaklığında bekletildikten sonra kalıplardan çıkartılmıştır. Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra kür işleminin fiziksel, mekanik ve radyasyon zırlama özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla, 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kürü ve 1, 3, 7, 14, 28, 56 ve 90 gün boyunca 20±2 °C su içerisinde kür uygulaması olmak üzere 2 farklı kür işlemi uygulanmıştır. UHPC üretiminde, buhar kürünün uygulandığı buhar tankı ve su kürünün uygulandığı havuzlar Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Buhar kürünün uygulandığı buhar tankı (solda) ve su kürünün uygulandığı havuzlar (sağda)

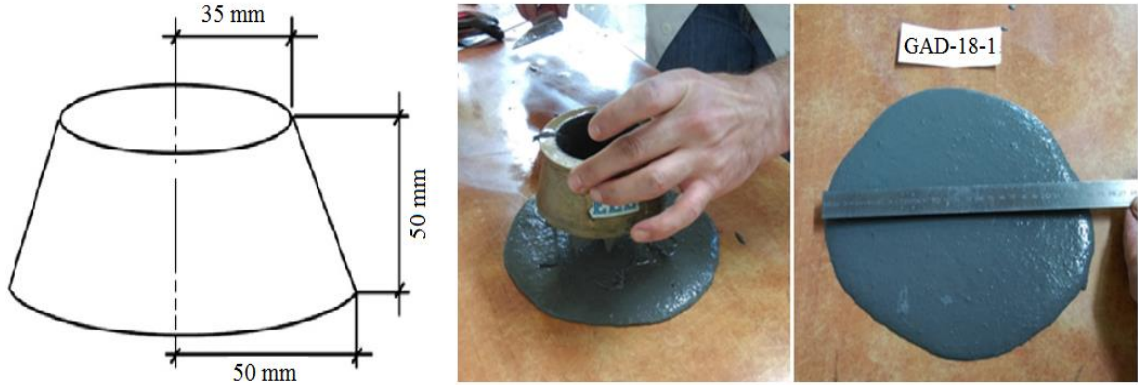
3.5 Taze UHPC Özellikleri

UHPC mekanik özellikler açısından yüksek performans gösterebilmesi için karışımın homojen olması ve dolayısıyla işlenebilirliğin uygun olması gerekmektedir [1]. Avrupa Birliği Ulusal Dernekler Federasyonu Beton Temsilciliği (EFNARC) [112] tarafından 2002 yılında yayınlanan yönetmelikte kendiliğinden yerleşen beton ve harç için gerekli özellikler verilmiştir. Bu özelliklerin belirlenmesi amacıyla taze UHPC çökme-yayılma çapı (d, cm) ve V hunisi akış süresi (t, sn) gibi kıvam deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarının ortalama değerleri Çizelge Ek A’da verilmiştir.

3.5.1 Çökme-Yayılma Deneyi

Taze UHPC malzemesinin işlenebilirliğini belirlemek amacıyla yapılan çökme-yayılma deneyi, malzemenin doldurma yeteneğini belirlemektedir [113]. Çökme-yayılma deneyi, TS EN 1015-3 [114], ASTM C230 [115] ve EFNARC’da [112] belirtilen yayılma tablası deney aleti kullanılarak yapılmıştır. Herhangi bir sarsma veya tokmakla sıkıştırma yapmadan mini çökme konisinin malzeme ile doldurulmasından sonra koninin kaldırılmasıyla malzemenin çökme-yayılma çapı, birbirine dik noktalardan ölçülen iki mesafenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. EFNARC [112] yönetmeliğinde kendiliğinden yerleşen harç fazı için hedef çökme-yayılma 25 ± 1 cm

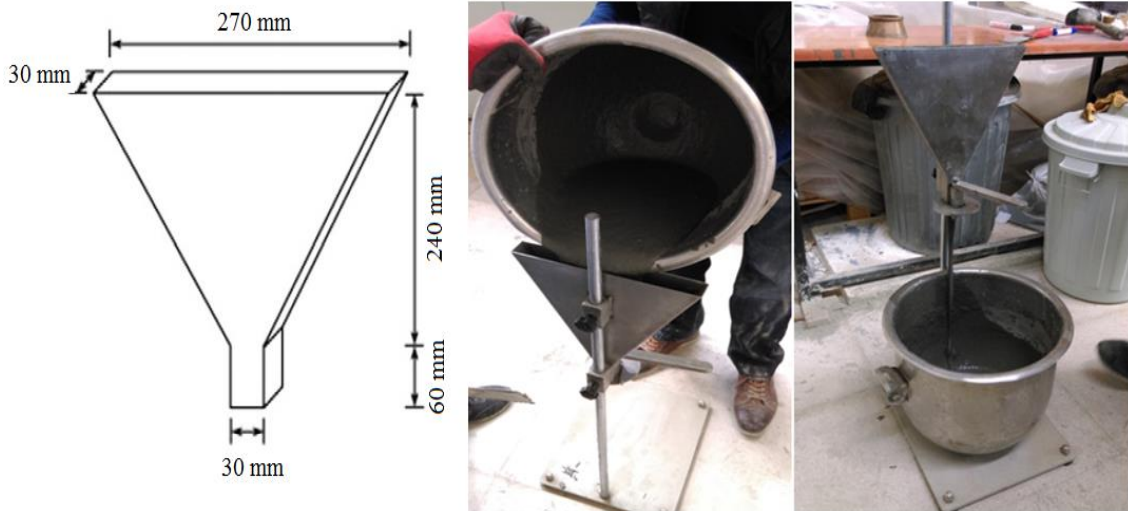
olarak belirlenmiştir. Şekil 3.8’de çökme-yayılma deney aparatı ve çökme-yayılma çapı ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Çökme-yayılma deney aparatı ve çökme-yayılma çapı ölçümü

3.5.2 V-hunisi Akış Deneyi

Taze UHPC malzemesinin işlenebilirliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan V-hunisi akış deneyi, malzemenin kesit değişikliği engeline karşı boşluklardan geçebilme yeteneğini belirlemektedir [113]. V-hunisi akış süresinin belirlenmesinde EFNARC’da [112] belirtilen deney aparatı kullanılmıştır. EFNARC [112] yönetmeliğinde kendiliğinden yerleşen harç fazı için hedef V-hunisi akış süresi 9 ± 2 sn olarak belirlenmiştir. V-hunisi akış süresi, Şekil 3.9’da gösterilen huninin herhangi bir sarsma veya tokmakla sıkıştırma yapmadan doldurulmasından sonra alt kısmında bulunan kapağın açılmasıyla başlatılan süre, kapaktan ışık görüldüğü anda durdurulmasıyla ölçülen süre olarak belirlenir.



Şekil 3.9 V-hunisi deney aparatı ve V hunisi akış süresi ölçümü

3.6 Sertleşmiş UHPC Özellikleri

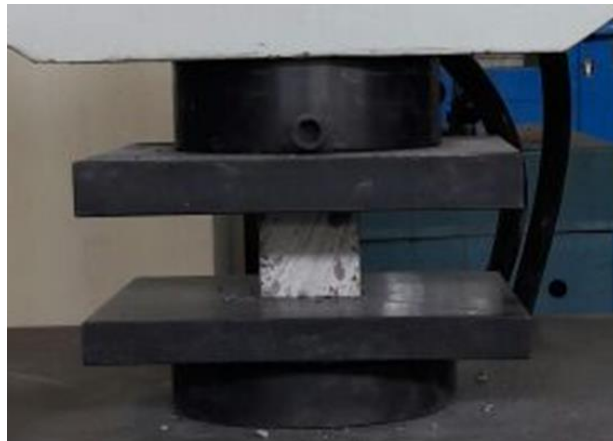
UHPC üretiminde kullanılan farklı karışım parametrelerinin mekanik özellikler açısından etkisini incelemek için, buhar kürü ve su kürü uygulanmış UHPC numunelerinde birim ağırlık, tek eksenli basınç dayanımı deneyi, dört noktalı eğilme deneyi, kırılma enerjisi ve direkt çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.6.1 Birim Ağırlık Deneyi

UHPC malzemesinin birim ağırlığının belirlenmesi amacı ile hazırlanan 100 mm boyutlu küp numuneler üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kürü uygulandıktan sonra 7. günde ASTM C 642’ye [116] uygun olarak 105±5 °C’de etüv kurusu haline getirilen numunelerde birim ağırlık deneyi gerçekleştirilmiştir.

3.6.2 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

UHPC malzemesinin basınç dayanımının belirlenmesi amacı ile hazırlanan 50 mm boyutlu küp numuneler üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kürü uygulanan serilerde 7. günde ve 20±2 °C su içerisinde kür uygulanan serilerde 1., 3., 7., 14., 28., 56. ve 90. günlerde ASTM C109/109M’ye [117] uygun olarak tek eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Basınç deneylerinde 600 kN kapasiteli, 1 N hassasiyete sahip ALŞA marka basınç makinesi ile 4 mm/dk yükleme hızı uygulanmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 UHPC malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı deneyi

Her bir UHPC serisine ait 3 numunede gerçekleştirilen basınç deneyi sonrasında, tek eksenli basınç dayanımı (f_c) aşağıda verilen (3.1) denklemine göre hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{P_{\max}}{A} \quad (MPa) \quad (3.1)$$

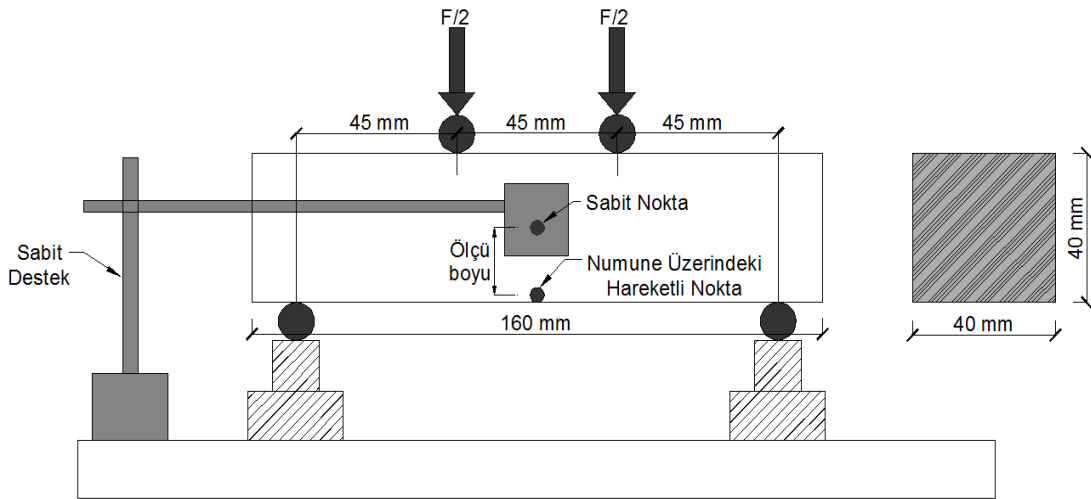
Denklemden yer alan değişkenlerden:

$P_{\max}$: Basınç deneyi sonunda ulaşılan maksimum yükü (N),

A: Yük uygulanan kesitin alanını ($50 \times 50 \text{ mm}^2$) göstermektedir.

3.6.3 Dört Noktalı Eğilme Deneyi

UHPC malzemesinin eğilme dayanımının belirlenmesi amacı ile hazırlanan $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlu prizma numuneler üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 90°C 'de 48 saat boyunca buhar kürü uygulanan serilerde 7. günde ve $20 \pm 2^\circ \text{C}$ su içerisinde kür uygulanan serilerde 1., 3., 7., 14., 28., 56. ve 90. günlerde ASTM C1609/C1609M'ye [56] uygun olarak hazırlanan ve Şekil 3.11'de şematik olarak gösterilen deney düzeneği ile mesnet açıklığı 135 mm olarak dört noktalı eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneyleri, 100 kN kapasiteli, 0,001 N hassasiyete sahip servo hidrolik INSTRON marka test cihazı ile 0,1 mm/dk yükleme hızı uygulanmıştır.



Şekil 3.11 Dört noktalı eğilme deney düzeneği şematik gösterimi

Her bir UHPC serisine ait 3 numunede gerçekleştirilen dört noktalı eğilme deneyi sonrasında, eğilme dayanımı (f_e) aşağıda verilen (3.2) denklemine göre hesaplanmıştır.

$$f_e = \frac{P_{\max} l}{bd^2} \quad (MPa) \quad (3.2)$$

Denkleimde yer alan değişkenlerden:

P_{max} : Eğilme deneyi sonunda ulaşılan maksimum yükü (N),

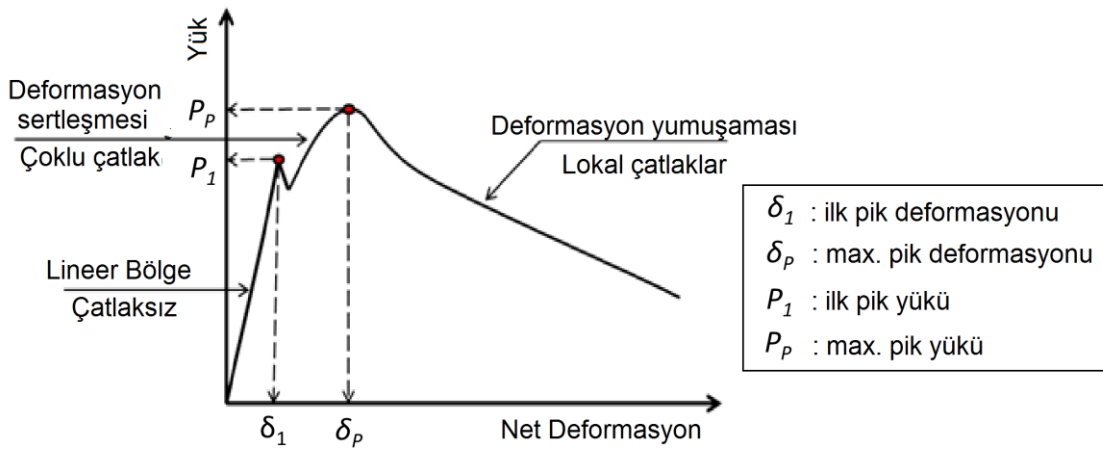
l : Mesnetler arasındaki mesafeyi (135 mm),

b : Enkesit genişliğini (40 mm),

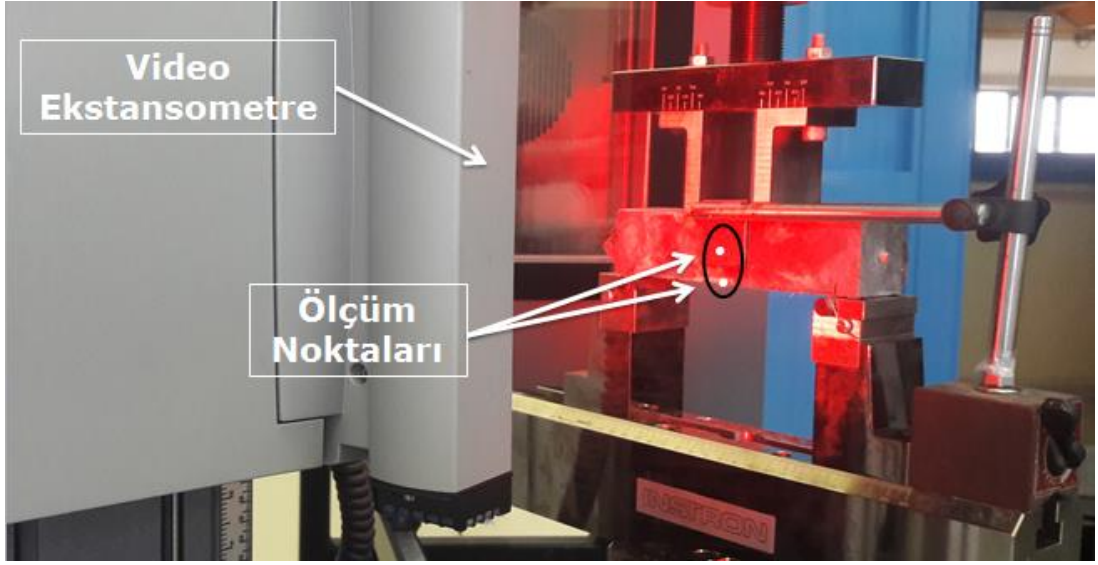
d : Enkesit yüksekliğini (40 mm) göstermektedir.

3.6.4 Kırılma Tokluğu

UHPC malzemesinin en önemli özelliklerinden birisi olan kırılma tokluğu, ASTM C1609 [56] standardında lifli kompozitler için verilen Şekil 3.12’de gösterilen tipik yük-deformasyon eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla belirlenmektedir. Dört noktalı eğilme deneyinde video ekstansometre kullanılarak net deformasyonlar okunmuş ve yük-deformasyon eğrileri tüm UHPC serileri için belirlenmiştir. Net deformasyon, numunenin eğilme gerilmesi altındaki hareketini tespit etmek için numunenin ortasına işaretlenen nokta ve deney düzeneğinde bulunan sabit noktanın video ekstansometreye tanıtılmasıyla hesaplanmıştır. UHPC numunelerin tokluğu, 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kürü uygulanan serilerde ve 20±2 °C su içerisinde 28 ve 90 gün kür uygulanan serilerde yapılan dört noktalı eğilme deneyinden elde edilen sonuçlarla hesaplanmış ve deney düzeneği Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



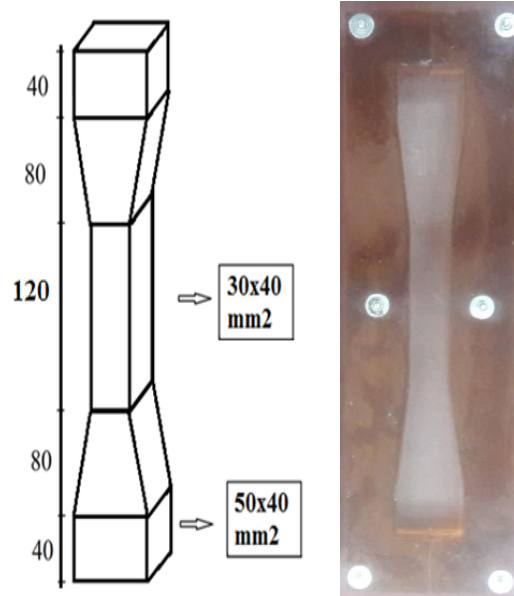
Şekil 3.12 ASTM C1609’da verilen tipik yük – net deformasyon eğrisi [56]



Şekil 3.13 Kırılma tokluğunun hesaplanması için kullanılan deney düzeneği

3.6.5 Direkt Çekme Deneyi

UHPC malzemesinin çekme dayanımının belirlenmesi amacıyla hazırlanan boyutları Şekil 3.14'te gösterilen kemik şeklinde üretilen numuneler üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 90 °C'de 48 saat boyunca buhar kürü uygulanan serilerde 7. günde ve 20±2 °C su içerisinde 90 gün kür uygulanan 27 farklı UHPC serilerinde Şekil 3.15'te şematik olarak gösterilen deney düzeneği ile direkt çekme deneyi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14 Direkt çekme deneyi numune boyutu ve kullanılan kalıplar

Direkt çekme deneyleri, 100 kN kapasiteli, 0,001 N hassasiyete sahip servo hidrolik INSTRON marka test cihazı ile 0,05 mm/dk yükleme hızı uygulanmıştır. Direkt çekme

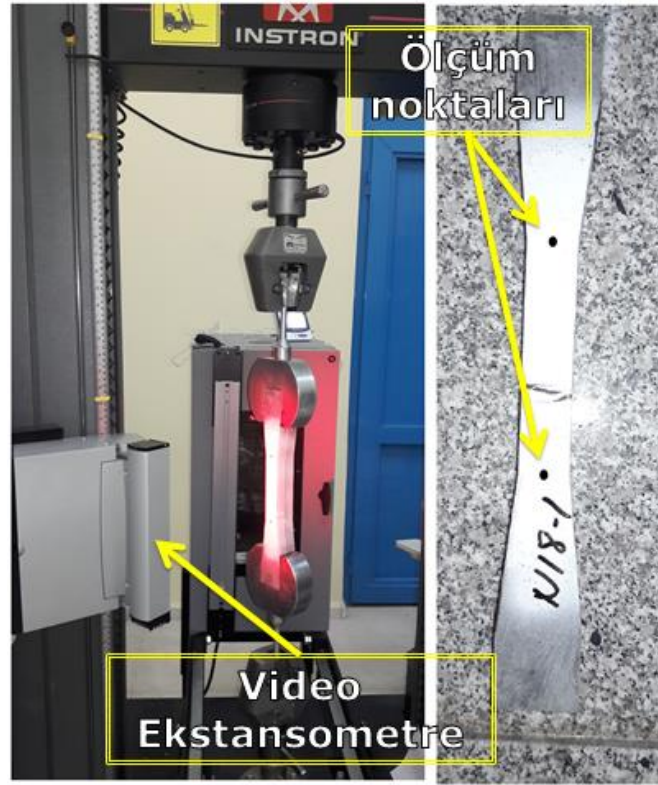
gerilmesi–şekil değiştirme davranışının belirlenmesi için numunenin kesit alanı değişmeyen orta kısmına konulan iki noktanın video ekstansometreye tanıtılmasıyla çekme gerilmesi altında deformasyon değerleri hesaplanmıştır. Direkt çekme deney düzeneği ve deney sonrası kırılan UHPC numunesi Şekil 12’de gösterilmiştir. Her bir UHPC serisine ait 3 numunede gerçekleştirilen direkt çekme deneyi sonrasında, çekme dayanımı (f_t) aşağıda verilen (3.3) denkleminde göre hesaplanmıştır.

$$f_t = \frac{P_{\max}}{A} \quad (MPa) \quad (3.3)$$

Denkleminde yer alan değişkenlerden:

$P_{\max}$: Direkt çekme deneyi sonunda ulaşılan maksimum yükü (N),

A: Kırılmanın meydana geldiği kesit alanını ($30 \times 40 \text{ mm}^2$) göstermektedir.



Şekil 3.15 Direkt çekme deney düzeneği ve deney sonrası kırılan UHPC numunesi

3.7 Radyasyon Zırlama Özellikleri

Ultra yüksek performanslı çimento esaslı ağır kompozitin (UHPC) X-ışını ve gama radyasyon zırlama özelliklerinin araştırılması amacıyla yapılan deneysel çalışma kapsamında 3 farklı agrega iskeleti, 3 farklı su/bağlayıcı oranı ve 3 farklı çelik lif içeriği olmak üzere toplam 27 farklı UHPC serisi üretilmiştir. Numuneler kalıptan çıkarıldıktan

sonra, 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kürü ve 20±2 °C su kürü uygulaması olmak üzere 2 farklı işlem uygulanmıştır. Malzeme ve kür tipi parametrelerinin tümü düşünüldüğünde radyasyon zırlama özelliklerine UHPC tasarımlarının etkisinin değerlendirilebileceği toplam 54 farklı seri oluşmaktadır. Tüm UHPC serilerinde radyasyon zırlama özelliklerinin belirlenmesi zaman, maliyet ve sonuçların değerlendirilmesinde yaşanacak karışıklık gibi olumsuzluklara neden olacağı düşünülmüştür. Bu nedenle, tüm parametrelerin, UHPC malzemesinin radyasyon zırlama özelliklerine etkisini inceleyebilecek şekilde seçilen 15 seride radyasyon geçirgenlik deneyi yapılmıştır. Radyasyon geçirgenlik deneyinin yapılacağı seriler ve deney kapsamı Çizelge 3.7’de verilmiştir. Ayrıca, UHPC malzemesinin radyasyon zırlama özelliklerinin barit agregalı geleneksel ağır betonun radyasyon zırlama özellikleri ile karşılaştırılması amacıyla aynı deney düzenekleri kullanılarak başka laboratuvarlardan temin edilen ve basınç dayanım sınıfı C30/37 olan geleneksel ağır beton numunesinde radyasyon geçirgenlik deneyi yapılmıştır.

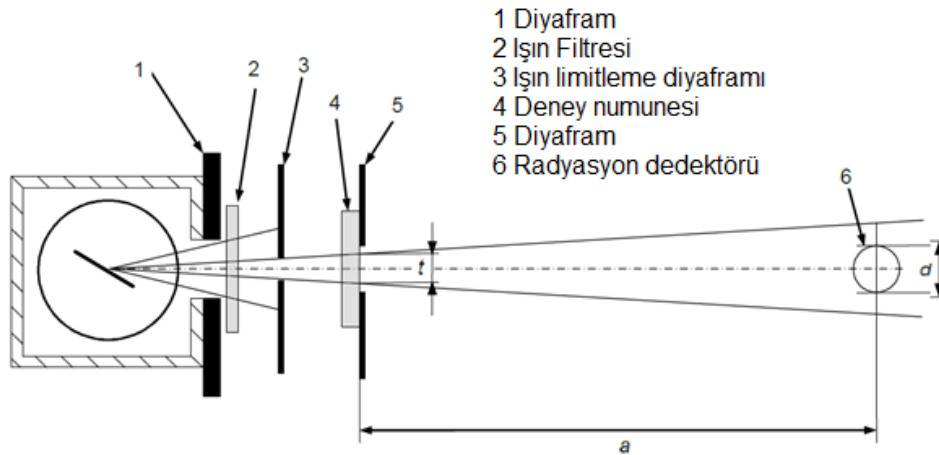
Çizelge 3.7 Radyasyon geçirgenlik deney programının kapsamı

Kod	s/b oranı (%)	Çelik lif oranı (%)	Agrega tipinin etkisi	s/b oranının etkisi	Çelik lif oranının etkisi	Kür tipinin etkisi
REF-18-2	18	2	x	x	-	-
REF-24-2	24		x	x	-	-
REF-36-2	36		x	x	-	-
GAD-18-1	18	1	-	-	x	-
GAD-18-2	18	2	x	x	x	x
GAD-18-3	18	3	-	-	x	-
GAD-24-2	24	2	x	x	-	x
GAD-36-2	36	2	x	x	-	x
GAD-36-3	36	3	-	x	-	-
BAR-18-2	18	2	x	x	-	-
BAR-24-2	24		x	x	-	-
BAR-36-2	36		x	x	-	-

UHPC malzemesinin X-ışını ve gama radyasyon zırlama özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesinden sonra, yukarıda verilen seriler için radyasyon zırlama özellikleri Amerika Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü (NIST)’nün Berger ve Hubbel’e [118] hazırlattığı XCOM adlı web bilgisayar programı yardımıyla teorik olarak hesaplanmıştır.

3.7.1 Deneysel Hesaplanan Radyasyon Zırhlama Özellikleri

UHPC malzemesinin radyasyon zırhlama özellikleri TS EN 61331-1'e [119] göre, dar demet geometrisi koşulu ile Türkiye Atom Enerji Kurumuna (TAEK) bağlı olan Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM) radyasyon geçirgenlik test laboratuvarında şematik olarak Şekil 3.16'da gösterildiği gibi hazırlanan deney düzeneği ile belirlenmiştir. Radyasyon geçirgenlik test laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerde, tüm deney parametrelerinin etkisini inceleyebilecek şekilde seçilen 15 farklı UHPC numunesi üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 90 °C'de 48 saat boyunca buhar kürü uygulanan serilerde 7. günde ve 20 ± 2 °C su içerisinde kür uygulanan serilerde 90. günde belirlenmiştir. Ayrıca, başka laboratuvardan temin edilen ve basınç dayanım sınıfı C30/37 olan geleneksel ağır beton numunesinde radyasyon zırhlama özellikleri belirlenmiştir. Deneysel olarak radyasyon zırhlama özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ÇNAEM radyasyon geçirgenlik test laboratuvarında hazırlanan deney düzeneğinde, 0,200 MeV enerjili X-ışını kaynağı ile 0,662 MeV enerjili sezyum (^{137}Cs) ve 1,250 MeV enerjili kobalt (^{60}Co) radyoizotopları olmak üzere 3 farklı enerji kaynağı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan sezyum (^{137}Cs) ve kobalt (^{60}Co) radyoizotopların özellikleri [81] Çizelge 3.8'de verilmiştir. Radyasyon doz ölçümlerinde, X-ışını ve sezyum (^{137}Cs) radyoaktif kaynağı için PTW marka TM 32005 [120] modelindeki 28 cm^3 küresel iyon odası ile kobalt (^{60}Co) radyoaktif kaynağı için PTW marka TM 30001 Farmer modeli [120] $0,6 \text{ cm}^3$ küresel iyon odası kullanılmıştır. Radyasyon geçirgenlik ölçümü için hazırlanan X-ray dozimetre cihazı ve gama ışını ölçüm cihazı düzeneği Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.16 Dar demet geometrisi koşulu ile hazırlanan radyasyon geçirgenlik deney düzeneğinin şematik gösterimi [119]

Çizelge 3.8 Deneyisel çalışmada kullanılan radyoizotopların özellikleri [81]

Radyoizotop	Yarı ömür	Enerji (MeV)	Kurşun yarı değer kalınlığı (cm)	Gama sabiti (γ), mSv.m ² /GBq
Kobalt (⁶⁰ Co)	5,3 yıl	1,250	1,1	0.351
Sezyum (¹³⁷ Cs)	30 yıl	0,662	0,6	0.081



Şekil 3.17 Radyasyon geçirgenlik ölçümü deney düzeneği: X-ışını dozimetre cihazı (solda) ve gama ışını ölçüm cihazı (sağda)

3.7.1.1 Lineer Zayıflatma Katsayısının Belirlenmesi

Radyasyon zırhlama özelliklerinin belirlenmesi için üretilen UHPC serilerinde ve barit agregalı geleneksel ağır beton numunesinde radyasyon geçirgenlik ölçümü deneyi 100 mm boyutlu küp numunelerde yapılmıştır. Her bir küp numune, yaklaşık 6~7 mm kalınlıkta kesilerek 9 adet plaka elde edilmiştir. Radyasyon detektörü ile radyasyon kaynağı arasına plaka konulmadan detektör ile kaynaktan gelen şiddet (I_0) ölçülmüştür. Daha sonra detektör ile radyasyon kaynağı arasına plaka konulduktan sonra dedektör ile kaynaktan gelen şiddet (I) okunmuştur. Bu okumalar ilave edilen her bir plaka için tekrarlanmıştır. Tek plaka kullanılarak fotonun malzeme içerisinde zayıflamasıyla hesaplanan lineer zayıflatma katsayısı Denklem 3.4 ile hesaplanmaktadır [79].

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (3.4)$$

Denklemden yer alan değişkenlerden:

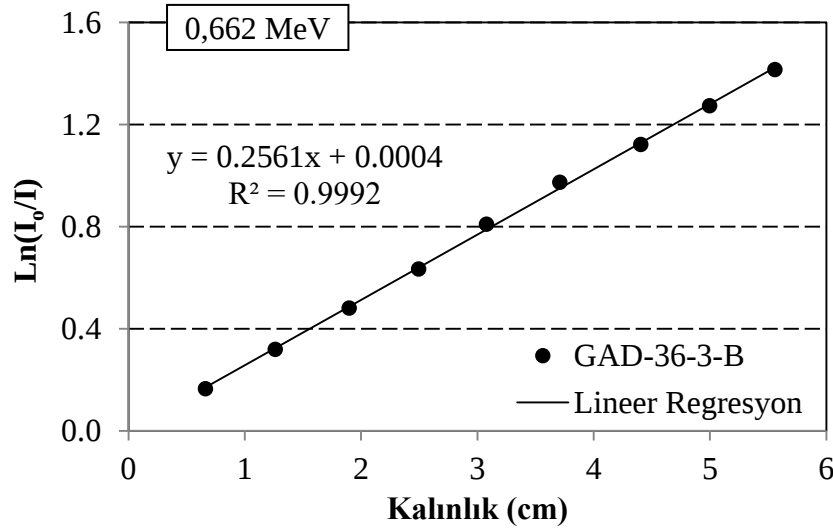
I : Etkileşim sonrası foton şiddetini,

I_0 : Başlangıçtaki foton şiddetini,

μ : Malzemenin lineer zayıflatma katsayısını,

x : Malzeme kalınlığını göstermektedir.

Ancak 9 adet plaka kullanılarak ölçülen tüm değerlerin hesaplamalara katılması için Şekil 3.18’de gösterildiği gibi dikey ekseninde “ $\ln(I_0/I)$ ” ve yatay ekseninde “kalınlık (cm)” olacak şekilde grafik hazırlanmıştır. Her bir seri ve her bir enerji değeri için hazırlanan bu grafikte doğrusal regresyon analizi yapılmasıyla elde edilen doğrunun eğiminden lineer zayıflatma katsayısını hesaplanmıştır.



Şekil 3.18 Doğrusal regresyon analizi ile lineer zayıflatma katsayısının belirlenmesi

3.7.1.2 Kütle Zayıflatma Katsayısının Belirlenmesi

Fotonların soğurulmasında, zırlama malzemesinin kalınlığının yanı sıra yoğunluğunun da kullanılmasıyla kütle zayıflatma katsayısı belirlenmektedir. Kütle zayıflatma katsayısı (μ_m , cm^2/g) Denklem 3.5’te gösterildiği gibi malzemenin lineer zayıflatma katsayısının (μ) yoğunluğuna (ρ) oranlanmasıyla hesaplanan karışım parametresidir [79].

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{cm}^2/\text{g}) \quad (3.5)$$

Denkleimde yer alan değişkenlerden:

μ_m : Kütle zayıflatma katsayısını,

μ : Lineer zayıflatma katsayısını,

ρ : Malzemenin yoğunluğunu göstermektedir.

3.7.1.3 Yarı Değer ve Onda-Bir Değer Kalınlıklarının Belirlenmesi

Yarı değer kalınlığı (YDK), gelen foton ışın şiddetini (I_0), yarıya düşürebilmek için gereken malzeme kalınlığıdır. Onda-bir değer kalınlığı (ODK) ise gelen foton ışın şiddetini (I_0), onda birine düşürebilmek için gereken malzeme kalınlığıdır. Yarı değer ve onda-bir değer kalınlıkları sırasıyla denklem 3.6 ve 3.7’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$YDK = \frac{\ln 2}{\mu} \text{ (cm)} \quad (3.6)$$

$$ODK = \frac{\ln 10}{\mu} \text{ (cm)} \quad (3.7)$$

Denkleimde yer alan değişkenlerden:

μ : Lineer zayıflatma katsayısını göstermektedir.

3.7.2 Teorik Hesaplanan Radyasyon Zırhlama Özellikleri

UHPC serilerinde ve barit agregalı geleneksel ağır beton numunesinde radyasyon zırhlama özelliklerinin teorik olarak belirlenmesi amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan XCOM adlı web bilgisayar programı kullanılmıştır. XCOM adlı web bilgisayar programı ile radyasyon zırhlama özelliklerinin teorik olarak belirlenmesinde, karışımların oksit cinsinden element bileşenleri ve bunların ağırlıkça yüzdeleri kullanılmaktadır. Karışımların kimyasal kompozisyonlarının belirlenmesi için X-Işını Floresan Spektrometresi (XRF) analizi yapılmıştır.

3.7.2.1 XCOM Programı ile Zırhlama Özelliklerinin Belirlenmesi

Radyasyon zırhlama özelliklerinin teorik olarak belirlenmesi amacıyla Amerika Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü’nün (NIST) [112] Berger ve Hubbel’e [109] hazırlattığı XCOM bilgisayar programı, 1 keV’den 100 GeV’e kadar olan enerji değerlerinde kimyasal bileşiklerin ya da elementlerin oluşturduğu karışımların (beton, alaşım vb.

gibi) kütle azaltma katsayılarını hesaplamaktadır. Bu hesaplamalar fotonun (X-ışını ve gama radyasyonu) madde ile etkileşiminde meydana gelen fotoelektrik etki, Compton Saçılmaları, çift oluşumu olayları için ayrı ayrı yapılmaktadır. XCOM bilgisayar programı her bir madde etkileşim olayındaki zayıflatma katsayısını hesaplayabildiği gibi toplam zayıflatma katsayılarını da hesaplayan bir bilgisayar kodudur. XCOM doğrudan lineer zayıflatma katsayısını hesaplamaz, fakat toplam kütleli zayıflatma katsayısını (μ_m) hesaplayabilmektedir. Programın giriş sayfasında incelemek istenilen malzemenin seçimi yapılır. Element, bileşik veya karışım olmak üzere üç seçenek mevcuttur (Şekil 3.19). Bu deneyde kullanılan malzemeler karışım sınıfına girmektedir.

Identify material by:

- ☐ Element
- ☐ Compound
- ☒ Mixture

Method of entering additional energies: (optional)

- ☒ Enter additional energies by hand
- ☐ Additional energies from file (*Note: Your browser must be file-upload compatible*)

Şekil 3.19 XCOM programının giriş sayfası

İlgili seçim yapıldıktan sonra çıkan ekranda, teorik kütle azaltma katsayılarını XCOM programında hesaplaması amacıyla XRF analiz sonucunda belirlenen numunelerin oksit cinsinden element bileşenleri ve bunların ağırlıkça yüzde değerleri programa girilmiştir (Şekil 3.20). Ayrıca sonucu talep edilen özel enerjiler varsa bu ekrandan elle girilmesiyle, bu enerji değerlerindeki sonuçlar tablo olarak alınmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan 0,200 MeV, 0.662 MeV ve 1.250 MeV enerjileri bu alana girilerek sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 3.21).

Girilen bu veriler sonucunda program 1 keV'den 1000 MeV'e kadar olan tüm enerjiler için 15 farklı UHPC serisinde ve barit agregalı geleneksel ağır betondan kütle azaltma katsayıları teorik olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.22). Teorik olarak lineer zayıflatma katsayısı, XCOM bilgisayar programı ile bulunan teorik kütle azaltma katsayılarının her bir malzemenin birim ağırlık değerleri ile çarpılmasıyla elde edilmiştir.

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.

SO3	0.2329
Sr	0.00889
Zn	0.0001
H2O	0.0212

Optional output title: BAR-36-2-B

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.

0.200
0.662
1.250

☒ Include the standard grid

Energy Range:

Minimum: 0.001 MeV

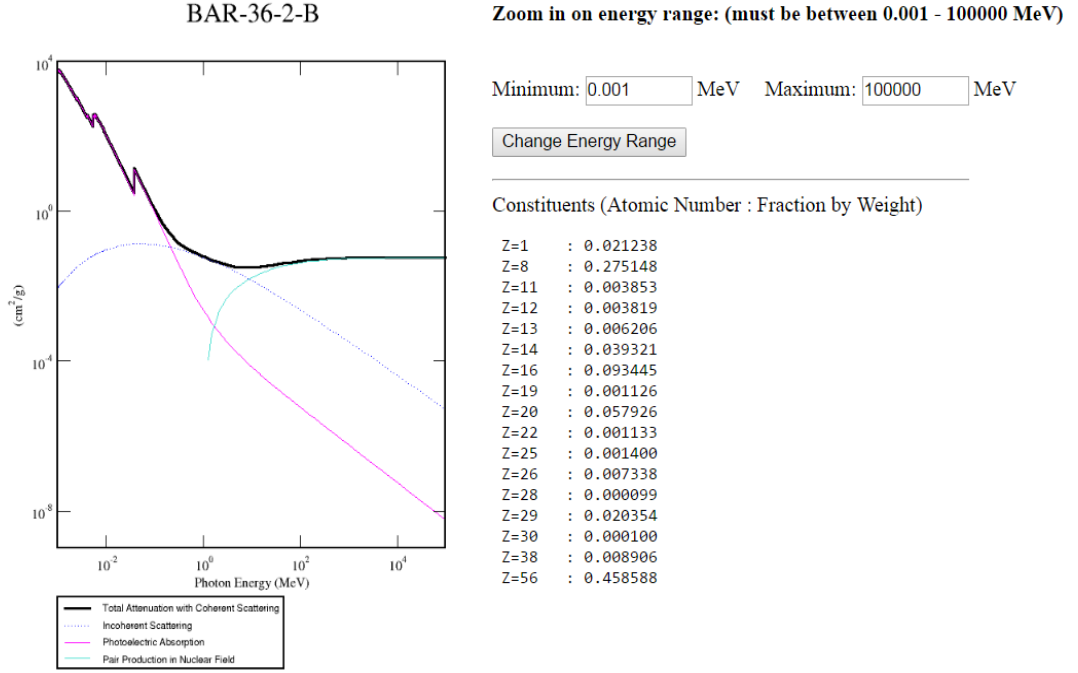
Maximum: 100000 MeV

Submit Information
Reset

Şekil 3.20 XCOM programının veri giriş sayfası

Download data		Reset						
Edge	(required) Photon Energy	Scattering		Photoelectric Absorption	Pair Production		Total Attenuation	
		Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
	MeV	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g
	1.000E-03	5.145E+00	9.384E-03	6.096E+03	0.000E+00	0.000E+00	6.101E+03	6.096E+03
	1.004E-03	5.143E+00	9.441E-03	6.038E+03	0.000E+00	0.000E+00	6.043E+03	6.038E+03
	1.008E-03	5.140E+00	9.499E-03	5.980E+03	0.000E+00	0.000E+00	5.985E+03	5.980E+03
28 L ₁	1.008E-03	5.140E+00	9.499E-03	5.980E+03	0.000E+00	0.000E+00	5.985E+03	5.980E+03
	1.500E-01	2.908E-02	1.197E-01	2.942E-01	0.000E+00	0.000E+00	4.430E-01	4.139E-01
	2.000E-01	1.717E-02	1.110E-01	1.300E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.581E-01	2.410E-01
	3.000E-01	8.005E-03	9.766E-02	4.194E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.476E-01	1.396E-01
	4.000E-01	4.607E-03	8.797E-02	1.941E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.120E-01	1.074E-01
	5.000E-01	2.987E-03	8.058E-02	1.097E-02	0.000E+00	0.000E+00	9.454E-02	9.155E-02
	6.000E-01	2.093E-03	7.468E-02	7.041E-03	0.000E+00	0.000E+00	8.381E-02	8.172E-02
	6.620E-01	1.727E-03	7.155E-02	5.592E-03	0.000E+00	0.000E+00	7.887E-02	7.714E-02
	8.000E-01	1.190E-03	6.573E-02	3.654E-03	0.000E+00	0.000E+00	7.057E-02	6.938E-02
	1.000E+00	7.655E-04	5.917E-02	2.283E-03	0.000E+00	0.000E+00	6.222E-02	6.145E-02
	1.022E+00	7.334E-04	5.853E-02	2.184E-03	0.000E+00	0.000E+00	6.145E-02	6.072E-02
	1.250E+00	4.920E-04	5.295E-02	1.473E-03	1.102E-04	0.000E+00	5.502E-02	5.453E-02
	1.500E+00	3.424E-04	4.813E-02	1.054E-03	5.216E-04	0.000E+00	5.005E-02	4.971E-02
	2.000E+00	1.930E-04	4.110E-02	6.409E-04	1.789E-03	0.000E+00	4.372E-02	4.353E-02
	2.044E+00	1.848E-04	4.058E-02	6.184E-04	1.913E-03	0.000E+00	4.330E-02	4.312E-02
	3.000E+00	8.593E-05	3.234E-02	3.396E-04	4.573E-03	1.131E-05	3.735E-02	3.726E-02

Şekil 3.21 XCOM programının sonuç sayfası



Şekil 3.22 1 keV’den 1000 MeV’e kadar olan tüm enerjiler için teorik hesaplanan kütle azaltma katsayıları

3.7.2.2 XRF Analizi ile Kimyasal Kompozisyonun Belirlenmesi

Radyasyon geçirgenlik tayini deneyi yapılan 15 farklı UHPC ve barit agregalı geleneksel ağır beton numunelerinde kantitatif olarak kimyasal kompozisyonun belirlenmesi için İTÜ Maden Fakültesi Jeokimya Laboratuvarında bulunan Bruker marka S8 Tiger model dalga boyu dağılımlı X-Işını Floresan Spektrometresi (XRF) kullanılmıştır. Hassas bir ölçüm almak için numunenin %80’i 45 mikron altına geçecek şekilde bağlayıcı katkı maddesi ile öğütüldükten sonra basınçla sıkıştırılarak elde edilen peletlerin pürüzsüz yüzeylerinden okuma yapılmıştır. XRF analiz sonuçları, numunelerin oksit cinsinden element bileşenleri ve bunların ağırlıkça yüzdesi şeklinde Çizelge 3.9’da verilmiştir. Bu sonuçlar XCOM programında kullanılarak her bir serinin teorik olarak kütle zayıflatma katsayılarının hesaplaması yapılmıştır.

