

**TEK DUVARLI KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ
ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

MUHAMMET SEİS

**DOKTORA TEZİ
DİSİPLİNLER ARASI KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SERKAN SUBAŞI**

DÜZCE - 2023

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TEK DUVARLI KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ
ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammet SEİS tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. İlker TEKİN

Karabük Üniversitesi

Prof. Dr. Osman GENÇEL

Bartın Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

Sakarya Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 26.07.2023

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

26 Temmuz 2023

Muhammet SEİS



TEŞEKKÜR

Doktora çalıőmamda ve bu tezin hazırlanmasında bilgi ve tecrübeleriyle gösterdiği sabır, her türlü destek ve yardımlardan dolayı değerli hocam Sayın Prof. Dr. Serkan SUBAŞI'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalıőmalarım esnasında destek, bilgi ve önerileriyle yeni bakış açıları yakalamama imkan sağlayan tez izleme komitesi üyesi değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK ve Sayın Doç. Dr. İlker TEKİN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimimin boyunca verdikleri destek ve moral-motivasyon ile zorlu süreçte yanımda yer alan değerli hocam sayın Doç. Dr. Latif Onur UĞUR ve değerli arkadaşım Dr. Engin YÜKSEL'e sonsuz teşekkür ederim. Tüm tez aşamasında yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Betül İŐBİLİR KULA'ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında AR-GE Merkezi altyapısının kullanımı, malzemelerin temini, deney üretim ve bazı testlerin gerçekleştirilmesi aşamalarında verdikleri destek için Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ő.'ye, Yönetim Kurulu Üyesi Sayın Muhammed MARAŞLI'ya, Ar-Ge merkezi őefi Volkan ÖZDAL, Dr. Heydar DEGHANPOUR ve tüm AR-GE personeline teşekkür ederim.

Bu alıőma süresince yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen aileme sevgilerimi sunarım.

26 Temmuz 2023

Muhammet SEİS

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
KISALTMALAR.....	xii
SİMGELER	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
EXTENDED ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. BETON	4
2.2. BETON SINIFLANDIRMASI.....	6
2.2.1. Normal (Geleneksel) Betonlar	6
2.2.2. Özel Betonlar	9
2.3. ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLAR (UYPB)	10
2.3.1. UYPB Tarihi Gelişimi.....	12
2.3.2. UYPB Bileşenleri.....	14
2.3.2.1. Agregalar.....	15
2.3.2.2. Bağlayıcılar	17
2.3.2.3. Puzolanik Malzemeler.....	18
2.3.2.4. Su Miktarı.....	22
2.3.2.5. Kimyasal Katkılar.....	22
2.3.2.6. Lifler.....	26
2.3.3. UYPB Geliştirme İlkeleri	29
2.3.3.1. Parçacık Paketleme Teorisi.....	30
2.3.3.2. UYPB Karıştırma Prosedürü.....	36
2.3.3.3. Kürlenme Ve Isıl İşlem.....	39
2.3.3.4. UYPB Karışım Tasarımları Örnekleri	43
2.3.4. UYPB'lerin Teknik Özellikleri	45
2.3.4.1. Taze Beton ve Fiziksel Özellikleri.....	45
2.3.4.2. Mekanik Özellikler.....	55
2.3.4.3. Dayanıklılık	63
2.3.5. UYPB Kullanımının Avantaj Ve Dezavantajları	66
2.3.6. UYPB Standartları.....	69
2.3.6.1. Amerikan Test Ve Malzeme Derneği (ASTM, ABD).....	69
2.3.6.2. Fransız Standartları (AFGC, Fransa)	70
2.3.6.3. İsviçre Standartları (SIA, İsviçre).....	71
2.3.6.4. Avustralya Standartları (SA, Avustralya).....	71
2.3.6.5. Kanada Standartları (CSA, Kanada).....	72
2.3.6.6. Japon Kılavuzları (JSCE, Japonya).....	73
2.3.6.7. Alman Kılavuzları (GCSC, Almanya)	73
2.3.6.8. İspanyol Kılavuzu (ACHE).....	73
2.3.6.9. Federal Karayolu İdaresi (FHWA, ABD)	74
2.3.7. UYPB Uygulamaları	74
2.3.7.1. Yapı Uygulamaları.....	76

2.3.7.2. Mimari Uygulamaları	76
2.3.7.3. Aşınma Koruyucu.....	79
2.3.7.4. Beton Onarımı	80
2.4. NANOTEKNOLOJİ VE BETONDA KULLANIMI	80
2.4.1. Betonda Nanoteknoloji Kullanımı	82
2.4.2. Karbon Nanotüp (CNT)	84
2.4.3. Betonda CNT Kullanımı.....	88
3. MATERYAL VE YÖNTEM	92
3.1. MATERYALLER.....	92
3.1.1. Bağlayıcılar	92
3.1.2. Agregalar	94
3.1.3. Çelik Lifler	95
3.1.4. Kimyasal Katkılar	96
3.1.5. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp.....	97
3.2. YÖNTEM	99
3.2.1. UYPB Karışım Oranlarının Belirlenmesi Ve Numunelerin Üretimi	100
3.2.2. Taze Beton Deneyleri	105
3.2.2.1. Taze Beton Yayılma Çapı Deneyi	105
3.2.2.2. Taze Beton Hava İçeriği Deneyi.....	105
3.2.2.3. Taze Beton Yoğunluğu Deneyi.....	106
3.2.2.4. Büzülme Deneyi	107
3.2.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	108
3.2.3.1. Sertleşmiş Beton Yoğunluğu Deneyi	108
3.2.3.2. Ultrases Geçiş Hızı (UGH) Deneyi.....	109
3.2.3.3. Yüzey Sertliği Deneyi	110
3.2.3.4. Basınç Dayanımı Deneyi.....	110
3.2.3.5. Eğilme Dayanımı Deneyi	111
3.2.3.6. Darbe Dayanımı (Charpy) Deneyi	112
3.2.3.7. Aşınma Dayanımı (Böhme) Deneyi.....	113
3.2.3.8. Elektriksel Özdirenç Ölçümleri	114
3.2.3.9. Renk Değişimi Ölçümü.....	115
3.2.4. Mikro Yapı Analizleri.....	117
3.2.4.1. FTIR Analizleri	118
3.2.4.2. XRD Analizleri.....	118
3.2.4.3. DTA-TG Analizleri.....	118
3.2.4.4. SEM Analizleri.....	119
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	120
4.1. UYPB TAZE BETON ÖZELLİKLERİ	120
4.1.1. Taze Beton Yayılma Çapı.....	120
4.1.2. Taze Beton Hava İçeriği	121
4.1.3. Taze Beton Yoğunluğu.....	122
4.1.4. UYPB'ların Sıcaklık Ve Büzülme Sonuçları	123
4.2. UYPB SERTLEŞMİŞ BETON ÖLÇÜMLERİ	126
4.2.1. Sertleşmiş Beton Yoğunluk Değerleri	126
4.2.2. Ultrases Geçiş Hızı (UGH) Ölçümü.....	129
4.2.3. Basınç Dayanımı Sonuçları	133
4.2.4. Eğilme Dayanımı Sonuçları.....	137
4.2.5. Elektriksel Özdirenç Ölçümleri	140
4.2.6. Schmidt Çekici ile Yüzey Sertliği Değerleri.....	144
4.2.7. Böhme Aşınma Direnci Kütle Kaybı Yüzdesi Değerleri	148
4.2.8. Charpy Darbe Dayanımı Değerleri	149

4.2.9. Renk Analizleri.....	151
4.3. MİKRO YAPI ANALİZLERİ	154
4.3.1. FT-IR Analizleri	154
4.3.2. XRD Analizleri	155
4.3.3. DTA-TG Analizleri	157
4.3.4. SEM Analizleri	160
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	163
6. KAYNAKLAR	169
ÖZGEÇMİŞ.....	194



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. 100 yılda betonun basınç dayanımındaki artış [20].	8
Şekil 2.2. Çimento ve betonun tarihi [38].	13
Şekil 2.3. Mukavemet ve s/ç oranına göre betonun gelişim tarihi [43].	13
Şekil 2.4. UYPB içeriğinde kullanılan bileşen türleri.	15
Şekil 2.5. UYPB’de kullanılan maksimum agrega boyutunun sıklığı [2].	16
Şekil 2.6. Portland çimento bileşenlerinin dayanıma olan katkısı [60].	17
Şekil 2.7. Silis dumanına ait SEM görünümü [69].	19
Şekil 2.8. Basınç dayanımı ve silis dumanı içeriği arasındaki ilişki [73].	20
Şekil 2.9. Basınç dayanımının su/bağlayıcı oranı ile ilişkisi [87].	22
Şekil 2.10. Polikarboksilat kutup zincirleri ve mekanizmaları [70].	23
Şekil 2.11 Beton’da kullanılan lif türleri [100].	27
Şekil 2.12. NB ile UYPB yapısı arasındaki farkın şematik görünümü [115].	31
Şekil 2.13. Parçacık boyut dağılımı [123].	34
Şekil 2.14. UYPB karıştırma prosesi.	38
Şekil 2.15. Basınç dayanımı ve hidrasyon derecesi ilişkisi [147].	40
Şekil 2.16. Büzülme ölçümünün zamana bağlılığı [181].	52
Şekil 2.17. Eşit moment kapasitesine sahip kiriş kesitlerinin karşılaştırılması [162].	55
Şekil 2.18. UYPB’nin çekme davranışı	58
Şekil 2.19. Yüksek sıcaklıkta RPB’nin basınç dayanımı [237].	62
Şekil 2.20. UYPB’nin güçlü betona kıyasla sıcaklık/dayanımın ilişkisi [242].	63
Şekil 2.21. UYPB ile farklı beton türlerinin gerilme durumunun karşılaştırılması [55].	66
Şekil 2.22. Prekast UYPB elemanların çeşitli yapı uygulamalarında kullanımı.	76
Şekil 2.23. UYPB prekast ürünlerinin çeşitli yapılardaki mimari uygulamaları.	77
Şekil 2.24. UYPB prekast ürünlerinin mimari cephe uygulama örnekleri.	78
Şekil 2.25. UYPB şehir mobilyaları [92].	79
Şekil 2.26. UYPB’nin aşınma koruyucu olarak kullanımı.	79
Şekil 2.27. UYPB’nin barajlarda beton onarımlarında kullanımı.	80
Şekil 2.28 Karbon nanotüplerin katlanmış şekillerine göre çeşitleri [289].	85
Şekil 2.29 TEM mikroskobunda SWCNT görüntüsü [289].	86
Şekil 2.30. Karbon nanotüpler farklı formları [276].	87
Şekil 2.31. Bazı yüksek dayanımlı malzemelerin çekme dayanımı [290].	87
Şekil 3.1. Karışımda kullanılan bağlayıcılar.	93
Şekil 3.2. Çimento ve silis dumanı tane boyut analizleri grafiği.	93
Şekil 3.3. Karışımda kullanılan agregalar.	94
Şekil 3.4. Agregaların tane boyut analizleri grafiği.	95
Şekil 3.5. Çelik lifler.	96
Şekil 3.6. Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı.	96
Şekil 3.7. Karışımda kullanılan SWCNT.	97
Şekil 3.8. Kullanılan SWCNT’nin FE-SEM görüntüsü [305].	98
Şekil 3.9. Tüm karışımda kullanılan malzemeler.	98
Şekil 3.10. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar ve test türleri.	99
Şekil 3.11. UYPB bileşenlerinin fiziksel özelliklerinin “EMMA karışım analiz” programına girilmesi ve farklı parçacık modellerine göre granülometri eğrileri.	101
Şekil 3.12. Karışımlarda kullanılan 56 litre kapasiteli mikser.	102

Şekil 3.13. UYPB betonların üretimi.....	103
Şekil 3.14. UYPB kalıplara dökülmesi.....	104
Şekil 3.15. Üretilen UYPB numuneler.....	104
Şekil 3.16. UYPB kıvam tayini.....	105
Şekil 3.17. UYPB hava içeriği tayini.....	106
Şekil 3.18. Taze UYPB'nin yoğunluğunun belirlenmesi.....	106
Şekil 3.19. Büzülme kalıbı ve deney düzeneği.....	108
Şekil 3.20. Ultrasonik ses hızı test yöntemi (a) şematik gösterimi ve (b) ölçümü.....	110
Şekil 3.21. Schmidt çekici ile yüzey sertlik tayini.....	110
Şekil 3.22. UYPB basınç dayanımı tayini.....	111
Şekil 3.23. UYPB eğilme dayanımı tayini.....	112
Şekil 3.24. UYPB darbe dayanımı tayini.....	113
Şekil 3.25. Aşınma dayanımı tayini.....	114
Şekil 3.27. Elektriksel iletkenlik ölçümü.....	115
Şekil 3.28. LAB renk sistemine ait renk uzayı.....	116
Şekil 3.29. Renk ölçüm cihazı.....	117
Şekil 3.30. Numuneler üzerinde renk ölçümlerinin yapılması.....	117
Şekil 3.31. Kullanılan termal analiz cihazı.....	118
Şekil 4.1. Taze SWCNT'li UYPB'ler ile ortalama yayılma çapı ilişki grafiği.....	120
Şekil 4.2. Taze UYPB'lerin SWCNT oranı ile hava içeriği ilişki grafiği.....	121
Şekil 4.3. Taze UYPB'lerin yoğunluk değerleri grafiği.....	122
Şekil 4.4. Taze betonların sıcaklık-büzülme ilişki grafiği.....	123
Şekil 4.5. SWCNT oranı ile sertleşmiş beton yoğunluk ilişkisi grafiği.....	127
Şekil 4.6. Beton yaşı ile sertleşmiş beton yoğunluk ilişkisi grafiği.....	127
Şekil 4.7. SWCNT oranı ile UPV değerleri ilişki grafiği.....	131
Şekil 4.8. UGH değerleri ile beton yaşı ilişki grafiği.....	131
Şekil 4.9. SWCNT oranı ile basınç dayanımı ilişki grafiği.....	134
Şekil 4.10. Beton yaşı ile basınç dayanımı ilişki grafiği.....	134
Şekil 4.11. SWCNT oranı ile eğilme dayanımı ilişki grafiği.....	138
Şekil 4.12. Beton yaşı ile eğilme dayanımı ilişki grafiği.....	138
Şekil 4.13. SWCNT oranı ile elektriksel özdirenç değerleri ilişki grafiği.....	141
Şekil 4.14. Beton yaşı ile elektriksel özdirenç değerleri ilişki grafiği.....	142
Şekil 4.15. SWCNT oranı ile yüzey sertliği (R) ilişki grafiği.....	146
Şekil 4.16. Beton yaşı ile yüzey sertliği (R) ilişki grafiği.....	146
Şekil 4.17. SWCNT oranı ile aşınma kütle kaybı değerleri ilişki grafiği.....	148
Şekil 4.18. SWCNT oranı ile darbe dayanımı değerleri grafiği.....	150
Şekil 4.19. Numuneler üzerinde renk ölçümlerinin yapılması.....	151
Şekil 4.20. Siyah-Beyazlık ölçüsü olan L ölçüm değerleri ile SWCNT oranı ilişkisi.....	152
Şekil 4.21. Değerlere göre oluşturulan dijital görsel.....	153
Şekil 4.22. SWCNT oranı ile ΔE renk değişimi değerleri arasındaki ilişki grafiği.....	153
Şekil 4.23. R, CNT1, CNT2, CNT3 UYPB numunelerine ait FT-IR analizleri.....	155
Şekil 4.24. R ve CNT numunelerinin XRD Analizleri.....	156
Şekil 4.25. Fark taramalı termal analiz (DTA) ve termal gravimetri (TG) analizi.....	157
Şekil 4.26. R, CNT1, CNT2, CNT3 UYPB numunelerinin CH içeriği.....	159
Şekil 4.27. 90 günlük referans UYPB numunesinden alınan SEM ve EDS analizi görüntüleri.....	160
Şekil 4.28. 90 günlük SWCNT takviyeli UYPB numuneleri üzerinde yapılan SEM ve EDS analizi görüntüleri.....	161

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Birim ağırlığa göre beton sınıflandırması [19].	7
Çizelge 2.2. Basınç dayanımına göre beton sınıflandırması	7
Çizelge 2.3. Farklı araştırmacılar tarafından UYPB’de kullanılmış olan agregaların maksimum boyutları [2].	16
Çizelge 2.4. Portland çimentosunun bileşenlerinin özellikleri [22], [60].	17
Çizelge 2.5. SD kimyasal içerikleri [71], [69].	20
Çizelge 2.6. Çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılan su-bağlayıcı oranı, lif ve süperakışkanlaştırıcı içeriği [26].	24
Çizelge 2.7. W/B ve SP dozajının UYPB karışımlarındaki hava içeriğine etkisi [47].	25
Çizelge 2.8. Betonda yaygın kullanılan liflerin teknik özellikleri [17].	27
Çizelge 2.9. UYPB karışımını tasarlamak için çeşitli yaklaşımlar [118].	32
Çizelge 2.10. Basınç uygulamasının UYPB basınç dayanımı üzerindeki etkisi.	40
Çizelge 2.11. Çeşitli kürleme yöntemleri için UYPB’nin basınç dayanımı [26].	41
Çizelge 2.12. Richard ve Cheyreyz tarafından önerilen tipik RPB’nin kompozisyonu ve mekanik özellikleri [5].	43
Çizelge 2.13. Abbas ve ark. kullandığı UYPB bileşenleri ve oranları [47].	43
Çizelge 2.14. Ahmad ve ark. ile Tayeh ve diğ. önerdiği UYPB karışımı oranları ^a (Kg) [154], [155].	44
Çizelge 2.15. Sherbrooke köprüsünde kullanılan 1 m ³ RPB’u için karışım hesabı.	44
Çizelge 2.16. En yaygın ticari UYPB’lerin dozajları ve özellikleri [156].	44
Çizelge 2.17. Karışım kıvamları [62].	45
Çizelge 2.18. S/b ile SP’nin hava içeriği üzerindeki etkisi [51].	47
Çizelge 2.19. UYPB, YPB ve NB yoğunluklarının karşılaştırması [163].	48
Çizelge 2.20. UYPB’de çeşitli büzülme türleri [166].	49
Çizelge 2.21. Kuruma büzülmesi ile Otojen büzülme arasındaki ana farklar.	50
Çizelge 2.22. Geleneksel beton, yüksek performanslı beton ve UYPB’nin dayanıklılık parametreleri [55].	64
Çizelge 2.23. UYPB’nin mekanik, fiziksel, kimyasal ve durabilite özellikleri [14].	64
Çizelge 2.24. Beton formları, kompozisyonları ve performansları [62].	65
Çizelge 2.25. RPB ile YPB özelliklerinin karşılaştırılması	67
Çizelge 2.26. Tek duvarlı karbon nanotüplerin (SWCNT) fiziksel özellikleri [289].	85
Çizelge 2.27. Çok katmanlı nanotüplerin (MWCNT) fiziksel özellikleri [289].	86
Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.	93
Çizelge 3.2. Silis dumanı fiziksel ve kimyasal özellikleri.	94
Çizelge 3.3. AFS 60-70 silis kumu fiziksel ve kimyasal özellikleri.	94
Çizelge 3.4. Kuvars kumu fiziksel ve kimyasal özellikleri.	95
Çizelge 3.5. Kullanılan çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.	96
Çizelge 3.6. Süper akışkanlaştırıcının (SP) fiziksel ve kimyasal özellikleri.	97
Çizelge 3.7. Kullanılan tek duvarlı nanotüpün teknik özellikleri (SWCNT).	98
Çizelge 3.8. Elde edilen referans karışım oranları (dm ³ /m ³).	102
Çizelge 3.9. Renk ölçüm parametreleri.	117
Çizelge 4.1. Karışımların yayılma çapı değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.	120
Çizelge 4.2. Sertleşmiş beton numunelerin yoğunluk değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.	126
Çizelge 4.3. UGH değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.	130
Çizelge 4.4. Beton dayanımı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistiksel veriler.	133
Çizelge 4.5. Eğilme dayanımı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistiksel veriler.	137

Çizelge 4.6. Elektriksel özdirenç değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.	141
Çizelge 4.7. Yüzey sertlik değerleri ve açıklayıcı istatistiksel bilgiler.	145
Çizelge 4.8. Aşınma kütle kaybı değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.	148
Çizelge 4.9. Darbe dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.....	149
Çizelge 4.10. Numuneler üzerinde yapılan ortalama ölçüm sonuçları.	151
Çizelge 4.11. Referans numune ile numune ölçüm sonuçlarının kıyaslanması.....	153
Çizelge 4.12. R, CNT1, CNT2, CNT3 UYPB numunelerinin farklı sıcaklıklardaki ağırlık kayıpları.	158



KISALTMALAR

AFGC	Fransız İnşaat Mühendisleri Derneği
AFNOR	Fransız Standartlar Enstitüsü
AFS	American Foundry Society, Amerikan Dökümcüler Derneği
AR	Alkali Dirençli
ASTM	American Society for Testing and Materials
CH	Kalsiyum Hidrat
CNF	Karbon Nanolif
CNT	Karbon Nanotüp
C-S-H	Kalsiyum-Silika-Hidrat
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
DÜBİT	Düzce Üniversitesi Bilimsel Ve Teknolojik Uygulama Ve Araştırma Merkezi
FDB	Fiber Donatılı Beton
FE-SEM	Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu
FHWA	Federal Karayolu İdaresi
FT-IR	Furier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
GGBS	Öğütülmüş Granüler Yüksek Fırın Cürufu
GNT	Grafen Nanotüp
HRWRA	Yüksek Oranda Su Azaltıcı Katkılar
ITZ	Çimentolu Matris Ve Kaba Agregalar Arasındaki Arayüzey Geçiş Bölgesi
İÇK	İşlenmiş Çimentolu Kompozit
MDF	Mikro Hatasız Çimento
MPEG	Metakrilik Asit Esteri
MPT	Maksimum Harç Kalınlığının
MWCNT	Çok Duvarlı (Katmanlı) Karbon Nanotüp”
NDB	Normal Dayanımlı Beton
OPC	Normal Portland Çimentosu
RILEM	Uluslararası İnşaat Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Laboratuvarları ve Uzmanları Birliği
SCM	Çimentomsu Malzemeler
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SF	Silis Dumanı
SP	Süperplastikleştirici
SRA	Rötre Azaltıcı Katkı
SWCNT	Tek Duvarlı (Katmanlı) Karbon Nanotüp (Single Wall Karbon Nanotüp)
TGA	Termogravimetrik Analiz
UGH	Ultrases Geçiş Hızı
UHPFRC	Lifle Güçlendirilmiş Ultra Yüksek Performanslı Beton
UK	Uçucu Kül
UYDB	Ultra Yüksek Dayanımlı Beton
UYPB	Ultra Yüksek Performanslı Beton
W/B	Su/Bağlayıcı
YDB	Yüksek Dayanımlı Beton
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
YPB	Yüksek Performanslı Beton

SİMGELER

Ω	Ohm
$\Omega.cm$	Ohm Santimetre
μm	Mikrometre
A	Numune Kesit Alanı
a_{cu}	Charpy Darbe Dayanımı(kJ/m^2)
d	Yoğunluk
E_c	Kırılma Enerjisi
F	Kuvvet
G	İletkenlik
Hz	Hertz
kJ/m^2	Darbe Enerjisi
Mpa	Mega Paskal
N/mm^2	Newton/milimetrekare
nm	Nanometre
R	Schmidt Yüzey Sertliği
UGH	Ultrases Geçiş Hızı
V	Volt
δ	Basınç Dayanımı
μA	Mikroamper
ρ	Elektriksel Öz Direnç($\Omega.cm$)
σ	Elektriksel İletkenlik
σ_c	Basınç Dayanımı (Mpa)

ÖZET

TEK DUVARLI KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammet SEİS

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,

Disiplinler Arası Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Temmuz 2023, 193 sayfa

Nanoteknolojinin gelişmesi ile birlikte inşaat sektöründe özellikle yapı malzemeleri alanında farklı özelliklere sahip nano malzemelerin kullanılması araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Nano malzemeler arasında günümüzün en büyük buluşlarından olduğuna inanılan karbon nanotüpler (CNT) boyutu ve olağanüstü mekanik özellikleri sayesinde, yüksek dayanımlı yeni nesil çimentolu kompozitler üretmek için yüksek potansiyele sahip olduğu yapılan çalışmalardan görülmektedir. Yapıların daha yüksek, daha uzun, daha dayanıklı ve daha hafif olma ihtiyacı yeni kompozit malzemelerin ortaya çıkmasına da etki etmektedir. Bu beklentilerin karşılanması amacıyla beton üzerine yapılan son araştırmalar neticesinde, geleneksel betona göre üstün özelliklere sahip olan ultra yüksek performanslı beton (UYPB) geliştirilmiştir.

Bu çalışma ile yapı sektörünün ihtiyaç duyduğu UYPB üretiminde SWCNT takviyesi ile tasarlanan betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında çimento ağırlığının %0,01; 0,02 ve 0,03 oranlarında SWCNT ve toplam ağırlığın %4'ü oranında mikro çelik lif kullanılarak üretilen UYPB'nin mekanik, fiziksel, elektriksel ve mikro yapı özellikleri araştırılmıştır. Hazırlanan 4 farklı UYPB karışımlarının 1 tanesinde sadece mikro çelik lif, 3 tanesinde ise SWCNT+Mikro çelik lif katılmıştır. Hazırlanan UYPB karışımların taze beton özelliklerini belirlemek için kıvam, taze beton yoğunluğu, hava içeriği, büzülme ve hidratasyon sıcaklıkları ölçülmüştür. Sertleşmiş UYPB'lerin 2, 7, 28, 56 ve 90. günlerde yoğunluk, ultrases geçiş hızı, yüzey sertliği ve 90. günde renk değişimi deneyleri ile fiziksel özellikleri, 2, 7, 28, 56 ve 90. günlerde basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve 90. günde darbe dayanımı deneyleri ile mekanik özellikleri, böhme aşınma deneyi ile durabilite özelliği, özdirenç ölçümleri ile elektriksel özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca mikro yapı analizleri kapsamında SEM, FT-IR, XRD, TGA-DTA analizleri gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, SWCNT kullanımı ile UYPB'lerin taze beton ve durabilite özelliklerinin iyileştirilebileceği ve sertleşmiş beton özelliklerinde ise kabul edilebilir oranlarda azalmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. SWCNT eklenmesi ve oranının artmasıyla elektriksel özdirenç azaldığı, SWCNT kullanımı ile iletken UYPB'nin üretilebileceği görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Ultra yüksek performanslı beton, Karbon nanotüp, Nano teknoloji, Büzülme, Elektriksel özellik.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBE REINFORCED ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETES

Muhammet SEİS

Düzce University

Graduate School, Department of Interdisciplinary Composite Material Technologies

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

July 2023, 193 pages

With the development of nanotechnology, the use of nanomaterials with different properties in the construction industry, especially in the field of building materials, attracts the attention of researchers. It is seen from the studies that carbon nanotubes (CNT), which is believed to be one of the greatest inventions of today among nanomaterials, have a high potential to produce high-strength new generation cementitious composites thanks to their size and extraordinary mechanical properties. The need for structures to be higher, longer, more durable and lighter also affects the emergence of new composite materials. In order to meet these expectations, as a result of the latest research on concrete, ultra-high performance concrete (UYPB), which has superior properties compared to conventional concrete, has been developed.

In this study, the effects on the fresh and hardened properties of the concrete designed with SWCNT reinforcement in the production of UYPB required by the construction industry were investigated. Within the scope of the study, the mechanical, physical, electrical and microstructural properties of ultra-high performance concrete (UYPB) produced by using SWCNT at the ratio of 0,01; 0,02 and 0.03% by cement weight and micro steel fiber at the rate of 4% by total weight were investigated. Only micro steel fiber was added in 1 of the 4 different UYPB mixtures prepared, and SWCNT+Micro steel fiber was added in 3 of them. The consistency, fresh concrete density, air content, shrinkage and hydration temperatures were measured to determine the fresh concrete properties of the prepared UYPB mixtures. Density, ultrasound transmission rate, surface hardness, and physical properties of hardened UYPBs at 2, 7, 28, 56 and 90 days, with color change experiments at 90 days, compressive strength, flexural strength at 2, 7, 28, 56 and 90 days and on the 90th day, mechanical properties with impact strength tests, durability properties with böhme abrasion test, electrical properties with resistivity measurements were determined. In addition, SEM, FT-IR, XRD, TGA-DTA analyzes were carried out within the scope of microstructural analysis.

As a result, it has been determined that the fresh concrete and durability properties of UYPBs can be improved with the use of SWCNT, and acceptable reductions occur in the hardened concrete properties. It has been observed that the electrical resistivity decreases with the addition of SWCNT and its ratio increases, and conductive UYPB can be produced with the use of SWCNT.

Keywords: Ultra high performance concrete, Carbon nanotube, Nano technology, Shrinkage, Electrical property.

EXTENDED ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBE REINFORCED ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETES

Muhammet SEİS

Düzce University

Graduate School, Department of Interdisciplinary Composite Material Technologies

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

July 2023, 193 pages

1. INTRODUCTION

New generation building materials and developments in construction technology strengthen the place of concrete in the construction industry day by day. In recent years, scientific studies of materials scientists have focused on the atomic and microstructure of materials. Especially thanks to researches carried out at micro and nano scale and called nanotechnological, new generation materials with far superior properties are being discovered.

With the development of nanotechnology, the use of nanomaterials with different properties in the construction industry, especially in the field of building materials, attracts the attention of researchers. It is seen from the studies that carbon nanotubes (CNT), which is believed to be one of the greatest inventions of today among nanomaterials, have a high potential to produce high-strength new generation cementitious composites thanks to their size and extraordinary mechanical properties.

Higher performance concretes (UYPB) have been produced as a result of the inadequacy of conventional concrete (GB) to meet the increasing needs. Within the scope of this study, the development of UYPB with superior mechanical, physical and electrical properties required by the construction industry with SWCNT reinforcement.

2. MATERIAL AND METHODS

In the preparation of UYPB concrete mixtures; CEM I 52.5 R white portland cement, silica fume, silica sand with 0-1000 micron grain size, quartz sand and quartz powder and chemical additives were used. Micro steel fiber and SWCNT were used as reinforcement material.

In this study, the mechanical, physical, electrical and microstructural properties of ultra-high performance concrete (UYPB) produced by using SWCNT at the ratio of 0,01; 0,02 and 0,03% by cement weight and micro steel fiber at the rate of 4% by total weight were investigated. Only micro steel fiber was added in 1 of the 4 different UYPB mixtures prepared, and SWCNT+Micro steel fiber was added in 3 of them. The consistency, fresh concrete density, air content, shrinkage and hydration temperatures were measured to determine the fresh concrete properties of the prepared UYPB mixtures. Density, ultrasound transmission rate, surface hardness, and physical properties of hardened UYPBs at 2, 7, 28, 56 and 90 days, with color change experiments at 90 days, compressive strength, flexural strength at 2, 7, 28, 56 and 90 days and on the 90th day, mechanical properties with impact strength tests, durability properties with böhme abrasion test, electrical properties with resistivity measurements were determined. In addition, SEM, FT-IR, XRD, TGA-DTA analyzes were carried out within the scope of microstructural analysis.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Fresh concrete spreading diameter, fresh concrete air content and fresh concrete density measurements were carried out on the prepared UHPC mixtures. Density, ultrasound penetration rate, compressive strength, bending strength, Charpy impact strength, surface hardness with Schmidt hammer, electrical resistivity, Böhme abrasion resistance and color change measurements were carried out on hardened UHPC concretes. In addition, FT-IR, XRD, TGA, DTA, and SEM analyzes were performed as microstructural analyzes and the effects of SWCNT supplementation on UHPC properties were investigated in a versatile way. As a result of the experimental studies carried out, the following results were obtained.

According to the test results performed on fresh UHPC concrete samples;

- It was observed that the spreading diameter values changed depending on the SWCNT ratio, and the spreading diameter values decreased as the SWCNT reinforcement ratio increased.
- It has been observed that SWCNT causes a decrease in the workability of UHPC concretes due to its high specific surface area.
- It was determined that the amount of air content increased in direct proportion with the increase in the SWCNT reinforcement ratio, the workability of fresh concrete decreased due to the nanofibril structure of SWCNTs with nano-sized high specific surface area, and therefore the amount of trapped air in the mixture increased in direct proportion to the increase in the SWCNT reinforcement ratio.
- When the fresh concrete density values are examined, it is seen that minor changes occur depending on the SWCNT reinforcement ratio.

According to the test results performed on the hardened concrete samples;

- It was observed that there was no significant change in the density values depending on the concrete age, but there was a significant change depending on the SWCNT ratio, and the density values decreased depending on the increase in the SWCNT ratio.
- It was observed that there were significant changes in the compressive strength values depending on the SWCNT and concrete age, the compressive strength values decreased inversely with the increase in the amount of SWCNT, and the compressive strength values increased in direct proportion with the increase in the concrete age.
- It has been observed that there are significant changes in flexural strength values depending on the age of SWCNT and concrete, the flexural strength values decrease inversely with the increase in the amount of SWCNT, and the flexural strength values increase in direct proportion with the increase in concrete age.
- It is thought that SWCNTs contribute to the creation of a continuous conductive network within the UHPC. It has been observed that the electrical conductivity of

UHPCs can be increased by doping with SWCNT.

- It was observed that there was a linear increase between the increase in the amount of SWCNT and the average surface hardness values.
- While an increase occurred in the CNT1 and CNT2 reinforcement ratios compared to the reference sample, the mass loss decreased in the CNT3 reinforcement ratio compared to the reference sample.
- It is thought that the use of SWCNTs in UHPC mixtures mechanically strengthens the bond between the cement matrix and improves the load transfer to the UHPC matrix, and the increase in impact strength values is due to this.
- According to SEM analysis, it is seen that SWCNTs do not undergo any agglomeration in the cement matrix, are homogeneously dispersed, and form a physical bond with the cement matrix.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

Nanotechnology provides several benefits to maximize the quality and performance of existing materials. Especially as a result of researches carried out at micro and nano scale, new generation materials with far superior properties are discovered. In this thesis; UHPC production was carried out, which will provide maximum matrix density, have an optimized dry mix recipe and a standard mixing procedure has been established. In this context, fresh and hardened properties of SWCNT-reinforced UHPCs were investigated in order to improve some of their properties. As a result of the experimental studies, it has been observed that UHPCs, which show an aggressive behavior in terms of early behavior, can be improved in terms of setting time, hydration temperatures and shrinkage behavior. It has been determined that SWCNTs can be successfully dispersed and added to UHPC mixtures, as well as the early behavior of UHPC, and its properties such as hardness, impact resistance, electrical conductivity and wear resistance can be improved. It is seen that limited reductions in strength properties of UHPCs occur with the use of nanomaterial SWCNTs. However, it is thought that by increasing the workability at different superplasticizer additive ratios, improvements in density, UGH and strength values can be achieved. It is thought that it would be beneficial for researchers to carry out studies on the use of functionalized different nanomaterials, different fibers in terms

of quantity, geometry, size and type, for the development of the mechanical, physical, electrical and durability properties of UHPCs, which is expected to be used in the construction industry day by day.



1. GİRİŞ

Yapay olarak olarak agrega, hidrolik bağlayıcı olarak su ve gerektiğinde katkı maddelerinin kullanımı ile üretilen beton, üretiminin kolaylığı, istenilen şeklin verilebilmesi, yüksek basınç dayanımı, durabilite ve ekonomik olması nedeniyle sudan sonra en fazla kullanılan, çimento esaslı vazgeçilmez kompozit bir yapı malzemesidir [1]. İnsanoğlunun artan istek ve ihtiyaçlarını karşılayabilmek için, gelişen teknoloji sayesinde beton teknolojisinde de çok büyük ilerlemeler kaydedilmektedir. Gerek yeni nesil malzemeler, gerekse yapım teknolojisindeki gelişmeler, betonun inşaat sektöründeki yerini her geçen gün güçlendirmektedir.

Son yıllarda malzeme bilimcilerinin bilimsel çalışmaları malzemelerin atomik, mikro yapısına yönelmiş durumdadır. Özellikle mikro ve nano ölçekte gerçekleşen, nanoteknolojik olarak da adlandırılan araştırmalar sayesinde çok daha üstün özelliklere sahip yeni nesil malzemeler keşfedilmektedir [1]. Öyle ki, geleneksel betonun (GB) artan ihtiyaçları karşılamada yetersiz kalması sonucu daha yüksek performanslı betonlar (YPB) üretilmiştir. Günümüz bilimsel çalışmalar ve araştırmalar ile gelişimi devam eden beton sektörü 20. yüzyılın sonlarına doğru, en üst performansa sahip beton keşfini gerçekleştirmiştir. Adına Ultra yüksek performanslı beton (UYPB) da denilen bu betonlar, GB ve YPB'ye kıyasla işlenebilirliği, mekanik dayanımı ve durabilitesi bakımından elde edilen en üstün seviyeye sahip yüksek performanslı bir beton türü olarak kabul edilmektedir. İçeriğinde tipik olarak kaba agregası olmayan yüksek kaliteli ince agrega/kum, portland çimentosu, ek çimentomsu malzemeler (SCM), yüksek oranda su azaltıcı katkıları (HRWRA), su ve takviye edici lifler bulunan UYPB'ler, hem taze hem de sertleşmiş haldeki diğer beton türlerinden önemli ölçüde üstün hale gelmektedir [2], [3]. Malzemesi ve mekanik özellikleri, geleneksel ve yüksek performanslı betondan çok farklı olan UYPB'nin, üretimi çok hassas ve yapılarda kullanılması özel bilgi gerektirmektedir. Yüksek yoğunlukta, kendiliğinden konsolidasyona sahip, geçirgenliği düşük ve genel kabul olarak minimum 120 MPa basınç dayanımına sahip mukavemet değeri ile karakterize edilir [4]. Hazırlanan harca basınç ve ısı uygulanması ile 800 MPa'ya kadar basınç dayanımına ulaşılabilir [5]. Bu özelliklerdeki bir malzeme başlıca,

yüksek beton dayanımı istenen, agresif çevre koşullarına maruz, dar kalıbın ve yoğun donatının kaçınılmaz olduğu, yüksek basınç dayanımı ve dayanıklılık gerektiren birçok uygulamalarda tercih edilmesini sağlar. UYPB'lerin üretimi özel laboratuvar koşullarında mikro yapısal özelliklerinin geliştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bileşimdeki malzemeler ve üretim aşamasındaki küçük bir değişikliğe aşırı duyarlıdır. İçeriğindeki yüksek oranda ince toz (pudra) malzeme ile normalden daha düşük su/çimento oranı işlenebilirliğini düşürmekte, olağanüstü değişiklikler yapmayı zorlaştırmaktadır [6]. Karışımında kullanılan yüksek çimento miktarı nedeniyle rötne ve büzülme kaynaklı dayanım sorunlarına sebep olmakta, betonun performansını olumsuz etkilemektedir [7]. Uluslararası geçerli bir standardının henüz olmayışı, optimum UYPB tasarımı elde edebilmek için betonu oluşturan tüm parametrelerin performans üzerindeki etkilerini belirlenip geliştirilmesi gerekliliği, araştırmacıların UYPB üzerinde yoğunlaşmalarına sebep olmaktadır.

Nanoteknoloji, atomik, moleküler ve nano (metrenin milyarda biri) ölçülerde malzeme parçacıklarını kullanarak daha üstün performanslı malzemelerin üretilmesinde uygulanan teknolojidir [8], [9]. Nanoteknoloji sayesinde mevcut malzemelerdeki kalite ve performansın en üst düzeye çıkarılması, var olan kusurların giderilerek hizmet ömrünün uzatılması, ağırlık ve/veya hacminin azaltılması, üretim yöntemlerini geliştirerek aşamalarını kolaylaştırma, daha verimli malzemelerle üretimini sağlama, işletme veya bakım-onarım ihtiyaçlarını en aza indirme gibi faydalar sağlanabilir. Böylece, optimum ham madde ve enerji kullanımı ile birlikte CO₂ salımının azaltılması, kaynakların verimli kullanılması, ekonomik faydayı artırarak konforlu rahat bir yaşama imkanı sağlanması amaçlanır [10]. Nano-silika, nano-kalsiyum karbonat, grafit nanoplateler, karbon nanotüp (CNT) ve karbon nanolif (CNF) gibi nanomalzemeler, yüksek yüzey alanları ve incelikleri nedeniyle beton özelliklerini geliştirmek için tercih edilmektedir [11], [12].

Türkiye'nin yanı sıra çoğu ülkelerdeki mevcut uygulamalardaki UYPB'lerin kullanımı, mevcut uluslararası üretim standardının olmayışı, karmaşık, hassas tasarım ve karıştırma prosedürü, sınırlı ham madde, yüksek maliyet vb. sebeplerle oldukça kısıtlıdır. Günümüz koşullarında sadece uluslararası tedarikçiler tarafından sağlanan tescilli, önceden paketlenmiş ürünlerle sınırlı ve seçkin projelerde tercih edilmektedir. Özellikle yerel olmayan malzeme ihtiyacı ve kütle maliyetleri, UYPB'nin maliyetini artırmakta

(metreküp başına 2.000 \$'a kadar çıkabilen), donanımlı ve tecrübeli uygulayıcı eksikliği kullanımını sınırlamaktadır [2].

Yapılan bu tez çalışması ile, maksimum matris yoğunluğu sağlayacak şekilde optimize edilmiş kuru karışım reçetesine sahip, standartlaştırılmış bir karışım prosedürü olan UYPB üretimi gerçekleştirmektir. Bu çerçevede UYPB'nin üretim kaynaklı bazı kusurlarının iyileştirilmesi, özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla betona SWCNT takviye edilmiş, çok özel laboratuvar koşul ve yöntemleri gerektirmeyen laboratuvar ortamında üretilen UYPB'lerin taze ve sertleşmiş özellikleri araştırılmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüz koşullarında sınırlı doğal kaynaklar, sınırlı hammadde ve çevresel sorunlar, daha ekonomik, daha güvenli, daha dayanıklı, çevre dostu üretim ve tüketime sahip sürdürülebilir yapıları gerekli kılmaktadır. Yapı sektörünün de artan istek ve ihtiyaçlar ile modern tasarımlar karşısında geleneksel malzemelerin performansı yetersiz kalmaktadır. İnsan yapımı dünyanın en popüler yapay taşı olarak da kabul edilen beton, mukavemet ve dayanıklılığı, birçok formda yerleştirilebilmesi ve düşük fiyatı gibi üstün özellikleri, inşaat endüstrisindeki en ünlü ve önemli malzeme olarak kabul görmesini sağlamaktadır. Kullanılacak beton tercihi, üretim, dayanım, dayanıklılık, görünüm vb. özelliklerin yanı sıra yerel mevzuat ve yapı yönetmelikleri ile projenin ihtiyacına bağlıdır. Tasarım, betonun gereksinimlerinin belirlenmesiyle başlar. Bu gereksinimler, betonun hizmette maruz kalacağı hava koşullarını ve gerekli tasarım mukavemetine bağlıdır. Betonun üretiminde, kullanılan malzemelerin maliyetinden, kolay karıştırma, yerleştirme bakım gereksinimi gibi maximum performans sağlayacak birçok faktörün dikkate alınması gerekir.

2.1. BETON

İnsanoğlunun, barınma ve yaşam koşullarını kolaylaştırma ihtiyacı uygarlık tarihindeki önemli gelişmelerle ortaya çıkarmıştır. Yaklaşık 5000 yıldan beri ve farklı formlarda kullanılmakta olan beton, insanlık tarihinin gelişiminde ve eski medeniyetlerin günümüze kadar gelebilen eserlerin içinde önemli bir yere sahiptir. Piramitlerin yapımında kireç bazlı bağlayıcıların kullanılması, Pantheon ve Colloseum gibi yapıların doğal hidrolik bağlayıcı olan puzzolanlarla yapılması ve Orta Asya ile Anadolu'da Horasan Harcı adı verilen bir bağlayıcı ile üretilmiş olması, betonun gelişiminin ve tarihinin çok eskilere dayandığını göstermektedir. Çağdaş beton tarihi ise 1800'lü yılların başında Louis Vicat'ın ilk yapay çimentoyu üretmesi ve Joseph Aspdin'in "Portland Çimentosu"nun patentini almasıyla başladığı düşünülmektedir. Betonarme yapı sistemlerinin bulunmasıyla, beton yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. 1900'lü yılların

başından itibaren birbirini izleyen teknolojik yenilikler beton kalitesini de yükseltmeye başlanmış, özellikle kimyasal ve mineral katkıları, lif gibi malzemelerin betonda kullanılmasıyla farklı özellikte ve amaçlara yönelik yüksek performanslı betonlar üretilmeye başlanmıştır.

Günümüzde çok geniş bir kullanım alanı olan ve sudan sonra yapılarda en fazla tüketilen malzeme haline gelmiştir. Ekonomik, üretimi ve kullanımı kolay, uygun kullanımında güvenli, dayanıklı ve servis gerektirmeyen temel yapı malzemesi durumundadır [13], [14]. Bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu ile kum ve farklı boyutlardaki çakılların su ile karıştırılması ile elde edilen beton, genellikle ilk nesil beton olarak kabul edilir [15]. Modern beton 19. yüzyılda keşfedilip 20. yüzyılda yapılarda önemli bir bileşen olarak kullanılmaya başlanmıştır. İlk beton yollar İskoçya'da Portland Çimentosu kullanılarak yapılmıştır. Bunu Fransa'da yapılan ilk betonarme köprü izlemiştir. 20. yüzyılın başında Fransız Perret, yük taşıyan duvarlar yerine kolon, kiriş ve döşemelerin kullanıldığı ilk yapıyı tasarlamıştır. Türkiye'de ilk betonarme yapıları 20. yüzyılın başlarında yapıldı [14]. Yapılarda beton kullanımı, ekstra ısıtma veya soğutma ihtiyacını azaltıp yüksek enerji verimliliği sağladığı için çevre dostu olarak kabul edilir. Açık gri rengeyle ısı adası etkisini azaltırken yeni betona veya başka uygulamalara tamamen geri dönüştürülebilir. Ham madde olarak geri dönüşümlü agregalar ve geri dönüştürülmüş su kullanılabilir. Üretiminde kullanılan karışım suyu, etkili su azaltıcı katkıları kullanılarak kolayca en aza indirilebilir. Bazı geri dönüştürülmüş malzemeler ile çürük veya uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünler betonda ham madde olarak çimento yerine kullanılır. Bu da döngüsel ekonomiye temel katkıdır. Beton inorganiktir; bu nedenle sağlık için güvenlidir. Çimento üretimi sırasında alternatif yakıtlar kullanılır. Betonarme yapıların servis ömrü, farklı yapı malzemelerine göre yüksek dayanıklılık özelliklerinden dolayı çok uzundur. [16] Yangına dayanıklıdır ve toksik duman çıkarmaz. Betonarmenin dayanıklılığı ve sağlamlığı, yüksek deprem güvenlik seviyeleri gerektiren binalar inşa etmek için idealdir. Üretimi genelde kolay ekonomik ve yereldir. Dayanıklı olması nedeniyle yapıların bakım maliyetlerini düşürebilir. Mimarların ve mühendislerin kompleks, dinamik ve ilgi çekici formlarına imkan sağlar [16].

Hızla artan nüfusun barınma ihtiyaçlarına en uygun karşılığı vermesi, estetik yapılarda kullanım kolaylığı sağlaması, dayanıklı ve sürdürülebilir olması, betonu alternatifini zor

bulunan bir yapı malzemesi hâline getirmiştir. Beton keşfinden bu yana bir yapı malzemesi olarak uygarlığın gelişimine paralel olarak çok farklı alanlarda ve farklı özellikleri ön plana çıkararak kullanılmıştır. Konutlar, kamu yapıları, altyapı inşaatları, deniz yapıları gibi yapıların taşıyıcı kısımlarında kullanıldığı gibi, kara yolları, baraj, havaalanı, spor tesisleri, tüneller, sulama kanalları, maden galerileri ve köprüler gibi teknolojik gelişmelere uygun yeni yapıların temel malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Yerinde döküm yöntemleri yanında ön üretim tekniklerinin gelişmesi ile endüstriyel tesislerde ürünler haline getirilerek de prefabrike yapım tekniklerinin gelişmesi ile birlikte köprü, sulama kanalları, cephe kaplamaları, mimari ürünler, ön üretilmiş konut ve endüstriyel yapıların kolon, döşeme ve duvar elemanları, kaldırım ve zemin elemanları, deniz yapıları, şehir mobilyaları, traversler ve hatta mobilyalar üretilmekte ve yaşamın her alanında yaygınlaşmaya devam etmektedir [17]. Uygarlıkların tarihinde önemli bir yeri olan beton, tasarımcıların sanat eseri oluşturmasına imkan verirken, gelişimi devam etmektedir. Diğer malzemelerle birleştirilerek birbirinin eksikliklerini gidererek daha dayanıklı ve verimli yeni kompozit malzemeler geliştirilebilmektedir [6].

2.2. BETON SINIFLANDIRMASI

İnşaat malzemeleri alanındaki sürekli gelişmeler ve geniş bir uygulama yelpazesi, farklı beton türlerini ortaya çıkarılmasını ve üretilmesini gerekli kılmaktadır. İnşaatla ilgili bütün alanlarda kullanılan betonları mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından genel olarak Normal Betonlar (NB) ve Özel Betonlar olarak iki sınıfa ayrılabilir.

2.2.1. Normal (Geleneksel) Betonlar

Normal betonlar, agrega, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddesi kullanılarak üretilen, basınç dayanımları 20MPa-60MPa, kırılma enerjileri 100 J/m² -120 J/m² civarında olan ekonomik malzemelerdir. Normal betonlar bina, yol, sanat yapıları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [18]. Farklı mimari tasarımlar, fonksiyonlar, ekonomik ve çevresel sorunlar ile yüksek basınç dayanımı, durabilite özellikleri, yüksek kırılma enerjisi gibi oluşan ihtiyaçları karşılayamadığında özel betonlara ihtiyaç duyulmaktadır [18]. Geleneksel betonu oluşturan ana hammaddelere (çimento, su, agrega) ilave olarak çeşitli kimyasal (akışkanlaştırıcı, priz geciktirici, geçirimsizlik sağlayıcı gibi) ve mineral katkıları (taş unu, tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı) eklenerek, özel üretim

yöntem ve teknikleri ile farklı tür betonlar elde edilmektedir. Bu betonlar birim ağırlıklarına, basınç dayanımlarına, üretildikleri ve kullanıldıkları yere göre isimlendirilmektedir.

Birim ağırlıklarına göre beton türleri Çizelge 2.1’de verildiği gibi ultra hafif beton, hafif beton, normal ağırlıklı beton ve ağır beton olarak isimlendirilir [19]. Ağır beton çeşitleri genel olarak zararlı ışınlar karşı bir engel oluşturmak için kullanılmaktadır. Ağır beton çeşitlerinin kullanım alanları arasında nükleer reaktörler yani atom santralleri, hastanelerin ışın tedavisi yapılan bölümleri yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Birim ağırlığa göre beton sınıflandırması [19].

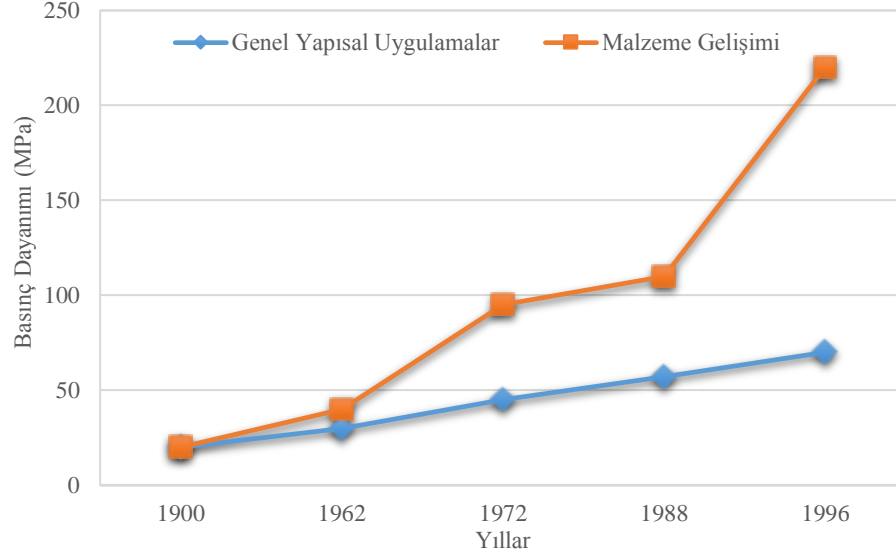
Tasnif	Birim ağırlık (kg/m³)
Ultra Hafif beton	<1200
Hafif Beton	1200 - 1800
Normal Ağırlıklı Beton	~2400
Ağır Beton	>3200

Basınç dayanımlarına göre beton türleri Çizelge 2.2’de verildiği gibi normal (düşük-orta) dayanımlı beton, yüksek dayanımlı beton ve ultra yüksek dayanımlı betonlardır.

Çizelge 2.2. Basınç dayanımına göre beton sınıflandırması

Tasnif	Basınç Dayanımı (MPa)
Düşük dayanımlı beton	<20
Orta dayanımlı beton	20-50
Yüksek dayanımlı beton	50-120
Ultra yüksek dayanımlı beton	>120

20. yüzyılın ilk yarısında normal beton basınç dayanımı 20 ila 40 MPa arasında iken [15] ikinci yarısından sonra basınç dayanımındaki artış 40 MPa’ı aştığı (Şekil 2.1) [20], 20. yy. sonlarında ultra yüksek dayanıma sahip beton türlerinde 200 MPa’ın üzerlerinde yüksek dayanımlar elde edildiği görülmektedir.



Şekil 2.1. 100 yılda betonun basınç dayanımındaki artış [20].

Ayrıca karışım özellikleri, üretim yöntemleri ve kullanım yerlerine göre var olan beton türleri olarak; püskürtme beton, lifli beton, ferrocement beton, vakumlu beton, endüstriyel zemin beton, renkli-dekoratif beton ve grobeton vb. sayılabilir. Estetik amaçlı ya da üstüne yapılacak kaplama imalatları için talep edilen brüt betonlar, pürüzsüz yüzey elde etmek için de kullanılmaktadır. Baskı betonunun (press betonu) kullanıldığı alanlar yollar, alışveriş ve iş merkezleri, çevre düzenlemeleri, kent meydanları, parklar, turistik tesisler, marina ve rıhtımlardır. Ancak restorasyon alanları, otopark, benzin istasyonu, iç mekânlar ve bahçe düzenlemeleri gibi yerlerde de baskı beton çeşidi kullanılmaktadır. Pürüzlü ve dekoratif istenen zeminlerde ise farklı renklerdeki doğal veya yapay agregaların bir araya getirilmesi, yüzeydeki hidrate olmayan çimento katmanının yıkanması ile dekoratif betonlar (wash beton) elde edilmektedir. Bu beton çeşidi eğimli yüzeylerde, garaj girişlerinde, yaya kaldırımlarında, yürüyüş alanlarında, park ve bahçeler gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca özel durumlar ve yerler için kullanılan, hafif beton, sülfat etkisine dayanıklı beton ve donmaya karşı dayanıklı beton çeşitleri de mevcuttur. Yol betonu, su geçirimsiz beton ve su altı betonları da sıklıkla kullanılan betonlardır. Zemin şapları, renkli betonlar ve akıcı dolgu betonları da bu grupta sayılabilir.

2.2.2. Özel Betonlar

Özel beton, üretim süreci ve özellikleri normal betonlardan farklı olan betonlardır. Örnek olarak; yüksek dayanımlı betonlar, reaktif pudra betonları, mineral katkılı betonlar, geciktiricili veya hızlandırıcılı betonlar, kendiliğinden yerleşen betonlar, hafif betonlar, polipropilen ve çelik lifli betonlar, püskürtme betonlar verilebilir [21].

Özel betonların üretim yaklaşımları:

- 1) Normal beton bileşimini değiştirip normal agrega ve çimento kullanarak,
- 2) Özellikleri çok değişik agrega kullanarak,
- 3) Üretim tekniğinde değişiklikler yaparak
- 4) Üretim esnasında karışıma katkı maddeleri ilave ederek üretilirler [22].

Yukarıda bahsi geçen üretim yaklaşımları ile yeni geliştirilen bazı karışım bileşenleri kullanılarak üretilmiş özel betonlar mevcuttur. Çimento hamuru enjekte edilmiş lifli beton (SIFCON), kendiliğinden yerleşen beton, kendini iyileştiren beton, antibakteriyel beton, termal enerji depolayan beton, polimer beton, iletken beton, eğilebilir beton, püskürtme beton, ağır beton, radyasyon zırhlı beton, 3D yazıcı betonu, su altı betonu vb. birçok özel beton türü araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir.

Betonların, yapılarda kullanım yerlerine göre gerekli olan dayanım ve dayanıklılık değerleri farklılık göstermektedir. Sadece basınç yüklerine maruz bırakılan bir beton oldukça yüksek performanslar gösterirken eğilme, çekme, burulma, darbe, titreşim gibi yüklerin tek tek veya birlikte etki ettiği yerlerde ise performans açısından oldukça sıkıntılı durumdadır. Özellikle betonun, kırılma (gevrek) yapısı, düşük çekme mukavemeti, bulunduğu zararlı ortam koşullarında zamanla içyapısının bozulmasıyla dayanımının düşmesi gibi sorunlar kullanımını sınırlamaktadır. Altyapının gelişmesi, ağır ve yüksek binalar, uzun açıklıklı köprüler, hidrolik veya deniz yapılarının maruz kaldığı olumsuz ortam koşulları, modern mimari tasarımlı ve özel inşaat mühendisliği yapıları gibi büyük ve özellikli projeler daha üstün özelliklerde yüksek performanslı beton ihtiyacını oluşturmuştur. Beton basınç dayanımındaki artış genel itibarıyla servis koşulları altındaki betonarme elemanların dayanıklılığını da arttırmaktadır. Örneğin inceliği ve termal işlem

yoluyla reaktivitesi arttırılmış bileşenlerin oluşturduğu, dayanım ve dayanıklılığı beraber geliştirilmiş olan yüksek performansa sahip, Reaktif Pudra Betonlar (RPB) geliştirilmiştir. İçeriği, farklı parçacıkların çok yoğun bir düzenlemeyle yerleştirilmesine dayanan RPB, laboratuvar ve saha deneylerinde kullanılan en yaygın Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) türüdür. Yapısında yüksek bağlayıcı içeriği, çok yüksek çimento içeriği, çok düşük w/b (su-bağlayıcı), silis dumanı (SF), ince kuvars tozu, kuvars kumu ve çelik liflerden oluşmaktadır. İlk kez 1990'lı yılların başlarında araştırmacılar Richard ve Cheyreyz [5] tarafından üretilmiştir. Reaktif Pudra Beton (RPB), küp basınç dayanımları 200 ile 800 MPa arasında, çekme dayanımları 25 ve 150 MPa, kırılma enerjileri yaklaşık 30000 J/m² ve birim ağırlıkları 2500-3000 kg/m³ aralığında değişen özel beton çeşididir [5].

2.3. ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLAR (UYPB)

Yüksek performanslı bir betonu oluşturmak için malzemeleri belirlemek, fiziksel ve kimyasal etkileşimlerini anlamak, karışım içeriğinin hesaplamak çok önemlidir. Beton karışımı, yüksek işlenebilirlik, yeterli dayanım, maruz kalacağı çevre ve servis koşulları (zati, hareketli ve deprem yüklemeleri gibi), dayanıklılık (durabilite) gibi özelliklere sahip en ekonomik betonu elde edebilmek amacıyla gerekli agrega, su, hava ve gerektiğinde katkı maddesi miktarlarının hesaplanmasıdır [23].

UYPB, yüksek basınç dayanımı ve üstün durabilite özellikleriyle çimento esaslı kompozitlerin yeni bir türü olup daha önce hiç mümkün olmadığı düşünülen inanılmaz düzeyde üstün performans değerlerine ulaşılmış beton türüdür [21]. Mikroskobik ölçekteki gelişmeler sayesinde keşfedilen UYPB'ler, karışımı oluşturan malzemelerin pudra tane boyutlu olması, sıcak kür işlemi ile puzolanik aktivitenin yeniden tekrarladığı ve çimento matrisli bir kompozit olması nedeniyle Reaktif Pudra Beton (RPB) olarak da isimlendirilir. Beton sektöründe;

- Ultra High Performance Concrete (UHPC),
- Lifle güçlendirilmiş Ultra Yüksek Performanslı Beton UHPFRC,
- Yüksek Performanslı Beton (YPB),
- Yüksek Dayanımlı Beton (YDB),

- Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) gibi isimlerle anılmaktadır.

Xue ve diğ. [24] göre, 2015 yılından itibaren UYPB'ler ile ilgili yayınlanan makale sayıları, UYPB'leri geliştirme çalışmalarının yoğun bir şekilde devam ettiğini, yakın gelecekte UYPB'lerin yüksek uygulama potansiyeline sahip olduğunu belirtmektedir.

Literatür'e göre UYPB tanımları çoğunlukla bileşen ve dayanım değerlerine göre yapılmaktadır. Bileşenlerine göre yapılan tanımlamalarda;

Farzad ve ark. [25], UYPB'yi, granüler bileşenlerin iyileştirilmiş derecelendirilmesi, w/b oranının 0,2'den az ve lif eklenmesi ile oluşturulmuş çimento bazlı bir malzeme olarak tanımlamaktadır. Mishra ve Singh [26], yüksek oranda ince taneli reaktif katkılardan (yani silis dumanı ve ince kuvars), liflerden ve süper akışkanlaştırıcılardan oluşan, yüksek miktarda bağlayıcı ve düşük w/c (su-çimento) oranına sahip özel bir beton türü olarak tanımlamaktadır. Azmee ve Şefik [27], normal agrega yerine çapı 0,15 ila 0,60 mm arasında değişen çok ince kuvars kumu içeren, çok düşük w/c oranına sahip, lif takviyeli, süper plastikleştirilmiş, silis dumanlı çimento karışımı olarak tanımlamaktadır. Ahmet vd. [28], yüksek oranda çimento, silis dumanı (0,1–1 µm) ve süperakışkanlaştırıcı ile birlikte çok ince kuvars kumu (0,15–0,60 mm), kuvars tozu (10 µm'den küçük) ve kaba agrega içermeyen, mikro lifler kullanılarak üretilen bir karışım olarak tanımlamaktadır. Nematullahi vd. [29], UYPB'yi optimum derecelendirme eğrilerine sahip çok ince malzemelerden, çok yüksek mukavemetli ayrık mikro çelik liflerden ve 0,25'ten düşük w/c oranına sahip çimento bazlı bir kompozit malzeme olarak tanımlar.

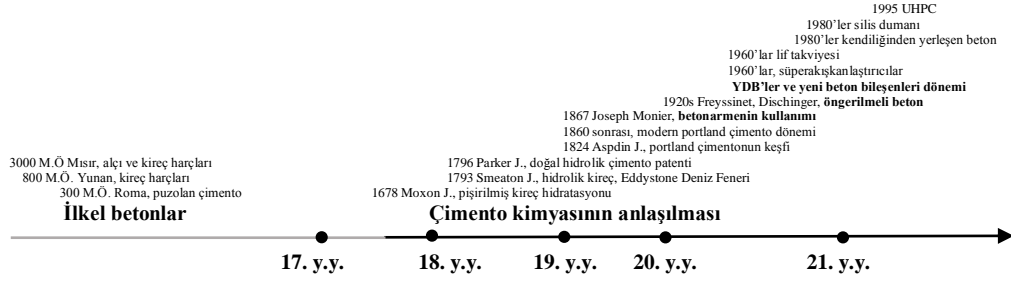
Mekanik ve dayanıklılık özelliklerine göre yapılan tanımlarda ise; Richard, P.& Cheyreyz, M. H. [30]'e göre UYPB, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesini belirleyen bir çimento matrisi ve kısa polimer veya metal lif takviyeden oluşan bir kompozit malzemedir [31]. Aroraa ve ark. [32], çok yüksek basınç dayanımı, yüksek eğilme ve çekme dayanımı ve yüksek süneklik için uyarlanmış çok ölçekli mikro yapı tasarımlı bir malzeme, Li, J. vd. [33], agresif ortamlara maruz kalan beton yapılar için üstün hizmet edebilecek yenilikçi bir kompozit malzeme, Tang [34], gelişmiş mekanik ve dayanıklılık özellikleri sergileyen, yapısal elemanların enine kesitlerini

azaltarak, malzeme tasarrufu, daha düşük kurulum ve işçilik maliyetleri ile ekonomik yapıya yol açabilen yeni bir yapı malzemesi olarak tanımlamaktadır. Liu, Song ve Wang [35]; Cwirzen [36], reaktif pudra betonunu, çok yüksek performanslı ve ultra yüksek basınç dayanımına sahip çimento esaslı yeni bir bileşik malzeme olarak tanımlamıştır. Sarika ve John'a [37] göre, reaktif pudra betonu beton değildir çünkü çimento karışımında kalın agrega yoktur. Reaktif pudra betonu terimi; çimento, silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı bileşiğinden oluşan, lif takviyeli ve çok düşük su çimento oranlı, ayrıca sıradan agrega yerine çok ince agrega içeren malzemeyi tanımlamak için kullanılmıştır.

Yukarıdaki tanımlara göre UYPB, ince ve ultra ince agregaların (silis dumanı ve kum) mikro ölçekli optimizasyonu, çok düşük su-çimento oranlı, süper akışkanlaştırıcı katkı ve yüksek mukavemetli çelik liflerle takviye edilmiş, çok yüksek basınç dayanımına sahip, yüksek süneklikte ve sürdürülebilirlik için tasarlanmış yeni nesil çimento bazlı yapı malzemesidir [15].

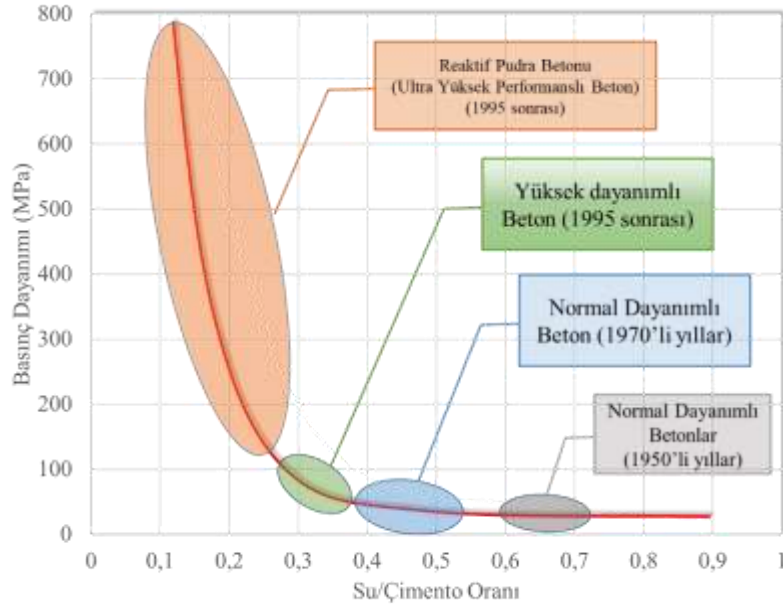
2.3.1. UYPB Tarihi Gelişimi

Betonun gelişim ölçeğinde (Şekil 2.2)'de görüldüğü üzere [38], UYPB ilk olarak 1995 yılında Fransa'da bulunan Bouygues SA firması tarafından geliştirilmiş, beton üretimindeki en son yenilik olarak kabul edilebilir [5]. Gelişmiş betonların kökeni, 1960'lara ve 1970'lere uzanırken, UYPB basınç altında ısıl kürleme ile çimento hamurunun mukavemetinin iyileştirilmesi üzerine yapılan araştırmalarla [33] düşük su/çimento oranlarının uygulanmasına dayanmaktadır [41]. Malzeme bilimindeki gelişmeler, malzemenin mikro yapısının daha iyi anlaşılmasını ve özelliklerini önemli ölçüde geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Su azaltıcı kimyasal katkıların 1960'lı yıllarda keşfi ile [42] işlenebilirliği etkilemeden su/çimento oranının 0,20'nin altına düşürülmesi yeni nesil süper akışkanlaştırıcılar sayesinde başarılmıştır.



Şekil 2.2. Çimento ve betonun tarihi [38].

Su/çimento oranının dayanıma etkisi ve yıllara göre değişimi Şekil 2.3'te görülmektedir. 1970'li yıllarda ise kısa kesilmiş yüksek dayanımlı çelik teller ve sıcak su kürü ve basınçlı su buharı kullanılarak beton basınç dayanımları 200 MPa'ın üzerine çıkarılmıştır [43].



Şekil 2.3. Mukavemet ve s/ç oranına göre betonun gelişim tarihi [43].

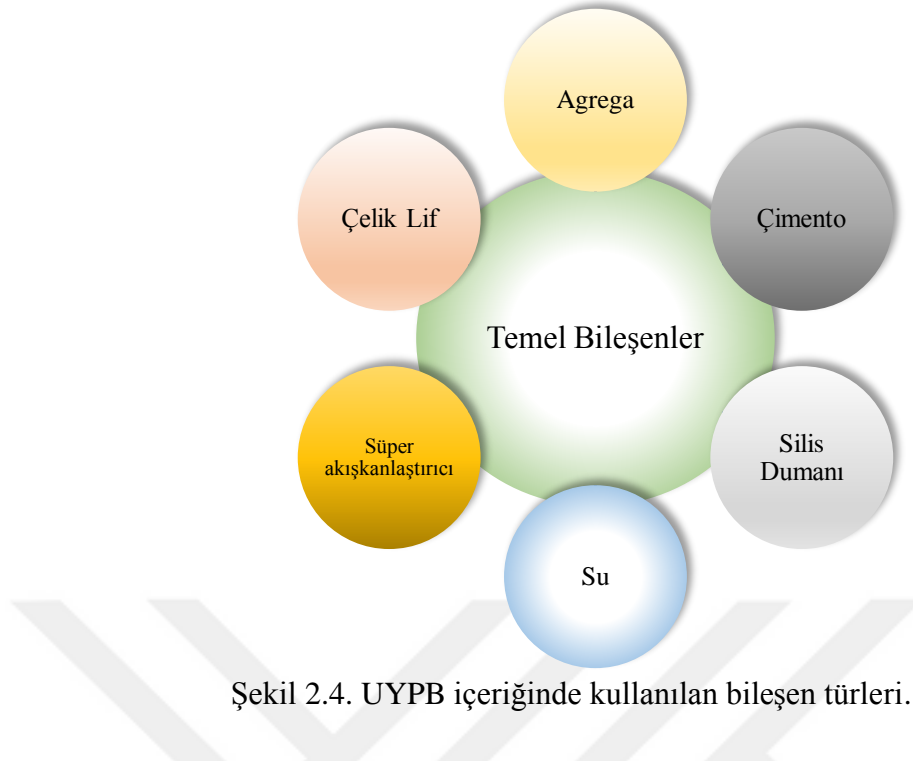
Yüksek mukavemet ve üstün mekanik özelliklere sahip beton ilk kez Yudenfreund tarafından 1970'lerde vakumlu bir ortamda 230 MPa dayanımda üretilmiştir [41]. Bu çalışmanın ardından Roy ve arkadaşları 50 MPa basınç ve 250°C sıcaklıktaki kür şartlarında 510 MPa dayanıma sahip beton üretebilmiştir [44]. İleri teknoloji eksikliği nedeniyle, 1980'lerden önce yüksek performanslı beton (YPB) üretimi, sadece laboratuvar ortamında üretilebilirken, hazırlanması çok zor ve fazla enerji gerektiriyordu. 1980'lerin başında; 200 MPa basınç dayanımına sahip Mikro Hatasız Çimento (MDF) keşfedildi. MDF üretiminde, gözenekleri doldurmak ve çimento hamurundaki tüm kusurları gidermek için polimerler kullanıldı. Bu işlem, malzemenin silindirlerden geçirilerek lamine edilmesi de dahil olmak üzere spesifik üretim koşulları gerektirmekte

idi. Bununla birlikte, pahalı hammadde, karmaşık hazırlık süreci, büyük yayılma ve kırılma olmaları, uygulamalarını sınırlandırmıştır. Daha sonra Danimarka'da Bache tarafından yüksek miktarda süperplastikleştirici (SP) ve silis dumanı (SF) içeren, ısı ve basınçla kürlenmiş yoğun silika parçacık çimentosu (DSP) üretilmiştir. MDF'den farklı olarak, DSP'nin hazırlanmasında üretim koşulları daha basitti. Parçacık paketleme yoğunluğunun artırılması, DSP'deki kusurların ortadan kaldırılmasını sağlamıştır. Böylece DSP'nin maksimum basınç dayanımı 345 MPa'ya kadar ulaşmıştır. Bu betonlardaki yüksek kırılma sorunu iyileştirmek için karışımlarda çelik lifler kullanılmasıyla CRC ve Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Betonlar (SIFCON) keşfedilmiştir. Mükemmel mekanik özellikler ve dayanıklılık gösteren bu betonlar etkili SP'nin olmaması nedeniyle, yerinde uygulamalarını engelleyen işlenebilirlik sorunları oluşturdu. Üretilen betonların mukavemetleri yüksek olsa bile üretim şartlarının zorluğu bu betonların kullanımı mühendisler tarafından pek avantajlı görülmemiştir [44].

UYPB, mikro çimento malzemelerinin entegrasyonu ile üretilmiş olup bu beton türü ile ilgili temel ilkeler Richard ve Cheyrezy tarafından yürütülmüştür. Reaktif pudra betonu; düşük su-bağlayıcı oranı ile priz sonrası ısıyla kürlenmiş, yüksek basınç uygulama işlemi ile makro kusurları arındırılmış, pudra ölçekte karışım bileşikleri geliştirmenin ve mikro yapının homojenliği artırılmış (agreganın maksimum çapını en aza (0,6 mm) indirerek), ileri bir beton teknolojidir [45]. Wang vd.'ne göre, yüksek performansa sahip yeşil bir beton tipi olarak tarif edilen RPB, yüksek durabiliteye de sahiptir [46].

2.3.2. UYPB Bileşenleri

Ultra yüksek performanslı betonun (UYPB) karışımında yüksek oranda portland çimentosu ile birlikte puzolanik malzemeler (silis dumanı (0,1–1 µm)), reaktif tozlar, agrega olarak kuvars kumu (0,15 ila 0,60 mm), kuvars tozu (10 µm'den küçük), yüksek oranda su azaltıcı katkı (süper akışkanlaştırıcı), çelik lif ve su birleştirilerek formüle edilir [5]. Genel olarak UYPB içeriği Şekil 2.4'te görüldüğü gibidir.



Şekil 2.4. UYPB içeriğinde kullanılan bileşen türleri.

2.3.2.1. Agregalar

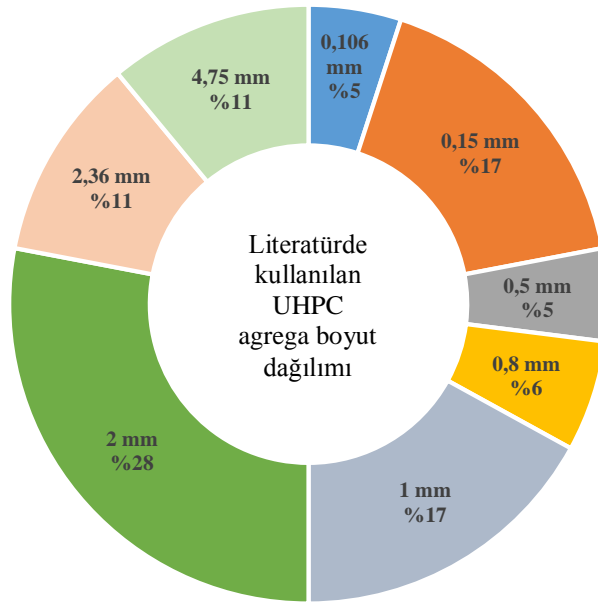
UYPB mukavemeti ve işlenebilirliği için önemli bileşen agregadır. Yüksek dayanımlı agreganın kullanılmasıyla daha yüksek dayanıma sahip betonlar elde edilebilir. Silis kumu, kuvars kumu veya doğal kum olabilir. Betonda kırılma esnasında çatlak oluşumu önce çimentolu matris ve kaba agregalar arasındaki arayüzey geçiş bölgesinde (ITZ) başlar, sonra matris çatlak ve yayılma matriste gelişir [26], [47]. Betondaki iri agreganın 150-600 µm boyut aralığında optimal olarak derecelendirilen ince agreganın ile değiştirilmesi, çimento matrisi ile agreganın arasındaki heterojenliğin azaltılmasında çok önemlidir, bu da yoğun bir mikro yapıya ve dolayısıyla UYPB'nin mükemmel performansına yani stabiliteye neden olur [48], [49]. UYPB karışımlarındaki kaba agregaların ortadan kaldırılması, ITZ'deki zayıflıkları azaltır, bu da matriste daha düşük gözeneklilik oluşturarak yüksek mekanik mukavemet sağlar [50]. İnce boyutlu agreganın, UYPB'nin karışım tasarımında önemli bir faktör olan maksimum harç (macun) kalınlığının (MPT) azaltılmasında da önemli bir rol oynar [51].

De Larrard ve Sedran'a [52] göre de, UYPB'nin mukavemetini artırmak için, iki agreganın arasındaki ortalama mesafenin (MPT) düşürülmesi için agreganın sadece ince kum kullanılmasını önerilmektedir. MPT arttığında basınç dayanımı azalmaktadır. Bu gözlem, UYPB tasarımı iri agreganın içerdiğinde bile normal betona kıyasla daha küçük (6 mm'den

küçük) ve daha düşük bir miktar olma eğiliminde olduğunu bildiren Graybeal [53] tarafından da doğrulanmaktadır. Bu nedenle, ince agrega genellikle UYPB matrisindeki en büyük parçacıklara sahiptir. Graybeal, optimize edilmiş parçacık dolgululu yüksek kaliteli, yüksek dayanımlı, düşük su emme özelliğine sahip agrega kullanımını önermiştir [54]. Meng'e [55] göre, UYPB'de kullanılacak ince agrega, çevresel ve ekonomik olarak arzu edilen kadar güçlü ve kimyasal olarak kararlı olmalıdır. Çizelge 2.3 ve Şekil 2.5'de farklı araştırmacıların UYPB üretiminde kullanmış olduğu agregaların maksimum parçacık boyutlarının ve bunların kullanım sıklığı görülmektedir [2].

Çizelge 2.3. Farklı araştırmacılar tarafından UYPB'de kullanılmış olan agregaların maksimum boyutları [2].

Maksimum agrega boyutu	Wille et al. 2011	Naaman et al. 2012	Ambily et al. 2014	Yu et al. 2014(a)	Yu et al. 2014(b)	Yu et al. 2015	Alkasy et al. 2015	Meng et al. 2016	Wu et al. 2016	Meng et al. 2017
0,106 mm							Evet			
0,150 mm		Evet	Evet							
0,500 mm							Evet			
0,800 mm		Evet								
1,000 mm				Evet	Evet	Evet				
2,000 mm	Evet							Evet		Evet
2,360 mm			Evet	Evet	Evet	Evet			Evet	
4,750 mm								Evet		Evet



Şekil 2.5. UYPB'de kullanılan maksimum agrega boyutunun sıklığı [2].

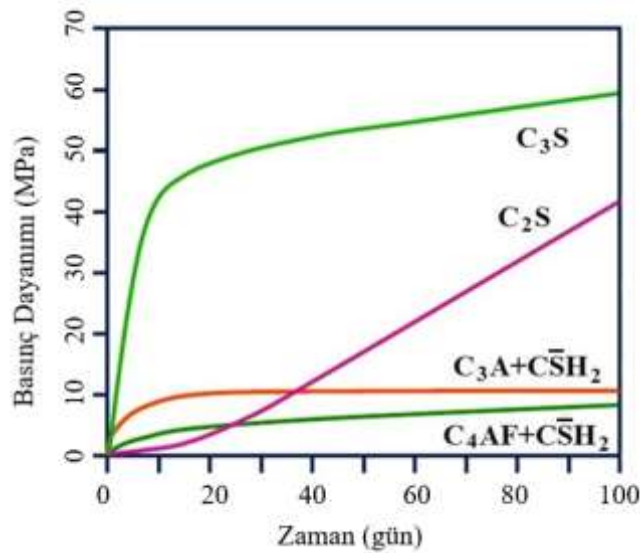
2.3.2.2. Bağlayıcılar

Normal dayanımlı (NB) ve yüksek performanslı betonda (YPB) kullanılan çimento miktarına oranla UYPB’de nispeten daha yüksek oranda çimento kullanılmaktadır [56], [57]. Çimento içeriğinin arttırılmasının UYPB basınç dayanımını arttırdığı; bununla birlikte, optimum bir çimento içeriğinin ötesinde, agregaların sınırlı katılımı nedeniyle basınç dayanımı muhtemelen düşme eğilimindedir [58]. Orta Blaine inceliğine sahip çimento ($4000 \text{ cm}^2/\text{g}$) ve %6’dan daha düşük trikalsiyum alüminat (C_3A) içeriği, daha düşük su ihtiyacı nedeniyle tercih edilmektedir [51].

UYPB karışımlarında kullanılan ana bağlayıcılar 42,5R ve 52,5R dayanım sınıfları için özel olarak üretilen CEM-I hafif alkali çimentolarıdır [59]. Klinkerin ana bileşimleri, trikalsiyum alüminat (C_3A), dikalsiyum Silikat (C_2S), trikalsiyum Silikat (C_3S) ve tetrakalsiyum alümino-ferrit (C_4AF) içermektedir. Bahsedilen malzemelerin özellikleri, Çizelge 2.4’de gösterilmekte olup, Şekil 2.6’da söz konusu minerallerdeki güç geliştirme eğrilerini göstermektedir [60].

Çizelge 2.4. Portland çimentosunun bileşenlerinin özellikleri [22], [60].

Bileşen	Miktarı %	Reaksiyon hızı	Bağlayıcılık değeri		Hidratasyon hızı	Hidratasyon Isısı	Sülfat etkisine mukavemet
			İlk hafta	İlk yıl			
C_3S	37-60	Orta (ilk hafta)	Kuvvetli	Kuvvetli	Hızlı	Yüksek	Orta
C_2S	15-37	Yavaş (ilk yıl)	Orta	Kuvvetli	Yavaş	Az	Yüksek
C_3A	3-12	Ani (ilk dakika)	Zayıf	Zayıf	En Hızlı	En yüksek	Zayıf
C_4AF	8-15	Hızlı	Zayıf	Zayıf	Orta	Düşük	Orta



Şekil 2.6. Portland çimento bileşenlerinin dayanıma olan katkısı [60].

C_2S ve C_3S hidrasyon ürünü olan C-S-H jeli betonun dayanımı için ana katkı maddesidir [59]. $Ca(OH)_2$, bir puzolanik reaksiyonda ana işlem olan ek kalsiyum (C-S-H) jelini üretmek üzere puzolonlardan amorf silis ile reaksiyona giren C_2S ve C_3S 'nin bir başka hidrasyon ürünüdür [3]. Çimentodaki C_3A ve alçı içeriğinin betonun, özellikle işlenebilirliği üzerinde önemli bir etkisi vardır. UYPB üretimi için C_3A çimentosu içeriğinin %8'den az olması gerektiği önerilmektedir [3], [55]. Çimentonun inceliği de betonun özelliklerini etkilemektedir. Yüksek inceliğe sahip çimento hızlı hidrasyon eğilimindedir [3]. UYPB'yi üretmek için kullanılan çimento içeriği, çoğunlukla 700 ila 1100 kg/m^3 arasında olup normal betona kıyasla çok yüksek (yaklaşık iki kat) bir miktara sahiptir. Bu nedenle, UYPB matrisindeki en büyük ikinci parçacık boyutu olarak kabul edilir. Çimento oranı genellikle %60-80 arasında değişmektedir [61], [62]. Rossi [63], bir UYPB'nin mekanik davranışına ilişkin gerçekleştirdiği deneysel çalışmada 1050 kg/m^3 çimento kullanmış, Park [64], "Ultra Yüksek Performanslı Hibrit Elyaf Takviyeli Betonun gerilme davranışı üzerinde hibrit elyafların etkileri" üzerine yaptığı çalışmada yaklaşık 1000 kg/m^3 bağlayıcı kullanmıştır. El-Dieb [65] yaklaşık 900 kg/m^3 çimento ve 135 kg/m^3 silis dumanı ile UHPFRC üretti. Tayeh [66], onarım malzemesi olarak UHPFRC üretmek için yaklaşık 770 kg/m^3 çimento ve 200 kg/m^3 silis dumanı kullanmıştır. Hassan [67], yaklaşık 650 kg/m^3 çimento, 420 kg/m^3 GGBS ve 120 kg/m^3 silis dumanı ile UHPFRC üzerinde mekanik araştırmalar yapmıştır.

2.3.2.3. Puzolanik Malzemeler

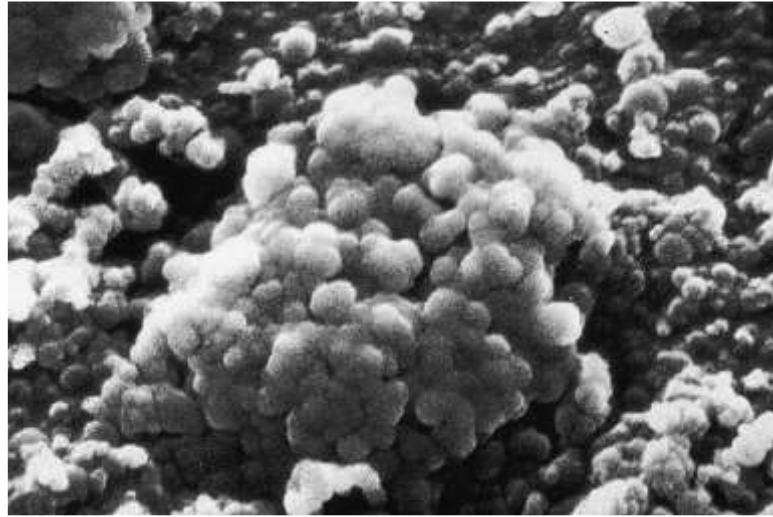
UYPB'nin üretimi için aktif mineral katkıların önemli olduğu ve her türlü aktif mineral katkı maddesi ile UYPB hazırlamak mümkün olmamakta, sadece silis dumanı (SD), uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) bu amaç için kullanışlıdır. Bunlar kalsiyum hidroksit ile puzolanik reaksiyona neden olan aktif silisyum dioksit (SiO_2) içeriği içeren spesifik minerallerdir. Daha yüksek (Ca/Si) C-S-H formu, beton bağlayıcı kalitesini artıran daha düşük forma dönüşmektedir [50].

Mineral katkıları karıştırıldıklarında başlangıçta etkisiz kalmaktadır. Su ve Portland çimentosu reaksiyona girmeye başladığında (hidratlaşırken), kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ve kristalizasyon yoluyla güç üreten kalsiyum silis hidrat (C-S-H) dahil olmak üzere birkaç bileşik üreten birincil kimyasal reaksiyonlarla sonuçlanmaktadır. $Ca(OH)_2$ kristallerinin varlığı, çimentoda zayıflık anlamına gelmesi bu tür kristallerin içinden

yayılabilen çatlaklara neden olmasına ve dolayısıyla betonun dayanıklılığı ve mukavemeti üzerinde ki olumsuz etkiye sebep olmasıdır [68]. Mineral katkıları eklendiğinde betonda puzolanik reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Bu CH ve mineral katkıları hidratlı çimento boşluklarında ekstra C-S-H üretmek üzere reaksiyona girmesiyle mümkün olmaktadır [68]. Oluşan C-S-H'lar, betonun basınç ve eğilme dayanımlarını iyileştirmekte ve daha yoğun bir matris vermektedir [68]. Tamamlayıcı çimento esaslı (SCM) olarak bilinen ve farklı endüstrilerden elde edilen bu malzemelerden;

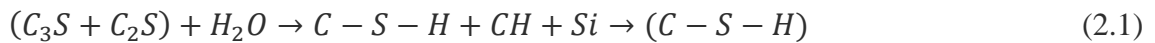
Silis Dumanı (SD):

Amorf camsı silisyum dioksit (SiO₂) küreleri içeren ultra ince minerallerden oluşan ve ferrosilikon alaşımları ve silikonu üretirken saf kuvars indirgemesi sırasında elde edilmektedir [69]. SD parçacıklarının SEM görünümü Şekil 2.7'de, kimyasal içeriği Çizelge 2.5'de görülmektedir.



Şekil 2.7. Silis dumanına ait SEM görünümü [69].

Portland çimentosu ve SD arasındaki reaksiyon Denklem 2.1'de görülmektedir [62].



Portland Çim. Su

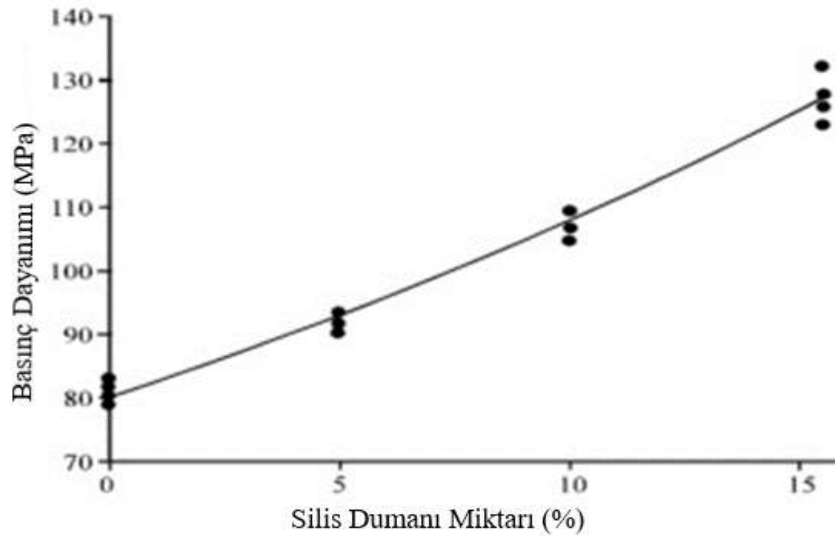
SD, küresel şekilde olup ortalama parçacık büyüklüğü 0,1-0,2 µm'dir. Portland çimentosunun taneleri ile karşılaştırıldığında 100 kat daha küçüktür [70]. Silis dumanı çimento taneleri arasındaki boşlukları azaltarak daha homojen ve daha sıkı bir mikro yapının oluşmasını sağlar, bu da beton yoğunluğunu artırır [71], [72]. Bu mikro dolgu

etkisine ek olarak, silis dumanı ayrıca puzolanik reaksiyonları yoluyla UYPB'nin mukavemet özelliklerini de artırır [5], [50]. Ayrıca filler etkisi göstererek hidrasyon sonucu oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile yeniden reaksiyona girerek yeni C-S-H jelleri oluşturur.

Çizelge 2.5. SD kimyasal içerikleri [71], [69].

SiO ₂ (minimum %)	85,0
Nem içeriği content (maksimum %)	3,0
Yanma kaybı (maksimum %)	6,0

SD kompasitenin yanı sıra dayanıklılığı, reolojisi ve basınç dayanımını arttırmak için kullanılmaktadır. Harçların veya SD'lı betonun mikro yapısı, daha düşük geçirgenliğe ve daha yüksek elektriksel dirence yol açan yoğun bir yapıdadır [68]. Shihada ve Arafa'nın [73] yaptıkları çalışma sonucu UYPB betonundaki basınç dayanımı ile silis dumanı içeriği arasındaki ilişki Şekil 2.8'de görülmektedir. Şekilde gösterildiği gibi, silis dumanı olmadan 81 MPa'ya kadar basınç dayanımı, silis dumanı içeriğinin arttırılmasıyla arttığı görülmektedir [73]. Bu malzemenin ana dezavantajlarından biri, son derece ince parçacıkları nedeniyle daha fazla su ihtiyacı oluşturmasıdır. Bu sorun süper akışkanlaştırıcı ilavesi ile giderilebilmektedir [74]. UYPB karışımındaki ince agrega miktarının artması çimento ve silis dumanı gereksinimleri artırabilmektedir [5], [75].



Şekil 2.8. Basınç dayanımı ve silis dumanı içeriği arasındaki ilişki [73].

Uçucu kül (FA):

Elektrik santrallerinin yanma sürecinde yanan kömürden çıkan dumandan ince, toz bir yan ürün [3] olarak elde edilen uçucu kül (FA), genel olarak su ile karıştırıldığında portland çimentosu gibi davranan bir puzolan malzemedir. Bir yandan betonun işlenebilirliğini artırırken, diğer yandan betonun erken dayanımını azaltabilmektedir.

Öğütülmüş granüler yüksek fırın cürufu (GGBS):

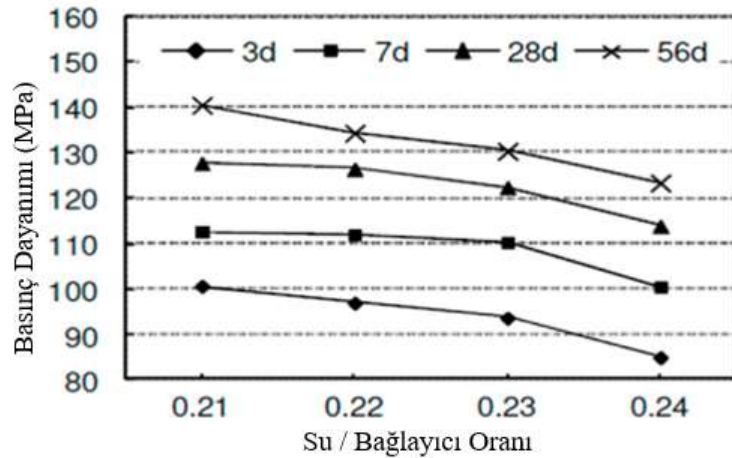
Demir cevherinin yüksek fırında koklaştırılması sürecinde ortaya çıkan bir yan üründür. 45 µm'den ince olan bu malzeme, su ile karıştırıldığında, Portland çimentosu ile aynı şekilde hidratlanmakta ve sertleşmektedir. GGBS, UYPB betonunun priz süresini geciktirilebilir. Betonun dayanıklılığını artırır ve alkali-silika reaksiyonları nedeniyle oluşabilecek hasar riskini azaltır. Ayrıca yüksek klorür penetrasyon direnci sağlar ve sülfatlara ve diğer tehlikeli maddelere karşı korur [72]. UYDB'nin yüksek maliyetinin daha geniş kullanımını kısıtlayan bir dezavantaj olduğu düşünüldüğünde, bu minerallerin çimento ikamesi olarak kullanılmasına önem arz etmektedir.

RPB üretiminde kullanılan silis dumanının oranı bir kısım araştırmacılara göre çimento kütlelerinin %10–30'u (150–250 kg/m³) [76], [77] aralığında önerilirken, bir kısım araştırmacılar tarafından ise %20-30 arasında kullanılması önerilmektedir [44], [71], [72], [78], [79]. Silis dumanlarının ve katkı maddelerinin maliyeti göz önüne alındığında, optimum SD/çimento oranı 0,10 olsa da [80], çimentonun toplam hidrasyonundan kaynaklanan kirecin tamamen tüketilmesi için optimum %25 oranında düşük karbon içerikli (<0.5 %) silis dumanı tavsiye edilmektedir [5], [47].

Tuan [81], UYPB üretiminde silis dumanı (SF) yerine pirinç kabuğu külü (RHA) kullanarak basınç dayanımının 150 MPa'dan fazla olduğunu bulmuştur. UYPB karışımlarında hacimce %30, 36 ve 40'a kadar çimento, basınç dayanımından ödün vermeden sırasıyla kırılmış kuvars, yüksek fırın cürufu veya uçucu kül ile değiştirilebileceği belirtilmektedir [82], [83].

2.3.2.4. Su Miktarı

Reaktif pudra betonlarda granüler matrisin performansını ve kalitesini belirlemede ana parametrelerinden biri de su miktarıdır. UYPB karışımlarında çok düşük bir w/b oranı kullanılır. w/b ne kadar düşükse, gözeneklilik o kadar düşük, basınç dayanımı o kadar büyük olur [84], [85]. Bunun nedeni, çimento su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyonun hemen C-S-H ile kalsiyum hidroksit gibi farklı hidratasyon ürünleri oluşturmasıdır. Bu tür ürünler farklı bileşenleri bağlayabilir ve gözenekleri yavaş yavaş doldurabilir. UYPB üretiminde düşük w/c ($<0,25$) tercih edilmesi düşük işlenebilirlik sorunu oluşturmaktadır [86]. Su oranının az olması nedeniyle hidrate olmayan çimento miktarı, paketleme optimizasyonu için diğer agregalarla birlikte kullanılabilir. Şekil 2.9'da suyun bağlayıcıya oranının basınç dayanımı üzerindeki etkisi görülmektedir [87].



Şekil 2.9. Basınç dayanımının su/bağlayıcı oranı ile ilişkisi [87].

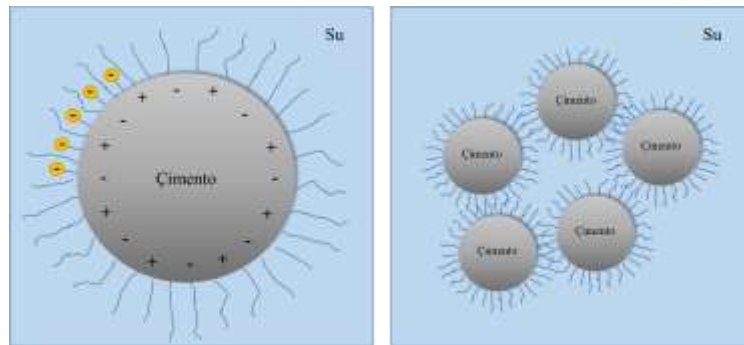
Farklı araştırmacıların çalışmalarında yoğunluk ve yayılma akışı elde etmek için 0,13-0,20'lik bir optimum w/b oranı önerilmektedir [5], [52]. Daha yüksek w/c oranı, gerekli mekanik özelliklerin sağlanması için tehlikelidir ve deformasyon ve dayanıklılık sorunlarına yol açmaktadır [62].

2.3.2.5. Kimyasal Katkılar

Süper akışkanlaştırıcılar, işlenebilirliği artırmak için beton karışımlarına ilave edilen kimyasal katkıdır. Karışım susuz kalmadıkça, betonun mukavemeti eklenen su miktarı veya w/c oranı ile ters orantılıdır. Daha güçlü beton üretmek için, daha az su eklenmesi

beton karışımını çok çalışılmaz hale getirir ve karıştırılmasını zorlaştırır. Bu durum plastikleştiricilerin, su azaltıcıların, süper akışkanlaştırıcıların veya dağıtıcıların kullanılmasını gerektirir. Mukavemeti artırmak için betona puzolanik malzeme eklenmesi de süper akışkanlaştırıcılar kullanımı gerekli kılar. Bu özellikle yüksek dayanımlı beton ve lif takviyeli beton üretilirken popülerdir. Çimento ağırlığına oranla %1-2 süperakışkanlaştırıcı eklenmesi genellikle yeterlidir. Ticari olarak temin edilebilen süper plastikleştiricilerin çoğu suda çözülmüş olarak gelir, bu nedenle eklenen ekstra su, karışım oranlamasında hesaba katılmalıdır. Aşırı miktarda süper akışkanlaştırıcı eklenmesi, betonun aşırı ayrışmasına neden olur ve tavsiye edilmez. Bazı çalışmalar ayrıca çok fazla süper akışkanlaştırıcının geciktirici bir etkiye neden olacağını göstermektedir [88].

SP'ler genellikle polikarboksilat esaslı ve temel olarak parçacıklar arasında sterik bir bariyer oluşturarak çalışır. Bununla birlikte, metakrilik asit esteri (MPEG) bazlı polikarboksilatların UYPB için etkili dağıtıcılar olduğu bilinmektedir [89]. 1980'lerin ortalarından itibaren kimya alanındaki gelişmeler ve polimer teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde özellikle çok düşük s/c oranına sahip UYPB'ler için yüksek oranda su azaltıcı katkıları (HRWR-High Range Water Reducer) kullanılmaya başlanmıştır [90]. Polikarboksilatlar, negatif fonksiyonel gruplar ve hidrofilik yan zincirleri taşıyan bir polar zince sahiptir (Şekil 2.10). Kutup zincirleri kendilerini çimento tanelerinin pozitif yüklerine bağlar ve çimento tanelerini çevreler. Sterik engelleme sırasında, yan zincirler, çimento tanelerini fiziksel olarak tamamen suyla çevrelenmesine izin verecek şekilde birbirlerinden uzak tutmaktadır. Ek olarak, negatif yüklü fonksiyonel gruplar elektrostatik etki göstererek birbirlerini itmektir. Böylece karışımın işlenebilirliğini geliştirmek için taze betonun daha akışkan olmasına yardımcı olur [70].



Şekil 2.10. Polikarboksilat kutup zincirleri ve mekanizmaları [70].

SP katkı oranını, katkının türü, çimento türü ve dozajı etkilemekte olup, agreganın özellikleri katkı miktarını artırmaktadır. Ayrıca diğer karışım bileşenleri ile kullanılan SP tipi arasındaki uyumluluk da etkilidir. Bileşenler arasındaki geliştirilmiş uyumluluk, daha düşük SP dozajına da yol açabilir [31]. SP'nin kademeli veya gecikmeli eklenmesinin (SP'yi bir seferde eklemek yerine), geliştirilmiş bir dağıtma etkisi sayesinde UYPB karışımlarının işlenebilirliğini arttırdığı bulunmuştur [91].

Yapılan çeşitli çalışmalarda [50], [92], UYPB karışımlarının işlenebilirliğini arttırmak için çimento ağırlığına göre %1 ila 8 arasında değişen SP dozajları kullanıldığı görülmektedir. Örneğin Wille ve ark, çimento ağırlığına göre %1,4-2,4 oranında [51]. Courtial ve diğerleri %0,5-2,0 oranında SP kullanmışlardır. [93]. Çizelge 2.6. Çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılan su-bağlayıcı oranı, lif ve süperakışkanlaştırıcı içeriği optimum içeriği Çizelge 2.6'da görüldüğü gibi % 1,5-2,4 arasındadır [26].

Çizelge 2.6. Çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılan su-bağlayıcı oranı, lif ve süperakışkanlaştırıcı içeriği [26].

Referans	Su/Bağlayıcı Oranı	Lif İçeriği (%)	Süperakışkanlaştırıcı(%)
1. Yang et al.	0,2	2,0	2,0
2. Kang et al.	0,20-0,25	10-5,0	1,8
3. Hassan et al.	0,28	2,0	-
4. Zhao and Sun	0,16	1,0	0,98
5. Yoo et al.	0,2	2,0	1,8
6. Yu et al.	0,4	2,5	4,5
7. Yoo et al.	0,2	1,0-4,0	1,2-1,6
8. Abbas et al.	0,23	1,0-6,0	-
9. Gesoglu et al.	0,174	2,0	-
10. Li et al.	0,16-0,22	-	-
11. Yoo et al.	0,25	2,0	1,6
12. Wu et al.	0,18	1,0-3,0	2,0
13. Yoo et al.	0,20	2,0	2,0
14. Xu et al.	0,22	2,0	5,1
15. Liu et al.	0,24	3,0	2,3
16. Casagrande et al.	0,20	2,0	-
17. Mcng and Khayat	0,20	0,50	-
18. Ren et al.	0,16	1,0-2,0	2,4
19. Shen et al.	0,16-0,24	1,0-4,0	1,5

Açıklama: (a) optimum su-bağlayıcı oranı: 0,18-0,22; (b) optimum lif içeriği: %1-2; (c) optimum süperakışkanlaştırıcı içeriği: 1,5-2,4.

Yapılan farklı çalışmalarda w/b ve SP dozajının UYPB karışımlarındaki hava içeriğini etkilediği de görülmektedir (Çizelge 2.7) [47].

Çizelge 2.7. W/B ve SP dozajının UYPB karışımlarındaki hava içeriğine etkisi [47].

Referans	Su/Bağlayıcı Oranı	Süperakışkanlaştırıcı	Hava İçeriği (%)
Ingo et al. (2004)	0,25	-	4,3
Maeder et al. (2004)	0,18	45 kg/m ³	3,5
Kamcn et al. (2009)	0,13	46 kg/m ³	1,8
Pierard and Caubeig (2009)	0,17	20 kg/m ³	1,0
Pierard et al. (2012)	0,11	15 kg/m ³	2,5
Maguteanu et al. (2012)	0,13	52 kg/m ³	4,6

Polikarboksilat eterlerin en büyük yararı, hava sürükleyici katkı eklenmemiş olsa bile havanın tutulabilmesidir. Lingo-sülfonat gibi bir maddenin dozu arttırıldığında hava miktarıda artmaktadır. Bu, hidrofilik yan zincirlere sahip olan bir sülfaktan benzeri madde veya hidrofobik özellikte bir katkı uygulandığında meydana gelmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, hava girişini azaltıcı köpük önleyici, ürünlerle birlikte uygulanmalıdır [90].

Diğer kimyasal katkılar:

Diğer kimyasal katkı türleri ise betonun rötre davranışını azaltmak için kullanılan rötre azaltıcı katkı (SRA) ve betonun yüksek erken yaş dayanımını elde etmek için kullanılan hızlandırıcıdır. UYPB'nin yüksek çimento içeriği, betonun önemli ölçüde kuruma büzülmesinin veya otojen büzülmesinin ana nedenidir. UYPB malzemesinin aşırı büzülmesi, yapılarda istenmeyen erken çatlaklara neden olabilir. Bu nedenle, boyutsal kararlılık UYPB'nin önemli bir endişesidir. SRA, kuruma büzülmesini azaltmak için UYPB'de kullanılan kimyasaldır [94], [95]. SRA'nın rötreyi azaltmadaki mekanizması, SRA'nın betonun mikro yapısındaki gözenek çözeltisinin kılcal basıncını azaltabilirken, [50], UYPB karışımlarının erken yaş basınç dayanımını da azalmaktadır. Hızlı onarım inşaat uygulamalarında ise erken yaş dayanımı yüksek UYPB tercih edilmektedir. SRA mevcudiyetinde UYPB'nin erken yaştaki basınç dayanımını iyileştirmek için kullanılan kimyasal hızlandırıcılar, betonun priz ve dayanım gelişimini hızlandırır. Fakat yapılan çalışmalar betonun 28 günlük basınç dayanımını azaltabileceğini göstermektedir [50]. SRA ve kimyasal hızlandırıcı kullanımı, istenen özelliklere sahip UYPB geliştirmede güçlü bir potansiyele sahiptir [3].

2.3.2.6. Lifler

Çok yüksek mukavemeti ve homojenliği nedeniyle gevrek bir yapıya sahip olan UYPB matrisini güçlendirmek, çatlak oluşumuna karşı daha iyi bir direnç ve daha iyi bir çekme mukavemeti, kırılmaya karşı direnç sağlamak için karışıma lifler eklenerek sünek hale getirilebilir [96], [95], [97]. Kırılacak malzemenin birim hacmi başına emilen enerjinin bir ölçüsü olan ve Kırılma modülü olarak da adlandırılan eğilme mukavemeti, UYPB'nin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılan liflerin eklenmesi nedeniyle yüksek süneklik sergiler [2]. Liflerin ana rolü, çekme gerilmelerini absorbe ederek mikro çatlakların iç içe büyümesini önlemek bunun sonucu da makro çatlakları önlemektir [98]. Bu amaçla karışımda karbon, polimer, cam ve çelik lifler kullanılmakta olup, [3], [70], beton'da kullanılan lif türleri Şekil 2.11'de görülmektedir. En yaygın kullanılanı çelik liftir. Çelik lifler şekil, uzunluk, çap, hacim, yön ve mukavemetleri ile karakterize edilir. DIN EN 14889-1'e göre ince ve kısa lifler maksimum 0,20 mm çapa ve 9-17 mm uzunluğa sahip olmalıdır. Bunun nedeni, işlenebilirlik için en iyi seçenek olan 2000 N/mm² gerilme mukavemetine sahip yüksek değerleri olmasıdır [62]. Betonda yaygın kullanılan liflerin teknik özellikleri Çizelge 2.8'de verilmiştir.

Çimento esaslı matrislere lif takviyesi:

- (1) Taze halde malzemenin reolojisini veya akış özelliklerini değiştirdiği,
- (2) Çekme veya eğilme mukavemetini iyileştirdiği,
- (3) Darbe direncini veya tokluğunu iyileştirdiği,
- (4) Çatlamayı kontrol ederek
- (5) Çatlama sonrası sünekliği artırıp kırılma dayanımını değiştirmektedir.