Çizelge 3.9 Karışımların oksit cinsiden kimyasal bileşenleri

Bileşen (%)	REF 18-2-B	REF 24-2-B	REF 36-2-B	GAD 18-1-B	GAD 18-2-B	GAD 18-3-B	GAD 18-2-S	GAD 24-2-B	GAD 24-2-S	GAD 36-2-B	GAD 36-2-S	BAR 18-2-B	BAR 24-2-B	BAR 36-2-B	Ağır Beton
SiO ₂	60,9	67,6	74,5	24,3	23,6	24,1	23,8	18,8	18,7	12,9	13,9	17,0	12,3	8,4	5,6
Al ₂ O ₃	4,6	4,6	4,3	3,7	3,9	3,8	3,8	3,1	3,1	2,2	2,4	2,4	1,8	1,2	1,2
Fe ₂ O ₃	2,1	1,3	1,0	47,7	48,7	46,3	48,2	58,9	59,6	72,1	69,6	1,5	1,3	1,0	0,8
MgO	1,2	1,0	0,8	1,4	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2	0,8	0,9	1,0	0,9	0,6	0,7
CaO	19,3	16,4	11,3	15,4	14,8	16,8	15,4	12,0	11,7	7,5	8,3	15,7	11,6	8,1	12,4
Na ₂ O	0,4	0,5	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,4	0,5	0,5	0,4
K ₂ O	0,9	1,1	1,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2
TiO ₂	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1
MnO	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2
Cr ₂ O ₃	0,4	-	-	0,5	0,3	-	-	0,5	0,1	-	-	-	-	-	-
BaSO ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54,7	64,8	74,4	69,0
SO ₃	1,3	1,1	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,5	0,5	-	-	-	-
Sr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6	0,8	0,9	0,9
Kızdırma Kaybı	7,6	5,4	4,9	4,0	4,3	4,5	4,4	2,8	3,1	2,1	2,4	5,3	5,2	4,1	8,3

BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ

UHPC malzemesinin taze haldeki reolojik ve sertleşmiş haldeki fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama özelliklerinin belirlenmesi amacı ile üretilen 3 farklı agrega tipi (REF, BAR ve GAD), 3 farklı su/bağlayıcı oranı (0,18, 0,24 ve 0,36) ve 3 farklı lif içeriğine (%1, %2 ve %3) sahip olan serilerde, Bölüm 3'te detaylı olarak açıklanan deneysel çalışmalar yapılmış ve elde edilen sonuçların irdelemesi yapılmıştır.

4.1 Taze UHPC Özellikleri

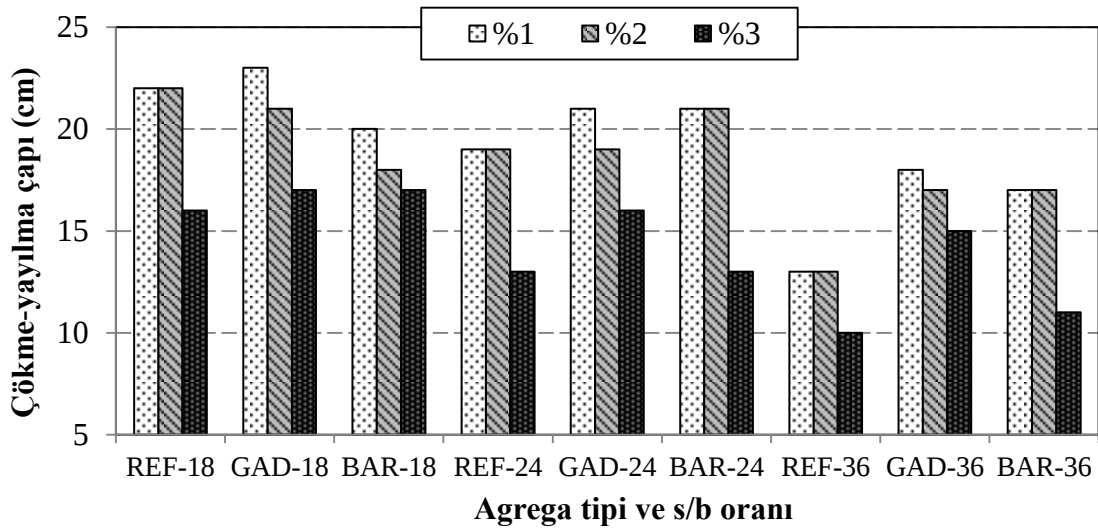
Taze haldeki UHPC malzemesinin işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile farklı karışım parametreleri ile üretilen toplam 27 farklı UHPC serisinde, çökme-yayılma ve V-hunisi akış deneyleri ile ölçümler yapılmıştır. Deneylere ait sonuçlar Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Çizelge Ek A'da verilmiştir.

4.1.1 Çökme-Yayılma Deneyi

Taze UHPC malzemesinin doldurma yeteneğini belirlenmesi amacıyla yapılan çökme-yayılma deneyi TS EN 1015-3 [114], ASTM C230 [115] ve EFNARC'da [112] belirtilen yayılma tablası deney aleti kullanılarak yapılmıştır. Taze UHPC serilerinin çökme-yayılma çapı, agrega tipinden, s/b oranından ve çelik lif içeriğinden etkilenmiştir. Şekil 4.1'de verilen deney sonuçlarına göre 0,18, 0,24 ve 0,36 s/b oranı ile üretilen serilerin çökme-yayılma çapı sırasıyla 16-23 cm, 13-21 cm ve 10-18 cm olarak belirlenmiştir. Karışımlarda toplam su miktarının sabit tutulması nedeniyle, s/b oranının artmasıyla bağlayıcı miktarı azalmıştır. Bağlayıcı miktarının azalmasıyla karışımdaki agrega hacmi artmıştır. Böylece UHPC malzemesinin içyapı özelliği bakımından yoğun tane dizilimi nedeniyle sahip olduğu kohezif ve viskoz yapısı azalmıştır. Bağlayıcı miktarının azalması özellikle normal agregalı REF serilerinin kohezyonunu ve birim

ağırlığının azalmasına neden olmuş ve böylece çökme-yayılma çapı önemli derecede azalmıştır. Ancak bağlayıcı miktarının azalmasıyla karışımdaki agrega hacminin artması ağır agregalı GAD ve BAR serilerinde birim ağırlığı arttırmıştır. Bu nedenle ağır agregalı serilerin çökme-yayılma çapı, REF serilerine göre daha fazla olmuştur. Yapay agrega olarak kullanılan granüle demir atık tozunun su emmesi, silis kumu-kuvars tozu ve barit agregası gibi doğal agrega olan malzemelere göre daha az olduğundan, granüle atık demir tozu kullanılan GAD serilerinde işlenebilirlik özelliğinin daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca Şekil 3.2’de SEM analizinde görüldüğü gibi granüle atık demir tozunun yuvarlak tane şekli işlenebilirlik özelliğini arttırmıştır.

Benzer çalışmalarda görüldüğü gibi [121] karışımlarda farklı oranlarda kullanılan çelik lif oranının artması da çökme-yayılma çapını azaltmıştır. Karışımların çelik lif içeriğinin %1’den %3’e artmasıyla UHPC serilerinin çökme-yayılma çapında ortalama %26 gibi azalma meydana gelmiştir. Çökme-yayılma deney sonuçlarına göre en iyi performansı, granüle demir atık tozu kullanılan GAD-18-1 serisi göstermiştir.



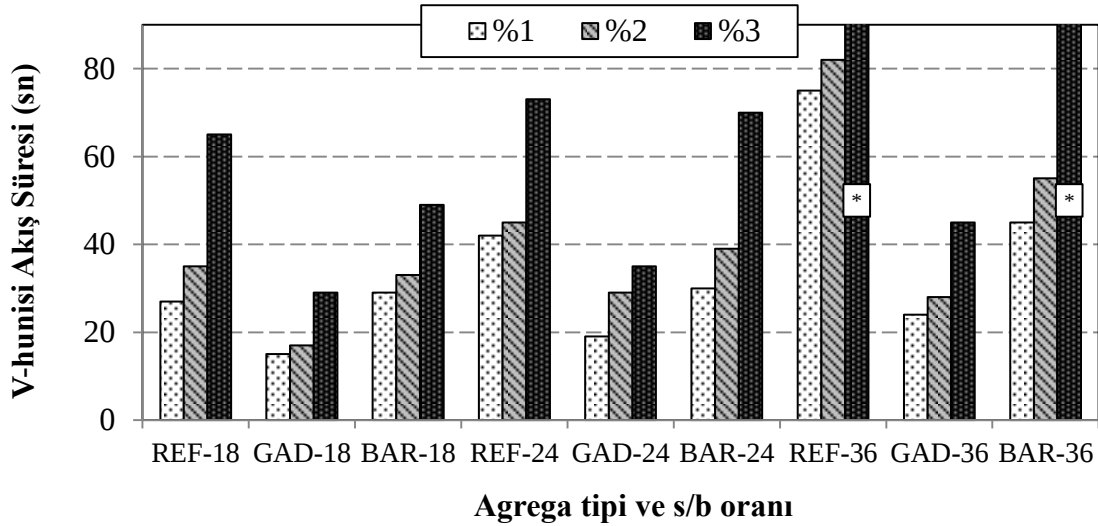
Şekil 4.1 Çökme-yayılma deneyi sonuçları

4.1.2 V-hunisi Akış Deneyi

Taze UHPC malzemesinin, malzemenin kesit değişikliği engeline karşı boşluklardan geçebilme yeteneğinin belirlenmesi amacıyla yapılan V-hunisi akış deneyi, EFNARC’da [112] boyutları ve özellikleri belirtilen deney aleti kullanılarak yapılmıştır. V-hunisi akış süresi ne kadar az olursa, taze haldeki karışımın kesit değişikliği engeline karşı boşluklardan geçebilme yeteneğinin iyi olduğu anlamına gelmektedir. Taze UHPC

serilerinin V-hunisi akış süresi, agrega tipinden, s/b oranından ve çelik lif içeriğinden etkilenmiştir.

Şekil 4.2’de verilen deney sonuçlarına göre 0,18, 0,24 ve 0,36 s/b oranı ile üretilen serilerin V-hunisi akış süresi sırasıyla 15-65 sn, 19-73 sn ve 24-82 sn olarak belirlenmiştir. Çökme-yayılma deney sonuçlarının değerlendirilmesinde belirtildiği gibi karışımların s/b oranının artması UHPC malzemesinin içyapı özelliği bakımından yoğun tane dizilimi nedeniyle sahip olduğu kohezif ve viskoz yapısını azaltmıştır. Bağlayıcı miktarının azalması özellikle normal agregalı REF serilerinin kohezyonunu ve birim ağırlığının azalmasına neden olmuş ve böylece V-hunisi akış süresini önemli derecede artmıştır. Ancak bağlayıcı miktarının azalmasıyla karışımdaki agrega hacminin artması ağır agregalı GAD ve BAR serilerinde birim ağırlığı arttırmıştır. Bu nedenle ağır agregalı serilerin V-hunisi akış süresi, REF serilerine göre daha az olmuştur.



* REF-36-3 ve BAR-36-3 serileri, V-hunisinde akış gösteremediği için deney sonucu elde edilememiştir.

Şekil 4.2 V-hunisi akış deneyi sonuçları

Karışımlarda farklı oranlarda kullanılan çelik lif oranının artması işlenebilirliği azaltmış, dolayısı ile kesit değişikliği engeline karşı boşluklardan geçebilme yeteneğinin belirlendiği V-hunisi akış deney sonuçlarını olumsuz yönde etkilemiştir. Özellikle %3 çelik lif içeriğine sahip karışımların V-hunisi akış süreleri önemli derecede artmıştır. Ayrıca, %3 çelik lif içeriğine sahip REF-36 ve BAR-36 serileri, V-hunisinde akış gösteremediği için deney sonucu elde edilememiştir. V-hunisi akış deney sonuçlarına göre en iyi performansı, çökme-yayılma deneyinde olduğu gibi tane yoğunluğu en fazla olan granüle demir atık tozu kullanılan GAD-18-1 serisi göstermiştir.

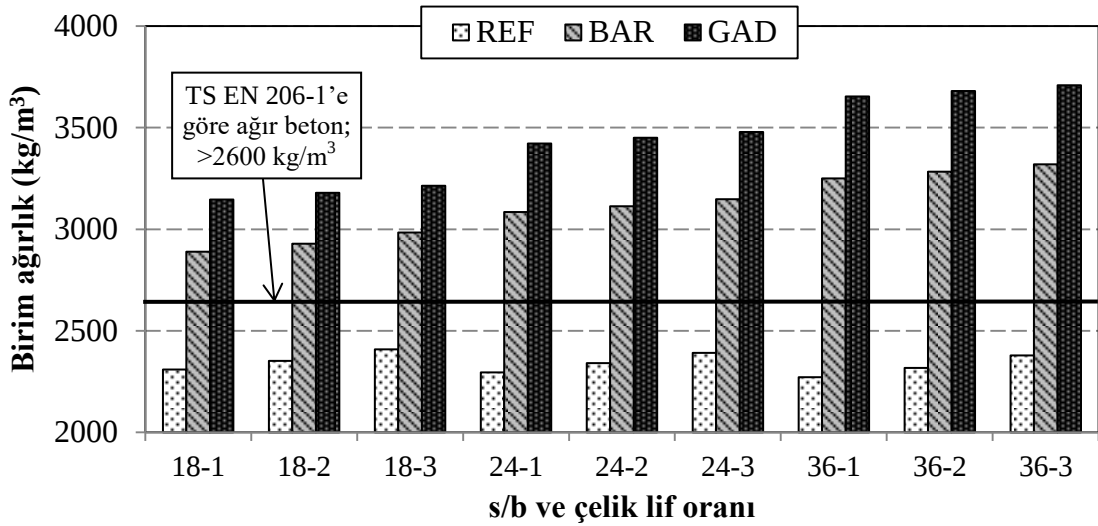
4.2 Sertleşmiş UHPC Özellikleri

Sertleşmiş haldeki UHPC malzemesinin fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama özelliklerinin belirlenmesi amacıyla farklı karışım parametreleri üretilen ve iki farklı kür uygulaması yapılarak oluşan toplam 54 farklı UHPC serisinde, birim ağırlık, tek eksenli basınç, dört noktalı eğilme, kırılma tokluğu, direkt çekme deneyi gibi mekanik özellikler ve radyasyon zırhlama özelliklerinin belirlenmesi amacıyla radyasyon geçirgenlik deneyleri yapılmıştır.

4.2.1 Birim Ağırlık Deneyi

Farklı özgül ağırlıktaki agregalar kullanılarak üretilen UHPC malzemesinin birim ağırlığı 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kürü uygulanan deney numunelerinde 7. günde ASTM C 642’ye [116] uygun olarak belirlenmiştir ve deney sonuçları Şekil 4.3’te gösterilmiştir.

Birim ağırlıklar, silis ve kuvars agregalı REF serilerinde 2271-2408 kg/m³, barit agregalı BAR serilerinde 2889-3319 kg/m³ ve granüle atık demir agregalı GAD serilerinde 3146-3708 kg/m³ arasında olduğu belirlenmiştir. REF serisinde, birim ağırlık değerinin s/b oranının artması ile değişmediği görülmüştür. Bunun nedeni silis kumu ve kuvars tozu karışımının tane yoğunluğu kullanılan bağlayıcı karışımının yoğunluğu ile benzer olmasıdır. Karışımın s/b oranının 0,18’den 0,36’ya artması ile karışımdaki agrega hacmi %37’den %57’ye yükselmiştir. Dolayısıyla s/b oranının artmasıyla birim ağırlık değişimi ağır agrega kullanılan serilerde daha net görülmektedir. Bu nedenle ağır agrega kullanılan BAR ve GAD serilerinde birim ağırlık değeri, REF serisine göre sırasıyla %37 ve %55 arttığı belirlenmiştir. Ayrıca çelik lif oranı arttıkça birim ağırlık değerinin arttığı belirlenmiştir. Karışımlarda farklı oranlarda kullanılan çelik lif oranının artması birim ağırlığı orantılı bir şekilde arttırmıştır. Birim ağırlık deney sonuçlarına göre en yüksek birim ağırlık değeri, granüle demir atık tozu kullanılan 3708 kg/m³ değeri ile GAD-36-3 serisinde görülmüştür. TS EN 206-1’de [122], birim ağırlığı 2600 kg/m³’ten daha büyük olan betonlar ağır beton olarak tarif edilmiştir. Bu tarife göre granüle atık demir tozu ve barit agregası kullanılan seriler, tüm s/b oranları için ağır beton sınıfına girmektedir.



Şekil 4.3 UHPC malzemesinin birim ağırlık sonuçları

4.2.2 Tek Eksenli Basınç Deneyi

UHPC malzemesinin basınç dayanımı, 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kür uygulanan serilerde 7. günde ve 20±2 °C su içerisinde kür uygulanan serilerde 1., 3., 7., 14., 28., 56. ve 90. günlerde ASTM C109/109M’ye [123] uygun olarak gerçekleştirilen tek eksenli basınç deneyi ile belirlenmiş ve deney sonuçları Çizelge Ek B.1’de verilmiştir. Su kürü uygulanan UHPC serilerinin 1, 3, 7, 14, 28, 56 ve 90. günlerde yapılan deneyler ile basınç dayanımı gelişimi sonuçları çelik lif içeriği %1, %2 ve %3 olan seriler için sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Deney sonuçları genel olarak incelendiğinde, kullanılan agrega tipi, s/b oranı ve kür tipi gibi malzeme ve üretim parametreleri UHPC serilerinin basınç dayanımını önemli derecede etkilemiştir. Ancak çelik lif içeriği, UHPC serilerinin basınç dayanımı üzerinde çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Su kürü uygulanan UHPC serilerin basınç dayanımının zamana bağlı gelişimi incelendiğinde (Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6), 90. günde basınç dayanımı nihai olarak kabul edilirse, 28. günde UHPC serileri, s/b oranı 0,18, 0,24 ve 0,36 olan seriler için sırasıyla nihai basınç dayanımının ortalama %87, %79 ve %72’sine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, 28. günden sonra tüm UHPC serilerinin dayanım kazanma hızının azaldığı görülmektedir.

Karışımların s/b oranının azalması ile bağlayıcı miktarı artmıştır. Bu nedenle s/b oranının azalması tüm UHPC serilerinin basınç dayanımının önemli derecede artmasına

neden olmuştur [124]. Karışımların s/b oranının 0,36'dan 0,18'e azalmasıyla UHPC serilerinin basınç dayanımında, su kürü uygulanan serilerde ortalama %47 ve buhar kürü uygulanan serilerde ortalama %70 gibi büyük bir artış meydana gelmiştir. Diğer yandan, kullanılan çelik lif oranının artması ile UHPC serilerinin basınç dayanımının çok az da olsa arttığı bilinmektedir. Ancak kullanılan çelik lif oranının artması, basınç dayanımının nihai değerine s/b oranının azalmasıyla meydana gelen artış etkisine göre daha az bir etkiye sahiptir [47]. Karışımların çelik lif içeriğinin %1'den %3'e artmasıyla UHPC serilerinin basınç dayanımında, su kürü ve buhar kürü uygulanan serilerde ortalama %13 gibi düşük bir artış meydana gelmiştir. Çelik lifin, mikro çatlak oluşumunu geciktirdiği ve çatlak yayılımını durdurmasından dolayı basınç dayanımı üzerinde az da olsa olumlu etkiye sahip olduğu belirtilmektedir [125]. Bu genel sonuçlara göre, en yüksek basınç dayanımı s/b oranı 0,18 ve çelik lif içeriği %3 olan serilerde görülmektedir.

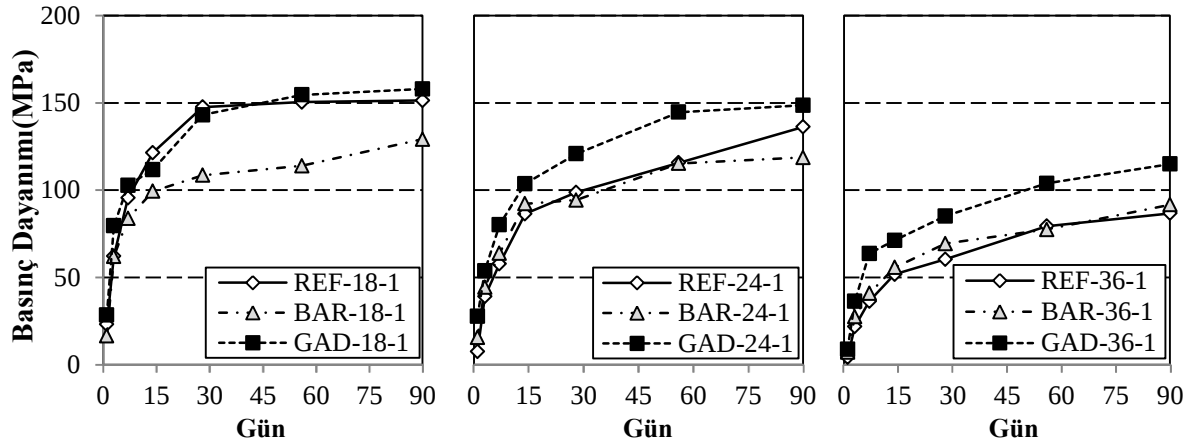
Silis kumu ve kuvars tozu kullanılan ve %3 çelik lif içeren REF serilerinde 90 gün su kürü uygulaması sonucunda basınç dayanımları, s/b oranı 0,18, 0,24 ve 0,36 olan serilerde sırasıyla 171 MPa, 140 MPa ve 101 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca buhar kürü uygulanan REF serilerin basınç dayanımları s/b oranı 0,18, 0,24 ve 0,36 olan serilerde sırasıyla 201 MPa, 162 MPa ve 109 MPa olarak belirlenmiştir. Granüle atık demir tozu kullanılan ve %3 çelik lif içeren GAD serilerinde 90 gün su kürü uygulaması sonucunda basınç dayanımları, s/b oranı 0,18, 0,24 ve 0,36 olan serilerde sırasıyla 182 MPa, 173 MPa ve 127 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca buhar kürü uygulanan GAD serilerin basınç dayanımları s/b oranı 0,18, 0,24 ve 0,36 olan serilerde sırasıyla 203 MPa, 183 MPa ve 126 MPa olarak belirlenmiştir. Barit agregalı 90 gün boyunca su kürü uygulanan ve %3 çelik lif içeren BAR serilerin basınç dayanımları s/b oranı 0,18, 0,24 ve 0,36 olan serilerde sırasıyla 149 MPa, 131 MPa ve 106 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca buhar kürü uygulanan BAR serilerin basınç dayanımları s/b oranı 0,18, 0,24 ve 0,36 olan serilerde sırasıyla 162 MPa, 137 MPa ve 108 MPa olarak belirlenmiştir.

Su kürü ve buhar kürü uygulanan bütün seriler arasında granüle atık demir tozu kullanılan GAD serileri en yüksek basınç dayanımına ve dayanım gelişim hızına ulaşmıştır. Granüle atık demir tozu kullanımının basınç dayanımı üzerindeki olumlu etkisi, boşluksuz ve sert tane yapısına sahip olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca Şekil 3.2'de SEM analizinde görülen granüle atık demir tozunun yuvarlak tane şekli, karışımda

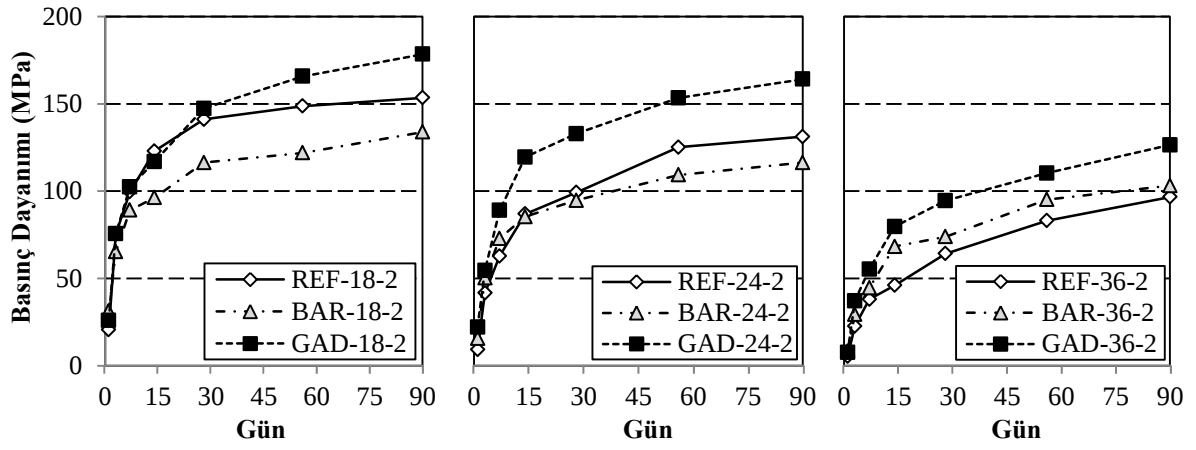
kullanılan diğer köşeli taneli agregalara göre daha az boşluk oluşturmaları nedeniyle sıkı tane yoğunluğunun artması basınç dayanımının artmasına sebep olmuştur.

Barit agregalı UHPC serilerinin basınç dayanımı ve gelişimi, s/b oranı 0,18 olan karışımlarda normal agregalı REF serilerinden daha düşük değerlerde, s/b oranı 0,24 olan karışımlarda normal agregalı REF serileri ile benzer değerlerde olmuş, s/b oranı 0,36 olan karışımlarda ise normal agregalı REF serilerinden daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Barit agregasının düşük s/b oranında basınç dayanımı üzerindeki negatif etkisi, agrega tanelerinin içyapısı ve dayanımı ile ilişkilendirilebilir. Barit agregası, üretim sürecinde çeneli kırıcılar ile kırılmasından dolayı tanelerin içyapısında mikro çatlaklar oluşması nedeniyle yüksek yoğunlukta olmasına rağmen düşük dayanıma ve sertliğe sahiptirler. Barit kumu kullanılan serilerin, düşük s/b oranında REF serilerine göre daha düşük ancak yüksek s/b oranında ise REF serilerine göre daha yüksek dayanımda olmasının nedeni; düşük s/b oranında karışımın yüksek bağlayıcı miktarına sahip olmasıyla çatlak oluşumu, dayanımı yüksek matris fazından değil, daha düşük dayanımlı agregadan meydana gelmesi ile açıklanmaktadır [97]. Bu nedenle, s/b oranı düşük olan yüksek dayanımlı matrise sahip olan serilerde agreganın etkisi daha net görülmektedir. Ancak s/b oranı yüksek olan daha düşük dayanımlı matrise sahip olan serilerde, çatlak oluşumu matris üzerinde oluşacağı için agreganın etkisi daha az görülmektedir. Dolayısıyla yüksek s/b oranında, barit agregalı serilerin basınç dayanımı REF serileri ile benzer sonuçlar almıştır.

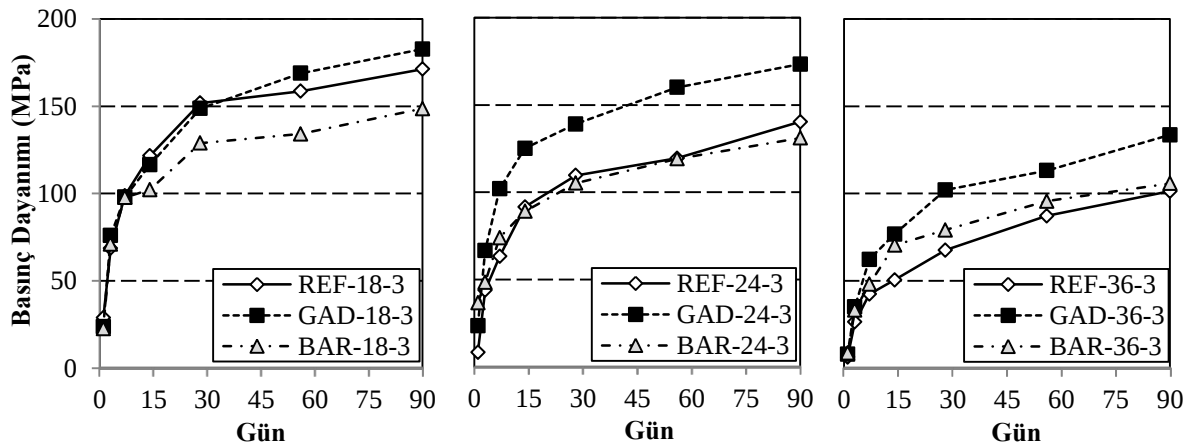
UHPC serilerin basınç dayanımına buhar kürü ve su kürü uygulamasının etkisinin araştırılması amacıyla %2 çelik lif oranına sahip serilerin basınç dayanımları Şekil 4.7’de karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi, s/b oranı 0,18 ve 0,24 olan UHPC serilerde, 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kür uygulanan serilerin basınç dayanımı 90 gün su kürü uygulanan serilere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak s/b oranı 0,36 olan UHPC serilerde, 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kürü uygulanan serilerin basınç dayanımı 90 gün boyunca su kürü uygulanan numunelere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Dikkat çeken bu sonuca göre, buhar kürü uygulamasının düşük s/b oranlı, dolayısıyla yüksek bağlayıcı miktarına sahip karışımlar için daha uygun olduğu belirlenmiştir.



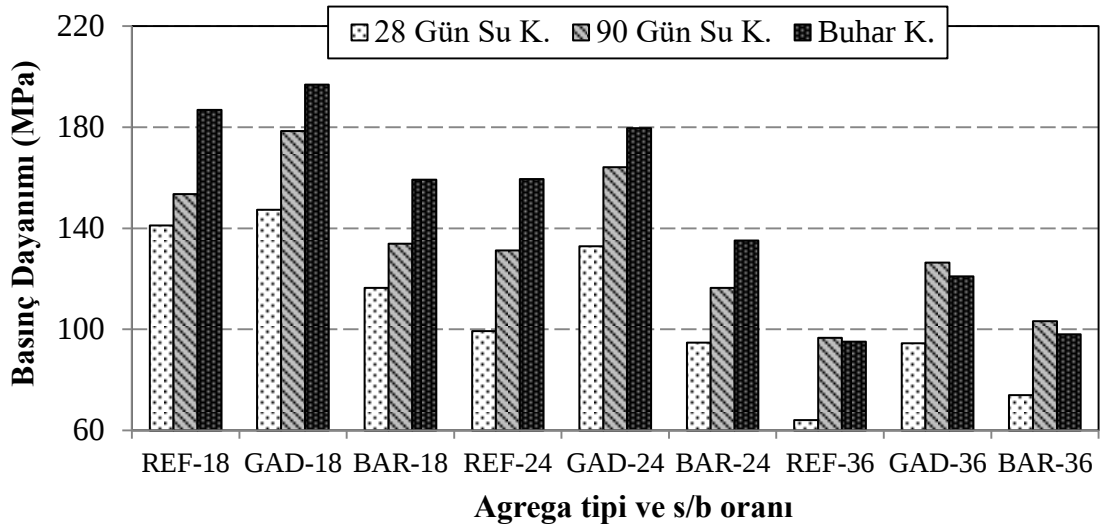
Şekil 4.4 Su kürü uygulanmış %1 çelik lif içeriğine sahip UHPC serilerin basınç dayanımının zamana bağlı gelişimi



Şekil 4.5 Su kürü uygulanmış %2 çelik lif içeriğine sahip UHPC serilerin basınç dayanımının zamana bağlı gelişimi



Şekil 4.6 Su kürü uygulanmış %3 çelik lif içeriğine sahip UHPC serilerin basınç dayanımının zamana bağlı gelişimi



Şekil 4.7 Çelik lif oranı %2 olan UHPC serilerinin basınç dayanımlarına kür tipinin etkisi

4.2.3 Dört Noktalı Eğilme Deneyi

UHPC malzemesinin eğilme gerilmesi altındaki özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM C1609/C1609M'ye [56] uygun olarak gerçekleştirilen dört noktalı eğilme deneyi ile eğilme dayanımı belirlenmiş ve ayrıca yük-deformasyon ilişkisi incelenerek kırılma toklukları belirlenmiştir. UHPC malzemesinin genel karakteristik özelliklerini düşük s/b oranına sahip karışımlar sergilediği için yük-deformasyon ilişkisi ve kırılma tokluğu sadece s/b oranı 0,18 olan serilerde incelenmiştir.

4.2.3.1 Eğilme Dayanımı

UHPC malzemesinin eğilme dayanımı, 90 °C'de 48 saat boyunca buhar kür uygulanan serilerde 7. günde ve 20±2 °C su içerisinde kür uygulanan serilerde 1., 3., 7., 14., 28., 56. ve 90. günlerde belirlenmiş ve deney sonuçları Çizelge Ek B.2'de verilmiştir. Su kürü uygulanan UHPC serilerinin 1, 3, 7, 14, 28, 56 ve 90 günlerde yapılan deneyler ile basınç dayanımı gelişimi sonuçları s/b oranı 0,18, 0,24 ve 0,36 olan seriler için sırasıyla Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Deney sonuçları genel olarak incelendiğinde, kullanılan agrega tipi, s/b oranı ve çelik lif içeriği gibi karışım parametreleri UHPC serilerinin eğilme dayanımını önemli derecede etkilemiştir. Ancak farklı kür tipi uygulamalarının, UHPC serilerinin eğilme dayanımı üzerinde çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Su kürü uygulanan UHPC serilerin eğilme dayanımının zamana bağlı gelişimi incelendiğinde (Şekil 4.8, Şekil 4.9

ve Şekil 4.10), 90. gündeki eğilme dayanımı nihai olarak kabul edilirse, 28. günde UHPC serileri, s/b oranı 0,18, 0,24 ve 0,36 olan seriler için sırasıyla nihai eğilme dayanımının ortalama %87, %84 ve %81'sine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, basınç dayanımında olduğu gibi 28. günden sonra tüm UHPC serilerinin eğilme dayanımının zamanla dayanım kazanma hızının azaldığı görülmektedir. Karışımların s/b oranının değişiminin eğilme dayanımına etkisi incelendiğinde, s/b oranının 0,36'dan 0,18'e azalmasıyla UHPC serilerinin eğilme dayanımında, su kürü uygulanan serilerde ortalama %68 ve buhar kürü uygulanan serilerde ortalama %69 gibi büyük bir artış meydana gelmiştir.

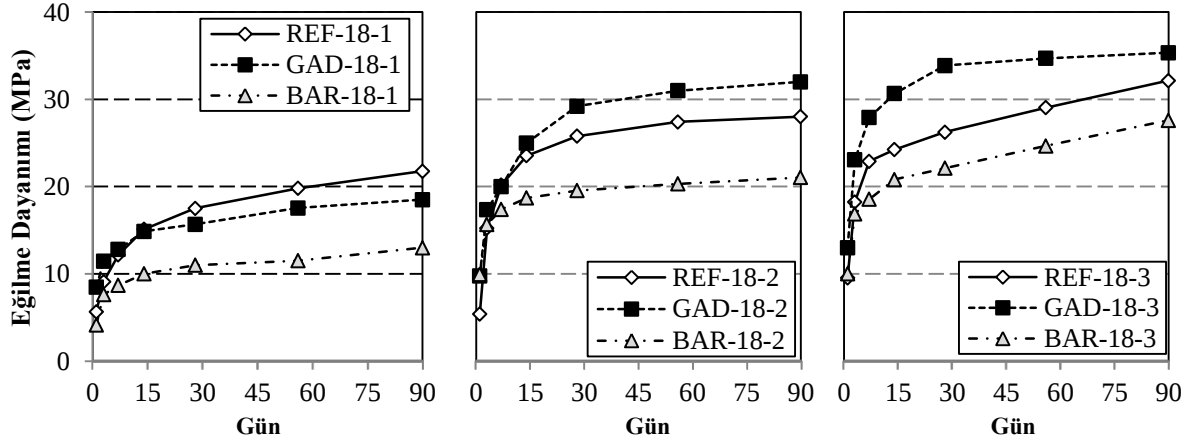
UHPC malzemesinin eğilme dayanımına en önemli etkisi olan çelik lif içeriğinin değişimi incelendiğinde, eğilme dayanımının nihai değerinde s/b oranının azalmasıyla meydana gelen artış etkisine göre daha fazla bir etkiye sahiptir. UHPC serilerinde kullanılan çelik lif oranı arttıkça, eğilme dayanımının aynı oranda arttığı görülmektedir [49]. Karışımların çelik lif içeriğinin %1'den %3'e artmasıyla UHPC serilerinin eğilme dayanımında, su kürü uygulanan serilerde ortalama %116 ve buhar kürü uygulanan serilerde ortalama %96 gibi yüksek bir artış meydana gelmiştir. Çelik liflerin çatlak oluşumunda göstermiş olduğu köprüleme görevi ile mikro çatlak oluşumunu geciktirmesi ve düşük gerilmelerde çatlak yayılımını durdurmasından dolayı, UHPC malzemesinin eğilme dayanımını önemli derecede arttırmıştır [126]. Bu genel sonuçlara göre, en yüksek eğilme dayanımı s/b oranı 0,18 ve çelik lif içeriği %3 olan serilerde görülmektedir.

Silis kumu ve kuvars tozu kullanılan ve 0,18 s/b oranına sahip REF serilerinde 90 gün su kürü uygulaması sonucunda eğilme dayanımları, çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde sırasıyla 22 MPa, 28 MPa ve 32 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca aynı s/b oranında buhar kürü uygulanan REF serilerin eğilme dayanımları çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde sırasıyla 22 MPa, 27 MPa ve 35 MPa olarak belirlenmiştir. Granüle atık demir tozu kullanılan ve 0,18 s/b oranına sahip GAD serilerinde 90 gün su kürü uygulaması sonucunda eğilme dayanımları, çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde sırasıyla yaklaşık 18 MPa, 32 MPa ve 35 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca aynı s/b oranında buhar kürü uygulanan GAD serilerin eğilme dayanımları çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde sırasıyla 19 MPa, 30 MPa ve 38 MPa olarak belirlenmiştir. Barit kumu kullanılan ve 0,18 s/b oranına sahip BAR serilerinde 90 gün su kürü uygulaması sonucunda eğilme dayanımları, çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde

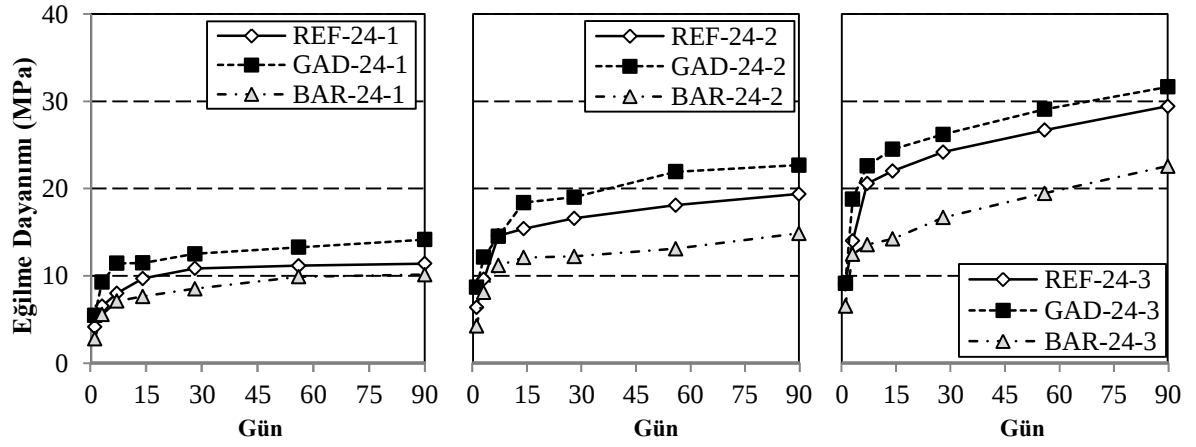
sırasıyla yaklaşık 13 MPa, 21 MPa ve 28 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca aynı s/b oranında buhar kürü uygulanan BAR serilerin eğilme dayanımları çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde sırasıyla yaklaşık 17 MPa, 22 MPa ve 29 MPa olarak belirlenmiştir.

Su kürü ve buhar kürü uygulanan bütün seriler arasında granüle atık demir tozu kullanılan GAD serileri en yüksek eğilme dayanımına ve dayanım gelişim hızına ulaşmıştır. UHPC'nin eğilme dayanımına, kullanılan çelik liflerin dağılımı ve lif ile matris arasındaki etkileşiminin büyük etkisi vardır. Lif-matris arayüz bölgesinin mikroyapısı ve matrisin homojenliği lif ile matris arasındaki etkileşimi etkilemekte ve lifin matris ile olan aderansını belirlemektedir [31]. Ayrıca malzemenin yük taşıma kapasitesi esas olarak liflerin dağılımına ve yönelimine bağlı olmasından [127] dolayı Şekil 3.2'de SEM analizinde görüldüğü granüle atık demir tozunun yuvarlak tane şekli, karışımda kullanılan diğer köşeli taneli agregalara göre işlenebilirliği iyileştirmesinden dolayı karışımın homojenliğini arttırmaktadır. Bu nedenle, liflerin dağılımını ve yönelimini olumlu yönde etkileyen granüle atık demir tozunun kullanılması, eğilme dayanımını önemli derecede arttırmaktadır. Barit kumu kullanılan BAR serileri ise, su kürü ve buhar kürü uygulanan bütün seriler arasında en düşük eğilme dayanımı ve dayanım gelişim hızı göstermiştir. Ancak s/b oranı 0,18 ve 0,24 olan karışımlarda BAR serileri, REF serilerine göre daha düşük dayanımda olmasına rağmen, s/b oranı 0,36 olan karışımlarda benzer eğilme dayanımı görülmüştür.