Uygulamaların çoğunda, lif içerikleri hacimce yaklaşık %0,3 ila %2,0 arasında değişmektedir. Öndökümlü öngerilmeli endüstride, çekme mukavemetindeki bir artış, daha uzun açıklıkların elde edilmesi ve ihtiyaç duyulan öngerilme tellerinin miktarının azaltılması üzerinde önemli bir faydalı etkiye sahiptir. Bununla birlikte, lif takviyeli betonlar, daha düşük iri agrega içeriğine (yaklaşık 350 ila 750 kg/m³) ve daha küçük iri agrega boyutuna (10 mm) sahip olmalarıyla geleneksel betonlardan farklıdır [99]. Şekil 2.11'de gösterilen lif türlerinden çelik liflerden, kancalılar düz olanlardan, uzun lifler kısa olanlardan daha verimlidir. Çelik lif donatının bir diğer önemli etkisi, eğilme dayanımı

üzerindedir. Kompozit içindeki maximum oranda homojen dağılım aynı oranda eğilme dayanımını da artırmaktadır [28]. Karışımın lif hacmindeki artış sünekliliği belirli bir sınıra kadar iyileştirirken daha fazlası faydalı olmamaktadır [33].



Şekil 2.11 Beton'da kullanılan lif türleri [100].

Çizelge 2.8. Betonda yaygın kullanılan liflerin teknik özellikleri [17].

No	Lif cinsi	Özgül Ağırlık	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Maks. uzama (%)	Alkali direnci	Lif Çapı (µm)	Maks. sıcaklık (°C)
1	Normal Çelikler	7,8	500-2600	200	5-35	Yüksek	100-500	1000
2	Paslanmaz Çelik	7,8	500-2600	200	30	Yüksek	50-100	1535
3	AR Cam Lif	2,6	2000-4000	75	20-35	Orta	12-20	800
4	Karbon	1,60-1,91	1500-4000	200-480	4-15	Yüksek	8-15	500
5	Polipropilen	0,91-0,98	450-700	7,5-12	60-90	Yüksek	10-500	150
6	PVA	1,3	800-900	26-30	50-75	Yüksek	13-300	240
1	Polyester	1,4	800-1100	10-19	8-20	Orta	10-50	240
8	Aramid	1,42	700-3600	70-130	21-40	Orta	12	480
9	Akrilik	1,16-1,18	270-1000	14-19	75-500	Yüksek	13-104	220-235
10	Poliyeten	0,92-0,96	75-590	5	30-800	Yüksek	25-1000	130
11	HDPE	0,93-0,97	2800	120	50	Yüksek	8-38	-
12	Naylon	1,14	970	5	200	Yüksek	23	200-220
13	Bazalt	2,7-2,8	2800-4800	86-90	30-35	Yüksek	13-20	650
14	Selüloz	1,5	500	60	-	Yüksek	1,5	-
15	Asbestler	3,2-3,5	552-966	83-138	6	Yüksek	0,02-3	-

İyi tasarlanmış bir UYPB kompozitte kullanılan lifler, matrisin kompozit gücünü artırarak gerilme ve çatlaklar üzerindeki yükün aktarılmasına yardımcı olmaktadır.

Çatlakları köprüleyen lifler sıyrılmama ve adezyon kaybı durumunda enerji emme mekanizmaları sağlayarak kompozitin dayanıklılığını arttırmaktadır [62].

UYPB'nin lifleri, türleri ve karışımdaki miktarları, hem gerilim hem de basınç sırasındaki süneklik davranışını büyük ölçüde etkilemektedir [88]. Çelik lif hacmindeki artış ile lif geometrisi, döküm yöntemi, lif harmanlama ve kürlenme rejimi, çekme ve eğilme mukavemetlerinde önemli rol oynar [101]. Bununla birlikte, tek biçimli oryantasyon sorunu, reoloji özelliklerinde azalma ve büyük miktarda lifle ilişkili yüksek maliyet, UYPB uygulamasının ana zorluklarıdır. Uzun ve kısa çelik liflerin hibridizasyonu, mikro ölçekten makro ölçeğe kadar olan çatlakların gelişimini aşamalı olarak sınırlayabilir [102].

Wille ve ark'na göre 6 mm uzunluğunda ve 0,15 mm çapında çelik lifler karışım hacminin %10'una kadar kullanılabilirken, 12 mm uzunluk ve 0,15 mm çapında lifler [51], %3'e kadar karışımın işlenebilirliğini etkilemeden kullanılabilir [103]. Büzülme çatlaklarını kontrol etmek için düşük miktarda lif (hacimce %0,5-1 arası) kullanılması gerekir [70]. Çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılan su-bağlayıcı oranı, lif ve süperakışkanlaştırıcı içeriği Çizelge 2.6'da görülmektedir. Yukarıda bahsedilen çalışmalara göre, UYPB'nin mekanik özellikleri üzerinde çelik lif ilavesinin etkisine ilişkin olarak, esas olarak betonun tipine ve karışım tasarımına bağlı olan farklı sonuçlar bildirilmiştir [104]. Çelik liflerin artan konsantrasyonu, lif demeti oluşturabilir, böylece liflerin verimliliğini özellikle basınç dayanımını azaltabilen zayıf noktalara yol açabilir. Uygun ısıtma işlemi uygulanırsa, lif ilavesine bağlı olarak basınç dayanımında hafif bir artış gözlemlenebilir. Bu esas olarak liflerin tipine ve dozajına bağlıdır [105]. Ayrıca, liflerin eklenmesinin daha az sıkışmış hava ile sonuçlandığı ve bunun da artırılmış yoğunluğa ve dolayısıyla daha yüksek basınç dayanımına yol açtığı bildirilmiştir [106]. Yükleme hızı ne kadar yüksek olursa, UYPB'nin eğilme mukavemetinin de o kadar yüksek olacaktır [107].

Rossi [108] tarafından gerilimde çatlama yönüne yönelik yapılan çalışmada yüklemenin başlangıcından betonun kırılmasına kadar üç farklı aşama tanımlanmıştır. Birinci aşamada, mikro çatlaklar tüm beton hacmi boyunca rastgele oluşmaktadır. İkinci aşamada, mikro çatlaklar mekanik davranışı etkileyen bölgesel makro çatlaklar oluşturmak için bir araya gelmektedir. Üçüncü aşamada, bir veya daha fazla makro çatlak

genişler ve betonun kırılmasına neden olurlar. Benzer durum Namaan ve Homrich [109] tarafından da gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, farklı lifler, köprü kurdukları çatlakla göre göreceli boyutlarına göre çatlak ilerlemesine direnmede diğerlerinden daha verimli olabilir. Bu nedenle, çok sayıda yakın aralıklı life sahip olmak, birinci aşamada karışımda oluşan mikro çatlakları köprülemenin en etkili yolu gibi görünmektedir. Bu, işlenebilirlik sorunları olmadan, çok sayıda lifin yerleştirilmesine izin veren küçük çaplı kısa lifler (<5,08 mm) kullanılarak elde edilebilir. Öte yandan, kullanılan lifler, ikinci ve üçüncü aşamalarda oluşan makro çatlakları köprülemek için yeterince uzun (>20 mm) olmalıdır. Bununla birlikte, uzun liflerin kullanımı her zaman azaltılmış işlenebilirlik ile ilişkilendirilmiştir ve bu nedenle tipik olarak %3'lük bir hacim oranı ile sınırlandırılmıştır. Bu işlenebilirlik sorununun üstesinden karışımda mikro çatlakları köprüleyen kısa lifler ve makro çatlakları köprüleyen uzun lifler olmak üzere iki farklı tipte lif kullanılarak ve/veya artan miktarlarda HRWR'lerin kullanımı ile gelinebilir [99].

2.3.3. UYPB Geliştirme İlkeleri

UYPB'yi sahada başarılı bir şekilde uygulamak için üzerinde durulması gereken başlıca zorluklar şunlardır:

1. UYPB bileşenlerinin ve karışım tasarımının optimizasyonu için rasyonel ve doğru bir yöntem geliştirmek.
2. UYPB'nin çok düşük w/b'si nedeniyle, bileşenlerini uygun şekilde karıştırmak için yüksek enerjili karıştırıcılar gereklidir.
3. UYPB'nin eğilme özellikleri, ağırlıklı olarak liflerin oryantasyonundan etkilenir. Bu nedenle güvenilir bir yöntemin geliştirilmesi gerekmektedir.
4. UYPB karışımlarındaki rötre deformasyonları fazla olması nedeniyle, özellikle tam ölçekli yapılarda boyutsal kararlılıkla ilgili sorunları azaltmak için özel tedbirler gereklidir.
5. UYPB'nin yüksek mukavemet ve dayanıklılık özellikleri büyük ölçüde ısı işleme bağlıdır. Bu nedenle, yerinde inşaat ve prekast tesislerde ısı kütleme için özel düzenlemelerin araştırılması gerekmektedir.
6. UYPB'nin yüksek mukavemetini ve diğer benzersiz özelliklerini etkin bir şekilde kullanmak için tasarım mühendisine güven sağlamak amacıyla UYPB için yaygın olarak

kabul edilen, basit ve rasyonel tasarım hükümlerinin geliştirilmesi gerekir [47], [55].

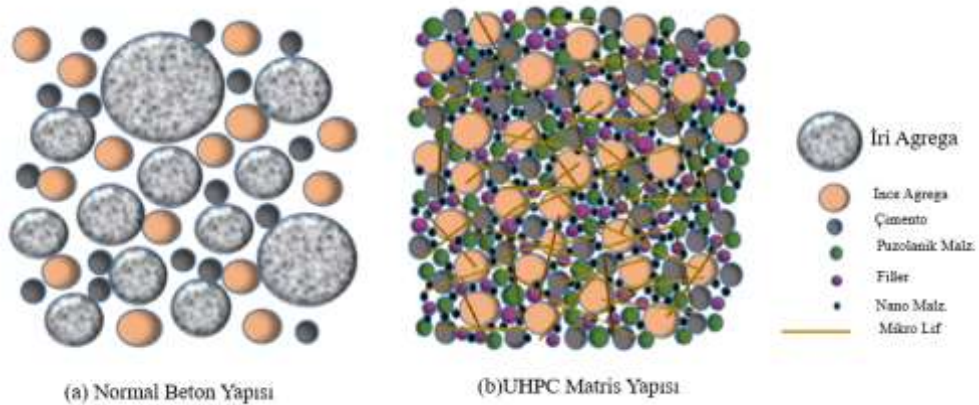
Belirtilen teknik detaylara ulaşabilmek için bileşenlerinin özellikleri, malzeme oranları, karıştırma prosedürü, mikser tipi ve kütleme işlemleri için tekdüzelik ve tutarlık sağlanmalıdır. Bu amaçla:

1. Kaba agregaların elimine edilerek homojenliğin artırılması,
2. Silis dumanı gibi puzolanik özellikli malzemelerden yararlanma,
3. Granül karışımı maximum optimize edilerek sıkıştırılmış yoğunluğun artırılması,
4. Optimum oranda süper akışkanlaştırıcının kullanımı ile w/c'yi azaltmak ve işlenebilirliği artırmak,
5. Basınç uygulaması ile sıkıştırılmış yoğunluğu artırmak,
6. Sünek bir yapı oluşturabilmek için küçük boyutlu çelik liflerin eklenmesi,
7. Mikro yapının iyileştirilmesi için döküm sonrası ısıl işlem,
8. Çok yüksek dayanımlara erişmek için basınç altında ve yüksek sıcaklıkta kür edilmesi gereklidir [5].

2.3.3.1. Parçacık Paketleme Teorisi

UYPB'nin ana bileşen malzemeleri, yüksek kaliteli çimento ve çimento benzeri katkı maddeleri, agregalar, süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte lif ilavesi içeren yüksek kaliteli çimentodur. Bu nedenle, matris temel olarak inert veya kimyasal olarak reaktif yapıya sahip ve aynı zamanda bir miktar dolgu yoğunluğu artırıcı özelliği olan malzemelerden oluşur [72]. UYPB matrisi, geleneksel betondan çok daha yoğun olması için tüm tanecikli bileşenlerin maksimum dolgu yoğunluğunu sağlayacak şekilde tasarlanması gerekir. Bunu sağlamak için, en büyük ebatlı parçacıklar arasındaki boşlukların daha küçük olanlar tarafından doldurulabilmesi gerekir. Bu yüzden farklı boyutlardaki bağlayıcılar ile agregalar artırılmalıdır [110]. Bu durum daha ince ve daha kaba parçacıklar arasında kaygan yatak etkisi sağlayarak parçacık yüzeyini kaplamak için çimento macunu gereksinimini azaltarak taze betonun işlenebilirliğini iyileştirmeye yardımcı olmaktadır. Taze betonun yerleştirilmeden önce belirli bir dereceye kadar akması gerektiğinden, tamamen yoğun bir dolgu uygun değildir [21].

Karışım tasarımının amacı, elde edilen nihai matristeki gözenek boşluklarının ve mikro çatlak kusurlarını en aza indirmektir. Bu, matris malzemeleri optimum oranlarda birleştirildiğinde, yüksek homojenlikte ve parçacıklar arasındaki boşluklar en aza indirildiğinde elde edilir [4], [47]. Bunun için temel unsur gözenekliliğin azaltılması, homojenliğin iyileştirilmesi, mikro yapının iyileştirilmesi ve tokluğunun artırılmasıdır. Böylece karışımın mikro ve makro özellikleri geliştirilebilir [49], [111]. Yüksek basınç dayanımı ve sünekliği, ince ve ultra ince parçacıkların optimize edilmiş bir şekilde paketlenmesinin [112] yanı sıra çelik liflerin de eklenmesiyle sağlanır [48], [113]. Beton karışımlarının tasarımı, yüksek yoğunluğu sağlarken [114], su talebi azaltılmış harcın akışkanlığını da sağlamalıdır [115]. Belirli bir w/c oranının altında ve betonun dolgu yoğunluğu artırılmadıkça dayanım daha fazla artmamaktadır [51]. Bu nedenle, gereken minimum işlenebilirliği sağlamak için karışıma su azaltıcı maddelerin eklenmesi, düşük su-bağlayıcı oranının ve lif ilavesinin olumsuz etkisini ortadan kaldıracaktır [110]. Özetle paketleme yoğunluğunu en üst seviyeye çıkarmak, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirerek UYPB'nin genel performansını da en üst düzeye çıkaracaktır [15], [26], [99]. Normal betonun matris yapısı ile UYPB arasındaki fark Şekil 2.12'de şematik olarak görülmektedir. UYPB yapısı, parçacıklar arasındaki minimum boşluklarla yoğun bir şekilde oluşurken, normal betonun yapısı gevşek bir şekilde yapıdadır. Bu, daha büyük parçacıklar arasındaki boşlukları doldurmak için iri agregaların elimine edilmesini ve ultra ince parçacıkların mikro yapı seviyesinde dağıtılmasını gerektirir [115].



Şekil 2.12. NB ile UYPB yapısı arasındaki farkın şematik görünümü [115].

RPB karışımlarının SCM (silis dumanı, uçucu kül vb. endüstriyel yan ürünler), kum ve ezilmiş kuvars gibi 0,02 ila 300 µm arasında değişen ince parçacık boyutuna sahip olması, dolayısıyla tane boyutunun optimize dağılımı beton yoğunluğunun artmasına [116],

[117], böylece hem taze hem de sertleşmiş beton özelliklerini gelişmesini sağlamaktadır [118]. Aynı zamanda kalıp detaylarını sertleştirilmiş yüzeye yakın şekilde aktarılmasını sağlarken pürüzsüz bir yüzey de elde edilebilmektedir.

UYPB karışımları genel olarak UYPB'nin tasarım felsefesi olarak kabul edilen parçacık paketleme teorisine göre tasarlanmaktadır [119]. Teori, matristeki daha büyük parçacıklar arasındaki boşlukları daha küçük parçacıklarla doldurarak betonun boşluk oranını azaltmaya dayanır. Beton karışımlarının maksimum parçacık paketleme yoğunluğu, optimizasyon, analitik yöntemler ve ayırık eleman modelleri gibi farklı yöntemler (DEM'ler) ile elde edilir [120]. Parçacık paketleme yaklaşımları, oluşabilecek boşluk alanını doldurabilecek mikron altı parçacıklar ile daha yoğun güçlü bir yapı, aynı zamanda puzolanik ise, mukavemette ilave artışlar meydana getirebilir. Ek olarak, suya ve aşındırıcı maddelerin nüfuz edebilirliğini azaltır ve böylece uzun süreli dayanıklılığı artırır [99]. Hunger ve Brouwers'a [118] göre birçok parçacık paketleme modeli mevcut olup UYPB karışımını tasarlamak için genellikle izlenen çeşitli yaklaşımlar,

Çizelge 2.9'da gösterildiği gibi Andreason ve Andersen [121] Larrard ve Sedran [52],[122] ve Funk ve Dinger [110] tarafından sağlanmıştır.

Çizelge 2.9. UYPB karışımını tasarlamak için çeşitli yaklaşımlar [118].

Metot	Referans	Denklemleri (varsa)	Önemli notlar	
1	Andreasen ve Andersen modeli	Andreasen and Andersen	$P(D_i) = \left(\frac{D_i}{D_{mak}}\right)^2$	<ul style="list-style-type: none"> Minimum gözeneklilik için tüm parçacıkların optimum boyut dağılımının gerekliliği Sonlu alt boyut limiti için minimum parçacık boyutu dahil edilmemiştir.
2	Doğrusal yoğunluk paketleme modeli	Larrard and Sedran		<ul style="list-style-type: none"> Parçacık boyutunun çeşitli sınıfları arasındaki etkileşimi açıklar. Yalnızca doğrusal karaktere sahiptir.
3	Katı süspansiyon modeli	Larrard and Sedran		<ul style="list-style-type: none"> Sanal paketleme yoğunluğu kavramı tanımlandı. Maksimum paketleme yoğunluğu için tek tek partikül yerleştirmenin sağlanması.
4	Modifiye Andreasen ve Andersen modeli	Funk and Dinger	$P(D_i) = \frac{D_i^q - D_{min}^q}{D_{mak}^q - D_{min}^q}$	<ul style="list-style-type: none"> Minimum parçacık boyutu dahil edilmiştir. Karışımın inceliği, q'nun değeri ile doğru orantılıdır.
5	Sıkıştırılmış paketleme modeli	Larrard and Sedran		<ul style="list-style-type: none"> Sıkıştırma indeksi tanımlandı. Sanal paketleme yoğunluğu ile gerçek paketleme yoğunluğu arasındaki farkı inceler.

D_i = Tanecik boyutu; $P(D_i)$ = D_i 'den boyutundan daha küçük olan toplam katıların hacim oranıdır D_{maks} ve D_{min} = maksimum ve minimum tanecik boyutu, q =dağılım modülü

Denklemler 2.2'de gösterilen Andreasen ve Andersen (A&A) teorisi, UYPB'yi tasarlamak için yaygın kullanılan modeldir.

$$P(D_i) = \left(\frac{D_i}{D_{max}}\right)^q \quad (2.2)$$

Burada;

D_i parçacık boyutudur (μm);

$P(D_i)$, D_i boyutundan daha küçük olan toplam katıların hacim oranıdır;

D_{max} , maksimum parçacık boyutudur (μm);

q , dağıtım modülüdür.

A&A modeli minimum parçacık boyutunu hesaba katmadığı için UYPB gibi ince malzemelerle karışımlar için daha uygun olduğu düşünülen değiştirilmiş Andreasen ve Andersen modeli geliştirilmiştir [123]. Modifiye edilen modelde, karışımın parçacıklarının hem maksimum hem de minimum boyutlarını dikkate alır. Modifiye A&A parçacık paketleme teorisine dayalı olarak, Denklem 2.3'e dayalı olarak optimum bir eğri üretilebilir.

$$P(D_i) = \frac{D_i^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (2.3)$$

Burada;

D , partikül boyutudur (μm);

$P(D_i)$, D boyutundan daha küçük olan toplam katıların hacim oranıdır;

D_{max} , maksimum parçacık boyutudur (μm);

D_{min} , minimum parçacık boyutudur (μm);

q dağılım modülüdür.

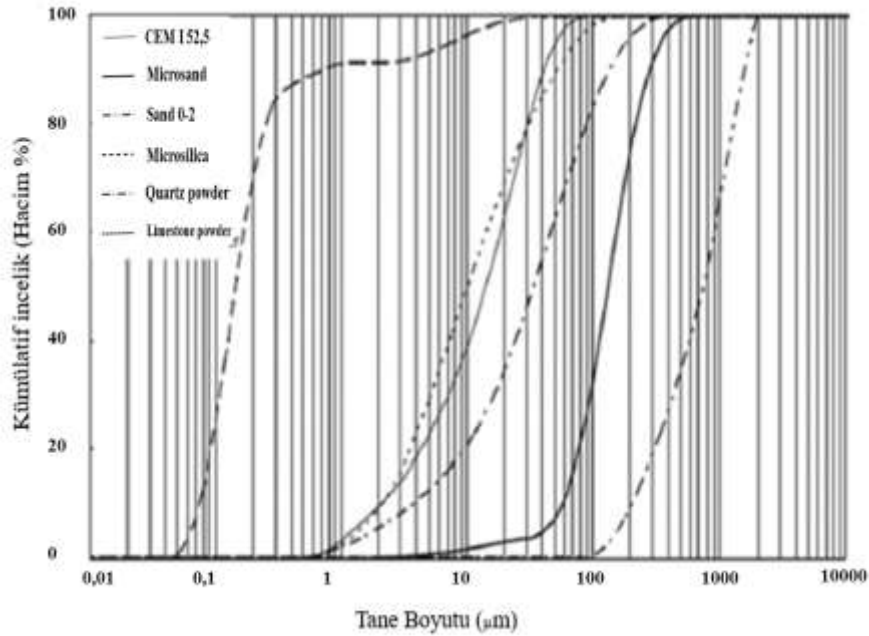
Modifiye Andreasen ve Andersen modelinde, dağılım modülü (q) karışımın inceliğini belirler. “ q ” değerinin düşüklüğü elde edilen karışımın inceliğini artırır [124]. Teorik olarak, ince taneli karışımlar için “ q ” 0 ila 0,28 aralığında olmalıdır [118]. Husken ve Brouwers [125], dağılım modülünün $>0,5$ olması iri bir karışım üreteceğini ve $<0,25$ değeri daha ince bir karışım elde edileceğini belirtmektedir. Karışımındaki her bir malzemenin ayarlanması, Şekil 2.13’de gösterildiği gibi hedef karışım ve oluşan karışım eğrisi optimum bir uyum sağlayana kadar yapılmalıdır. Oluşturulan karışım ve hedef eğri arasındaki sapma, aşağıdaki Denklem 2.4’te verilen Artık Kareler Toplamı-RSS

(Residuel Square of Sum) değeri cinsinden ifade edilir[110]:

$$RSS = \sum_{i=1}^n [P_{mix}(D_i^{i+1}) - P_{tar}(D_i^{i+1})]^2 \quad (2.4)$$

Burada, RSS, artık kareler toplamıdır; P_{mix}, oluşan karışımdır ve P_{tar}, değiştirilmiş Andreason ve Andersen denkleminden elde edilen hedef değerdir. Minimum elde edilen RSS değeri, maksimum ise karışımdaki malzemelerin kompozisyon optimizasyonu olacaktır.

Modifiye edilmiş Andreason ve Andersen modeli, UYPB karışım tasarımı için en iyi yaklaşımlardan biridir. Bir hedef fonksiyon görevi görür ve karışımdaki her bir malzemenin ayarı, hedef karışım ve oluşan karışım eğrisi optimum uyumu sağlayana kadar yürütülür [126].



Şekil 2.13. Parçacık boyut dağılımı [123].

Bazı araştırmacılar [127], [128], [129], partikül paketlemeyi daha da iyileştirmek için farklı yaklaşımlar önermişlerdir. Yaklaşımına göre; Çimento ve SCM'ler, w/b ve HRWR ayarlanarak en iyi akışkanlığa ve basınç dayanımına sahip çimento hamurları belirlendi. Daha sonra, yüksek işlenebilirlik ve mekanik özelliklere sahip karışımlar elde etmek için uygun miktar ve tipte agregalar ve lifler ilave ettiler. Ancak yaklaşımları, tüm UYPB

matrisinin, yani macun ve agreganın birlikte paketleme yoğunluğunu değerlendirmedir. En iyi performans gösteren macunun, en iyi performans gösteren UYPB'yi sağlayacağı varsayılmıştır. Macun, UYPB'nin işlenebilirliğini ve basınç dayanımını önemli ölçüde etkilese de, agrega eklendiğinde parçacık dolgusu bozulabilir. Agregaların ve toz malzemelerin bir arada paketlenmesi, UYPB'nin performansında önemli bir parametredir. Bu nedenle makul bir yöntem olsa da macun ve agrega dahil olmak üzere tüm matrisin dolgu yoğunluğu ihmal edilmemelidir [2].

1994 yılında, DeLarrard ve Sedran [52], kullandıkları paketleme modeli ile çimento malzemelerin paketleme yoğunluğunu maksimize ederek su/çimento (w/c) oranını ağırlıkça 0,14'e kadar düşürmüş ve böylece 165-260 MPa beton dayanımı elde etmişlerdir. Bir yıl sonra 1995 yılında, Richard ve Cheyrezy [5] aynı paketleme modelini kullanarak beton karışımındaki tüm granüler malzemelerin paketlenmesini maksimize etmiş, ayrıca diğer ileri üretim tekniklerini uygulayarak 200-800 MPa beton dayanımları elde etmişlerdir. 1996 yılında Sedran [130], kendi kendine yerleşen beton tasarımına paketleme teorisini başarılı bir şekilde uygulamış, betonun performans optimizasyonunun temel olarak granüler iskeletin dolgu yoğunluğunun artırılmasına bağlı olduğu sonucuna varmıştı. Boşluk oranını en aza indirmek ve orantılı beton bileşenlerini hesaplamaya yönelik granüler karışımın optimizasyonu için analitik paketleme yoğunluğu modelleri piyasada kullanılmaktadır. 4C-Packing, Europack, MixSim98 ve BetonlabPro gibi çeşitli bilgisayar yazılım programları ve modifiye modeller bu amaçla kullanılmaktadır [131], [132].

Parçacık paketleme teorisi modeli genellikle UYPB'yi tasarlamak için kullanılsa da, karışım sıvı eklendiğinde, ince parçacıklar arasındaki etkileşim kuvveti ($<100 \mu\text{m}$) genellikle hesaba katılmaz [129]. Ayrıca, parçacık şekli ve yüzey durumu gibi parçacık dolgularının derecesini etkileyebilecek diğer faktörler, çoğu paketleme modelinde dikkate alınmaz. Bu nedenle, parçacık paketleme teorisi genel bir kılavuz olarak hizmet edebilirken, optimum UYPB tasarımı için gerçek paketlemeyi belirlemek için kullanılan malzemelerle deneysel çalışmalar çok önemlidir [2].

Fennis ve diğerleri [133] tarafından parçacık paketleme teknolojisine dayanan, çimento içeriğini %50 oranında azaltan ekolojik bir UYPB karışımı gerçekleştirmişlerdir. Yu ve

diğ. [123] Modifiye Andreasen ve Andersen partikül paketleme modeli kullanılarak, çimento içeriği 675 kg/m^3 'ten düşük olan yoğun şekilde sıkıştırılmış bir UYPB geliştirilmiştir. Ayrıca, UYPB'nin karışım tasarımı için istatistiksel modeller de önerilmektedir. Örneğin, UYPB'nin karışım bileşenlerini oranlamak için uyarlanabilir nöro bulanık arayüz sistemi (ANFIS) kullanılmıştır [134]. Başka bir çalışmada Ghafari, UYPB'nin karışım tasarımını optimize etmek için bir istatistiksel karışım tasarımı (SMD) modeli kullanmıştır. Minimum çimento içeriği kullanılarak UYPB'nin basınç dayanımını tahmin etmek için tek tek bileşenlerin etkisi ve bunların etkileşimleri incelenmiştir [135].

2.3.3.2. UYPB Karıştırma Prosedürü

Yeni nesil çimentolu malzemeler için en önemli faktörlerden biri karıştırma prosedürüdür. UYPB çok ince malzemelerden oluştuğu için geleneksel karıştırma yöntemi uygun değildir ve karıştırma yöntemi aynı olamaz. Taze UYPB karışımı, esas olarak düşük w/b ve HRWRA kullanımı nedeniyle yapışkan bir yapıya sahiptir [113]. Ayrıca çok ince parçacıklar nedeniyle karıştırma sırasında kolayca kümeler oluşur [136]. Karıştırma işleminin verimini artırmak için genellikle yüksek enerji çıkışlı, yüksek parçalayıcı pan karıştırıcılar tercih edilmektedir [53]. Dolayısıyla mikser, UYPB'nin maliyetinin yüksek olmasının sebeplerinden biridir. Karıştırıcıya aşırı yüklenilmesini önlemek, istenen kıvamı ve performansı elde etmek, için normal betona kıyasla genellikle daha uzun karıştırma süresi gerekir. Yapışkan taze beton karışımı nedeniyle mikser üzerindeki yükü hafifletebilecek karıştırma prosedürleri izlenmelidir. Karışımda kullanılan malzemelerin özellikleri yanı sıra bunları mikserde karışıma ekleme sırası ve süresi de önemlidir. Genel olarak, UYPB karışım süreleri, 15 ila 20 dakikaya kadar çıkabilmektedir [5].

Farklı araştırmacıların karıştırma prosedürü için farklı yaklaşımları vardır, ancak süreç genellikle üç aşamaya ayrılabilir,

- (1) Kuru bileşenlerin karıştırılması,
- (2) Su ve HRWR eklenmesi,
- (3) Lif'in eklenmesidir [2].

Bir kısım araştırmacı, karışıma önce tüm toz ve agreganın 30 saniye ile 10 dakika arasında karıştırılmasıyla başlanılmasını, daha sonra karışıma su ve HRWR eklenmesi önermiştir. Bazı durumlarda su iki kısıma bölünür ve dağılımını artırmak için ayrı ayrı mikserde yüklenir. Sıvı eklendikten sonra toplam karıştırma süresi 5 ila 12 dakika arasında değişir. Daha sonra lifler eklenir [4], [11], [137], [138].

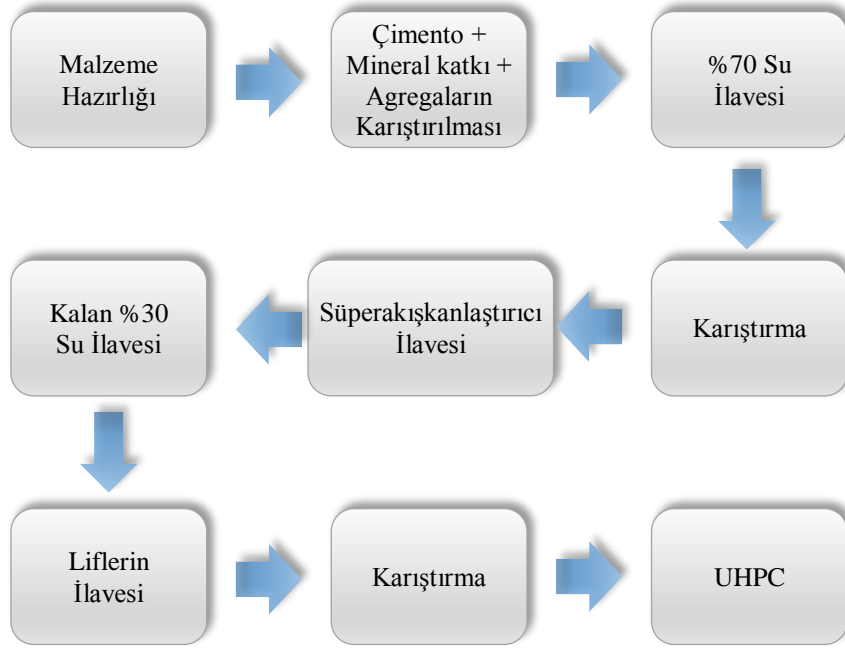
Bir başka çalışmaya göre, silis dumanı partiküllerinin parçalanmasını sağlamak için önce kuru karışım, silis dumanı ve agregayı 5 dakika süreyle karıştırılması önerilmiştir. Ardından imento ve SCM'ler ilave edilerek 5 dakika daha karıştırılır. Mikserde yavaş yavaş su ve HRWR ilave edilerek beton istenilen kıvama gelinceye kadar karıştırılır. Son olarak lifler eklenir ve dağılmalarını sağlamak için 5 dakika karıştırılır [51], [139].

De Larrard ve Sedran [52], homojen bir bulamaç gözlenene kadar önce toz ve sıvının karıştırılmasını ve ardından kumun eklenmesini önermiştir. Ferdosian ve Camoes'e [140] göre bu prosedür, daha düşük viskoziteli bir karışım üretilmesine yardımcı olabilir nk karıştırmanın ilk aşamasında imento ile temas halinde olan su, daha sonra HRWR zincirine emilen Ca^{2+} iyonlarını serbest bırakır. El-Tawil ve ark. [136], bu prosedürün, karışım devir aşaması sırasında karıştırma için yoğun g kullanımına olan talebi azaltabileceğini belirtti. Ancak araştırmacılar, kumun iki kısıma ayrılarak ilk kısmın toz malzemelerle ilave edilmesi ve 5 dakika karıştırılması, ardından sıvının eklenmesi ve beton karıştırıldıktan sonra kum ve son olarak liflerin eklenmesini içeren farklı bir prosedür önermişlerdir. Kumun, malzemeleri karıştırmaya ve dağıtmaya yardımcı olduğu, böylece karışımın devir süresini kısalttığı belirtilmiştir [2].

Tam ve diğ. [141] önerdikleri RPC'nin karıştırma sırasına göre, 1800 dev/dak sabit hızda yaklaşık 1 dakika boyunca kuru karıştırma tozları (imento, kuvars kumu, kırılmış kuvars ve silis dumanı dahil) karıştırılmalıdır. Daha sonra SP'nin yarısını da içeren yarım hacim su ilavesi yapılır. Yaklaşık 285 rpm'lik bir hızla yaklaşık 3 dakika karıştırılır. Kalan su ve SP'nin eklenip 1800 rpm sabit hızda yaklaşık 8 dakika karıştırma şeklinde dir.

Yu ve ark. [123], sadece %75 su ilavesiyle önce imento, mineral katkılar ve agregaların 30-50 sn süreyle yavaş bir şekilde karıştırılmasını belirtmişlerdir (şekil 2.14.). Uygun harmanlama elde edildiğinde, karışıma süper akışkanlaştırıcılar, lifler ve %25'in üzerinde

kalan su eklenmesini, önce düşük hızda 180-200 s daha sonra yüksek hızda 120-150 s karıştırmanın uygun olacağını belirtmektedir [26].



Şekil 2.14. UYPB karıştırma prosesi.

Yapılan farklı bir başka çalışmaya göre, agregalar ve bağlayıcı maddeler önce 3 dakika kadar kuru bir şekilde karıştırılmalıdır. Sonra su ve süperakışkanlaştırıcı süspansiyonun yarısı beton karışımına eklenmelidir. Bu şekilde de 5 dakika karıştırıldıktan sonra geriye kalan süspansiyon karışıma kakatılarak 5 dakika daha karıştırma yapılmalıdır. Bu sayede RPB topaklanmadan kalıba dökülmeye hazır bir duruma getirilebilir [44].

Başka bir UYPB için karıştırma prosedürüne göre ise, agrega ve silis dumanı 5 dakika kuru karıştırılır. Portland çimentosu ve uçucu kül ilave edilerek 5 dakika daha karıştırılır. Karışım suyu ve 1/3 HRWR karışıma eklenir. Kalan HRWR 1 dakika içinde eklenerek istenilen akışkanlık elde edilene yaklaşık 5-10 dakika daha kadar hızlı karıştırılır [142].

UYPB karışımı hazır olduğunda, kalıplar ile beton harç arasındaki arayüzde sürtünmeyi azaltmak için kalıp yağı püskürtülmüş kalıplara dökülür. UYPB karışımı, titreşimli bir tabla kullanılarak ve kare bir sıkıştırma çubuğu kullanılarak elle sıkıştırılır. Dökme kalıplar, betondaki nemin çevreye yayılmasını önlemek için kalıptan çıkarılıncaya kadar plastik levhalarla kaplanır. Numuneler, daha uzun sertleşme süresi gerektiren yüksek SP dozajı nedeniyle dökümden en az 24 saat sonra kalıptan çıkarılır [141].

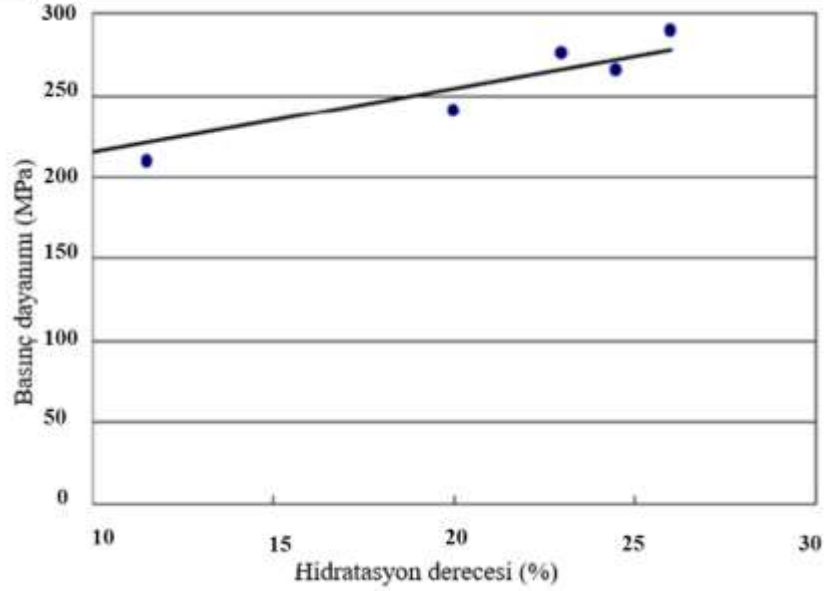
2.3.3.3. Kürleme Ve Isıl İşlem

UYPB, kalıba yerleştirildikten hemen sonra bir dizi kür işleminin uygulanması gerekmektedir. Sertleştirme-kürleme işlemi nem ve sıcaklık dahil olmak üzere iki bileşene sahiptir. Diğer çimentolu kompozit malzemeler gibi, gerekli çimento reaksiyonlarının gerçekleşmesini sağlamak için sıcaklığı uygun bir seviyede tutmak gerekir [86]. Nemli koşullarda standart bir sıcaklıkta (23.0+2.0°C) sertleştirme esastır, beton yüzeylerindeki suyu kalıplamadan gerekli dayanımın sağlanması aşamasına kadar muhafaza etmek de bu bakımdan gereklidir [90].

Yapılan araştırmalarda, reaktif pudra betonunun dayanım gelişiminin esas olarak, karışımın bileşimine, süresine, kürleme yöntemi ile sıcaklığına bağlı olduğu görülmektedir [5], [47]. Betona uygulanan kürleme, daha hızlı beton dayanımı sağlama, azaltılmış sünme efektleri ve gecikmiş büzülme, geliştirilmiş sürdürülebilirlik ve dayanıklılık gibi avantajları sağlamaktadır [72]. Sıcaklık, oluşan hidratların mikro yapısını değiştirirken puzolanik reaksiyonu önemli ölçüde hızlandırır [5]. Yüksek kür sıcaklığı, hidratasyon sırasında malzemelerin kristalleşmesi ve silis içerikli filler malzemelerin puzolanik reaksiyonuna başlamasını [143] ve ilerleterek ilave kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) oluşumuna yol açar. Bu C-S-H fazları küçük gözenekleri doldurarak daha yoğun mikro yapıya ve dolayısıyla daha yüksek mekanik özelliklere yol açar [95], [144], [145].

Zanni vd. yaptıkları çalışmada sıcaklık 90°C'den 250°C'ye yükseltildiğinde, hidrasyon ürünleri oluşumu 8 saatte %10'dan %55'e yükseldiği [146], Richard ve Cheyrezy, 2 gün boyunca 250°C yüksek sıcaklığa maruz bıraktıkları UYPB numunesinin elastik modülü 57'den 70 GPa'ya yükseldiği bildirilmiştir [30].

Kamen vd.'göre ultra yüksek performanslı betonun basınç dayanımının artması ile hidratasyon işleminin ilişkisini gösteren sonuç Şekil 2.15'de görülmektedir. Malzemenin içerdiği su-bağlayıcı oranının düşük seviye de olması nedeniyle, belirli bir hidratasyon derecesine göre yüksek dayanım elde edildiği görülmektedir [147].



Şekil 2.15. Basınç dayanımı ve hidrasyon derecesi ilişkisi [147].

Ayrıca, UYPB'nin sertleşme esnasında, sınırlayıcı bir basıncın uygulanması, artan kompaktlığa ve daha yoğun mikro yapıya katkıda bulunur, böylece daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine yol açar (Çizelge 2.10). Bu, sıkışmış hava boşluklarının ve serbest suyun uzaklaştırılmasına bağlanmaktadır [5].

Çizelge 2.10. Basınç uygulamasının UYPB basınç dayanımı üzerindeki etkisi.

Referans	Sıcaklık kürü (°C)	Basınç Uygulaması (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
Roy ve diğ. (1972)	250	50	510
Richard ve Cheyrezy (1995)	400	50	800
Roux ve diğ. (1996)	20	60	230
Shaheen ve shrive (2006)	300	26	280

UYPB üretiminde üç genel kürlenme yöntemi kullanılmaktadır [26], [111].

1. Standart kürlenme,
2. Isı (Buhar) kürü,
3. Otoklav kürü.

Standart kürlenme, oda sıcaklığında yapılır ve hidrasyon ve puzolanik reaksiyon üzerinde ortalama bir C-S-H zinciri uzunluğu sağlar [148]. Diğerlerine göre en çevreci ve ekonomik olarak en sağlıklı yöntemdir. Isıl kürlenme, hidrasyon sürecini hızlandırır ve standart kürlenmeye kıyasla geliştirilmiş eğilme ve basınç dayanımına yol açar [149].

Ancak mukavemet üretimi açısından otoklav kürü diğerlerine göre en iyi yöntemdir. Yüksek sıcaklık ve basınçta sıkıştırıcı bir kürlenme sağlayabilir, ancak sadece 8 saatlik buharda 200 MPa'lık mukavemet, UYPB'nin eğilme mukavemeti üzerinde olumsuz bir etkiye sebeptir [83].

Yapılan bir çalışmaya göre (Çizelge 2.11), hem ıslak kürlenme hem de 90 günde 20°C'de 160 MPa'lık bir basınç dayanımı sağladığı, hava kuru kürünün ıslak ve buhar kürüne kıyasla daha az etkili olduğunu göstermiştir [26].

Çizelge 2.11. Çeşitli kürlenme yöntemleri için UYPB'nin basınç dayanımı [26].

Beton Yaşı	Basınç Dayanımı (MPa)		
	Hava kürü (20°C)	Su ile kürlenme (20°C)	Buhar kürü (90°C)
7 gün	120	140	185
28 gün	140	160	190
90 gün	160	190	200

2008'de Yunsheng ve ark. [149], matriste maksimum bağlanma kuvvetini elde etmek için otoklav kürünün (200°C) en iyi seçenek olduğunu, su kürünün (20°C) ise en kötü seçenek olduğunu bildirmiştir.

Richard ve Cheyrezy [5] ve Feylessoufi vd. [143], silika dumanının reaksiyonu aktive edildiğinden ve ısı işlem uygulanmasıyla ortalama gözeneklerin boyutu küçüldüğünden, ısı işlem yoluyla çimentolu matriste daha fazla iyileştirmenin sağlanabileceğini belirtmiştir. Cheyrezy ve diğerleri tarafından yürütülen cıva intrüzyonlu porozimetrik analizler [5], 150°C ve 200°C arasında kürlenmiş kapalı UYPB numunelerinde sıfır gözeneklilik gösterdiği bilinmektedir. Ayrıca Collepardi ve ark. [75], buharla kürlenme uygulandıktan sonra UYPB'deki hem büzülmenin hem de şişmenin azaldığını belirtmektedirler. Benzer eğilimler, 90°C 'de ısı kürlenmenin uygulandığı Richard ve Cheyrezy [5] tarafından da gözlemlenmiştir. Ayrıca, Monosi ve ark. [150] çalışmalarında, 160°C'de yüksek basınçlı buhar kürlenmesinin, 90°C'de buharla kürlenmiş UYPB'lere göre daha fazla mukavemet artışına neden olduğu sonucuna varmıştır.

Mostofinejad, Nikoo ve Hosseini [151], basınç dayanımının maksimum değerini elde

etmeye neden olan faktörleri belirlemek için, karışım parametrelerinin ve farklı kür durumunun, UYPB'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Uygulama koşulları, 125°C'de otoklav ile üç günlük uygulama, ardından 220°C'de yedi günlük ısıtma işlemi ve böylece minimum uygulama süresinde üstün mekanik özelliklerde daha etkili bir performans görüldü. Bu çalışmada, 85 MPa'dan 233 MPa'ya yükselen bir dayanım artışı ile yaklaşık %174 oranında gelişim elde edildiği görülmüştür.

Yüksek basınçlı buhar kürü (otoklav) ile 28 günlük standart kür dayanıma 24 saatte erişilebilmektedir [152]. Kür süresinin basınç dayanımını artırdığı ve sonrasında düşüş gösterdiği ayrıca 14 saat otoklav kürü ile maksimum basınç dayanımlarının elde edildiği belirtilmiştir. Bunun yanında, Uygunoğlu ve Ünal çalışmalarında, en uygun otoklav kür süresinin 8 saat olduğunu, otoklavda 8 saatten fazla kalan numunelerde basınç mukavemeti kaybı görüldüğünü belirtmişlerdir [153].

P. N. Hiremath ve Yaragal (2017), erken dönemdeki dayanım gelişimi üzerinde sıcak hava kürleme, ortam havası ile kürleme, sıcak su banyosu ile kürleme ve hızlandırılmış kürlemeyi içeren dört kür rejiminin etkilerini incelediği çalışmalarında; kombine rejim (aynı anda iki kür rejiminin kullanılması) ile kürleme, UYPB'nin basınç dayanımı üzerinde %63 daha etkili bir artış sağlamış ve basınç dayanımını 110 MPa'dan 180 MPa'ya yükseltmiştir. İlk değere standart kürleme ile ikinci değere kombine uygulama rejimleri ile ulaşılmıştır [117].

Buhar (ısı) küründe elde edilen bağ kuvveti, aslında su kürü ile otoklav kürü arasında olup, otoklava göre biraz daha düşüktür. Genel olarak, UYPB'ye ısıtma işlemi, sürünmeyi ve büzülmeyi azalttığı, mukavemet kazanma oranını artırdığı ve işlem sürecinden sonra daha iyi dayanıklılık sağladığı için her zaman tercih edilir [26]. Ancak tüm bu avantajlarına rağmen yüksek maliyeti ve enerji tüketim eğilimi yaygın kullanımını sınırlamaktadır [137]. Bu nedenle, Wille ve arkadaşlarına göre, UYPB'nin ultra yüksek mukavemetini elde etmek için basınç veya ısıtma işlemi sağlamak zorunlu değildir. Uygun karışım tasarımıyla, yani optimum su-çimento ve kum-çimento oranını koruyarak, maksimum tane boyutunu sınırlayarak, uygun oranda ince çimentolu katkı maddeleri ve yüksek oranlı su azaltıcılar (HRWR) ve lif ilavesi kullanılarak kolayca elde edilebilir [51].

2.3.3.4. UYPB Karışım Tasarımları Örnekleri

UYPB’lerde farklı uygulamalar için kullanılan farklı formülasyonlar bulunmaktadır. Bu formülasyonlar, ham madde içerik dozajları, lif türleri ve kütleme rejimlerine göre farklılık gösterir. Richard ve Cheyrezy tarafından önerilen RPB’nin tipik kompozisyonu ve mekanik özellikleri aşağıdaki görülmektedir (Çizelge 2.12) [5].

Çizelge 2.12. Richard ve Cheyrezy tarafından önerilen tipik RPB’nin kompozisyonu ve mekanik özellikleri [5].

UYPB Bileşenleri (kg/m ³)	RPB 200	RPB 800
Portland çimentosu	955	1000
İnce kum (150-600 µm)	1051	500
Öğütülmüş kuvars (d50 = 10 µm)	-	390
Silika dumanı	239	230
Süper akışkanlaştırıcı	15	19
Çelik elyaf	168	630
Toplam su	162	190
Sıkıştırma basıncı (MPa)	-	50
Isıl işlem	20°C-90°C	250°C -400°C
Basınç dayanımı (MPa)	170-230	490-680
Eğilme mukavemeti (MPa)	25-60	45-102

Çizelge 2.13’de, Abbas ve ark. yaptıkları çalışmalarda kullandıkları bileşenlerin ağırlıkça oranları görülmektedir [47].

Çizelge 2.13. Abbas ve ark. kullandığı UYPB bileşenleri ve oranları [47].

UYPB Bileşenleri	Kullanım aralığı (Ağırlıkça %)
Çimento	27-40
Silis Dumanı	6-12
Kuvars/Toz	7-14
Kum	35-45
Süperakışkanlaştırıcı	0,5-3
Su	4-10
Çelik lif	0-8

Veriler Schmidt ve diğ. (2004, 2012), Fehling ve diğ. (2008) ve Talebinejad ve diğ. (2004) çalışmalarından toplanmıştır.

Ahmad ve ark. ile Tayeh ve diğ. tarafından önerilen bir metreküp UYPB için malzemelerin tipik karışım oranları Çizelge 2.14’de sunulmuştur [154], [155].

Çizelge 2.14. Ahmad ve ark. ile Tayeh ve diğ. önerdiği UYPB karışımı oranları^a (Kg)
[154], [155].

UYPB Bileşenleri	Ağırlık (Kg)	Tipik Aralık (Kg) ^b
İnce kum	1005	490-1390
Portland çimentosu	900	610-1080
Silis dumanı	220	50-334
Su	163	126-261
Süperakışkanlaştırıcı	40	9-71
Çelik Lif	157	40-250
Toplam Ağırlık	2485	
a)Ahmad, Hakeem, ve Maslehuddin, b)Tayeh ve diğ.		

RPB'nin donatısız olarak ilk kullanıldığı yapı Kanada'nın Quebec eyaletindeki Sherbrooke köprüsünde uygulanan betonunun karışım hesabı Çizelge 2.15'de verilmiştir.

Çizelge 2.15. Sherbrooke köprüsünde kullanılan 1 m³ RPB'ü için karışım hesabı.

Bileşenler	Çimento	Silis dumanı	Öğütülmüş kuvars	Silis esaslı kum	Çelik fiber	Süper akışkanlaştırıcı	Su
Miktar (kg)	710	230	210	1010	190	19 litre	200

Çoğu UYPB-UHPFRC deneyimi Fransa, Almanya, Danimarka, Japonya ve ABD'de geliştirilmiştir. Ticari olarak temin edilebilen bazı ürünler için karışım tasarımları Çizelge 2.16'da özetlenmektedir [156].

Çizelge 2.16. En yaygın ticari UYPB'lerin dozajları ve özellikleri [156].

Bileşenler	Ductal		BSI		CRC		CEMTEC		BCV	
	Tür	kg/m ³	Tür	kgm ³	Tür	kg/m ³	Tür	kgm ³	Tür	kg/m ³
Çimento	Portl.	746		1114			CEMI 52,5	1050		2115 premix
Silis dumanı	-	242	-	169	Binder	930	-	275		
Kuvars tozu	-	224	-	-			-	-		
Kum (mm)	0,1-0,6	1066	0-6	1072	0-5	1325	<0.5	730	2-3	
Su	W/C	0,19	W/C	0,19	W/B	0,16	W/C	0,181	W/C	0,25
Kimyasal katkı	Chryso	9	SIKA	40	-	-	Chryso	35	-	21,5
Lif	13/0,2	161	20/0,3	234	12/0,4	150-300	10/0,2	470	20 _{2/3} 13 _{1/3}	156
Yayıma çapı (mm)		700		640		-		-		750
f _{ct,28} (MPa)		8		8.8		-		-		8
f _{cm,7} (Mpa)	20°	101	20°	165		-	20°	-	20°	98
f _{cm,28} (Mpa)	20°/90°	124/198	20°	199	20°/90°	150/400	20°	168	20°/90°	130-150

2.3.4. UYPB'lerin Teknik Özellikleri

2.3.4.1. Taze Beton ve Fiziksel Özellikleri

Betonda farklı bağlayıcı tipleri, kimyasal katkı kullanımı, karışım bileşenlerinin sıcaklık değerleri, üretim ortamının sıcaklık ve rüzgar şartları, kullanılan kalıp türlerinin beton hidrasyonu sırasında ısı alışverişi ve geçirgen olup olmama durumları, üretilen elemanın yüzey alanı gibi etmenler işlenebilirlik üzerinde etkilidir. UYPB, çok düşük s/ç oranı ile yeterli akış için ultra yüksek polikarboksilat (PE) bazlı süper akışkanlaştırıcılara ihtiyaç duymaktadır [29]. Karışıma ilave edilen hava sürükleyici maddeler, çimento parçacıkları arasındaki boşluklara hava kabarcıkları sürükleyerek genel işlenebilirliği, geçirimsizliği, ayrışma eğilimini ve kimyasal saldırılara karşı direnci geliştirebilmektedir [26]. Özetle, UYPB kendiliğinden yerleşen beton (KYB) olarak çoğunlukla karmaşık kalıp ve yoğun donatı içeren inşaatlarda kullanıldığı için kendi kendine yerleşen, oldukça akıcı bir beton türüdür [62]. Taze UYPB'lerin özellikleri, işlenebilirliğin tutarlı ölçümlerini gerektirir. Taze UYPB'nin işlenebilirlik özellikleri normalde standart küçük, koni biçimli bir kalıbın doldurulması, kalıbı karışımdan kaldırarak ve yayılımı ölçerek belirlenir. UYPB için yeni ASTM C1856 standardı, malzemenin 2 dakika boyunca kendi kendine yayılmasına izin verilmesi gerektiğini, ardından maksimum ve minimum çaplar arasındaki ortalamasının hesaplanmasını gerektirir. Farklı kurumlar, UYPB akışı için genel kriter olarak 179 ila 250 mm yayılma kullanırken ASTM C1856 200 ila 250 mm gerektirir [2]. Wille ve ark.'a göre, lifsiz yoğun UYPB için ASTM C230'a (1998) göre akış çapı yayılması için 200-350 mm sınırının benimsenmesini önermiştir [51]. Ramroom'un çalışmasında kullandığı ve genel kabul işlenebilirlik sınıflandırması Çizelge 2.17'de belirtilmiştir [62].

Çizelge 2.17. Karışım kıvamları [62].

Yayılma çapı 25 düşüş sonu (mm)	Karışım sınıflandırması
<200	Katı
200-250	Akışkan
>250	Yüksek akışkanlık

Yoğun yapısı ve özel bileşenleriyle ilişkili olan yapışkan tutarlılık nedeniyle UYPB'de ayrılma ve kanama sorunları nadiren meydana gelir. UYPB'nin işlenebilirliği, çelik liflerin eklenmesinden etkilenir [47]. Çelik lif hacmindeki artış, ayrışma direncini iyileştirebilir. Çeliğin özgül ağırlığı çimento harcından çok daha yüksek olması,

ayrışmayı bir sorun haline getirebilir. Reolojik özelliklerin, nihai olarak UYPB'nin mekanik özelliklerini etkileyen liflerin dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmelidir. Bu nedenle, UYPB'nin taze özellikleri, yüksek akışkanlık ve stabilite, yeterli yayılma süresi ve çelik liflerin düzgün dağılımını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır [101].

2.3.4.1.1. *Priz (Sertleşme) Süresi*

UYPB normalde yüksek miktarda HRWR kullanılması nedeniyle geleneksel betona göre çok daha uzun ilk ve son priz süresine sahiptir. UHPC'nin sertleşme süresi genellikle AASHTO T197 ve ASTM C403 gibi penetrasyon testi yöntemiyle değerlendirilir. UYPB için ilk sertleşme süresi 70 dakika ile 15 saat arasındadır ve buna karşın son sertleşme süresi 5 ile 20 saat arasındadır [3].

Habel et al. [157], UYPB'nin priz süresi, "karışımın 1000 kpa sertliğe ulaştığı ve otojen büzülmenin başladığı zaman" olarak tanımlanmaktadır. Bir başka çalışmada Graybeal ilk priz süresini "dökümden 15 saat sonra 3.45 MPa penetrasyon direnci" ve son priz süresini ise 27,60 MPa penetrasyon direnci olarak tanımlamıştır [95]. AASHTO T197'ye (2000) göre dökümden yaklaşık 18-20 saat sonrasıdır [47]. Genel olarak, UYPB'nin rapor edilen sertleşme süresi karışım tasarımına bağlı olarak 6 ile 12 saat arasında değişmektedir [5], [158], [159]. Ancak bazı çalışmalarda yüksek SP dozajının ayarlanmış geciktirici etkisi nedeniyle UYPB için priz süresinin 30-40 saate kadar çıktığı, yüzey kaplamasının da priz süresini geciktirdiği görülmüştür [47], [158].

2.3.4.1.2. *Hava İçeriği*

UYPB karışımlarında bildirilen hava içeriği, karışım tasarımına bağlı olarak karışım hacmine göre %0,3 ile 5,4 arasında değişmektedir [51]. Daha yüksek w/b ve SP dozajı, UYPB karışımlarındaki hava içeriğini artırma eğilimindedir (Çizelge 2.18). Ayrıca, toplam hava içeriği büyük ölçüde kullanılan mikser tipine bağlıdır [160]. Yüksek karıştırma hızına sahip karıştırıcılar, harcın yapışkan kıvamına neden olarak hava içeriğini artırır. Öte yandan, prekast tesislerdeki halka tipi karıştırıcılar, aynı karışım bileşimi ve oranları için nispeten daha düşük hava içeriğine (yaklaşık %3,2) yol açan yüksek kesme kuvvetleri uygular [160]. 50mbar basınçlı bir vakum aksesuarı kullanılarak UYPB'de %1'in altında bir hava içeriğinin elde edilebileceği bildirilmiştir. Ayrıca beton

yerleştirme yöntemi de hava içeriğini önemli ölçüde etkiler. Örneğin, spiral pompa kullanılarak kalıba beton iletilmesi, hava içeriğini %2,9'dan %1,3'e düşürdüğü görülmüştür [160]. Gecikmeli SP ilavesi, UYPB karışımının viskozitesini azalttığı ve sonuç olarak hava içeriğini %2,5'ten %1'e düşürdüğü görülmüştür [161]. Karışım hacmine göre %2 hava içeriği eşik değeri, yayılma akışı ve UYPB karışımlarının gelişmiş özellikleri için yeterli kabul edilebilir [51].

Çizelge 2.18. S/b ile SP'nin hava içeriği üzerindeki etkisi [51].

Referans	Su/Bağlayıcı	Süperakışanlaştırıcı	Hava içeriği (%)
Ingo ve diğ. (2004)	0,5	-	4,3
Maeder ve diğ. (2004)	0,18	45 kg/m ³	3,5
Kamen ve diğ. (2009)	0,13	46 kg/m ³	1,8
Pierard ve Cauberg (2009)	0,17	20 kg/m ³	1,0
Pierard ve diğ. (2012)	0,11	15 kg/m ³	2,5
Magurcanu ve diğ. (2012)	0,13	52 kg/m ³	4,6

2.3.4.1.3. Birim Ağırlık

UYPB'lar, yüksek kaliteli, yüksek yoğunluklu agrega ve düşük su içeriği ile karakterize, kompakt bir mikro yapıya sahip olduğu için YPB'den ve NB'den daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir. Beton üretiminde sertleşmenin erken dönemlerindeki ön ayar basıncı da karışım yoğunluğunu arttırmaktadır [162]. Kompozitin yoğunluğu taze betona priz sırasında etkiyen basınç kuvveti ile betonun karıştırılması sırasında bünyesine aldığı hava kabarcıkları ve hidratasyon için gerekli su miktarından fazla olan su dışarı atıldığından karışımın s/c oranı ve porozitesi azalmaktadır. Sıkıştırma işlemi ile betonun birim ağırlığı da %5 oranında artmaktadır [44].

Richard ve Cheyrezy, yoğunluk artışının basınç dayanımını artışında önemli bir ilişkisi olduğunu, ayrıca basınç ile yoğunluğu artarken, sıkışmış havanın azaltılması, fazla suyun çıkarılması ve kimyasal rötreinin telafi edilmesine de yardımcı olacağı belirtilmektedir [5]. Kürleme sıcaklığının da yoğunluğu azalttığı bilinmektedir. Sadrekarimi [162], 240°C'deki yüksek sıcaklık seviyesi ile kürlemenin, yoğunluğu, 90°C'de kürlemeden daha çok azalttığını belirtmiştir. Yoğunluktaki bu azalmanın, 240°C'lik numunelerin hidratasyonunun daha yüksek olması ve özgün elementlerden (C-S-H) daha hafif olan

ksonotlit oluşumuyla sonuçlanmasından kaynaklandığını açıklamıştır. Karışım içeriğindeki silis dumanı artışının, yoğunluğun azalmasına neden olduğu, çünkü çimento parçacıkları tarafından doldurulması gereken boşluklar, kısmen daha hafif silis dumanı tozunun parçacıklarıyla dolduğu belirtilmiştir [162]. Çizelge 2.19, UYPB, YPB ve NB karışımlarının tipik yoğunlukları arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir [163].

Çizelge 2.19. UYPB, YPB ve NB yoğunluklarının karşılaştırması [163].

Beton türü	Tipik yoğunluk aralığı
Normal	2290-2400 kg/m ³
YDB	2430-2480 kg/m ³
UYPB	2320-2760 kg/m ³
Kosmatka ve diğ. 2002, Ma ve diğ. 2003, Tcichmann ve Schmidt 2004	

UYPB, yoğun mikro ve makro yapıları nedeniyle inşaat demiri ve liflere yüksek bağlanma gücü sergilediği de gözlenmiştir [79].

2.3.4.1.4. Büzülme

UYPB'ler, yüksek miktarda bağlayıcı (çimento ve silis dumanı) ve düşük su/çimento oranları içeren karışım tasarımları kullanılarak elde edilir. Buharlaşıma, karbonatlaşma veya herhangi bir kimyasal değişimden kaynaklanan su kaybı, betonun büzülmesine neden olarak betonda çatlak oluşturur [101]. Genel olarak, betonun büzülmesinin çimento hamuru matrisinde gerçekleştiğine inanılmaktadır [164]. İnce UYPB yapıları, çok düşük w/c nedeniyle erken yaşta büzülme çatlamasına karşı oldukça hassastır [165]. Büzülme çatlaklarının yüksek performanslı çimentolu kompozitlerden beklenen durabiliteyi ve mekanik performansı azalttığı bilinmektedir. Büzülme çatlakları riskinin sadece sahada olmadığı, kontrollü fabrikasyon üretimde ısıl kürün başlatılmasına kadar geçen süreçte de gelişebilmektedir [50]. Temel beton büzülmesi türleri, otojen rötre, kimyasal rötre, kuruma rötresi, termal rötre ve karbonatlaşma rötresidir (Çizelge 2.20) [166]. Bu büzülme oranları 100. güne kadar artabilir ancak sonrasında giderek azalır [167].

Çizelge 2.20. UYPB’de çeşitli büzülme türleri [166].

Büzülme tipi	Görülme zamanı	Önemli notlar
1. Otojen büzülme	24. saat ve sonrasında	<ul style="list-style-type: none"> • Kendi kendine kuruma büzülmesi. • İlk ayardan sonra çimento hidrasyonu nedeniyle. • Sıcaklık değişimi, madde kaybı vb. nedeniyle hacim değişiklikleri dahil edilmez.
2. Kimyasal büzülme	Erken veya geç	<ul style="list-style-type: none"> • Su ve çimento hacmine kıyasla daha düşük hacimli hidrasyon ürünleri üretimi nedeniyle. • Plastik aşamada otojen çekme ve kimyasal çekme aynıdır.
3. Kuruma büzülmesi	Erken veya geç	<ul style="list-style-type: none"> • Dahili suyun buharlaşması nedeniyle. • Gelişimi, otojen büzülmeden nispeten daha uzundur.
4. Termal büzülme	Erken veya geç	<ul style="list-style-type: none"> • Aşırı sıcaklık değişimi nedeniyle.
5. Karbonatlaşma büzülmesi	Sadece son dönemde	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂'e maruz kaldığında betonun karbonatlaşması nedeniyle. • Nem kaybı ve Ca(OH)₂ konsantrasyon azalması ile hızlandırılabilir. • Daha sonraki yaşlarda karbonatlaşma ve otojen oluşumu birlikte gerçekleşebilir.

Su/çimento oranının artmasıyla kuru rötre artarken, otojen rötre azalmaktadır. Ayrıca, beton matrisine yüksek dozda süperakışkanlaştırıcılar, silis dumanı ve çelik liflerin eklenmesi hem otojen hem de kuruma rötresinin artışına neden olabilmektedir [166], [168]. Bu nedenle, UYPB’deki büzülme, iri agregalar ve daha düşük çelik lif içeriği dahil edilerek, silis dumanı yerine FA ve GGBFS kullanılarak, uygun su-bağlayıcı oranını koruyarak ve beton matrisine ısı kürü sağlayarak etkili bir şekilde azaltılabilir [167], [166], [164], [169], [170]. Ayrıca, büzülme azaltıcı katkıları (SRA), UYPB’nin büzülmesini azaltmak için etkin bir şekilde kullanılabilir [164].

Kuruma büzülmesi;

Nem kaybının sebep olduğu kuruma büzülmesini ana etkileyen faktörler buharlaşma hızı, bağıl nem, rüzgâr hızı, hava ve beton sıcaklığıdır [157]. Doymamış havada depolanan sertleşmiş betondan çevreye atılan suyun neden olduğu hacim azalmasıdır [164]. Aynı

zamanda, yüksüz ve sınırlandırılmamış bir numunede sabit sıcaklıkta ölçülen zamana bağlı gerinim olarak da tanımlanır. Büzülme, kurumaya maruz kalan eleman yüzeylerinde en büyük değeri gösterir ve elemanın iç kısmına doğru azalır [171]. Numunenin hem üst hem de alt yüzeyinde kuruma koşulları aynıysa, toplam gerinim numunenin derinliği boyunca üniform olacaktır; ancak kuruma, üst ve alt yüzeylerden farklı bir oranda gerçekleşirse, toplam gerinim dağılımı eğimli hale gelir ve elemanın şekil değişimine neden olur. Kuruma büzülmesi gerilime neden olur ve çatlakların oluşumuyla sonuçlanarak hizmet verebilirlik ve dayanıklılık kayına neden olur. Betonun kuruma büzülmesini etkileyen faktörler, bileşenleri, gözenekliliği, betonun yaşını, kür sıcaklığını, bağıl nemi, nem içeriğini ve kullanılan katkı maddelerini içerir [172], [173].

Otojen büzülme;

Otojen büzülme, çimento hidrasyonu ile çimentolu malzemelerin görünür hacminin (katı, sıvı veya gaz fazları gibi bileşenlerinin hacimlerinin toplamı) azalmasıdır [173]. Karıştırma sırasında hesaplanandan fazla ilave su olmadığında, çevreye nem kaybolmasa bile beton kurumaya başlayacaktır. Hem düşük su/çimento oranı hem de silis dumanının dahil edilmesi, betonun otojen büzülmesini artırır [174]. Betonun dayanımı arttıkça otojen büzülme daha önemli hale gelir ve kuruma büzülmesine benzer [172]. Kuruma büzülmesi ile otojen büzülme arasındaki ana farklar

Çizelge 2.21’de listelenmiştir.

Çizelge 2.21. Kuruma büzülmesi ile Otojen büzülme arasındaki ana farklar.

	Kuruma büzülmesi	Otojen büzülme
Kütle kaybı	✓	X
Mekanizma	Büzülen yüzeyden betonun çekirdeğine kadar.	İzotropik olarak beton içinde
Bağıl nem değişimi	✓	X
Oluşma zamanı	Sertleşmiş beton kuru bir ortama maruz kaldığında yüzeyde yavaş gelişir.	Beton döküldükten birkaç saat sonra başlar

Kimyasal büzülme;

Kimyasal büzülme, hidrasyon ürünlerinin mutlak hacminin (katı ve sıvı fazların hacimlerinin toplamı), hidrasyondan önceki hidrate olmayan çimento ve suyun toplam hacminden daha az olduğu, çimento hamurunun hidrasyonu sırasında hidrasyonun

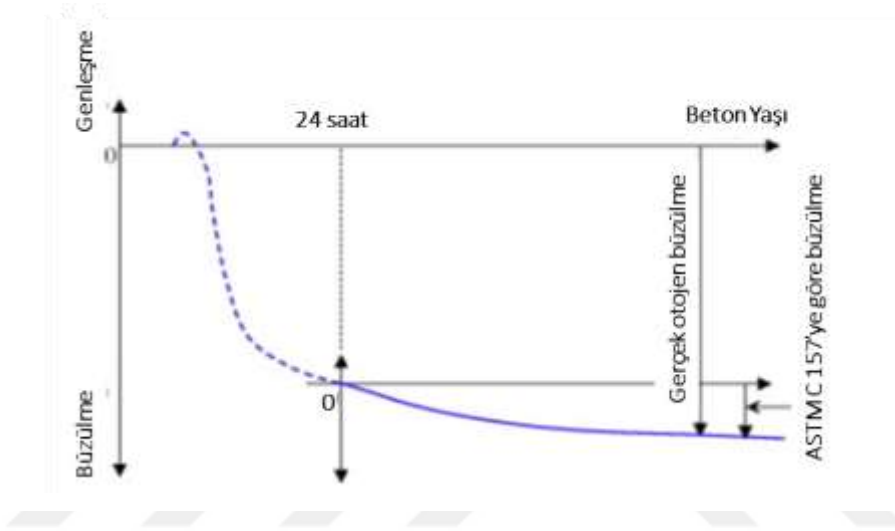
mutlak hacminde bir azalma olduğu bir olgudur [175]. Başka bir deyişle, kimyasal büzülme, otojen büzülmenin itici mekanizmasıdır. Kimyasal büzülme, malzemenin gözenekliliğine ve sertliğine bağlı olan hidrasyondan kaynaklanır. Görünür hacim değişimlerinin, mineral iskelet bu deformasyonları dizginleyecek kadar sert olana kadar mutlak hacim değişimleriyle örtüştüğü doğrulanmıştır [175]. Yapılan bir çalışmada UYPB karışımlarında kullanılan düşük su/çimentolu malzeme oranı nedeniyle otojen çekmenin yaklaşık %93' temsil ettiğini göstermiştir [99]. Çalışma sonucuna göre, UYPB'nin çok küçük kuruma büzülmesi yaşadığını ancak son derece yüksek otojen büzülme yaşadığını dolayısıyla, ultra yüksek performanslı betonların performansını değerlendirirken otojen büzülme dikkate alınmalıdır [99]. Otojen büzülme, bağlayıcının tipi ve özelliklerinden, karışım oranlarından ve gözenek yapısını iyileştiren katkılarından etkilenir [92]. Bu, beton yapıların çatlamasına ve nihayetinde mukavemetin azalmasına, dayanıklılığın azalmasına, öngerilmeli yapı elemanlarında öngerilme kaybına ve yapısal bütünlüğe yol açabilir. UYPB'nin bzlmesini azaltmak için süper emici polimerler ve lifler gibi genleşen malzemeler ile [101] CaO ve MgO değerleri yüksek hafif agrega kullanılabilir [176].

UYPB'nin büzülme gerilimlerini ölçmenin önemi büzülmeleri yöneten temel mekanizmaları ve bunun performans üzerindeki etkisini anlamak açısından önemlidir. Ölçümler UYPB yerleştirildikten hemen sonra başlamalıdır. Beton sertleştikten sonra başlayan kuruma bzlmesini ölçmek için Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılan standart test, ASTM C157' dir [177]. Otojen büzülmeyi ölçmek için ise başka yöntemler kullanılır. Çimentolu matrislerin erken yaş (<24 saat) büzülme ölçümlerinde kullanılan yöntemlerden biri lazer ölçüm sistemidir. Henüz erken dönemde plastik halde bulunan matrise dışarıdan deforme edici bir kuvvet uygulamadan ölçmek için lazer ile mesafe ölçümü mantığına dayanır [165].

Bzlme başlangıç zamanının belirlenmesi

Özellikle, yüksek incelikteki karışımlara sahip çok düşük w/b nedeniyle, UYPB'deki çekmenin önemli bir kısmı çok erken yaşlarda üretilir. Bu nedenle, UYPB için büzülme ölçümünün yeterli bir sıfır noktasının belirlenmesi çok önemlidir [178], [179]. İlk döküm anlarında neredeyse sıfıra yakın rijitliğe sahip olduğu için ölçülen gerinim betonda tutuculuk yaparak çatlamaya neden olmaz [178]. Yoo ve ark. büzülme

gerinimi gelişiminin başlangıç zamanının veya betondaki sıcaklık ile gerinim arasındaki sapma noktasının, UYPB için otojen büzülme ölçümünün sıfır noktası olarak kullanılabileceğini önermektedir [178]. Aıtcin tarafından rapor edildiği gibi, özellikle yüksek otojen büzölmeye sahip yüksek dayanımlı beton için büzölme ölçümü için yeterli bir sıfır noktası belirlemek önemlidir, çünkü Şekil 2.16’de gösterildiği gibi, otojen büzölme sertleşme işlemi sırasında gelişir. Otojen büzölme ölçümünün ASTM C157’de [177] önerildiği gibi 24 saat sonra başlaması durumunda otojen çekmenin önemli bir kısmı ölçülemeyecektir [181].



Şekil 2.16. Büzölme ölçümünün zamana bağlılığı [181].

Holt [182], sertleşme süresine bağlı olarak sıfır noktası belirlemenin hatalı olduğunu bildirmiştir. Holt tarafından yapılan test sonuçlarına göre, w/c oranı düşük betonun otojen deformasyonunun başlama zamanı, ilk prizden çok daha erken olmuştur. Ayrıca, bazı araştırmacılar ve uluslararası standartlar, büzölme ölçümünün sıfırlanma noktası için farklı sertleşme süreleri önermiştir. Darquennes ve ark. [183], ASTM C 1698 [184] ve Kazemi-Kamyab ve ark. [185], son sertleşme zamanını sıfırlama noktası olarak önerirken, JCI [186], sıfırlama noktası olarak ilk sertleşme zamanını önerdi. Literatürdeki çelişkili sonuçlar, priz süresinden büzölme ölçümünün sıfır noktasının belirlenmesinin uygun olmadığını doğrulamaktadır.

Erken Yaş Büzölme Ölçümü

Büzölme gerinimlerini ölçmenin önemi, UYPB'nin otojen büzölmesini yöneten temel mekanizmaları ve bunun performans üzerindeki etkisini belirleyebilmektir. UYPB'nin erken yaş büzölme değerleri çok yüksek olabilir. Cheyrezy ve Behloul [187], UYPB sıvı

fazdayken lineer büzülme geriniminin 2120 $\mu\text{m}/\text{m}$ kadar yüksek olabileceğini belirtmişlerdir. İlk priz ile son priz arasında meydana gelen çekmenin 760 $\mu\text{m}/\text{m}$ kadar yüksek olduğu tahmin edilirken, 90 gündeki çekmenin yaklaşık 1400 $\mu\text{m}/\text{m}$ olduğu tahmin edilmektedir [187]. Loukili ve ark. [188], UYPB'nin otojen bzlmesini 40 günde yaklaşık 875 $\mu\text{m}/\text{m}$ ve 90 günde 890 $\mu\text{m}/\text{m}$ olarak bildirmiştir. Graybeal [95], UPHC'nin toplam bzlmesini 40 günde ısı kürü olmaksızın 790 $\mu\text{m}/\text{m}$ olarak bildirmiştir. SCM'lerin kullanımının, ortam sıcaklığında UYPB'nin otojen bzlmesini önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir [169]. Liflerin ayrıca çekme için yerel bir kısıtlama görevi gördüğü, Habel ve ark. [157] ile Cheyrezy ve Behloul [187]'e göre UYPB'ye %2 elyaf dahil etmenin elyafsız UYPB'ye kıyasla çekmeyi %10 ila 20'ye kadar azaltığı öne sürülmektedir [55].

Yapılan farklı bir çalışmada Van [189], 20°C sıcaklıkta kürleme ile 90°C ısı kürü altında elde edilenlere kıyasla otojen büzülme gerilmelerinde %85'lik bir azalmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Alternatif olarak karışıma nem tutan süper emici polimerlerin dahil edilmesi yoluyla kuruma bzlmesini azaltmanın mümkün olduğunu göstermiştir [190], [191]. V. Y. Garas'a göre toplam otojen çekmenin %87'sinin ısıl işlem sırasında meydana gelmektedir. Bu, daha yüksek sıcaklıklarda erken hidrasyonun hızlandırılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca hacimce %2 elik lif kullanımının karışımdan sonraki 14. günde otojen çekmede %42'lik bir azalma ile sonuçlandığını göstermektedir. Ayrıca ısıl işlem süresi boyunca çimentolu hamurun hidrasyonu ilerledikçe liflerin otojen çekmeyi azaltmadaki etkisi artmaktadır. Bu sonuç, hidrasyon ilerledikçe gelişen fiber-matris arayüzünün özelliklerinin, fiberlerin deformasyonları ne kadar verimli bir şekilde engelleyebileceği üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu vurgulamaktadır [99]. G. Benjamin [95], 76x76 mm prizmalar kullanarak ASTM C157'ye göre ölçülen UYPB büzülmesi, buharla kürleme yöntemine bağlı olarak 620×10^{-6} ila 766×10^{-6} ve işlenmemiş numuneler için 555×10^{-6} nihai büzülme aralığı sağladı. UYPB'nin ilk büzülme oranı da ayrı testlerde ölçülmüş, ilk hidrasyon periyodu sırasında, $64 \times 10^{-6}/\text{sa}$ 'lik en yüksek büzülme değerı ölçlmştir. Muamele edilmemiş numuneler için ilk 24 saatte 400×10^{-6} oranında büzülme meydana geldi. Buharla kürlemenin ardından daha fazla büzülme gözlenmemiştir [95]. Burkhart ve Mller tarafından, dökümden 1 ila 2 gün sonra başlayan büzülme ölçümleri, sızdırmaz silindirler ile 75, 100 ve 150 mm çaplı numuneler arasında hiçbir fark göstermedi [92]. Fehling ve

diğ. çalışmalarında kısılmanın çoğu otojen büzülmeden kaynaklandığı çok azının kuruma büzülmesinden kaynaklandığını belirtmektedir [92]. 200 günlük ölçümlerden sonra tüm değerler yaklaşık 300×10^{-6} idi. Farklı günlerde yapılan farklı çalışmalarda yine 28 günde 600×10^{-6} ila 900×10^{-6} otojen çekme değerleri, 150 günde 200×10^{-6} ila 550×10^{-6} ve 365 günde yaklaşık 640×10^{-6} rapor edilen sonuçlar bulunmaktadır [92]. Ocel, J. and Graybeal, B. yaptıkları çalışmada, 20°C 'de kürlenmiş örneklerde silis dumanı metakaolin ile değiştirilerek erken yaştaki otojen büzülme oranlarında önemli azalma elde etti. 42°C 'de kürlenmiş UYPB için, metakaolin içeren karışımdaki toplam büzülme, silis dumanı veya uçucu kül içeren karışımlara kıyasla ihmal edilebilir seviyeye geldi [192]. Xie ve ark.'nın çalışmalarına göre, bağlayıcı/su oranı, SRA içeriği ve buz dozajının UYPB'nin çekme özellikleri üzerindeki etkileri olarak aşağıdakiler sayılabilir:

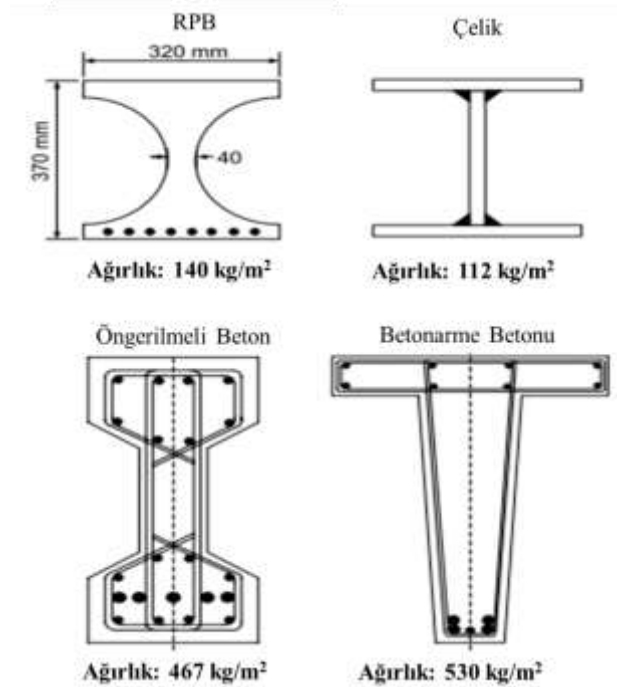
1. UYPB'nin otojen çekmesi, b/s oranının artmasıyla azalır.
2. UYPB karışımındaki b/s oranının artması betonun gözenekliliğinin azalmasına neden olur. Daha düşük b/s oranı kullanılarak hazırlanan UYPB için betondaki gözenek ve çatlaklarda görülen kristal etrenjit ve C-H bolluğu betonun kuruma rötresini en aza indirebilir.
3. Tipik bir UYPB karışımı için optimum b/s oranı, f_c 'yi önemli ölçüde etkilemeden büzülme etkisini en aza indirmek için 1–1,1 olabilir.
4. Betonun hidratasyon derecesi ile ilgili olan gözeneklilik ve reaksiyona girmemiş bağlayıcı miktarı, UYPB'lerin büzülme özellikleri üzerinde etkili olan iki faktördür.
5. SRA, UYPB'lerin yalnızca kuruma çekmesini değil, aynı zamanda otojen çekmesini de (yani SRA dozajının %3'ü ile 90 günde %55'e kadar) azaltabilir.
6. Bir UYPB karışımında karışım suyunun yarısının ezilmiş buzla değiştirilmesi, UYPB'nin kendi kendine çekmesini %22'ye kadar azaltabilir [193].

UYPB karışımı ile boyutsal kararlılığı iyileştirebilmek için uyulması gereken tasarımlar şunlardır. Beton sıcaklığını düşürmek için karışım tasarımında buzlu su kullanılması, ince agreganın yararlı sınırlayıcı etkisini ve ek boyutsal stabilite sağlayan bir dolgu maddesi görevi görebilecek hidratlanmamış bağlayıcıların varlığını belirlemek için değişen karışım tasarımı oranları hesaplanmalıdır. Beton boşluk suyundaki yüzey gerilimini azaltarak rötreyi fiziksel olarak azaltmak için yüksek dozlarda geleneksel rötreyi azaltıcı

katkıların kullanılması önerilmektedir [193].

2.3.4.2. Mekanik Özellikler

Statik ve dinamik yüklere maruz kalan UYPB'nin yapılarda basınç, çekme ve eğilme davranışı dahil olmak üzere mekanik özellikleri performans bakımından çok önemlidir [80]. Taze karışımın reolojik özellikleri, lif oryantasyonunu UYPB'nin mekanik özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenle, uyarlanmış reoloji özellikleri ve tatmin edici lif oryantasyonu ile UYPB'yi sağlamak, yüksek mekanik özellikler için kritik öneme sahiptir [101]. UYPB'nin üstün özellikleri ile normal betonarmenin benzer yapısal gereksinimleri daha az donatı ve daha az betonla sağlanabilmektedir. Farklı dayanımda betonlar kullanıldığında kesit alanı ihtiyacının değiştiği bilinen bir gerçektir. Şekil 2.17'de farklı malzemeler ile üretilmiş eşit moment taşıma kapasitesine sahip kiriş kesitleri görülmektedir [162].



Şekil 2.17. Eşit moment kapasitesine sahip kiriş kesitlerinin karşılaştırılması [162].

Basınç dayanımı, UYPB'nin yapı ve bileşen tasarımı ile ilgili en temel özelliktir ve farklı kurum ve kuruluşlar UYPB için farklı minimum basınç dayanımları belirtmiş olsalar da, tescilli olmayan UYPB'nin 28 gün sonraki basınç dayanımı 77,9MPa ila 206MPa arasında değişir [2]. Öyle ki, basınç dayanımı EN 206:2013 standardına göre 100MPa kabul edilirken, Wu ve ark. [101], Perry ve ark., [194], Zhang ve ark. [195]'e göre minimum 120MPa ve üzeri, Ahmad ve ark. [154] ile Naser ve ark. [196] 150 MPa'dan

başladığını belirtmişlerdir. Richard ve Cheyrezy'ye [5] göre ise RPB'nin basınç dayanımı 200-800MPa, kırılma modülü 25-150MPa, kırılma enerjileri yaklaşık 30.000 J/m² ve birim hacim ağırlıkları 2500-3000 kg/m³'tür. RPB'ler 50GPa'yı aşan, 75GPa'ya kadar çıkabilen Young modülü değerlerine sahiptir.

Yapılan çalışmalarda UYPB'lerde kullanılan çelik lif ilavesi basınç dayanımını bir miktar artırdığı görülmüştür [197]. 1995 yılında Richard ve Cheyrezy, RPB'de hacimce %1,5-3 oranında 13mm uzunluğunda ve 0,1 mm çapında kullandıkları küçük boyutlu çelik lifler basınç dayanımı %20 artmıştır. Ekonomik ve uygulanabilir bir UYPB karışım tasarımı için karışım hacmine göre %2 çelik lif kullanılmasını önermiştir [5]. Maten'e göre %2,5'lik bir lif ilavesi, basınç mukavemetini sadece %15 oranında arttırmaktadır [88]. Su-Tae Kang tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çelik lif içeriği arttıkça basınç dayanımının ve ilgili gerilmenin arttığı, maksimum basınç dayanımı %5 lif içeriğine sahip numunenin 231,4MPa iken, lif içermeyen numunenin 207,2MPa olduğu bu da %12'lik bir etki yaptığı görülmüştür [198]. Yoo ve ark. dört farklı oranda lif takviyeli (%1, 2, 3 ve 4) UYP'lı çimentolu kompozitlerin mekanik özelliklerini inceledi. %3 lif katkılı numune için maksimum basınç dayanımı 207,2 MPa elde edilirken, %1, 2 ve 4 lif içeren numunelerden sırasıyla %5,3, 2,7 ve 12,1 daha yüksek olmuştur. Graybeal'e göre ısı işleme tabi tutulan lifli numunelerde, karışım hacmine göre %2,5 oranında çelik lif ilavesi ile basınç dayanımında yaklaşık %30 artış gözlemlenmiştir [95].

Lifler UYPB'ların eğilme özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir [159]. Yoo vd'nin çalışmalarında en yüksek eğilme mukavemeti %4 çelik lif katkılı numunede 45MPa olurken, %1 elyaf içeriğine sahip numunenin eğilme mukavemetinden yaklaşık %80 daha fazla olduğu görülmüştür [199]. Magureanu ve ark. yaptıkları çalışmalarında lifsiz kontrol kırımları ile karışım hacmine göre %2,5 çelik lif ilaveli UYPB numuneleri ile yaptıkları deneyler ile eğilme mukavemetinde %144'lük bir artış sağlandığı görülmüştür [200]. Lappa ve ark. UYPB'nin eğilme mukavemetinin, betonun kalıba dökülme yöntemine de bağlı olduğunu gözlemlenmişlerdir [201]. Pansuk ve diğ. yaptıkları çalışmada kalıbın bir ucundan beton dökülmesi, kalıba farklı yerlere dökülen aynı betona kıyasla yalnızca %56 oranında artan bir eğilme mukavemeti göstermiştir [202]. Bunu, akış yönüne paralel olarak güçlü lif oryantasyonuna (belirli bölümlerde toplanan yüksek lif miktarına) bağlamışlardır. Steil ve ark. eğilmeye maruz bırakılan UYPB kırımlarının

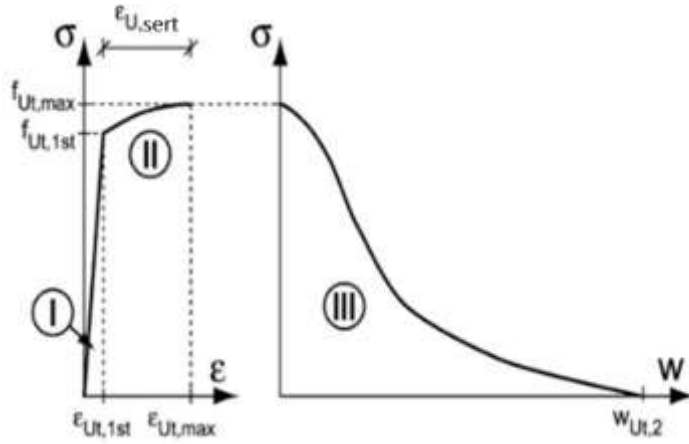
başlangıç rijitliği üzerinde döküm yönünün önemli bir etkisi olmadığını ancak, dikey olarak dökülen kiriş numunelerinin, yatay olarak dökülen kiriş numunelerine kıyasla yaklaşık beş kat daha düşük eğilme dayanımı gösterdiği bildirilmiştir [203]. Yang ve ark. çalışmalarında kalıp ucundan dökülen kirişlerin kalıbın ortasına dökülen kirişlere kıyasla %16 daha yüksek eğilme mukavemeti sergilemiştir. Bu, kalıp ucundan dökülen kirişlerin daha iyi akış özelliklerine atfedildi, bu da fiber oryantasyonunun iyileşmesine ve dolayısıyla eğilme mukavemetinin artmasına yol açtığı belirtilmiştir [204]. Wille ve Parra-Montesinos, sadece orta noktasından dökülen kiriş numunelerin, yüksek akış hızında (0,50m/s) dökülen benzer numunelere kıyasla daha düşük pik mukavemeti sergilerken ince katmanlar oluşturmuş ve kiriş eksenini boyunca istenen lif hizalamasını sağlayarak eğilme mukavemetini artırmıştır [205]. Kang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kalıp boyu yönüne paralel yerleştirilen UYPB'nin ilk çatlama ve nihai eğilme mukavemetleri, enine yerleştirilmiş numunelerden sırasıyla %5,5 ve %61 daha büyük olduğunu bulmuşlardır [101].

UYPB'nin kalıba döküm hızında eğilme mukavemetini etkilemektedir. Öyle ki Wille ve diğ. göre daha düşük akış hızıyla (0,13m/s) dökülen kirişler, daha düşük eğilme mukavemeti sergilemiştir. Bunun nedenini, akışın yavaş hareketinin liflerin dikey yönelmesine yol açarak eğilme mukavemetini düşürmesine bağlandı [205]. Liflerin en-boy oranı da UYPB'nin eğilme kapasitesini etkilemektedir. Daha yüksek en-boy oranlı lifler içeren UYPB karışımları, daha düşük en-boy oranlı fiberlere sahip olanlara kıyasla daha yüksek eğilme kapasitesine sahiptir. Bunun nedeni, küçük çaplı lif (daha yüksek en-boy oranı) içeren karışımların, betonun birim hacmi başına lif sayısının artması, bunun da daha fazla lifin çatlakları köprülemesine ve dolayısıyla eğilme kapasitesinin artmasına neden olduğu görüşüdür [206]. Ayrıca, çelik ve PVA liflerinin hibrit karışımı, UYPB'nin eğilme davranışını, bireysel ilavelerine kıyasla önemli ölçüde geliştirdiği görülmüştür [207]. Alkali dirençli (AR) cam elyafların mikro çatlakların gelişimi için gereken enerjiyi artırarak en yüksek (Pik) yük taşıma kapasitesini artırdığı da gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, çelik liflere kıyasla AR cam lifleri kullanımında süneklikte bir azalma gözlemlenmiştir [208].

UYPB'nin eğilme mukavemeti, üzere numune boyutuna göre de farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin, Bornemann ve ark. göre 700x150x150mm numune boyutu,

160x40x40mm boyutundaki benzer bir numuneye kıyasla eğilme mukavemetinde %33'lük bir azalma göstermiştir [207]. Nguyen ve ark. numune boyutu küçüldükçe ortalama çatlak sayısının ve aralıklarının azaldığı bildirilmiştir [209]. AFGC-SETRA [210], numune yüksekliği 100mm'den 150mm'ye yükseldiğinde eğilme mukavemetinde %9'luk bir azaltma faktörü önermektedir. Habel ve diğ. göre [211], UYPB'nin sergileyebildiği üç farklı gerilme davranışını Şekil 2.18 göstermektedir. Buna göre:

- I) Çatlamadan önce doğrusal-elastik davranış;
- II) Çatlama sonrası gerinim sertleşmesi davranışı ve dağınık ayrık çatlama;
- III) Spesifik çatlaklar boyunca gerinim lokalizasyonu sırasında yumuşama davranışı



Şekil 2.18. UYPB'nin çekme davranışı

UYPB çekme özellikleri, çimento esaslı kompozit matrisin artan çekme çatlama kapasitesi ve fiber takviyenin çatlak köprüleme davranışı nedeniyle geleneksel betonunkinden farklıdır [52]. Lif içeriği, şekil, en boy oranı, yönü ve dağılımı gibi liflerin özelliklerinin lif takviyeli UYPB'nin çekme performansını önemli ölçüde etkilemektedir [212], [213], [214]. UYPB'de çelik liflerin çekme davranışı büyük ölçüde, yükleme yönüne göre lif oryantasyonu ve eğimine bağlıdır [215]. Ayrıca, çengel uçlu veya bükülmüş lifler, geliştirilmiş mekanik ankraj nedeniyle düz liflere kıyasla daha iyi bağlanma mukavemeti sağlamaktadır [216].

Nguyen ve ark. [209] çeşitli boyut ve geometrilere sahip lifli UYPB'nin doğrudan çekme gerilimine karşı gerinim tepkisini araştırdığı çalışmada, hacimce %1 makro bükümlü ve %1 mikro düz çelik lifler kullandılar. Numunelerin farklı boyut ve geometrilerinin UYPB'nin çatlama sonrası mukavemeti üzerinde önemli bir etki yaratmadığını, ancak

UYPB'nin gerinim kapasitesi, enerji emme kapasitesi ve çoklu çatlama davranışı üzerinde belirgin etkiler ürettiğini bulmuşlardır. Hasan ve ark., UYPB'deki çelik lif içeriğinin, lifsiz UYPB'ye kıyasla gerilme mukavemetini neredeyse iki kat artırmada önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna vardı [67]. Kay ve ark., doğrudan çekme yükü altında UYPB'nin dayanım ve sünekliğinin optimizasyonu üzerine yaptıkları araştırmalarında, hacimce %1,5 çelik lif içeren bir lifli UYPB, ortalama 13 MPa'lık bir çekme mukavemeti ve %0,6'lık maksimum çatlama sonrası gerinim ile sonuçlanmıştır [213].

Yüksek basınç dayanımı nedeniyle, UYPB numunelerini düşük yükleme hızında kırmak uzun zaman gerektirir. Örneğin, 0,24MPa/s yükleme hızı uygulandığında, 150x300 mm UYPB silindiri 13 dakika sonra kırıldığı görülmüştür. Bu nedenle, kırım süresini azaltmak için UYPB'nin mukavemet özelliklerini önemli ölçüde etkilemeden 1,0 MPa/s'ye kadar daha yüksek yükleme hızı uygulanabilir [159], [217]. AFGC yönergelerine göre, 0,24 ile 1,7MPa/s arasında değişen bir yükleme hızı, UYPB basınç dayanımını %4 kadar etkilemiştir [210]. Konrad ve ark., UYPB'nin yüksek gerinim hızı yüklemesinde mekanik enerjiyi dağıtma ve emme yeteneğini inceledikleri çalışmada, lif içeriği aralığı %0,125 ila %2 idi. Sonuçlar, lif içeriğindeki artışın, en düşük lif içeriği ile maximum lif içeriğine sahip UYPB için 10 kattan fazla olarak ölçülmüştür [218].

Wu ve ark. [219] ve Eldin ve ark. [220], farklı lif içeriklerinin (farklı hacim (%0, 1, 2 ve 3) ve farklı lif şekline göre) UYPB'nin mekanik özellikleri üzerine yaptığı etkileri inceledikleri çalışmada, %3 oranında düz çelik lif'li betonun 28 günlük kürelemeden sonra, basınç, eğilme ve yarma gerilme mukavemetinde sırasıyla %48, 110 ve 67'lik maksimum artış sağladığı görülmüştür. Sovják ve ark., lif içeriğine bağlı olarak UYPB levhaları üzerindeki mermi etkisinin direncini araştırdıkları çalışmada liflerin hasarı önemli derecede engellediğini gösterdi. Lif içeriği artırıldığında levhanın hasarı önemli ölçüde azalırken en iyi sonucun en yüksek lif içeriği ile elde edildiği görülmüştür [221]. Kang ve ark., kalıp boyu yönüne paralel yerleştirilen UYPB'nin ilk çatlama ve nihai eğilme mukavemetlerinin, enine yerleştirilmiş numunelerinkinden sırasıyla %5,5 ve %61 daha büyük olduğunu bulmuşlardır [222].

Elastisite Modülü

Yüksek dayanımlı beton gerekliliği yüksek bir elastisite modülüne sahip olması ve yapısal elemanların deformasyonu açısından önemlidir. Böylece tasarımcı, beton sınıfını ve ilgili elastisite modülünün arttırarak elemanlara daha az sapma ile ulaşabilir [117]. UYPB'nin sıkıştırıcı gerilim-gerinim eğrisi tipik olarak maksimum gerilim değerinin %80-90'ına kadar doğrusal bir elastik kısım gösterir [47]. Su/çimento oranı, iri agrega tip ve miktarı, betonun nem içeriği, ortam sıcaklığı, ısıtılma işleminin fonksiyonu ve deney sırasındaki yükleme hızı elastisite modülünü etkileyen faktörlerdir [223]. Ayrıca, UYPB'nin elastik modülü, ısıtılma işleminin bir fonksiyonudur [30]. Richard ve Cheyrezy'nin çalışmasında numuneler 2 gün boyunca 250°C gibi yüksek bir sıcaklığa maruz bırakıldığında elastik modül'ü 57GPa'den 70 GPa'a yükseldiği belirtilmektedir [30]. Bonneau ve diğ. göre çelik liflerin karışım hacmine göre %2 eklenmesi lifsiz kontrol UYPB'ye kıyasla elastik modülünde sadece %7'lik bir artış sağlamıştır [224].

Güçlendirme Kaplaması (Paspayı)

Çelik lif içeren UYPB'ler, yüksek çekme özellikleri sayesinde beton dökülmesine karşı daha dayanıklıdır [225]. Böylece daha az takviye kaplaması (paspayı) gerektirir. Ayrıca, UYPB'nin çok düşük gözenekliliği nedeniyle azalan geçirgenlik, sertleştirilmiş matrisle agresif sıvıların (örneğin klorür iyonları) girmesini engeller. UYPB elemanlarındaki daha ince paspayı, ekonomik yapıya doğru giden enine kesit boyutlarını daha da azaltır.

Dinamik ve Darbe Yüğü Altında UYPB

UYPB'nin deprem veya darbe yüğü gibi dinamik etkiler altındaki davranışı hakkında çok sınırlı literatür mevcuttur. Rebstrost ve Wight [226] ürettikleri UYPB betonları yapılan testlerinde darbeli yüklemeye karşı da mükemmel performans gösterdiği, Farnam ve diğ. UYPB panellerini 8,5 kg'lık bir darbe yüğüne karşı test etmiş ve eleman kalınlığının, lif tipinin, lif uzunluğunun ve lif dozajının darbe direncinden sorumlu önemli parametreler olduğu sonucuna varmıştır [227]. UYPB, yüksek mukavemet ve süneklik özelliklerinden dolayı darbe yükleri altında NDB'dan daha fazla enerji dağıtma yeteneğine sahiptir [228]. Sun ve Jiao, çelik fiber takviyeli UYPB numunelerinin darbe eksenel çekme mukavemetinde NDB'ye kıyasla 1,5 kat artış olduğunu bildirmiştir [229]. Astarlioglu ve Krauthammer, tek bir serbestlik dereceli yaklaşım kullanarak UYPB kolonlarının patlama

yüklemesi altındaki davranışını incelemiş, UYPB kolonları, kontrol NDB kolonlarına kıyasla yaklaşık %30 daha küçük yer değiştirme sergilemiştir. Ayrıca, UYPB, NDB'lara kıyasla dört kat daha yüksek darbeli yüklere dayanabildiği bildirilmiştir [230]. Patlama yüklemesi altında UYPB için temel davranışın kayma olduğu gözlenmiştir [231]. Schleyer ve diğerleri geleneksel inşaat demiri takviyeli UYPB panelleri, yaklaşık 2500kPa'lık patlama basıncına dayanabilirken, çelik lifler içeren UYPB panelleri, 500kPa'lık bir patlatma basıncında iki parçaya ayrıldı [232]. Mao e ark., farklı tip ve dozlarda çelik fiber içeren UYPB levhalar üzerinde patlama yüklemesinin etkisini incelemiştir. Lif dozajındaki artışın UYPB levhaların patlama direncini iyileştirdiği, özellikle uzun çelik lifler içeren UYPB karışımlarının, kısa lifler içerenlere kıyasla darbe yükü altında daha iyi performans sergilediği de gözlemlenmiştir [233]. Aoude ve ark. bir darbe tüpü ile simüle edilmiş patlama yüklemesi altında UYPB kolonlarını test etti. Beton tipi, lif tipi ve dozajı, boyuna donatı oranı ve enine donatılar arasındaki boşluğun, patlama yüküne maruz kalan UYPB kolonların göçme modelini etkileyen önemli parametreler olduğu görülmüştür [234].

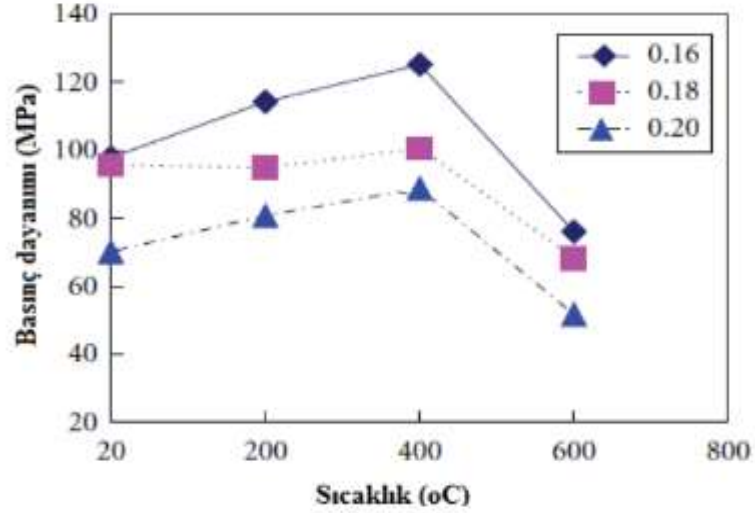
Kırılma Enerjisi

Metalik özellik göstermeyen ancak yüksek kırılma enerjisine sahip materyaller üç ana grupta toplanmaktadır. Seramikler, plastikler ve betonlar (yüksek dayanımlı betonlar). Bununla birlikte plastiklerin sünme davranışlarının olması, seramiklerin maliyetli bir malzeme oluşu sebebiyle yüksek dayanımlı betonlar bu konuda düşük maliyeti ve yüksek dayanımı ile yüksek kırılma enerjisine en iyi aday olarak görülmektedir [235]. Kırılma enerjisi, "gerilme-açıklığın ortasındaki sehim" eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasına dayanmaktadır. Kırılma enerjisi RPB için 1250 μm 'ye kadar sehimde 30000 J/m²'dir. Bu değer normal betonda ise 110J/m²'dir. Böylece, reaktif pudra betonunun kırılma enerjisinin normal betondan yaklaşık 300 katı kadar olduğu sonucuna varılabilir [18].

Yangın/Yüksek Sıcaklık Altında UYPB

UYPB yanmaz malzeme sınıfında yer almaktadır. UYPB'nin yüksek sıcaklıktaki davranışı NDB ile karşılaştırıldığında, UYPB elemanların dayanım kaybına ve beton dökümüne daha duyarlı olduğu görülmüştür. UYPB'nin yoğunluğu aşırı derecede yüksek olduğu için, ateşe maruz kaldığında oluşan yüksek su basıncı [88] nedeniyle patlayarak parçalanmasına sebep olur [236].

Şekil 2.19’de görüldüğü gibi RPB yüksek sıcaklık altında diğer betonlarla paralel özellikler göstermektedir. Betonlardaki basınç dayanımı 400°C’ye kadar artmakta, 400°C’den 600°C’ye kadar ise azalmalar görülmektedir. UYPB’nin, 600°C’deki dayanım kaybının diğer betonlardan daha az olması UYPB’nin yüksek sıcaklığa dayanıklılığının daha fazla olduğunu göstermektedir [237].



Şekil 2.19. Yüksek sıcaklıkta RPB’nin basınç dayanımı [237].

Diğer beton tipleri gibi, UYPB’nin mekanik performansı da ateşe maruz kaldığında değişmektedir. UYPB yapıları, buhar basıncının salınmasını engelleyen ve fiziksel hasara yol açan azaltılmış gözenekliliği nedeniyle yangına ve yüksek sıcaklıklara karşı daha savunmasız olabilir [238]. Polipropilen (PP) liflerinin kullanılması bu sorunu azaltabilir [47]. UYPB’lere hem çelik hem de polipropilen (PP) liflerin eklenmesi beton dökümünü zorlaştırabilmekte ve matrisinin spesifik ısı kapasitesini azaltmaktadır. Bu, çelik liflerin yüksek ısı iletkenliği ve yüksek dayanımıyla ilgilidir. Ek olarak, PP liflerin sıcaklık artarken eridiği ve UYPB matrisinde çok miktarda küçük gözenekler oluşturduğu görülmüştür. Mikro gözeneklerin ısı dağılımını artırdığı ve bu nedenle dökümdeki olumsuz etkiyi azaltmada yararlı olduğu düşünülmektedir [126].

Tai ve ark., 300°C’ye kadar ısıtılan UYPB numunelerinin basınç dayanımında bir artış bildirmiş, bununla birlikte, 300°C’nin üzerinde basınç dayanımında azalma eğilimi gözlemlenmiştir [239]. Yüksek sıcaklıkta UYPB’nin mekanik özelliklerindeki düşüş eğilimi, esas olarak iç mikro yapının zayıflamasından kaynaklanmaktadır [240].

Erosemiah, Sathieswaran ve Viji, RPB'lerin yüksek sıcaklıkta dökülmeden önce ve sonra mikro yapısını SEM analizi ile incelemiş, kontrol karışımında 400°C'de C-S-H jeli oluşumu ve 800°C'de ise betonun yüzeyinde küçük çatlaklar oluşarak betonun bozulduğunu belirtmişlerdir [241]. Yapılan bir başka yangın deneyi çalışmasında yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan UYPB'nin mikro yapı görüntüleri analiz edilmiştir. Şekil 2.20'de lif hacmi sırasıyla %0; 0,25; 0,75 ve 1,25 oranında güçlendirilmiş UYPB kirişlerinin soğuduktan sonraki görünüşleri verilmiştir. UYPB mikro yapısının yüksek sıcaklıkta kontrol numunesinden daha yoğun olduğu görülmektedir. UYPB'de PP varlığı, yüksek sıcaklıklara tutulduğunda PP'nin erime süreci nedeniyle farklı kanalların oluşmasına yol açmıştır [242].



Şekil 2.20. UYPB'nin güçlü betona kıyasla sıcaklık/dayanımın ilişkisi [242].

Ye ve ark., yaptıkları çalışmalarında, UYPB'nin yangın durumunda çatlaklar ve mukavemet azalması yaşadığı, maksimum çatlakların 300°C'de üretildiğini ve tam patlamanın 400°C'de gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir [243].

2.3.4.3. Dayanıklılık.

UYPB, üstün mekanik özelliklerinin yanında olağanüstü dayanıklılığa da sahiptir. Bu dayanıklılık konularının kilit noktası, beton matrisin geçirgenliğine atfedilmektedir. Geçirgenliği kontrol eden ana faktörler, yoğun mikro yapısı ve beton matrisin gözenekliliğidir [106]. UYPB'nin çok düşük gözenekliliği nedeniyle, kılcal gözeneklerinde suyun, çözeltilerin ve klorür gibi zararlı maddelerin taşınması çok sınırlıdır. Solüsyonlar, zararlı maddeler (klorürler) ve su, kılcal gözeneklerden

taşınmaktadır. Kılcal gözeneklerin değerleri düştüğünde; zararlı maddelere karşı direnç artmaktadır [244]. Böylece önemli durabilite özelliklerine sahip UYPB'ler, çeşitli iklim koşullarının etkisindeki özel yapılar için potansiyel uygun bir malzeme niteliği sağlar. Geleneksel beton, yüksek performanslı beton ve UYPB'nin dayanıklılık karşılaştırması Çizelge 2.22'te görülmektedir [55].

Çizelge 2.22. Geleneksel beton, yüksek performanslı beton ve UYPB'nin dayanıklılık parametreleri [55].