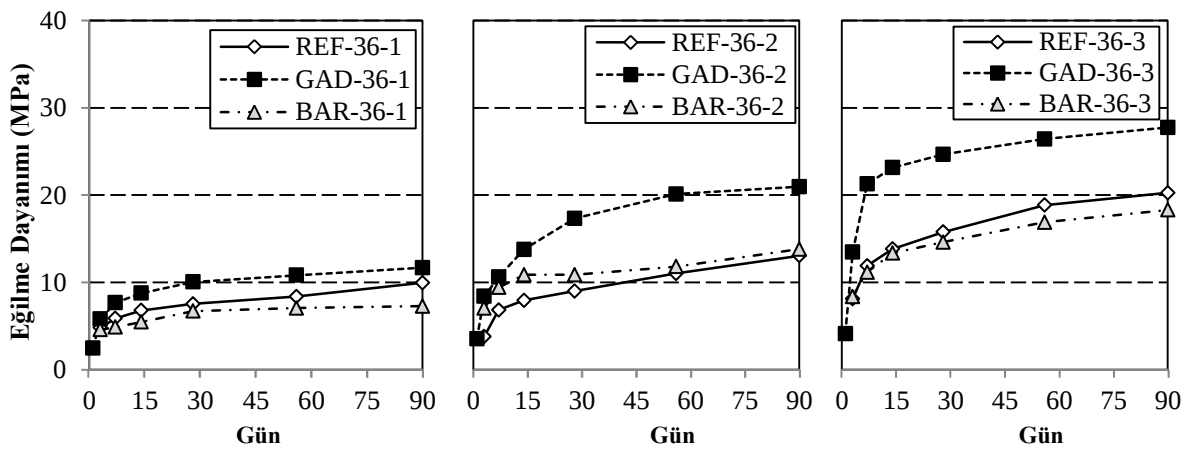
UHPC serilerin eğilme dayanımına buhar kürü ve su kürü uygulamasının etkisinin araştırılması amacıyla %2 çelik lif oranına sahip serilerin eğilme dayanımları Şekil 4.11'de karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi, tüm s/b oranları için 90°C'de 48 saat boyunca buhar kürü uygulanan serilerin eğilme dayanımı, 28 gün su kürü uygulanan serilere göre daha yüksek olmasına rağmen 90 gün su kürü uygulanan serilere göre daha düşüktür. Ancak 90 gün su kürü ve 48 saat boyunca buhar kürü uygulanan serilerin eğilme dayanımları arasında tüm seriler için ortalama %5 gibi az bir fark vardır.



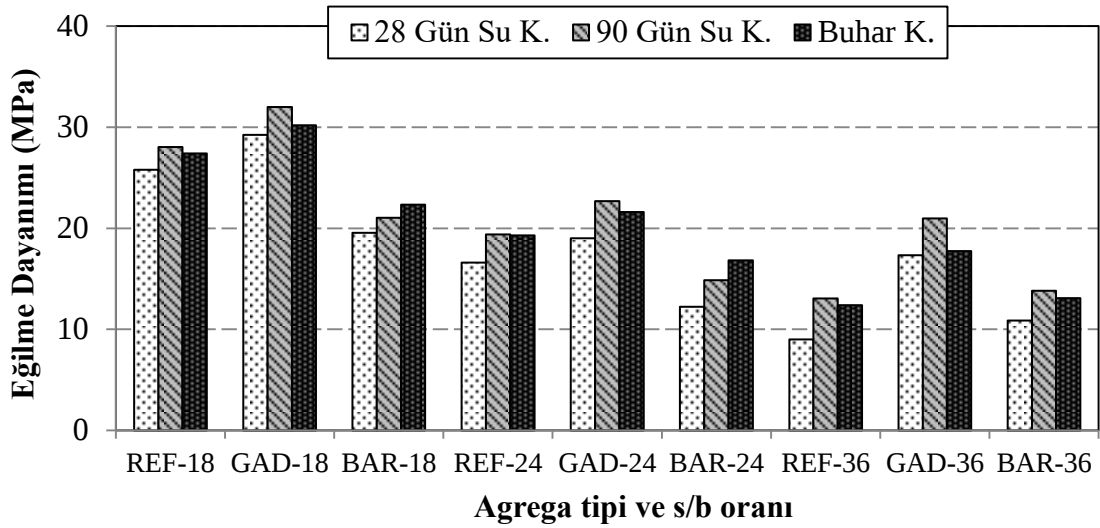
Şekil 4.8 Su kürü uygulanmış 0,18 s/b oranına sahip UHPC serilerin eğilme dayanımının zamana bağlı gelişimi



Şekil 4.9 Su kürü uygulanmış 0,24 s/b oranına sahip UHPC serilerin eğilme dayanımının zamana bağlı gelişimi



Şekil 4.10 Su kürü uygulanmış 0,36 s/b oranına sahip UHPC serilerin eğilme dayanımının zamana bağlı gelişimi



Şekil 4.11 Çelik lif oranı %2 olan UHPC serilerinin eğilme dayanımlarına kür tipinin etkisi

4.2.3.2 Yük-Deformasyon İlişkisi

Yük-deformasyon ilişkisi, 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kürü uygulanan serilerde 7. günde ve 20±2 °C su içerisinde kür uygulanan serilerde 28. ve 90. günlerde ASTM C1609/C1609M’ye [56] uygun olarak yapılan eğilme deneyi ile belirlenmiştir. Yük-deformasyon eğrileri 3 mm deformasyon değerine kadar 0,18 s/b oranına sahip REF, GAD ve BAR serileri için sırasıyla Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te gösterilmiştir.

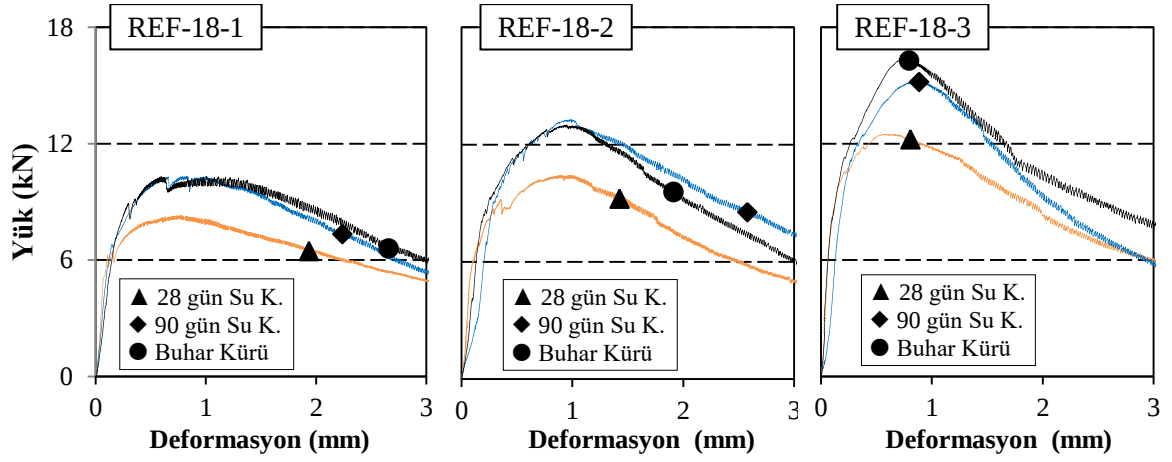
Çimento esaslı lifli kompozitlerin eğilme altındaki tipik yük-deformasyon eğrileri Şekil 3.12’de gösterildiği gibi genel olarak lineer elastik, deformasyon sertleşmesi ve deformasyon yumuşaması olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır [124]. ASTM C1609/C1609M [56] standardında yük-deformasyon eğrisinde lineerliğin bozulduğu ilk nokta ilk çatlağın oluştuğu nokta olarak ifade edilmektedir. İlk çatlağın oluştuğu noktadaki yüke ilk çatlak yükü (P_1) ve bu noktadaki deformasyonda ilk çatlak deformasyonu (δ_1) olarak tanımlanmaktadır. Çimento esaslı lifli kompozitlerin ilk çatlak oluştuğu noktadan sonraki davranışına göre deformasyon yumuşaması (deflection-softening behavior) veya deformasyon sertleşmesi (deflection-hardening behavior) davranışı göstermektedirler [19]. İlk çatlağın oluşumundan sonra yük azalmaya devam ederse deformasyon yumuşaması ve ilk çatlağın oluşumundan sonra yük artmaya devam ederse deformasyon sertleşmesi olarak ifade edilmektedir [22].

Yük-deformasyon eğrileri genel olarak incelendiğinde, kullanılan agrega tipi, çelik lif oranı ve kür tipi gibi malzeme ve üretim parametreleri UHPC serilerinin yük-

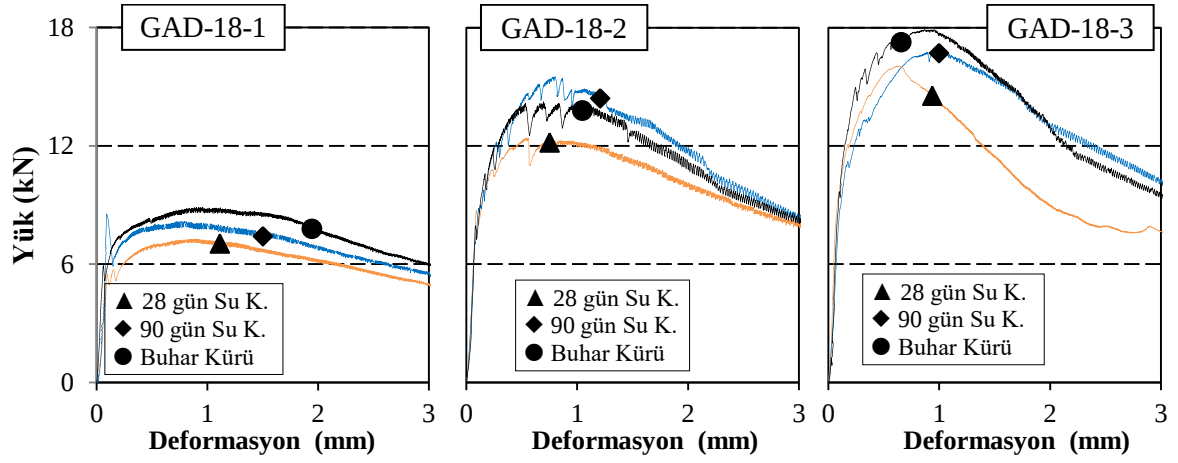
deformasyon davranışını önemli derecede etkilemiş ve 0,18 s/b oranına sahip tüm UHPC serilerinde deformasyon sertleşmesi davranışı görülmüştür. Ayrıca, ilk çatlak oluşumundan sonra çelik liflerin çatlak köprüleme özelliği ile çatlak yayılımının önlenmesinden dolayı [128] çelik lif oranının %1'den %3'e artmasıyla deformasyon sertleşmesi davranışı belirginleşmektedir. Buna ilave olarak, karışımların çelik lif oranının artmasıyla liflerin birbirlerine daha yakın olmasını sağlamak ve bu nedenle daha sık olan lifler, mikro çatlakların makro çatlaklara geçmemesi için bölgesel olarak katkı sağlamaktadır [129]. Böylelikle ilk çatlaktan sonra makro çatlak oluşumu geciktirilerek malzemenin daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olması sağlanmıştır [61],[130].

UHPC malzemesinin ilk çatlak yükü, liflerin köprüleme özelliğinden daha fazla matrisin içerisinde oluşacak çatlak oluşumundan etkilenmektedir [121]. Ancak yüksek lif içeriğine sahip malzemelerde, lif başına düşen gerilmelerin azalmasıyla yüksek yüklerde ani azalmalar görülmeyecektir [121]. Bu nedenle, %2 ve %3 çelik lif içeriğine sahip serilerde ilk çatlak oluşumundan sonra ani yük azalması gözlenmemesine rağmen %1 çelik lif içeriğine sahip serilerde ilk çatlak oluşumundan sonra ani yük azalması görülmektedir.

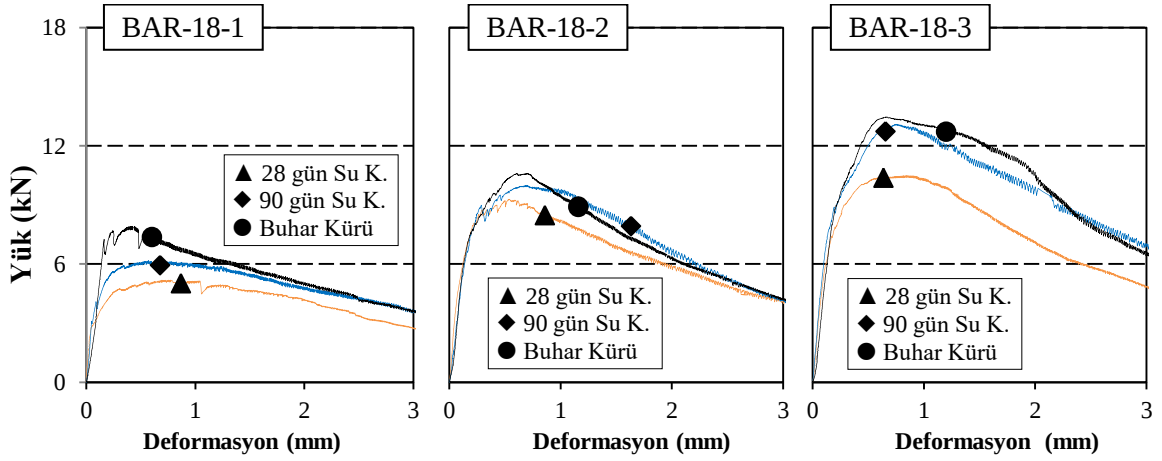
Kür tipinin UHPC malzemesinin yük-deformasyon davranışı üzerindeki etkisi incelendiğinde, buhar kürü uygulanan serilerin, 28 ve 90 gün boyunca su kürü uygulanan serilere göre daha yüksek pik yüke (P_p) ve yük taşıma kapasitesine (W_f) sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca kür tipinin, UHPC malzemesinin pik yük deformasyonunu da (δ_p) etkilediği belirlenmiştir. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi REF serilerinin δ_p değerleri, 28 ve 90 gün boyunca su kürü ve buhar kürü için sırasıyla 0.57 mm, 0.88 mm ve 0.74 mm'dir. Genel olarak 90 gün boyunca su kürü uygulanan serilerin δ_p değerleri daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca UHPC malzemesinin pik yükü (P_p) ve pik yük deformasyonu (δ_p) kullanılan agreganın tipine göre değişmektedir. Örneğin buhar kürü uygulanmış ve %3 çelik lif içeriğine sahip REF, GAD ve BAR serileri için δ_p değerleri sırasıyla 0.74 mm, 0.86 mm ve 0.66 mm olarak belirlenmiştir. Granüle atık demir tozu kullanılan GAD serileri genel olarak daha yüksek P_p ve δ_p değerlerine ulaşmış ancak bir diğer ağır agrega olarak kullanılan barit kumlu BAR serileri ise en düşük P_p ve δ_p değerlerini göstermiştir.



Şekil 4.12 REF serilerin eğilme etkisi altında yük-deformasyon ilişkisi



Şekil 4.13 GAD serilerin eğilme etkisi altında yük-deformasyon ilişkisi



Şekil 4.14 BAR serilerin eğilme etkisi altında yük-deformasyon ilişkisi

4.2.3.3 Kırılma Tokluğu

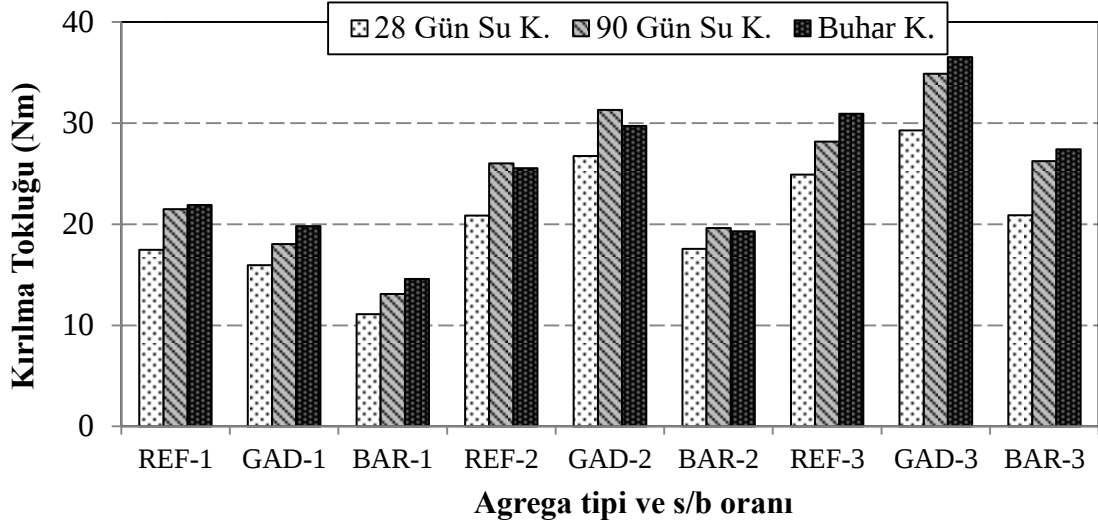
Kompozit malzeme içerisindeki lif içeriği malzemenin tokluğunu veya enerji yutma kapasitesini önemli derecede etkilediği literatürde belirtilmiştir [121],[130],[131]. Yapılan araştırmalarda, liflerin yük altında oluşacak çatlaklar arasında köprüleme görevi görmesiyle çatlakların yayılmasını engellemekte ve böylece daha yüksek yük taşıma ve enerji yutma kapasitesine ulaşılmakta olduğu belirtilmiştir [132].

UHPC serilerinin kırılma tokluğu, 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kür uygulanan serilerde 7. günde ve 20±2 °C su içerisinde kür uygulanan serilerde 28. ve 90. günlerde ASTM C1609/C1609M’ye [56] uygun olarak yapılan eğilme deneyi ile belirlenmiştir. Kırılma tokluğu, 3 mm deformasyon değerine kadar çizilen yük-deformasyon eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla belirlenmiştir ve deney sonuçları Şekil 4.15’te verilmiştir.

Deney sonuçları genel olarak incelendiğinde, kullanılan agrega tipi ve çelik lif içeriği gibi karışım parametreleri UHPC serilerinin kırılma tokluğunu önemli derecede etkilemiştir. Ancak farklı kür tipi uygulamalarının, UHPC serilerinin kırılma tokluğu üzerinde çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Karışımların çelik lif içeriğinin %1’den %3’e artmasıyla UHPC serilerinin kırılma tokluğu orantılı bir şekilde artmıştır. Örneğin buhar kürü uygulanmış ve 0,18 s/b oranına sahip REF, GAD ve BAR serileri için çelik lif içeriğinin %1’den %3’e artmasıyla kırılma tokluğu sırasıyla % 41,% 84 ve % 87 oranında artmıştır.

UHPC malzemesinin kırılma tokluğunu önemli ölçüde etkileyen bir diğer parametre agrega tipidir. Çelik lif içeriği %1 olan seriler arasında, en yüksek kırılma tokluğuna REF serisi ulaşmasına rağmen, çelik lif içeriği %2 ve %3 olan serilerde en yüksek kırılma tokluğu GAD serisinde görülmüştür. Granüle atık demir tozu kullanılan bu serinin yüksek lif içeriğinde daha yüksek kırılma tokluğuna sahip olması taze halde daha iyi kıvama sahip olmasıyla açıklanabilir. Şekil 3.2’de SEM analizinde görüldüğü granüle atık demir tozunun sahip olduğu yuvarlak tane şekli ile daha işlenebilir özellikte olması liflerin dağılımını ve yönelimini iyileştirmektedir. Ayrıca yuvarlak tane şekli sayesinde, boşluksuz bir içyapı ile lif-matris arasındaki aderansı arttırmasıyla açıklanabilir. Diğer yandan UHPC malzemesinde barit kumunun kullanılması, tokluk performansı açısından belirgin bir azalma meydana getirmiştir.

Buhar kürü uygulanan ve çelik lif içeriği %1 ve %3 olan serilerin kırılma tokluğu, 90 gün su kürü uygulanan serilere göre daha yüksek değerde olmasına rağmen %2 çelik lif içeriği için buhar kürü 90 gün su kürü uygulamasına göre daha düşük değerler aldığı görülmektedir.



Şekil 4.15 0,18 s/b oranı ile üretilen UHPC serilerin tokluklarına lif oranının etkisi

4.2.4 Direkt Çekme Deneyi

UHPC malzemesinin çekme gerilmesi altındaki özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Bölüm 3.6.5'te detaylı olarak açıklanan direkt çekme deneyi ile çekme dayanımı belirlenmiş ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi incelenmiştir. UHPC malzemesinin genel karakteristik özelliklerini düşük s/b oranına sahip karışımlar sergilediği için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi sadece s/b oranı 0,18 olan serilerde incelenmiştir.

4.2.4.1 Çekme Dayanımı

UHPC malzemesinin çekme dayanımı, 90 °C'de 48 saat boyunca buhar kür uygulanan serilerde 7. günde ve 20±2 °C su içerisinde kür uygulanan serilerde 90. günde direkt çekme deneyi ile belirlenmiş ve deney sonuçları Çizelge Ek B.3'te verilmiştir. Su kürü uygulanan UHPC serilerinin 90. günde belirlenen çekme dayanımı Şekil 4.16'da ve buhar kürü uygulanan serilerin çekme dayanımı sonuçları Şekil 4.17'de verilmiştir. Deney sonuçları genel olarak incelendiğinde, kullanılan agrega tipi, s/b oranı ve çelik lif içeriği gibi karışım parametreleri UHPC serilerinin çekme dayanımını önemli derecede etkilemiştir. Ancak farklı kür tipi uygulamalarının, UHPC serilerinin çekme dayanımı üzerinde çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

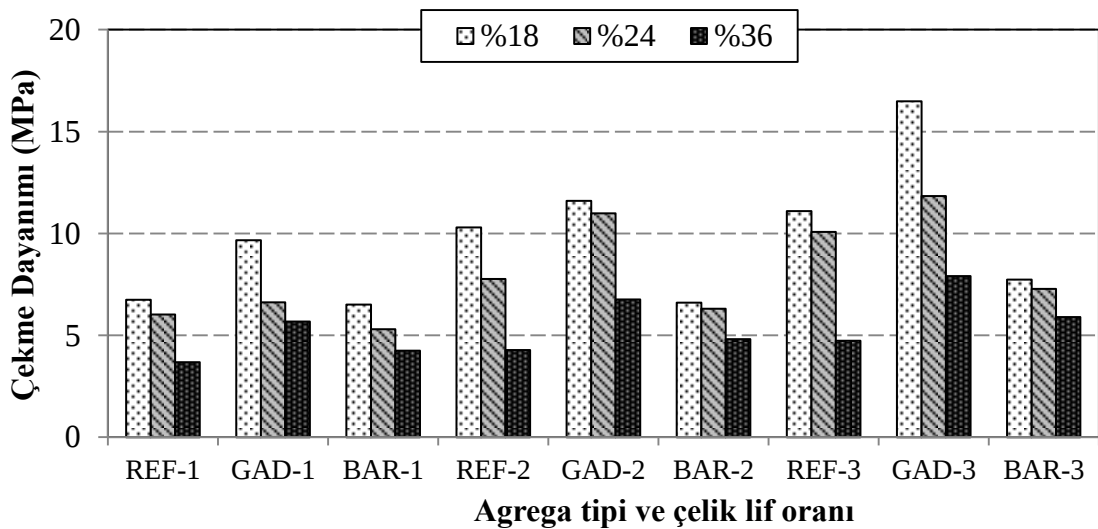
Çimento esaslı kompozitin çekme dayanımı asıl olarak kullanılan lifin oranına bağlı olsa da, matris fazının dayanımı da matris-lif arayüzeyindeki aderansı etkilemesi nedeniyle önemlidir [133]. UHPC malzemesinin s/b oranının azalmasıyla bağlayıcı miktarı artmakta ve matris fazının dayanımı artmaktadır. Böylece düşük s/b oranında UHPC malzemesinin çekme dayanımı artmaktadır. UHPC malzemesinin s/b oranının 0,36'dan 0,18'e azalmasıyla UHPC serilerinin çekme dayanımında, 90 gün su kürü uygulamasında REF, GAD ve BAR serileri için sırasıyla %119, %84 ve %40 ve buhar kürü uygulamasında REF, GAD ve BAR serileri için sırasıyla %167, %119 ve %102 gibi büyük bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca bu sonuçlara göre s/b oranının azalmasıyla çekme dayanımında meydana gelen artışa, su kürü uygulamasına göre buhar kürü uygulamasının daha katkı sağladığı görülmektedir. Bu nedenle buhar kürü uygulamasının malzemenin içyapısını geliştirdiği ve boşlukları azaltarak lif-matris arayüzeyinde oluşacak aderansı arttırdığı söylenebilir.

Silis kumu ve kuvars tozu kullanılan ve 0,18 s/b oranına sahip REF serilerinde 90 gün su kürü uygulaması sonucunda çekme dayanımları, çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde sırasıyla 6,7 MPa, 10,3 MPa ve 11,1 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca aynı s/b oranında buhar kürü uygulanan REF serilerin çekme dayanımları çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde sırasıyla 8,8 MPa, 10,9 MPa ve 11,4 MPa olarak belirlenmiştir. Granüle atık demir tozu kullanılan ve 0,18 s/b oranına sahip GAD serilerinde 90 gün su kürü uygulaması sonucunda çekme dayanımları, çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde sırasıyla yaklaşık 9,7 MPa, 11,6 MPa ve 16,5 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca aynı s/b oranında buhar kürü uygulanan GAD serilerin çekme dayanımları çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde sırasıyla 11,4 MPa, 13,2 MPa ve 17,4 MPa olarak belirlenmiştir. Barit kumu kullanılan ve 0,18 s/b oranına sahip BAR serilerinde 90 gün su kürü uygulaması sonucunda çekme dayanımları, çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde sırasıyla yaklaşık 6,5 MPa, 6,6 MPa ve 7,7 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca aynı s/b oranında buhar kürü uygulanan BAR serilerin çekme dayanımları çelik lif oranı %1, %2 ve %3 olan serilerde sırasıyla yaklaşık 6,9 MPa, 8,3 MPa ve 10,7 MPa olarak belirlenmiştir.

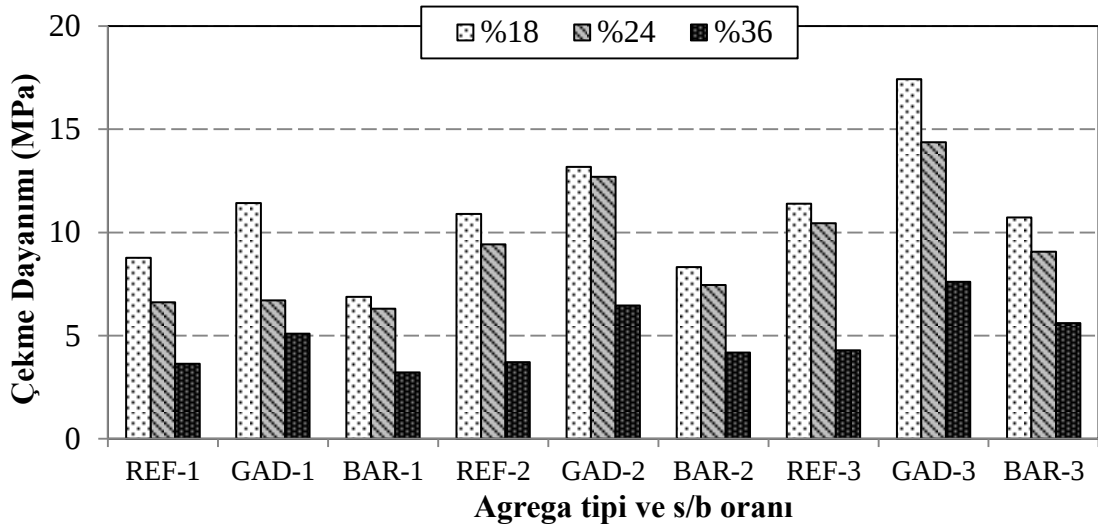
UHPC malzemesinin çekme dayanımına bir diğer önemli etkisi olan çelik lif içeriğinin değişimi incelendiğinde, çekme dayanımının nihai değerinde s/b oranının azalmasıyla meydana gelen artışın etkisi olduğu gibi çelik lif oranının değişimi de önemli bir etkiye sahiptir. UHPC serilerinde kullanılan çelik lif oranı arttıkça, çekme dayanımının aynı

oranda arttığı görülmektedir. Ancak çelik lif oranının çekme dayanımında göstermiş olduğu etki, kullanılan s/b oranına ve agreganın tipine göre değişmektedir. Karışımların s/b oranının artmasıyla çelik lif oranındaki artışın çekme dayanımında göstermiş olduğu olumlu etki azalmaktadır. Bunun nedeni, karışımların s/b oranının artmasıyla, işlenebilirliğin azalması ve matris fazının dayanımının zayıflamasıyla lif aderansının azalması olarak açıklanabilir. Ayrıca granüle atık demir tozu kullanılan ve 0,18 s/b oranına sahip GAD serilerinde, çelik lif içeriğinin %1'den %3'e artmasıyla her iki kür uygulaması için de UHPC serilerinin çekme dayanımının oldukça arttığı Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de görülmektedir. UHPC malzemesinin çekme dayanımı asıl olarak lif oranı, dağılımı ve yönelimine bağlı olmasından [127] dolayı Şekil 3.2'de SEM analizinde görüldüğü gibi granüle atık demir tozunun yuvarlak tane şekli, karışımda kullanılan diğer köşeli taneli agregalara göre işlenebilirliği iyileştirmesinden dolayı karışımın homojenliğini arttırmaktadır. Bu nedenle, liflerin dağılımını ve yönelimini olumlu yönde etkileyen granüle atık demir tozunun kullanılması, çekme dayanımı önemli derecede arttırmaktadır. Bütün seriler arasında, en yüksek çekme gerilmesi 17,4 MPa değeri ile buhar kürü uygulanan GAD-18-3 serisinde elde edilmiştir.

Barit kumu kullanılan BAR serileri ise, su kürü ve buhar kürü uygulanan bütün seriler arasında en düşük çekme dayanımını göstermiştir. Şekil 3.2'de SEM analizinde ve basınç dayanımı sonuçlarında da görüldüğü gibi, barit kumunun köşeli ve parçalı tane şekli nedeniyle agrega matris fazı dayanımının azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle matris-lif arasındaki dayanım azalmasıyla çekme dayanımı azalmaktadır.



Şekil 4.16 90 gün su kürü uygulanmış UHPC serilerin çekme dayanımları



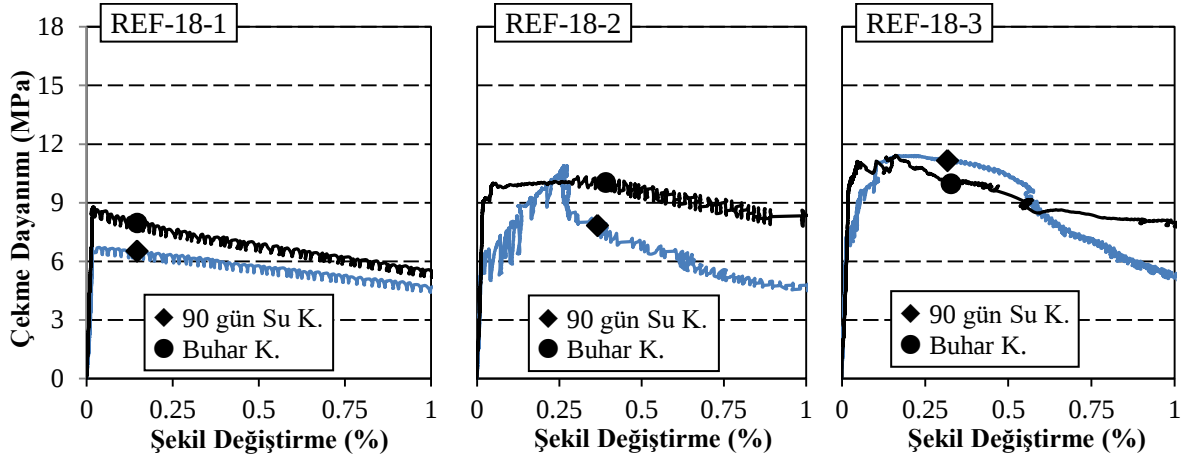
Şekil 4.17 Buhar kürü uygulanmış UHPC serilerin çekme dayanımları

4.2.4.2 Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi

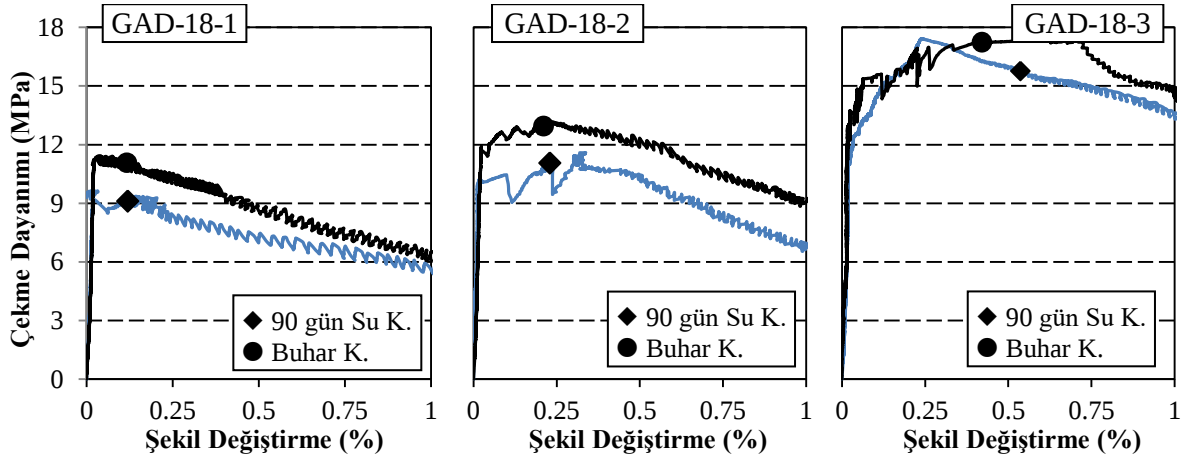
Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, 90 °C’de 48 saat boyunca buhar kür uygulanan serilerde 7. günde ve 20±2 °C su içerisinde kür uygulanan serilerde 90. günde yapılan direkt çekme deneyi ile belirlenmiştir. Gerilme-şekil değiştirme eğrileri 1 mm şekil değiştirme değerine kadar 0,18 s/b oranına sahip REF, GAD ve BAR serileri için sırasıyla Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir.

Çimento esaslı lifli kompozitlerin çekme altındaki tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 2.1’de gösterildiği gibi genel olarak lineer elastik, şekil değiştirme sertleşmesi ve şekil değiştirme yumuşaması olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde lineerliğin bozulduğu ilk noktada matris çatlamış ve ilk çatlak oluşmuştur. Bu noktadan sonra çekme gerilmesi azalmaya başlarsa şekil değiştirme yumuşaması (strain-softening behavior) veya çekme gerilmesi artmaya başlarsa şekil değiştirme sertleşmesi (strain-hardening behavior) davranışı olarak adlandırılmaktadır [19]. Gerilme-şekil değiştirme eğrileri genel olarak incelendiğinde, kullanılan agrega tipi, çelik lif oranı ve kür tipi gibi malzeme ve üretim parametreleri UHPC serilerinin yük-deformasyon davranışını önemli derecede etkilemiştir. Çelik lif oranı %1 olan 0,18 s/b oranına sahip tüm UHPC serilerinde şekil değiştirme yumuşaması davranışı görülmesine rağmen %2 ve %3 çelik oranına sahip UHPC serilerinde şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemektedir. Ayrıca çelik lif oranının %2’den %3’e artmasıyla şekil değiştirme sertleşmesi davranışı belirginleşmektedir. UHPC serilerinde çelik lif oranının artmasıyla belirginleşen şekil değiştirme sertleşmesi davranışı agreganın tipine

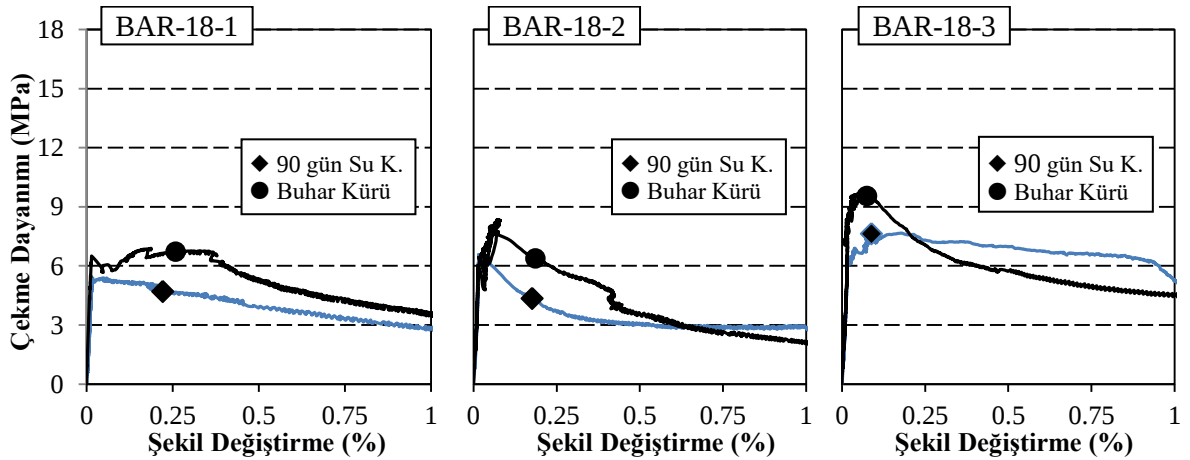
göre değişmektedir. Basınç ve eğilme dayanımında olduğu gibi granüle atık demir tozu kullanılan GAD serisinde daha yüksek çekme dayanımı ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı görülmektedir.



Şekil 4.18 REF serilerin çekme etkisi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 4.19 GAD serilerin çekme etkisi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 4.20 BAR serilerin çekme etkisi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri

UHPC malzemesinin sahip olduğu üstün mekanik özelliklere önemli katkıda bulunan çelik lifler, çekme gerilmesi altında malzemenin çekme şekil değıştirme kapasitesini yani maksimum çekme gerilmesinde yapmış olduğu şekil değıştirme miktarını arttırmaktadır. Literatürde, şekil değıştirme sertleşmesi yapan UHPC malzemesinin çekme şekil değıştirme kapasitesinin %0,2'den fazla olduğu ancak bu değerin kullanılan çelik lif oranının artmasıyla artabileceğı ifade edilmiştir [134]. Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de görüldüğü gibi lif oranı arttıkça REF, GAD ve BAR serileri için şekil değıştirme kapasiteleri artmıştır. Özellikle granüle atık demir tozu kullanılan GAD serisinde şekil değıştirme kapasitesi %0,55 gibi yüksek bir değere ulaşmıştır.

4.2.5 Radyasyon Zırhlama Özellikleri

UHPC malzemesinin radyasyon zırhlama özellikleri, TS EN 61331-1'e [119] göre, dar demet geometrisi koşulu ile Türkiye Atom Enerji Kurumuna (TAEK) bağı olan Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM) radyasyon geçirgenlik test laboratuvarında hazırlanan deney düzeneğı ile belirlenmiştir. Radyasyon geçirgenlik test laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerde, tüm deney parametrelerin etkisini inceleyebilecek şekilde Çizelge 3.7'de gösterildiğı gibi seçilen 15 farklı UHPC serisinde ve basınç dayanım sınıfı C30/37 olan geleneksel ağır beton numunesinde radyasyon zırhlama özellikleri belirlenmiştir. UHPC malzemesinin X-ışını ve gama radyasyon zırhlama özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesinden sonra, yukarıda verilen seriler için radyasyon zırhlama özellikleri Amerika Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü (NIST)'nün Berger ve Hubbel'e [118] hazırlattığı XCOM adlı web bilgisayar programı yardımıyla teorik olarak hesaplanmıştır.

4.2.5.1 Deneysel Hesaplanan Lineer ve Kütle Zayıflatma Katsayıları

UHPC malzemesinin X-ışını ve gama radyasyonu için lineer ve kütle zayıflatma katsayısının deneysel olarak belirlenmesi amacıyla ÇNAEM radyasyon geçirgenlik test laboratuvarında hazırlanan deney düzeneğinde, 0,200 MeV enerjili X-ışını kaynağı ile 0,662 MeV enerjili sezyum (¹³⁷Cs) ve 1,250 MeV enerjili kobalt (⁶⁰Co) radyoizotopları olmak üzere 3 farklı enerji kaynağı kullanılmıştır. Lineer ve kütle zayıflatma katsayıları Bölüm 3.7.1.2 ve 3.7.1.2'de detaylı olarak açıklandığı gibi, 90°C'de 48 saat boyunca buhar kür uygulanan serilerde 7. günde ve 20±2 °C su içerisinde kür uygulanan

serilerde 90. günde yapılan radyasyon geçirgenlik deneyi ile Denklem 3.4 ve 3.5 yardımıyla hesaplanmış ve deney sonuçları Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Deneysel olarak hesaplanan lineer zayıflatma katsayıları (μ , cm^{-1})

Kod	0,200 MeV	0,662 MeV	1,250 MeV
REF-18-2-B	0,371	0,174	0,115
REF-24-2-B	0,378	0,178	0,118
REF-36-2-B	0,352	0,168	0,111
GAD-18-1-B	0,527	0,226	0,147
GAD-18-2-B	0,534	0,229	0,148
GAD-18-3-B	0,533	0,227	0,148
GAD-18-2-S	0,529	0,226	0,148
GAD-24-2-S	0,555	0,247	0,160
GAD-24-2-B	0,574	0,244	0,162
GAD-36-2-S	0,597	0,254	0,163
GAD-36-2-B	0,604	0,250	0,163
GAD-36-3-B	0,610	0,256	0,166
BAR-18-2-B	0,792	0,215	0,139
BAR-24-2-B	0,893	0,233	0,149
BAR-36-2-B	0,998	0,244	0,155
Ağır Beton	0,976	0,243	0,158

Çizelge 4.2 Deneysel olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları (μ_m , cm^2/g)

Kod	0,200 MeV	0,662 MeV	1,250 MeV
REF-18-2-B	0,161	0,075	0,050
REF-24-2-B	0,162	0,076	0,050
REF-36-2-B	0,152	0,073	0,048
GAD-18-1-B	0,168	0,072	0,047
GAD-18-2-B	0,168	0,072	0,047
GAD-18-3-B	0,166	0,071	0,046
GAD-18-2-S	0,166	0,071	0,046
GAD-24-2-S	0,160	0,071	0,046
GAD-24-2-B	0,166	0,071	0,047
GAD-36-2-S	0,162	0,069	0,044
GAD-36-2-B	0,164	0,068	0,044
GAD-36-3-B	0,165	0,069	0,045
BAR-18-2-B	0,270	0,073	0,047
BAR-24-2-B	0,287	0,075	0,048
BAR-36-2-B	0,304	0,074	0,047
Ağır Beton	0,286	0,071	0,046

Çizelge 4.1’de verilen sonuçlar incelendiğinde, lineer zayıflatma katsayısı foton enerjisinin şiddeti arttıkça azalmakta ve ağır agrega kullanılmasıyla artmaktadır. Özellikle 0,200 MeV enerjide barit agregası kullanılan BAR serilerinde lineer zayıflatma katsayısı en yüksek değere ulaşmaktadır. Ayrıca, BAR serilerine göre daha yüksek agrega hacmine sahip olan ve barit agregası ile üretilen daha yoğun geleneksel ağır betonun lineer zayıflatma katsayısı da UHPC prensibiyle üretilen BAR serilerinden daha düşüktür. Böylelikle UHPC malzemesinin daha az yoğun olmasına rağmen homojenliğinin radyasyon zırlama özelliğine olumlu katkı yaptığı görülmektedir. Lineer zayıflatma katsayısı 0,662 MeV ve 1,250 MeV gibi daha yüksek foton enerjilerinde ise granüle atık demir tozu kullanılan GAD serilerinde en yüksek değere ulaşmıştır. UHPC malzemesinin agrega tipi, çelik lif oranı ve s/b oranı gibi malzeme ve kür tipi gibi üretim parametrelerinin lineer zayıflatma katsayısına etkisi Bölüm 4.2.5.5’te detaylı olarak irdelenecektir.

Literatürde kütle zayıflatma katsayısı, aynı yoğunluğa sahip malzemelerin soğurma özelliklerinin karşılaştırılması amacıyla kullanılmaktadır. Kütle zayıflatma katsayısı, malzemenin elemental kompozisyonuna ve yoğunluğuna bağlıdır [135]. Çizelge 4.2’de verilen sonuçlar incelendiğinde, lineer zayıflatma katsayısının malzemenin yoğunluğuna oranlanmasıyla bulunan kütle zayıflatma katsayısı, 0,200 MeV gibi düşük foton enerjisinde granüle atık demir tozuna göre daha düşük yoğunluğa sahip olan barit agregalı BAR serilerinde daha yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Ancak 0,662 MeV ve 1,250 MeV gibi daha yüksek enerjilerde kütle zayıflatma katsayısı, bütün agrega tipleri için yaklaşık aynı değerdedir.

4.2.5.2 Teorik Hesaplanan Lineer ve Kütle Zayıflatma Katsayıları

UHPC serilerinde ve barit agregalı geleneksel ağır beton numunesinde lineer ve kütle zayıflatma katsayılarının teorik olarak belirlenmesi amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan XCOM adlı web bilgisayar programı kullanılmıştır. XCOM adlı web bilgisayar programına karışımların Çizelge 3.9’da verilen oksit cinsinden element bileşenleri ve bunların ağırlıkça yüzdeleri girilerek kütle zayıflatma katsayıları belirlenmiş ve her bir malzemenin yoğunluğuyla çarpılarak lineer zayıflatma katsayıları teorik olarak hesaplanmış ve deney sonuçları Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Teorik olarak hesaplanan lineer zayıflatma katsayıları (μ , cm^{-1})

Kod	0,200 MeV	0,662 MeV	1,250 MeV
REF-18-2-B	0,304	0,187	0,138
REF-24-2-B	0,300	0,186	0,137
REF-36-2-B	0,296	0,183	0,135
GAD-18-1-B	0,414	0,244	0,180
GAD-18-2-B	0,417	0,245	0,180
GAD-18-3-B	0,419	0,246	0,181
GAD-18-2-S	0,418	0,246	0,181
GAD-24-2-S	0,452	0,263	0,194
GAD-24-2-B	0,449	0,261	0,192
GAD-36-2-S	0,481	0,277	0,204
GAD-36-2-B	0,479	0,275	0,202
GAD-36-3-B	0,489	0,283	0,208
BAR-18-2-B	0,617	0,230	0,164
BAR-24-2-B	0,705	0,243	0,173
BAR-36-2-B	0,791	0,253	0,179
Ağır Beton	0,825	0,280	0,199

Çizelge 4.4 Teorik olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları (μ_m , cm^2/g)

Kod	0,200 MeV	0,662 MeV	1,250 MeV
REF-18-2-B	0,132	0,081	0,060
REF-24-2-B	0,128	0,079	0,059
REF-36-2-B	0,128	0,079	0,058
GAD-18-1-B	0,132	0,078	0,057
GAD-18-2-B	0,131	0,077	0,057
GAD-18-3-B	0,130	0,076	0,056
GAD-18-2-S	0,131	0,077	0,057
GAD-24-2-S	0,130	0,076	0,056
GAD-24-2-B	0,130	0,076	0,056
GAD-36-2-S	0,130	0,075	0,055
GAD-36-2-B	0,130	0,075	0,055
GAD-36-3-B	0,132	0,076	0,056
BAR-18-2-B	0,211	0,078	0,056
BAR-24-2-B	0,227	0,078	0,056
BAR-36-2-B	0,241	0,077	0,055
Ağır Beton	0,242	0,082	0,058

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’te verilen teorik olarak hesaplanan lineer ve kütle zayıflatma katsayıları incelendiğinde, deneysel olarak hesaplanan sonuçlarla benzer eğilimde olduğu görülmekte ve deneysel hesaplamaların doğruluğunu desteklemektedir. Lineer

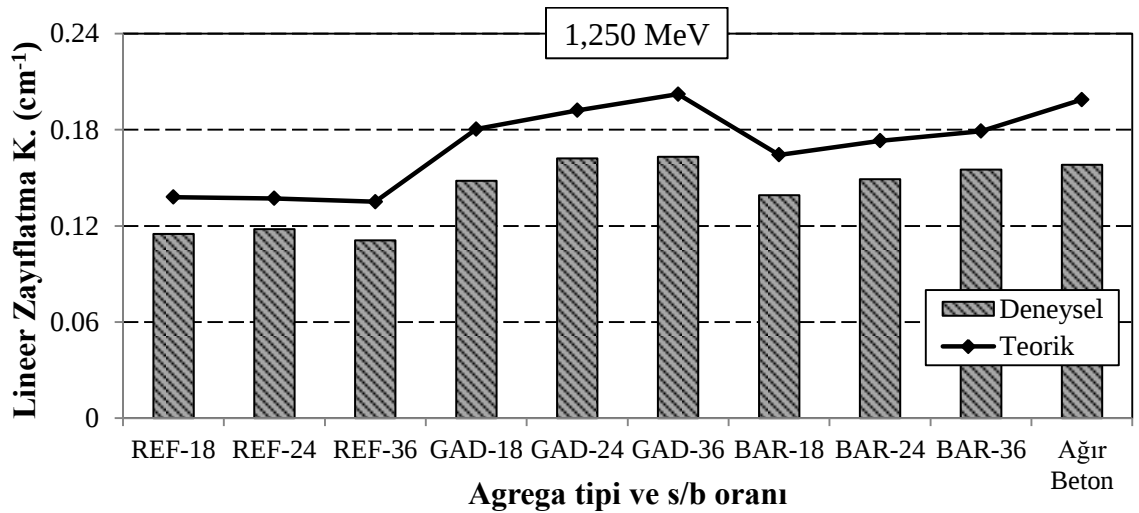
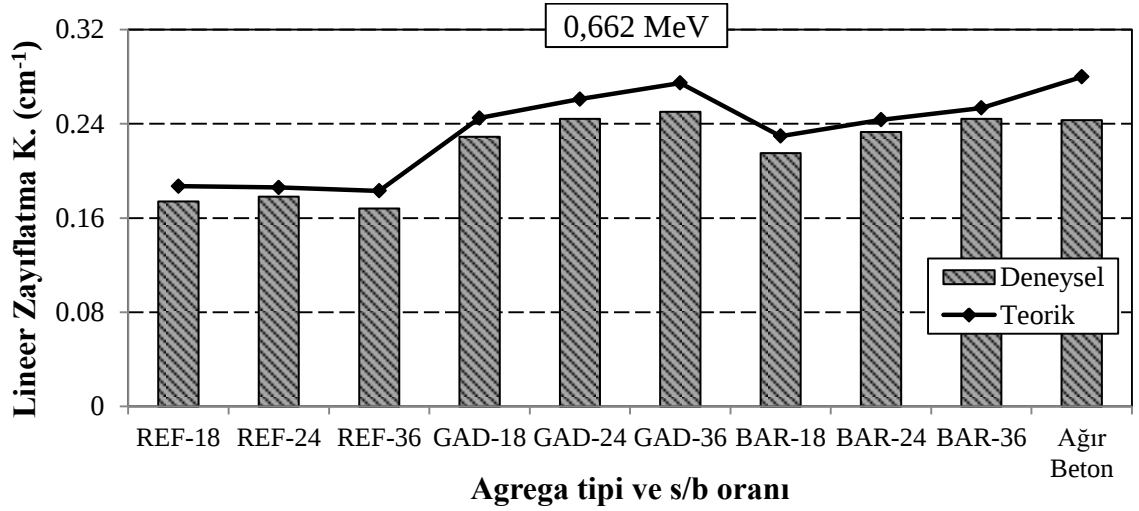
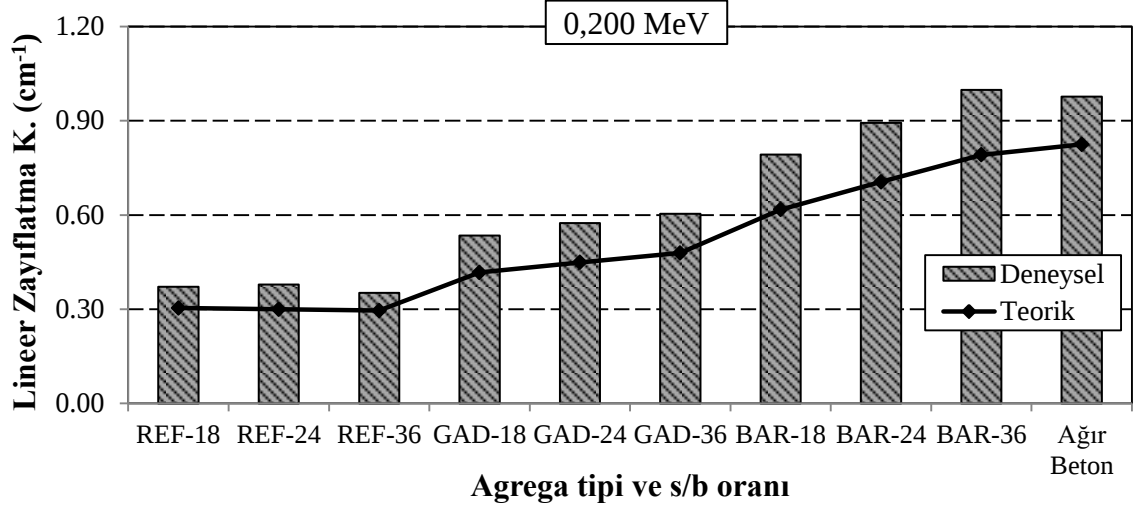
zayıflatma katsayısının deneysel ve teorik hesaplanan değerleri, bir sonraki bölümde aynı şekil üzerinde verilerek detaylı olarak karşılaştırılması yapılmıştır.

4.2.5.3 Deneysel ve Teorik Olarak Hesaplanan Lineer Zayıflatma Katsayılarının Karşılaştırılması

3 farklı yoğunlukta agrega ve 3 farklı s/b oranı ile üretilen UHPC numunelerinde 0,200 MeV, 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerjileri kullanılarak yapılan radyasyon geçirgenlik deneyleri sonucu hesaplanan lineer zayıflatma katsayıları ve aynı enerjiler için XCOM bilgisayar programı ile hesaplanan teorik lineer zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayıları 0,200 MeV, 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerjileri için sırasıyla Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Bu şekillerde, UHPC malzemesinin radyasyon zırhlama özelliklerine çelik lif oranı ve uygulanan kür tipinin etkisi olmadığı için sadece %2 çelik lif içeriği ve buhar kürü uygulanan serilerin değerleri karşılaştırılmıştır. Deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayıları literatürde diğer çalışmalarda olduğu gibi [91],[136],[137] benzer sonuçlar almıştır. Deneysel lineer zayıflatma katsayısı, 0,200 MeV enerji değerinde teorik olarak hesaplanan değerden daha fazla olmasına rağmen 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerjilerinde daha düşüktür. Ancak deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayıları arasındaki bağıl fark %5 ila %22 arasında değişmektedir. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayıları arasındaki bağıl farkın ± 20 olabileceği ve bunun nedeni olarak deneysel kurulum ve ölçüm hatalarının olabileceği şeklinde ifade edilmiştir [136],[137].

0,200 MeV enerji için Şekil 4.21'de verilen lineer zayıflatma katsayıları incelendiğinde, deneysel ölçüm sonuçlarının teorik hesaplanan sonuçlara göre sırasıyla REF, GAD ve BAR serilerinde %18,3, %20,6 ve %21,3 arttığı görölmüştür. En yüksek lineer zayıflatma katsayı 0.998 cm^{-1} değeri ile BAR-36 serisinde görölmüştür. 0,662 MeV enerji için Şekil 4.22'de verilen lineer zayıflatma katsayıları incelendiğinde, deneysel ölçüm sonuçlarının teorik hesaplanan sonuçlara göre sırasıyla REF, GAD ve BAR serilerinde %6,9, %8,3 ve %5,0 azaldığı görölmüştür. En yüksek lineer zayıflatma katsayı 0.250 cm^{-1} değeri ile GAD-36 serisinde görölmüştür. 1,250 MeV enerji için Şekil 4.23'te verilen lineer zayıflatma katsayıları incelendiğinde, deneysel ölçüm sonuçlarının teorik hesaplanan sonuçlara göre sırasıyla REF, GAD ve BAR serilerinde

%19,3, %22,5 ve %16,6 azaldığı görülmüştür. En yüksek lineer zayıflatma katsayı 0,163 cm⁻¹ değeri ile GAD-36 serisinde görülmüştür.



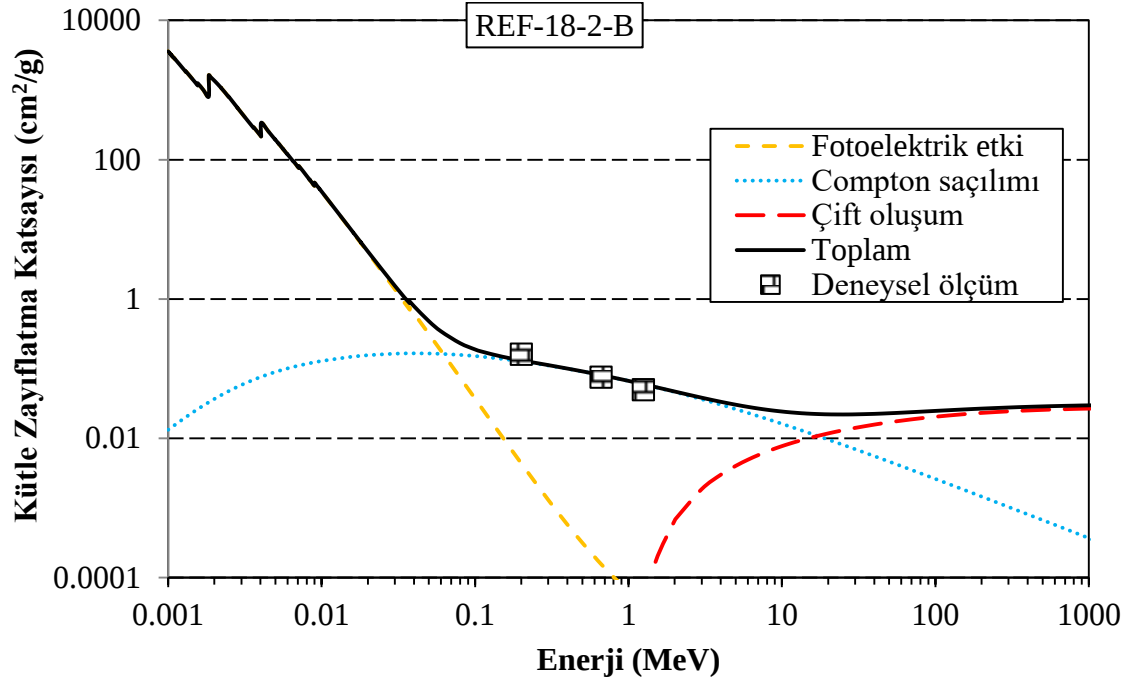
4.2.5.4 Deneyisel ve Teorik Hesaplanan Kütle Zayıflatma Katsayılarının Karşılaştırılması

Radyasyon geçirgenlik deneyi ile lineer zayıflatma katsayısının belirlendiği tüm serilerde, XCOM bilgisayar programı vasıtasıyla 1 KeV – 1000 MeV arasındaki tüm enerjiler için fotoelektrik etki, Compton Saçılımı, çift oluşumu ve bu üçünün toplamı kütle zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan teorik kütle zayıflatma katsayılarının gösterildiği enerji - kütle zayıflatma katsayısı eğrileri REF, GAD, BAR ve Ağır beton karışımları arasında en iyi performans gösteren seriler için sırasıyla Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Bu enerji - kütle zayıflatma katsayısı eğrilerine 0,200 MeV, 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerji değerleri için deneysel olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları da karşılaştırma amacıyla eklenmiştir. Teorik ve deneysel olarak elde edilen kütle zayıflatma katsayılarının birbirleriyle uyum sağlamakta olduğu görülmektedir.

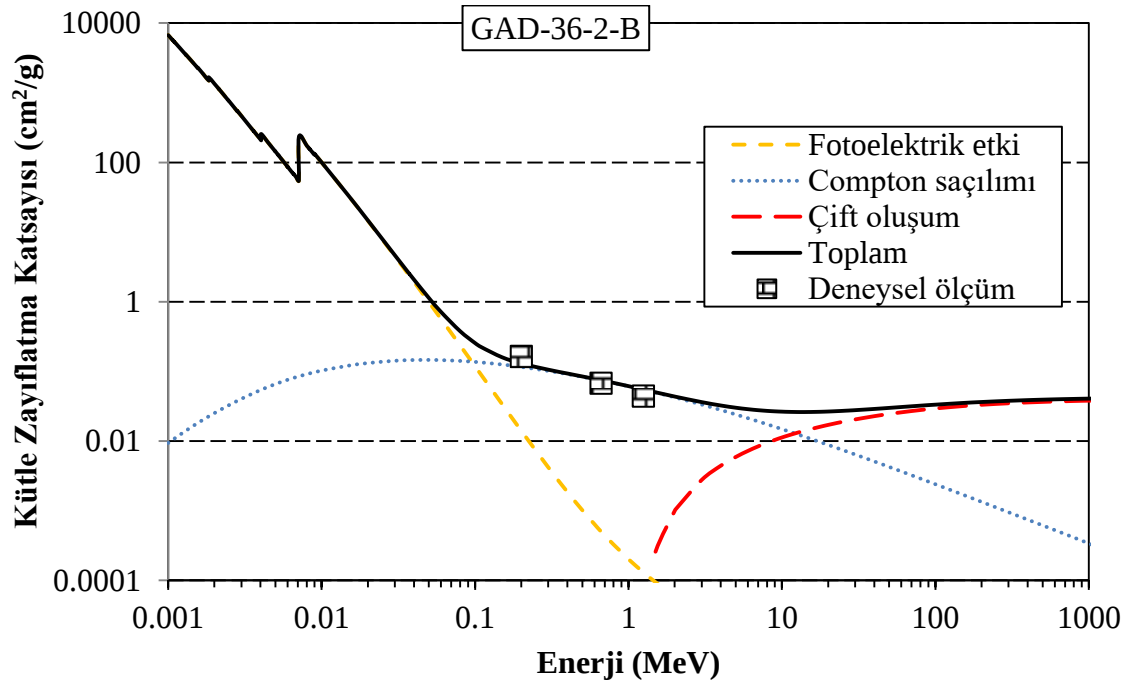
Şekillerde verilen enerji - kütle zayıflatma katsayısı eğrileri incelendiğinde, kütle zayıflatma katsayılarının farklı enerji aralıklarındaki değişim karakteristiklerinin birbirinden tamamen ayrı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, farklı enerji bölgelerinde, foton ışınlarıyla malzemeyi oluşturan elementler arasındaki farklı etkileşme mekanizmalarının baskın olmasıdır. Literatürde de belirtildiği gibi, düşük foton enerjisi değerlerinde ($< 0,1$ MeV) fotoelektrik etkileşme, orta seviyedeki enerjilerde (0,1 MeV - 1 MeV arası) Compton saçılımı etkileşmesi ve yüksek enerjilerde ($>1,022$ MeV) çift oluşum olayı baskındır [77],[79]. Belirtilen farklı enerji değerlerinde, farklı etkileşimlerin olması malzemeyi oluşturan elementlerin atom numarası (Z) ve malzemenin yoğunluğu ile ilgilidir. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’te sırasıyla REF ve GAD serileri için verilen enerji - kütle zayıflatma katsayısı eğrilerinde, toplam kütle zayıflatma katsayısı 0,100 MeV değerine kadar hızla azalmıştır. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de sırasıyla BAR ve ağır beton serilerde ise toplam kütle zayıflatma katsayısı 0,400 MeV değerine kadar hızla azalmıştır. Bu değerlerden sonra, tüm şekillerde foton enerjisinin artmasıyla kütle zayıflatma katsayısı çok az değiştiği görülmektedir.

Bu şekillerde dikkat çeken bir diğer sonuç ise, Şekil 4.24’te REF serisine ait enerji - kütle zayıflatma katsayısı eğrisinde dikkat çeken önemli bir süreksizlik oluşmamıştır. Ancak Şekil 4.25’te GAD serisine ait eğride fotoelektrik bölgede görülen süreksizlik

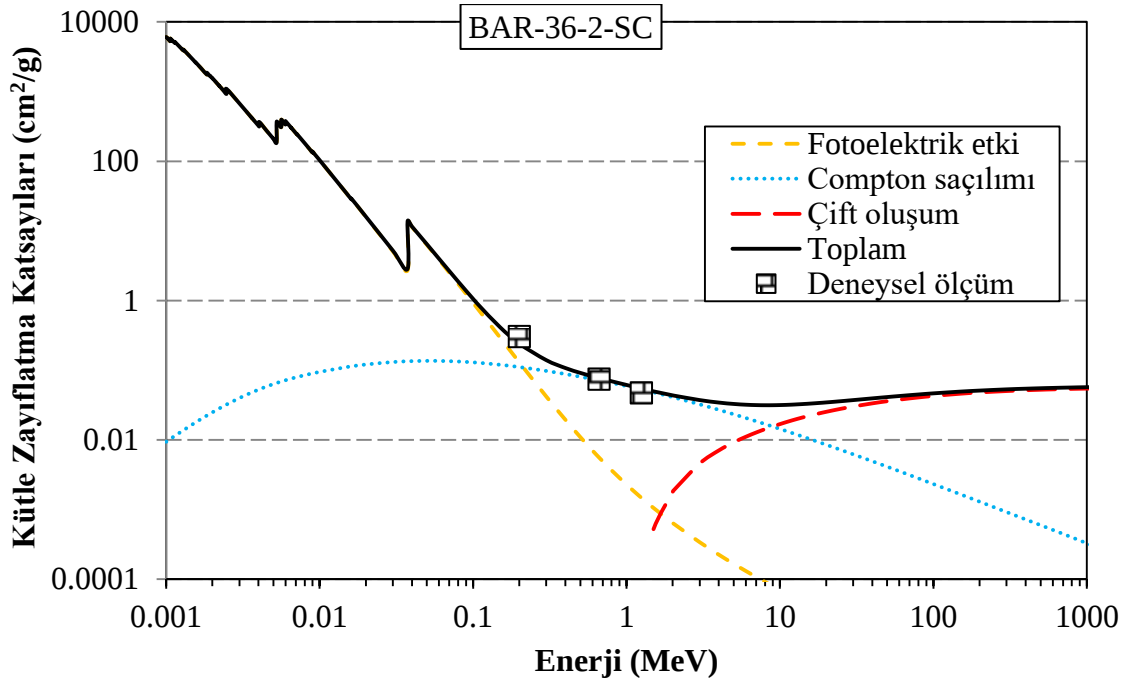
karışım içerisindeki demirin ($Z=26$) zayıflatma etkisinden kaynaklanmaktadır ve $6,5 \times 10^3$ MeV’de oluşmuştur.



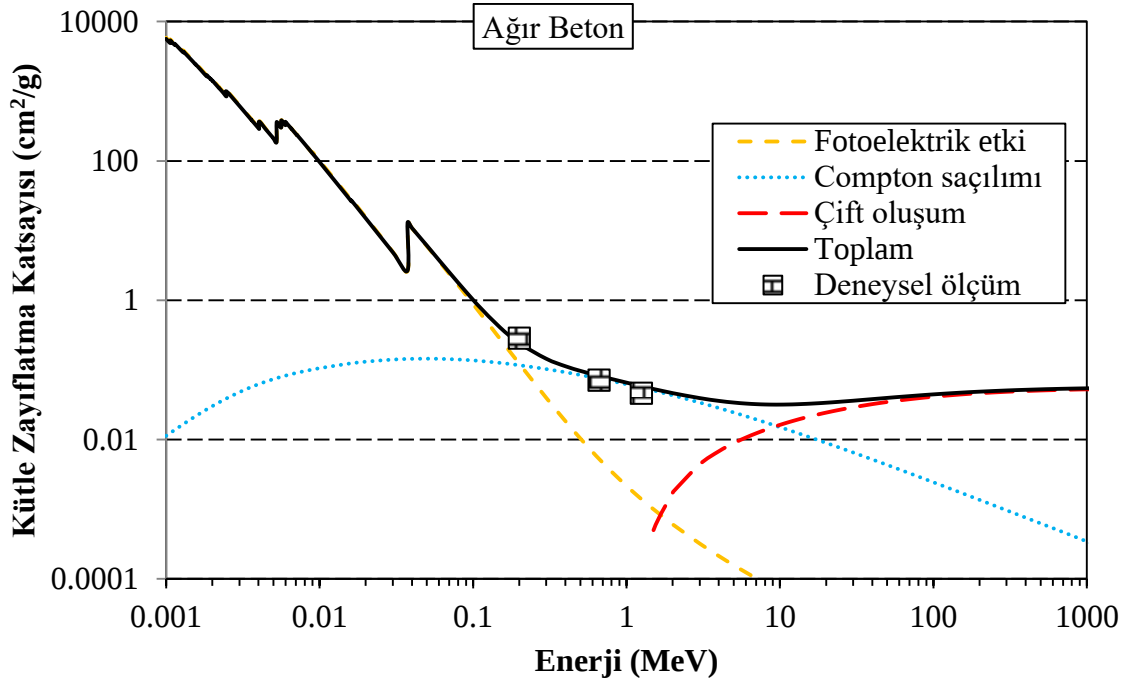
Şekil 4.24 REF-18-2-B serisi için deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayıları



Şekil 4.25 GAD-36-2-B serisi için deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayıları



Şekil 4.26 BAR-36-2-B serisi için deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayıları



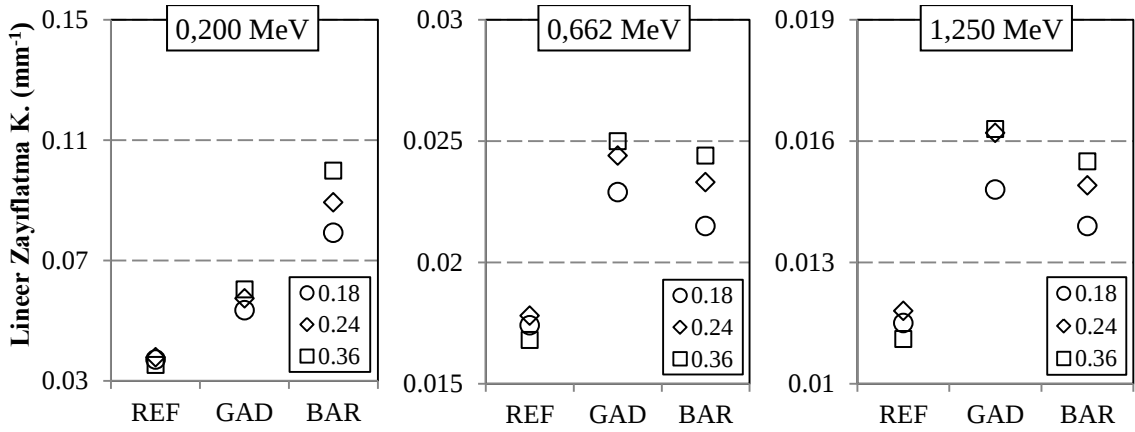
Şekil 4.27 Ağır Beton için deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayıları

Diğer yandan BAR ve ağır betonlar için verilen eğrilerde (Şekil 4.26 ve Şekil 4.27) fotoelektrik etki bölgesinde kaynaklanan süreksizlikler de oldukça belirgindir. Bu süreksizlikler karışımların kimyasal içeriğindeki baryum (Ba, $Z=56$) ağır metalinin bulunmasının sonucudur. Her seri için de görülen bu süreksizlikler $3,74 \times 10^2$ MeV değerinde ortaya çıkmaktadır. Esasen, tüm karışımların içeriğinde bulunan ağır

elementler nedeniyle süreksizlikler oluşmaktadır. Ancak ağır elementlerin oranının az olmasından dolayı zayıflatma katsayılarında oluşabilecek süreksizlikler grafik üzerinde ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

4.2.5.5 Karışım Parametrelerinin Lineer Zayıflatma Katsayısına Etkisi

UHPC üretiminde kullanılan 3 farklı agrega tipi (REF, GAD, BAR), 3 farklı s/b oranı (0,18, 0,24 ve 0,36), 3 farklı lif içeriği (%1, %2 ve %3) ve kür tipi gibi tasarım parametrelerinin 0,200 MeV, 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerji değerlerinde lineer zayıflatma katsayısına etkisi incelenmiş ve Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir.

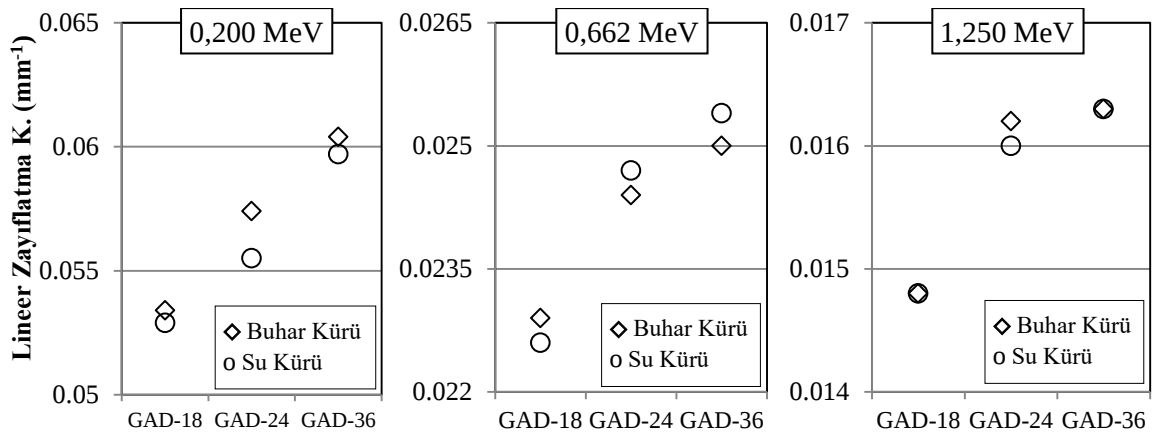


Şekil 4.28 %2 çelik lifli UHPC numunelerinin lineer zayıflatma katsayısına agrega tipinin ve s/b oranının etkisi

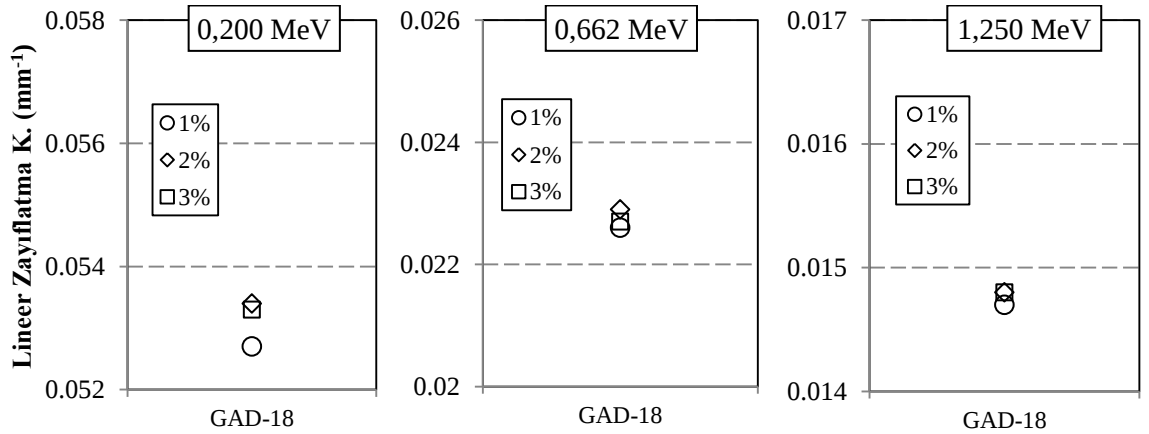
Bilindiği üzere, lineer zayıflatma katsayısı agrega tipi ve s/b oranının değişiminden oldukça etkilenmektedir (Şekil 4.28). 0,200 MeV enerji değerinde, barit agregalı BAR serisinin lineer zayıflatma katsayısı en yüksek değere ulaşmış olmasına rağmen 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerji değerlerinde GAD serisi daha yüksek değer almıştır. Bunun nedeni tamamen Şekil 2.10'da [77] gösterildiği gibi zırhlama malzemesinin atom numarasına ve radyasyonun enerjisine göre fotonların madde ile etkileşmelerinin değişmesidir. Bu nedenle, 0,200 MeV gibi düşük enerji değerlerinde, atom numarası yüksek olan (Barit, Z=56) malzemeler daha etkin zırhlama performansı göstermesine rağmen 0,662 MeV ve 1,250 MeV gibi orta enerji değerlerinde atom numarası düşük olan malzemeler (Demir, Z=26) daha etkin zırhlama performansı göstermektedir [74]. Karışımlarda toplam karışım suyu miktarı sabit tutulduğu için, s/b oranının artmasıyla karışım içinde bulunan agrega hacmi artmaktadır. Bu nedenle, s/b

oranının artmasıyla zırhlama özelliği olan agregaların kullanıldığı serilerin lineer zayıflatma katsayılarının arttığı sonucu Şekil 4.28’de görülmüştür. Ancak silis kumu ve kuvars tozunun zırhlama performansına bir etkisi olmadığı için, REF serisinde s/b oranının değişmesi tüm enerji değerleri için lineer zayıflatma katsayısına bir etki yapmadığı görülmüştür.

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da ise UHPC malzemesinin lineer zayıflatma katsayısına farklı kür uygulamalarının ve çelik lif oranının etkisi gösterilmiştir. Lineer zayıflatma katsayısı, kür tipinden ve çelik lif oranından belirgin bir şekilde etkilenmediği görülmektedir.



Şekil 4.29 %2 çelik lifli UHPC numunelerin lineer zayıflatma katsayısına kür tipinin etkisi



Şekil 4.30 %2 çelik lifli UHPC numunelerinin lineer zayıflatma katsayısına lif oranının etkisi

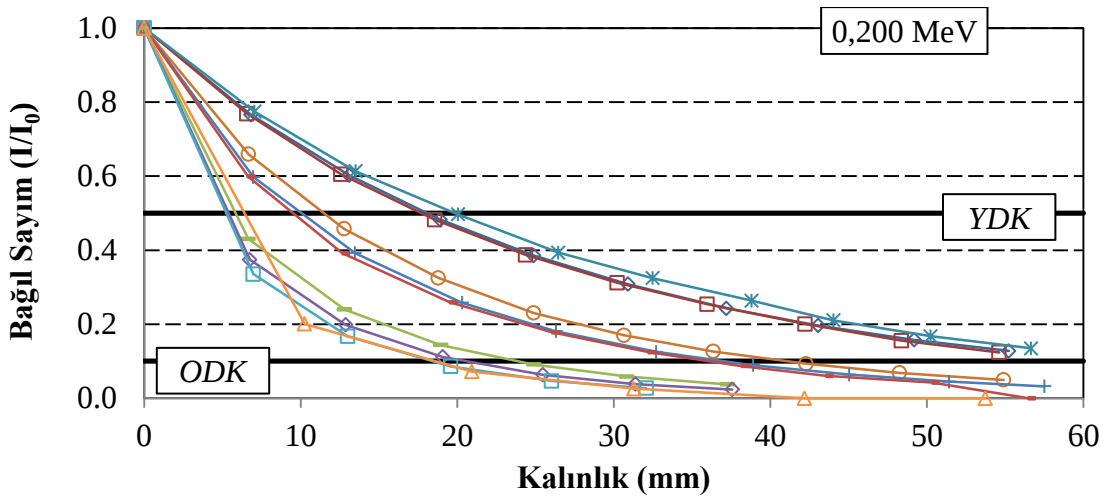
4.2.5.6 Yarı Değer ve Onda-Bir Değer Kalınlıkları

Yarı değer (YDK) ve onda-bir değer kalınlıkları (ODK), gelen foton enerjisinin şiddetinin yarıya ve onda birine düşürmesi için gerekli olan malzeme kalınlığıdır. Radyasyon zırhlama özelliği olan malzemelerin etkinliğini ifade etmek için yarı değer ve onda-bir değer kalınlıkları yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, çoğu radyoizotopun özellikleri belirtilirken, kurşun malzemesi için yarı ve onda-bir değer değer kalınlıkları da ifade edilmektedir. Radyasyon etkileşimi sonrası foton enerjinin gelen foton enerjisine oranının zırhlama malzemesinin kalınlığıyla olan ilişkisi 0,200 MeV, 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerji değerleri için sırasıyla Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te verilmiştir. Yarı değer (YDK) ve onda-bir değer kalınlıkları (ODK) farklı enerjiler için hesaplanmış ve Çizelge 4.5'te verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.5'te, radyasyon zırhlamasında yaygın olarak kullanılan kurşun için 0,200 MeV, 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerji değerlerinde literatürde mevcut olan yarı değer ve onda-bir değer kalınlıkları da karşılaştırma amacıyla verilmiştir.

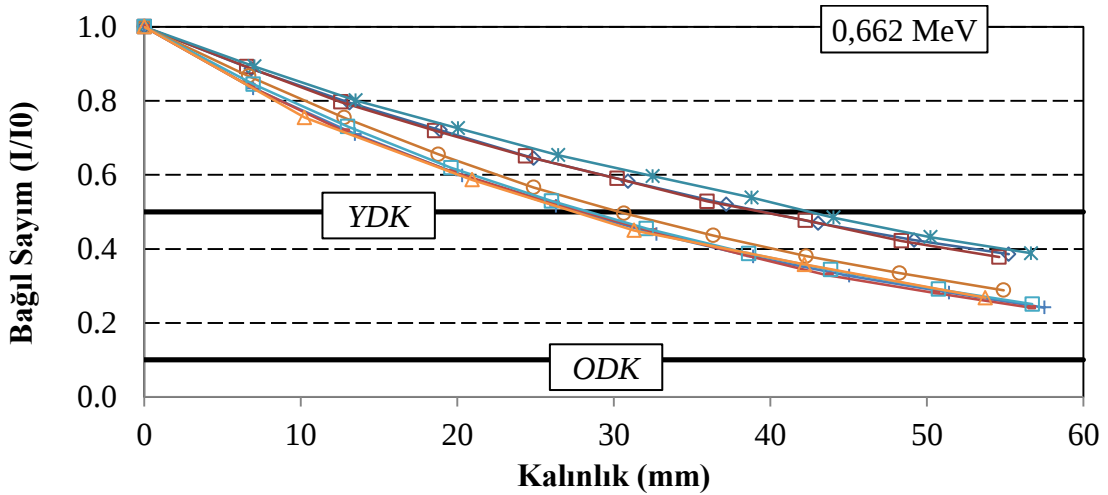
0,200 MeV enerji değerinde, yarı değer ve onda-bir değer kalınlıkları sırasıyla 6,9 mm ve 23,1 mm değeri ile en düşük BAR-36 serisi için hesaplanmıştır. Kurşunun, aynı enerji değerinde yarı değer ve onda-bir değer kalınlıkları ise sırasıyla 1,4 mm ve 4,8 mm'dir. 0,200 MeV enerji değerinde, en düşük yarı değer ve onda-bir değer kalınlıklarına sahip olan UHPC serinin yaklaşık 4 kat daha fazla kalınlıkla kurşun malzemesinin zırhlama performansına eşdeğer bir zırhlamaya sahip olabileceği belirlenmiştir. 0,200 MeV enerji değerinde, tüm agrega tipleri için 20 mm kalınlık radyasyon şiddetini yarıya indirdiği ve 62 mm kalınlık ise onda-bir değerine düşürdüğü görülmektedir.

0,662 MeV enerji değerinde, yarı değer ve onda-bir değer kalınlıkları sırasıyla 27,7 mm ve 92,1 mm değeri ile en düşük GAD-36 serisi için hesaplanmıştır. Kurşunun, aynı enerji değerinde yarı değer ve onda-bir değer kalınlıkları ise sırasıyla 7,9 mm ve 24 mm'dir. 0,662 MeV enerji değerinde, en düşük yarı değer ve onda-bir değer kalınlıklarına sahip olan UHPC serinin yaklaşık 2,7 kat daha fazla kalınlıkla kurşun malzemesinin zırhlama performansına eşdeğer bir zırhlamaya sahip olabileceği belirlenmiştir. 0,662 MeV enerji değerinde, tüm agrega tipleri için 40 mm kalınlık radyasyon şiddetini yarıya indirdiği ve 132 mm kalınlık ise onda-bir değerine düşürdüğü görülmektedir.