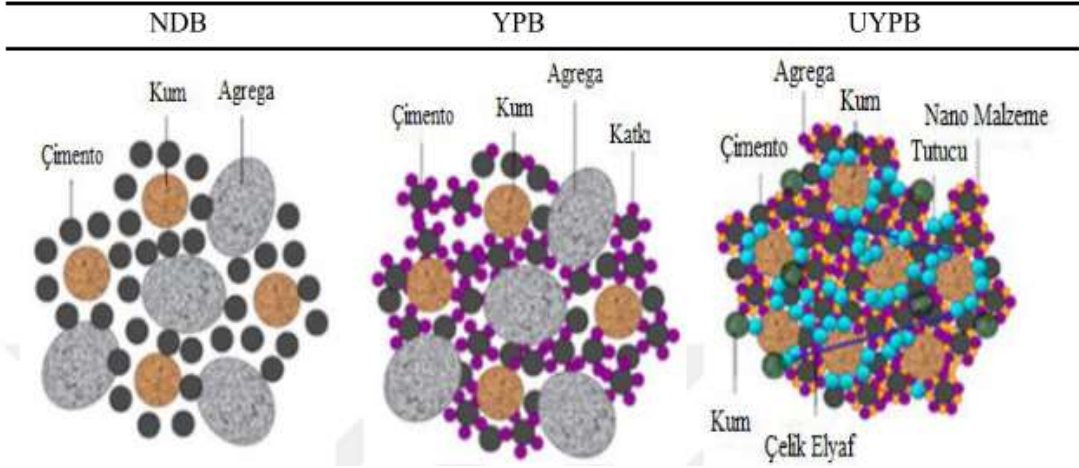
Dayanıklılık türleri	Geleneksel Beton (35 MPa)	Yüksek Performanslı Beton (100 MPa)	UYPB (120 MPa)
Nitrojen Geçirimsizliği (m ²)	10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹⁸
Klor iyon Difüzyonu (mm)	23	8	1
Karbonatlaşma Derinliği (3 yıl sonra) (mm)	7	4	1.5
Donma Çözülme Direnci (g/m ²)	≤1500	150	2050
Su Emme Faktörü	60	11	1

UYPB'nin mekanik, fiziksel, kimyasal ve durabilite özellikleri [14] Çizelge 2.23'te, beton şekilleri, kompozisyonları ve performansları [62] Çizelge 2.24'te görülmektedir.

Çizelge 2.23. UYPB'nin mekanik, fiziksel, kimyasal ve durabilite özellikleri [14].

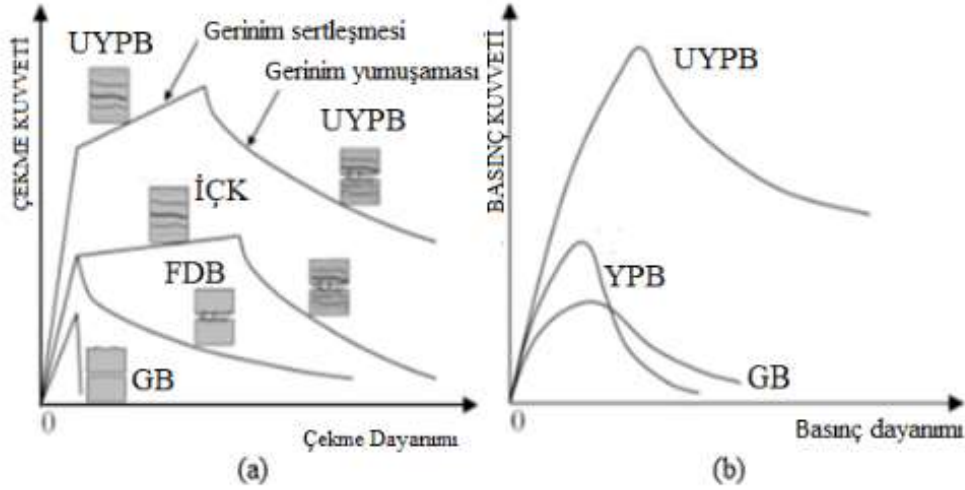
Özellikler	UYPB	YDB	NB
Su / Bağlayıcı Oranı	0,15	<0.25	>0,23
Basınç Dayanımı (MPa)	> 120 MPa	50-100	30-40
Eğilme Dayanımı (MPa)	30-60	6-10	~ 6 MPa
Düktilite	250 kat > YDB	-	-
Enerji yutma kapasitesi	Metaller ile karşılaştırılabilir	-	-
Permeabilite	50 kez < YDB		
Aşınma dayanımı	2-3 kez > YDB		Zayıf
Donma-Çözülme (Tekrarı)	Zarar görmedi	150	50
Young modülü (GPa)	50-60	35-40	20-30
Su emme (kg/m ²)	0-0,05	0,25	2-4

Çizelge 2.24. Beton formları, kompozisyonları ve performansları [62].



Özellikleri	Birim	Standartlar	NDB	YPB	UYPB
Yoğunluğu (d)	kg/m ³	BS1881: Part 114-1983	2300	2400	2440-2550
Basınç dayanımı (f _c)	MPa	BS6319: Part 2-1983	20-50	50-100	120-220
Silindirik kırılma dayanımı (f _i)	MPa	ASTM C496	2-4	4-6	8,6-12,4
Sönme katsayısı [28gün] (Ø _{cc})		ASTM C512	2-5	1-2	0,29-0,66
Kürleme sonrası büzülme	µε	AS1012.16 (1996)	1000-2000	500-1000	0
Elastisite (E _o)	GPa	BS1881:Part 121-1983	20-35	35-40	50-53
Poisson Oranı (ν)		BS1881:Part 121-1983	0,2	0,2	0,2
Yarımada Çekme Dayanımı, (f _t)	MPa	BS:EN 12390-6-2000	2-4	4-6	8,6-12,4
İlk Çatlama Dayanımı (f _{cr})	MPa	ASTM C1018 (1997)	2,5-4	4-8	9-9,7
Klorür geçirgenliği	Coulmb	ASTM C 1202(2005)	2000-4000	500-1000	<55
Klorür Difüzyon Katsayısı (D _c)	mm ² /s	ASTM C 1556(2004)	4-8x10 ⁻⁶	1-4x10 ⁻⁶	0,02x10 ⁻⁶
Karbonasyon Derinliği	mm	BS:IN 14630(2006)	5-15	1-2	<0,5
Aşınma Direnci	mm	ASTM 0944(1999)	0,8-1	0,5-0,8	<0,03
Su emme oranı	%	BS1881-Part 122 (1983)	>3	1,5-3,0	N/A

UYPB'lerin çekme ve basınç gerilmesi, GB'a oranla işlenmiş çimentolu kompozitler (İÇK), fiber donatılı beton (FDB) ve YPB'a göre çok yüksek değerlere sahip bir beton türüdür (Şekil 2.21) [55].



Şekil 2.21. UYPB ile farklı beton türlerinin gerilme durumunun karşılaştırılması [55].

2.3.5. UYPB Kullanımının Avantaj Ve Dezavantajları

UYPB teknolojisi ile alışılmış tasarımların ötesinde yapılar inşa etmek mümkündür. O'Neil ve Dowd'e göre UYPB yapısal olarak çelik ile rekabet edebilme potansiyeline sahiptir. Üstün mukavemeti, daha yüksek kesme kapasitesi ile birleştiğinde, ölü yükte önemli azalma ve yapısal elemanların daha az sınırlı şekliyle sonuçlanır. Sünek çekme kırılma mekanizması ile doğrudan birincil çekme gerilmeleri dışında tüm gerilmelere karşı koymak için kullanılabilir. Bu, ek kesme ve takviye çelik ihtiyacını ortadan kaldırır. Daha hafif elemanlarla atalet yüklerini azaltarak, enine kesitleri azaltarak daha büyük elastik sapmalara izin vererek, daha yüksek enerji emilimi ve artırılmış enerji absorbe etme yeteneği gelişmiş sismik performans sağlar. Düşük ve birbirine bağlı olmayan gözenekliliği sıvı/gaz veya radyoaktif elementlerin penetrasyonunu neredeyse sıfıra indirir. [245]. Böylece NB'lere göre üstün durabiliteye sahip olmakta ve bunun sonucunda yapıların ekonomik ve uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır [55], [246], [247].

UYPB'lerin basınç dayanımları, yüksek elastisite modülleri küçük kesitli (narin) eleman kullanımına olanak vererek [248] daha yenilikçi tasarımların çatı ve cephe panellerine uygulanabilmesi ile mimariye estetik kazandırır [249]. UYPB'lerin cephe panellerinde kullanımı malzemenin hafif ve dayanıklı olması sebebiyle yapı yükünü azaltır, servis ömrünü uzatır, bakım onarım maliyetlerini düşürür, kurulum söküm kolaylığı sağlar [31]. Mineral bazlı pigmentler sayesinde renkli ve desenli olarak kullanılabilir. Estetik görünümü düzensiz şekillerinin ve olağanüstü bitişli yüzeylerin elde edilmesini sağlar

[42]. Geleneksel betondan %10 daha yoğundur ve düktil ve kolay işlenebilir malzeme olması sebebiyle istenilen form uygulanabilir [250]. Ultra yüksek performansı sayesinde çeliğe yakın bir performans sergilemesi geniş açıklık geçilmesini sağlar böylece daha ince panellerle daha geniş açıklık geçilebilir. Süper plastikleştiricilerin kullanılması nedeniyle betonun yeterli dayanıma ulaşma süresi kısalmakta bu nedenle inşaat süresi de azalmaktadır. Korozyon, aşınma ve kimyasallara karşı dayanıklıdır. Bu nedenle çeliğin kullanımının uygun olmadığı yerlerde kullanım olanağı sağlar. Yanmaz malzeme sınıfına girdiği için acil tahliye alanlarında kullanımı uygundur. Çelik liflerin kullanımından dolayı yüksek enerji yutma potansiyeline sahip olan bu betonlar patlamaya maruz kalan veya darbe etkisinde olan yerlerde kullanılmaktadır [251], [252], [224]. Bu betonların reaktörler, açık deniz yapıları, savunma amaçlı depolama binaları gibi uzun servis ömrü istenen yapılarda kullanılması artan bir ilginin oluşmasına neden olmaktadır. Çizelge 2.25’de verilen UYPB’nin özellikleri, kimyasal olarak agresif ortamlarda ve fiziksel aşınmanın diğer betonların ömrünü büyük ölçüde sınırladığı ortamlarda kullanılmasını sağlar [253].

Çizelge 2.25. RPB ile YPB özelliklerinin karşılaştırılması

Malzeme karakteristikleri	UYPB ile YDB karşılaştırılması
Basınç dayanımı	2-3 kat büyük
Eğilme dayanımı	2-6 kat büyük
Elastisite modülü	1.5 kat büyük
Toplam porozite	4-6 kat küçük
Mikro porozite	10-50 kat küçük
Permeabilite	50 kat küçük
Su emme	7 kat küçük
Klor iyon difüzyonu	25 kat küçük
Aşınma direnci	2.5 kat küçük
Korozyon hızı	8 kat küçük

Çelik liflerle iyi aderansı sayesinde yüksek süneklik ve enerji yutma kapasitesine sahiptir. Bu durum, yapıları aşırı yüklerde ve depremlerde daha güvenilir hale getirir [254], patlamaya maruz kalan veya darbe etkisinde olan yerlerde kullanılmasına olanak sağlar [44]. Çok düşük su/çimento oranı ($\approx 0,20$), ve çok düşük boşluk miktarı ile yapı elemanına su ve zararlı iyonlar içeren kimyasalların girişini kısıtlayarak yüksek dayanıklılık sağlar. Donma-çözülme, ıslanma-kuruma gibi olumsuz yıpratıcı etkilere karşı kalıcılığı

yüksektir. Su ve gaz sızmalarına imkân vermemesinden ötürü bu betonlara yalıtım gerekmez [44]. Ayrıca UYPB'ler nükleer atıkların depolandığı alanlarda da kullanıma uygundur. Gelişmiş korozyon direnci kötü veya sert iklim koşullarına sahip alanlara koruma sağlar [2]. UYPB'nin yüksek durabilitesi, uzun bir servis ömrü sağlar ve bu da bakım maliyetlerini azaltır. Reaktif pudra betonu neredeyse geçirimsiz bir malzemedir ve aşınmaya karşı direnci, köprü zeminleri ve endüstriyel tabanlar için uzun servis ömrü sağlamaktadır [255]. UYPB, önemli miktarda hidrate olmamış Portland çimentosu nedeniyle, çatlama etkileri altında kendi kendini iyileştirme potansiyeli sunmaktadır [256], [141].

UYPB, ince kabukların ve plakların üretimine uygundur. Mükemmel kalitede yüzey düzgünlüğü sağlamaktadır [256]. Bileşenlerdeki takviye çelik miktarının ortadan kaldırılması, elemanların şekillerini seçme özgürlüğü ve ayrıca beton elemanlarının kalınlığında azalma sağlamaktadır, bunların hepsi işçilik maliyetlerinde malzeme ve masraf tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca daha fazla mimari özgürlük sağlayarak mimarlar ve tasarımcılar için neredeyse sınırsız yapı şekli ve formuna izin verir [2].

Ultra yüksek dayanımı, malzeme kullanımını optimize ederek toplam çimento ve agrega miktarlarında önemli bir azalmaya neden olmaktadır [256], [141]. UYPB'de gerekli olan çimento içeriği daha yüksek olmasına rağmen, malzeme maliyeti de daha büyük kesitli bir NDB'lere kıyasla azaltılabilir. Ayrıca UYPB'de iri agrega kullanılmazken ince agrega miktarı %30'a kadar düşürülebilir [69], [31]. NDB yerine UYPB kullanılarak malzeme maliyetlerinde yaklaşık %56 azalmanın sağlanabileceği sonucuna varmıştır [47]. Bu aynı zamanda yıkım atığının azalmasına, nakliye talebinin azalmasına ve sonuç olarak çevre üzerinde daha az etkiye yol açabilir. Ayrıca, çimento yerine uçucu kül/silis dumanı gibi yan ürünlerin kullanılması UYPB'yi daha sürdürülebilir kılmaktadır [257]. Ayrıca, UYPB'ler çivilenebilir, vidalanabilir ve kesilebilir de olduğundan bu malzeme yapısal kullanımlara ek olarak ahşap için alternatif bir malzeme olarak da kullanılabilir [258].

UYPB'nin olumlu çevresel etkileri, ozon tabakası üzerinde daha düşük etki, potansiyel olarak çevreye daha az zarar verir ve daha az sera gazı emisyonu sağlar. Yapılan bir çalışmada, UYPB kullanımının NB'ye kıyasla %50 enerji azalması ile sonuçlandırıldığı

sonucuna varmıştır [47]. Çimentoyu silika dumanı gibi atık malzemelerle değiştirmek, çimento üretiminden atmosfere CO₂ emisyonlarını azaltacaktır [15].

Günümüz koşullarında UYPB kullanımı, daha yüksek başlangıç maliyeti, müteahhit deneyimi eksikliği ve yaygın olarak kabul edilen tasarım standartları olmaması nedeniyle çok sınırlıdır [47]. Pahalı ekipman, karmaşık karıştırma prosedürleri ve uzun karıştırma süresi [3], bileşenlerin doğal olarak mevcut olmadığı yerlerde UYPB'nin maliyetini yükseltmektedir [28]. UYPB'nin endüstride daha fazla kullanılması için davranışı hakkında özel bilgilere ihtiyaç vardır [141]. Ayrıca UYPB için standart testlerin yeterince olmaması, üretim aşamasındaki herhangi bir değişikliğe karşı oldukça hassas olması ve üretim aşamasında herhangi bir sorunla karşılaşmamak için yetenekli işçilik gerektirmektedir [6]. Karışımdaki yüksek bağlayıcı içeriği yüksek hidrasyon ısısını da etkileyerek büzülme sorunlarına neden olur [259]. Azaltılmış gözeneklilik nedeniyle, UYPB yapıları yangına ve buhar basıncının salınmasındaki tıkanıklık nedeniyle yüksek sıcaklıklara karşı daha savunmasızdır ve fiziksel hasar meydana gelebilmektedir [47]. Bu beton türünün kullanımı yeni olduğundan uzun süreli özellikleri ve davranışları bilinmemektedir. Resmi bir yönetmelik veya karışım oranlarına ilişkin bir standardı bulunmamaktadır. Yapı kodu gereksinimlerinin izin verdiği minimum yapı elemanları boyutları, geleneksel betona göre belirlendiği için mevcut minimum boyutlarda UYPB'nin kullanılması maliyeti önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle, yeni spesifikasyonların ve yeni uygulamaların geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [42], [260].

2.3.6. UYPB Standartları

2000 yılının başından bu yana, bazı uluslararası standart kuruluşları, yasa organları ve profesyonel kullanıcı grupları, UYPB'nin malzemeleri, yapım yöntemleri ve yapısal tasarıma yönelik geliştirdikleri çeşitli yönerge, kılavuzlar, standartlar ve kodlar aşağıda verilmektedir.

2.3.6.1. Amerikan Test Ve Malzeme Derneği (ASTM, ABD).

American Society of Testing and Materials (ASTM), UYPB'ye özel ilk belgesini Temmuz 2017'de yayınlamıştır. ASTM C1856/1856M-17 "Ultra Yüksek Performanslı

Beton Numunelerinin Üretilmesi ve Test Edilmesi İçin Standart Uygulama", kodlu bu yayın örnek bir UYPB numunesi kullanılarak laboratuvarında ve sahada numunelerin üretilmesi ve test edilmesi için malzemenin özelliklerini belirten prosedürleri açıklamaktadır. Standart, uygulama, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, statik elastisite modülü, Poisson oranı, sıkıştırmada sürünme, uzunluk değişimi, aşınmaya karşı direnç, donma ve çözölmeye karşı direnç ve klorür iyonlarının penetrasyonu elde etmek için prosedürler sunmaktadır.

2.3.6.2. Fransız Standartları (AFGC, Fransa)

Fransız İnşaat Mühendisleri Derneği (Association Française de Génie Civil [AFGC]) 1990'ların sonlarında, UYPB hakkında bir rehber hazırlık çalışmasına başlamıştı. 2003 yılında yayınlanan ilk yönergeler, 2013 yılında revize edilerek yeniden yayınlanmıştır. Daha sonra 2016 ve 2017 yıllarında, Fransız Standartlar Enstitüsü (Association Française de Normalization [AFNOR]) UYPB ile ilgili aşağıdaki 2 Fransız standardı yayınladı:

- NF P 18-710: Eurocode 2'ye ulusal ekleme - Beton yapıların tasarımı: Ultra Yüksek Performanslı Fiber Takviyeli Beton (UHPFRC) için özel kurallar-16 Nisan 2016.
- NF P 18-470: Ultra Yüksek Performanslı Fiber Takviyeli Beton (UHPFRC): özellikler, performans, üretim ve uygunluk-2017.

Fransız standardı NF P 18-470, UYPB'nin taze ve sertleştirilmiş özelliklerini belirlemek için hammadde seçimi, test yöntemleri ve KG/KK gereklilikleri için kuralları göstermektedir. Ayrıca, sertleştirilmiş dayanıklılık ve mukavemet (sıkıştırma ve doğrudan çekme) özelliklerine dayalı olarak farklı UYPB kategorileri için sınıflandırmalar sunar. Standart, 130MPa ila 250MPa arasında değişen basınç için 5 kategori ve doğrudan çekme için gerinim sertleşmesinden gerinim yumuşamasına kadar uzanan 3 kategori belirtir. Ek olarak, yerinde sertleştirilmiş özellikleri doğrulamak için üretimi (yığıma, taşıma, döküm, konsolidasyon ve kürlenme) ve yöntemleri kapsamaktadır.

Fransız standardı NF P 18-710, farklı lifler (UHPFRC) içeren takviyesiz, güçlendirilmiş ve öngerilmeli UYPB'deki binaların ve inşaat mühendisliği yapılarının yapısal tasarımı için kuralları belirtmektedir. Sıkıştırma, çekme ve kesme analizi ve tasarımı kuralları ve modellerini belirtir. Standart, güvenilirlik yönetimi, limit durum tasarımı ve dayanıklılık

tasarımı yanısıra, ayrıntılı bir ters analiz ile eğilme prizması veya plaka testine dayalı doğrudan çekme özelliklerini belirlemeye yönelik metodolojiler de sunmaktadır.

Fransız standardının güçlü yönlerinden biri, UYPB'nin işlenmesi ve yerleştirilmesi ve bunun sertleştirilmiş malzeme özelliklerinin güvenilirliği üzerindeki etkisi nedeniyle elyaf yönünün anlaşılması alanında tamamlanan kapsamlı çalışmadır. Bu standart, döküm yöntemlerine, eleman şekline ve boyutuna dayalı olarak çekme dayanımı azaltma faktörleri için kurallar belirler.

2.3.6.3. İsviçre Standartları (SIA, İsviçre)

Aralık 2014'te İsviçre Mühendisler ve Mimarlar Derneği (SIA) PrSIA 2052'yi yayınlamıştır: "UYPB: Malzeme, Tasarım ve İnşaat (Béton fibré ultra-performant [BFUP]: Matériaux, Dimensionnement et exécution)". Belge, UYPB ile donatısız, güçlendirilmiş ve öngerilmeli yapıların tasarımı kurallarını içermektedir. Ayrıca, UYPB ince bağlı kaplamalara sahip geleneksel betonarme kompozit yapılar için tasarım metodolojisi içermektedir.

PrSIA 2015, 120MPa veya daha yüksek basınç dayanımına sahip ve doğrudan gerilimde minimum 7,0MPa sağlayan farklı lifler içeren UYPB için kullanılabilir. Gerinim yumuşamasından gerinim sertleşmesine kadar üç çekme mukavemeti kategorisine belirtmektedir. Sıkıştırma, eğilme ve kesme için mukavemet tasarım modelleri ve kuralları ile güvenilirlik faktörleri de dahil yangın ve yorgunluk hakkında kısa bir açıklama yapılmaktadır. Ayrıca, malzeme özellik karakterizasyonu, lif oryantasyon etkisinin eğilme dayanımlarına olan etkisini ve test yöntemlerini kapsayan ekler içermektedir.

2.3.6.4. Avustralya Standartları (SA, Avustralya)

Ocak 2000'de VSL (Avustralya) ile New South Wales Üniversitesi "RPC Öngerilmeli Beton Kirişler için Tasarım Yönergeleri"ni yayınlanmıştır. Bu belge, metodoloji olarak 1990'ların sonlarında endüstri ve AFGC tarafından Fransa'da yazılan kılavuzlara benzemektedir. Bu kılavuz ayrıca UYPB öngerilmeli kirişlerin tasarım örneklerini de içermektedir. 2018'de Avustralya standart şirketi, "Çelik Elyaf Takviyeli Beton"u

kapsayan 16 Bölümden oluşan DR AS 3600 "Beton Yapılar"ı yayınlanmıştır. Standart, FRC'nin UYPB'ye uygulanabilecek sıkıştırma ve çekme özelliklerini belirlemeye yönelik metodolojiyi (test yöntemleri ve güvenilirlik faktörleri) göstermektedir. Takviye veya ön gerilim tendonları olan ve olmayan hem gerinimle sertleşen hem de gerilimi yumuşatan FRC'yi kapsar. Basınç, eğilme ve kesme (dikme ve bağlantı) için tasarım modelleri sunmaktadır. Ayrıca dayanıklılık (yangın dahil), hizmet verebilirlik ve inşaat öncesi kalite testi için kurallar belirtilmektedir.

2.3.6.5. Kanada Standartları (CSA, Kanada)

Kanada Standartlar Birliği (CSA), UYPB için iki ayrı standart sunmaktadır

- CSA A23.1 Ek U "Yapım Malzemeleri ve Yöntemleri"
- CSA S6 Ek 8 "FRC ile Köprülerin Yapısal Tasarımı".

UYPB ile ilgili her iki CSA Standardı da teknik komiteler tarafından onaylanmıştır. CSA A23.1 standardı, Ek U "Yapım Malzemeleri ve Yöntemleri", UYPB malzemelerini aşağıdaki şekilde kapsar:

- 2 basınç dayanımı kategorisi (120-150MPa ve >150MPa),
- 3 çekme mukavemeti kategorisi (gerilme sertleştirme, gerinim yumuşatma ve lifsiz),
- 3 dayanıklılık kategorisi.

Standart, UYPB'nin önceden karıştırılmış, kısmen önceden karıştırılmış ve önceden karıştırılmamış tedariki ve harmanlanması için kuralları belirtir. Ayrıca, malzeme özelliklerini, KG/KK, harmanlama, taşıma, yerleştirme, kütleme ve kalıptan çıkarma özelliklerini karakterize etmek için gereklilik testinin tümünü karşılamaktadır.

CSA S6 Ek 8 Standardı, "FRC'li Köprülerin Yapısal Tasarımı" aşağıdakileri kapsar:

- Tüm basınç dayanımı kategorileri için FRC ve UYPB,
- Basma, eğilme ve kesme için tasarım modelleri,
- Güvenilirlik ve mukavemet azaltma faktörleri,
- Ters analiz veya doğrudan çekme testleri ile prizmadan doğrudan çekme özelliklerini

belirleme yöntemleri,

- İnce birleştirilmiş köprü tabliye kaplamalarının, waffle güverte panellerinin ve UYPB saha döküm bağlantılarının tasarımı için özel kurallar.

2.3.6.6. Japon Kılavuzları (JSCE, Japonya)

1990'ların sonlarında VSL (Japonya), Taisei İnşaat ve Teiheyo Cement Company, Japon pazarı için UYPB'yi geliştirmeye başlamıştı. 2006 yılında Japon İnşaat Mühendisleri Derneği (JSCE) "Ultra Yüksek Mukavemetli Fiber Takviyeli Beton Yapıların Tasarım ve İnşası için Öneriler (Taslak), Beton için JSCE Yönergeleri No.9"u yayınlanmıştır. Bu belge, metodoloji olarak 1990'ların sonlarında endüstri ve AFGC tarafından Fransa'da yayınlanan kılavuzlara benzemektedir.

2.3.6.7. Alman Kılavuzları (GCSC, Almanya)

Alman Yapısal Beton Komitesi, 2017'de, hem prekast hem de yerinde dökme, pasif takviye çubukları veya ön gerilimli çelik liflerle özel olarak güçlendirilmiş yapılar için geçerli olan UYPB için taslak yönergeler hazırlamıştır. Kılavuz, hammaddeleri, karışım oranlarını, kalite kontrolünü, taze ve sertleştirilmiş özellikleri karakterize etme yöntemlerini, üretimi, yapısal tasarımı (3 noktalı bükme çentikli prizma ile çekme mukavemeti karakterizasyonu) ve tasarım örneklerini kapsamaktadır. Kılavuz, 3 basınç dayanımı kategorisi (C130, C150 ve C175) içerir ve dayanıklılık için EN gerekliliklerini sağlamaktadır.

2.3.6.8. İspanyol Kılavuzu (ACHE)

Kasım 2015'te İspanyol Beton Birliği olan Scientific Technical (ACHE) 1 No'lu Komite, UHPFRC hakkında ilk İspanyol yönergelerini geliştirmek için bir görev grubu oluşturdu. Kılavuz, 6 basınç dayanımı kategorisi (120, 135, 150, 175, 200 ve 225 MPa), çekme dayanımı için iki kategori (Fransız Yönergelerine benzer şekilde gerinme-sertleşme ve gerinim yumuşama) ve dayanıklılık için EN gerekliliklerini kapsamaktadır. Yönergeler aynı zamanda ham madde gereksinimlerini (maksimum agrega boyutu ve lif boyutu dahil), işlenebilirlik özelliklerini, çevresel maruz kalma koşullarını, yerleştirme yöntemlerini ve geometrik hususları içermektedir.

2.3.6.9. Federal Karayolu İdaresi (FHWA, ABD)

FHWA 1999'da, UYPB'nin karayolu altyapısını inşa etmek için esnek bir malzeme olarak kullanılmasıyla ilgilenmeye başlamıştır. Araştırma çalışmaları sonucu, FHWA-HRT-06-103 "Ultra Yüksek Performanslı Betonun Malzeme Özelliği Karakterizasyonu" ve FHWA-HRT-06-1152 kodlu iki önemli kılavuz yayınlamıştır.

FHWA yayınları, tanecikli bileşenlerin optimize edilmiş derecelendirmesinden, %25'in altında su/çimentolu malzeme oranından ve yüksek oranda süreksiz iç lif takviyesinden oluşan çimentolu bir kompozit malzeme olarak tanımlanan bir UYPB'ye dayanmaktadır. UYPB'nin mekanik özellikleri arasında 150MPa ve 25MPa'dan daha yüksek sürekli çatlama sonrası çekme dayanımını temel almaktadır.

2013 yılında, FHWA, FHWA-HRT-13-032 "Bağlantılar dahil Prekast UYPB Waffle Deck Panel Sistemleri için Tasarım Kılavuzu"nu yayınladı. Kılavuz, genel düzenlemeler, Waffle Deck Panel tasarımı, bitişik paneller ve panelden kirişe arasındaki UYPB bağlantıları hakkında bilgi sunmaktadır.

2014 yılında FHWA, FHWA-HRT-14-084 "Sahada Üretilen UYPB Bağlantılarının Tasarımı ve İnşası" kılavuzunu yayınladı. Bu 36 sayfalık kılavuz, UYPB'ye genel bir bakış ve prekast bağlantılar için malzeme kullanımı, tamamlanan proje örnekleri, tipik bağlantı ayrıntıları örnekleri, UYPB bağlantıları için yapısal tasarım kuralları, yapım (yığıma, döküm ve kütleme) metodoloji önerileri ve testler belirtmektedir [261].

2.3.7. UYPB Uygulamaları

UYPB'nin mükemmel performansı, altyapı çalışmaları, bina inşaatlarında olmak üzere son yıllarda artan sayıda yeni uygulama fırsatları sunmaktadır. UYPB küresel pazar büyüklüğünün 2016 yılında 892 milyon ABD doları değerinde olduğu ve bu sayının 2025 yılında %8,6 artarak 1 milyar 867,3 milyon ABD dolarına ulaşması bekleniyor [262]. UYPB, Avustralya ve Yeni Zelanda başta olmak üzere Avusturya, Kanada, ABD, Almanya, Fransa, İtalya, Japonya, Malezya, Hollanda, Slovenya ve Güney Kore gibi birçok ülkede ticarileşmesiyle dünya çapında ilgi gördü. Son yirmi yılda, UYPB teknolojisini geleceğin sürdürülebilir inşaat malzemesi olarak endüstrileştirmek için

dünya çapında akademisyenler ve mühendisler tarafından kapsamlı araştırma projeleri yürütülmüştür [27]. 2000'li yıllardan itibaren, birçok ülke UYPB'yi çeşitli uygulamalarda kullanmaktadır. Fransa'da köprüler, cepheler, ABD'de karayolu altyapılarının bakım ve geliştirilmesinde, Avustralya'da köprüler, İsviçre'de daha çok yapıların güçlendirilmesinde, Hollanda, Malezya ve İspanya'da köprü yapımında UYPB kullanımları mevcuttur [101]. Voo ve diğ.'nin literatür tabanlı araştırmasına göre bir veya daha fazla bileşeninde UYPB kullanılarak inşa edilmiş 200'den fazla köprü bulunmaktadır [263]. UYPB'nin diğer uygulamaları da binalarda, yapısal güçlendirmede, prekast elemanlarda ve bazı özel uygulamalarda görülmektedir [27]. Kaldırımlar, köprüler, depremden hasar görmüş yapıların güçlendirilmesi ve rehabilitasyon elemanları, açık deniz yapıları koruyucu barınaklar, kent mobilyaları, merdivenler ve altyapıda rögar kapağı üretimi gibi bir çok uygulama potansiyeline sahiptir. Nükleer enerji, marina, petrol ve askeri üs tesisleri gibi özel inşaat projelerinde kullanılabilir [264]. Hem yangına hem de dış etkilere karşı daha dayanıklı olduğu için bankalarda ve sığınaklarda kullanılabilir. Bu amaca yönelik yüksek maliyeti de düşürmektedir [92], [162]. Yüksek yapılar, rehabilitasyon çalışmaları, yapısal ve yapısal olmayan elemanlar ve makine parçalarında kullanılabilir.

UYPB kullanılarak daha küçük kesitler sayesinde daha hafif yapılar yapılabilir. Bu nedenle UYPB, prekast beton endüstrisinde etkin bir şekilde kullanılabilir. Ayrıca UYPB kullanılarak mimari ve estetik açıdan çekici yapılar yapılabilir [47].

2.3.7.1. Yapı Uygulamaları

UYPB'nin prekast endüstrisinde imal edilmiş olan ürünlerinin çeşitli yapılardaki uygulamaları Şekil 2.22'te görülmektedir.



Kanada'daki Sherbrooke yaya köprüsü [86]



Amerika'da, Mars Hill ilk otoyol köprüsü [86]



Route 624 köprüsü [86]



Barış Yaya Köprüsü, Seul, Güney Kore [92]



Japonya'daki Sakata-Mirai Yaya Köprüsü [260]



Prekast palplanj uygulaması [265]

Şekil 2.22. Prekast UYPB elemanların çeşitli yapı uygulamalarında kullanımı.

2.3.7.2. Mimari Uygulamaları

UYPB panelleri çatı ve cephelerde genel olarak; hafiflik, kolay işlenebilirlik ve esneklik, dayanıklılık ve kimyasallara karşı dirençli olması nedeniyle mimariye estetik sağlayarak istenilen form ve dizayn'da yenilikçi tasarımları uygulama imkânı sunmaktadır [31]. UYPB'nin prekast endüstrisinde imal edilmiş olan ürünlerinin çeşitli yapılardaki mimari uygulamaları Şekil 2.23 ve Şekil 2.24'te görülmektedir.



Jean Bouin stadyumu, Paris [92]



Fransa'daki avrupa ve akdeniz medeniyetleri müzesi (MuCEM)



Amerikan büyükelçiliği, Maputo/Mozambik (Fibrobeton A.Ş.)

Şekil 2.23. UYPB prekast ürünlerinin çeşitli yapılardaki mimari uygulamaları.



Çin Kültür Merkezi, Belgrad - Sırbistan



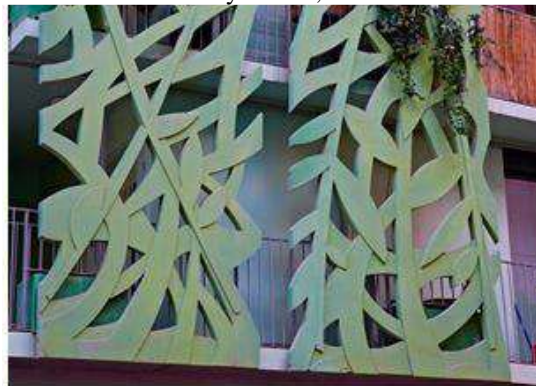
Finsbury Tower, Londra - İngiltere



Mercury Tower, Malta



Amerikan Büyükelçiliği, Bahamas



ZAC Paris Rive Gauche (Fransa): Dikey peyzaj için mineral yaprak dekoru [266]



Plescop şehir holü cephesi için delikli cephe panelleri [266]

Şekil 2.24. UYPB prekast ürünlerinin mimari cephe uygulama örnekleri.

Şekil 2.25’de de görüldüğü üzere UYPB, kentsel alanlarda benzersiz, modern ve pratik ofis, ev ve sokak mobilyası üretmek için kullanılmaktadır.



Şekil 2.25. UYPB şehir mobilyaları [92].

2.3.7.3. Aşınma Koruyucu

UYPB, kömür, uçucu kül, çimento, çelik, silika kumu ve kimyasallar gibi aşındırıcı malzemelerin hidrolik ve pnömatik taşıma ve depolama sistemlerinde aşınma koruyucu olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.26).



Keçbe besleyicinin değiştirilebilir kısmı

Birlikte monte edilen parçalar

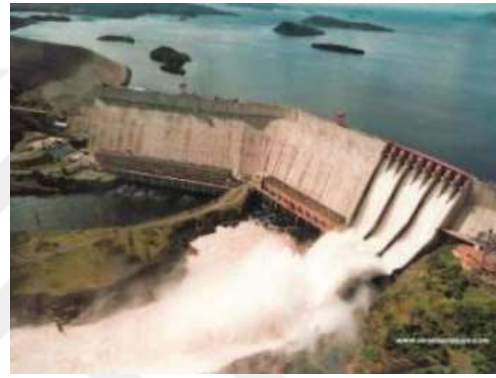
Şekil 2.26. UYPB’nin aşınma koruyucu olarak kullanımı.

2.3.7.4. Beton Onarımı

UYPB'ler beton onarımında da kullanılabilir. İlk büyük uygulamalardan biri, Ekim ve Kasım 1983'te Kinzua Barajı İskandinav Havzası'nın rehabilitasyonudur (Şekil 2.27.-a). Venezüella'da Raúl Leoni Barajı'nda (Guri) büyük hasarların giderilmesi için çeşitli testler yapılmıştır. Giriş/çıkışta, ayak parmağındaki ve dolu savaklarda aşırı kavite nedeniyle meydana gelen çok büyük hasar UYPB kullanarak giderilmiştir (Şekil 2.27.-b). Hollanda'da 1988 ve 1989'dan beri aşınma-erozyonlu kilit ve savaklarda UYPB ile çeşitli onarımlar yapıldığı bilinmektedir.



a) Kinzua Barajı, Amerika



b) Raúl Leoni Barajı, Venezuela

Şekil 2.27. UYPB'nin barajlarda beton onarımlarında kullanımı.

Ayrıca UYPB'yi diğer malzemelerle birleştirerek, her yönde büyük mukavemetli benzersiz kombinasyonlar sergileyen büyük seramik/metal bazlı hibrid yapılar yapılabilir. Sadece devasa yapıları ve son derece ince, zarif yapıları tasarlanmanın ve inşaatın değil, aynı zamanda tıbbi uygulamalar için kırılma-erozyonlu kilit ve savaklarda üretilmesini de mümkün kılmaktadır [267].

2.4. NANOTEKNOLOJİ VE BETONDA KULLANIMI

Nanoteknoloji, moleküler seviyede malzeme davranışını, makro seviyede ise binaların, altyapı tesislerinin ve mühendislik yapılarının performansını geliştiren teknolojidir. Nano-değişime uğrayan yapı malzemeleri, mukavemeti daha yüksek, daha dayanıklı, daha kalıcı, daha hızlı inşa edilebilen ve çevresel zararı azaltılmış olarak nitelendirilir [268].

Nobel ödüllü fizikçi Richard Feynman'ın 1959'da Caltech'te gerçekleştirdiği "There's Plenty of Room at the Bottom" başlıklı konuşması, nanoteknoloji çağının başlangıcı olarak

kabul edilebilir. “Nanoteknoloji” terimi ilk kez 1974’te Norio Taniguchi tarafından üretilmiştir [269], [270]. 1980’lerde Kim Eric Drexler’in çalışmalarıyla gelecek potansiyeli daha iyi bir biçimde açıklığa kavuşturulmuştur [269]. Aynı dönemde, Binnig ve Rohrer, bilim insanlarının olayları atomik çözünürlükte ilk kez görüntülemesine olanak tanıyan “Taramalı Tünelleme Mikroskobu”nu (“Scanning Tunneling Microscope” -STM) icat etmiştir. 1989’da Eigler, yüzeylerdeki nano-yapıların, moleküllerin ve atomların özelliklerini analiz etmek için “Taramalı Sonda Mikroskopları” (Scanning Probe Microscope-SPM) olarak bilinen cihazın geliştirerek maddeyi nano ölçekte manipüle etme ve konumsal olarak kontrol etme imkânına kavuşulmuştur [270].

Yapılarda ilk nanoteknoloji uygulamaları 90’lı yılların ortalarında görülmeye başlanmıştır. 2003 yılında İskoçya’da gerçekleştirilen uluslararası bir seminerde (International Symposium on Nanotechnology in Construction (NICOM1) “The Roadmap for Nanotechnology in Construction” başlığı ile ilk kez yapı sektöründe nanoteknolojinin rolünü ve araştırma sahasını belirleyici 25 yıllık bir yol haritası çizilmiştir. Yol haritasının içeriği aynı zamanda RILEM’in uluslararası teknik çalışma grubu’nun (TC 197-NCM) yapı malzemelerinde nanoteknoloji (2002-2007) çalışmalarıyla bütünleştirilmiştir [9].

Dünya çapında malzemelerin ve enerjinin yaklaşık %40’ını kullandığı ve yıllık küresel sera gazı emisyonlarının %40’ını oluşturan inşaat sektöründeki eko-verimliliğin artırılması ve çevre üzerindeki etkilerinin azaltılmasına yönelik uygulamaların geliştirilmesi önem taşımaktadır [271]. Yeni nesil kompozitler, üstün mekanik performans ve sağlamlık gibi özelliklerin yanı sıra düşük elektrik direnci, öz-algılama becrisi, kendi kendini temizleyebilme ve onarabilme gibi alışılmamış davranışlar sergileyebilir [272]. Yapı malzemelerine alışılmamış dışında özellikler katan nanoteknoloji, hızla yeni çok işlevli ve akıllı malzemelerin keşfedildiği disiplinler arası ve üretken bir araştırma alanına dönüşmüştür [268].

Betonun makro yapısal düzeyde özellikleri fazlasıyla araştırılmışsa da mikro düzeyde çimentolu malzemelerin özellikleri etraflıca bilinmemektedir. Günümüzde nanoteknolojik gelişmeler sayesinde malzemelerin mikro ve nano düzeyde yapıları ve davranışları belirlenebilmekte ve başta beton olmak üzere çok çeşitli yapı malzemelerinin özellikleri geliştirilmektedir [272]. Hacimlerine oranla yüksek miktarda yüzey alanına

sahip nanomalzemeler, olağanüstü fiziksel özellikleri, boyut etkisi, kimyasal ve termal kararlılıkları sayesinde çimentolu malzemelerin mekanik, elektrik, termal, elektromanyetik kalkını ve dayanıklılık özelliklerinde gelişim/değişime oldukça duyarlıdırlar. Yüksek reaktiviteleri nedeniyle çimento hidrasyonunu teşvik ederek hızlandırabilecek yüksek reaktiviteye sahip olmaları sayesinde yüksek basınç ve durabilite sağlayabileceği öngörülmektedir Bu sebeple de üstün performanslı beton geliştirme araştırmalarında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır [273], [274].

Özetle geleneksel malzemelere yapılacak nano boyutlu müdahaleler ile makro boyutlardaki malzeme özelliklerinin iyileştirildiği yapı sistemleri oluşturulabilir. Böylece yeni nesil yüksek mukavemetli, düşük bakım gerektiren, düşük enerji tüketimine sahip sürdürülebilir yapıların inşası mümkün olacaktır [275].

Yapı sektöründe nanomalzeme kullanımı ile yapı malzemelerinin daha hafif ve daha sağlam üretilmesi, çimentolu malzemelerin özelliklerin artırılması, dayanıklı malzemeler ile yapı ömrünün uzaması, onarım ve bakım maliyetlerinin düşmesi, yapıda harcanan enerjinin kontrol edilebilmesi, ateş, korozyon, su, ses gibi dış etkilere karşı üstün yalıtım özellikleri, yansıtıcılığı ve yalıtım özellikleri arttırılmış camlar, hızlı inşa süresi, iş gücüne ve malzeme maliyetinin azaltılması sağlanabilmektedir [276]. Nano-parçacıkların daha önce bilinmeyen ama gösterebileceği olumsuzluklar, üretim aşamasında çalışanlara ve sonrasında kullanıcılara ve insan sağlığına etkileri, nano-materyallerin üretimi, taşınması, kullanımı ve imhası esnasında farketmeden, çevreye salınım yapma ihtimali ve verebileceği olası zararlar, yeterli düzeyde bilgili olmayan eleman zorluğu, nitelikli eleman gerekliliği, nano-malzemelerin kullanılacağı yapı elemanlarının tasarımı ve uygulamasına yönelik standartların eksikliği, yeni bir teknolojik imkân olması sebebiyle tanınmaması ve talep yetersizliğinin yarattığı yüksek maliyetler olumsuz yanları olarak değerlendirilebilir [276].

2.4.1. Betonda Nanoteknoloji Kullanımı

Beton nano ölçekte, çok fazlı, kompozit bir materyal olarak kullanılmakta olan en yaygın insan yapımı malzemedir. Nano, mikro ve makro ölçeklerinin her birinin özelliklerinin kendisinden daha küçük ölçekteki özelliklerinden türediği ve zaman içerisinde bozunabildiği bir mekanizmaya sahip olan betonu bir arada tutan yapıstırıcısı kalsiyum-

silikat-hidrat (C-S-H), amorf fazda bir nano-materyaldir [277]. C-S-H'nin yapısı, ara katman ve adsorbe edilmiş su ile doldurulmuş jel gözenekleri ile ayrılan ince katı katmanları ile kile çok benzemektedir [278]. Bunun betonun performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Çünkü yapı nem hareketine karşı hassastır ve eleman boyutlarında uyum sağlanmazsa büzülür ve bunun sonucu çatlamayla sonuçlanır [279]. Ayrıca yorulma yüklerine maruz kalan çimento esaslı malzemeler de kolaylıkla çatlar. Böylece betonda kısa sürede renk değişimi, donma-çözülme hasarı ve pul pul dökülme, solma ve lekelenme gibi istenmeyen etkiler ortaya çıkar [280]. Betonlarda nano malzemelerin kullanılması daha yoğun bir mikro yapıya ve daha iyi mekanik ve dayanıklılık sağlayarak belirtilen olumsuzlukları engelleyebilir [47].

Çimento ile karıştırılan nano malzemelerle ilgili yapılan çalışmalar ve bu karışımlara olan ilgi, çimento ve betonun davranışına ilişkin ulaşılan temel bilgiler, inşaat endüstrisine doğrudan uygulanabilecek betonlara yeni ve/veya üstün özellikler üretme olasılığını ortaya koymaktadır [281].

Korkmaz ve ark. göre, beton malzemesinin bağlayıcısı olan çimentoya veya agregasına nano boyutta malzemeler ekleyerek, betonun mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri ciddi oranlarda geliştirilebilir [277]. Nano malzemeler özellikle çimentonun hidratasyonunu hızlandırabilir, olası pozolanik reaksiyonlar yoluyla ek kalsiyum silikat hidratlarının (C-S-H) oluşumunu uyarabilir ve kalsiyum sızmasını ve zayıf kalsiyum hidroksit bölgelerini azaltabilir [282], [283].

Araştırmacılar özellikle yüksek dayanımlı beton malzemelerin özelliklerini başarılı bir şekilde geliştirilebilmek için çimento ağırlığına göre nano parçacıklar kullanılabileceğini belirtmektedirler. Örneğin Ghafari ve ark. çalışmalarında daha yüksek nano-silika (nS) dozajı ile UYPB 'nin basınç dayanımını arttırdıkları, bununda bağlayıcı kütesine göre optimum nS miktarı %3,74 olarak rapor etmişlerdir [284], Öyleki UYPB karışımlarına nano ölçekli bu malzemenin ilavesinin çelik donatıların korozyon hızını azalttığı da görülmüştür [57].

nS içeren UYPB karışımlarının, nS içermeyen UYPB karışımlarına kıyasla kılcal gözenekliğinde azalma gösterdiği de bildirilmiştir [285]. Yine %1 nano metakaolin

kullanılan bir UYPB’da, klorür iyonlarının penetrasyonunun azalmasına yol açan mikroyapı gelişimi gözlemlenmiştir. Falikman ve diğ., nano TiO₂ partikülleri içeren UYPB’nin bir fotokataliz etkisi yoluyla duman yeme ve kendi kendini iyileştirme özelliklerini bildirmiştir [286]. Nano Fe₂O₃ içeren karışımların UYPB’nin mekanik gücünü arttırdığı ve kendini algılama yeteneklerini indüklediği gözlenmiştir [287]. Lee ve ark. göre, ağırlığa oranda %1 miktarda karbon nanotüp eklenmesi, beton kompozit malzemelerde çatlakların oluşmasını ve yayılmasını etkili bir şekilde önlediği görülmüştür [288].

2.4.2. Karbon Nanotüp (CNT)

1985 yılında, Richard Smalley’in bulduğu karbon atomlarının 60’lı gruplar halinde birbirlerine bağlanmasıyla oluşan “buckyball”lar (küresel molekül), kütlesine birkaç kobalt veya nikel atomu eklendiğinde şekil değiştirerek, kimyasal olarak kararlı ve duvar kalınlığı bir nanometre boyutundaki “nanotüp” şekline dönüşür [289]. S. Iijima’nın (1991) keşfettiği karbon nanotüpler (CNT), yüksek dayanım, Young modülü (elastik ya da çekme modülü), büyük deformasyon ve yüksek süneklik, yüksek en-boy oranı (>500) ve mükemmel elektrik iletkenliği gibi sayılabilecek fiziksel özellikleri nedeniyle çok çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [290]. CNT’ler sahip olduğu yüksek yüzey alanı (yaklaşık 1000m²/g), çok yüksek sıcaklık kararlılığı (havada 800°C’ye kadar), yüksek kimyasal stabilite, düşük yoğunluk (yaklaşık 1,33 g/cm³) ile mükemmel elektrik ve kimyasal özellikleri, takviye materyali olarak tercih edilmesini sağlamaktadır [291]. Diyamanyetiklik ve belirgin bir anizotropi duyarlılığı gösteren CNT’ler, genelde kendisini oluşturan grafen duvar sayısına göre tek duvarlı (SWCNT) ve çok duvarlı nanotüp (MWCNT) olarak üretilmektedir. SWCNT’nin Young modülü ~1TPa iken MWCNT’nin değeri ~1,28 TPa’dır. CNT’ler için ~30GPa’lık bir maksimum gerilme mukavemeti bildirilmiştir. Özdirenç değeri ise 10⁻⁴Ω cm’dir [292].

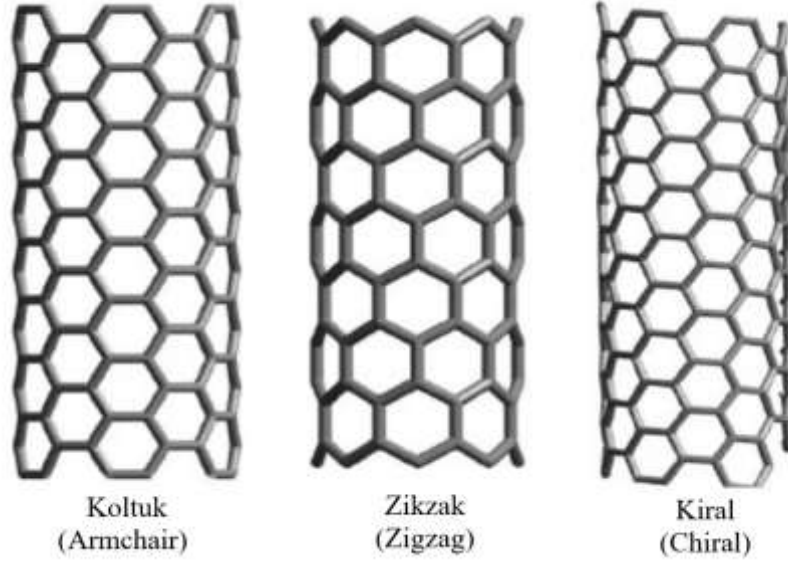
Tek Duvarlı Karbon Nanotüpler (SWCNT)

Karbon nanotüp silindir şeklindeki bir karbon allotropudur, sadece karbon atomu içerir. Karbon nanotüpleri kıvrılmış grafen yüzeyi gibi düşünebilir. Karbon nanotüp, boylamasına kıvrılarak elde edilmiş silindir şeklindedir. Uçları açık ya da kapalı olabilir. Katlanmış şekillerine farklı isimlendirilen CNT’lerin çeşitleri Şekil 2.28’de görülmektedir.

Bir tek grafin yüzeyini kıvrırarak tek katmanlı nanotüp (Single Wall Karbon Nanotüp-SWCNT) elde edilir (Şekil 2.30). Özellikleri Çizelge 2.26’da gösterilen SWCNT’lerin TEM mikroskobunda görüntüsü Şekil 2.29’de görülmektedir [289].

Çizelge 2.26. Tek duvarlı karbon nanotüplerin (SWCNT) fiziksel özellikleri [289].

SWCNT Dışçapı	1-2 nm
SWCNT İççapı	0,8-1,6 nm
SWCNT Aslı	< % 1,5 ağırlıkça
SWCNT Saflığı	>% 90 ağırlıkça
Ek MWCNT İçeriği	>% 5 ağırlıkça
Amorf Karbon İçeriği	<%3 ağırlıkça
SWCNT Uzunluğu	5-30 μm
SWCNT Spesifik Yüzey Alanı	407 m^2/g
SWCNT Elektriksel İletkenliği	10^{-2} S/cm



Şekil 2.28 Karbon nanotüplerin katlanış şekillerine göre çeşitleri [289].



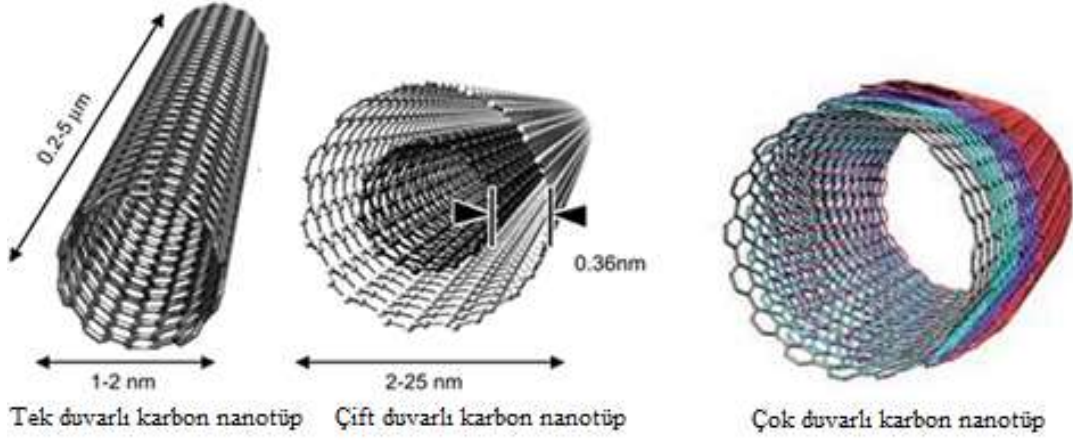
Şekil 2.29 TEM mikroskobunda SWCNT görüntüsü [289].

Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler (MWCNT)

Üst üste bir kaç grafin konulup katlanarak iç içe geçmiş şekilde elde edilen karbon nanotüplere “Çok Duvarlı (Katmanlı) Karbon Nanotüp” (MWCNT) denir (Şekil 2.30). Özellikleri Çizelge 2.27’de verilen MWCNT’lerin her iki katmanı arasındaki mesafe yaklaşık olarak 0,34nm kadardır. Bal peteği dizilişi ile oluşan hegzagonal yapıli levhaların sarmal formlarında, iç içe geçmiş silindirik tüp yüzeylerinde yer alan atomların yapılandırma durumlarına göre bu tüplerin elektriksel özellikleri yarı iletken veya metalik niteliklerde olabilir [289].

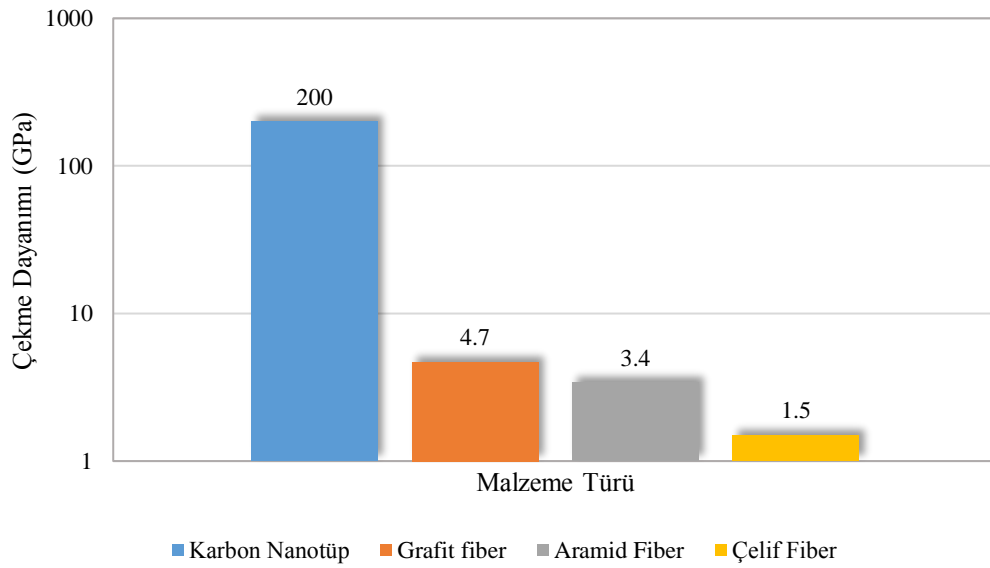
Çizelge 2.27. Çok katmanlı nanotüplerin (MWCNT) fiziksel özellikleri [289].

MWCNT Dışçapı	<8 nm
MWCNT İççapı	2 -5 nm
MWCNT Ash	< %1,5 ağırlıkça
MWCNT Saflığı	> %95 ağırlıkça
MWCNT Uzunluğu	10-30 µm
MWCNT Spesifik Yüzey Alanı	500 m ² /g
MWCNT Elektriksel İletkenliği	10 ⁻² S/cm



Şekil 2.30. Karbon nanotüpler farklı formları [276].

Karbon nano tüpler sırasıyla gerilme, sağlamlık ve esneklik katsayısı terimlerinde keşfedilen en sert ve en kuvvetli materyaller olduğu bilinmektedir. Karbon fiberlerinin aksine, tek katmanlı nano tüpler çok yüksek oranda esnektir. Boşluklu yapısı sayesinde basınç altında bulduklarında burkulma, eğilme gerilmesi eğilimi gösterirler. Burkulabilir, düzleştirilebilir, küçük daireler şeklinde kıvrılabilir ya da başka çeşitli esnetmeler sonucunda kırılmadan kalabilir. Ayrıca araştırmacılar nano tüp üzerindeki etki çekildiği zaman eski orijinal şeklini aldığını gözlemlemişlerdir [289]. Sonuç olarak nano tüpler karbon fiberlerin avantajlarından başka çok daha esnek ve basınç altında kırılmaya dayanıklı, çok sağlam ve yüksek elastikiyet modülüne sahiptir (Şekil 2.31) [290].



Şekil 2.31. Bazı yüksek dayanımlı malzemelerin çekme dayanımı [290].

2.4.3. Betonda CNT Kullanımı

Son yapılan araştırmalardan, karbon nanotüplerin çimento bazlı kompozit malzemelerin güçlendirebilme yetenekleri nedeniyle betonda potansiyel nano-takviye malzemesi olarak kullanılabileceği görölmektedir [291]. CNT'lerin nano-güçlendirici özellikleri, betondaki nano gözenekleri doldurarak, gerilme sırasında oluşan mikro çatlakları köprüleyerek ve beton matrisinin çatlak ilerlemesine karşı direncini artırarak mekanik özelliklerin geliştirilmesini kolaylaştırır [293], [294]. Ultra yüksek en boy oranları, son derece yüksek akma dayanımları, esneklik modülleri ve elastik davranış, takviye uygulamalarında CNT'lerin yüksek performanslı çimentolu kompozitler üretme potansiyelini gösterir [281]. SWCNT ilavesinin erken yaşlarda hidrasyon sürecini hızlandırdığı [295], betona ilave edilen CNT, filler etkisi göstererek daha boşluksuz yapı oluşturabildiği bildirilmektedir. CNT'nin nanometrik çapları, eğer bir matris içinde iyi dağılmışlarsa, çatlak oluşumunu ve yayılmasını engelleyerek çimento hamuru ile agrega ara yüzünün kalitesini arttırabilir. Sonuçta, çok daha dayanıklı ve yüksek performanslı betonlar elde edilebilir [268].

CNT'lerin en büyük sorunu, çimento karışımında homojen dağılımın zorluğudur. Birbirine bağlı mikro yapılar oluşturup kümelenme oluşmaması için CNT'leri dağıtmak çok önemlidir [269], [296]. Çok yüksek yüzey alanları, elektrostatik etkiler ve Van Der Waals kuvvetleri nedeniyle birbirine yapışmasına neden olabileceğinden, başarılı bir dispersiyon elde etmek de zor olabilir [297]. Bununla birlikte, sürfaktan kullanımı, çimento matrisi ile CNT'ler arasındaki bağlanma kuvvetini azaltır. İyi bir dispersiyon beton dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye yol açarken, kötü bir dispersiyon betonun dayanımını olumsuz etkileyebilir [298], [299]. Yeterli bir işlenebilirlik elde etmek için yüksek su talebi, büyük boşlukların oluşması mukavemette düşüşlere sebep olabilir [273]. Bu olumsuz etki PE süperplastikleştirici (SP) gibi kimyasal katkı maddeleri ile azaltılabilir. PE, SP'nin MWCNT'yi dağıtmadaki başarısına rağmen, sonikasyon sona erdiğinde SWCNT'nin tekrar demetler halinde kümelenmesini önlemede etkili olmadığı bildirilmektedir [281], [295], [300].

Bugüne kadar yapılan çalışmaların çoğu, tek duvarlı karbon nanotüplerden (SWCNT)

ziyade ucuz ve daha kolay bulunabilen çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) üzerinde yapılmıştır. Ancak SWCNT, MWCNT'den daha yüksek en-boy oranlarına ve hidratlı portland çimentosundaki C-S-H katmanlarının yapısal aralığına yakın bireysel boru çaplarına sahip olması nedeniyle, potansiyel olarak MWCNT'ye göre daha fazla takviye malzemeleri olarak tercih edilirler [281]. Ancak çimentolu matriste kullanım için SWCNT'nin dağılımındaki ek komplikasyonlar göz önüne alınmalıdır. SWCNT hidrofobiktir ve karışım suyunda kolaylıkla dağılmaz. SWCNT'nin dağılımını sağladığı bilinen organik çözücüler de çimentolu sistemlerde istenmeyebilir [301].

Literatürdeki karbon nanotüp ilaveli çimentolu malzemeler üzerine yapılan çalışmalara göre; MWCNT'nin çimentolu malzemelerin yoğunluğu üzerinde etkilerinin net olmadığı bildirilmektedir. Öyle ki, Chaipanich ve ark.'nın [302] çalışmalarda MWCNT takviyesinin beton yoğunluğunu artırıldığı, Hu ve ark.'nın [303] çalışması yoğunluğu azalttığı ve Del ve ark. [304] çalışmasında ise etkisiz kaldığı bildirilmektedir. Seis ve diğ. yaptıkları çalışmalarının numune yoğunlukları ile yayılma ilişkisine göre, lifli karışımların yoğunluğunun azalmasını, karışımda oluşan topaklanma kaynaklı olabileceği belirtilmiştir [305].

Shimoda ve ark. [306], artan CNT/CNF içeriğinin, nano-partiküllerin topaklanma etkisine bağlı olarak eğilme veya eğilme mukavemetinde bir azalmaya yol açtığını bildirmiştir [306]. CNT'lerin dağılımı, beton özelliklerini büyük ölçüde etkiler; Taramalı Elektron Mikroskobu'ndan (SEM) elde edilen mikrograflar, matris içinde iyi bir dağılıma sahip bireysel nanoliflerin varlığının daha iyi mekanik özelliklere yol açtığını ortaya çıkarmıştır [307]. İyi dağılmış CNT'ler, bükülme altında art gerilim çatlamasını uzatır [11], [308]. Bu nedenle, UHPC'de daha yüksek basınç ve eğilme mukavemeti özellikleri için CNT'lerin iyi bir şekilde dağılması esastır.

UHPC gibi düşük su içerikli betonlarda potansiyel bir hacim azalması olan otojen büzülmenin [309], düşürülmesinde CNT'lerin ve karbon liflerinin eklenmesinin katkı sağladığı [310], bununla birlikte, literatürde CNT'lerin UHPC'nin otojen büzülme davranışı üzerindeki etkisine ilişkin çok sınırlı bilgi vardır ve bu durum bu konuda ayrıntılı çalışmayı gerekli kılmaktadır [298].

Li ve ark. [311], beton'a çimento ağırlığına göre %0,5 oranında MWCNT'lerin eklenmesinin, sırasıyla basınç ve eğilme dayanımlarını %19 ve %25 oranında artırdığını bildirmiştir. Yakovlev ve ark. [24], CNT kullanımının (%0,05 bwoc) çimento bazlı köpük betonun basınç dayanımını %70 artırdığını bildirmiştir. Konsta-Gdoutous ve ark. [312], MWCNT'lerin (%0,08 bwoc) çimento hamuruna dahil edilmesinin eğilme mukavemetinde %35'lik bir artışa neden olduğunu bildirmiştir. Hu ve ark. [303], bir karboksil grubu (%0,1 bwoc) içeren MWCNT'lerin çimento hamuruna eklenmesinin kırılma enerjisini ve kırılma tokluğunu sırasıyla %42,9 ve %19,2 oranında iyileştirdiğini bildirmiştir. Zou ve ark. [313], MWCNT'lerin kullanımının çimento hamurlarının elastikiyet modülünü, eğilme mukavemetini ve kırılma enerjisini önemli ölçüde iyileştirdiğini bildirmiştir. MWCNT'lerin eklenmesi gözenekliliği azalttığı ve nano ölçekte mikro çatlak köprüleme kapasitesini arttırdığı için çimento matrisinin mikro yapısını iyileştirmiştir. Ayrıca klorür iyonu penetrasyonuna ve sülfat saldırısına karşı direnci verimli bir şekilde iyileştirmiştir [314]. Mahendra'ya [288] göre ağırlıkça %1 miktarda karbon nanotüp eklenmesi, beton kompozit malzemelerde çatlakların oluşmasını ve yayılmasını etkili bir şekilde önlediği söylenebilir. Cwirzen ve diğ. [315], MWCNT takviyeli kompozitlerin eğilme mukavemetinde düz çimento harcı ile karşılaştırıldığında %10'luk bir artış elde etmişlerdir. Shang ve ark. yaptıkları çalışmada farklı ağırlık yüzdelerine sahip (ağırlıkça %0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 ve 0,25) karbon nanotüplerle güçlendirilmiş betonun mekanik test sonuçlarına göre, karbon nanotüplerin optimum dozajının ağırlıkça yaklaşık %0,22 olduğunu gösterdi. Normal betona kıyasla kübik basınç dayanımı ve yarma çekme dayanımının sırasıyla %30,8 ve %46,0 oranında arttığı, elastik modüldeki değişimin önemsiz olduğu bulundu [291]. Lu vd. [314], yaptıkları çalışmada, UYPB numuneleri, çimentoya göre ağırlıkça %0 ila %0,15 arasında değişen çeşitli miktarlarda MWCNT ile hazırlanmış, optimum MWCNT yüzdesi (%0.05) ile, 28 günlük kürlemede UYPB'nin basınç dayanımında %4.63'lük bir artışa ve klorür difüzyon katsayısında %24'lük bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Ayrıca, MWCNT'lerin çimento matrisindeki dağılımını ve MWCNT'leri içeren sertleştirilmiş çimento hamurunun morfolojisini gözlemlemek için alan emisyon taramalı elektron mikroskopu (FE-SEM) kullanılmış, FE-SEM gözlemi, MWCNT'lerin matriste iyi dağıldığını ve hiçbir aglomera oluşmadığı görülmüştür. MWCNT'lerin UYPB üzerindeki güçlendirici etkisinin, gerilimdeki yükü aktaran MWCNT'lerin dışarı çekilmesi ve mikro çatlak köprülemesi olduğu belirtilmiştir. Lim vd. (24), normal kürleme koşulları altında CNT içeren UYPB'nin karışım tasarımını sentezlemek ve CNT'nin UYPB özellikleri

üzerindeki etkisini araştırmıştır. CNT'nin özelliklerinin ve homojen dağılım yönteminin UYPB özelliklerine önemli ölçüde katkıda bulunduğu, bazı durumlarda basınç dayanımı üzerinde küçük olumsuz etkilere (%11'e varan azalma) neden olmasına rağmen, eğilme dayanımının önemli ölçüde iyileştirildiği (kontrol UYPB karışımı ile karşılaştırıldığında %70) görülmüştür. Araştırmada, CNT'nin UYPB kompozitin çatlak sonrası davranışına katkı sağladığı da belirtilmiştir. Liu vd. [316], farklı tip MWCNT'lerin (F-tipi ve L-tipi) RPB'ye katkısını araştırdığı çalışmada, ağırlıkça %0,025 F-MWCNT'lerin eklenmesiyle, 28 günlük basınç dayanımı ve ilk çatlama eğilme dayanımı sırasıyla %7,2 ve %36 artmıştır. L-MWCNT içeren kompozitlerin ilk çatlama gerilme mukavemetleri %16 arttığı gözlenmiştir. Ayrıca mikroskobik analiz, MWCNT'lerin nano ölçekte çatlak gelişimini yavaşlattığı bildirilmektedir. Lee vd. [317], kendinden algılamalı ultra yüksek performanslı beton (UYPB) geliştirmek için çelik lif ve karbon nanotüp (CNT) kullanımını incelemiştir. Dört farklı çelik lif türü ve üç farklı boyda ve 2 farklı şekilde ve %2'lik hacim lif ve %0,5 oranında CNT katkılı UYPB'ler ve kontrol numunesi üretmişlerdir. Sonuçta çelik katkısı basınç dayanımı ve elastiklik modülü artırmış, CNT'nin dayanıma herhangi bir etkisi olmamıştır. Yapılan bir başka çalışmadaki sertlik testlerinden elde edilen bulgular, CNT'nin erken hidrasyon sürecini doğrudan etkilediğini ve %40 ve %50 w/c oranlı kontrol numunelerinin deneyimlediğinden daha yüksek hidrasyon oranları ürettiğini bildirmektedir. Bu hızlanma hem süperakışkanlaştırıcı eklenmiş hem de eklenmemiş numunelerde görülmektedir. Çalışma sonucu, SEM ve sertlik testi sonuçlarının kombinasyonu, çimento hamuru ile CNT arasında güçlü bir bağ oluşabileceğini göstermektedir [295]. Lu vd. [314] göre, MWCNT'lerin %0,05 oranında UYDB'ye dahil edilmesiyle klorür penetrasyonuna karşı dirençte klorür difüzyon katsayısını %24 azalmıştır. Jung vd. [23]'e göre, UYPB'a CNT'lerin eklenmesi, elektrik direncini önemli ölçüde azaltarak, düşük voltajda (19-23v) etkili elektriksel kürelemeye izin verdiği görülmüştür. Köprülleme, gözenek doldurma ve C-S-H oluşumuyla mekanik özellikler ve eğilme gerilimi altında bükülme dayanımını ve çoklu çatlama davranışını olumlu bir şekilde etkilemiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölüm, çalışmada kullanılan deneysel materyalleri, teknik özelliklerini, numune üretimine yönelik kodlama, parçacık paketleme işlem aşamaları, karışım reçetesi, karışım prosesi oluşturma aşamalarını ve test prosedürlerini içermektedir. Bu araştırmanın temel amacı, gelişim aşamasındaki UYPB'lerde ortaya çıkan bazı kusurların giderilmesi, özgün karışım prosedürüne sahip laboratuvar koşullarından ziyade şantiyelerde de üretilebilecek bir yerel UYPB üretmektir. Araştırmada kullanılan malzemelerin çoğu yerel kaynaklardan alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan test prosedürleri, UYPB'nin mevcut uluslararası bir standardı bulunmaması nedeniyle TSE, ASTM prosedürlerini, ASTM prosedürlerinden, değiştirilmiş prosedürleri ve genel literatür kaynaklı yaklaşımları kapsamaktadır.

3.1. MATERYALLER

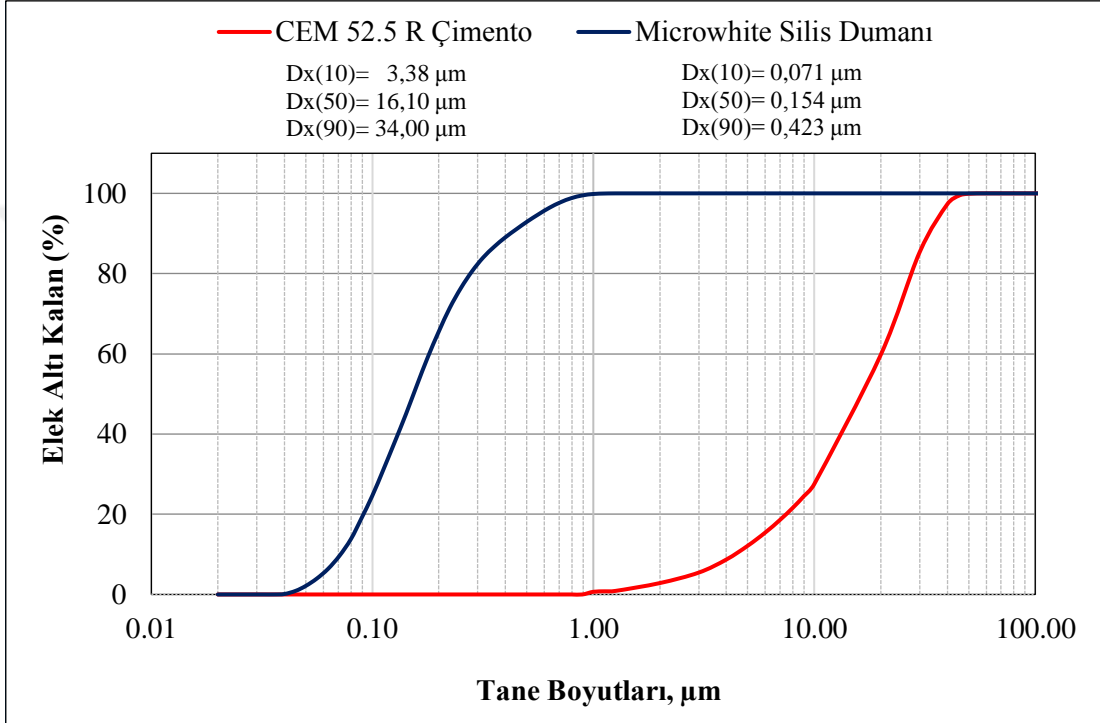
Bu kısımda, hammaddeler ve özellikleri, numunelerin kodlandırılmasına numunelerin hazırlanması, gerçekleştirilen testler ve analizleri sunulmuştur.

3.1.1. Bağlayıcılar

Karışımlarda bağlayıcı olarak TS EN 197-1'e uygun olarak ÇİMSA firması tarafından üretilen CEM I 52,5/R beyaz Portlant çimentosu ile puzolanik malzeme olarak ELKEM firmasından temin edilen beyaz silis dumanı (Microwhite) kullanılmıştır (Şekil 3.1). Kullanılan çimento ve silis dumanının tane dağılım grafiği Şekil 3.2'de sunulmaktadır. Kullanılan çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de, silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Karışımda kullanılan bağlayıcılar.



Şekil 3.2. Çimento ve silis dumanı tane boyut analizleri grafiği.

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
SiO ₂ (%)	21,6	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,06
Al ₂ O ₃ (%)	4,05	Özgül Yüzey (cm ² /g)	4600
Fe ₂ O ₃ (%)	0,26	Priz Başlangıcı (sa/dk)	01:40
CaO (%)	65,7	Priz Sonu (sa/dk)	02:10
MgO (%)	1,30	Hacim sabitliliği (mm)	1
SO ₃ (%)	3,30	45 µm Elek bakiyesi (%)	1
Na ₂ O (%)	0,30	90 µm Elek bakiyesi (%)	0,1
K ₂ O (%)	0,35	Mekanik Özellikler	
Chloride(Cl) (%)	0,01	Basınç Dayanımı (MPa)	
S.CaO (%)	1,60	2.Gün	37
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,18	7.Gün	50
Kızdırma Kaybı(%)	3,20	28.Gün	60

Çizelge 3.2. Silis dumanı fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Miktar
SiO ₂	%96
Renk Yansıması	%75
H ₂ O	%1
Kızdırma Kaybı	%3
Özgül Yüzey Alanı	15 m ² /g
Özgül Ağırlık	2,20 g/cm ³

3.1.2. Agregalar

Karışımlarda dolgu malzemesi olarak TSE ve AFS (American Foundry Society) standardına uygun, ortalama tane çapı 212 µm boyutlarında ve içeriğinde %98,91 oranında SiO₂ bulunan silis kumu ile 16,1 ve 40,7 µm ortalama tane boyutlarına sahip iki farklı boyutta kuvars kumu kullanılmıştır (Şekil 3.3). Kullanılan silis kumunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3’de, kuvars kumunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4’de, agregaların tane boyut analizleri grafiği Şekil 3.4’de sunulmaktadır.



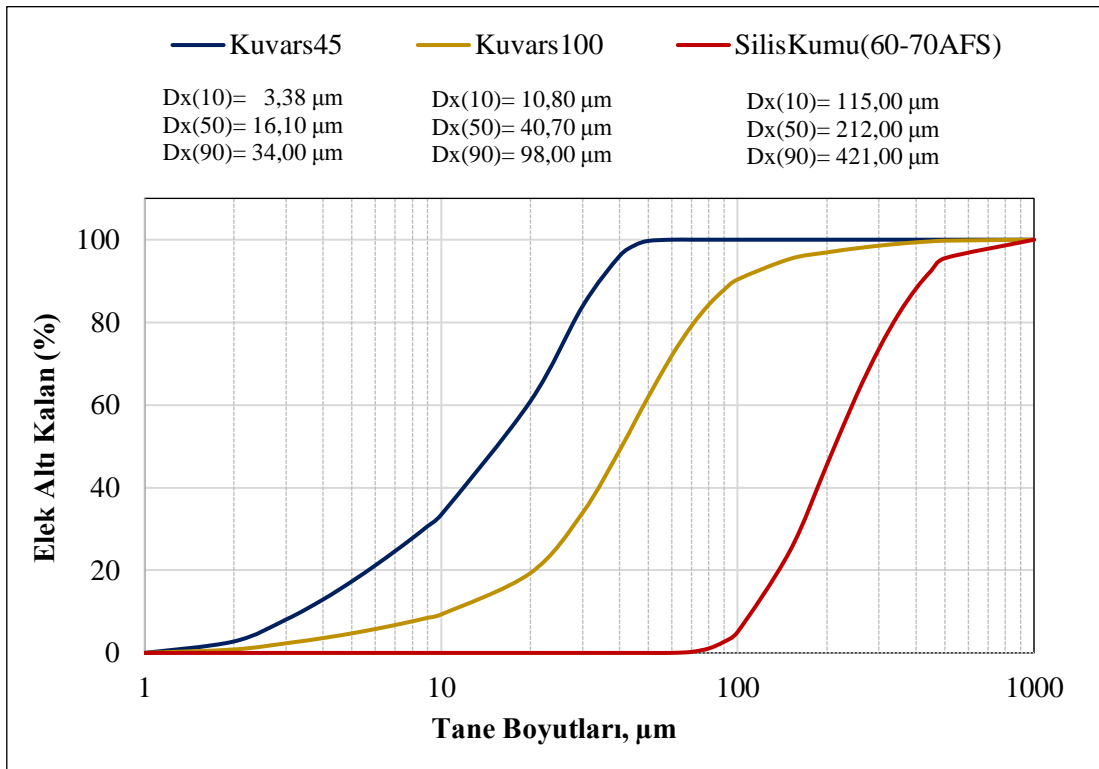
Şekil 3.3. Karışımda kullanılan agregalar.

Çizelge 3.3. AFS 60-70 silis kumu fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Miktar (%)
SiO ₂	98,91
Al ₂ O ₃	0,04
Fe ₂ O ₃	0,14
CaO	0,13
SO ₃	0,02
K ₂ O	0,08
P ₂ O ₅	0,01
TiO ₂	0,15
Cr ₂ O ₃	0,0214
Mn ₂ O ₃	0,0042

Çizelge 3.4. Kuvars kumu fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Miktar
SiO ₂	%97-99
CaO	%0,14
SO ₃	%0,02
K ₂ O	%0,02
P ₂ O ₅	%0,01
TiO ₂	%0,05
Cr ₂ O ₃	%0,0076
Özgül Ağırlık	2,85 g/cm ³
MOHS' Sertliği	7
Erime Noktası	1785°C
Sinterleşme Sıcaklığı	1500°C



Şekil 3.4. Agregaların tane boyut analizleri grafiği.

3.1.3. Çelik Lifler

Karışımında KRAMPE HAREX firmasından temin edilen 0,175 mm çap, 12,5 mm uzunluktaki paslanmaz mikro çelik lif kullanılmıştır (Şekil 3.5). Kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Çelik lifler.

Çizelge 3.5. Kullanılan çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik	Miktar
Lif Uzunluğu	12,5 mm
Lif Çapı	0,175 mm
Özgül Ağırlık	2,20 g/cm ³
Çekme Dayanımı	2800MPa
Elastisite Modülü	210GPa

3.1.4. Kimyasal Katkılar

İşlenebilirliğin sağlanması için 6 farklı marka akışkanlaştırıcı ile yapılan deneyler sonucunda tercih edilen SİKA PC61 marka polikarboksilat eter esaslı süper akışkanlaştırıcı (SP) tercih edilmiştir (Şekil 3.6). SP'nin fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.6. Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı.

Çizelge 3.6. Süper akışkanlaştırıcının (SP) fiziksel ve kimyasal özellikleri.

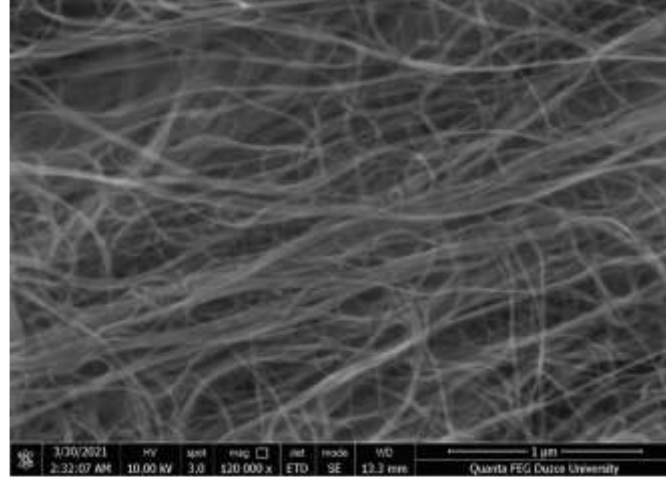
Özellik	Miktar
Tip	Polikarboksilat
Görünüm (Renk)	Açık Kahve
Klorür İçeriği	≤ % 1
pH Değeri	3-7
Özgül Ağırlık	1,06-1,1 g/cm ³

3.1.5. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp

Karışımında kullanılacak CNT, TUBALL firmasının toz, macunsu ve disperse edilmiş 3 çeşit ürünlerinden yapılan deneyler sonucu tercih edilmiştir. Yapılan deneylerde toz ve macunsu ürünlerin disperse edilmesi aşamasında yaşanan topaklanma sorunları dayanım düşüşlerine sebep olmuştur. Bu sebeple %0.4 (binde 4) Tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) katkılı sulu çözeltili disperse edilmiş TUBALL™ beta-302 markalı ürün tercih edilmiştir (Şekil 3.7). SWCNT'nin konsantre taşıyıcısı, sürfaktan, stabilize edici ajan-alkilen glikol türevi ve distiril bifenil türevinden olup, teknik özellikleri Çizelge 3.7'de, FE-SEM görüntüsü Şekil 3.8'de sunulmuştur.



Şekil 3.7. Karışımında kullanılan SWCNT.



Şekil 3.8. Kullanılan SWCNT'nin FE-SEM görüntüsü [305].

Çizelge 3.7. Kullanılan tek duvarlı nanotüpün teknik özellikleri (SWCNT).

Özellik	Miktar
SWCNT Dış Çapı	1-2 nm
SWCNT İç Çapı	0,8-1,6 nm
SWCNT Ash	<1,5 wt%
SWCNT Saflığı	>90 wt%
Ek MWNT İçeriği	>5 wt%
Amorf Karbon İçeriği	<3 wt%
SWNT Uzunluğu	5-30 µm
SWNT Spesifik Yüzey Alanı	407 m ² /g
SWNT Elektriksel İletkenliği	>10 ⁻² S/cm
Kaynama noktası	188°C
Parlama Noktası (ASTM D3278)	107°C
25°C Yoğunluk (ISO 15212-1)	1,056 g/ml

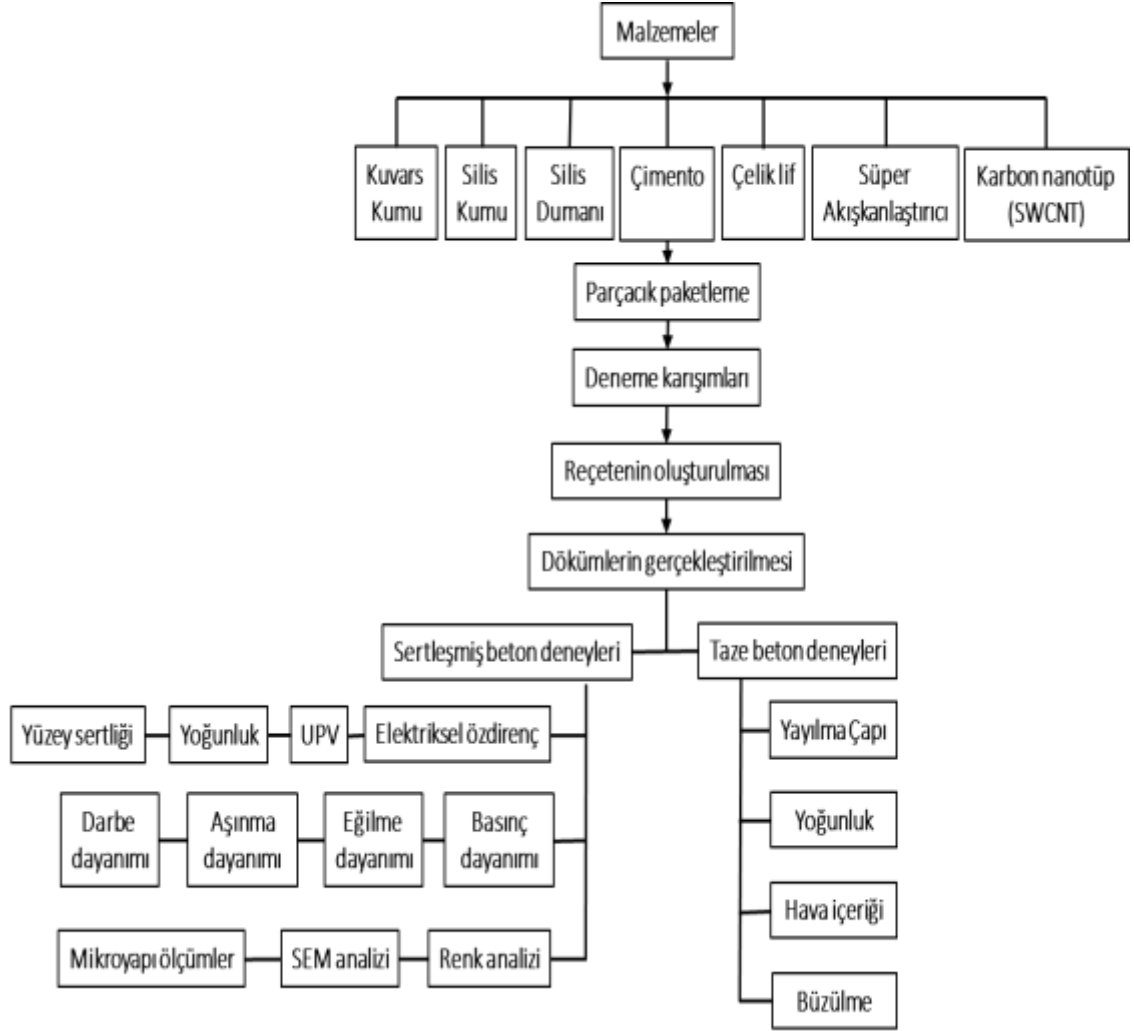


- 1- Çimento
- 2- Silis Dumanı
- 3- SWCNT
- 4- Kuvars Kumu-45
- 5- Kuvars Kumu-100
- 6- Silis Kumu (60-70AFS)
- 7- Süperakışkanlaştırıcı
- 8- Çelik Lif

Şekil 3.9. Tüm karışımda kullanılan malzemeler.

3.2. YÖNTEM

Bu kısımda tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların numunelerin hazırlanması, gerçekleştirilen deneyler ve analizler sunulmuştur. Gerçekleştirilen çalışmalara ilişkin işlem basamakları Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar ve test türleri.

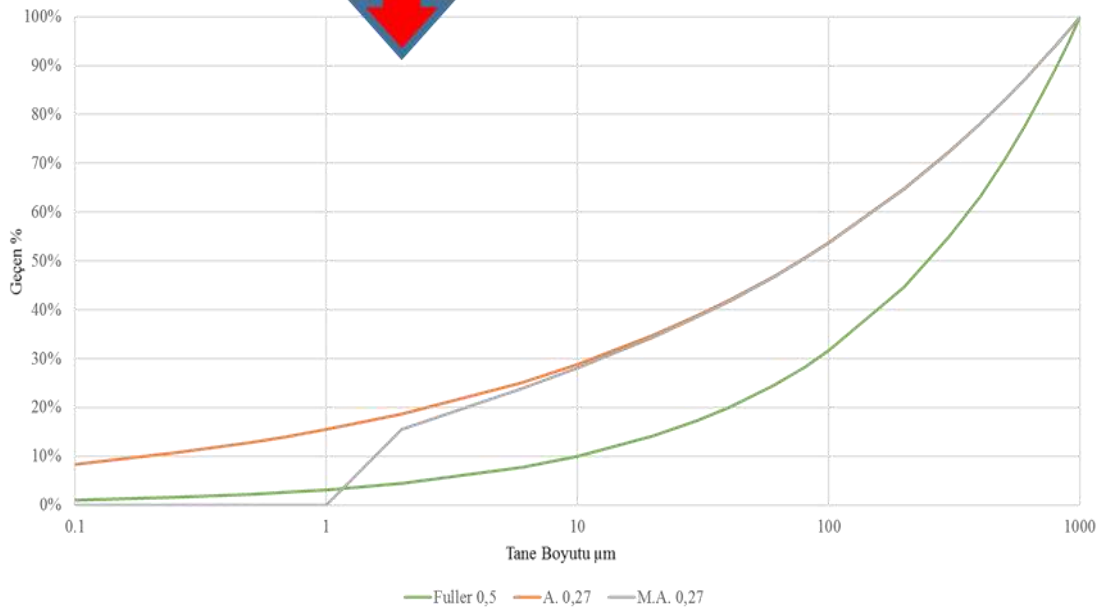
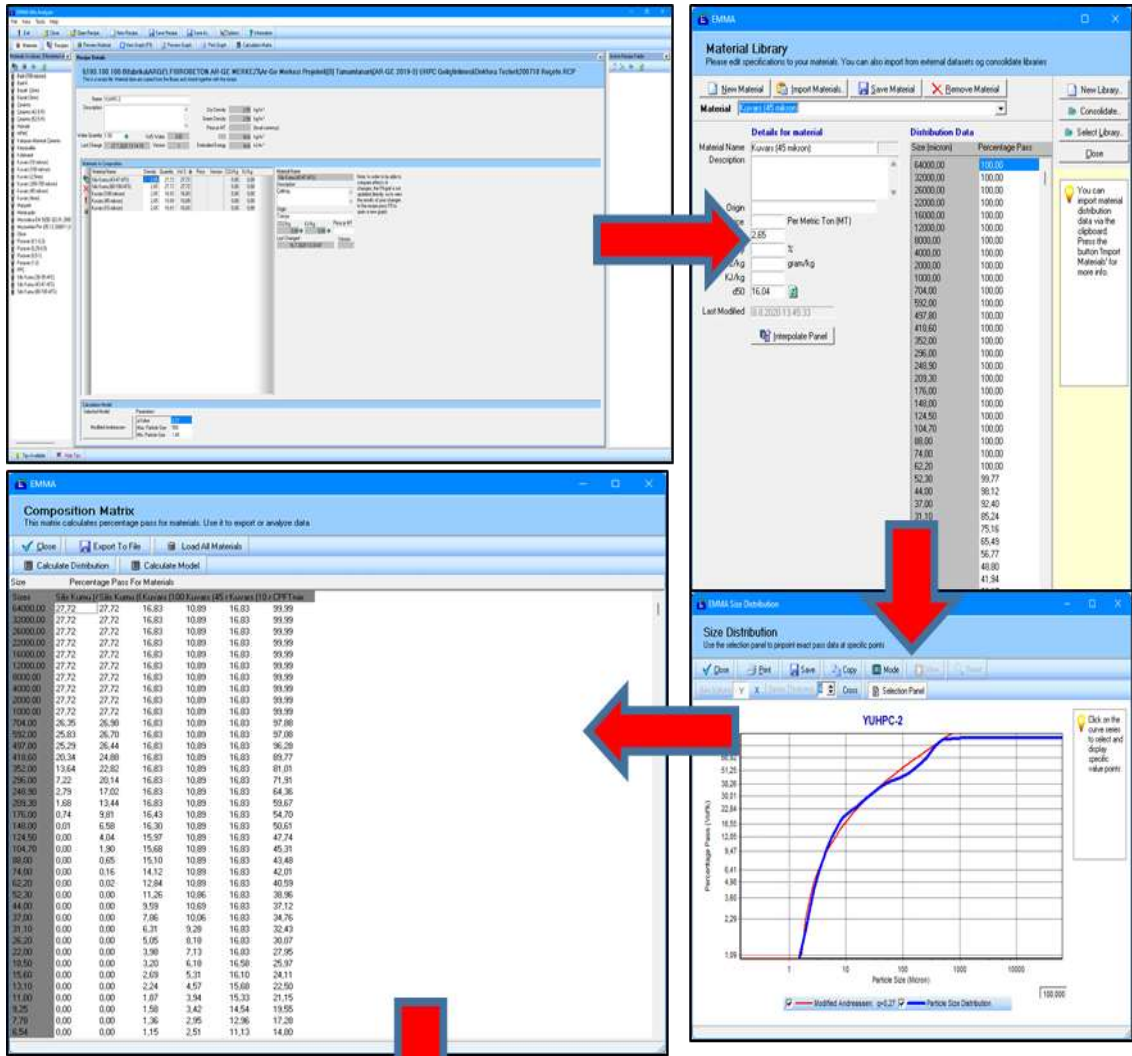
UYP beton karışım oranlarının belirlenmesi ve üretimine yönelik yapılan deneysel çalışmalar;

- Agrega granülometrisi ile bağlayıcı (çimento-silis dumanı) miktarının belirlenmesi,
- Su/bağlayıcı oranı ile optimum akışkanlaştırıcı oranını belirlenmesi,
- Çelik lif miktarını belirlenmesi,

- Karbon nanotüp (SWCNT) oranını belirlenmesi,
- Elde edilen verilere göre referans karışım reçetesinin oluşturulması,
- Dökümlerin gerçekleştirilmesi,
- Taze beton testlerinin gerçekleştirilmesi,
- 2, 7, 28, 56 ve 90 günlük sertleşmiş beton testlerinin gerçekleştirilmesi,
- Elde edilen sonuçların analizinin yapılarak bulguların yorumlanması şeklindedir.

3.2.1. UYPB Karışım Oranlarının Belirlenmesi Ve Numunelerin Üretimi

UYPB karışım reçetesi oluşturmak amacıyla Elkem ASA Materials tarafından geliştirilen parçacık boyutu dağılımı için “EMMA Mix Analyzer” bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Granüler karışımın en yüksek yoğunluğunu sağlayabilmek amacıyla, betonun kuru bileşenlerinin fiziksel özellikleri gözönüne alınarak en küçük boşluk oranını oluşturacak miktarları hesaplanmıştır. Bu amaçla beton kuru karışımlarının granülometri hesabında kullanılan farklı modeller bulunmaktadır. Çalışmamızda analitik parçacık paketleme modellerinden Fuller, Andreasen&Andersen ve Modifiye Andreasen&Andersen (Modifiye A&A) modelleri karşılaştırılmıştır. Literatürde de belirtildiği gibi karışıma giren tüm ince malzemeleri hesaba katarak maximum yoğunluk elde edilmesini sağladığı için hedef model olarak Modifiye Andreasen & Andersen (Modifiye A&A) modeli karışımlarımızın parçacık paketleme yöntemi olarak benimsenmiş, hesaplamalar bu modele uygun gerçekleştirilmiştir. Parçacık paketleme yazılımına ait işlem akış şeması basamaklarını gösteren ekran arayüzlerine ait görseller Şekil 3.11’de görülmektedir.



Şekil 3.11. UYPB bileşenlerinin fiziksel özelliklerinin “EMMA karışım analiz” programına girilmesi ve farklı parçacık modellerine göre granülometri eğrileri.

Numunelerin kolay hatırlanabilmesi için yapılan kodlamada, SWCNT miktarını göstermek üzere %0; 0,01; 0,02; 0,03 oranları, sırasıyla R (Ref.), CNT1, CNT2, CNT3 olarak kodlanmıştır.

Karışıma girecek tüm malzeme miktarları, gerçekleştirilen işlenebilirlik, basınç, eğilme, yoğunluk, hidratasyon gelişimi gibi ön test sonuçlarının maximum değerlerine göre belirlenmiştir. Referans karışım oranını elde edebilmek için yapılan ön deneme testlerinde toplamda 62 farklı karışıma sahip beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre karar verilen referans ve SWCNT'li karışım oranları Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Elde edilen referans karışım oranları (dm^3/m^3).

Malzemeler	Ref.	CNT1	CNT2	CNT3
Agrega (%)	324,44	324,40	324,36	324,32
Çimento (%)	294,12	294,12	294,12	294,12
Silis Dumanı (%)	102,27	102,27	102,27	102,27
SP (%)	41,67	41,67	41,67	41,67
Su/Bağlayıcı (%)	225	225	225	225
Çelik lif (%)	12,50	12,50	12,50	12,50
SWCNT (gr)	0	0,09	0,018	0,27

Numunelerin üretiminde, 56 litrelik karıştırma kapasiteli ve 70 rpm devir/dk çalışma hızına sahip Hira Pump marka mikser kullanılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Karışımlarda kullanılan 56 litre kapasiteli mikser.

Betonların üretiminde uygulanan karıştırma prosedürü aşağıda belirtilen şekliyle uygulanmıştır. Buna göre; agrega ve bağlayıcılardan oluşan kuru karışım mikserde 3 dakika düşük hızda karıştırılmıştır. Daha sonra %70 karışım suyu ilave edilerek yaklaşık 2 dakika karıştırılan harca kalan %30 karışım suyu ile süper akışkanlaştırıcı ilave edildi. CNT'li numunelerin üretiminde %70'lik karışım suyuna CNT'ler ilave edilmiştir. Karışım 1 dakika yavaş, 3 dakika hızlı modda karıştırıldı. Çelik ilavesi yapılarak yaklaşık 3 dakika kadar normal hızda karıştırıldı. Yaklaşık 2 dakika bekletilen beton sarsılmadan kalıplara döküldü. Kalıpların üzeri hava akımını kesecek şekilde kapatılarak 24 saat laboratuvar ortam koşullarında bekletildi. Daha sonra test gününe kadar %90 üzeri nemli kür dolabında bekletildi.



Şekil 3.13. UYPB betonların üretimi.



Şekil 3.14. UYPB kalıplara dökülmesi.



Şekil 3.15. Üretilen UYPB numuneler.

Hazırlanan harçların taze beton testleri olarak yayılma çapı, hava içeriği, beton yoğunluğu ve büzülme ölçümleri (shrinkage) gerçekleştirildi. Sertleşmiş beton testleri olarak yoğunluk testi, UPV, yüzey sertliği, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı, aşınma dayanımı elektriksel özdirenç ve renk ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Her bir karışımdan 2, 7, 28, 56 ve 90. günlerde yapılacak olan sertleşmiş beton testler için 3'er adet numuneler kalıplara dökülmüştür. Basınç dayanımı testleri için 70x140 mm'lik silindir numuneler dökülmüştür. Silindir numuneler üzerinde tahribatsız deneylerden yüzey sertliği (schmidt), sönüm oranı (UPV), elektriksel iletkenlik deneyleri gerçekleştirildi. Eğilme dayanım testi için 70x70x280 mm'lik kiriş numuneler dökülmüştür. Eğilme numunelerinden 70x70x70 mm'lik numuneler kesilerek aşınma (Böhme) dayanımlarını ölçülmüştür. Darbe dayanımı (Charpy) değeri ölçümleride gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin mikroyapısal olarak incelenmesine yönelik kırılma dayanımı numunelerinden alınan parçalar üzerinde XRD, FTIR, TGA ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. Taze Beton Deneyleri

3.2.2.1. Taze Beton Yayılma Çapı Deneyi

Karışımlar hazırlandıktan sonra taze beton kıvam tayini için ASTM-C1611/C1611M-05 standardına [319] göre test edilmiştir. UYPB karışımlarının kendiliğinden yayılma özelliğini ölçmek amacıyla, betonun kendi ağırlığı ile yayılma çapı ölçümleri yapılmıştır. 100x100 cm boyutlarında yayılma tablası düz bir zemine yerleştirilerek üzerine üst çap kesik koni taze beton harcı ile doldurularak koni dik olarak yukarı çekilerek betonun tablaya akması sağlanmıştır (Şekil 3.16). Yayılma tamamlandıktan sonra birbirine dik iki yöndeki 6 adet çap ölçülerek ortalaması alınarak test sonuçları kaydedilmiştir.



Şekil 3.16. UYPB kıvam tayini.

3.2.2.2. Taze Beton Hava İçeriği Deneyi

Taze beton hava içeriği tayinleri, TS EN 12350-7 [320] standardına göre tespit edilmiştir. Taze beton karışımları hava kalmayacak şekilde, hava ölçer (aerometre) kabına (Şekil 3.17) üç tabaka halinde doldurulmuş, basınç kaçağının olmamasına dikkat edilerek, kapak hava ölçer kabına kelepçelenmiştir. Ana hava vanası kapatılarak, iki su vanası açılmış, diğer vanadan su çıkıncaya kadar cihaza su doldurulmuştur. Kapak iç yüzeyinde bulunan hava kabarcıklarını çıkartmak için tokmak ile hafifçe vurulmuştur. Kapalı hava hücresine bağlı hava tahliye vanası kapatılıp kapalı hava hücresi içerisine, basınç göstergesi ibresi ve başlangıç basınç çizgisine gelinceye kadar hava pompalanmıştır. İki su vanası kapatılarak, ana hava vanası açılmış, basınç ibresinin gösterdiği değer hava yüzdesi olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.17. UYPB hava içeriği tayini.

3.2.2.3. Taze Beton Yoğunluğu Deneyi

Taze beton yoğunluğu tayinleri, TS EN 12350-6 [321] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Taze beton, hacmi ve kütlesi bilinen rijit ve sızdırmaz bir kap içerisine yerleştirilerek ağırlık ölçülmüştür (Şekil 3.18). Numuneler için taze beton yoğunluğu D , aşağıdaki Denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır:

$$D = \frac{M_1 - M_2}{V} \quad (3.1)$$

Burada;

D : Taze beton yoğunluğu (kg/m^3),

M_1 : Kabın Kütlesi (kg),

M_2 : Kap+Beton numune kütlesi (kg),

V : Kabın Hacmi (m^3)'dir.



Şekil 3.18. Taze UYPB'nin yoğunluğunun belirlenmesi.

3.2.2.4. Büzülme Deneyi

Betonun sertleşmesinden sonra beton hacminin zamanla azalması büzülme olarak tanımlanmaktadır. Bu azalma, betonun nem içeriğindeki değişikliklerin ve betonun dışındaki etkilere atfedilebilen gerilme olmadan meydana gelen fiziko-kimyasal değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Genleşme ise, sertleşmiş betonda nem kazanımı nedeniyle hacimsel olarak artış durumunu ifade etmektedir. Büzülme uygun şekilde sabit bağıl nem ve sıcaklık koşulları altında boyutsuz bir gerinim (m/m) olarak ifade edilebilmekte, kuruma büzülmesi, otojen büzülme ve karbonatlaşma büzülmesini içermektedir. Kuruma rötresi betondaki nem kaybı, otojen rötre çimentonun hidratasyonu, karbonatlaşma rötresi çimento hidratasyonu sırasında ortamdaki CO₂'den kaynaklanmaktadır [322].

Betonun büzülme ölçümü, ASTM D 2732 Unrestrained Linear Thermal Shrinkage of Plastic Film and Sheeting [323] metoduna uygun olarak yapılmıştır. Her iki yöndeki büzülme oranı Denklem 3.2'ye göre her farklı karışım harçları üzerinde ayrı ayrı hesaplanmıştır.

$$\text{Büzülme oranı (\%)} = \frac{L_0 - L_f}{L_0} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Formülde:

L_0 = İlk uzunluk

L_f = Büzülme sonrası uzunluğu, ifade etmektedir.

Ultra yüksek performanslı taze beton numunelerinin büzülme ve sıcaklık değerlerinin tespiti, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, Schleibinger Marka test cihazında yapılmıştır. Erken yaş büzülmesini ölçebilen 25x25x290 mm çelik bir kalıp sistemi kullanılmıştır. Deneyin yapılışına ait görsel Şekil 3.19'de verilmiştir. Çelik pimlerle sabitlenen ve hareketli durdurmaya sahip uçlar kullanılarak, serbest uç tarafında çelik bir levha ile sistem kapatılarak sertleşmeden önce probe ile 24 saate kadar sıcaklık, büzülme ve zaman verileri bir bilgisayar tarafından eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Sürtünmeyi en aza indirmek ve otojen gerinim ölçümleri sırasında ortamdaki nem kaybını önlemek için taze beton kalıba yerleştirilirken streç film ile kaplanmıştır.



Şekil 3.19. Büzülme kalıbı ve deney düzeneği.

3.2.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Mekanik testler için her tahribatsız testlerden yoğunluk, UPV, öz direnç ve yüzey sertliği (schmidt) deneyleri 5 farklı günde (2, 7, 28, 56, 90.) ve her bir karışım türünden 4 numune üzerinde basınç dayanımı numunelerine basınç testi yapılmadan önce uygulanmıştır. Tahribatlı test yöntemlerinden basınç, eğilme dayanımı, 5 farklı günde (2, 7, 28, 56, 90.) ve her bir karışıma ait 3'er numune üzerinde;

Böhme aşınma deneyi 56. günde eğilme deneyi numunelerinden kesilerek elde edilen numuneler üzerinde 3'er ölçüm yapılmıştır. Yine Charpy (darbe) dayanımı için 56. günde her farklı numune için 3 ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak son test sonuçları elde edilmiştir. Ultrasonik darbe hızı (UPV) ve öz direnç testleri, aynı numuneler üzerinde basınç dayanımına tabi tutulmadan önce tahribatsız yöntemler olarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.3.1. Sertleşmiş Beton Yoğunluğu Deneyi

Sertleşmiş betonların yoğunluk değerleri 2., 7., 28., ve 56. günlük basınç dayanımı deneyinden önce aynı numuneler üzerinde tüm numunelerin ağırlıkları ve boyutları ölçülerek birim ağırlıkları TS EN 12390-7 standardına uygun olarak aşağıda verilen Denklem 3.3'e göre hesaplanmıştır.

$$D = \frac{M_1}{V} \quad (3.3)$$

Burada;

D: Sertleşmiş beton yoğunluğu (kg/m^3),

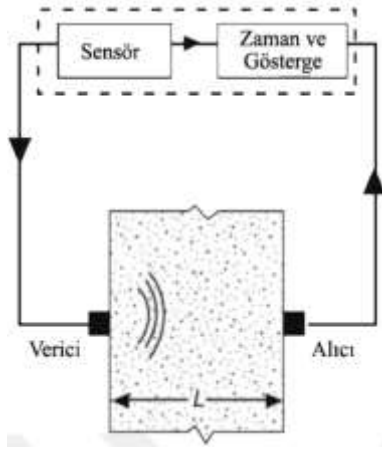
M_1 : Numune Kütlesi (kg),

V: (Silindir numune hacmi= $\pi \times r^2 \times h$)'dır (m^3). (Her bir numune kumpas ile ölçülerek hacmi hesaplanmıştır.)

3.2.3.2. Ultrases Geçiş Hızı (UGH) Deneyi

Tahribatsız yöntem olarak bilinen Ultrases Geçiş Hızı (UGH) test yöntemi, yapı malzemelerinin tahmini basınç dayanımını belirlemek için kullanılan bir tekniktir. UGH, ultrasonik darbenin, genellikle beton ve harç numunelerinde, malzeme boyunca belirli bir mesafeye gitmesi için geçen süreyi ifade eder. Ek olarak, gözeneklilik, mikro çatlaklar ve boşluklar gibi dahili kusurlar da UGH testi ile tespit edilebilir. Dolayısıyla UGH testi yaparak, malzemenin homojenliği hakkında da bilgi edinmek mümkündür [324], [325]. Bu test şekli, modern ultrasonik yöntemle, 20-150kHz frekans aralığında, elektronik devreler tarafından üretilen ve kaydedilen darbeler kullanılarak geliştirilmiştir. Ultrasonik darbe hızı yöntemi, titreşimli enerji darbesinin beton içerisinden yayılma hızını belirler (Şekil 3.20-a). Darbe hızı, elastisite modülü ve betonun yoğunluğu ile ilişkilendirilebilir. Bu teknik, donatı, agrega ve nem varlığından oldukça etkilenir. Bu yöntem aynı zamanda betonun kalitesini ve homojenliğini, ayrıca çatlak ve boşlukların mevcudiyetini değerlendirmek için de uygulanabilir [17].