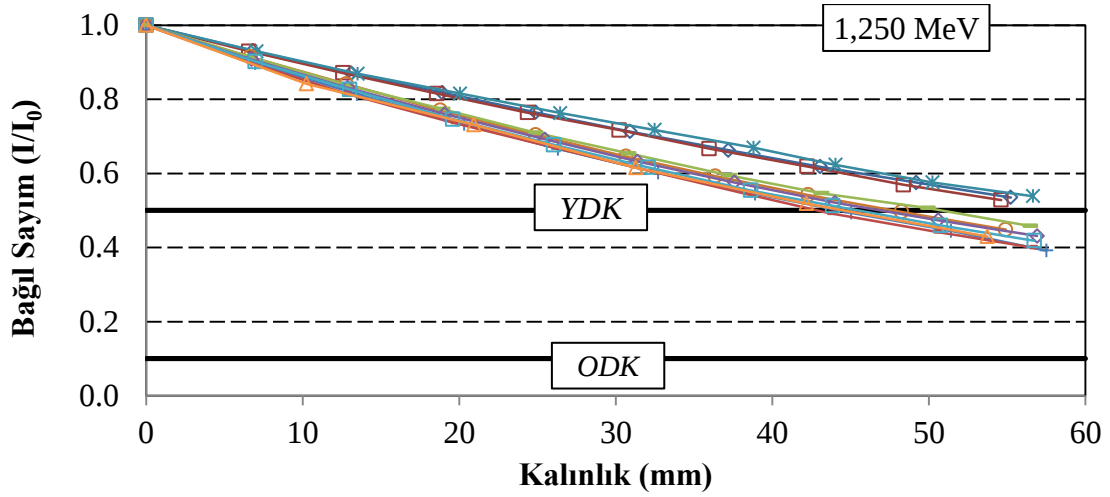
1,250 MeV enerji değerinde, yarı değer ve onda-bir değer kalınlıkları sırasıyla 42,5 mm ve 141,2 mm değeri ile en düşük GAD-36 serisi için hesaplanmıştır. Kurşunun, aynı enerji değerinde yarı değer ve onda-bir değer kalınlıkları ise sırasıyla 12,4 mm ve 41,0 mm'dir. 1,25 MeV enerji değeri için, en düşük yarı değer ve onda-bir değer kalınlıklarına sahip olan UHPC serinin yaklaşık 2,4 kat daha fazla kalınlıkla kurşun malzemesinin zırhlama performansına eşdeğer bir zırhlamaya sahip olabileceği belirlenmiştir. 1,250 MeV enerji değerinde, tüm agrega tipleri için 60 mm kalınlık radyasyon şiddetini yarıya indirdiği ve 200 mm kalınlık ise onda bir değerine düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 4.31 0,200 MeV enerjili X ışını kaynağı için yarı ve onda-bir değer kalınlıkları



Şekil 4.32 0,662 MeV enerjili ^{137}Cs izotop kaynağı için yarı ve onda-bir değer kalınlıkları



Şekil 4.33 1,250 MeV enerjili ^{60}Co izotop kaynağı için yarı ve onda-bir değer kalınlıkları

Çizelge 4.5 Yarı değer (YDK) ve onda-bir değer kalınlıkları (ODK)

Karışımlar	Yoğunluk (g/cm ³)	0.200 MeV		0.662 MeV		1.25 MeV	
		YDK (cm)	ODK (cm)	YDK (cm)	ODK (cm)	YDK (cm)	ODK (cm)
REF-18-2-B	2,31	1,9	6,2	4,0	13,2	6,0	20,0
REF-24-2-B	2,34	1,8	6,1	3,9	12,9	5,9	19,5
REF-36-2-B	2,32	2,0	6,5	4,1	13,7	6,2	20,7
GAD-18-1-B	3,15	1,3	4,4	3,1	10,2	4,7	15,7
GAD-18-2-B	3,18	1,3	4,3	3,0	10,1	4,7	15,6
GAD-18-3-B	3,21	1,3	4,3	3,1	10,1	4,7	15,6
GAD-18-2-S	3,19	1,3	4,4	3,1	10,2	4,7	15,6
GAD-24-2-S	3,47	1,2	4,1	2,8	9,3	4,3	14,4
GAD-24-2-B	3,45	1,2	4,0	2,8	9,4	4,3	14,2
GAD-36-2-S	3,69	1,2	3,9	2,7	9,1	4,3	14,1
GAD-36-2-B	3,68	1,1	3,8	2,8	9,2	4,3	14,1
GAD-36-3-B	3,71	1,1	3,8	2,7	9,0	4,2	13,9
BAR-18-2-B	2,93	0,9	2,9	3,2	10,7	5,0	16,6
BAR-24-2-B	3,11	0,8	2,6	3,0	9,9	4,7	15,4
BAR-36-2-B	3,28	0,7	2,3	2,8	9,4	4,5	14,9
Ağır Beton	3,41	0,7	2,4	2,9	9,5	4,4	14,6
Kurşun [91][138]	11,34	0,14	0,48	0,79	2,40	1,24	4,10

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ VE KARIŞIMLARIN OPTİMİZASYONU

UHPC malzemesinin taze haldeki reolojik ve sertleşmiş haldeki fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama özellikleri, farklı malzeme ve üretim parametrelerine sahip olan toplam 54 farklı UHPC karışımlarında belirlenmiştir. Bu bölümde, UHPC malzemesinin taze haldeki çökme-yayılma çapı ve V-hunisi akış süresi ile sertleşmiş haldeki birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve 3 farklı radyasyon enerjisindeki lineer zayıflatma katsayılarına karışım ve üretim parametrelerinin etkisinin ve öneminin incelenmesinde istatistiksel analiz yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca taze haldeki reolojik ve sertleşmiş haldeki fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama özellikleri açısından istenilen en uygun değerlerin elde edilebilmesi amacıyla malzeme ve üretim parametreleri açısından tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Deney sonuçlarının istatistiksel analiz ve tasarım optimizasyonu için Design Expert 9.0.5 [139] programında yer alan Tepki Yüzeyi Yöntemi (RSM-“Response Surface Methodology”) faktöriyel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle, bağımlı değişkenlerin modellenmesi ve analiz problemlerinde etkili olan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin kullanılması ile bağımlı değişkenler üzerinde tekli ve kombinasyon halinde bağımsız değişkenlerin etkilerini tanımlayabilecek matematiksel modeller üretilmiştir. Ayrıca belirlenen matematiksel modeller, optimizasyonda amaç fonksiyonu olarak tanımlanmış ve optimum sonuçları elde etmek için çeşitli matematiksel veya sayısal yaklaşımlar kullanılarak tasarım optimizasyonu yapılmıştır.

5.1 İstatistiksel Analizi

UHPC tasarımında, 3 farklı agrega tipi (REF, BAR ve GAD), 3 farklı su/bağlayıcı oranı (0,18, 0,24 ve 0,36) ve 3 farklı lif içeriği (%1, %2 ve %3) gibi karışım parametreleri ve farklı kür işlemleri (buhar kürü ve su kürü) gibi üretim parametreleri olmak üzere dört

farklı bağımsız değişken kullanılmıştır. Kullanılan bu bağımsız değişkenlere bağlı olarak elde edilen bağımlı değişkenler (çökme-yayılma çapı, V-hunisi akış süresi, birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve lineer zayıflatma katsayısı) arasında istatistiksel analizin yapılabilmesi için ilk olarak uygun istatistik modelin seçilmesi gerekmektedir. Daha sonra seçilen modele göre regresyon analizi yapılarak, bağımlı değişkenler bağımsız değişkenler cinsinden regresyon denklemi yardımı ile ifade edilmiştir.

5.1.1 Design Expert Programıyla Model Seçimi ve Regresyon Analizi

Design Expert paket programında model seçiminde ve bu uygun modele göre regresyon analizi yapılabilmesi için bağımsız (faktör) ve bağımlı (tepki) değişkenlerin programa tanıtılması gerekmektedir. Bu nedenle bağımsız değişkenlerden s/b oranı ve çelik lif oranı sayısal olarak, agrega tipi ve buhar kürü ise kategorik olarak programa tanıtılmıştır. Daha sonra bağımlı değişkenler olan çökme-yayılma çapı, V-hunisi akış süresi, birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve 0,200 MeV, 0,662 MeV ve 1,250 MeV için lineer zayıflatma katsayılarının deneysel sonuçları programa girilmiştir.

Design Expert paket programında model katsayılarının en doğru tahminlerini sağlamak için D-optimal kriterleri kullanılarak $\alpha=0,05$ anlamlılık seviyesinde varyans analizi (ANOVA-“Analysis of Variance”) yapılmıştır. Varyans analizi (ANOVA), bağımlı değişkenlerin tahmin edilen değerlerin istatistiksel olarak anlamlı farklılığın olup olmadığını tespit etmeye yönelik bir analiz tipidir. Ayrıca, ANOVA analizi bağımsız değişkenlerin kendi aralarında nasıl etkileşime girdiklerini ve bu etkileşimlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılmıştır. Çalışmada %95’lik güven aralığı kullanıldığından ANOVA tablosunda $p<0,05$ olması durumunda kurulan modelin anlamlı olduğu anlaşılmaktadır. Design Expert paket programında her bir bağımlı değişken için lineer model, 2FI (ikili bağımsız değişken etkileşimi), kuadratik ve kübik modeller analiz edilmiş ve en uygun model program tarafından seçilmiştir. Bu farklı modellerde bağımsız değişkenlerin nasıl kullanıldığı Çizelge 5.1’de verilmiştir. En iyi model türü program tarafından belirlendikten sonra modellere ait yüksek korelasyon katsayıları elde edilebilmesi amacıyla kullanılan bağımsız değişkenlerin seçilen model için anlamlılığı (p-değeri) varyans analizi (ANOVA) ile kontrol edilmiştir. Bağımsız değişkenlerin anlamlılığını belirten p-değeri 0,1’den büyükse

bağımsız değişkenin model üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı ve 0,05'ten küçükse bağımsız değişkenin model üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Böylece model üzerinde anlamlı etkiye sahip olmayan bağımsız değişkenler çıkarılarak varyans analizi tekrarlanmıştır. Ayrıca modelin yeterli ve tatmin edici düzeyde olduğu, seçilen model için hesaplanan standart sapma değerlerinin normal olasılık değerleri üzerinden kontrolü ile yapılmıştır. Standart sapma değerlerinin normal olasılık eğrisi üzerine çakışması modelin anlamlı ve kullanılabilir olduğunun diğer bir göstergesidir [140]. Modelin uygunluğunun kontrolü için kullanılan bir diğer yöntem ise ANOVA analizi sonucu model için hesaplanan varyasyon katsayısının değerinin seviyesidir. Varyasyon katsayısı, verilerin standart sapmasının ortalama değerine oranlanmasından yüzde olarak gösterilmesiyle hesaplanır. Bir modelin varyasyon katsayısı, % 10'dan fazla değilse, model kullanılabilir olduğu düşünülmektedir [140],[141]. Seçilen modelin uygunluğu kontrol edildikten sonra, UHPC malzemesinin tasarımında kullanılan malzeme ve üretim parametreleri gibi bağımsız değişkenler ile taze halde reolojik ve sertleşmiş halde fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama özellikleri gibi bağımlı değişkenlerin tahmin edilebilmesi için uygun modellere göre regresyon denklemleri belirlenmiştir.

Çizelge 5.1 Design Expert paket programında kullanılan modeller

Model	Bağımsız Değişkenlerin Kullanımı
Lineer	Bağımsız değişkenlerin tekli olarak kullanıldığı model (A, B, C gibi).
2FI (İkili etkileşim)	Bağımsız değişkenlerin tekli ve ikili olarak kullanıldığı model (AB, AB, AC gibi).
Kuadratik	Bağımsız değişkenlerin tekli, ikili olarak ve tekli terimlerin karelerinin de kullanıldığı model (AB, AC, BC, A ² , B ² , C ² gibi).
Kübik	Bağımsız değişkenlerin tekli, ikili, üçlü olarak kullanıldığı model (ABC, A ² B, A ² C, AB ² , A ³ , B ³ , C ³ gibi).

5.1.2 Taze UHPC Malzemesinin Deney Sonuçlarının Analizi

Taze haldeki UHPC malzemesinin özelliklerinin belirlemek amacıyla yapılan çökme-yayılmaya çapı ve V-hunisi akış süreleri üzerinde Design Expert paket programı

kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizinde taze haldeki UHPC malzemesinin özelliklerinin etkileyen agrega tipi, s/b oranı ve çelik lif oranı gibi bağımsız değişkenler kullanılmıştır.

5.1.2.1 Çökme-yayılma Deney Sonuçlarının Analizi

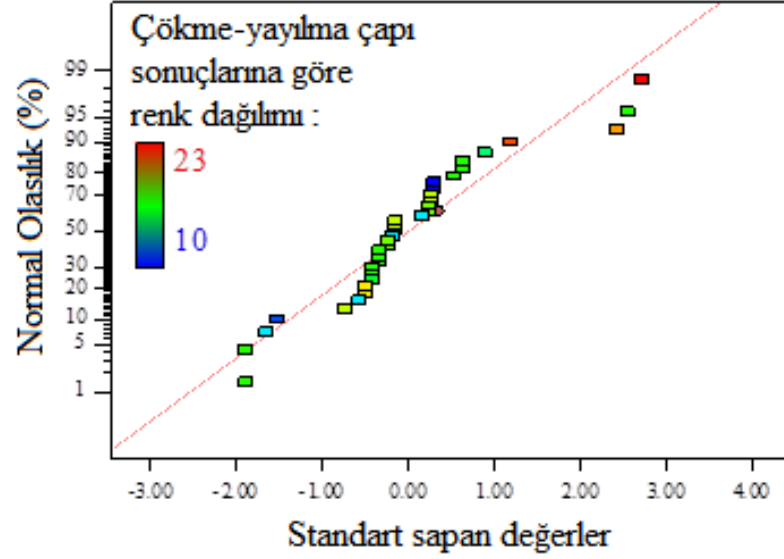
Çökme-yayılma deneyi sonuçları Design Expert paket programı ile istatistiksel olarak incelendiğinde, deney sonuçlarının tepki yüzey yöntemi ile analizin yapılabilmesi için en uygun regresyon modelinin kuadratik model olduğu belirlenmiştir. Seçilen modele ait varyans analizi (ANOVA) ile modelde yer alan bağımsız değişkenlerin modeldeki anlamlılık derecesi kontrol edilmiştir. Kuadratik modele ait ANOVA analizi Çizelge 5.2’de verilmiştir. Burada normal olasılık için % 95’ lik güven aralığında, s/b oranı (A), lif oranı (B), agrega tipi (C), s/b oranı x agrega tipi (AC) ve lif oranının karesi (B^2) etkileşimlerin p-değeri 0.05’ten küçük olması nedeniyle modele katkısının anlamlı olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.2 Çökme-yayılma sonuçlarının kuadratik modele göre ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	Katkı Yüzdesi (%)	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri Prob > F	Anlamlılık
Model	307,9	88,7	28,0	16,5	< 0,0001	Anlamlı
A-s/b oranı	101,4	29,2	101,4	59,7	< 0,0001	Anlamlı
B-lif oranı	105,8	30,5	108,2	63,7	< 0,0001	Anlamlı
C-Agrega tipi	8,6	2,5	4,8	2,8	0,0414	Anlamlı
AxB	4,1	1,2	4,5	2,6	0,1177	-
AxC	48,6	14,0	24,3	14,3	< 0,0001	Anlamlı
BxC	1,5	0,4	1,1	0,7	0,5209	-
A^2	1,9	0,6	1,9	1,1	0,2991	-
B^2	15,3	4,4	15,3	9,0	0,0064	Anlamlı

Anlamsız değişkenler modelden çıkarılarak daha düşük standart sapma ve daha yüksek R^2 değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.1’de UHPC malzemesinin çökme-yayılma çapı regresyon analizi ile hesaplanan standart sapma değerlerinin normal olasılık dağılımı verilmiştir. Burada verilen standart sapma değerlerinin normal olasılık eksenine göre bir doğru üzerinde yer alması istenen bir durumdur. Şekil incelendiğinde artıkların yaklaşık olarak doğru üzerinde yer aldığı görüldüğünden modelin normal dağılıma uygun olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Kuadratik modele göre elde edilen standart sapma ve R^2

değerleri sırasıyla 1,31 ve 0,88’dir. Ayrıca hesaplanan varyasyon katsayısı %7,6 olarak bulunmuş ve %10’nun altında kalmasıyla uygun olduğu belirlenmiştir. Bu durum, çökme-yayılma çapı için oluşturulan modelin bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi oldukça yüksek bir doğrulukla ifade ettiğini ve deneysel çalışma sonuçlarının genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

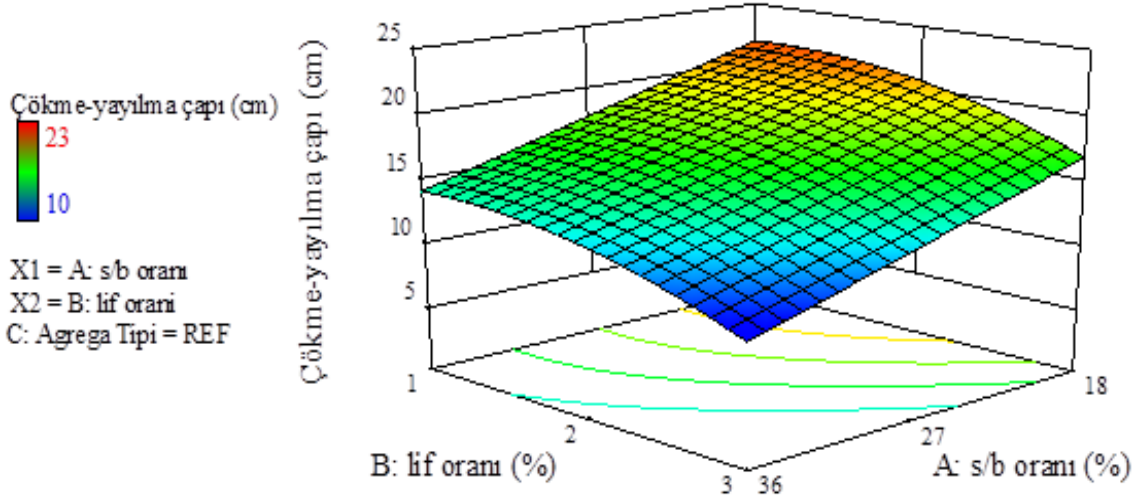


Şekil 5.1 Çökme-yayılma çapının normal olasılık dağılımı

Design Expert programı ile çökme-yayılma çapının kuadratik modele göre tahmin edilmesi için REF, GAD ve BAR agrega tipine göre oluşturulan regresyon denklemleri Çizelge 5.3’te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 5.2’de s/b oranı ve çelik lif oranına bağlı olarak değişimin en çok görüldüğü REF serisi için çökme-yayılma çapı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi verilmiştir. GAD ve BAR serileri için hazırlanan tepki yüzeyleri Ek C.1 ve C.2’de verilmiştir. Tüm serilerde s/b ve çelik lif oranının azalmasıyla çökme-yayılma çapı değerinin arttığı ve dolayısıyla UHPC malzemesinin işlenebilirliğinin arttığı belirlenmiştir.

Çizelge 5.3 Çökme-yayılma çapının (cm) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri

Agrega Tipi	Regresyon Denklemleri
REF	$Y = 30,8764 - 0,5615 \times \text{s/b oranı} + 2,0548 \times \text{lif oranı} + 0,05910 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı} - 1,4972 \times \text{lif oranı}^2$
GAD	$Y = 23,0201 - 0,2214 \times \text{s/b oranı} + 2,0840 \times \text{lif oranı} + 0,05910 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı} - 1,4972 \times \text{lif oranı}^2$
BAR	$Y = 23,7120 - 0,2345 \times \text{s/b oranı} + 1,4382 \times \text{lif oranı} + 0,05910 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı} - 1,4972 \times \text{lif oranı}^2$



Şekil 5.2 REF serisi için çökme-yayılma çapı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

5.1.2.2 V-hunisi Akış Deneyi Sonuçlarının Analizi

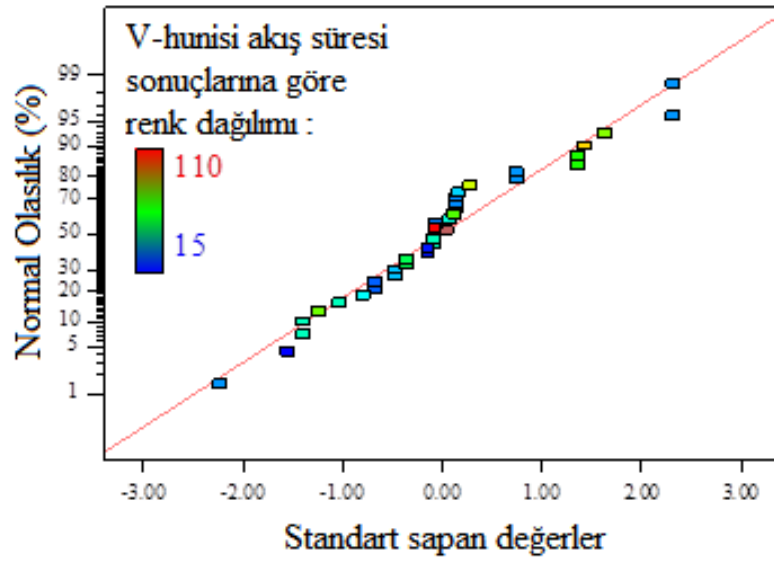
V-hunisi akış deneyi sonuçları Design Expert paket programı ile istatistiksel olarak incelendiğinde, deney sonuçlarının tepki yüzey yöntemi ile analizinin yapılabilmesi için en uygun regresyon modelinin, çökme-yayılma çapı analizinde olduğu gibi kuadratik model olduğu belirlenmiştir. Seçilen modele ait varyans analizi (ANOVA) ile modelde yer alan bağımsız değişkenlerin modeldeki anlamlılık derecesi kontrol edilmiştir. Kuadratik modele ait ANOVA analizi Çizelge 5.4’te verilmiştir. Burada normal olasılık için % 95’ lik güven aralığında, s/b oranı (A), lif oranı (B), agrega tipi (C), s/b oranı x agrega tipi (AC), lif oranı x agrega tipi (AC) ve lif oranının karesi (B^2) etkileşimlerin p-değeri 0.05’ten küçük olması nedeniyle modele katkısının anlamlı olduğu görülmektedir.

Anlamsız değişkenler modelden çıkarılarak daha düşük standart sapma ve daha yüksek R^2 değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.3’te UHPC malzemesinin V-hunisi akış süresinin regresyon analizi ile hesaplanan standart sapma değerlerinin normal olasılık dağılımı verilmiştir. Şekil incelendiğinde, standart sapma değerlerinin yaklaşık olarak doğru üzerinde yer aldığı görüldüğünden modelin normal dağılıma uygun olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Kuadratik modele göre elde edilen standart sapma ve R^2 değerleri sırasıyla 4,0 ve 0,98’dir. Ayrıca hesaplanan varyasyon katsayısı %8,7 olarak bulunmuş ve %10’nun altında kalmasıyla uygun olduğu belirlenmiştir. Bu durum, V-hunisi akış süresi için oluşturulan modelin bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki

ilişkiyi oldukça yüksek bir doğrulukla ifade ettiğini ve deneysel çalışma sonuçlarının genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.4 V-hunisi akış sonuçlarının kuadratik modele göre ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	Katkı Yüzdesi (%)	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri Prob > F	Anlamlılık
Model	21003,1	98,3	1909.37	119.03	< 0.0001	Anlamlı
A-s/b oranı	4187,9	19,6	4187.93	261.07	< 0.0001	Anlamlı
B-lif oranı	4478,6	21,0	4478.57	279.19	< 0.0001	Anlamlı
C-Agrega tipi	6616,8	31,0	3308.42	206.25	< 0.0001	Anlamlı
AxB	32,3	0,2	32.30	2.01	0.1693	-
AxC	1489,0	7,0	744.51	46.41	< 0.0001	Anlamlı
BxC	299,5	1,4	149.76	9.34	0.0011	Anlamlı
A ²	0,6	0,0	0,0	0,0	0.9949	-
B ²	689,8	3,2	689.79	43.00	< 0.0001	Anlamlı



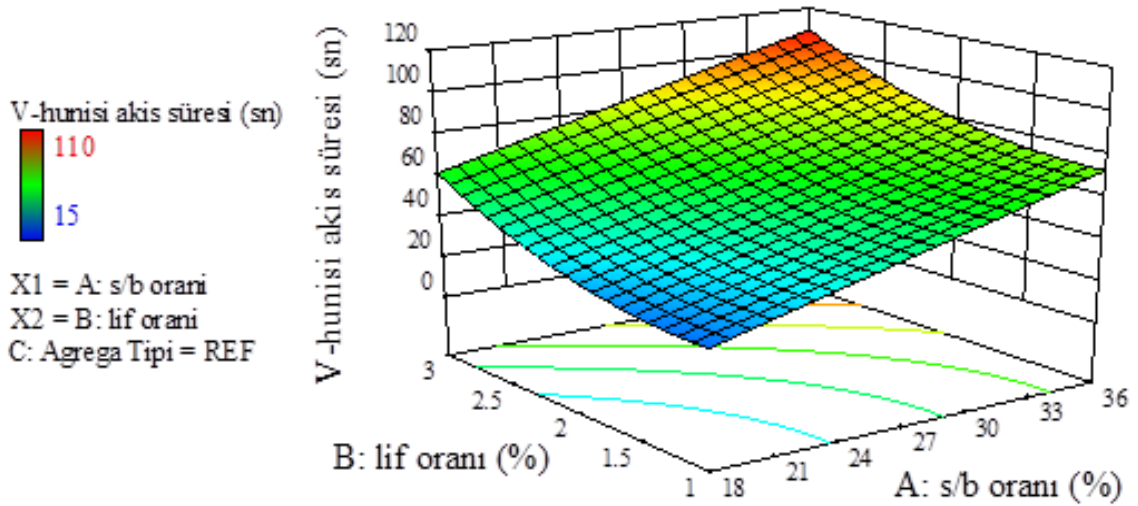
Şekil 5.3 V-hunisi akış süresinin normal olasılık dağılımı

Design Expert programı ile V-hunisi akış süresinin kuadratik modele göre tahmin edilmesi için REF, GAD ve BAR agrega tipine göre oluşturulan regresyon denklemleri Çizelge 5.5'te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 5.4'te s/b oranı ve çelik lif oranına bağlı olarak değişimin en çok görüldüğü REF serisi için V-hunisi akış süresi sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi verilmiştir. GAD ve BAR serileri için hazırlanan tepki yüzeyleri Ek C.3 ve C.4'te verilmiştir. Tüm serilerde s/b ve çelik lif oranının azalmasıyla V-hunisi akış

süresi değerinin azaldığı ve dolayısıyla UHPC malzemesinin işlenebilirliğinin arttığı belirlenmiştir.

Çizelge 5.5 V-hunisi akış süresinin (sn) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri

Agrega Tipi	Regresyon Denklemi
REF	$Y = -11,4300 + 2,6323 \times \text{s/b oranı} - 19,8979 \times \text{lif oranı} + 9,4879 \times \text{lif oranı}^2$
GAD	$Y = 26,5946 + 0,5422 \times \text{s/b oranı} - 28,4011 \times \text{lif oranı} + 9,4879 \times \text{lif oranı}^2$
BAR	$Y = 14,0851 + 1,1489 \times \text{s/b oranı} - 18,7554 \times \text{lif oranı} + 9,4879 \times \text{lif oranı}^2$



Şekil 5.4 REF serisi için V-hunisi akış süresi sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

5.1.3 Sertleşmiş UHPC Malzemesinin Deney Sonuçlarının Analizi

Sertleşmiş haldeki UHPC malzemesinin özelliklerinin belirlemek amacıyla gerçekleştirilen birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve çekme dayanımı sonuçları üzerinde Design Expert paket programı kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizinde sertleşmiş haldeki UHPC malzemesinin özelliklerinin etkileyen agregat tipi, s/b oranı, çelik lif oranı ve kür tipi gibi bağımsız değişkenler kullanılmıştır.

5.1.3.1 Birim Ağırlık Deney Sonuçlarının Analizi

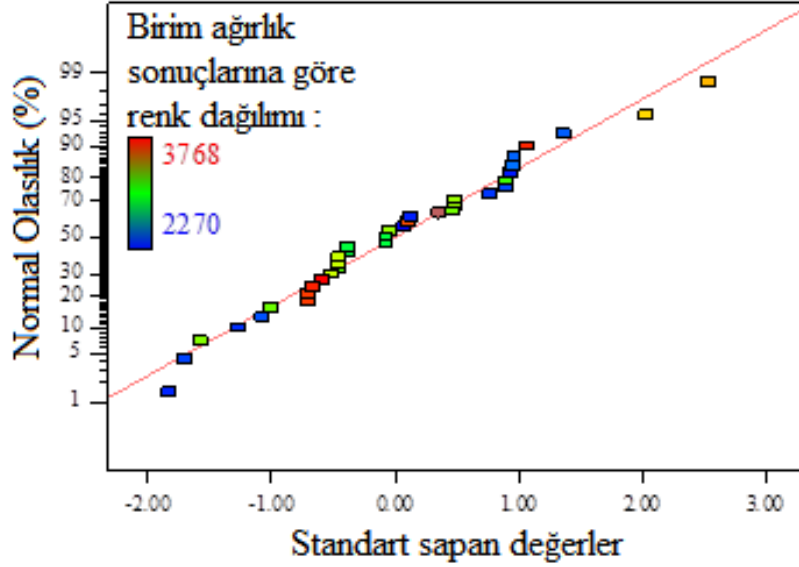
Birim ağırlık deney sonuçları Design Expert paket programı ile istatistiksel olarak incelendiğinde, deney sonuçlarının tepki yüzey yöntemi ile analizin yapılabilmesi için en uygun regresyon modelinin, çökme-yayılma çapı ve V-hunisi akış deneyleri analizinde olduğu gibi kuadratik model olduğu belirlenmiştir. Seçilen modele ait varyans analizi (ANOVA) ile modelde yer alan bağımsız değişkenlerin modeldeki anlamlılık derecesi kontrol edilmiştir. Kuadratik modele ait ANOVA analizi Çizelge 5.6’da verilmiştir. Burada normal olasılık için % 95’ lik güven aralığında, s/b oranı (A), lif oranı (B), agrega tipi (C), kür tipi (D), s/b oranı x agrega tipi (AC) ve s/b oranının karesi (A^2) etkileşimlerin p-değeri 0.05’ten küçük olması nedeniyle modele katkısının anlamlı olduğu görülmektedir. Bu etkileşimler arasında, agrega tipinin % 74,1 gibi yüksek bir oranla birim ağırlığı etkilediği görülmektedir.

Çizelge 5.6 Birim ağırlık sonuçlarının kuadratik modele göre ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	Katkı Yüzdesi (%)	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri Prob > F	Anlamlılık
Model	12	99,9	563111,2	935,5	< 0.0001	Anlamlı
A-s/b oranı	475199,7	5,3	475199,7	789,4	< 0.0001	Anlamlı
B-lif oranı	35272,6	0,4	35272,6	58,6	< 0.0001	Anlamlı
C-Agrega tipi	6684780,4	74,1	3342390,2	5552,6	< 0.0001	Anlamlı
D-Kür Tipi	11723,5	0,1	11723,5	19,5	0.0003	Anlamlı
AB	1,6	0,0	1,6	0,0	0.9593	-
AC	278437,3	3,1	139218,6	231,3	< 0.0001	Anlamlı
AD	99,9	0,0	99,9	0,2	0.6885	-
BC	2115,8	0,0	1057,9	1,8	0.2008	-
BD	1257,7	0,0	1257,7	2,1	0.1655	-
CD	2397,0	0,0	1198,5	2,0	0.1655	-
A^2	10127,9	0,1	10127,9	16,8	0.0007	Anlamlı
B^2	66,7	0,0	66,7	0,1	0.7431	-

Anlamsız değişkenler modelden çıkarılarak daha düşük standart sapma ve daha yüksek R^2 değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.5’te UHPC malzemesinin birim ağırlık deney sonuçlarının regresyon analizi ile hesaplanan standart sapma değerlerinin normal olasılık dağılımı verilmiştir. Şekil incelendiğinde, standart sapma değerlerinin yaklaşık olarak doğru üzerinde yer aldığı görüldüğünden modelin normal dağılıma uygun olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Kuadratik modele göre elde edilen standart sapma ve R^2

değerleri sırasıyla 24,7 ve 0,99'dur. Ayrıca hesaplanan varyasyon katsayısı %0,8 olarak bulunmuş ve %10'nun çok altında kalmasıyla modelin uygun olduğu belirlenmiştir. Bu durum, birim ağırlık deneyi için oluşturulan modelin bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi oldukça yüksek bir doğrulukla ifade ettiğini ve deneysel çalışma sonuçlarının genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.



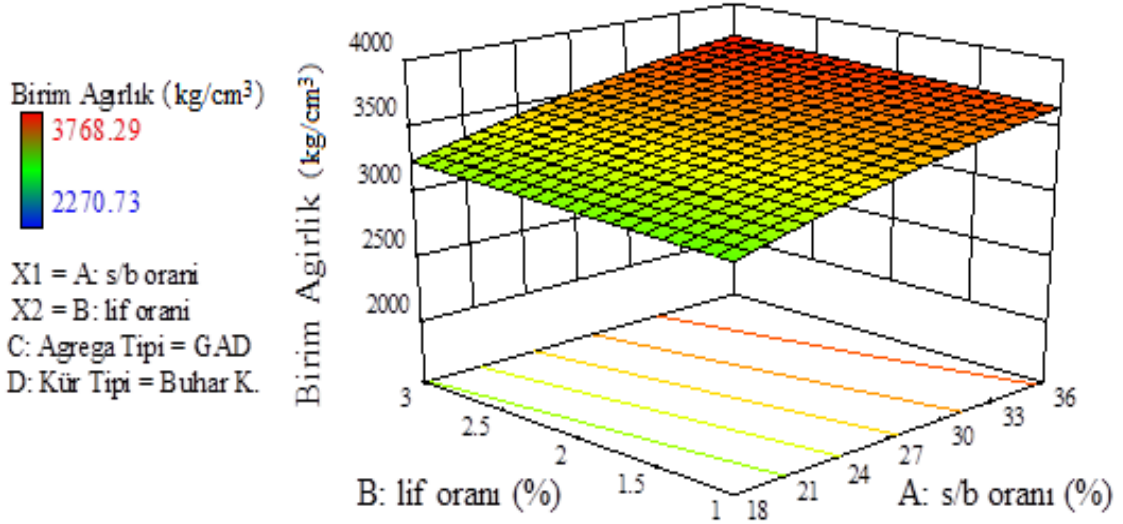
Şekil 5.5 Birim ağırlık deney sonuçlarının normal olasılık dağılımı

Design Expert programı ile birim ağırlık sonuçlarının kuadratik modele göre tahmin edilmesi için REF, GAD ve BAR agrega tipine göre oluşturulan regresyon denklemleri Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7 Birim ağırlığın (kg/m^3) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri

Agrega Tipi	Kür Tipi	Regresyon Denklemleri
REF	Buhar	$Y = 1896,2545 + 29,5552 \times \text{s/b oranı} + 45,1244 \times \text{lif oranı} - 0,5680 \times \text{s/b oranı}^2$
	Su	$Y = 1935,4558 + 29,5552 \times \text{s/b oranı} + 45,1244 \times \text{lif oranı} - 0,5680 \times \text{s/b oranı}^2$
GAD	Buhar	$Y = 2247,2310 + 58,1992 \times \text{s/b oranı} + 45,1244 \times \text{lif oranı} - 0,5680 \times \text{s/b oranı}^2$
	Su	$Y = 2286,4323 + 58,1992 \times \text{s/b oranı} + 45,1244 \times \text{lif oranı} - 0,5680 \times \text{s/b oranı}^2$
BAR	Buhar	$Y = 2130,7913 + 49,9912 \times \text{s/b oranı} + 45,1244 \times \text{lif oranı} - 0,5680 \times \text{s/b oranı}^2$
	Su	$Y = 2169,9927 + 49,9912 \times \text{s/b oranı} + 45,1244 \times \text{lif oranı} - 0,5680 \times \text{s/b oranı}^2$

Ayrıca, Şekil 5.6’da s/b oranı ve çelik lif oranına bağlı olarak en yüksek birim ağırlık sonucunun görüldüğü GAD serisi için birim ağırlık sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi verilmiştir. REF ve BAR serileri için hazırlanan tepki yüzeyleri Ek C.5 ve C.6’da verilmiştir. GAD ve BAR serilerinde s/b ve çelik lif oranının azalmasıyla birim ağırlık değerinin azaldığı ancak REF serisinde herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.6 GAD serisi için birim ağırlık sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

5.1.3.2 Basınç Dayanımı Sonuçlarının Analizi

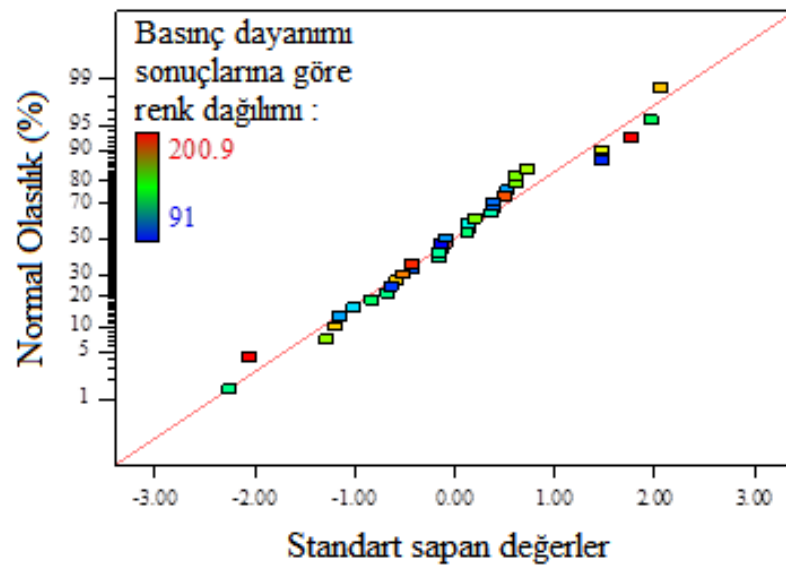
Basınç dayanımı deney sonuçları Design Expert paket programı ile istatistiksel olarak incelendiğinde, deney sonuçlarının tepki yüzey yöntemi ile analizin yapılabilmesi için en uygun regresyon modelinin, önceki deneylerin analizinden farklı olarak 2FI (iki faktör etkileşimi) modeli olduğu belirlenmiştir. Seçilen modele ait varyans analizi (ANOVA) ile modelde yer alan bağımsız değişkenlerin modeldeki anlamlılık derecesi kontrol edilmiştir. 2FI modele ait ANOVA analizi Çizelge 5.8’de verilmiştir. Burada normal olasılık için % 95’ lik güven aralığında, s/b oranı (A), lif oranı (B), agregası tipi (C), kür tipi (D), s/b oranı x agregası tipi (AC), s/b oranı x kür tipi (AD) ve agregası tipi x kür tipi (CD) etkileşimlerin p-değeri 0.05’ten küçük olması nedeniyle modele katkısının anlamlı olduğu görülmektedir. Bu etkileşimler arasında, s/b oranının % 69,8 gibi yüksek bir oranla basınç dayanımını etkilediği görülmektedir.

Anlamsız değişkenler modelden çıkarılarak daha düşük standart sapma ve daha yüksek R^2 değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.7’de UHPC malzemesinin basınç dayanımı deney sonuçlarının regresyon analizi ile hesaplanan standart sapma değerlerinin normal

olasılık dağılımı verilmiştir. Şekil incelendiğinde, standart sapma değerlerinin yaklaşık olarak doğru üzerinde yer aldığı görüldüğünden modelin normal dağılıma uygun olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. 2FI modele göre elde edilen standart sapma ve R^2 değerleri sırasıyla 3,85 ve 0,99'dur. Ayrıca hesaplanan varyasyon katsayısı %2,8 olarak bulunmuş ve %10'nun çok altında kalmasıyla modelin uygun olduğu belirlenmiştir. Bu durum, basınç dayanımı deneyi için oluşturulan modelin bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi oldukça yüksek bir doğrulukla ifade ettiğini ve deneysel çalışma sonuçlarının genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.8 Basınç dayanımı sonuçlarının 2FI modele göre ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	Katkı Yüzdesi (%)	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri Prob > F	Anlamlılık
Model	40758,1	99,3	2911,3	196,4	< 0.0001	Anlamlı
A-s/b oranı	28662,5	69,8	28662,5	1933,1	< 0.0001	Anlamlı
B-lif oranı	990,3	2,4	990,3	66,8	< 0.0001	Anlamlı
C-Agrega tipi	5299,0	12,9	2649,5	178,7	< 0.0001	Anlamlı
D-Kür Tipi	879,6	2,1	879,6	59,3	< 0.0001	Anlamlı
AB	1,9	0,0	1,9	0,1	0.7231	-
AC	976,1	2,4	488,0	32,9	< 0.0001	Anlamlı
AD	740,1	1,8	740,1	49,9	< 0.0001	Anlamlı
BC	0,4	0,0	0,2	0,0	0.9861	-
BD	0,2	0,0	0,2	0,0	0.9165	-
CD	125,0	0,3	62,5	4,2	0.0297	Anlamlı

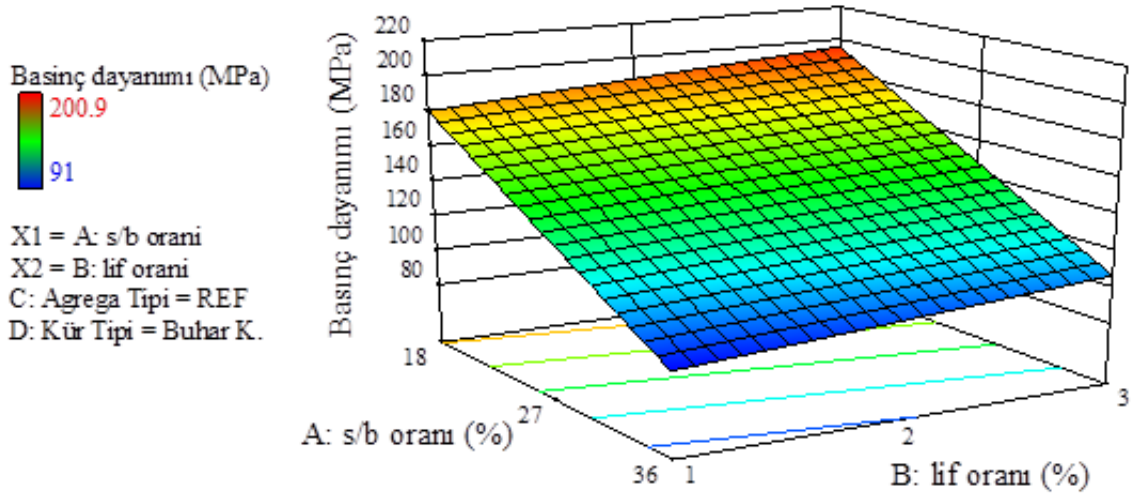


Şekil 5.7 Basınç dayanımı deney sonuçlarının normal olasılık dağılımı

Design Expert programı ile basınç dayanımı sonuçlarının 2FI modele göre tahmin edilmesi için REF, GAD ve BAR agrega tipine göre oluşturulan regresyon denklemleri Çizelge 5.9’da verilmiştir. Ayrıca, Şekil 5.8’de s/b oranı ve çelik lif oranına bağlı olarak basınç dayanım değişiminin en net görüldüğü REF serisi için basınç dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi verilmiştir. GAD ve BAR serileri için hazırlanan tepki yüzeyleri Ek C.7 ve C.8’de verilmiştir. Tüm serilerde s/b ve çelik lif oranının azalmasıyla basınç dayanımı değeri artmıştır. Ayrıca tüm seriler için tepki yüzeylerinin renk dağılımlarından görüldüğü gibi en büyük değişimin REF serisinde olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.9 Basınç dayanımının (MPa) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri

Agrega Tipi	Kür Tipi	Regresyon Denklemleri
REF	Buhar	$Y = 262,2646 - 4,9456 \times \text{s/b oranı} + 7,5857 \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 211,3586 - 3,6618 \times \text{s/b oranı} + 7,5857 \times \text{lif oranı}$
GAD	Buhar	$Y = 260,9058 - 4,3261 \times \text{s/b oranı} + 7,5857 \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 219,6585 - 3,0423 \times \text{s/b oranı} + 7,5857 \times \text{lif oranı}$
BAR	Buhar	$Y = 200,3418 - 3,2285 \times \text{s/b oranı} + 7,5857 \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 156,8876 - 1,9448 \times \text{s/b oranı} + 7,5857 \times \text{lif oranı}$



Şekil 5.8 REF serisi için basınç dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

5.1.3.3 Eğilme Dayanımı Sonuçlarının Analizi

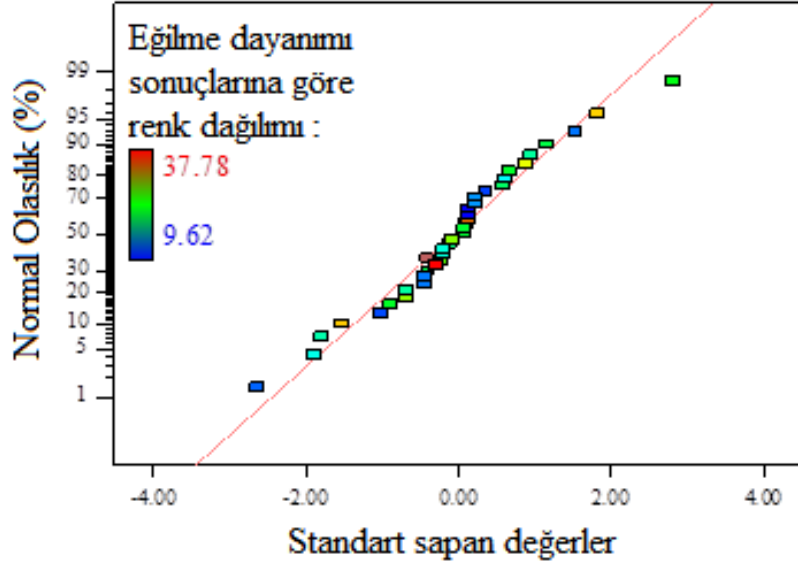
Eğilme dayanımı deney sonuçları Design Expert paket programı ile istatistiksel olarak incelendiğinde, deney sonuçlarının tepki yüzey yöntemi ile analizin yapılabilmesi için en uygun regresyon modelinin kuadratik model olduğu belirlenmiştir. Seçilen modele ait varyans analizi (ANOVA) ile modelde yer alan bağımsız değişkenlerin modeldeki anlamlılık derecesi kontrol edilmiştir. Kuadratik modele ait ANOVA analizi Çizelge 5.10’da verilmiştir. Çizelgede, normal olasılık için % 95’ lik güven aralığında, s/b oranı (A), lif oranı (B), agrega tipi (C), kür tipi (D), s/b oranı x lif oranı (AB), s/b oranı x agrega tipi (AC), lif oranı x agrega tipi (BC), agrega tipi x kür tipi (CD) ve s/b oranının karesi (A^2) etkileşimlerin p-değeri 0.05’ten küçük olması nedeniyle modele katkısının anlamlı olduğu görülmektedir. Bu etkileşimler arasında, çelik lif oranının % 40,5 gibi yüksek etki düzeyiyle eğilme dayanımını etkilediği görülmektedir.

Çizelge 5.10 Eğilme dayanımı sonuçlarının kuadratik modele göre ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	Etki Düzeyi (%)	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri Prob > F	Anlamlılık
Model	1840,5	98,1	115,0	58,5	< 0.0001	Anlamlı
A-s/b oranı	585,4	31,2	585,4	297,6	< 0.0001	Anlamlı
B-lif oranı	759,8	40,5	759,8	386,2	< 0.0001	Anlamlı
C-Agrega tipi	208,4	11,1	104,2	53,0	< 0.0001	Anlamlı
D-Kür Tipi	0,1	0,0	0,1	0,1	0.8115	-
AB	13,0	0,7	13,0	6,6	0.0191	Anlamlı
AC	14,7	0,8	7,3	3,7	0.0443	Anlamlı
AD	1,6	0,1	1,6	0,8	0.3818	-
BC	15,4	0,8	7,7	3,9	0.0385	Anlamlı
BD	5,0	0,3	5,0	2,5	0.1281	-
CD	16,2	0,9	8,1	4,1	0.0337	Anlamlı
A^2	52,3	2,8	52,3	26,6	< 0.0001	Anlamlı
B^2	0,1	0,0	0,1	0,0	0.8465	-

Anlamsız değişkenler modelden çıkarılarak daha düşük standart sapma ve daha yüksek R^2 değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.9’da UHPC malzemesinin eğilme dayanımı deney sonuçlarının regresyon analizi ile hesaplanan standart sapma değerlerinin normal olasılık dağılımı verilmiştir. Şekil incelendiğinde, standart sapma değerlerinin yaklaşık olarak doğru üzerinde yer aldığı görüldüğünden modelin normal dağılıma uygun olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Kuadratik modele göre elde edilen standart sapma ve R^2

değerleri sırasıyla 1,4 ve 0,98'dir. Ayrıca hesaplanan varyasyon katsayısı % 7,0 olarak bulunmuş ve % 10'nun altında kalmasıyla modelin uygun olduğu belirlenmiştir. Bu durum, eğilme dayanımı deneyi için oluşturulan modelin bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi oldukça yüksek bir doğrulukla ifade ettiğini ve deneysel çalışma sonuçlarının genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.



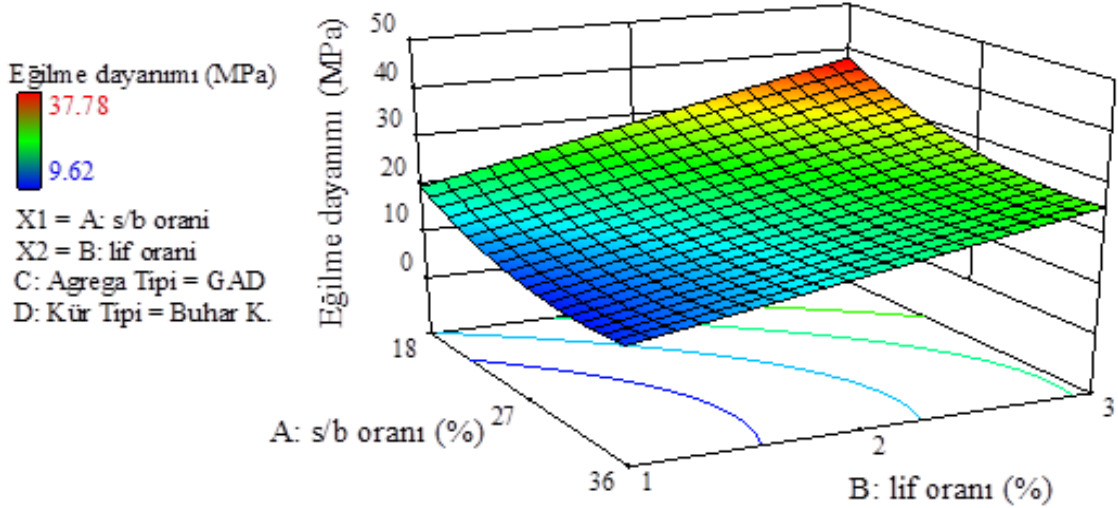
Şekil 5.9 Eğilme dayanımı deney sonuçlarının normal olasılık dağılımı

Design Expert programı ile eğilme dayanımı sonuçlarının kuadratik modele göre tahmin edilmesi için REF, GAD ve BAR agrega tipine göre oluşturulan regresyon denklemleri Çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.11 Eğilme dayanımının (MPa) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri

Agrega Tipi	Kür Tipi	Regresyon Denklemleri
REF	Buhar	$Y = 52,5613 - 3,0988 \times \text{s/b oranı} + 9,3280 \times \text{lif oranı} - 0,11311 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı} + 0,0495 \times \text{s/b oranı}^2$
	Su	$Y = 51,1811 - 3,0988 \times \text{s/b oranı} + 9,3280 \times \text{lif oranı} - 0,1131 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı} + 0,0495 \times \text{s/b oranı}^2$
GAD	Buhar	$Y = 49,1354 - 3,0390 \times \text{s/b oranı} + 11,3314 \times \text{lif oranı} - 0,1131 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı} + 0,0495 \times \text{s/b oranı}^2$
	Su	$Y = 50,9468 - 3,0390 \times \text{s/b oranı} + 11,3314 \times \text{lif oranı} - 0,1131 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı} + 0,0495 \times \text{s/b oranı}^2$
BAR	Buhar	$Y = 43,3914 - 2,8717 \times \text{s/b oranı} + 9,2036 \times \text{lif oranı} - 0,1131 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı} + 0,0495 \times \text{s/b oranı}^2$
	Su	$Y = 42,4417 - 2,8717 \times \text{s/b oranı} + 9,2036 \times \text{lif oranı} - 0,1131 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı} + 0,0495 \times \text{s/b oranı}^2$

Ayrıca, Şekil 5.10'da s/b oranı ve çelik lif oranına bağlı olarak eğilme dayanım değişiminin en net görüldüğü GAD serisi için eğilme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi verilmiştir. REF ve BAR serileri için hazırlanan tepki yüzeyleri Ek C.9 ve C.10'da verilmiştir. Tüm serilerde s/b oranının azalmasıyla ve çelik lif oranının artmasıyla eğilme dayanımı değeri artmıştır. Ayrıca tüm seriler için tepki yüzeylerinin renk dağılımlarından görüldüğü gibi en büyük değişimin GAD serisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.10 GAD serisi için eğilme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

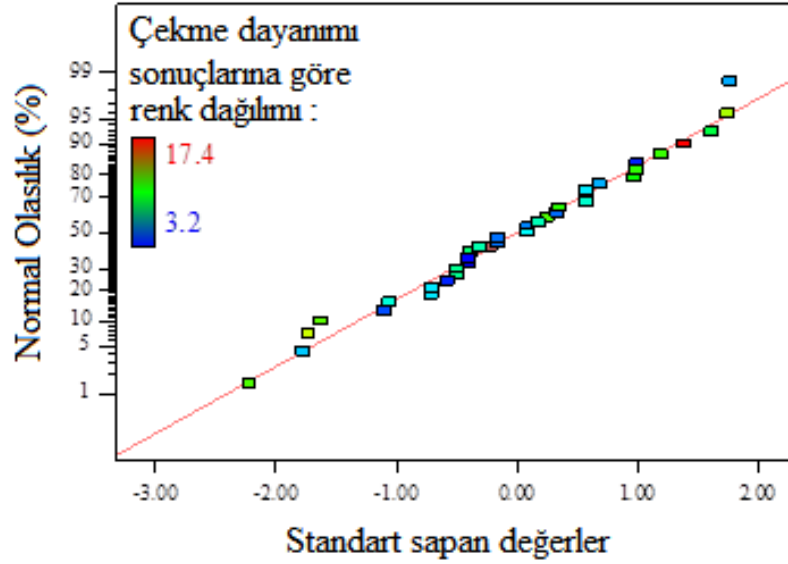
5.1.3.4 Çekme Dayanımı Sonuçlarının Analizi

Çekme dayanımı deney sonuçları Design Expert paket programı ile istatistiksel olarak incelendiğinde, deney sonuçlarının tepki yüzey yöntemi ile analizin yapılabilmesi için en uygun regresyon modelinin, basınç dayanımı sonuçlarının analizinde olduğu gibi 2FI (iki faktör etkileşimi) modeli olduğu belirlenmiştir. Seçilen modele ait varyans analizi (ANOVA) ile modelde yer alan bağımsız değişkenlerin modeldeki anlamlılık derecesi kontrol edilmiştir. 2FI modele ait ANOVA analizi Çizelge 5.12'de verilmiştir. Burada normal olasılık için % 95' lik güven aralığında, s/b oranı (A), lif oranı (B), agrega tipi (C), kür tipi (D), s/b oranı x lif oranı (AB), s/b oranı x agrega tipi (AC), s/b oranı x kür tipi (AD) ve lif oranı x agrega tipi (BC) etkileşimlerin p-değeri 0.05'ten küçük olması nedeniyle modele katkısının anlamlı olduğu görülmektedir. Bu etkileşimler arasında, s/b oranının % 52,4 gibi yüksek bir oranla çekme dayanımını etkilediği görülmektedir. Burada dikkat çeken sonuç ise çekme dayanımının üzerinde çelik lif içeriğinden çok s/b oranının daha etkin olmasıdır.

Çizelge 5.12 Çekme dayanımı sonuçlarının 2FI modele göre ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	Katkı Yüzdesi (%)	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri Prob > F	Anlamlılık
Model	363,8	97,9	26,0	65,6	< 0.0001	Anlamlı
A-s/b oranı	194,9	52,4	194,9	491,9	< 0.0001	Anlamlı
B-lif oranı	31,1	8,4	31,1	78,4	< 0.0001	Anlamlı
C-Agrega tipi	78,5	21,1	39,2	99,1	< 0.0001	Anlamlı
D-Kür Tipi	2,5	0,7	2,5	6,3	0.0210	Anlamlı
AB	3,3	0,9	3,3	8,4	0.0090	Anlamlı
AC	10,3	2,8	5,1	13,0	0.0002	Anlamlı
AD	4,0	1,1	4,0	10,0	0.0049	Anlamlı
BC	3,4	0,9	1,7	4,3	0.0276	Anlamlı
BD	1,0	0,3	1,0	2,5	0.1317	-
CD	0,8	0,2	0,4	1,0	0.3780	-

Anlamsız değişkenler modelden çıkarılarak daha düşük standart sapma ve daha yüksek R^2 değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.11’de UHPC malzemesinin çekme dayanımı deney sonuçlarının regresyon analizi ile hesaplanan standart sapma değerlerinin normal olasılık dağılımı verilmiştir.



Şekil 5.11 Çekme dayanımı deney sonuçlarının normal olasılık dağılımı

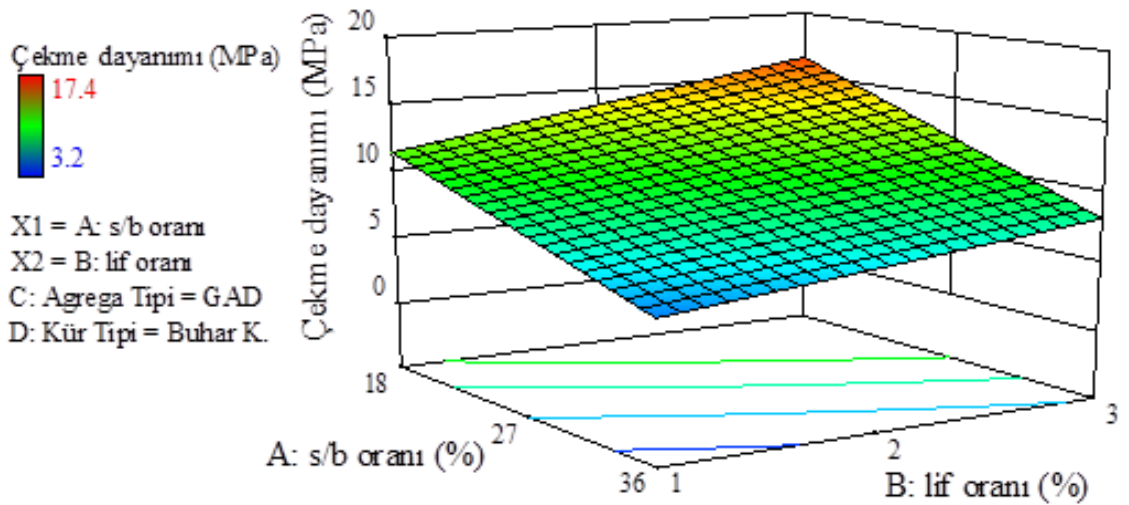
Şekil 5.11 incelendiğinde, standart sapma değerlerinin yaklaşık olarak doğru üzerinde yer aldığı görüldüğünden modelin normal dağılıma uygun olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. 2FI modele göre elde edilen standart sapma ve R^2 değerleri sırasıyla 0,63 ve 0,98’dir. Ayrıca hesaplanan varyasyon katsayısı %8,0 olarak bulunmuş ve %10’nun

altında kalmasıyla modelin uygun olduğu belirlenmiştir. Bu durum, çekme dayanımı deneyi için oluşturulan modelin, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi oldukça yüksek bir doğrulukla ifade ettiğini ve deneysel çalışma sonuçlarının genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Design Expert programı ile çekme dayanımı sonuçlarının 2FI modele göre tahmin edilmesi için REF, GAD ve BAR agrega tipine göre oluşturulan regresyon denklemleri Çizelge 5.13'te verilmiştir.

Çizelge 5.13 Çekme dayanımının (MPa) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri

Agrega Tipi	Kür Tipi	Regresyon Denklemleri
REF	Buhar	$Y = 11,8738 - 0,2618 \times \text{s/b oranı} + 2,7671 \times \text{lif oranı} - 0,0553 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 9,8028 - 0,1682 \times \text{s/b oranı} + 2,2774 \times \text{lif oranı} - 0,0553 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
GAD	Buhar	$Y = 13,8279 - 0,2937 \times \text{s/b oranı} + 3,7802 \times \text{lif oranı} - 0,0553 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 11,3360 - 0,2004 \times \text{s/b oranı} + 3,2904 \times \text{lif oranı} - 0,0553 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
BAR	Buhar	$Y = 7,3009 - 0,1311 \times \text{s/b oranı} + 2,8141 \times \text{lif oranı} - 0,0553 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 5,5864 - 0,0379 \times \text{s/b oranı} + 2,3244 \times \text{lif oranı} - 0,0553 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$

Şekil 5.12'de s/b oranı ve çelik lif oranına bağlı olarak çekme dayanım değişiminin en net görüldüğü GAD serisi için çekme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi verilmiştir.



Şekil 5.12 GAD serisi için çekme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

REF ve BAR serileri için hazırlanan tepki yüzeyleri Ek C.11 ve C.12’de verilmiştir. Tüm serilerde s/b oranının azalmasıyla ve çelik lif oranının artmasıyla çekme dayanımı değeri artmıştır. Ayrıca tüm seriler için tepki yüzeylerinin renk dağılımlarından görüldüğü gibi en büyük değişimin GAD serisinde olduğu görülmüştür.

5.1.4 UHPC Malzemesinin Lineer Zayıflatma Katsayısı Sonuçlarının Analizi

UHPC malzemesinin, 0,200 MeV enerjili X-ışını kaynağı ile 0,662 MeV enerjili sezyum (^{137}Cs) ve 1,250 MeV enerjili kobalt (^{60}Co) radyoizotopları olmak üzere 3 farklı enerji kaynağı kullanılarak deneysel olarak belirlenen lineer zayıflatma katsayıları sonuçları üzerinde Design Expert paket programı kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizinde UHPC malzemesinin lineer zayıflatma katsayısı özelliklerini etkileyen agrega tipi, s/b oranı, çelik lif oranı ve kür tipi gibi bağımsız değişkenler kullanılmıştır.

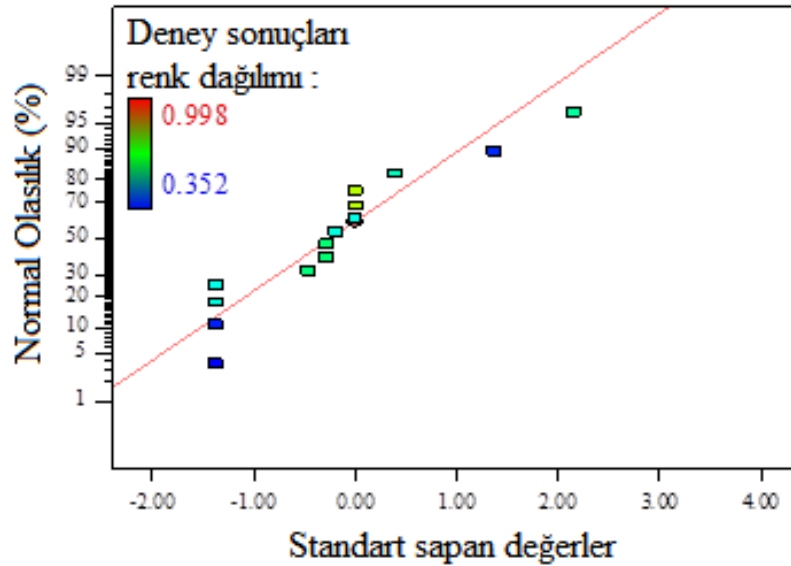
5.1.4.1 0,200 MeV Enerji için Lineer Zayıflatma Katsayısının Analizi

0,200 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı deney sonuçları Design Expert paket programı ile istatistiksel olarak incelendiğinde, deney sonuçlarının tepki yüzey yöntemi ile analizin yapılabilmesi için en uygun regresyon modelinin 2FI (iki faktör etkileşimi) modeli olduğu belirlenmiştir. Seçilen modele ait varyans analizi (ANOVA) ile modelde yer alan bağımsız değişkenlerin modeldeki anlamlılık derecesi kontrol edilmiştir. 2FI modele ait ANOVA analizi Çizelge 5.14’te verilmiştir. Burada normal olasılık için % 95’ lik güven aralığında, s/b oranı (A), agrega tipi (C), s/b oranı x lif oranı (AB) ve s/b oranı x agrega tipi (AC) etkileşimlerin p-değeri 0.05’ten küçük olması ile modele katkısının anlamlı olduğu görülmektedir. Etkileşimler arasında, agrega tipinin % 62,4 gibi yüksek bir oranla lineer zayıflatma katsayısını etkilemiştir.

Anlamsız değişkenler modelden çıkarılarak daha düşük standart sapma ve daha yüksek R^2 değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.13’te UHPC malzemesinin 0,200 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı deney sonuçlarının regresyon analizi ile hesaplanan standart sapma değerlerinin normal olasılık dağılımı verilmiştir.

Çizelge 5.14 0,200 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının 2FI modele göre ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	Katkı Yüzdesi (%)	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri Prob > F	Anlamlılık
Model	0,50268	99,9	0,1	808,1	< 0.0001	Anlamlı
A-s/b oranı	0,01676	3,3	0,0	242,5	< 0.0001	Anlamlı
B-lif oranı	0,00000	0,0	0,0	0,0	0.8679	-
C-Agrega tipi	0,31404	62,4	0,2	2271,7	< 0.0001	Anlamlı
D-Kür Tipi	0,00008	0,0	0,0	1,1	0.3296	-
AB	0,00080	0,2	0,0	11,6	0.0145	Anlamlı
AC	0,00796	1,6	0,0	57,6	0.0001	Anlamlı
AD	0,00001	0,0	0,0	0,1	0.7541	-



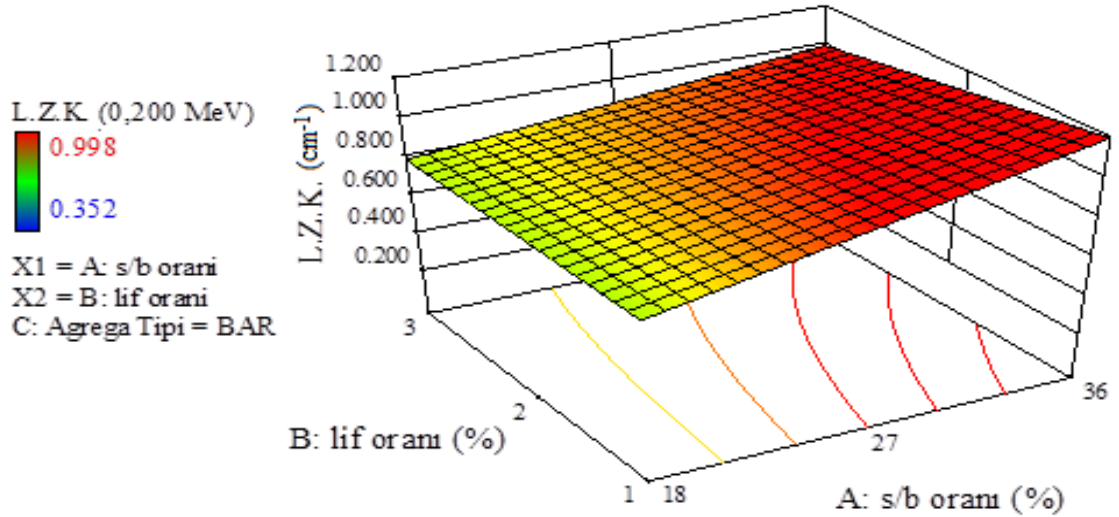
Şekil 5.13 0,200 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarının normal olasılık dağılımı

Şekil 5.13 incelendiğinde, standart sapma değerlerinin yaklaşık olarak doğru üzerinde yer aldığı görüldüğünden modelin normal dağılıma uygun olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. 2FI modele göre elde edilen standart sapma ve R^2 değerleri sırasıyla 0,007 ve 0,99'dur. Ayrıca hesaplanan varyasyon katsayısı % 1,3 olarak bulunmuş ve %10'nun altında kalmasıyla modelin uygun olduğu belirlenmiştir. Bu durum, 0,200 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı deneyi için oluşturulan modelin, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi oldukça yüksek bir doğrulukla ifade ettiğini ve deneysel çalışma sonuçlarının genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Design Expert programı ile 0,200 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarının 2FI modele göre tahmin edilmesi için REF, GAD ve BAR agrega tipine göre oluşturulan regresyon denklemleri Çizelge 5.15'te verilmiştir. Şekil 5.14'te ise s/b oranı ve çelik lif oranına bağlı olarak 0,200 MeV enerji için en yüksek lineer zayıflatma katsayısının görüldüğü BAR serisi için tepki yüzey grafiği verilmiştir.

Çizelge 5.15 0,200 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının (cm^{-1}) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri

Agrega Tipi	Kür Tipi	Regresyon Denklemleri
REF	Buhar	$Y = 0,1926 - 0,0099 \times \text{s/b oranı} + 0,1030 \times \text{lif oranı} - 0,0055 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 0,1863 - 0,0099 \times \text{s/b oranı} + 0,1030 \times \text{lif oranı} - 0,0055 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
GAD	Buhar	$Y = 0,2588 - 0,0150 \times \text{s/b oranı} + 0,1030 \times \text{lif oranı} - 0,0055 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 0,2525 - 0,0150 \times \text{s/b oranı} + 0,1030 \times \text{lif oranı} - 0,0055 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
BAR	Buhar	$Y = 0,2830 - 0,0279 \times \text{s/b oranı} + 0,1030 \times \text{lif oranı} - 0,0055 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 0,2768 - 0,0279 \times \text{s/b oranı} + 0,1030 \times \text{lif oranı} - 0,0055 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$



Şekil 5.14 BAR serisi için 0,200 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

REF ve GAD serileri için hazırlanan tepki yüzeyleri Ek C.13 ve C.14'te verilmiştir. Tüm serilerde s/b oranının artmasıyla lineer zayıflatma katsayılarının arttığı ancak çelik

lif oranının değişmesiyle herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür. Ayrıca tüm seriler için tepki yüzeylerinin renk dağılımlarından görüldüğü gibi en büyük değişimin BAR serisinde olduğu görülmüştür.

5.1.4.2 0,662 MeV Enerji için Lineer Zayıflatma Katsayısının Analizi

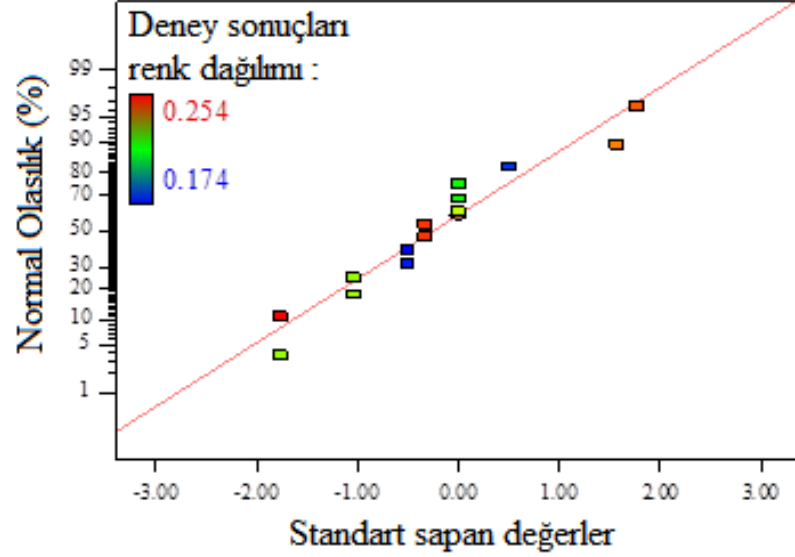
0,662 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı deney sonuçları Design Expert paket programı ile istatistiksel olarak incelendiğinde, deney sonuçlarının tepki yüzey yöntemi ile analizin yapılabilmesi için 0,200 MeV enerji değeri sonuçları içinde olduğu gibi en uygun regresyon modelinin 2FI (iki faktör etkileşimi) modeli olduğu belirlenmiştir. Seçilen modele ait varyans analizi (ANOVA) ile modelde yer alan bağımsız değişkenlerin modeldeki anlamlılık derecesi kontrol edilmiştir. 2FI modele ait ANOVA analizi Çizelge 5.16’da verilmiştir. Burada normal olasılık için % 95’lik güven aralığında, s/b oranı (A) ve agrega tipi (C) etkileşimlerin p-değeri 0.05’ten küçük olması ile modele katkısının anlamlı olduğu görülmektedir. Etkileşimler arasında, agrega tipinin % 73,7 gibi yüksek bir oranla lineer zayıflatma katsayısını etkilemiştir.

Çizelge 5.16 0,662 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının 2FI modele göre ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	Katkı Yüzdesi (%)	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri Prob > F	Anlamlılık
Model	0,0106	98,4	0,0012	42,2	< 0.0001	Anlamlı
A-s/b oranı	0,0011	10,4	0,0011	40,2	0.0007	Anlamlı
B-lif oranı	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0.8918	-
C-Agrega tipi	0,0079	73,7	0,0040	142,1	< 0.0001	Anlamlı
D-Kür Tipi	0,0000	0,2	0,0000	0,8	0.4021	-
AB	0,0001	0,5	0,0001	1,9	0.2215	-
AC	0,0003	2,4	0,0001	4,7	0.0594	-
AD	0,0000	0,0	0,0000	0,1	0.7238	-

Anlamsız değişkenler modelden çıkarılarak daha düşük standart sapma ve daha yüksek R^2 değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.15’te UHPC malzemesinin 0,662 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı deney sonuçlarının regresyon analizi ile hesaplanan standart sapma değerlerinin normal olasılık dağılımı verilmiştir. Şekil incelendiğinde, standart sapma değerlerinin yaklaşık olarak doğru üzerinde yer aldığı görüldüğünden modelin normal dağılıma uygun olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. 2FI modele göre elde

edilen standart sapma ve R^2 değerleri sırasıyla 0,005 ve 0,98'dir. Ayrıca hesaplanan varyasyon katsayısı % 2,3 olarak bulunmuş ve %10'nun altında kalmasıyla modelin uygun olduğu belirlenmiştir. Bu durum, 0,662 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı deneyi için oluşturulan modelin, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi oldukça yüksek bir doğrulukla ifade ettiğini ve deneysel çalışma sonuçlarının genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

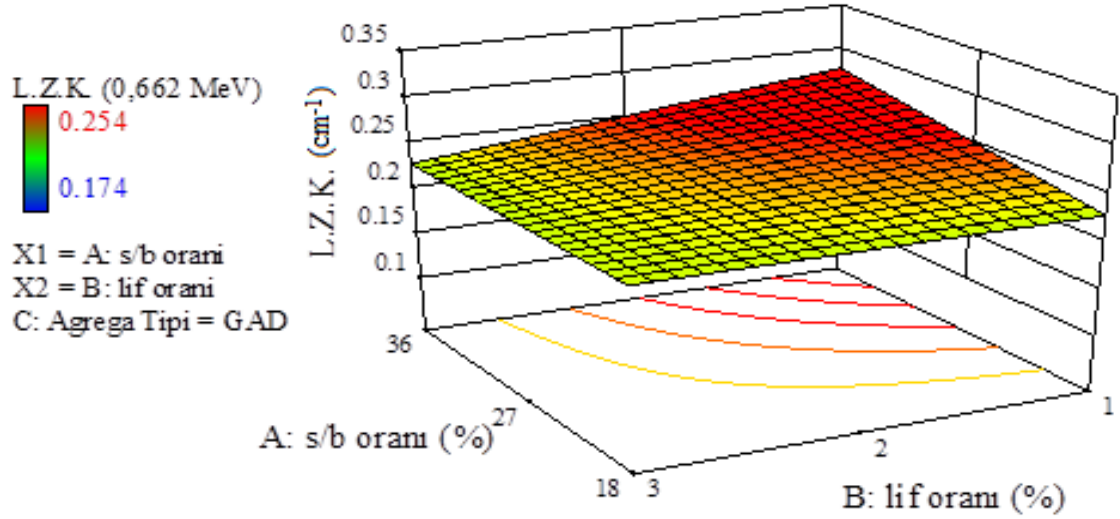


Şekil 5.15 0,662 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarının normal olasılık dağılımı

Design Expert programı ile 0,662 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarının 2FI modele göre tahmin edilmesi için REF, GAD ve BAR agrega tipine göre oluşturulan regresyon denklemleri Çizelge 5.17'de verilmiştir. Şekil 5.16'da ise s/b oranı ve çelik lif oranına bağlı olarak 0,662 MeV enerji için en yüksek lineer zayıflatma katsayısının görüldüğü GAD serisi için tepki yüzey grafiği verilmiştir. REF ve BAR serileri için hazırlanan tepki yüzeyleri Ek C.15 ve C.16'da verilmiştir. Tüm serilerde s/b oranının artmasıyla lineer zayıflatma katsayılarının arttığı ancak çelik lif oranının değişmesiyle herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür. Ayrıca tüm seriler için tepki yüzeylerinin renk dağılımlarından görüldüğü gibi en büyük değişimin GAD serisinde olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.17 0,662 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının (cm^{-1}) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri

Agrega Tipi	Kür Tipi	Regresyon Denklemleri
REF	Buhar	$Y = 0,1221 + 0,0029 \times \text{s/b oranı} + 0,0260 \times \text{lif oranı} - 0,0014 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 0,1209 + 0,0031 \times \text{s/b oranı} + 0,0260 \times \text{lif oranı} - 0,0014 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
GAD	Buhar	$Y = 0,1547 + 0,0041 \times \text{s/b oranı} + 0,0260 \times \text{lif oranı} - 0,0014 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 0,1535 + 0,0043 \times \text{s/b oranı} + 0,0260 \times \text{lif oranı} - 0,0014 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
BAR	Buhar	$Y = 0,1090 + 0,0058 \times \text{s/b oranı} + 0,0260 \times \text{lif oranı} - 0,0014 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 0,1077 + 0,0060 \times \text{s/b oranı} + 0,0260 \times \text{lif oranı} - 0,0014 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$



Şekil 5.16 GAD serisi için 0,662 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

5.1.4.3 1,250 MeV Enerji için Lineer Zayıflatma Katsayısının Analizi

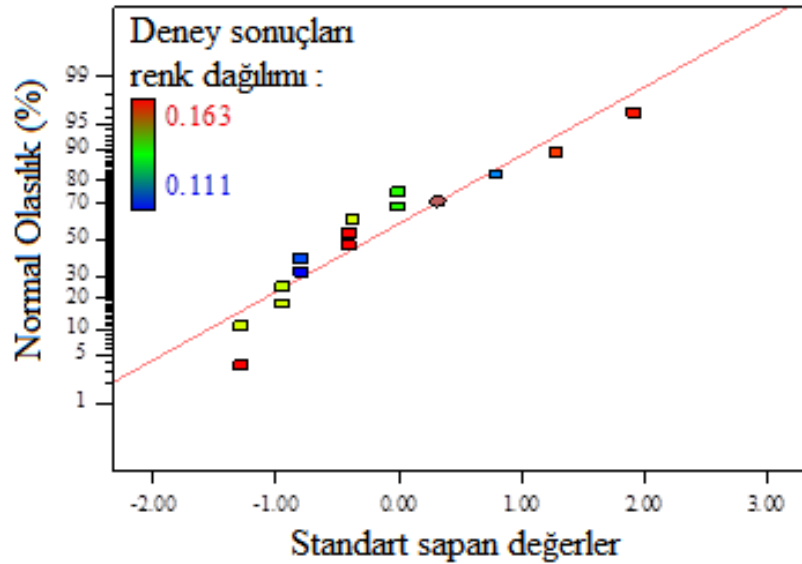
1,250 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı deney sonuçları Design Expert paket programı ile istatistiksel olarak incelendiğinde, deney sonuçlarının tepki yüzey yöntemi ile analizin yapılabilmesi için en uygun regresyon modelinin 2FI (iki faktör etkileşimi) modeli olduğu belirlenmiştir. Seçilen modele ait varyans analizi (ANOVA) ile modelde yer alan bağımsız değişkenlerin modeldeki anlamlılık derecesi kontrol edilmiştir. 2FI modele ait ANOVA analizi Çizelge 5.18’de verilmiştir. Burada normal olasılık için

%95'lik güven aralığında, s/b oranı (A) ve agrega tipi (C) etkileşimlerin p-değeri 0.05'ten küçük olması ile modele katkısının anlamlı olduğu görülmektedir. Etkileşimler arasında, agrega tipinin % 75,2 gibi yüksek bir oranla lineer zayıflatma katsayısını etkilemiştir.

Çizelge 5.18 1,250 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının 2FI modele göre ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	Katkı Yüzdesi (%)	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri Prob > F	Anlamlılık
Model	0,0044	97,4	0,0005	25,5	0.0004	Anlamlı
A-s/b oranı	0,0003	7,6	0,0003	17,8	0.0056	Anlamlı
B-lif oranı	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0.9798	-
C-Agrega tipi	0,0034	75,2	0,0017	88,5	< 0.0001	Anlamlı
D-Kür Tipi	0,0000	0,0	0,0000	0,1	0.7508	-
AB	0,0000	0,4	0,0000	0,9	0.3839	-
AC	0,0002	3,9	0,0001	4,6	0.0623	-
AD	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0.8525	-

Anlamsız değişkenler modelden çıkarılarak daha düşük standart sapma ve daha yüksek R^2 değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.17'de UHPC malzemesinin 1,250 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı deney sonuçlarının regresyon analizi ile hesaplanan standart sapma değerlerinin normal olasılık dağılımı verilmiştir.



Şekil 5.17 1,250 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarının normal olasılık dağılımı

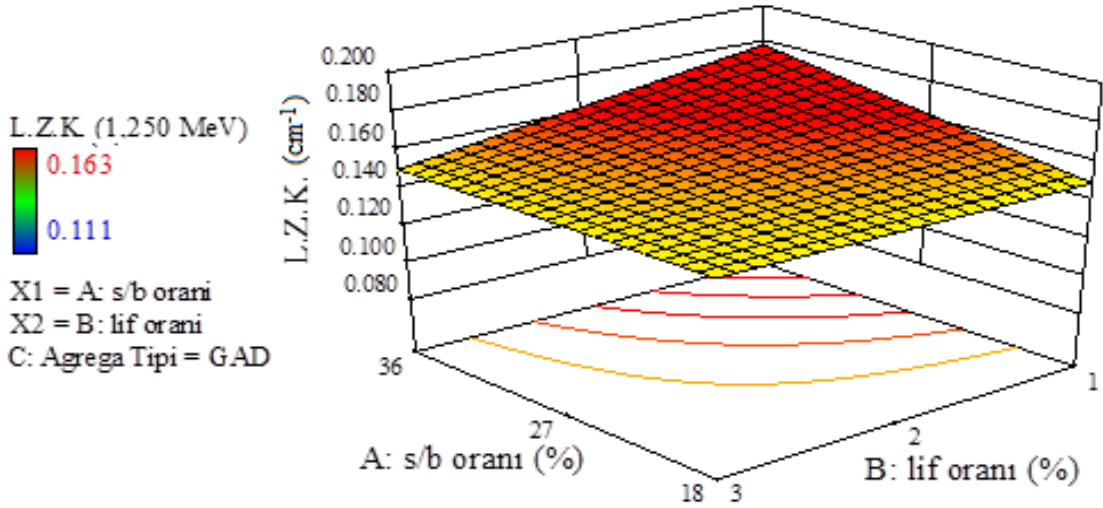
Şekil 5.17 incelendiğinde, standart sapma değerlerinin yaklaşık olarak doğru üzerinde yer aldığı görüldüğünden modelin normal dağılıma uygun olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. 2FI modele göre elde edilen standart sapma ve R^2 değerleri sırasıyla 0,004 ve 0,97'dir. Ayrıca hesaplanan varyasyon katsayısı % 3,0 olarak bulunmuş ve %10'nun altında kalmasıyla modelin uygun olduğu belirlenmiştir. Bu durum, 1,250 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı deneyi için oluşturulan modelin, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi oldukça yüksek bir doğrulukla ifade ettiğini ve deneysel çalışma sonuçlarının genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Design Expert programı ile 1,250 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarının 2FI modele göre tahmin edilmesi için REF, GAD ve BAR agrega tipine göre oluşturulan regresyon denklemleri Çizelge 5.19'da verilmiştir.

Çizelge 5.19 1,250 MeV enerji için lineer zayıflatma katsayısının (cm^{-1}) tahmin edilmesi için regresyon denklemleri

Agrega Tipi	Kür Tipi	Regresyon Denklemleri
REF	Buhar	$Y = 0,0917 - 0,00133 \times \text{s/b oranı} + 0,0150 \times \text{lif oranı} - 0,0008 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 0,0948 - 0,00126 \times \text{s/b oranı} + 0,0150 \times \text{lif oranı} - 0,0008 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
GAD	Buhar	$Y = 0,1045 - 0,00244 \times \text{s/b oranı} + 0,0150 \times \text{lif oranı} - 0,0008 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 0,1075 - 0,00236 \times \text{s/b oranı} + 0,0150 \times \text{lif oranı} - 0,0008 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
BAR	Buhar	$Y = 0,0790 - 0,00320 \times \text{s/b oranı} + 0,0150 \times \text{lif oranı} - 0,0008 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$
	Su	$Y = 0,0820 - 0,00328 \times \text{s/b oranı} + 0,0150 \times \text{lif oranı} - 0,0008 \times \text{s/b oranı} \times \text{lif oranı}$

Şekil 5.18'de ise s/b oranı ve çelik lif oranına bağlı olarak 1,250 MeV enerji için en yüksek lineer zayıflatma katsayısının görüldüğü GAD serisi için tepki yüzey grafiği verilmiştir. REF ve BAR serileri için hazırlanan tepki yüzeyleri Ek C.17 ve C.18'de verilmiştir. Tüm serilerde s/b oranının artmasıyla lineer zayıflatma katsayılarının arttığı ancak çelik lif oranının değişmesiyle herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür. Ayrıca tüm seriler için tepki yüzeylerinin renk dağılımlarından görüldüğü gibi en büyük değişimin GAD serisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.18 GAD serisi için 1,250 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

5.2 Karışımların Optimizasyonu

Optimizasyon, seçilen karışım ve üretim parametreleri gibi bağımsız değişkenlere bağlı olarak elde edilen malzeme özellikleri gibi bağımlı değişkenlerin, hedeflenen seviyelerinin elde edilmesi amacı ile değişkenlerin koşullarına göre (maksimum, minimum veya hedef değerlere göre) en uygun çözümlerin bulunmasını amaçlamaktadır. Karışımların optimizasyonunda genellikle malzemenin performansını veya kalite kriterlerini belirleyen çok sayıda bağımsız değişken mevcuttur. Dolayısıyla, hedeflenen malzeme özelliklere ulaşabilmek için birden fazla çözüm mevcut olabilmektedir. Bu nedenle, değişkenlerin bazılarının maksimum seviyede tutulması, bazılarının minimum seviyede tutulması, bazılarının da kabul edilebilir değerler veya hedef değer alması gerekmektedir. Bu yüzden, optimizasyon çalışmalarında hedeflenen çözüme ulaşabilmek için tüm değişkenlerin birlikte ele alınması gerekmektedir. Ancak bu durumda, optimizasyon işlem oldukça karmaşık bir problem oluşturmaktadır. Bu problemi çözmek için literatürde birçok yöntem önerilmekte ancak arzu edirlilik yöntemi (desirability function), bilgisayar yazılımı ile elde edilebilirliği, kolaylığı ve her bir tepki için verilen önem ve etki ağırlığının değiştirilebilir olması nedeniyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [98],[142],[143]. Arzu edirlilik yöntemi, tepki yüzey yönteminde çok hedefli bir optimizasyon tekniği olup, bu metodun diğer optimizasyon metotlarından üstünlüğü ise çok daha az veri ile gerçekçi sonuçlara ulaşabilmesidir [144],[145].