Tüm karışımlardan elde edilen numunelerin ultrases geçiş hızlarını belirlemek için, ASTM C597 [326] standardına göre, Fore Marka ve MFR-W-E200 Emodumeter model cihaz (Şekil 3.20-b) ile Ultrases Geçiş Hızı (UGH) testleri gerçekleştirilmiştir. 70x140 mm ölçülerindeki hazırlanan 4'er adet UYPB silindir numuneler deney günlerine kadar kür kabini içinde bekletilmiş ve 2., 7., 28., 56., ve 90. günlük ultrasonik geçiş hızı km/s cinsinden elde edilmiştir.



a



b

Şekil 3.20. Ultrasonik ses hızı test yöntemi (a) şematik gösterimi ve (b) ölçümü.

3.2.3.3. Yüzey Sertliği Deneyi

Numunelerin Schmidt yüzey sertliği değerleri, basınç dayanımı için 70x140 mm ölçülerindeki hazırlanan 4'er adet UYPB silindir numunelerin her iki yüzeyine ASTM C805-97 [327] standardında belirtilen esaslara göre gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Utest marka ve N tipi model Schmidt test çekici ile yapılmıştır. Numuneler, deney günlerine kadar kür kabininde bekletilmiş, 2., 7., 28., 56., ve 90. günlerde yüzey sertliği deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.21). Numune yüzeyine dik bir şekilde yerleştirilerek uygulanmıştır. Her bir grup için tek bir numunede 12 ölçüm değerinin ortalaması alınarak ortalama yüzey sertliği değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.21. Schmidt çekici ile yüzey sertlik tayini.

3.2.3.4. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı testi, TS EN 12390-3 [328] standardına göre 70x140 mm ölçülerindeki

silindir numuneler deney günlerine kadar kür kabininde bekletildikten sonra 2., 7., 28., ve 56. günlük testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. UYPB basınç dayanımı tayini.

Basınç dayanımları Utest Marka ve 300.000kN kapasiteli, hidrolik beton pres makinasında numune kırılıncaya kadar uygulanmıştır. Her karışımdan üç adet numune üretilmiş, yükleme hızı 0,4MPa/s basınç yüklemesi uygulanarak beton basınç dayanımları hesaplanmıştır. Basınç dayanımı, aşağıdaki eşitlikten (3.4) hesaplanır:

$$\delta = \frac{P}{A} \quad (3.4)$$

Burada;

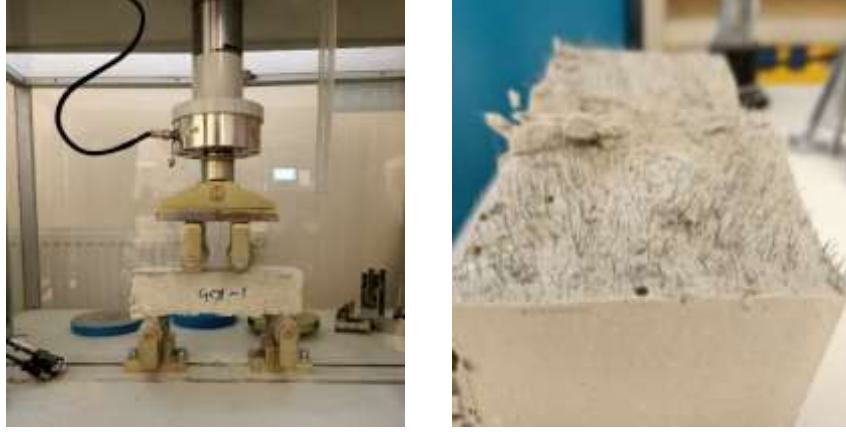
δ : Basınç dayanımı (N/mm²),

P: Kırılmadaki en büyük yük (N),

A: Silindir numune kesit alanı: πr^2 (mm²)

3.2.3.5. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı testi, TS EN 12390-5 [329] standardına göre 70x70x280 mm ölçülerindeki kiriş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. UYPB eğilme dayanımı tayini.

Utest marka, 30.000kN kapasiteli ve 0,04MPa/s yükleme hızına sahip cihaz ile prizma numune kırılıncaya kadar yükleme yapılarak, maksimum yük belirlenmiştir. Her bir grup için üç adet numune hazırlanmış olup, yükleme hızı 0,05MPa/s yük kontrollü dayanım uygulanarak eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Dört Noktalı Eğilme dayanımı, aşağıdaki Denklem 3.5'a göre hesaplanır:

$$R_f = \frac{F_f x L}{b x d^2} \quad (3.5)$$

Burada;

R_f : Eğilme dayanımı(N/mm²),

F_f : Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm)

L : Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm)'dir.

3.2.3.6. Darbe Dayanımı (Charpy) Deneyi

Darbe dayanımı testi, TS EN ISO 179-1 [330] standardına uygun olarak 25x25x125 mm ebatlarında prizmatik kiriş numuneler hazırlanarak, 56 günlük darbe dayanımı deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.24). Charpy testlerinin gerçekleştirilmesi için Düzce Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Charpy test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir grup için üç adet numune hazırlanmış olup, 50J'luk kuvvet ile uygulanarak darbe dayanımları hesaplanmıştır. |



Şekil 3.24. UYPB darbe dayanımı tayini.

Charpy darbe dayanımı, aşağıdaki Denklem 3.6'ya göre hesaplanır:

Burada:

$$a_{CU} = \frac{E_c}{hxb} \times 10^3 \quad (3.6)$$

a_{cu} : Charpy darbe dayanımı (kJ/m^2)

h: Kalınlık (0,025 m),

b: Genişlik (0,025 m),

E_c = Test numunesinin kırılmasıyla emilen düzeltilmiş enerji (J)'dir.

3.2.3.7. Aşınma Dayanımı (Böhme) Deneyi

Aşınma dayanımı testi, TS 2824 [331] (Böhme) standardına göre 70x70x70 mm ölçülerinde küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Aşınma dayanımı tayini.

Deneylerde, 30 devir/dk. \pm 1 devir/dk hızla dönme sağlayan, yaklaşık 750 mm çapında yatay olarak yerleştirilmiş döner bir aşındırma diski bulunan cihaz kullanılarak, kenar uzunlukları 70 mm olan küp numunelere uygulanmıştır. 20gr \pm 0,5 gr aşındırıcı kum sürtünme şeridi üzerine serpilerek, çelik manivela aracılığı ile 294 ± 3 N ile yüklenmiştir. Her numune için 22 devirden meydana gelen deney, numuneye 16 defa uygulanmış, deney numunesi iyice temizlendikten sonra numune boyutları 0,01 mm hassasiyetle olan kumpas ile ölçülmüş ve hassas terazide tartılmıştır. Her bir grup için 3 adet numune hazırlanmış olup, aritmetik ortalamaları alınarak hesaplama yapılmıştır. Toplam hacim kaybı, aşağıdaki Denklem 3.7'e göre hesaplanır:

Burada:

$$\Delta v = \frac{\Delta m}{d} \quad (3.7)$$

Δv : 16 çevirim sonrası toplam hacim kaybı (mm^3)

Δm : 16 çevirim sonrası toplam kütle kaybı (g)

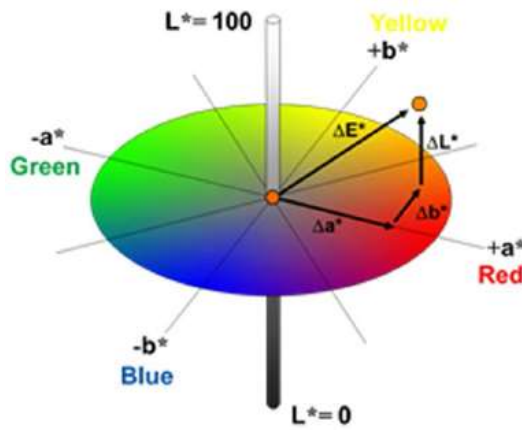
d: Numune yoğunluğu (g/mm^3)

TA: Aşındırma uygulanan numunenin taban alanı ($70 \times 70 \text{ mm}^2$)'dir.

3.2.3.8. Elektriksel Özdirenç Ölçümleri

Elektriksel öz direnç testi, UNI-T Marka ve UT-803 model cihaz ile tespit edilmiştir. 70 mm çap ve 140 mm yüksekliğinde silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil

değiştirebilmektedir [332]. Renklerin değerlendirilebilmesi, CIELAB kromatik uzayda L^* , a^* ve b^* dijital değerlerinin ölçümleriyle gerçekleştirilir. L^* açıklığı, h^* tonu ve C^* doygunluğu temsil eden üç faktördür. LAB renk sistemine ait renk uzayı Şekil 3.27’de görülmektedir. Sırasıyla L^* beyaz (üst), gri (kürenin ortası) ve siyah (alt) arasındaki farkı gösterir. Renk saflığı ile ilgili C^* parametresi, merkezden a^*-b^* düzlemindeki bir noktaya kadar olan bir vektör ile gösterilir. Bu parametre, rengin kırmızı, sarı, yeşil veya mavi (sırasıyla 0, 90, 180 ve 270) veya ara değerler arasında değiştiğini gösteren ton açısına (h^*) göre herhangi bir konumu kabul edebilir. ΔE^* , toplamdaki fark olarak anılır ve insan gözünün algılama yeteneği ile ilgilidir [333].



Şekil 3.27. LAB renk sistemine ait renk uzayı.

UYPB numunelerin üretiminden itibaren 90. gününde renk ölçümleri yapılmıştır. Renk ölçümleri yapılırken PCE–CSM 10 renk ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.28). Test yöntemi uygulanırken ASTM D2244 [334] standardına göre ölçümler alınmıştır. Test sonuçları SQC8 yazılımında ölçülmüş ve işlenmiştir.

Test ölçümleri yapılırken, her bir numune için 6 farklı noktadan LAB değerleri ölçülmüştür (Şekil 3.29). Ölçülen bu değerler, referans ürün ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama yapılırken aşağıdaki Denklem 3.10 kullanılarak ΔE değişim katsayıları tespit edilmiştir. Ayrıca renk ölçüm parametreleri Çizelge 3.9’da gösterilmiştir.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta A^2 + \Delta B^2} \quad (3.10)$$

Çizelge 3.9. Renk ölçüm parametreleri.

Parametre	Kullanım
Aydınlatıcı	D65
Gözlem Açısı	10°
Renk Uzayı	CIELAB
Renk Formülü	CIE 1976



Şekil 3.28. Renk ölçüm cihazı



Şekil 3.29. Numuneler üzerinde renk ölçümlerinin yapılması

3.2.4. Mikro Yapı Analizleri

Mineralojik yapı ve faz gelişimlerinin belirlenmesi amacıyla DTA-TGA, FTIR, XRD analizleri yapılmış ve SEM ile mikro yapıları belirlenmiştir. Her bir numune aynı işlemlere tabi tutulmuştur. SEM analizi işlemleri için numuneler kırılmış, kırılmış yüzey üzerinden görüntü çekimi sağlanmıştır.

3.2.4.1. FTIR Analizleri

Referans ve CNT ilaveli UYPB'lerden 56 gün sonrası elde edilen örneklerinin kafes ve moleküler yapılarının belirlenmesi için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, Schmadzu IRPrestige 21 model cihaz ile Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT) Çevre ve Kimya laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2.4.2. XRD Analizleri

Malzemelerin yapısını, bileşimini ve fiziksel özelliklerini incelemek için kullanılır [241]. Referans ve CNT ilaveli UYPB'lerden 56 gün sonrası elde edilen örneklerinin kafes ve moleküler yapılarının belirlenmesi için minerolojik yapı analizleri (XRD) gerçekleştirilmiştir. Analizler, RIGAKU SmartLab model cihaz ile Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2.4.3. DTA-TG Analizleri

Referans ve CNT ilaveli UYPB'lerden 56 gün sonrası elde edilen örneklerin simultane termal analizleri (diferansiyel termal "DTA" ve termal gravimetri "TG") 20 °C/dk ısıtma hızı ile 1000 °C maksimum sıcaklığa çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler Şekil 3.30'da görülen Shimadzu DTG 60H-DSC 60 model cihazı kullanılarak Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT) Çevre ve Kimya laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.30. Kullanılan termal analiz cihazı.

3.2.4.4. SEM Analizleri

Referans ve CNT ilaveli UYPB'lerden 56 gün sonrası elde edilen örneklerinin içyapılarının belirlenmesi için Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) analizleri yapılmıştır. Kullanılan SEM, EDX cihazı, FEI (Field Electron and Ion Company) üreticisinin Quanta FEG 250 tipi olup, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT) malzeme ve yüzey laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. UYPB TAZE BETON ÖZELLİKLERİ

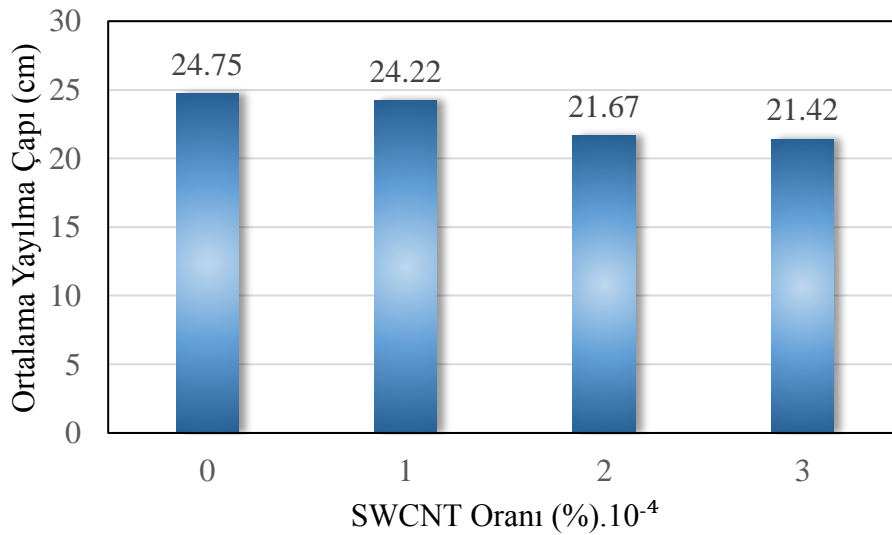
Hazırlanan UYPB karışımlarının taze beton özellikleri olarak; yayılma çapı, hava içeriği, yoğunluk, sıcaklık ve büzülme parametreleri ölçülmüştür. Elde edilen verilere ait bulgular ve tartışmalar aşağıda başlıklar halinde sunulmuştur.

4.1.1. Taze Beton Yayılma Çapı

Farklı oranlarda SWCNT takviye edilen taze UYPB karışımlarının yayılma çapı değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler Çizelge 4.1’de, SWCNT oranı ile yayılma çapı verileri arasındaki ilişki grafiği ise Şekil 4.1’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Karışımların yayılma çapı değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.

SWCNT Oranı (%)x10 ⁻⁴	Numune sayısı	Ortalama Yayılma çapı (cm)	Std. Sapma	Std. Hata	95% Güven aralığında ortalamanın		Minimum	Maksimum
					Alt sınırı	Üst sınırı		
0	6	24,7500	0,41833	0,17078	24,3110	25,1890	24,00	25,00
1	6	24,2167	1,21724	0,49694	22,9393	25,4941	22,50	25,50
2	6	21,6667	0,60553	0,24721	21,0312	22,3021	21,00	22,50
3	6	21,4167	0,58452	0,23863	20,8032	22,0301	20,50	22,00



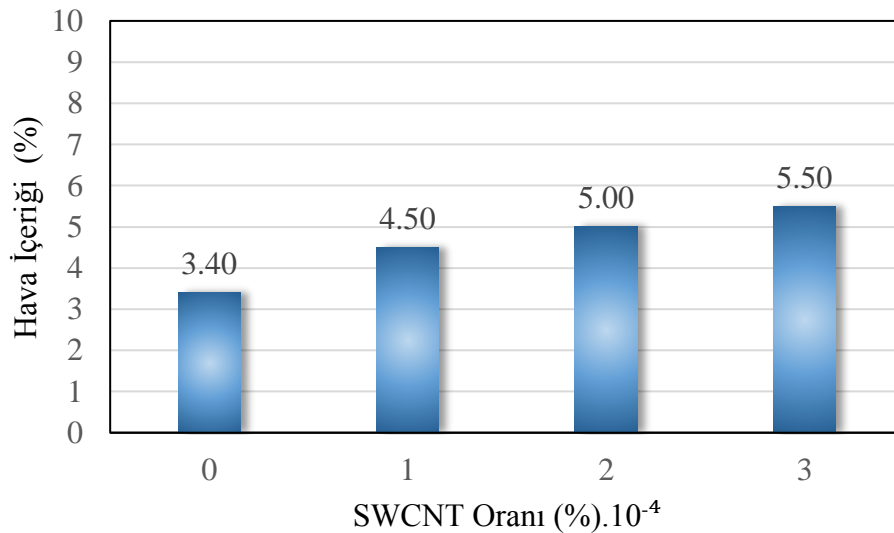
Şekil 4.1. Taze SWCNT’li UYPB’ler ile ortalama yayılma çapı ilişki grafiği.

Taze haldeki UYPB karışımlarının yayılma çapı değerleri incelendiğinde, SWCNT oranına bağlı olarak yayılma çapı değerlerinin değişim gösterdiği, SWCNT takviye oranı arttıkça yayılma çapı değerlerinin azaldığı görülmektedir. En büyük yayılma çapının referans numunesinde olduğu, SWCNT oranı artışı ile ters orantılı olarak yayılma çapı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. %0,01, 0,02 ve 0,03 oranlarında SWCNT takviye edilen karışımların yayılma çapı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla %2,14, 12,44 ve 13,45 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda SWCNT'lerin nano malzeme olması, yüksek özgül yüzey alanının, nanofibril yapıya sahip olması belirli oranların üzerindeki kullanımlarda taze beton işlenebilirliklerini düşürebildiği bilinmektedir [335], [336]. Dolayısıyla, SWCNT, MWCNT'den daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olması nedeniyle, UYPB betonlarının işlenebilirliklerinde azalmaya sebep olduğu değerlendirilmiştir.

4.1.2. Taze Beton Hava İçeriği

Farklı oranlarda SWCNT takviyeli taze beton karışımlarından elde edilen ortalama hava içeriği değerlerine ait sonuçlar Şekil 4.2'te görülmektedir.



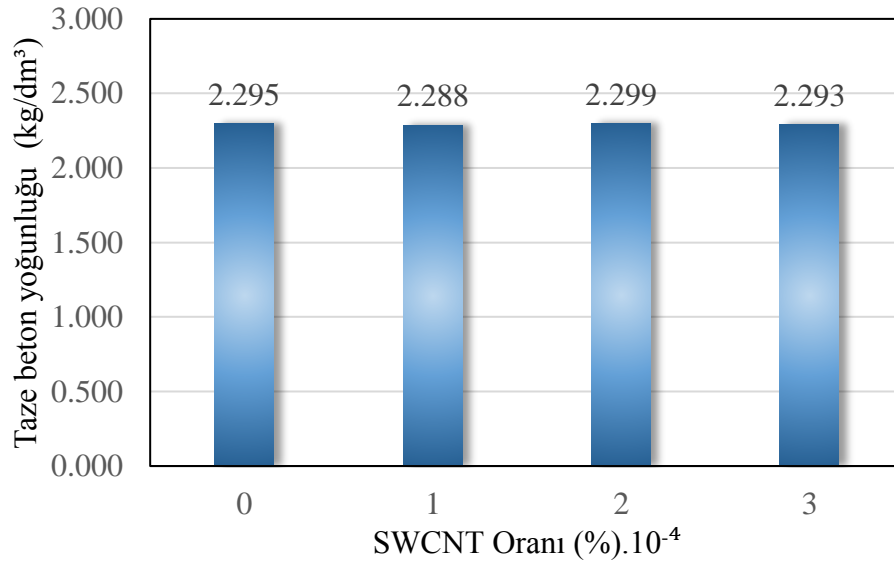
Şekil 4.2. Taze UYPB'lerin SWCNT oranı ile hava içeriği ilişki grafiği.

Taze UYPB'lerin ortalama hava içeriği değerleri incelendiğinde; CNT takviye oranındaki artış ile doğru orantılı olarak hava içeriği miktarlarının arttığı görülmektedir. En büyük hava içeriği %0,03 SWCNT takviyeli UYPB karışımında, en küçük hava içeriğinin ise

referans karışımında meydana geldiği, SWCNT takviye oranına bağlı olarak hava içeriği değerlerinin referans karışıma göre sırasıyla %32, 47, 62 oranlarında arttığı görülmektedir. Taze beton hava içeriklerimiz %3,40 ile %5,50 arasındadır. G. J. Wille ve arkadaşlarının [51] çalışmalarında belirttiği UYPB karışımlarının sahip olduğu hava içeriği miktarına göre kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde SWCNT'lerin nano boyutlu yüksek özgül yüzey alanına sahip olan nanofibril yapıda olması nedeniyle taze beton işlenebilirliklerini düşürdüğü ve dolayısıyla karışım içerisinde hapsolmuş hava miktarının SWCNT takviye oranındaki artış ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Karışımlarda oluşabilecek hava içeriğinin azaltılması için hava atıcı katkıların ve vakumlu mikserlerin kullanılabileceği, böylece SWCNT gibi nano boyutlu bir malzeme kullanımı ile oluşabilecek dezavantajın ortadan kaldırılabilceği düşünülmektedir. Bu sayede olası dayanım ve dayanıklılık kayıplarının engellenebileceği söylenebilir.

4.1.3. Taze Beton Yoğunluğu

SWCNT takviye edilen UYPB karışımlarına ait ortalama taze beton yoğunluğu değerleri Şekil 4.3'te görülmektedir. Taze beton yoğunluğu değerleri incelendiğinde SWCNT takviye oranına bağlı olarak önemli olmayan küçük değişimlerin meydana geldiği görülmektedir.

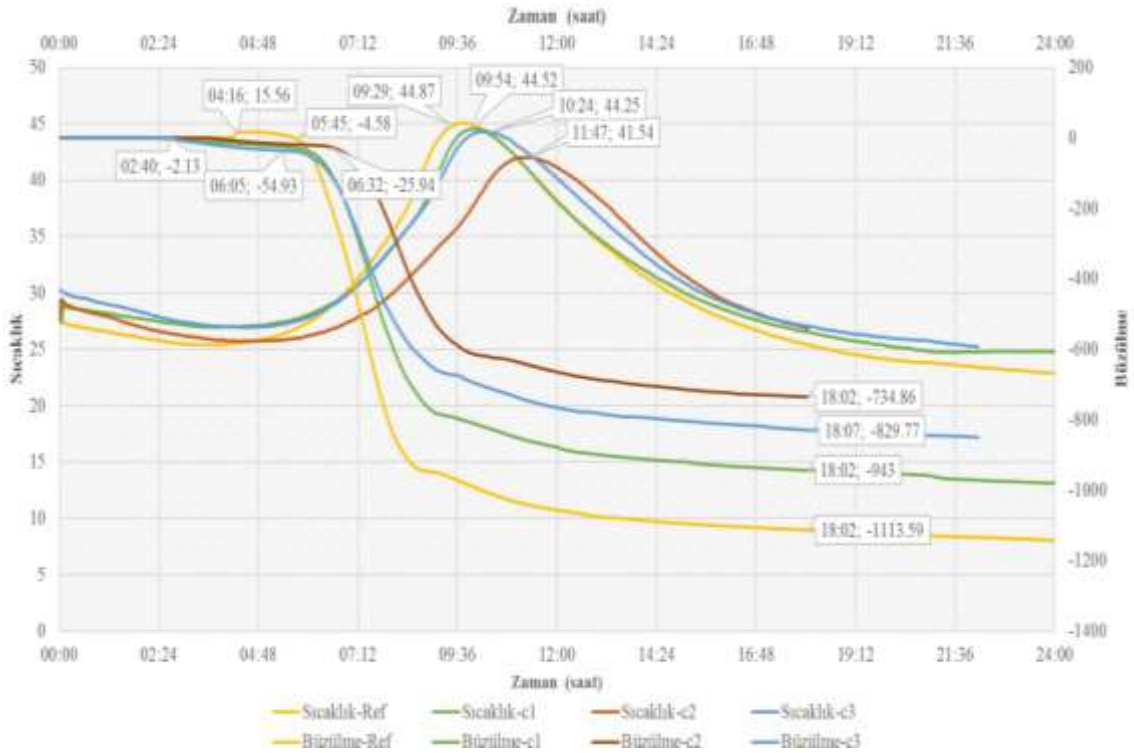


Şekil 4.3. Taze UYPB'lerin yoğunluk değerleri grafiği.

Taze beton yoğunluk değerlerinin SWCNT takviyeli karışımlarda referans numuneye göre %0,01, 0,03 takviyeli karışımda sırasıyla %0,31; 0,19 oranında daha küçük, %0,02 CNT takviyeli karışımda ise %0,17 oranında daha büyük değere sahip olduğu görülmektedir. Kullanılan SWCNT oranlarının onbinde 1, 2 ve 3 gibi düşük oranlarda olmasından dolayı taze beton yoğunluğu değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı ifade edilebilir.

4.1.4. UYPB'ların Sıcaklık Ve Büzülme Sonuçları

SWCNT takviyeli UYPB karışımlarının büzülme değerlerinin ölçümü *ASTM D2732* [323] standardına göre gerçekleştirilmiş olup, erken yaş büzülmesini ölçebilen 25x25x290 mm çelik bir kalıp sistemi içerisine beton yerleştirildikten sonra taze betona termokuple yerleştirilmiş ve büzülme değerleri ile eşzamanlı olarak beton sıcaklığı verileri ölçülmüştür. UYPB karışımlarından elde edilen erken yaş büzülme ve sıcaklık değerlerini gösteren grafik Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4. Taze betonların sıcaklık-büzülme ilişki grafiği.

UYPB karışımlarının içerisine SWCNT takviyesi ile karışımın erken yaş büzülme ve beton sıcaklığı değerlerinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. En büyük büzülme ve

sıcaklık değerlerinin referans numuneye ait olduğu, en küçük büzülme ve sıcaklık değerlerinin ise %0,02 CNT takviyeli UYPB karışımlarında meydana geldiği tespit edilmiştir. %0,01, %0,02 ve %0,03 oranında SWCNT takviyeli karışımların 18. saatteki büzülme değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla %15, %34, %25 oranında azaldığı görülmüştür. Referans numunenin büzülme başlangıcı yaklaşık 6 saat iken, C2 (%0,02 CNT'li) numunesi ise yaklaşık bir saat sonra en geç büzülme yapan numunedir. Referans numune 24 saatte yaklaşık 1150 µm büzülme yaptığı görülmektedir. En az büzülme görülen C2 numunesinin başlangıçtan itibaren 7. saatte büzülmeye başladığı, büzülmesinin büyük kısmını 3 saat içerisinde yaptığı ve bu değer ise yaklaşık 600 µm olduğu görülmektedir.

%0; 0,01; 0,02 ve 0,03 oranında SWCNT takviyeli karışımların maksimum sıcaklık değerlerinin sırasıyla 45,11; 44,57; 42,01; 44,35°C olduğu tespit edilmiştir. En büyük sıcaklık değerinin 45,11°C ile referans numunede, en küçük sıcaklık değerinin ise 42,01°C ile %0,02 oranında SWCNT takviyeli karışımda meydana geldiği görülmüştür. %0,01; 0,02 ve 0,03 oranında SWCNT takviyeli karışımların referans numuneye göre %1,2; 6,9; 1,7 oranlarında azaldığı görülmektedir.

UYPB karışımlarında SWCNT'li numunelerdeki ısı artışı Referans numuneye göre daha uzun sürede gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca SWCNT'li numunelerde daha düşük ısı artışı meydana gelmiştir. Referans numune maksimum 45 derecelik ısıya yaklaşık 10 saatte ulaşmıştır. En küçük ısı değerlerinin görüldüğü %0,02 SWCNT takviyeli karışımın 42°C'ye derece ile yaklaşık 12 saatte çıktığı görülmektedir.

Seo ve arkadaşlarının [337] yaptığı “İnce cidarlı CNT katkılı ultra yüksek performanslı betonun malzeme karakterizasyonu ve piezodirençli algılama kapasitesi değerlendirmesi” ile ilgili çalışmasında %0,1-0,5 aralığında kullandığı CNT katkı oranına bağlı olarak büzülme değerlerinin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Büzülme ölçümlerinin başlangıcında tüm numunelerin bir genişleme gösterdiği belirtilmiştir. Çok erken aşamada gözlemlenen bu genişleme, çimentoda bulunan serbest kirecin hidrasyonu ile ilişkilendirilmiştir [338], [339]. Serbest kirecin hidrasyonu, matriste gözenekler oluşturan ve toplam hacimde bir artışa neden olan $Ca(OH)_2$ 'yi oluşturarak yaklaşık 2,5 kat hacimsel artışa neden olabildiği belirtilmektedir [338].

SWCNT takviyeli UYPB karışımlarımızda ise yalnızca referans numunede erken dönem genişleme olgusuna rastlanıldığı, SWCNT takviyeli karışımlarda muhtemel hidrasyon ısısının düşme nedeniyle genişlemenin meydana gelmediği düşünülmektedir. Seo ve arkadaşlarının yaptığı çalışma sonuçlarına benzer bir şekilde genişleme sonrası, 12 saate kadar tüm örneklerde hızlı otojen büzülme gelişimi gözlenmiştir. Bu hızlı büzülme genellikle, kendi kendine kurumaya karşı çok hassas olan ve sonuç olarak yüksek otojen büzülme yol açan son derece düşük su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde meydana geldiği bilinmektedir [169].

SWCNT'nin hem büzülme hemde sıcaklık artışını engelleyici bir etki oluşturduğu, böylece otojen büzülme düşürebileceği söylenebilir. UYPB gibi yüksek oranda bağlayıcı içeren ve bundan dolayı özellikle erken yaşlarda büzülme kaynaklı çatlak riskinin yüksek olduğu betonlarda SWCNT kullanımı ile büzülme çatlaklarının engellenebileceği görülmektedir.



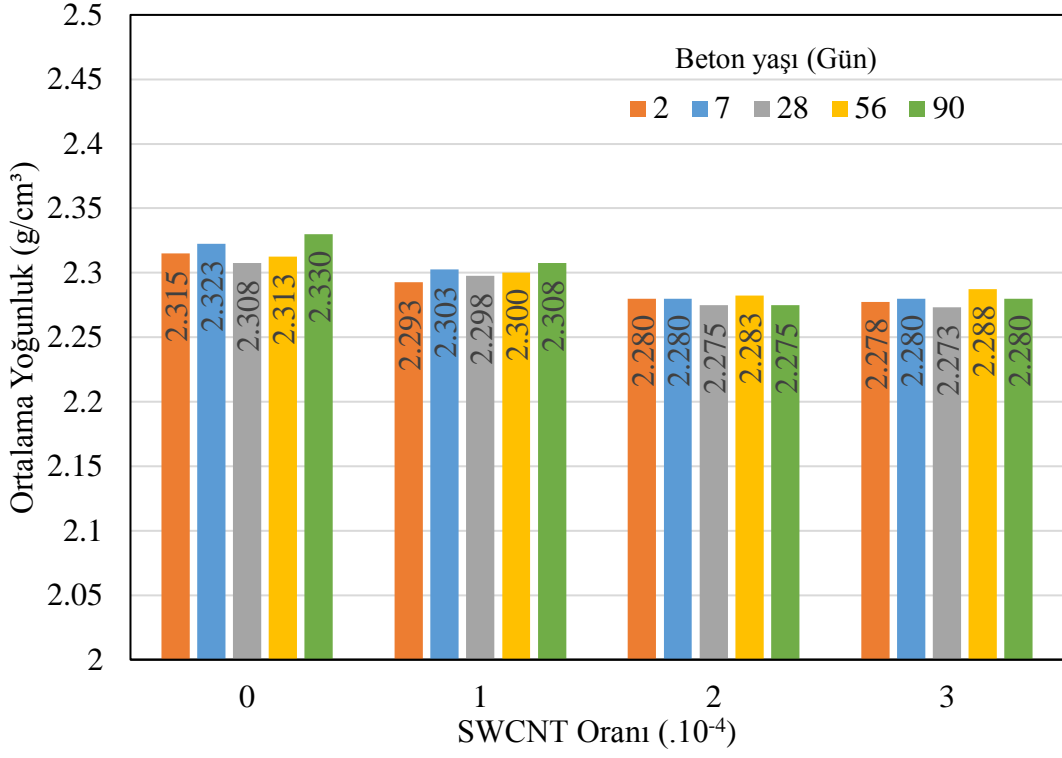
4.2. UYPB SERTLEŞMİŞ BETON ÖLÇÜMLERİ

4.2.1. Sertleşmiş Beton Yoğunluk Değerleri

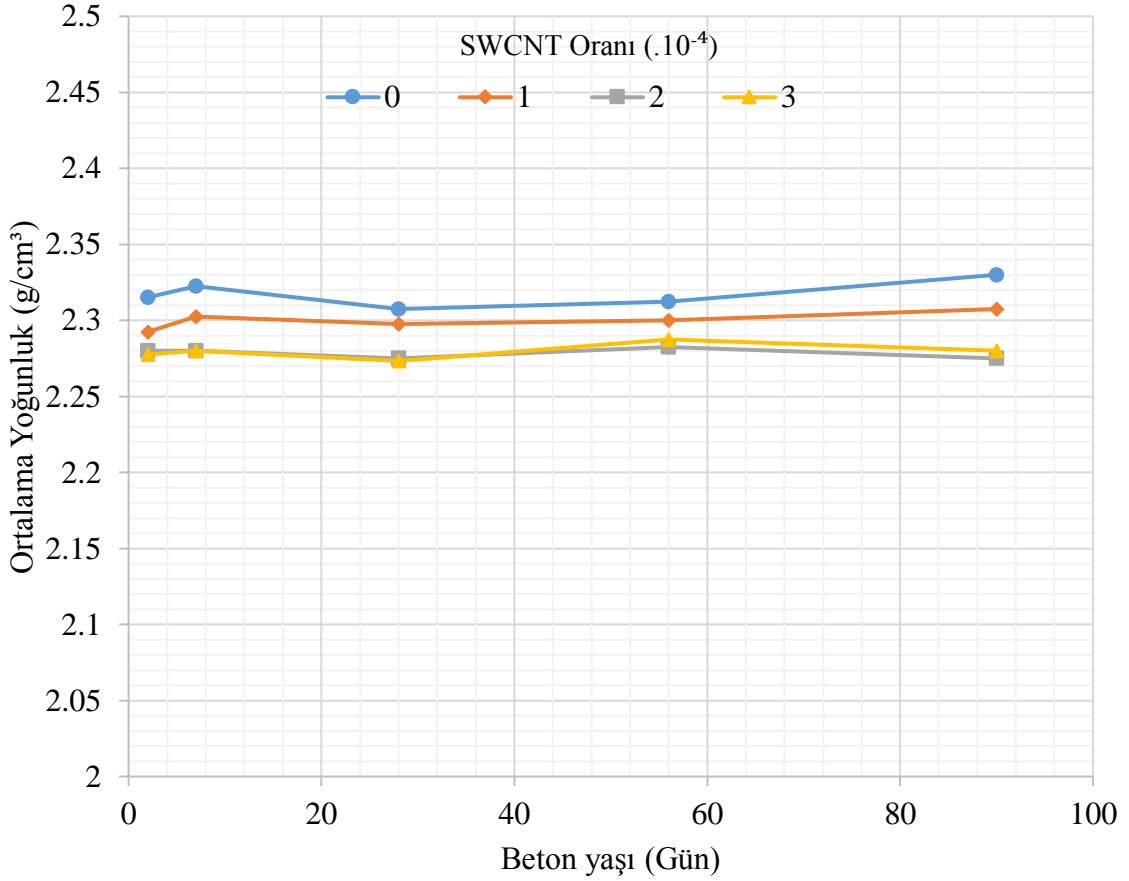
Sertleşmiş beton numunelerin yoğunluk değerleri ve açıklayıcı istatistiksel bilgiler Çizelge 4.2’de, SWCNT oranı ile sertleşmiş betonların ortalama yoğunluk değişimini gösteren grafiği Şekil 4.5’de, beton yaşı ile sertleşmiş beton yoğunluk ilişki grafiği Şekil 4.6’da görülmektedir.

Çizelge 4.2. Sertleşmiş beton numunelerin yoğunluk değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.

SWCNT Oranı ($\cdot 10^{-4}$)	Beton Yaşı (Gün)	Numune sayısı	Ortalama Yoğunluk (g/cm^3)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven aralığında ortalamanın		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst sınırı		
0	2	4	2,3150	0,01000	0,00500	2,2991	2,3309	2,31	2,33
	7	4	2,3225	0,00957	0,00479	2,3073	2,3377	2,31	2,33
	28	4	2,3075	0,01258	0,00629	2,2875	2,3275	2,29	2,32
	56	4	2,3125	0,01258	0,00629	2,2925	2,3325	2,30	2,33
	90	4	2,3300	0,01000	0,00577	2,3052	2,3548	2,32	2,34
1	2	4	2,2925	0,00957	0,00479	2,2773	2,3077	2,28	2,30
	7	4	2,3025	0,00500	0,00250	2,2945	2,3105	2,30	2,31
	28	4	2,2975	0,01258	0,00629	2,2775	2,3175	2,28	2,31
	56	4	2,3000	0,00816	0,00408	2,2870	2,3130	2,29	2,31
	90	4	2,3075	0,00500	0,00250	2,2995	2,3155	2,30	2,31
2	2	4	2,2800	0,01633	0,00816	2,2540	2,3060	2,26	2,30
	7	4	2,2800	0,01414	0,00707	2,2575	2,3025	2,27	2,30
	28	4	2,2750	0,01732	0,00866	2,2474	2,3026	2,26	2,30
	56	4	2,2825	0,00500	0,00250	2,2745	2,2905	2,28	2,29
	90	4	2,2750	0,01000	0,00500	2,2591	2,2909	2,27	2,29
3	2	4	2,2775	0,00957	0,00479	2,2623	2,2927	2,27	2,29
	7	4	2,2800	0,00816	0,00408	2,2670	2,2930	2,27	2,29
	28	4	2,2733	0,00577	0,00333	2,2590	2,2877	2,27	2,28
	56	4	2,2875	0,00500	0,00250	2,2795	2,2955	2,28	2,29
	90	4	2,2800	0,01414	0,01000	2,1529	2,4071	2,27	2,29



Şekil 4.5. SWCNT oranı ile sertleşmiş beton yoğunluk ilişkisi grafiği.



Şekil 4.6. Beton yaşı ile sertleşmiş beton yoğunluk ilişkisi grafiği.

SWCNT takviyeli UYPB'lerin yoğunluk değerleri incelendiğinde;

- Yoğunluk değerlerinin beton yaşına bağlı olarak anlamlı bir değişimin olmadığı, ancak SWCNT oranına bağlı olarak anlamlı bir değişimin olduğu,
- SWCNT oranındaki artışa bağlı olarak yoğunluk değerlerinin azaldığı,
- En büyük yoğunluk değerlerinin 90. günde $2,33 \text{ g/cm}^3$ ile referans numunede, en küçük değer ise 28. günde $2,273 \text{ g/cm}^3$ ile CNT3 numunesinde olduğu,
- En büyük yoğunluk değeri ile en küçük yoğunluk değeri arasında %2,5 gibi küçük bir fark olduğu,
- Sertleşmiş numunelerin 28 günlük yoğunluk değerleri incelendiğinde referans numunenin en yüksek, SWCNT miktarı en fazla olan CNT3 numunesinde en düşük yoğunlukta olduğu,
- 28. gündeki betonlarda referans numune $2,308 \text{ g/cm}^3$ ile en büyük yoğunluğa sahip iken CNT3 numunesinin $2,273 \text{ g/cm}^3$ ile en küçük yoğunluk değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %1,51 oranında azalma olduğu,
- 90. gündeki betonların yoğunluk değerlerinin referans numuneye göre CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde sırasıyla %0,94; 2,36 ve 2,14 oranında azaldığı,
- Farklı yaşlardaki UYPB numunelerinin kendi içerisindeki yoğunluk değerlerinin %0,2-0,6 aralığında değişim gösterdiği, çok küçük oranda meydana gelen bu değişimin lif homojenizasyonundaki farklılıklardan kaynaklanabileceği, Buna karşın artan SWCNT miktarı ile beton yoğunluğunun bir miktar düşme eğiliminde olduğu,
- Sertleşmiş numunelerdeki beton yoğunluğu en belirgin olarak referans numunede arttığı, SWCNT'li numunelerde sertleşmiş beton yoğunluğu artan CNT miktarına karşın düştüğü, CNT takviye oranındaki artış nedeniyle işlenebilirlikteki azalma nedeniyle betonun boşluk yapısında meydana gelen artış nedeniyle yoğunluk değerlerinde azalmanın meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir.

UYPB'lerin uluslararası bir standardı olmasa da yoğunluklarının Ingo vd. [175]'e göre $2430-2480 \text{ kg/m}^3$, Kosmatka ve diğ., Ma ve diğ. (2003), Teichmann ve Schmidt'e göre $2320-2760 \text{ kg/m}^3$ arasında kabul edilebileceği belirtilmektedir [163]. Referans UYPB'mizin 28 günlük yoğunluğu $2,31 \text{ kg/m}^3$ olması bir miktar düşük olsa da farkın

UYPB'lerin üretiminde kullanılan basınç uygulamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sadrekarimi [162]'ye göre beton üretiminde sertleşmenin erken dönemlerindeki ön yüklem basıncı karışım yoğunluğunu %5 oranında artırmaktadır [44].

Literatürdeki bazı çalışmalarda, CNT'lerin dolgu ve çekirdeklenme etkileri çimento matrisinin yoğunluğunun artırabilirliği hakkında bilgi verirken [340], Chaipanich vd'nin [302] çalışmalarda MWCNT takviyesinin beton yoğunluğunu artırdığı, Hu ve ark.'nın [303] çalışmasına göre yoğunluğu azalttığı ve Del ve ark. [304]'a göre de etkisiz kaldığı bildirilmektedir.

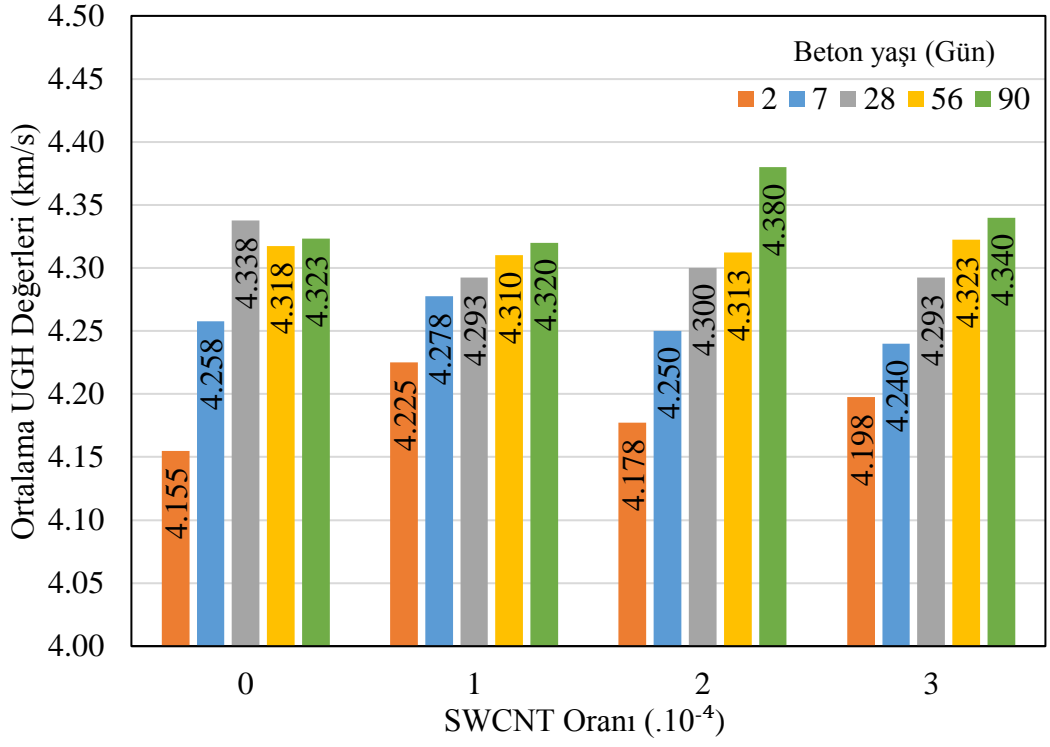
Çalışmamızda SWCNT takviye oranına bağlı olarak hava içeriği değerlerinin referans karışıma göre sırasıyla %32, 47, 62 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Taze beton hava içeriğindeki artış ile doğru orantılı olarak sertleşmiş UYPB'lerin yoğunluk değerlerinde bir azalmanın olduğu görülmektedir.

4.2.2. Ultrases Geçiş Hızı (UGH) Ölçümü

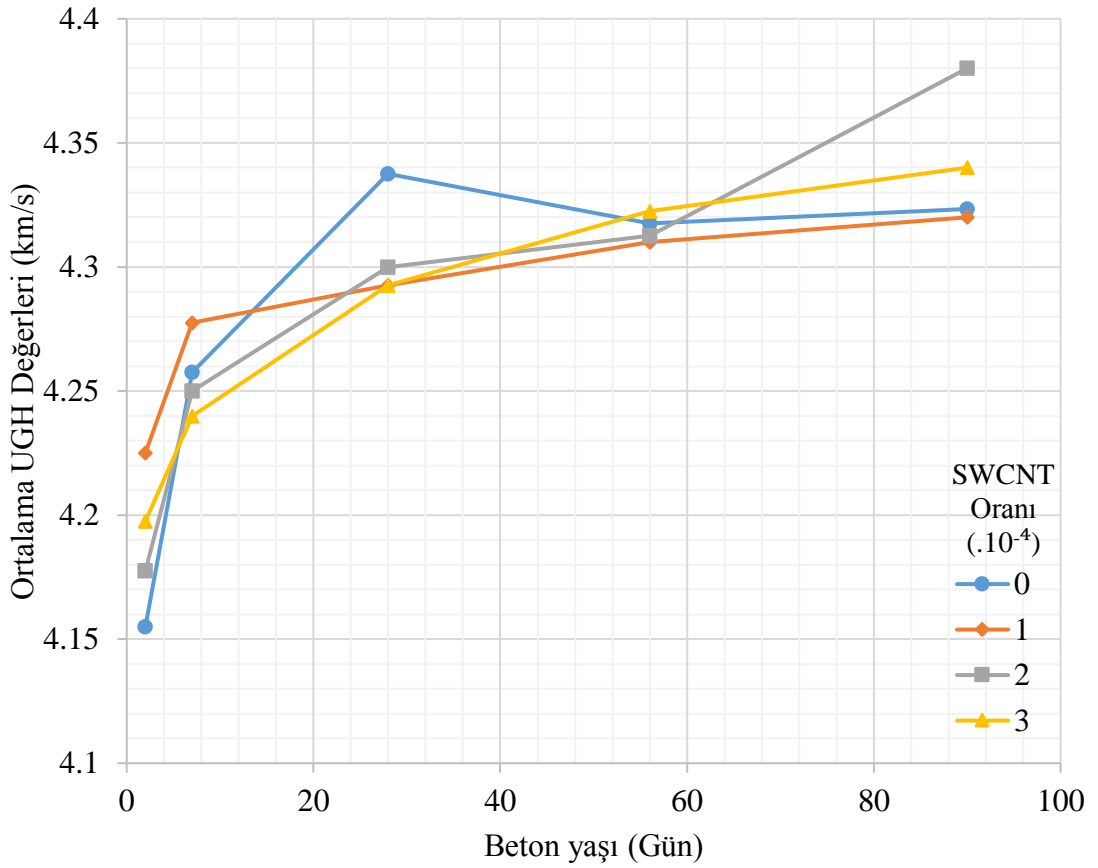
UYPB numunelerin UGH değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel bilgiler Çizelge 4.3'te, SWCNT oranı ile sertleşmiş betonların ortalama UGH değişimini gösteren grafik Şekil 4.7'de, beton yaşı ile UGH ilişki grafiği ise Şekil 4.8'de görülmektedir.

Çizelge 4.3. UGH değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.

SWCNT Oranı (.10 ⁻⁴)	Beton Yaşı (Gün)	Numune sayısı	Ortalama UPV Değerleri (km/s)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven aralığında ortalamannın		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst sınırı		
0	2	4	4,1550	0,01291	0,00645	4,1345	4,1755	4,14	4,17
	7	4	4,2575	0,02986	0,01493	4,2100	4,3050	4,23	4,30
	28	4	4,3375	0,01500	0,00750	4,3136	4,3614	4,32	4,35
	56	4	4,3175	0,01258	0,00629	4,2975	4,3375	4,30	4,33
	90	4	4,3233	0,02309	0,01333	4,2660	4,3807	4,31	4,35
1	2	4	4,2250	0,02082	0,01041	4,1919	4,2581	4,20	4,25
	7	4	4,2775	0,03096	0,01548	4,2282	4,3268	4,25	4,32
	28	4	4,2925	0,00957	0,00479	4,2773	4,3077	4,28	4,30
	56	4	4,3100	0,03162	0,01581	4,2597	4,3603	4,27	4,34
	90	4	4,3200	0,02160	0,01080	4,2856	4,3544	4,30	4,35
2	2	4	4,1775	0,03304	0,01652	4,1249	4,2301	4,14	4,22
	7	4	4,2500	0,02000	0,01155	4,2003	4,2997	4,23	4,27
	28	4	4,3000	0,02160	0,01080	4,2656	4,3344	4,28	4,33
	56	4	4,3125	0,02217	0,01109	4,2772	4,3478	4,29	4,34
	90	4	4,3800	0,04082	0,02041	4,3150	4,4450	4,32	4,41
3	2	4	4,1975	0,00957	0,00479	4,1823	4,2127	4,19	4,21
	7	4	4,2400	0,02449	0,01225	4,2010	4,2790	4,22	4,27
	28	4	4,2925	0,02754	0,01377	4,2487	4,3363	4,26	4,32
	56	4	4,3225	0,02754	0,01377	4,2787	4,3663	4,29	4,35
	90	4	4,3400	0,02653	0,01342	4,3400	4,3400	4,32	4,36



Şekil 4.7. SWCNT oranı ile UPV değerleri ilişki grafiği.



Şekil 4.8. UGH değerleri ile beton yaşı ilişki grafiği.

UGH değerlerinin SWCNT miktarına bağlı olarak anlamlı bir değişiminin olmadığı ancak beton yaşına bağlı olarak UGH değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. UGH değerleri incelendiğinde;

- 28. gündeki UYPB'lerde 4,338 km/s ile en büyük UGH değerleri referans numunesine ait iken, en küçük UGH değerlerinin ise 4,293 km/s ile CNT1 ve CNT3 numunelerinde meydana geldiği,
- 28. Gündeki UGH değerlerinin CNT1, CNT2 ve CNT 3 numunelerinde referans numuneye göre sırasıyla %1,04; 0,87 ve 1,04 oranlarında azaldığı
- CNT1 ve CNT3 numunelerinin UGH değerlerinin referans numuneye göre %1 oranında azaldığı,
- 90. gündeki UYPB'lerde 4,380 km/s ile en büyük UGH değerlerinin CNT2 numunesine ait iken, en küçük UGH değerinin ise 4,320 km/s ile CNT1 numunesinde meydana geldiği,
- CNT2'nin CNT1'e göre UGH değerinin %1,4 oranında daha büyük değere sahip olduğu,
- Referans numunenin UGH değerleri 56. ve 90. günlerde bir miktar düşüş gösterirken, CNT li tüm numunelerin UGH değerlerinin ise lineer olarak artış gösterdiği, Beton yaşına bağlı olarak UGH değerlerinde anlamlı değişimlerin olduğu, tüm CNT oranlarında yaşa bağlı olarak UGH değerlerinin artış gösterdiği,
- CNT0, CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde 2. ve 90. gün UGH değerleri arasında sırasıyla %4,04; 2,25; 4,83 ve 3,38 oranlarında artış meydana geldiği görülmektedir.

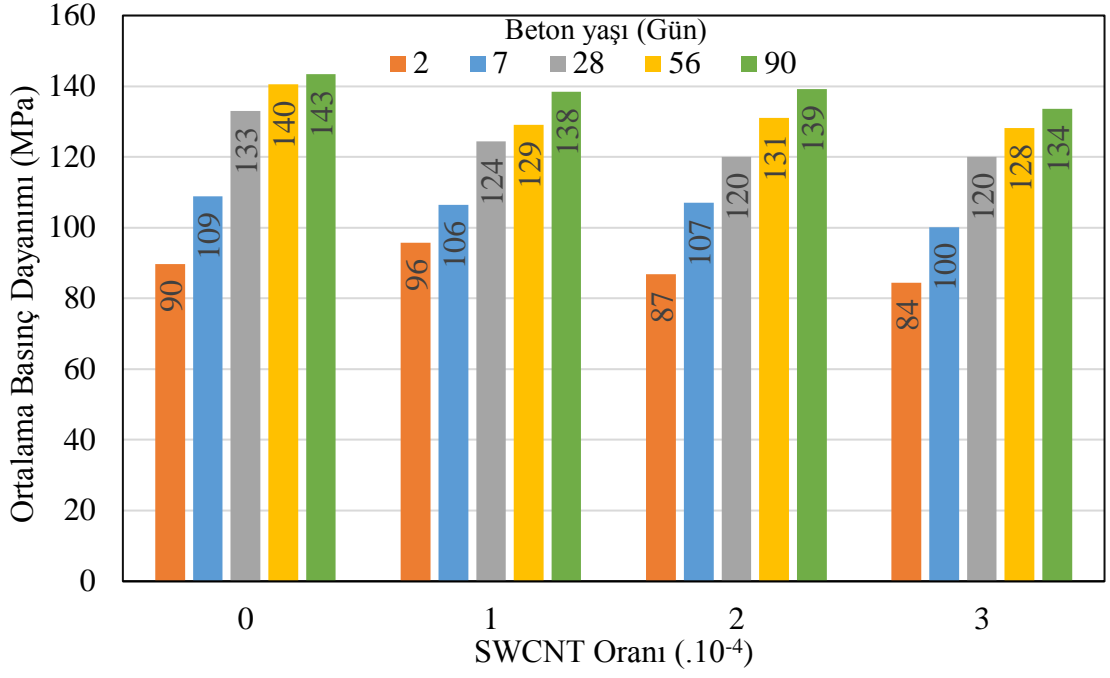
Rroszila vd. [341] 40-100MPa aralığındaki yüksek dayanımlı betonlar üzerinde yaptığı UGH ölçümlerinde 3,74-4,42 km/s UGH değerleri elde etmiştir [305]. Çalışmamızda elde ettiğimiz UGH değerlerinin literatürle uyumlu olduğu, SWCNT oranına bağlı olarak 28 günlük numunelerde meydana gelen sınırlı azalmanın yoğunluk değerlerinde azalma ile doğru orantılı olduğu SWCNT kullanımı ile beton kıvamında meydana gelen azalma ve hapsolmuş hava miktarındaki artış nedeniyle UGH değerlerinde bir miktar azalmanın meydana geldiği görülmüştür.