Bu çalışmada, UHPC'nin taze haldeki reolojik ve sertleşmiş haldeki fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama özelliklerinin incelenmesi amacıyla 3 farklı agrega tipi, 3 farklı s/b oranı ve 3 farklı lif içeriği gibi karışım parametreleri ile farklı kür uygulamaları gibi üretim parametreleri olmak üzere dört farklı bağımsız değişken kullanılmıştır. Kullanılan bu bağımsız değişkenlere bağlı olarak elde edilen bağımlı değişkenler (çökme-yayılma çapı, V-hunisi akış süresi, birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve lineer zayıflatma katsayısı) arasında istatistiksel analiz yapılmış ve en uygun regresyon modelleri seçilmiştir. Bu modeller kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyonun arzu edilebilirlik fonksiyonunda kullanılmak üzere değişkenlerin arzu edilen seviyeleri Design Expert bilgisayar programına girilmesiyle optimizasyon yapılmış ve en uygun karışım oranları ve bu oranlarla tahmini olarak elde edilebilecek malzeme özellikleri belirlenmiştir. Seçilen optimum karışım için arzu edilebilirlik değeri program tarafından hesaplanmıştır. Arzu edilebilirlik değeri 0 ile 1 arasında değişen çoklu optimizasyon için yanıt indeksidir ve bu değer 1'e yaklaşması belirlenen amaç kriterlerin sağlandığını belirtmektedir. Literatürde [146], arzu edilebilirlik değerinin 1-0,80 arasında olması mükemmel, 0,80-0,63 arasında olması iyi ve 0,63-0,37 arasında olması kabul edilebilir ancak tüm kriterlerin sağlanması yönünden kötü bir yaklaşım olduğu belirtilmiştir.

5.2.1 Optimizasyon Amaç Koşulları

Bu çalışmada, taze halde kendiliğinden yerleşebilir kıvamda olmasıyla yüksek mekanik özelliklere sahip olmakla birlikte X-ışını ve gama radyasyonuna karşı zırhlama özelliği geliştirilmiş UHPC malzemesinin tasarımı asıl olarak hedeflenmiştir. Deney sonuçlarının irdelenmesiyle kıvam, mekanik ve radyasyon zırhlama özellikleri bakımından farklı karışımlar ön plana çıkmıştır. Ancak, bu özelliklerin hepsinin aynı anda amaçlanan seviyelere getirebilecek optimum karışımlar Design Expert bilgisayar programı yardımıyla belirlenmiştir.

Farklı karışım ve üretim parametreleri ile üretilen UHPC malzemesinin optimizasyonu yapılırken 3 farklı amaç düşünülmektedir (Çizelge 5.20). Bu amaçlar doğrultusunda ayrı ayrı optimizasyon yapılmıştır. Yapılan tüm optimizasyonlarda, UHPC malzemesinin birim maliyetini çelik lif oranı önemli derecede arttırdığından dolayı daha ekonomik karışım çözümlerini belirlemek amacıyla çelik lif oranının en düşük olduğu optimum çözümler araştırılmıştır.

Çizelge 5.20 UHPC malzemesinin optimizasyonu için belirlenen amaçlar

No	Amaçlar
1	• Kendiliğinden yerleşebilir kıvam • Yüksek mekanik özellikler
2	• Kendiliğinden yerleşebilir kıvam • Yüksek mekanik özellikler • X-ışınına karşı yüksek zırhlama özelliği
3	• Kendiliğinden yerleşebilir kıvam • Yüksek mekanik özellikler • Gama ışınına karşı yüksek zırhlama özelliği

Çizelge 5.20’de verilen 1. optimizasyon amacında zırhlama özelliklerinden bağımsız olarak sadece kıvam ve mekanik özellikler açısından üstün özellikler ile birlikte en ekonomik çözüm aranmaktadır. 2. ve 3. optimizasyon amacında ise kıvam ve mekanik özellikler ile birlikte X-ışını enerji seviyesi olan 0,200 MeV değeri ve gama ışını enerji seviyeleri olan 0,662 MeV ve 1,250 MeV değerleri için hesaplanan lineer zayıflatma katsayısının en yüksek değere ulaşması istenmektedir. Arzu edilen bu amaçlara göre belirlenen optimizasyon kriterleri Çizelge 5.21’de verilmiştir.

Çizelge 5.21 Arzu edilen amaçlar için optimizasyon kriterleri

	Değişkenler	Limitler	Amaç 1	Amaç 2	Amaç 3
Bağımsız Değişkenler	A:s/b oranı (%)	18-36	Aralıkta	Aralıkta	Aralıkta
	B:lif oranı (%)	1-3	Minimum	Minimum	Minimum
	C:Agrega Tipi	REF-GAD-BAR	Aralıkta	Aralıkta	Aralıkta
	D:Kür Tipi	Buhar - Su	Aralıkta	Aralıkta	Aralıkta
Bağımlı Değişkenler	Çökme-yayılma çapı (cm)	10-23	Maksimum	Maksimum	Maksimum
	V-hunisi akis süresi (sn)	15-100	Minimum	Minimum	Minimum
	Birim Ağırlık (kg/m ³)	2270-3768	Aralıkta	Aralıkta	Aralıkta
	Basınç dayanımı (MPa)	91-201	Maksimum	Maksimum	Maksimum
	Eğilme dayanımı (MPa)	9,6-37,8	Maksimum	Maksimum	Maksimum
	Çekme dayanımı (MPa)	3,2-17,4	Maksimum	Maksimum	Maksimum
	L.Z.K. (0,200 MeV) (cm ⁻¹)	0,352- 0,998	-	Maksimum	-
	L.Z.K. (0,662 MeV) (cm ⁻¹)	0,174-0,254	-	-	Maksimum
	L.Z.K. (1,250 MeV) (cm ⁻¹)	0,111-0,163	-	-	Maksimum

5.2.2 Optimum Karışım Çözümleri

Farklı karışım ve üretim parametreleri ile üretilen UHPC malzemesinin optimizasyonu için Çizelge 5.20’de verilen 3 farklı amaca ait optimum malzeme karışım çözümleri Çizelge 5.22’de verilmiştir. UHPC malzemesinin tüm amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilen optimizasyon işleminde, kullanılan malzemeler arasında en yüksek maliyete sahip olan çelik lif oranının minimize edilmesi ile birim maliyetin düşük olması düşünülmektedir.

UHPC malzemesinin zırhlama özelliklerinden bağımsız olarak sadece kıvam ve mekanik özellikler açısından üstün özellikler ile birlikte en ekonomik çözüm aranana Amaç 1 için, agrega tipi olarak GAD serilerinin 0,18 s/b oranına ve %1,35 çelik lif içeriğine sahip karışımında optimum tasarım elde edilmiştir. Bu optimum tasarımın, hedeflenen kriterleri sağlama düzeyini belirten arzu edilebilirlik değeri, 0,763 gibi yüksek bir değer olarak tüm kriterlerin sağlanması yönünden iyi bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir.

UHPC malzemesinin kıvam ve mekanik özellikler ile birlikte X-ışını enerji seviyesi olan 0,200 MeV enerji değeri (Amaç 2) ve gama ışını enerji seviyeleri olan 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerji değerleri (Amaç 3) için hesaplanan lineer zayıflatma katsayısının en yüksek değere ulaşması istenmektedir. Amaç 2 için optimum tasarım, agrega tipi olarak BAR serilerinin 0,18 s/b ve %1,94 çelik lif oranına sahip karışımında optimum tasarım elde edilmiştir. Bu optimum tasarımın, hedeflenen kriterleri sağlama düzeyini belirten arzu edilebilirlik değeri 0,451 gibi düşük bir değer olarak tüm kriterlerin sağlanması yönünden kötü ancak kabul edilebilir bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir. Burada, BAR serilerin mekanik özellikleri düşük olmasından dolayı, hedeflenen maksimum mekanik özelliklere ulaşamadığından dolayı arzu edilebilirlik değerinin düşük çıkmıştır. Ancak Çizelge 5.22’de görüldüğü gibi optimum karışımın 156,9 MPa basınç dayanımına, 21,6 MPa eğilme dayanımına ve 8,5 MPa çekme dayanımına ulaşmasıyla mekanik olarak üstün performans sağladığı belirlenmiştir.

Amaç 3 için optimum tasarım, agrega tipi olarak GAD serilerinin 0,18 s/b ve %1,65 çelik lif oranına sahip karışımında optimum tasarım elde edilmiştir. Bu optimum tasarımın, hedeflenen kriterleri sağlama düzeyini belirten arzu edilebilirlik değeri, 0,743 gibi yüksek bir değer olarak tüm kriterlerin sağlanması yönünden iyi bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.22 Arzu edilen amaçlara ait optimum karışım çözümleri

	Değişkenler	Amaç 1	Amaç 2	Amaç 3
Bağımsız Değişkenler	A:s/b oranı (%)	18	18	18
	B:lif oranı (%)	1,35	1,94	1,65
	C:Agrega Tipi	GAD	BAR	GAD
	D:Kür Tipi	Buhar K.	Buhar K.	Buhar K.
Bağımlı Değişkenler	Çökme-yayılma çapı (cm)	20,4	18,5	20,0
	V-hunisi akis süresi (sn)	15,3	34,0	15,3
	Birim Ağırlık (kg/m ³)	3171,5	2933	3185
	Basınç dayanımı (MPa)	193,3	156,9	195,6
	Eğilme dayanımı (MPa)	23,0	21,6	25,8
	Çekme dayanımı (MPa)	12,3	8,5	13,1
	L.Z.K. (0,200 MeV) (cm ⁻¹)	0,513	0,833	0,552
	L.Z.K. (0,662 MeV) (cm ⁻¹)	0,229	0,215	0,229
	L.Z.K. (1,250 MeV) (cm ⁻¹)	0,149	0,139	0,149
Optimizasyon için arzu edilebilirlik değeri:		0,763	0,451	0,743

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozit (UHPC) malzemelerin, 3 farklı agrega tipi (silis kumu-kuvars tozu karışımı, barit kumu ve granüle atık demir tozu), 3 farklı su/bağlayıcı oranı (0,18, 0,24 ve 0,36) ve 3 farklı çelik lif içeriğinden (%1, %2 ve %3) oluşan karışım parametreleri ve 2 farklı kür tipine (buhar kürü ve su kürü) bağlı olarak geliştirilen üretim parametreleri ile toplam 54 farklı seri tasarlanarak üretilmiş, taze haldeki reolojik ve sertleşmiş haldeki fiziksel ve mekanik özellikler yapılan deneysel çalışmalar kapsamında detaylı olarak incelenmiştir. 54 farklı UHPC serinin bütün parametrelerin değişimini inceleyebilecek şekilde azaltılmış olarak seçilen 15 farklı UHPC seride, X-ışını ve gama radyasyon zırhlama özellikleri deneysel ve teorik olarak belirlenmiştir. Ayrıca, radyasyon zırhlaması amacıyla yaygın olarak kullanılan basınç dayanım sınıfı C30/37 olan barit agregalı ağır beton numunesinin radyasyon zırhlama özellikleri belirlenmiş ve UHPC serileri ile radyasyon zırhlama performansı karşılaştırılmıştır.

Deney sonuçlarının istatistiksel analizi ve tasarım optimizasyonu için Design Expert bilgisayar programı ile varyans analizi (ANOVA) yapılarak karışım ve üretim parametrelerinin deney sonuçları üzerindeki etkisini gösteren anlamlılık seviyeleri belirlenmiştir. Buna ilave olarak, karışım ve üretim parametrelerine bağlı olarak deney sonuçlarının tahmin edilebilmesi için regresyon denklemleri geliştirilmiş ve Tepki Yüzeyi Yöntemi ile farklı karışım ve üretim parametrelerinin etkisine bağlı olarak deney sonuçlarının değişimi incelenmiştir. Son olarak, arzu edilen 3 farklı amaca göre tasarım optimizasyonu yapılmış ve optimum karışım ve üretim parametreleri belirlenmiştir. Çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlar ve sunulan öneriler aşağıdaki gibidir:

- UHPC malzemesinin taze haldeki işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile gerçekleştirilen çökme-yayılma ve V-hunisi akış deneylerinde, s/b oranı 0,18 olan serilerin akıcı kıvamda olmasıyla kendiliğinden yerleşen özellik gösterdiği saptanmıştır. Karışımlarda çelik lif içeriğinin artmasıyla işlenebilirlik özelliklerin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, yuvarlak tane şekline sahip olan granüle atık demir tozu kullanılan serilerin işlenebilirlik özelliği diğer agregalı serilere göre daha iyi olduğu belirlenmiştir.
- Elde edilen çökme-yayılma ve V-hunisi akış deney sonuçlarının istatistiksel analizi sonucu tüm karışım parametrelerinin işlenebilirlik özelliklerine önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Ancak, çökme-yayılma çapına çelik lif oranının ve V-hunisi akış süresine ise agrega tipinin etkisinin daha fazla olduğu analiz sonucunda görülmüştür.
- Farklı özgül ağırlıktaki agregalar kullanılarak üretilen UHPC malzemesinin birim ağırlıkları, silis ve kuvars agregalı serilerinde 2271-2408 kg/m³, barit agregalı serilerinde 2889-3319 kg/m³ ve granüle atık demir agregalı serilerinde 3146-3708 kg/m³ arasında olduğu belirlenmiştir. TS EN 206-1'de [122] belirtilen tarife göre barit kumu ve granüle atık demir tozu kullanılarak üretilen UHPC serilerin tüm s/b oranları için ağır beton sınıfına girdiği görülmüştür.
- UHPC serilerinin basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde, kullanılan agrega tipi, s/b oranı ve kür tipinin basınç dayanımını önemli derecede etkilemesine rağmen çelik lif içeriğinin, basınç dayanımı üzerinde çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. UHPC serileri arasında, basınç dayanımı en yüksek s/b oranı 0,18 ve %3 çelik lif içeren granüle atık demir agregalı karışımlarda su ve buhar kürü uygulamaları için sırasıyla 182 MPa ve 203 MPa olarak hesaplanmıştır. Granüle atık demir tozu sahip olduğu yuvarlak, boşluksuz ve sert tane yapısı nedeniyle basınç dayanımı üzerinde olumlu etki göstermiştir. Barit kumunun yüksek yoğunlukta ve sertlikte olmasına rağmen parçalı yapısı ve içyapısında mikro çatlaklar olmasından dolayı diğer serilere göre daha düşük basınç dayanıma sahiptirler. Özellikle yüksek dayanıma sahip s/b oranı 0,18 olan serilerde bu fark daha da belirginleşmiştir.
- Su kürü uygulanan UHPC serilerin basınç dayanımının 90 gün boyunca gelişimi incelendiğinde, 28. günden sonra tüm UHPC serilerinin dayanım kazanma hızının

azaldığı görülmüştür. UHPC karışımlarında s/b oranı 0,18 ve 0,24 olan serilerde buhar kürü uygulamasının basınç dayanımı, 90 gün su kürü uygulamasına göre daha fazla olmasına rağmen s/b oranı 0,36 olan serilerde bu durum tam tersi olarak görülmüştür. Bu nedenle, buhar kürü uygulaması yüksek bağlayıcı miktarına sahip olan düşük s/b oranındaki karışımlar için basınç dayanımının daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür.

- UHPC serilerin yük-deformasyon eğrileri incelendiğinde, agrega tipinin, çelik lif içeriğinin ve kür tipinin UHPC serilerin pik yükünü (P_p) ve pik yük deformasyonunu (δ_p) önemli derecede etkilediği görülmüştür. Buna rağmen, 0,18 s/b oranına sahip tüm seriler deformasyon sertleşmesi davranışı göstermiştir. Özellikle karışım içindeki çelik lif oranının %1'den %3'e artmasıyla liflerin birbirlerine daha yakın olması sağlanmakta ve bu nedenle daha sık olan lifler, mikro çatlakların makro çatlaklara geçmesini engelleyerek deformasyon sertleşmesi davranışını belirginleştirmektedir. Ayrıca yüksek lif içeriğine sahip serilerde, lif başına düşen gerilmelerin azalmasıyla daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olmakta ve bu nedenle ilk çatlaktan sonra ani azalmalar görülmediği için ilk çatlak oluşumu belirgin olmamıştır. ASTM C1609/C1609M'de [56] verilen tipik yük-deformasyon eğrisinde, ilk çatlağın oluşumundan sonra yük ani olarak azaldığı için ilk çatlak belirgindir. Ancak, bu çalışmada olduğu gibi yüksek lif içeriği ile yüksek yük taşıma kapasitesine sahip kompozitler için standartta verilen eğri tekrar oluşturulmalıdır.
- Eğilme gerilmesi altında belirlenen yük-deformasyon eğrilerinden hesaplanan kırılma tokluğu (enerji yutma kapasitesi) deney sonuçları genel olarak incelendiğinde, tüm parametrelerin kırılma tokluğunu etkilemiş olmasına rağmen özellikle çelik lif içeriğinin %1'den %3'e artması, yaklaşık %70 gibi yüksek bir değerde kırılma tokluğunun artmasında etkili rol oynamıştır.
- Su kürü uygulanan UHPC serilerin eğilme dayanımının 90 gün boyunca gelişimi incelendiğinde, 28. günden sonra tüm UHPC serilerinin dayanım kazanma hızının azaldığı görülmüştür. Tüm s/b oranları için buhar kürü uygulanan serilerin eğilme dayanımı, 28 gün su kürü uygulanan serilere göre daha yüksek olmasına rağmen 90 gün su kürü uygulanan serilere göre çok az daha düşük olduğu belirlenmiştir.

- UHPC serilerinin eğilme ve çekme dayanımını deney sonuçları incelendiğinde, agrega tipi, s/b oranı ve çelik lif içeriği gibi parametrelerin eğilme ve çekme dayanımını önemli derecede etkilemesine rağmen kür tipinin eğilme ve çekme dayanımını üzerinde çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. UHPC seriler arasında, en yüksek eğilme ve çekme dayanımı s/b oranı 0,18 ve %3 çelik lif içeriğine sahip buhar kürü uygulanan granüle atık demir tozu agregalı karışımlarda sırasıyla 38 MPa ve 17,4 MPa olarak hesaplanmıştır. Granüle atık demir tozunun sahip olduğu yuvarlak tane şekli karışımda kullanılan diğer köşeli taneli agregalara göre işlenebilirliği iyileştirmesinden dolayı karışımın homojenliğini arttırmıştır. Bu nedenle, liflerin dağılımını ve yönelimini olumlu yönde etkilemiş ve lif-matris aderansının artmasıyla eğilme ve çekme dayanımının arttığı düşünülmektedir. Barit kumunun agrega olarak kullanılması ise, tüm seriler arasında en düşük eğilme ve çekme dayanımı ve dayanım gelişim hızı göstermesine neden olmuştur.
- Elde edilen eğilme ve çekme dayanımı deney sonuçlarının istatistiksel analizi sonucu, tüm karışım parametrelerinin malzemenin çekme altında yük taşıma kapasitesine önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Bilindiği gibi eğilme dayanımına çelik lif oranının etkisinin daha fazla olduğu deneysel olarak görülmesine rağmen istatistiksel analiz sonucu çekme dayanımı üzerinde s/b oranının etkisinin çelik lif oranına göre daha fazla olduğu saptanmıştır.
- UHPC serilerinin çekme etkisi altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, çelik lif oranı %1 ve s/b oranı 0,18 olan karışımlar şekil değiştirme yumuşaması davranışı göstermesine rağmen %2 ve %3 çelik oranına sahip UHPC serilerinde şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemiştir. UHPC serilerinde çelik lif oranının artmasıyla belirginleşen şekil değiştirme sertleşmesi davranışı agreganın tipine göre farklılık göstermekte ve granüle atık demir tozu kullanılan serilerde bu davranış daha fazla belirginleşmiştir.
- Çimento esaslı lifli kompozitlerin direkt çekme gerilmesi altında malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deney koşullarını, numune boyutlarını ve analitik prosedürleri tanımlayan herhangi bir standart mevcut değildir. Ön deneyler ve deneysel çalışma sonuçlarına göre, deney numunesinin çekmeye maruz kalacak alanının azaltılarak çatlak oluşumunun numunenin orta noktasında meydana gelmesi sağlanmalıdır. Ayrıca, deney numunesinin alt ve üst kısımlarını tutan

başlıklar, oluşacak yüksek gerilmelerden dolayı deformasyon yapmadan çekme gerilmesinin numune üzerine dengeli bir şekilde iletilmesi sağlanmalıdır. Böylece çekme gerilmesi altında gerçeğe daha uygun malzeme özelliklerinin elde edilebilmesi mümkün olacaktır.

- Son yıllarda kullanımı hızla artan çimento esaslı lifli kompozitlerin çekme gerilmesi altında malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla, deney koşullarını ve numune boyutlarını tarif eden uluslararası bir standardın geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Ayrıca bu standartta çimento esaslı lifli kompozitlerin farklı performans seviyeleri için temel özelliklerin belirtilmesi gerekmektedir.
- UHPC malzemesinin 0,200 MeV enerjili X-ışını kaynağı ile 0,662 MeV enerjili sezyum (^{137}Cs) ve 1,250 MeV enerjili kobalt (^{60}Co) gama radyoizotopları olmak üzere 3 farklı enerji kaynağı için radyasyon zırhlama özelliklerini temsil eden lineer ve kütle zayıflatma katsayılarının deneysel ve teorik hesaplanan değerlerinin birbirleriyle benzer olduğu görülmüştür.
- Barit agregalı serilerin lineer ve kütle zayıflatma katsayıları 0,200 MeV enerji değerinde en yüksek değere ulaşmış olmasına rağmen 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerji değerlerinde granüle atık demir tozunun kullanıldığı seriler en yüksek değere ulaşmıştır. Bu farklılık, zırhlama malzemesinin atom numarasına ve radyasyon enerjisine göre fotonların madde ile etkileşmelerinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, 0,200 MeV gibi düşük enerji değerlerinde, atom numarası yüksek olan (Barit, $Z=56$) malzemelerin zırhlama performansı daha etkin olmasına rağmen 0,662 MeV ve 1,250 MeV gibi orta enerji değerlerinde ise atom numarası düşük olan (Demir, $Z=26$) malzemelerin zırhlama performansı daha etkindir. Dolayısıyla, zırhlama amacıyla kullanılması düşünülen malzemelerin seçimi, malzemenin atom numarasının radyasyon enerjisine göre etkinliğinin değiştiği düşünülerek yapılması gerekmektedir.
- En düşük yarı değer ve onda-bir değer kalınlıklarına sahip olan UHPC serilerinin 0,200 MeV, 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerji değerlerinde sırasıyla yaklaşık 4,0, 2,7, ve 2,4 kat daha fazla kalınlıkla kurşun malzemesinin zırhlama performansına eşdeğer bir zırhlamaya sahip olabileceği belirlenmiştir.

- Karışımlarda s/b oranının artmasıyla karışım içinde bulunan agrega hacmi artmış ve bu nedenle, s/b oranının artmasıyla zırlama özelliği olan agregaların kullanıldığı serilerin lineer zayıflatma katsayılarının arttığı görülmüştür. Ayrıca, UHPC malzemesinin lineer zayıflatma katsayısının farklı kür uygulamalarından ve çelik lif oranının değişiminden anlamlı bir şekilde etkilenmediği görülmüştür.
- Farklı karışım ve üretim parametreleri ile üretilen UHPC malzemesinin optimizasyonu için aşağıda verilen 3 farklı amaca göre optimum malzeme karışımları belirlenmiştir. Belirlenen bu farklı amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilen optimizasyon işlemlerinin hepsinde, kullanılan malzemeler arasında en yüksek maliyete sahip olan çelik lif oranının minimize edilmesi ile birim maliyetin azaltılması hedeflenmiştir.

Amaç 1. Radyasyon zırlama özelliklerinden bağımsız olarak işlenebilirlik ve mekanik özellikler açısından üstün özellikler ile birlikte en ekonomik tasarım: granüle atık demir tozunun kullanılarak 0,18 s/b oranına ve %1,4 çelik lif içeriğine sahip karışım,

Amaç 2. İşlenebilirlik ve mekanik özellikler ile 0,200 MeV enerji değerinde radyasyon zırlama açısından üstün özelliklerin sağlandığı en ekonomik tasarım: barit kumunun kullanılarak 0,18 s/b oranına ve %1,9 çelik lif içeriğine sahip karışım,

Amaç 3. İşlenebilirlik ve mekanik özellikler ile 0,662 MeV - 1,250 MeV enerji değerinde radyasyon zırlama açısından üstün özelliklerin sağlandığı en ekonomik tasarım: granüle atık demir tozunun kullanılarak 0,18 s/b oranına ve %1,7 çelik lif içeriğine sahip karışım olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Richard, P. ve Cheyrezy, M. H., (1994). “Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa”, Special Publication, 144(24): 507–518.
- [2] Tang, M.-C., (2004). “High Performance Concrete – Past, Present and Future”, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 3-9, 13-15 September 2004, Kassel, Germany.
- [3] Torrenti, J.M., Matte, V., Maret, V. ve Richet, C., (1996). “High Integrity Containers for Interim Storage of Nuclear Wastes Using Reactive Powder Concrete”, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High Performance Concrete, Paris, 1407–1413.
- [4] Matte, V. ve Moranville, M., (1999). “Durability of reactive powder composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes”, Cem. Concr. Compos., 21(1):1–9.
- [5] IAEA-TECDOC-1515, (2006). Development of Specifications for Radioactive Waste Packages, International Atomic Energy Agency, Viyna.
- [6] Peters, R., Diersch, R., Jack, A., ve Jobson, G., (1999). “CONSTOR –Spent Nuclear Fuel Storage and Transport Cask System”, WM’99 Conference, 28 February - 4 March, 1999.
- [7] Brandt, A.M., (2009). Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance, Second Edition. Taylor & Francis, New York.
- [8] Bentur, A., ve Mindess, S., (2007). Fibre Reinforced Cementitious Composites, Second Edition. Taylor & Francis, New York.
- [9] Neville, A.M., (1995). Properties of Concrete, 4th and Final Edition, Longman, Harlow, Essex.

- [10] Tokyay, M., (2016). Cement and Concrete Mineral Admixtures, CRC Press Taylor & Francis Group.
- [11] Naaman, A.E., (2008). High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, High-performance Construction Materials: Science and Applications, World Scientific Publishing Co., Chapter 3, 91–153.
- [12] Baradan, B., Yazıcı, H., ve Aydın, S., (2015). Beton, İkinci Baskı. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, Türkiye.
- [13] Vitruvius, (1914). The Ten Books on Architecture, Ed. Morgan, M.H., Dover Inc, New York.
- [14] Newman, J., ve Choo, B.S., (2003). Advanced Concrete Technology 1: Constituent Materials, Elsevier Ltd, Oxford.
- [15] Xincheng, P., (2013). Super-High-Strength High Performance Concrete, CRC Press Taylor & Francis Group.
- [16] Romualdi, J.P. ve Mandel, J.A., (1964). “Tensile Strength of concrete Affected by UnigormlyDistributed and Closely Spaced Short Lengths of wire Reinforcement”, J. Am. Concr. Inst., 61(6):657-670.
- [17] Aitcin, P.C., (1998). High Performance Concrete, E & FN Spon, London.
- [18] Naaman, A.E., (1972). A statistical theory of strength for fiber reinforced concrete, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Paris.
- [19] Naaman, A.E. ve Reinhardt, H.W., (2003). “High Performance Fiber Reinforced Cement Composites HPFRCC-4: International RILEM Workshop”, Mater. Struct., 36(10):710–712.
- [20] Naaman, A.E., (2007). Tensile strain-hardening FRC composites: Historical evolution since the 1960, In: Grosse C.U. (eds) Advances in Construction Materials 2007, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [21] JCI-DFRCC Committee, (2003). “DFRCC Terminology and Application Concepts”, J. Adv. Concr. Technol., 1(3):335–340.
- [22] Naaman, A.E. ve Reinhardt, H.W., (2007). “Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response,” Mater. Struct., 39(5):547–555.

- [23] Wille, K., El-Tawil, S., ve Naaman, A.E., (2014). “Properties of Strain Hardening Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC) under Direct Tensile Loading”, *Cem. Concr. Compos.*, 48:53–66.
- [24] Kmita, A., (2000). “A new generation of concrete in civil engineering”, *J. Mater. Process. Technol.*, 106(1):80–86.
- [25] Japan Society of Civil Engineers, (2008). *Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)*, Concrete Engineering Series 82, Tokyo.
- [26] Naaman, A.E.,(2003). “Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites”, In: *Proceedings of the international RILEM workshop high performance fiber reinforced cementitious composites HPFRCC4*, 15-18 June 2003, Ann Arbor, USA,
- [27] Li, V.C., (1993). “From Micromechanics to Structural Engineering - the Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications”, *J. Struct. Mech. Earthq. Eng.*, 10(2):37–48.
- [28] Reda, M.M., Shrive, N.G., ve Gillott, J. E., (1999). “Microstructural investigation of innovative UHPC”, *Cem. Concr. Res.*, 29(3):323–329,
- [29] AFGC&SETRA, (2002). *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes - Interim Recommendations*. Association Francaise de Génie Civil, France.
- [30] Richard, P. ve Cheyrezy, M., (1995). “Composition of reactive powder concretes”, *Cem. Concr. Res.*, 25(7):1501–1511.
- [31] Zhao, S., Fan, J. ve Sun, W., (2014). “Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 50:540–548.
- [32] Resplendino, J., (2011). “Introduction: What is a UHPFRC? ”, in *Designing and building with UHPFRC-State of the Art and Development*, 3–12, Derleyen: Toutlemonde, F. ve Resplendino, J., ISTE Ltd. ve John Wiley & Sons Inc., London.
- [33] Eide, M.B. ve Hisdal, J.-M., (2012). *Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art*, SINTEF Building and Infrastructure,

COIN Project report no: 44, Oslo.

- [34] Cheyrezy, M., Maret, V. ve Frouin, L., (1995). “Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete) ”, *Cem. Concr. Res.*, 25(7):1491–1500.
- [35] CEB-FIP International Federation, (2009). *Structural Concrete: Textbook on Behaviour, Design and Performance*, Second Edi., International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland.
- [36] Bonneau, O., Vernet, C., Moranville, M. ve Aïtcin, P.C., (2000). “Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete”, *Cem. Concr. Res.*, 30(12):1861–1867.
- [37] Papadakis, V.G., (1999). “Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete”, *Cem. Concr. Res.*, 29(1):79–86.
- [38] Deeb, R., Ghanbari, A. ve Karihaloo, B.L., (2012). “Development of self-compacting high and ultra high performance concretes with and without steel fibres”, *Cem. Concr. Compos.*, 34(2):185–190.
- [39] Mazanec, O., Lowke, D. ve Schießl, P., (2010). “Mixing of high performance concrete : effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time”, *Mater. Struct.*, 43(3):357–365.
- [40] Dehn, F., Orgass, M. ve König, A., (2014). “Influence of different mixing parameters on fresh properties of ultra high strength hybrid fibre concrete (HFC)”, *Fifth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5)*, 243–249.
- [41] Williams, D.A., Saak, A.W. ve Jennings, H.M., (1999). “Influence of mixing on the rheology of fresh cement paste”, *Cem. Concr. Res.*, 29(9):1491–1496.
- [42] Simon, A., (2011). “New AFGC Recommendations on UHPFRC: Chapter 1 - Mechanical Characteristics and Behavior of UHPFRC”, in *Designing and Building with UHPFRC- State of the Art and Development*, 723–741, Derleyen: Toutlemonde, F. ve Resplendino, J., ISTE Ltd. ve John Wiley & Sons Inc., London.
- [43] Tuan, N.V., (2011). *Rice husk ash as a mineral admixture for ultra high performance concrete*, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology,

Netherlands.

- [44] Hoy, C.W. ve Bartos, P.J.M., (1999). “Interaction and packing of fibres: Effects on the mixing process”, in Third International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement, 181–191.
- [45] Martinie, L., Rossi, P. ve Roussel N., (2013) “Rheology of Fiber-reinforced Cementitious Materials: Basic Concepts and Application to UHPFRC”, in Designing and Building with UHPFRC, 575–578, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ USA
- [46] Yazici, H., (2007). “The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures,” Build. Environ., 42(5):2083–2089.
- [47] Fehling, E., Leutbecher, T. ve Bunje, K., (2004). “Design relevant properties of hardened ultra high performance concrete”, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 327–338, 13-15 September 2004, Kassel, Germany.
- [48] Yunsheng, Z., Wei, S., Sifeng, L., Chujie, J. ve Jianzhong, L., (2008). “Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static-dynamic behaviors”, Cem. Concr. Compos., 30(9):831–838.
- [49] Tjiptobroto, P. ve Hansen, W., (1992). “Mechanism for Tensile Strain Hardening in High Performance Cement-based Fiber Reinforced Composites”, Cem. Concr. Compos., 13(1991):265–273.
- [50] Brameshuber, W., Brockmann, T. ve Banholzer, B., (2004) “Textile Reinforced Ultra High Performance Concrete”, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 511–522, 13-15 September 2004, Kassel, Germany.
- [51] Wille, K., Naaman, A.E., El-Tawil, S. ve Parra-Montesinos, G.J., (2012). “Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing”, Mater. Struct., 45(3):309–324.
- [52] Tran N.T., Tran T.K. ve Kim, D.J., (2014). “High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension”, Cem. Concr. Res., 69(2015):72–87.

- [53] Mechtcherine, V. ve Schulze, J., (2005). “Ultra-ductile concrete–material design concept and testing”, *CPI Concrete Plant International*, 5:88-98.
- [54] Gu, C., Ye, G. ve Sun, W., (2015). “Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives”, *Sci. China Technol. Sci.*, 58(4):587–599.
- [55] ASTM C1018-97, (1997). Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading), ASTM, Pennsylvania.
- [56] ASTM C1609/C1609M-12, (2012). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM, Pennsylvania.
- [57] JSCE-SF4, (1984). Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete, Japanese Society of Civil Engineers, Tokyo.
- [58] Hillerborg, A. (1983). Concrete fracture energy tests performed by 9 laboratories according to a draft RILEM recommendation, Report to RILEM TC50-FMC, Division of Building Materials, LTH, Lund University.
- [59] Sivakumar, A. ve Sounthararajan V.M., (2013). “Toughness characterization of steel fibre reinforced concrete A review on various international standards”, *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 4(3):65–69.
- [60] Herold, G. ve Muller, H., (2004). “Measurement of porosity of ultra-high strength fibre- reinforced concrete”, *Proceedings of the international symposium on ultra-high performance concrete*, 685–694, 13-15 September 2004, Kassel, Germany.
- [61] Abbas, S., Soliman, A.M. ve Nehdi, M.L., (2015). “Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages”, *Constr. Build. Mater.*, 75(2015):429–441.
- [62] Sobuz, H.R., Visintin, P., Mohamed Ali, M.S., Singh, M., Griffith, M.C. ve Sheikh, A.H., (2016). “Manufacturing ultra-high performance concrete utilising conventional materials and production methods”, *Constr. Build. Mater.*, 111:251–261.

- [63] Tuan, N.V., Ye, G., Breugel, K.V., Fraaij, A.L.A. ve Bui, D.D., (2011). “The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 25(4):2030–2035.
- [64] Parra-Montesinos, G., (2003). “HPFRCC in earthquake-resistant structures: current knowledge and future trends”, in *International Workshop High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, RILEM Publications, 453–472.
- [65] Naaman, A.E., (2011). “Half a Century of Progress Leading To Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete: Part 2- Tensile Stress-Strain Response”, *2nd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites*, 12-14 December 2011, Rio de Janeiro, Brazil
- [66] Yazici, H., Yardimci, M.Y., Aydin, S. ve Karabulut, A.Ş., (2009). “Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes”, *Constr. Build. Mater.*, 23(3):1223–1231.
- [67] Lee, M.G., Wang, Y.C. ve Te Chiu, C., (2007). “A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material”, *Constr. Build. Mater.*, 21(1):182–189.
- [68] Ren, G.M., Wu, H., Fang, Q., Liu, J.Z. ve Gong, Z.M., (2016). “Triaxial Compressive Behavior of UHPCC and Applications in the Projectile Impact Analyses”, *Constr. Build. Mater.*, 113:1-14.
- [69] Zhao, S. ve Sun, W., (2014). “Nano-mechanical behavior of a green ultra-high performance concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 63:150–160.
- [70] Martin, A., Harbison, S., Beach, K. ve Peter, C., (2012). *An Introduction To Radiation Protection*, Sixth Edit., Hodder Arnold, London.
- [71] Robertson, J.C., (1976). *A Guide to Radiation Protection*. The Macmillan Press Ltd., London.
- [72] Rutherford, F., (1913). *Radioactive Substances and Their Radiations*. Cambridge University Press.
- [73] Oto, B., (2012). Barit, Manyetit, Bazı Bor Mineralleri ve Atıklarını İçeren Beton Numunelerinin Gama Radyasyon Soğurganlıkları ve Nötron Tutma Kapasitelerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.

- [74] Mcalister, D.R., (1955). Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials, Ph.D thesis, University Lane Lisle, IL, USA
- [75] Singh, V.P., Ali, A.M., Badiger N.M. ve El-Khayatt, A.M., (2013). “Monte Carlo simulation of gamma ray shielding parameters of concretes”, Nucl. Eng. Des., 265:1071–1077.
- [76] Khan, F.M., (2010). The physics of radiation therapy, 4th ed, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia.
- [77] Attix, F.H., (1986). Gamma- and X-Ray Interactions in Matter, in Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany.
- [78] Turner, J.E., (2007). Atoms, Radiation and Radiation Protection, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany.
- [79] Wood, J., (1982). Computational Methods in Reactor Shielding. Elsevier Science, Pergamon.
- [80] NCRP Report No. 139, (2002). Risk-based classification of radioactive and hazardous chemical wastes, National Council on Radiation Protection & Measurements, Bethesda, Maryland.
- [81] Osmanlıoğlu, A.E. (2014). Radyoaktif Atık Yönetimi, Nobel Yayıncılık, Ankara.
- [82] IAEA Safety Series No. 111-F, (1995). The principles of radioactive waste management. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria
- [83] IAEA-TECDOC-1397, (2004). Long term behaviour of low and intermediate level waste packages under repository conditions, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria
- [84] Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Bilgi Köşesi, <http://www.taek.gov.tr/bilgi-kosesi.html>, 5 Mayıs 2017.
- [85] ICRP, (1997). General Principles for the Radiation Protection of Workers, ICRP Publication 75, Ann, ICRP 27 (1).
- [86] Schmidt, F.A.R., (1969). “Analytical radiation shielding calculations for concrete- formulas and parameters”, Nucl. Eng. Des., 10(3):308–324.

- [87] Ouda, A.S., (2015). “Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding”, *Prog. Nucl. Energy*, 79:48–55.
- [88] ASTM C637 - 14, (2014). *Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete*, ASTM, Pennsylvania.
- [89] ASTM C638-14, (2014). *Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates*, ASTM, Pennsylvania.
- [90] Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S. ve Mavi, B., (2005). “The shielding of gamma rays by concretes produced with barite”, *Prog. Nucl. Energy*, 46(1):1–11.
- [91] Shirmardi, S.P., Shamsaei, M. ve Naserpour, M., (2013). “Comparison of photon attenuation coefficients of various barite concretes and lead by MCNP code, XCOM and experimental data”, *Ann. Nucl. Energy*, 55:288–291.
- [92] Kharita, M.H., Takeyeddin, M., Alnassar, M. ve Yousef, S., (2008). “Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics”, *Prog. Nucl. Energy*, 50(1):33–36.
- [93] Kharita, M.H., Yousef, S. ve AlNassar, M., (2009). “The effect of carbon powder addition on the properties of hematite radiation shielding concrete”, *Prog. Nucl. Energy*, 51(2): 388–392.
- [94] Sharifi, S., Bagheri, R. ve Shirmardi, S. P., (2013). “Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel-magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental results”, *Ann. Nucl. Energy*, 53:529–534.
- [95] Oto, B., Gür, A., Kavaz, E., Çakır, T. ve Yaltay, N., (2016). “Determination of gamma and fast neutron shielding parameters of magnetite concretes,” *Prog. Nucl. Energy*, 92:71–80.
- [96] El-Sayed Abdo, A., Ali, M.A.M. ve Ismail, M.R., (2003). “Influence of magnetite and boron carbide on radiation attenuation of cement-fiber/composite”, *Ann. Nucl. Energy*, 30(4):391–403.
- [97] Kan, Y.C., Pei, K.C. ve Chang, C.L., (2004). “Strength and fracture toughness of

- heavy concrete with various iron aggregate inclusions”, Nucl. Eng. Des., 228(1–3):119–127.
- [98] Huang, X., Ranade, R., Ni, W. ve Li, V.C., (2013). “Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates”, Constr. Build. Mater., 44:757–764.
- [99] Shettima, A. U., Hussin, M.W. Ahmad, Y. ve Mirza, J., (2016). “Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete”, Constr. Build. Mater., 120:72–79.
- [100] Jankovic, K., Stankovic, S., Bojovic, D., Stojanovic, M. ve Antic, L., (2016). “The influence of nano-silica and barite aggregate on properties of ultra high performance concrete”, Constr. Build. Mater., vol. 126:147–156.
- [101] Al-Humaiqani M.M., Shuraim, A.B. ve Hussain, R.R., (2013). “ γ -Radiation Shielding Properties of High Strength High Performance Concretes Prepared with Different Types of Normal and Heavy Aggregates”, Asian Trans. Eng., 3:18–28.
- [102] Quapp W.J. ve Lessing, P.A., (1995). Radiation shielding composition, Patent No: US5786611 A.
- [103] Mattus, C.H. ve Dole, L.R., (2003). “Durability of Depleted-Uranium Aggregates (DUAGG) in Concrete Shielding Applications”, WM’03 Conference, 23-27 February 2003, Tucson, AZ.
- [104] Saegusa, T., Yagawa, G. ve Aritomi, M., (2008). “Topics of research and development on concrete cask storage of spent nuclear fuel”, Nucl. Eng. Des., 238(5):1168–1174.
- [105] Chuang, M.L. ve Huang, W.H. (2013). “Durability Analysis on Reactive Powder Concrete as Barrier Materials for Low-Level Radioactive Waste Disposal”, Appl. Mech. Mater., 284–287:1295–1299.
- [106] TS EN 197-1, (2012). Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, TSE, Ankara.
- [107] TS EN 13263-1, (2010). Silis dumanı - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri, TSE, Ankara.

- [108] ASTM C618, (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM, Pennsylvania.
- [109] Taфраoui, A., Escadeillas, G., Lebailli, S. ve Vidal, T. (2009). “Metakaolin in the formulation of UHPC”, *Constr. Build. Mater.*, 23(2):669–674.
- [110] Yu, R., Spiesz, P. ve Brouwers, H.J.H., (2014). “Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) ”, *Cem. Concr. Res.*, 56:29–39.
- [111] Dils, J., Boel, V. ve De Schutter, G., (2013). “Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC”, *Constr. Build. Mater.*, 41:455–463.
- [112] EFNARC, (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, Norfolk, UK.
- [113] De Schutter, G., Bartos, P.J.M., Domone, P. ve Gibbs, J., (2008). Self-compacting concrete, CRC Press LLC, Taylor and Francis Group, Scotland, UK.
- [114] TS EN 1015-3, (2007). Kagit harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile), TSE, Ankara.
- [115] ASTM C230 / C230M, (2014). Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM, Pennsylvania.
- [116] ASTM C 642, (2013). Standard Test Method for Density , Absorption , and Voids in Hardened Concrete, ASTM, Pennsylvania.
- [117] ASTM C109/109M, (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens), ASTM, Pennsylvania.
- [118] Berger, M. ve Hubbell, J., (1987). XCOM: Photon cross sections on a personal computer, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD.
- [119] TS EN 61331-1, (2015). Tıpta teşhis amaçlı kullanılan x-ışınına karşı koruyucu cihazlar - Bölüm 1: Malzemelerin zayıflatma özelliklerinin belirlenmesi, TSE, Ankara.

- [120] PTW-FREIBURG, (2016). Ionizing Radiation Detectors Catalog, Available:http://www.ptw.de/fileadmin/data/download/catalogviewer/DETECTORS_Cat_en_16522900_10/blaetterkatalog/index.html?startpage=10#page_90.
- [121] Wu, Z., Shi, C., He, W. ve Wu, L., (2016). “Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 103:8–14.
- [122] TS EN 206:2013+A1, (2017). Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk, TSE, Ankara.
- [123] ASTM C109 / C109M, (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM, Pennsylvania.
- [124] Yu, R., Spiesz, P. ve Brouwers, H.J.H., (2015). “Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres”, *Constr. Build. Mater.*, 79:273–282.
- [125] Sahmaran, M. ve Yaman, I.O., (2007). “Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, 21(1):150–156.
- [126] Kang, S.T., Lee, B.Y., Kim, J.-K. ve Kim, Y.Y. (2011). “The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 25(5):2450–2457.
- [127] De Koker, D. ve Van Zijl, G., (2004), “Extrusion of engineered cement-based composite material”, In: 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes, 1301–1310, 20–22 September 2004, Varenna, Italy.
- [128] Leung, C.K.Y. ve Li, V.C., (1992). “Effect of fiber inclination on crack bridging stress in brittle fiber reinforced brittle matrix composites”, *J. Mech. Phys. Solids*, 40(6):1333–1362.
- [129] El-Dieb, A.S. (2009). “Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers”, *Mater. Des.*, 30(10):4286–4292.
- [130] Yoo, D.-Y. Lee, J.-H. ve Yoon, Y.-S., (2013). “Effect of fiber content on

- mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites”, *Compos. Struct.*, 106:742–753.
- [131] Deng, Z. Daud, J.R. ve Gao, L., (2017). “Flexural toughness performance of hybrid fiber-reinforced RPC”, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 39(1):279-288.
- [132] Beigi, M.H., Berenjia, J. Omran, O.L., Nik, A.S. ve Nikbin, I.M., (2013). “An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete”, *Mater. Des.*, 50:1019–1029.
- [133] Naaman, A.E., (2003). “Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites”, *J. Adv. Concr. Technol.*, 1(3):241–252.
- [134] Park, S.H., Kim, D.J., Ryu, G.S. ve Koh, K.T., (2012). “Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete”, *Cem. Concr. Compos.*, 34(2):172–184.
- [135] El-Sayed Abdo, A., (2002). “Calculation of the cross-sections for fast neutrons and gamma-rays in concrete shields”, *Ann. Nucl. Energy*, 29(16):1977–1988.
- [136] Bashter, I.I., (1997a). “Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes”, *Ann. Nucl. Energy*, 24(17):1389–1401.
- [137] Bashter, I.I., (1997b). “Radiation attenuation and nuclear properties of high density concrete made with steel aggregates”, *Radiat. Eff. Defects Solids*, 140(3):351–364.
- [138] Berger, M.J. ve Hubbell, J.H., (1999). XCOM: Photon Cross Sections Database, Web version 1.2. Available from: <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>, 25 Aralık 2016.
- [139] Design Expert 9.0.5., <http://www.statease.com/dx10.html>, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, USA.
- [140] Ghafari, S., Aziz, H.A., Isa, M.H. ve Zinatizadeh, A.A., (2009). “Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum”, *J. Hazard. Mater.*, 163(2):650–656.
- [141] Beg, Q.K., Sahai, V. ve Gupta, R., (2003). “Statistical media optimization and

alkaline protease production from *Bacillus mojavensis* in a bioreactor”, *Process Biochem.*, 39(2):203–209.

- [142] Aldahdooh, M.A.A., Bunnori, N.M. ve Johari, M.A.M. (2013). “Evaluation of ultra-high-performance-fiber reinforced concrete binder content using the response surface method”, *Mater. Des.*, 52:957–965.
- [143] Harrington, E. C. J. (1965). “The Desirability Function,” *Ind. Qual. Control*, 21:494–498.
- [144] Çelik, B., (2007). *Recycled Aggregate Concrete At Elevated Temperatures*. Ph.D. Thesis, Boğaziçi University, Istanbul.
- [145] Derringer, G. ve Suich, R., (1980). “Simultaneous Optimization of Several Response Variables”, *Journal of Quality Technology*, 12(4):214–219.
- [146] Lazić, Z. R., (2004). *Design of experiments in chemical engineering : a practical guide*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

UHPC SERİLERİNİN İŞLENEBİLİRLİK DENEY SONUÇLARI

Çizelge A.1 UHPC serilerin çökme-yayılma çapı ve V-hunisi akış süresi deney sonuçları

Seriler	s/b oranı (%)	Lif oranı (%)	Çökme-yayılma çapı (cm)	V-hunisi akış süresi (sn)
REF	18	1	22	27
		2	22	35
		3	16	65
GAD		1	23	15
		2	21	17
		3	17	29
BAR		1	20	29
		2	18	33
		3	17	49
REF	24	1	19	42
		2	19	45
		3	13	73
GAD		1	21	19
		2	19	29
		3	16	35
BAR		1	21	30
		2	21	39
		3	13	70
REF	36	1	13	75
		2	13	82
		3	10	*
GAD		1	18	24
		2	17	28
		3	15	45
BAR		1	17	45
		2	17	55
		3	11	*

*UHPC serilerinde V-hunisi akış süresi sonucu elde edilememiştir.

UHPC SERİLERİNİN MEKANİK DENEY SONUÇLARI

Çizelge B.1 UHPC serilerin basınç dayanımı deney sonuçları

Seriler	s/b oranı (%)	Lif oranı (%)	Su Kürü Uygulaması (Günler)							Buhar Kürü
			1	3	7	14	28	56	90	
REF	18	1	23,0	62,3	95,5	121,5	147,6	150,5	151,4	178,3
		2	20,6	75,3	99,6	123,0	141,1	148,8	153,5	186,8
		3	28,8	68,5	98,7	121,7	151,9	158,6	171,3	200,7
GAD		1	28,4	79,5	102,8	111,8	143,2	154,6	158,0	192,0
		2	25,8	75,5	102,3	116,9	147,4	165,8	178,5	196,8
		3	23,7	75,9	97,9	116,6	148,8	168,9	182,8	202,9
BAR		1	16,4	62,0	83,8	99,4	108,5	114,0	129,2	137,8
		2	31,2	65,3	89,2	96,3	116,4	121,9	133,9	159,2
		3	22,6	71,0	97,7	102,3	129,0	134,1	148,7	162,3
REF	24	1	7,6	39,1	57,8	86,5	98,8	115,8	136,3	154,3
		2	9,2	41,6	62,8	86,9	99,3	125,2	131,3	159,5
		3	8,3	43,8	63,2	91,6	109,7	119,4	140,4	161,9
GAD		1	27,7	53,8	80,2	103,7	120,8	144,7	148,6	160,8
		2	22,0	54,5	89,0	119,5	132,9	153,4	164,2	179,6
		3	23,5	66,7	102,0	125,2	139,1	160,1	173,4	182,5
BAR		1	15,7	44,5	63,9	92,3	94,3	115,3	118,8	112,5
		2	15,5	50,2	72,9	85,3	94,8	109,3	116,4	135,2
		3	36,6	48,5	74,0	89,2	105,3	119,2	131,2	136,8
REF	36	1	4,2	21,9	36,4	51,8	60,4	79,4	86,7	95,1
		2	5,3	22,6	38,1	46,0	64,1	83,0	96,6	97,3
		3	6,2	26,4	42,3	50,5	67,6	87,2	101,3	108,7
GAD		1	8,9	36,4	63,8	71,2	85,2	103,9	115,0	109,0
		2	7,4	37,1	55,3	79,7	94,5	110,3	126,5	121,0
		3	8,0	35,1	62,3	76,8	102,0	113,2	133,6	126,2
BAR		1	7,1	27,5	40,9	55,7	69,4	77,5	91,7	91,0
		2	8,3	29,3	44,5	68,3	73,9	95,2	103,2	98,0
		3	8,6	33,3	48,0	70,4	79,1	95,6	105,8	107,5

Çizelge B.2 UHPC serilerin eğilme dayanımı deney sonuçları

Seriler	s/b oranı (%)	Lif oranı (%)	Su Kürü Uygulaması (Günler)							Buhar Kürü
			1	3	7	14	28	56	90	
REF	18	1	5,7	9,1	12,2	15,1	17,5	19,8	21,8	21,8
		2	5,4	15,2	20,2	23,6	25,8	27,4	28,0	27,4
		3	9,5	18,2	22,9	24,3	26,2	29,1	32,2	34,6
GAD		1	8,5	11,4	12,8	14,9	15,7	17,5	18,5	19,0
		2	9,8	17,3	20,0	25,0	29,2	31,0	32,0	30,2
		3	13,0	23,1	27,9	30,7	33,9	34,7	35,3	37,8
BAR		1	4,2	7,6	8,7	10,0	11,0	11,5	13,0	16,6
		2	9,9	15,7	17,4	18,7	19,6	20,3	21,1	22,3
		3	10,0	16,9	18,6	20,8	22,1	24,7	27,6	28,8
REF	24	1	4,1	6,5	8,0	9,7	10,9	11,2	11,4	14,7
		2	6,4	9,6	14,6	15,4	16,6	18,1	19,4	19,3
		3	9,1	14,0	20,6	22,0	24,2	26,7	29,4	26,2
GAD		1	5,5	9,3	11,4	11,5	12,5	13,3	14,2	13,5
		2	8,7	12,2	14,5	18,4	19,0	21,9	22,7	21,6
		3	9,1	18,8	22,6	24,5	26,2	29,1	31,7	34,3
BAR		1	2,8	5,6	7,1	7,6	8,5	9,9	10,1	13,3
		2	4,3	8,1	11,2	12,1	12,2	13,1	14,9	16,8
		3	6,5	12,5	13,6	14,2	16,7	19,5	22,6	21,3
REF	36	1	*	4,8	5,9	6,8	7,5	8,4	10,0	10,7
		2	*	3,8	6,8	7,9	9,0	11,0	13,1	12,4
		3	*	8,1	11,9	13,8	15,8	18,9	20,3	23,2
GAD		1	2,5	5,8	7,7	8,8	10,0	10,8	11,7	12,9
		2	3,5	8,4	10,6	13,8	17,3	20,1	21,0	17,7
		3	4,1	13,5	21,3	23,1	24,7	26,4	27,7	30,9
BAR		1	*	4,6	4,9	5,5	6,7	7,1	7,3	9,6
		2	*	7,1	9,4	10,9	10,9	11,8	13,8	13,1
		3	*	8,4	11,2	13,4	14,6	16,9	18,3	17,3

* UHPC serilerinde eğilme deneyinde sonuç elde edilememiştir.

Çizelge B.3 UHPC serilerin çekme dayanımı deney sonuçları

Seriler	s/b oranı (%)	Lif oranı (%)	90 gün su kürü	Buhar Kürü
REF	18	1	6,7	8,8
		2	10,9	10,3
		3	11,4	11,4
GAD		1	9,7	11,4
		2	11,6	13,2
		3	17,5	17,4
BAR		1	5,4	6,9
		2	6,5	8,3
		3	7,7	9,7
REF	24	1	6,0	6,6
		2	7,8	9,4
		3	10,1	10,4
GAD		1	6,6	5,7
		2	11,0	12,7
		3	11,8	14,4
BAR		1	6,5	6,3
		2	6,6	7,5
		3	7,3	10,1
REF	36	1	2,9	3,6
		2	4,3	3,7
		3	4,7	4,3
GAD		1	5,7	5,1
		2	6,8	6,5
		3	7,1	8,6
BAR		1	4,2	3,2
		2	4,8	4,2
		3	5,5	5,9

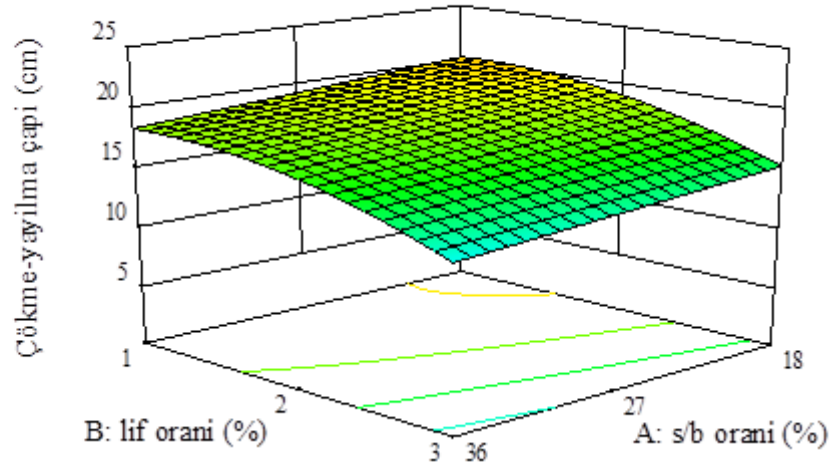
DENEY SONUÇLARINA AİT TEPKİ YÜZEYLERİ

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Çökme-yayılma çapı (cm)



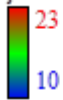
X1 = A: s/b oranı
X2 = B: lif oranı

Actual Factors
C: Agrega Tipi = GAD
D: Kür Tipi = Average



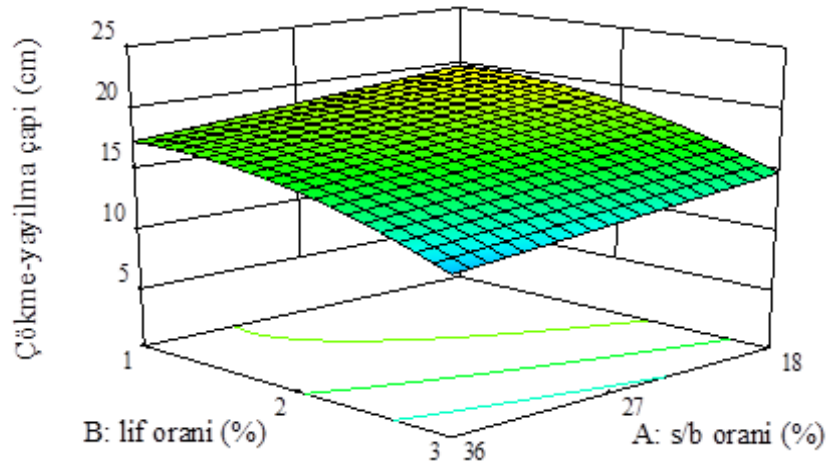
Şekil C.1 GAD serisi için çökme-yayılma çapı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Çökme-yayılma çapı (cm)



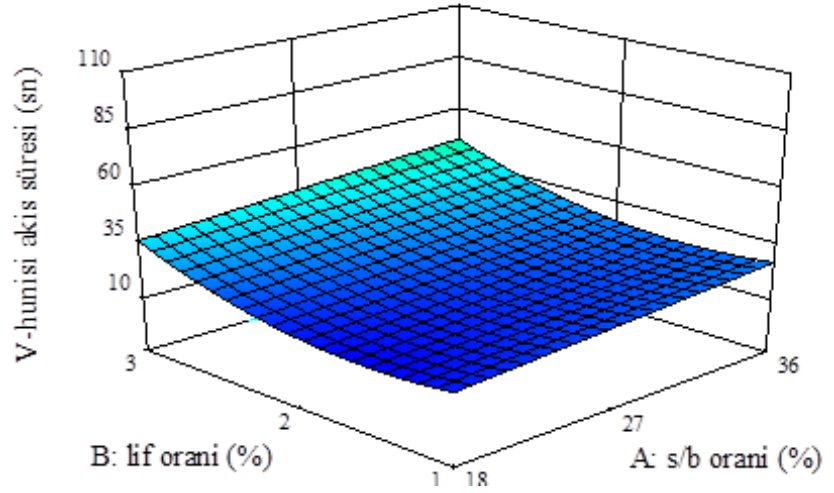
X1 = A: s/b oranı
X2 = B: lif oranı

Actual Factors
C: Agrega Tipi = BAR
D: Kür Tipi = Average



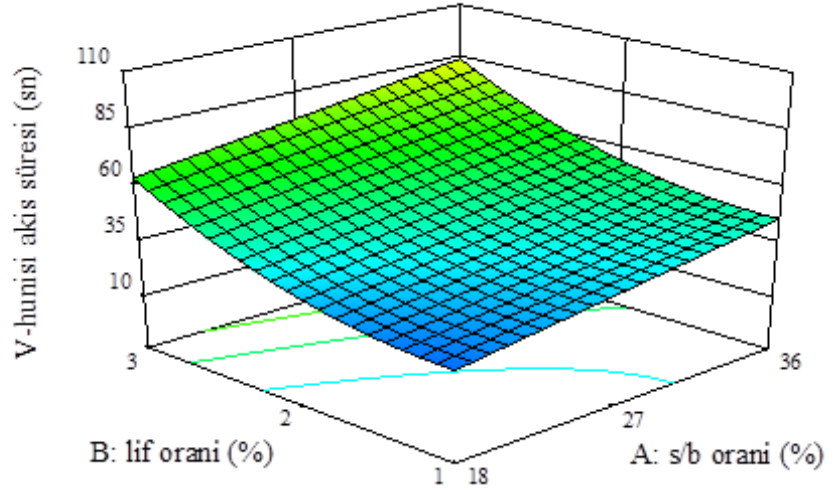
Şekil C.2 BAR serisi için çökme-yayılma çapı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 V-hunisi akis süresi (sn)
 110
 15
 X1 = A: s/b orani
 X2 = B: lif orani
 Actual Factors
 C: Agregada Tipi = GAD
 D: Kür Tipi = Average



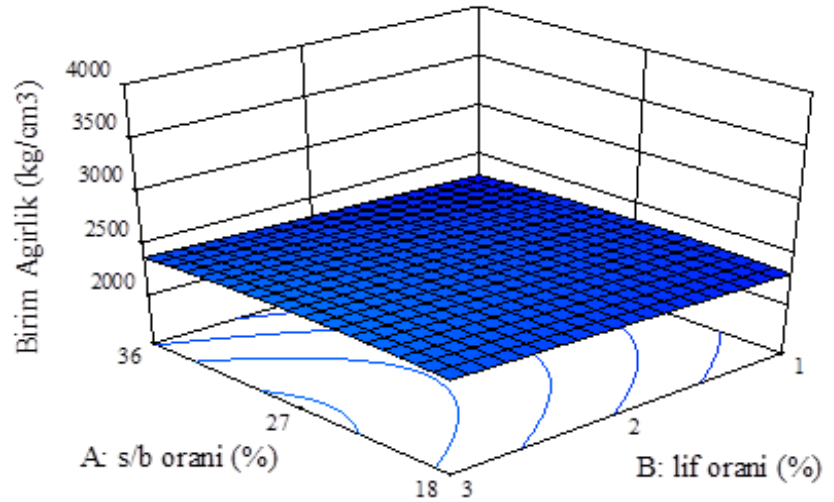
Şekil C.3 GAD serisi için V-hunisi akış süresi sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 V-hunisi akis süresi (sn)
 110
 15
 X1 = A: s/b orani
 X2 = B: lif orani
 Actual Factors
 C: Agregada Tipi = BAR
 D: Kür Tipi = Average



Şekil C.4 BAR serisi için V-hunisi akış süresi sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Birim Agirlik (kg/cm3)
 3768.29
 2270.73
 X1 = A: s/b orani
 X2 = B: lif orani
 Actual Factors
 C: Agregada Tipi = REF
 D: Kür Tipi = Average



Şekil C.5 REF serisi için birim ağırlık sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Birim Ağırlık (kg/cm³)



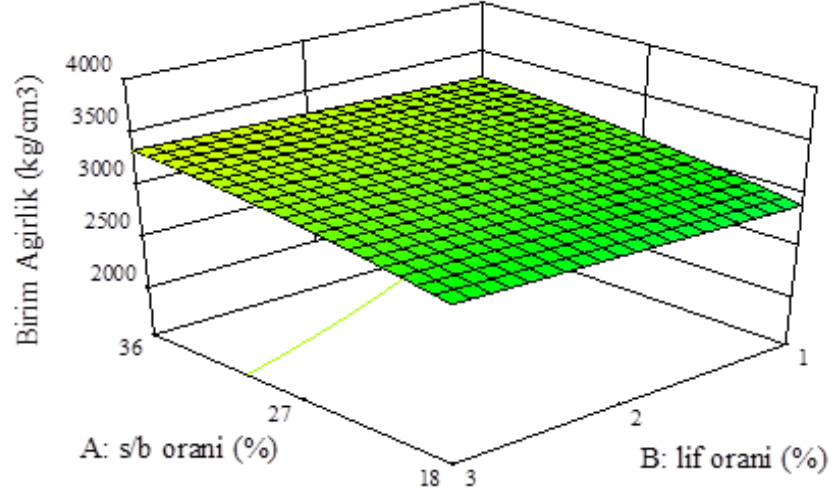
X1 = A: s/b oranı

X2 = B: lif oranı

Actual Factors

C: Agregat Tipi = BAR

D: Kür Tipi = Average



Şekil C.6 BAR serisi için birim ağırlık sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Basınç dayanımı (MPa)



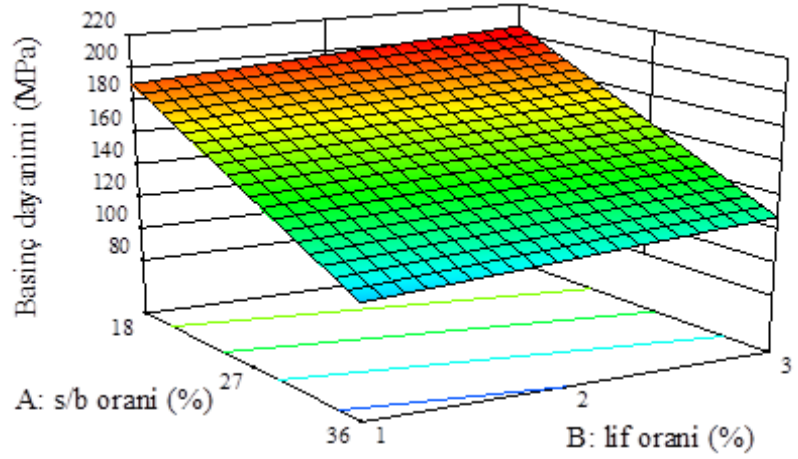
X1 = A: s/b oranı

X2 = B: lif oranı

Actual Factors

C: Agregat Tipi = GAD

D: Kür Tipi = Buhar K.



Şekil C.7 GAD serisi için basınç dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Basınç dayanımı (MPa)



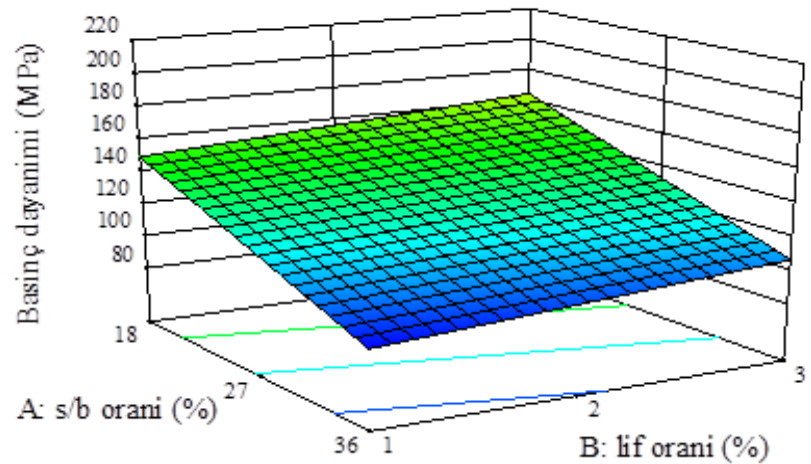
X1 = A: s/b oranı

X2 = B: lif oranı

Actual Factors

C: Agregat Tipi = BAR

D: Kür Tipi = Buhar K.



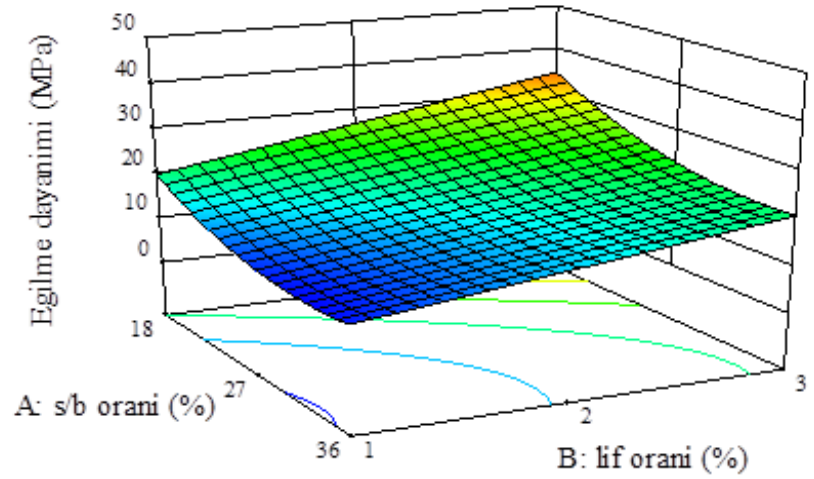
Şekil C.8 BAR serisi için basınç dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Eğilme dayanımı (MPa)



X1 = A: s/b oranı
X2 = B: lif oranı

Actual Factors
C: Agregatı Tipi = REF
D: Kür Tipi = Buhar K.



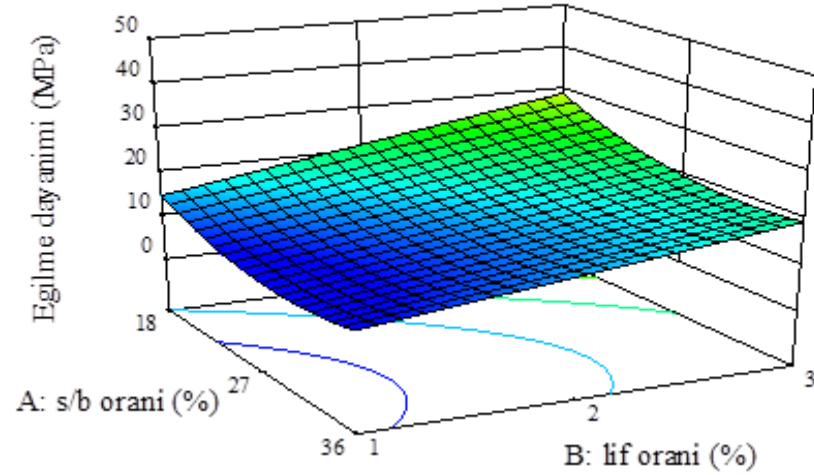
Şekil C.9 REF serisi için eğilme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Eğilme dayanımı (MPa)



X1 = A: s/b oranı
X2 = B: lif oranı

Actual Factors
C: Agregatı Tipi = BAR
D: Kür Tipi = Buhar K.



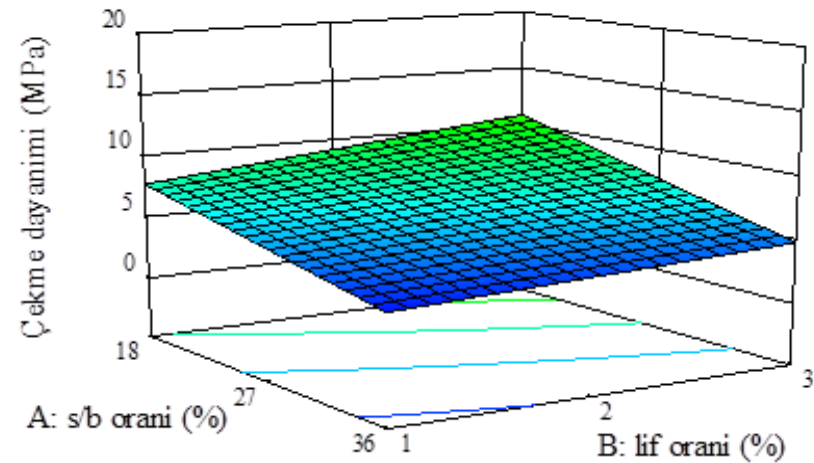
Şekil C.10 BAR serisi için eğilme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Çekme dayanımı (MPa)



X1 = A: s/b oranı
X2 = B: lif oranı

Actual Factors
C: Agregatı Tipi = REF
D: Kür Tipi = Su K.



Şekil C.11 REF serisi için çekme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Çekme dayanımı (MPa)



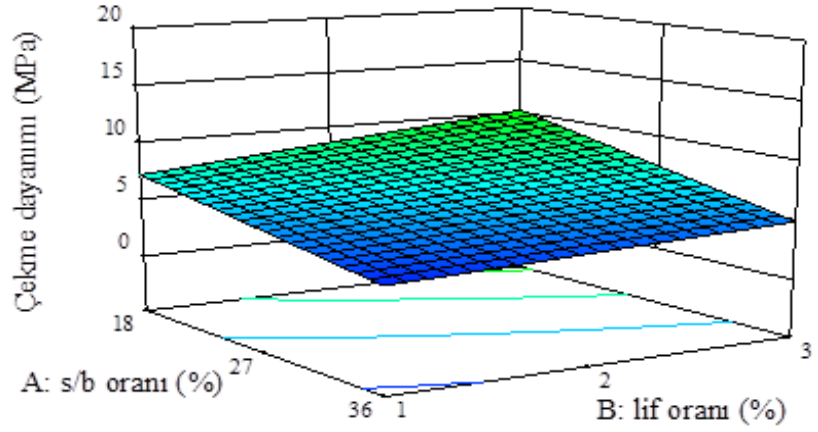
X1 = A: s/b oranı

X2 = B: lif oranı

Actual Factors

C: Agregası Tipi = BAR

D: Kür Tipi = Buhar K.



Şekil C.12 BAR serisi için çekme dayanımı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

L.Z.K. (0,200 MeV) (1/cm)



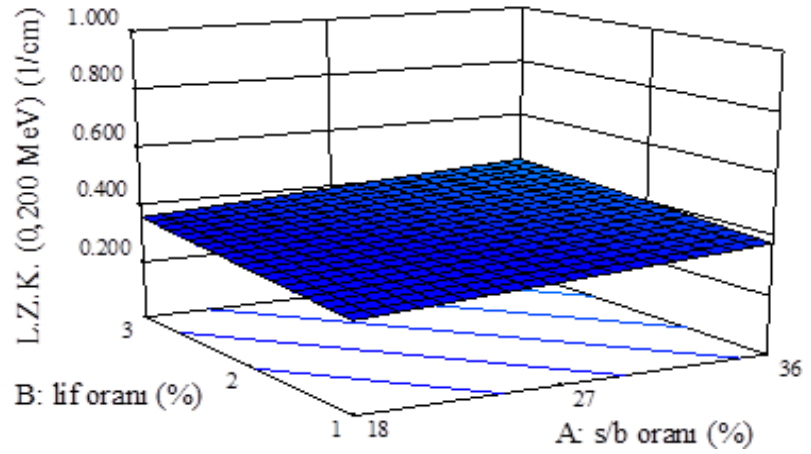
X1 = A: s/b oranı

X2 = B: lif oranı

Actual Factors

C: Agregası Tipi = REF

D: Kür Tipi = Average



Şekil C.13 REF serisi için 0,200 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

L.Z.K. (0,200 MeV) (1/cm)



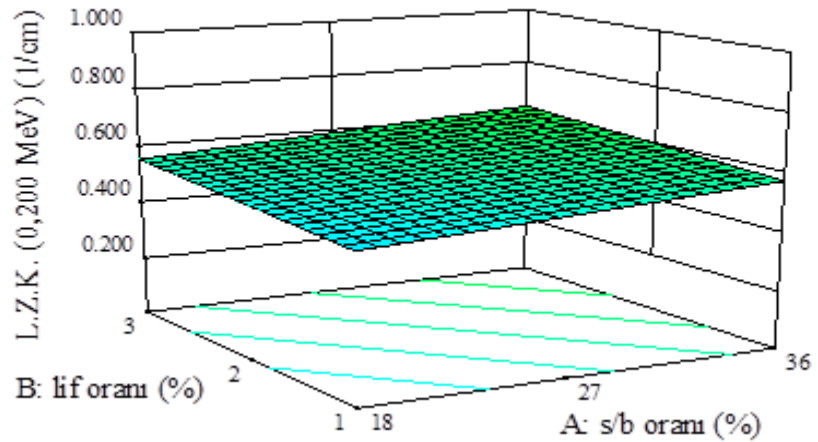
X1 = A: s/b oranı

X2 = B: lif oranı

Actual Factors

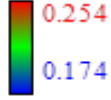
C: Agregası Tipi = GAD

D: Kür Tipi = Average



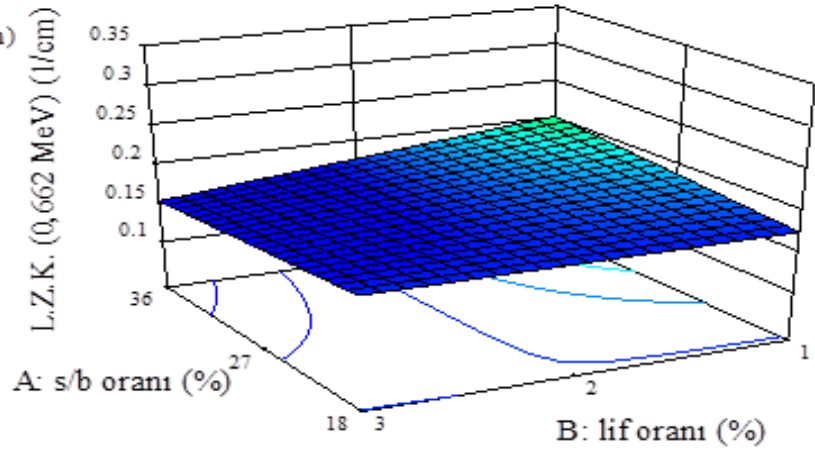
Şekil C.14 GAD serisi için 0,200 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
L.Z.K. (0,662 MeV) (1/cm)



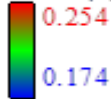
X1 = A: s/b oranı
X2 = B: lif oranı

Actual Factors
C: Agregat Tipi = REF
D: Kür Tipi = Average



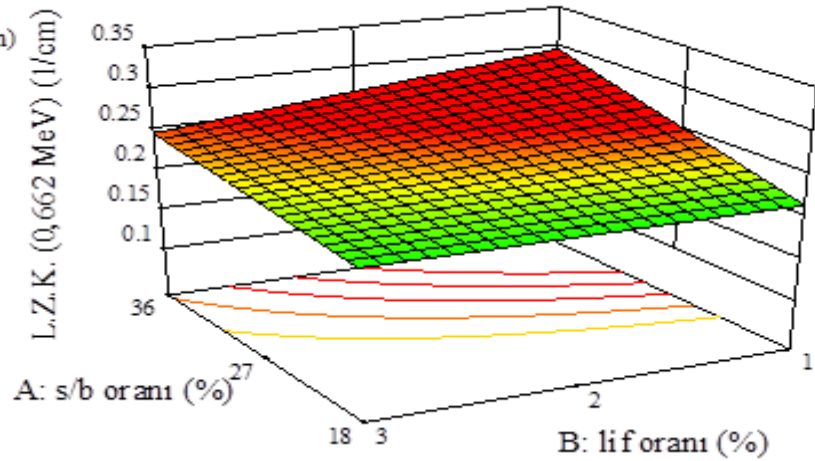
Şekil C.15 REF serisi için 0,662 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
L.Z.K. (0,662 MeV) (1/cm)



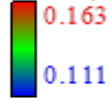
X1 = A: s/b oranı
X2 = B: lif oranı

Actual Factors
C: Agregat Tipi = BAR
D: Kür Tipi = Average



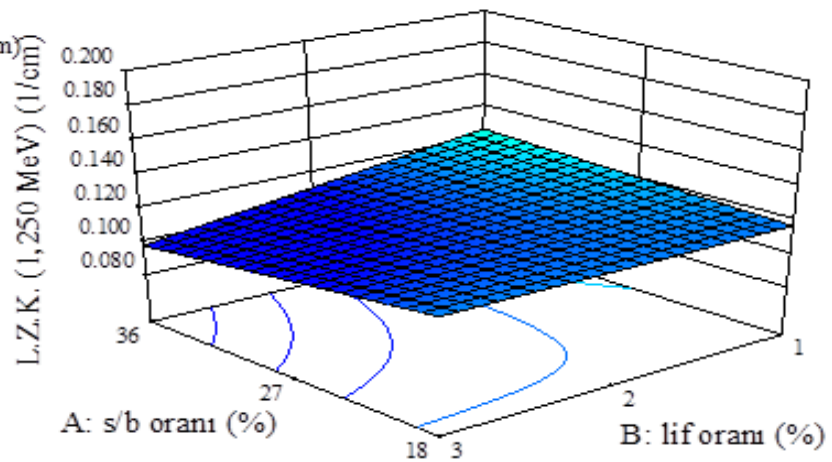
Şekil C.16 BAR serisi için 0,662 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
L.Z.K. (1,250 MeV) (1/cm)



X1 = A: s/b oranı
X2 = B: lif oranı

Actual Factors
C: Agregat Tipi = REF
D: Kür Tipi = Average



Şekil C.17 REF serisi için 1,250 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

Design-Expert® Software

Factor Coding Actual

L.Z.K. (1,250 MeV) (1/cm)



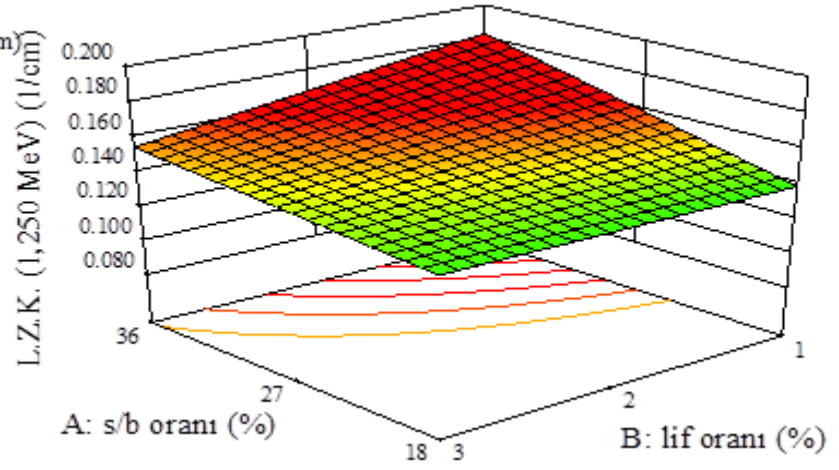
X1 = A: s/b oranı

X2 = B: lif oranı

Actual Factors

C: Agregat Tipi = BAR

D: Kür Tipi = Average



Şekil C.18 BAR serisi için 1,250 MeV enerji değerinde lineer zayıflatma katsayısı sonuçlarını temsil eden tepki yüzeyi

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muzaffer Mansur TÜFEKÇİ
Doğum Tarihi ve Yeri : 11/07/1986 – Şişli/İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mansurtufekci@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Yapı Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Karadeniz Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Kabataş Erkek Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010-Devam Ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLAR

Ulusal ve Uluslararası Makaleler

1. TÜFEKÇİ, M.M., ve GÖKÇE, A., (2017). Development of Heavyweight High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) - Part I: Mechanical Properties, Construction And Building Materials, 148:559–570, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.009. **Bu tezden üretilmiştir.**
2. TÜFEKÇİ, M.M., ve ÇAKIR, Ö., (2017). An Investigation on Mechanical and Physical Properties of Recycled Coarse Aggregate (RCA) Concrete with GGBFS, International Journal of Civil Engineering, 15(4):549-563. DOI: 10.1007/s40999-017-0167-x.
3. KABAY, N., KIZILKANAT, A.B. ve TÜFEKÇİ, M.M., (2016). Effect of Prewetted Pumice Aggregate Addition on Concrete Properties under Different Curing Conditions, Periodica Polytechnica-Civil Engineering, 60(1):89-95. DOI: 10.3311/PPci.7767.
4. KIZILKANAT, A.B., OKTAY, D., KABAY, N. ve TÜFEKÇİ, M.M., (2016). Comparative Experimental Study of Mortars Incorporating Pumice Powder or Fly Ash, Journal of Materials in Civil Engineering, 28(2). DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001407.
5. KABAY, N., TÜFEKÇİ, M.M., KIZILKANAT, A.B. ve OKTAY, D., (2015). Properties of Concrete With Pumice Powder And Fly Ash As Cement Replacement Materials, Construction And Building Materials, 85:1-8. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.026.
6. TÜFEKÇİ, M.M. ve ÇAKIR, Ö., (2011). Geri Kazanılmış Agregalı Beton, CemenTürk Dergisi, 45-56.

Ulusal ve Uluslararası Bildiriler

1. TÜFEKÇİ, M.M. ve GÖKÇE, A., (2017). Utilization of granulated ferrous waste as fine aggregate in high performance fiber reinforced concrete (HPFRC), International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE - Cappadocia), 8-10 Mayıs 2017, Nevşehir/ Türkiye. **Bu tezden üretilmiştir.**
2. YÜZER, N., KAVAK, Z., TAFTAF, A., AKTÜRK, B. ve TÜFEKÇİ, M.M., (2017). Karayolu Trafik Düzenlemesinde Alternatif Bir Sistem: Araçsayar Akıllı Beton, Hazır Beton Kongresi Bildirileri (Beton 2017), İstanbul/ Türkiye.
3. TÜFEKÇİ, M.M., GÖKÇE, A. KABAY, N. ve KIZILKANAT, A.B., (2017). Beton Yapılarda Su Yalıtımı Uygulamaları Üzerine Bir Araştırma, Hazır Beton Kongresi Bildirileri (Beton 2017), İstanbul/ Türkiye.
4. TÜFEKÇİ, M.M. ve ÇAKIR, Ö., (2014). Properties of concrete with recycled coarse aggregate is obtained from high quality concrete. Euroasia 2014 Waste Management Symposium. Euroasia 2014 Waste Management Symposium, 28-30 Nisan 2014, YTU 2010 European Capital of Culture Congress & Cultural Center, İstanbul/Türkiye.
5. TÜFEKÇİ, M.M. ve ÇAKIR, Ö., (2011). Geri Kazanılmış Agregaların Beton Üretiminde Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması, 8. Ulusal Beton Kongresi, İzmir.

Proje

1. Ultra Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Ağır Kompozitlerin (UHPC) Mekanik, İyapı ve Radyasyon Soğurma Özelliklerinin Araştırılması, YTU-BAPK, Proje No, 2011-05-01-DOP04, Ağustos 2014-2017.
2. Geri Kazanılmış Agregaların Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, İBB (Proje İstanbul-6.Dönem), 2011- 2012.