4.2.3. Basınç Dayanımı Sonuçları

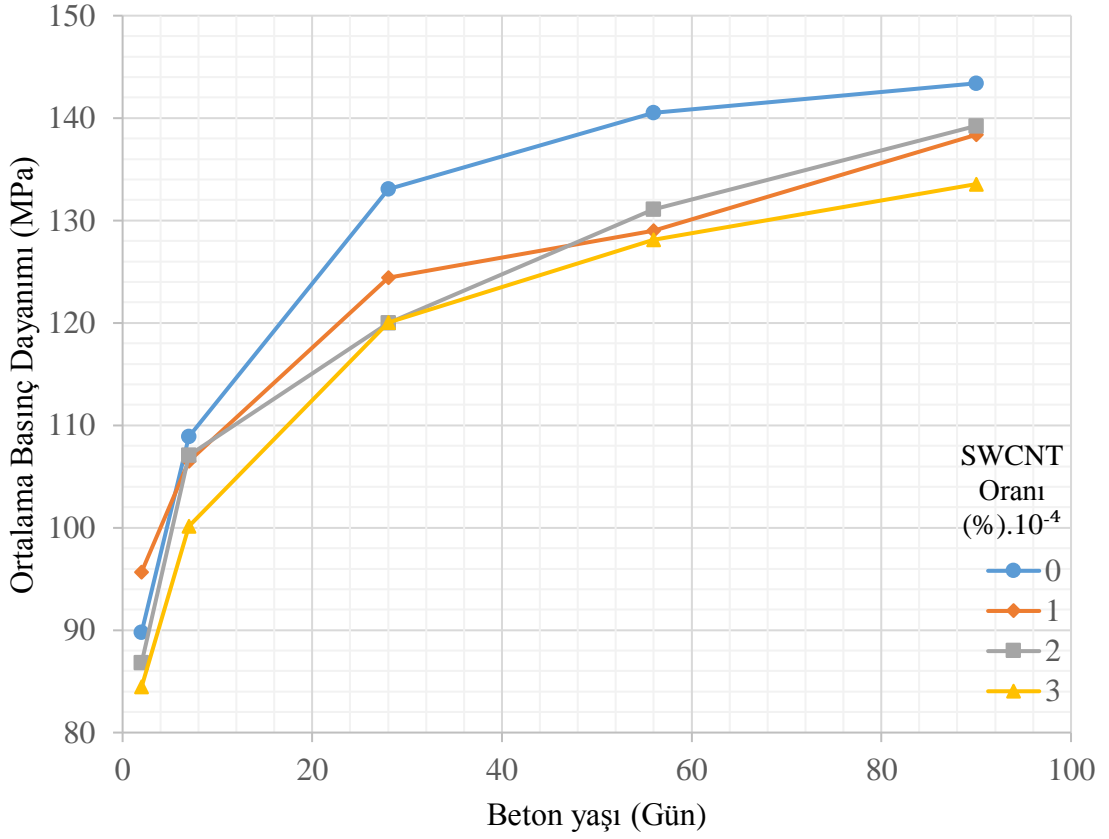
Beton basınç dayanımı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistiksel bilgiler Çizelge 4.4'te, SWCNT oranına bağlı olarak ortalama basınç dayanımı değerlerindeki değişim Şekil 4.9'da, beton yaşı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki grafiği ise Şekil 4.10'da görülmektedir.

Çizelge 4.4. Beton dayanımı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistiksel veriler.

SWCNT Oranı ($\cdot 10^{-4}$)	Beton Yaşı (Gün)	Numune adedi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven aralığında ortalamanın		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst sınırı		
0	2	3	89,7730	1,83014	0,91507	86,8608	92,6852	88,26	92,22
	7	3	108,9150	0,70569	0,49900	102,5746	115,2554	108,42	109,41
	28	3	133,0628	4,73986	2,36993	125,5206	140,6049	128,34	137,40
	56	3	140,4905	0,16028	0,08014	140,2355	140,7455	140,35	140,71
	90	3	143,3950	1,84838	1,30700	126,7880	160,0020	142,09	144,70
1	2	3	95,6720	6,52167	3,76529	79,4713	111,8727	88,14	99,52
	7	3	106,4940	1,23319	0,87200	95,4142	117,5738	105,62	107,37
	28	3	124,4075	2,27362	1,13681	120,7897	128,0253	122,77	127,74
	56	3	129,0255	6,29537	4,45150	72,4638	185,5872	124,57	133,48
	90	3	138,3688	3,80345	1,90172	132,3166	144,4209	136,05	144,05
2	2	3	86,7827	3,32819	1,92153	78,5150	95,0504	82,99	89,22
	7	3	107,0750	4,02496	2,32381	97,0765	117,0735	103,11	111,16
	28	3	120,0125	6,77502	3,38751	109,2319	130,7931	112,25	125,88
	56	3	131,1085	6,40085	3,20043	120,9233	141,2937	122,88	137,21
	90	3	139,2360	4,21601	2,10801	132,5274	145,9446	134,25	143,70
3	2	3	84,4438	2,58555	1,29277	80,3296	88,5579	80,78	86,84
	7	3	100,1617	3,10277	1,79139	92,4540	107,8694	98,26	103,74
	28	3	120,0225	5,98384	2,99192	110,5009	129,5441	114,20	125,44
	56	3	128,1360	1,95609	1,12935	123,2768	132,9952	126,38	130,24
	90	3	133,5530	0,42285	0,29900	129,7538	137,3522	133,25	133,85



Şekil 4.9. SWCNT oranı ile basınç dayanımı ilişki grafiği.



Şekil 4.10. Beton yaşı ile basınç dayanımı ilişki grafiği.

SWCNT ve beton yaşına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinde önemli değişimlerin meydana geldiği, SWCNT miktarındaki artış ile ters orantılı olarak basınç dayanımı değerlerinin azaldığı, beton yaşındaki artış ile doğru orantılı olarak basınç dayanımı değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür. Ortalama basınç dayanımı değerleri incelendiğinde;

- 28. Gündeki basınç dayanımı değerlerinde 133MPa ile en büyük basınç dayanımı değerinin referans numuneye ait olduğu, en küçük basınç dayanımının ise 120MPa ile CNT2 ve CNT3 numunelerinde meydana geldiği,
- Referans numuneye göre CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde basınç dayanımı değerlerinin sırasıyla %6,8; 9,8 ve 9,8 oranlarında azalmanın meydana geldiği,
- 90. Gündeki basınç dayanımı değerlerinde 143MPa ile en büyük basınç dayanımı değerinin referans numuneye ait olduğu, en küçük basınç dayanımının ise 134MPa ile CNT3 numunesine ait olduğu,
- Referans numuneye göre CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde basınç dayanımı değerlerinin sırasıyla %3,5; 2,8 ve 6,3 oranlarında azalmanın meydana geldiği,
- 2. gündeki numuneler hariç tüm yaş gruplarında SWCNT takviyeli UYPB'lerde basınç dayanımı değerlerinin referans numuneye göre daha düşük değerler aldığı,
- Tüm CNT oranlarında beton yaşına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerin artış gösterdiği, CNT0, CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde 2. ve 90. gün basınç dayanımı değerleri arasında sırasıyla %58,8; 43,8; 59,8 ve 59,5 oranlarında artış meydana geldiği,
- Erken yaşlarda basınç dayanımı değerlerindeki artışın referans numunede CNT takviyeli UYPB'lere göre daha yüksek olduğu,
- 90 günlük nihai basınç dayanımı değerleri baz alındığında referans, CNT1, CNT2, ve CNT3 numunelerinin 28.gündeki dayanım değerleri 90. Gündeki dayanımlarının sırasıyla %93; 90; 86; 89'una ulaştığı,
- SWCNT takviyesi ile beton iç sıcaklıklarında meydana gelen azalma ile doğru orantılı olarak CNT takviyeli betonların dayanım gelişimlerinin referans numuneye göre daha yavaş meydana geldiği söylenebilir.

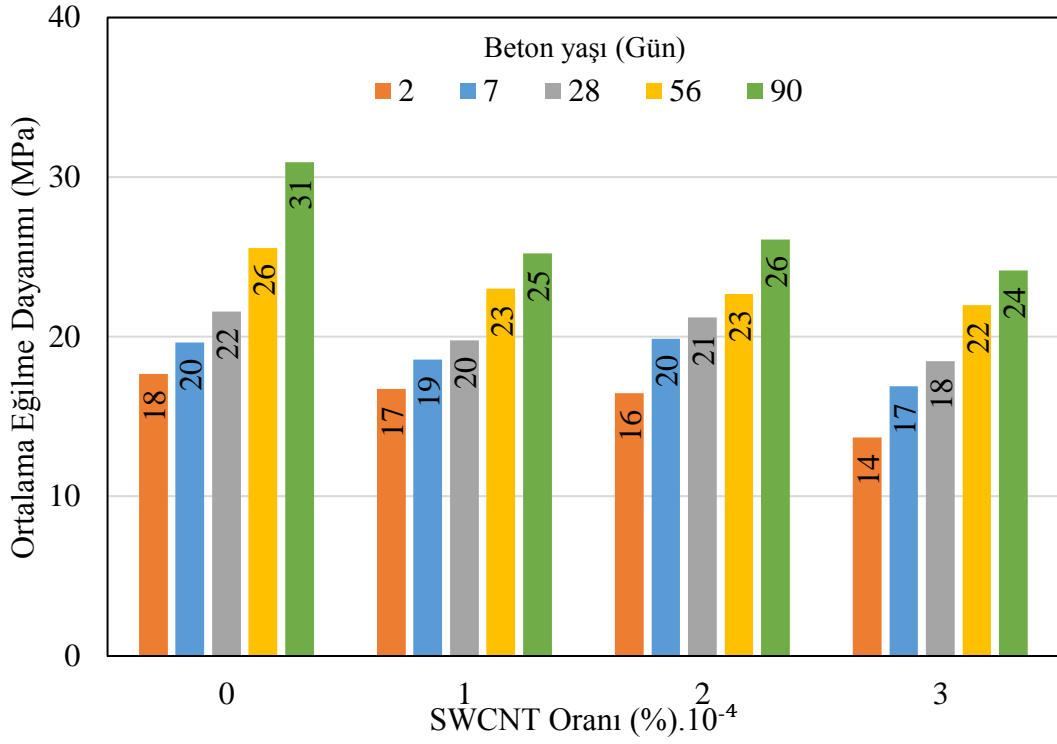
Kang vd. [342], çimento ağırlığına göre %0; 0,02; 0,04 ve 0,06 oranlarında SWCNT katkılı normal dayanımlı betonların dayanımını araştırdıkları çalışmalarında, iyonik olmayan dispersiyon ajanı kullanıldığında hem basınç hem de eğilme mukavemetinin arttığı, %0,02 ve 0,04 SWCNT oranlarında herhangi bir artış elde edemezken, %0,06 oranında SWCNT kullanımında 18,77MPa'dan 22,71MPa'a çıkararak %20 oranında bir dayanım artışı sağlanmıştır. Dayanım artışını dispersiyon ajanı olmadan SWCNT oranındaki artışın mukavemetin azalmasına neden olduğu tespit etmişlerdir. Çalışmamızda SWCNT oranı takviye edilirken CNT nin etkisini gözlemleyebilmek için kıvamın sabit tutulması veya dispersiyonun arttırılması için herhangi bir katkı maddesi kullanılmamıştır. Kıvamın sabit tutulması amacıyla CNT takviye oranı artışına paralel olarak süperakışkanlaştırıcı katkı oranında artışa gidilmiş olsaydı, CNT takviyesi ile muhtemelen hava boşluklarının daha az olduğu ve dolayısıyla daha yüksek yoğunluk ve dayanım değerlerin elde edilmesi mümkün olabilecekti. Ayrıca Kang vd. [342] çalışmalarında dayanım artışı sağladıkları SWCNT oranının bizim çalışmamızda kullanılan miktarın 2 katı olduğu görülmektedir. Diğer taraftan düşük ve normal dayanımı betonlar üzerinde SWCNT'nin dayanım arttırma etkisinin görülebildiği ancak UYPB gibi 120MPa ve üzeri dayanım değerlerine sahip betonlarda %0,01-0,03 gibi düşük oranlarda kullanımında dayanım arttırma etkisinin görülmesinin mümkün olmadığı söylenebilir. Keriené vd. [343], MWCNT'lerin otoklavlanmış ve otoklavlanmamış gaz beton üzerindeki etkisini ayrı ayrı incelemiştirlerdir. Farklı MWCNT oranlarına sahip karışım sonuçlarına göre maksimum basınç dayanımının, %11,03 artışla, ağırlıkça %0,02 nanotüp eklenen karışıma ait olduğu bildirilmiştir. Musso vd. [344], CNT'lerin mekanik özelliklerde olumsuz etkisi olduğunu belirtmektedir [305]. Kompozitlerin dayanımındaki azalma nedeni işlenebilirliğin düşmesinden kaynaklanabilir. Bu durum hava içeriği ile yoğunluk sonuçlarında da görülebilir. Basınç dayanımı değerinde SWCNT takviye oranına bağlı olarak 28. günde %6,8-9,8 oranlarında, 90. günde ise %2,8-6,3 oranında bir azalmanın meydana geldiğini, bu sonuçların yoğunluk ve UGH değerlerindeki azalış ile uyumlu olduğunu söyleyebiliriz. Daha yüksek SWCNT katkı oranında kullanılacak hava atıcı ve süperakışkanlaştırıcılar ile kıvamı arttırılmış düşük hava içeriğine ve yüksek yoğunluğa sahip dayanımı arttırılmış UYPB'lerin elde edilebileceği değerlendirilmektedir.

4.2.4. Eğilme Dayanımı Sonuçları

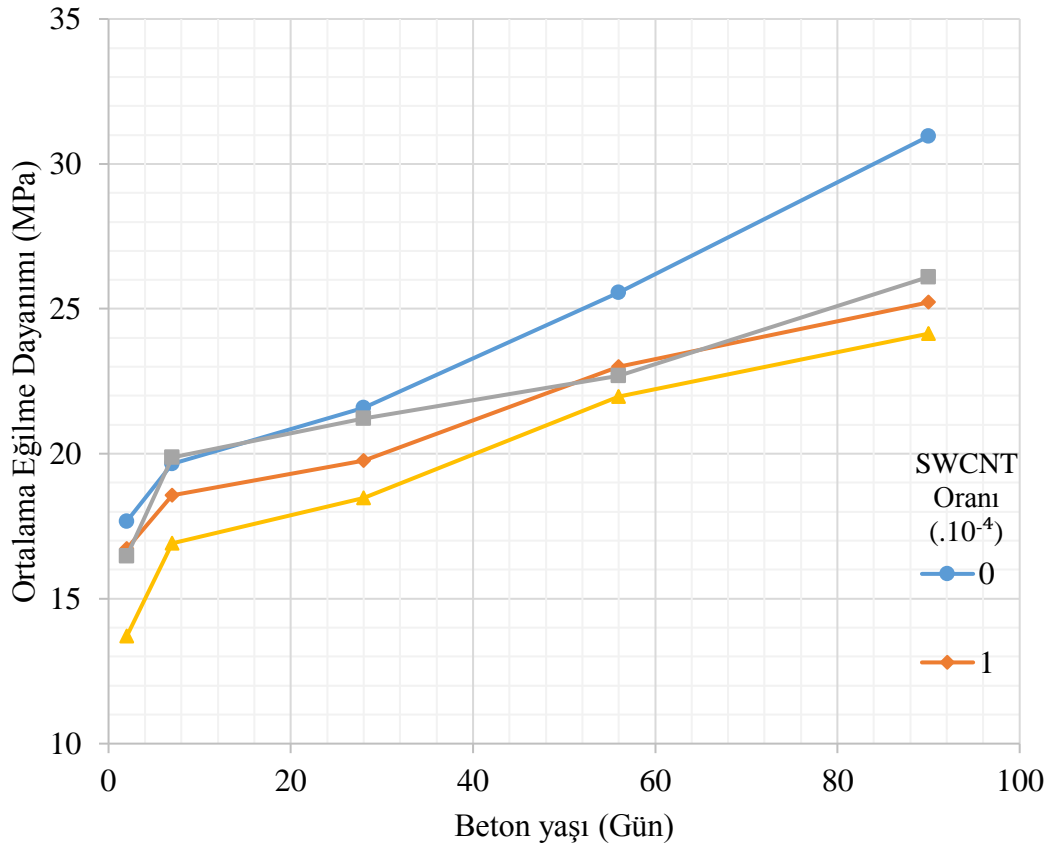
Beton eğilme dayanımı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistiksel bilgiler Çizelge 4.5'te, SWCNT oranına bağlı olarak ortalama eğilme dayanımı değerlerindeki değişim Şekil 4.11'de, beton yaşı ile eğilme dayanımı değerleri arasındaki ilişki grafiği ise Şekil 4.12'de görülmektedir.

Çizelge 4.5. Eğilme dayanımı deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistiksel veriler.

SWCNT Oranı ($\cdot 10^{-4}$)	Beton Yaşı (Gün)	Numune adedi	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven aralığında ortalamamın		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst sınırı		
0	2	3	17,6705	0,35216	0,20332	16,7957	18,5453	17,40	18,07
	7	3	19,6455	1,43052	0,82591	16,0918	23,1991	18,07	20,87
	28	3	21,5886	0,46926	0,27093	20,4229	22,7543	21,10	22,04
	56	3	25,5588	2,68982	1,55297	18,8769	32,2407	22,45	27,20
	90	3	30,9517	2,99437	1,72880	23,5133	38,3901	27,63	33,45
1	2	3	16,7244	1,41542	0,81719	13,2083	20,2405	15,17	17,94
	7	3	18,5612	0,25870	0,14936	17,9186	19,2039	18,34	18,85
	28	3	19,7637	0,59034	0,34083	18,2972	21,2302	19,37	20,44
	56	3	23,0083	1,61736	0,93378	18,9905	27,0260	21,14	24,04
	90	3	25,2233	0,76732	0,44302	23,3171	27,1294	24,47	26,00
2	2	3	16,4653	1,40187	0,80937	12,9829	19,9478	14,92	17,66
	7	3	19,8704	0,59674	0,34453	18,3880	21,3528	19,29	20,48
	28	3	21,2208	0,29188	0,16851	20,4957	21,9458	20,94	21,52
	56	3	22,6816	1,37270	0,79253	19,2716	26,0916	21,88	24,27
	90	3	26,1004	0,26867	0,15512	25,4330	26,7678	25,91	26,41
3	2	3	13,7034	1,20250	0,69426	10,7162	16,6905	12,32	14,44
	7	3	16,9028	0,57544	0,33223	15,4734	18,3323	16,26	17,38
	28	3	18,4757	0,95030	0,54866	16,1150	20,8364	17,92	19,57
	56	3	21,9680	0,73703	0,42553	20,1371	23,7989	21,47	22,82
	90	3	24,1438	0,95247	0,54991	21,7777	26,5099	23,08	24,91



Şekil 4.11. SWCNT oranı ile eğilme dayanımı ilişki grafiği.



Şekil 4.12. Beton yaşı ile eğilme dayanımı ilişki grafiği.

SWCNT ve beton yaşına bağlı olarak eğilme dayanımı değerlerinde önemli değişimlerin meydana geldiği, SWCNT miktarındaki artış ile ters orantılı olarak eğilme dayanımı değerlerinin azaldığı, beton yaşındaki artış ile doğru orantılı olarak eğilme dayanımı değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür. Ortalama eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde;

- 28. gündeki eğilme dayanımı değerlerinde 22MPa ile en büyük basınç dayanımı değerinin referans numuneye ait olduğu, en küçük eğilme dayanımının ise 18MPa ile CNT3 numunesinde meydana geldiği,
- Referans numuneye göre CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde eğilme dayanımı değerlerinin sırasıyla %9,1; 4,5 ve 18,2 oranlarında azalmanın meydana geldiği,
- 90. gündeki eğilme dayanımı değerlerinde 31MPa ile en büyük basınç dayanımı değerinin referans numuneye ait olduğu, en küçük basınç dayanımının ise 24MPa ile CNT3 numunesine ait olduğu,
- Referans numuneye göre CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde basınç dayanımı değerlerinin sırasıyla %19,4; 16,2 ve 22,6 oranlarında azalmanın meydana geldiği,
- Tüm CNT takviyeli UYPB'lerde eğilme dayanımı değerlerinin referans numuneye göre daha düşük değerler aldığı,
- Tüm CNT oranlarında beton yaşına bağlı olarak eğilme dayanımı değerlerin artış gösterdiği,
- CNT0, CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde 2. ve 90. gün eğilme dayanımı değerleri arasında sırasıyla %72,2; 47,1; 62,5 ve 71,4 oranlarında artış meydana geldiği,
- Bütün CNT takviyeli UYPB'lerin erken yaş olan 2. günden 7. güne kadar olan dayanım artış hızının daha fazla olduğu, 7. Günden sonra dayanım artışının lineer bir şekilde devam ettiği,
- 90 günlük nihai eğilme dayanımı değerleri baz alındığında CNT0, CNT1, CNT2, ve CNT3 numunelerinin 28.gündeki dayanım değerleri 90. gündeki dayanımlarının sırasıyla %64,5; 80; 81; 75'ine ulaştığı,
- SWCNT takviyesi ile beton iç sıcaklıklarında ve basınç dayanımlarında meydana

gelen azalma ile doğru orantılı olarak CNT takviyeli betonların eğilme dayanım değerlerinin azaldığı görülmüştür.

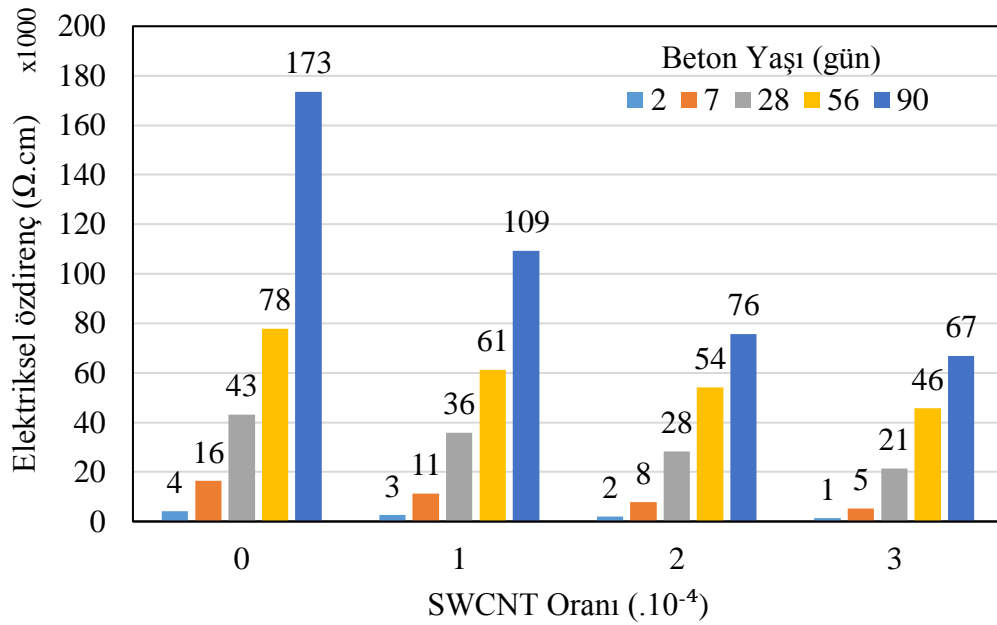
CNT'lerin çimentolu malzemelerin eğilme dayanımı üzerinde olumlu etkileri yanında bazı tutarsızlıklar da araştırmacılar tarafından bildirilmektedir. CNT takviyeli çimentolu malzemelerde, CNT ile çimento arasındaki bağ, eğilme dayanımı için en önemli faktördür. Bununla birlikte, CNT'nin dispersiyon tipi, kalitesi ve özelliği, bağ mekanizmasını önemli ölçüde etkileyebilir [305]. Diğer taraftan liflerin UYPB karışımları içerisinde homojen dağılımının [28], [33], ve yönelimlerinin eğilme dayanımı değerleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu bilinmektedir [101], [102]. Eğilme dayanımı değerlerinde SWCNT oranındaki artışa bağlı olarak yoğunluk, UGH ve basınç dayanımı değerlerindeki azalmaya benzer bir dayanım kaybının meydana geldiği, bu dayanım kaybının en yüksek CNT3 oranında bile 28. Günde %18,2, 90. Günde ise %22,6 oranında meydana geldiği görülmektedir. İşlenebilirliğin sabit tutulduğu UYPB karışımları ile daha düşük hava içeriğine sahip betonların üretilmesi ile SWCNT'nin eğilme dayanımları üzerine olan katkısının daha belirgin bir şekilde değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

4.2.5. Elektriksel Özdirenç Ölçümleri

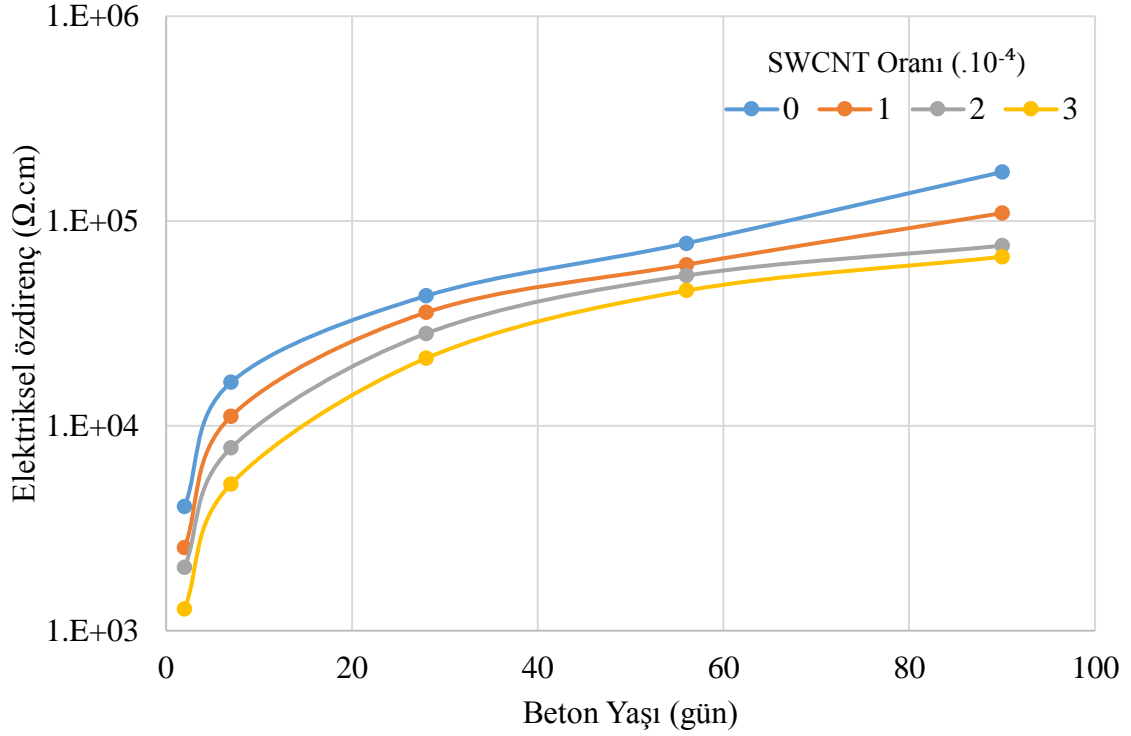
SWCNT takviyeli UYPB'lerin elektriksel özdirenç değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler Çizelge 4.6'da, SWCNT oranına bağlı olarak ortalama elektriksel özdirenç değerlerindeki değişim grafiği Şekil 4.13'te, beton yaşı ile elektriksel özdirenç değerleri arasındaki ilişki grafiği ise Şekil 4.14'te görülmektedir.

Çizelge 4.6. Elektriksel özdirenç değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.

SWCNT Oranı ($\cdot 10^{-4}$)	Beton Yaşı (Gün)	Numune adedi	Ortalama Özdirenç (Ωcm)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven aralığında ortalamannın		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst sınırı		
0	2	4	4052,96	312,046	156,023	3556,43	4549,50	3799	4492
	7	4	16350,84	2120,043	1060,022	12977,38	19724,30	14085	18799
	28	4	43140,85	3631,897	1815,948	37361,70	48920,01	38560	46956
	56	4	77909,52	6396,659	3198,330	67731,01	88088,04	71863	84227
	90	4	173455,82	38168,009	22036,310	78641,23	268270,41	133084	208951
1	2	4	2550,85	516,189	258,094	1729,48	3372,22	2197	3316
	7	4	11152,45	2139,064	1069,532	7748,72	14556,18	8575	13511
	28	4	35792,91	2129,193	1064,597	32404,88	39180,93	32615	37033
	56	4	61243,52	1812,310	906,155	58359,73	64127,31	59080	63491
	90	4	109342,76	13511,972	6755,986	87842,20	130843,32	100015	129414
2	2	4	2042,36	106,434	53,217	1873,00	2211,72	1932	2166
	7	4	7813,83	676,649	338,324	6737,13	8890,53	7233	8574
	28	4	28262,55	431,623	215,811	27575,74	28949,36	27679	28693
	56	4	54158,68	2408,769	1204,384	50325,79	57991,57	51799	56786
	90	4	75784,55	3926,143	1963,072	69537,19	82031,92	72622	80789
3	2	4	1279,72	240,495	120,247	897,04	1662,40	1038	1519
	7	4	5212,53	657,972	328,986	4165,55	6259,51	4559	6038
	28	4	21384,78	2412,360	1206,180	17546,18	25223,38	18597	23702
	56	4	45748,22	6592,890	3296,445	35257,46	56238,98	40016	51636
	90	4	66881,87	1658,996	1173,087	51976,38	81787,35	65709	68055



Şekil 4.13. SWCNT oranı ile elektriksel özdirenç değerleri ilişki grafiği.



Şekil 4.14. Beton yaşı ile elektriksel özdirenç değerleri ilişki grafiği.

SWCNT ve beton yaşına bağlı olarak elektriksel özdirenç değerlerinde önemli değişimlerin meydana geldiği, SWCNT miktarındaki artış ile ters orantılı olarak elektriksel özdirenç değerlerinin azaldığı, beton yaşındaki artış ile doğru orantılı olarak elektriksel özdirenç değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür. Ortalama elektriksel özdirenç değerleri incelendiğinde;

- 28. gündeki elektriksel özdirenç değerlerinde $43\Omega.cm$ ile en büyük elektriksel özdirenç değerinin referans numuneye ait olduğu, en küçük elektriksel özdirenç ise $21\Omega.cm$ ile CNT3 numunesinde meydana geldiği,
- Referans numuneye göre CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde elektriksel özdirenç değerlerinin sırasıyla %16,3; 34,9 ve 51,2 oranlarında azalmanın meydana geldiği,
- 90. gündeki elektriksel özdirenç değerlerinde $173\Omega.cm$ ile en büyük elektriksel özdirenç değerinin referans numuneye ait olduğu, en küçük elektriksel özdirenç ise $67\Omega.cm$ ile CNT3 numunesine ait olduğu,
- Referans numuneye göre CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde elektriksel özdirenç değerlerinin sırasıyla %37; 56 ve 61,3 oranlarında azalmanın meydana geldiği,

- Tüm CNT takviyeli UYPB'lerde elektriksel özdirenç değerlerinin referans numuneye göre daha düşük değerler aldığı,
- Tüm CNT oranlarında beton yaşına bağlı olarak elektriksel özdirenç değerlerin artış gösterdiği,
- CNT0, CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde 2. ve 90. gün elektriksel özdirenç değerleri arasında sırasıyla 43 kat; 36 kat; 38 kat ve 67 kat artış meydana geldiği,
- 90 günlük nihai elektriksel özdirenç değerleri baz alındığında CNT0, CNT1, CNT2, ve CNT3 numunelerinin 90.gündeki değerlerin 28. gündeki değerlere göre sırasıyla 4 kat; 3 kat, 2,7 kat, 3,2 kat artış gösterdiği görülmüştür.

Betonun elektriksel direncinin yüksek seviyelerde olduğu farklı araştırmalarla doğrulanmıştır. Atmosfer koşullarında kürlenmiş betonun elektriksel özdirenci 6.54×10^5 – $11.4 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalara göre, suya doymuş betonun ve etüv kurusu betonun elektriksel özdirencinin sırasıyla $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ve $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ olduğu tespit edilmiştir [345]. Dehghanpour vd'nin [346] çalışmasında ısı üretilebilir bir betonun maksimum özdirenç değeri yaklaşık $500 \Omega \cdot \text{cm}$ olarak belirtilmiştir. D'Alessandro vd [347], kendi kendini algılayan karbon-nanotüp içeren çimentolu malzemeler imal etmek için çeşitli prosedürler hakkında sistematik bir araştırma sunmuşlardır. Nanotüplerin suda dispersiyon, kimyasal dispersantlar ve farklı karışım stratejileri kullanılarak, nanotüplerin dispersiyon kalitesi, ayrışma hızı ve mikro yapıları araştırılmıştır. %0-1,6 MWCNT içeren farklı karışımların özdirenç değerleri yaklaşık 10^3 - $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ arasında elde edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre kendi kendini algılayabilir çimentolu malzemelerin elde edilebilmesi için, minimum MWCNT içeriğinin çimento ağırlığına göre %1 olduğu bulunmuştur [305].

Jung vd. [23]'e göre, UYPB'na CNT'lerin eklenmesi, elektrik direncini önemli ölçüde azaltarak, düşük voltajda (19-23v) etkili elektriksel küremeye izin verdiği görülmüştür. Köprüleme, gözenek doldurma ve kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) oluşumuyla mekanik özellikler ve eğilme gerilimi altında bükülme dayanımını ve çoklu çatlama davranışını olumlu bir şekilde etkilemiştir.

Elektriksel özdirenci düşük iletken betonların geliştirilmesi ısıtılabilir betonlar, kendi

kendini algılayan betonlar, antistatik betonlar ve betonlarda yapısal sağlık izleme uygulamalarında kullanımı bakımından oldukça önemlidir. SWCNT takviyesi ile elektriksel iletkenlikleri arttırılmış UYPB'lerin üretilebileceği deneysel çalışma bulgularından anlaşılmaktadır.

UYPB'lerde iletkenliğin 3.10^{-4} oranında SWCNT kullanımı ile referans UYPB'ye göre 2,6 kat arttırılabileceği tespit edilmiştir. Erken yaşlardaki UYPB'lerde iletkenlik değerlerinin ileri yaşlardaki betonlara kıyasla daha düşük çıkması beton boşluklarında bulunan suya bağlanmaktadır. Hidratasyon sürecinde boşluk suyunun C-S-H gelişimi nedeniyle tüketilmesinden dolayı iletkenliklerde azalmanın meydana geldiği tüm CNT takviye oranlarında görülmektedir.

Boşluk suyunun azalmasının elektriksel iletkenliği azaltmasına karşın C-S-H yapısının artarak gelişmesi sayesinde kompasitesi yüksek bir beton matrisi elde edilmektedir. Kompasitenin artmasıyla iletkenlik değerlerinde bir miktar arttığı düşünülmektedir.

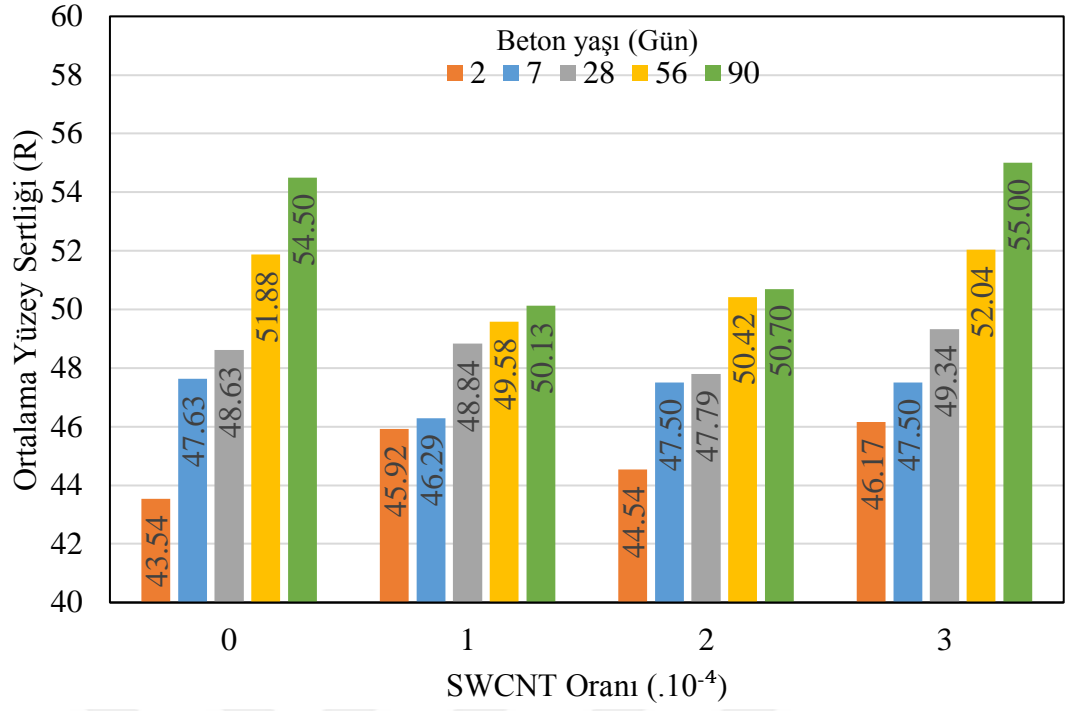
Bunların yanında UYPB'lerde kullanılan mikro çelik liflerin iletkenliğe olumlu katkısının olduğu referans numunede dahi $500\Omega.cm$ 'nin altında elektriksel öz direnç değerlerinin elde edilmesi ile anlaşılmaktadır. Çelik liflerin sağladığı iletken ağ, çimento matrisi içerisine katılan 5-30 μm boy ve 1-2nm çapa sahip olan nano boyutlu SWCNT'ler ile UYPB içerisinde sürekli iletken bir ağ oluşturulmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu durum SWCNT oranındaki artış ile UYPB'lerin 2,6 kat daha iletken hale geldiğini göstermektedir. Bütün bu değerlendirmeler ışığında SWCNT takviye edilmesi ile UYPB'lerde elektriksel iletkenliğin arttırılabileceği görülmüştür.

4.2.6. Schmidt Çekici ile Yüzey Sertliği Değerleri

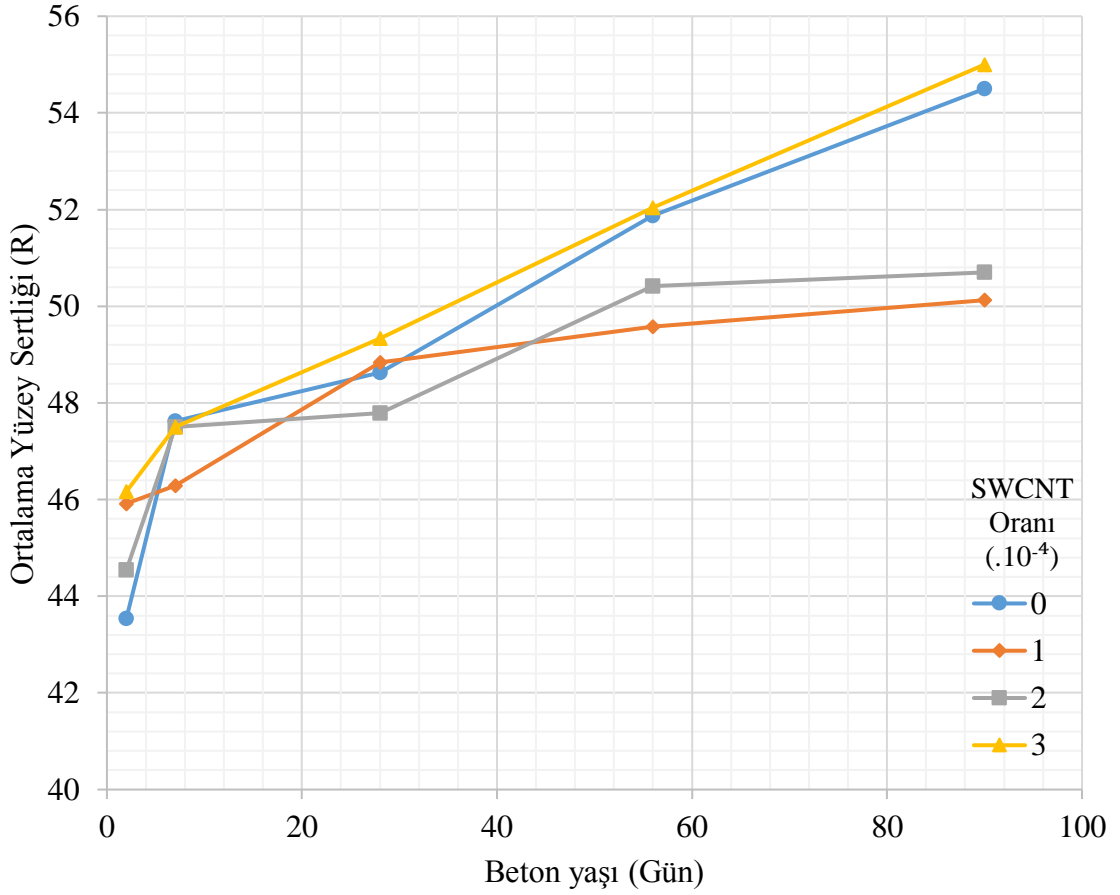
Schmidt çekici ile yüzey sertliği deneyi sonuçlarına ait açıklayıcı istatistiksel veriler Çizelge 4.7'de, SWCNT oranına bağlı olarak ortalama yüzey sertliği (R) değerlerindeki değişim grafiği Şekil 4.15'de, beton yaşı ile yüzey sertliği (R) değerleri arasındaki ilişki grafiği Şekil 4.16'de görülmektedir.

Çizelge 4.7. Yüzey sertlik değerleri ve açıklayıcı istatistiksel bilgiler.

SWCNT Oranı (.10 ⁻⁴)	Beton Yaşı (Gün)	Numune adedi	Ortalama Geri Tepme Katsayısı (R)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven aralığında ortalamanın		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst sınırı		
0	2	4	43,54	4,37529	2,18764	36,58	50,50	37,00	46,17
	7	4	47,62	1,81799	0,90900	44,73	50,52	45,00	49,17
	28	4	48,62	0,55236	0,27618	47,75	49,50	48,00	49,17
	56	4	51,87	2,57896	1,28948	47,77	55,98	49,33	55,33
	90	4	54,50	2,12132	1,50000	35,44	73,56	53,00	56,00
1	2	4	46,29	2,03097	1,01548	43,06	49,52	45,17	49,33
	7	4	45,91	1,79253	0,89626	43,07	48,77	43,67	47,67
	28	4	48,83	1,04704	0,52352	47,17	50,50	48,00	50,17
	56	4	49,58	0,61630	0,30815	48,60	50,56	49,17	50,50
	90	4	50,12	1,31498	0,65749	48,03	52,22	49,00	52,00
2	2	4	44,54	4,54135	2,27068	37,32	51,77	38,00	48,00
	7	4	47,79	1,87320	0,93660	44,81	50,77	46,00	50,00
	28	4	47,50	2,01954	1,00977	44,29	50,71	45,17	49,83
	56	4	50,41	1,83752	0,91876	47,49	53,34	48,67	53,00
	90	4	50,70	1,73973	0,86987	47,93	53,47	49,00	53,00
3	2	4	47,50	1,93869	0,96935	44,42	50,58	45,33	49,83
	7	4	46,16	1,56276	0,78138	43,68	48,65	45,17	48,50
	28	4	49,33	1,89971	0,94986	46,31	52,36	47,17	51,67
	56	4	52,04	2,20164	1,10082	48,54	55,55	50,00	55,17
	90	4	55,00	1,41421	1,00000	42,29	67,71	54,00	56,00



Şekil 4.15. SWCNT oranı ile yüzey sertliği (R) ilişki grafiği.



Şekil 4.16. Beton yaşı ile yüzey sertliği (R) ilişki grafiği.

SWCNT ve beton yaşına bağlı olarak ortalama yüzey sertliği değerlerinde önemli değişimlerin meydana geldiği, SWCNT miktarındaki artış ile ortalama yüzey sertliği değerleri arasında doğrusal olarak artışların olduğu, aynı zamanda beton yaşındaki artış ile doğru orantılı olarak ortalama yüzey sertliği değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür. Ortalama yüzey sertliği değerleri incelendiğinde;

- Yüzey sertliği değerinin bütün beton yaşlarında en büyük CNT3 numunesinde olduğu, erken yaştaki en küçük değer 2. günlük referans numunede olduğu,
- Referans numuneye göre CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde 2. günlük ortalama yüzey sertliği değerlerinin sırasıyla %5,2; 2,2; 5,7 oranlarında yüksek olduğu, 28. günlük ortalama yüzey sertliği değerlerinin sırasıyla CNT1 ve CNT3 numunelerinde sırasıyla %0,4; 1,4 oranlarında yüksek olduğu, CNT2 numunesinde %1,7 oranında azalmış olduğu, 90. günlük ortalama yüzey sertliği değerlerinin CNT1 ve CNT2 numunelerinde sırasıyla %8; 7 oranında azalmış olduğu, CNT3 numunesinde %0,9 oranında yükselmiş olduğu,
- CNT0, CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde 2. ve 90. gün ortalama yüzey sertliği değerleri arasında sırasıyla %25; 9,2; 13,8 ve 17,6 oranlarında artış meydana geldiği,
- Erken yaş numuneler arasında en küçük sertlik değer referans numunede 43, 54, en büyük değer ise CNT3 numunesinde 46,16 olarak ölçüldüğü,
- İlerki yaşlarda ise düşük oranlı CNT'li numunelerde belirgin bir artış olmamasına rağmen yüksek oranda katılan CNT miktarı yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir.

Dehghanpour vd.'nin [348] PVA, cam ve çelik lif kullanarak ürettikleri UYPB'lerde mekanik fiziksel ve dinamik özellikleri araştırdıkları çalışmalarında, her bir lif türü için 3 farklı lif oranında UYPB üretmişler ve 110-175MPa aralığında basınç dayanımı değerlerine sahip betonlar elde etmişlerdir. Üretilen UYPB'lerin Schmidt çekici ile yüzey sertlikleri ölçülmüş ve 51-53 (R) arasında geri tepme katsayıları elde etmişlerdir. Çelik lif kullanılan UYPB'lerin yüzey sertliği değerlerinin PVA lifi kullanılanlara göre %4 oranında artış gösterdiği bulunmuştur. Schmidt çekici ile yüzey sertliği deneyinde ölçek indeksi olarak geri tepme sayısı, ölçülen değer ile basınç dayanımı arasındaki korelasyon eğrilerinin oluşturulmasıyla, prekast olarak ve

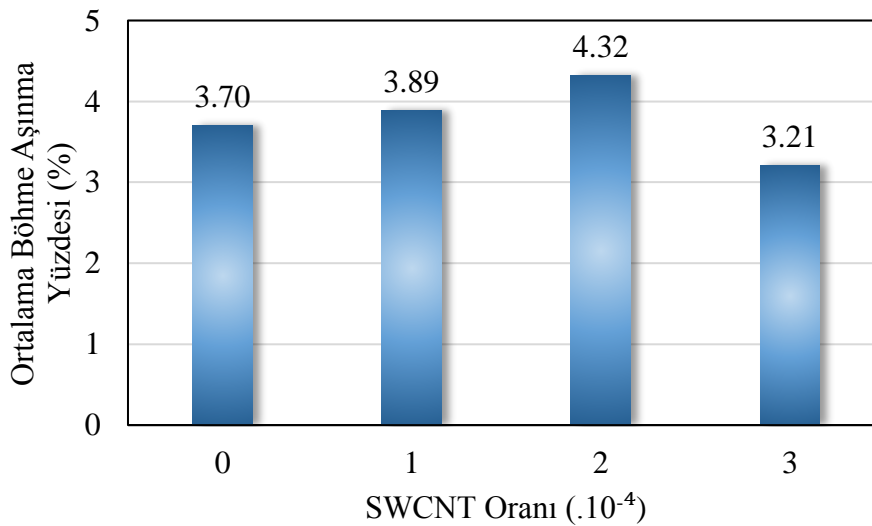
şantiyede üretilen betonların dayanım tahmini ve/veya homejenizasyon kontrolü için kullanılabilir [305]. Üretilen UYPB'lerin yüzey sertliği değerlerinin $3 \cdot 10^{-4}$ oranında SWCNT kullanımı ile farklı beton yaşlarında referans numuneye göre %0,3-6 aralığında artış sağlandığı, beton yaşına bağlı olarak yüzey sertliği değerlerinde meydana gelen değişimin SWCNT takviyesi ile olan değişimden daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.

4.2.7. Böhme Aşınma Direnci Kütle Kaybı Yüzdesi Değerleri

UYPB numunelerinin aşınma direnci deneyinden elde edilen kütle kaybı yüzdesi değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel bilgiler Çizelge 4.8'de, SWCNT oranına bağlı olarak ortalama kütle kaybı yüzdesi değerlerindeki değişimi gösteren grafiğe ise Şekil 4.17'de görülmektedir.

Çizelge 4.8. Aşınma kütle kaybı değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.

SWCNT Oranı ($\cdot 10^{-4}$)	Numune adedi	Ortalama Aşınma Kütle Kaybı (%)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven aralığında ortalamanın		Minimum	Maksimum
					Alt sınırı	Üst sınır		
0	3	3,7023	0,22366	0,11183	3,3464	4,0582	3,38	3,89
1	3	3,8870	0,05680	0,03279	3,7459	4,0281	3,84	3,95
2	3	4,3168	0,32031	0,18493	3,5211	5,1125	3,96	4,57
3	3	3,2055	0,58168	0,29084	2,2799	4,1311	2,59	3,72



Şekil 4.17. SWCNT oranı ile aşınma kütle kaybı değerleri ilişkisi grafiği.

SWCNT katkı oranına bağlı olarak ortalama aşınma kütle kaybı değerleri incelendiğinde;

SWCNT katkı oranına bağlı olarak kütle kaybı değerlerinde değişimlerin meydana geldiği, CNT1 ve CNT2 takviye oranlarında referans numuneye göre bir artış meydana gelirken CNT3 takviye oranında ise referans numuneye göre kütle kaybının azaldığı görülmektedir. En büyük kütle kaybının %4,32 ile CNT2 numunesine ait olduğu, en küçük kütle kaybının ise %3,21 ile CNT 3 numunesine ait olduğu, CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerinde kütle kaybı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla %5,1; 16,7 ve -13,2 oranlarında değişim gösterdiği, SWCNT miktarı artışı ile CNT1 ve CNT 2 numunelerinde aşınma direncinin azaldığı ancak CNT3 numunesinde aşınma direncinin arttığı görülmektedir.

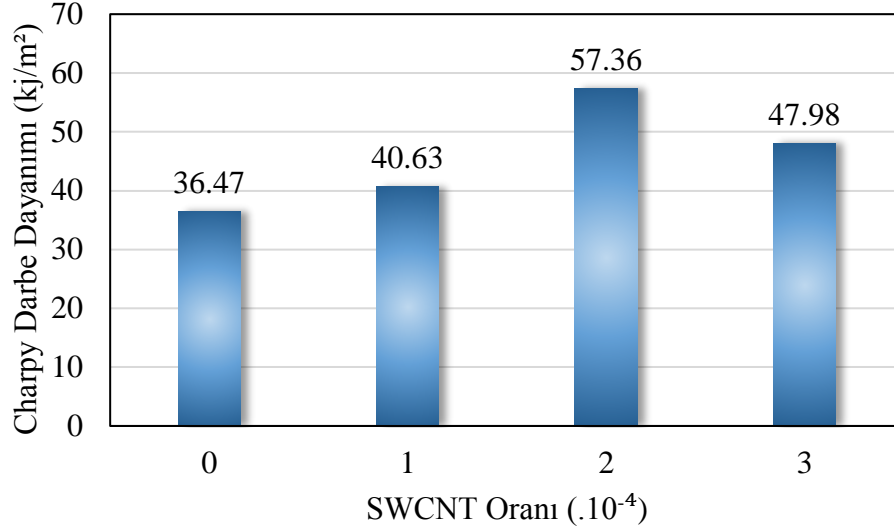
SWCNT miktarı artışı ile dayanım ve yoğunluk değerlerindeki azalmaya paralel olarak UYPB'lerin aşınma direncinin CNT2 oranına kadar azaldığı, ancak CNT3 oranında diğer sonuçlarla ters orantılı bir şekilde aşınma direncinin arttığı görülmektedir. Çelik liflerin UYPB karışımı içerisinde olası heterojen dağılımı ve örneklerin alındığı bölgenin heterojen lif dağılımının olduğu bölgeden alınmış olması olasılığı ve/veya karbon içeriği yüksek olan CNT3 oranındaki UYPB'lerin en büyük yüzey sertliği değeri verdiği gözönünde bulundurulduğunda aşınma direncinin artmış olabileceği düşünülmektedir.

4.2.8. Charpy Darbe Dayanımı Değerleri

UYPB numunelerin darbe dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel bilgiler Çizelge 4.9'da, SWCNT oranı ile ortalama darbe dayanımı değerlerindeki değişimi gösteren bar grafiği ise Şekil 4.18'de görülmektedir.

Çizelge 4.9. Darbe dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistiksel veriler.

SWCNT Oranı ($\cdot 10^{-4}$)	Numune adedi	Ortalama darbe dayanım değerleri (kJ/m^2)	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven aralığında ortalamanın		Minimum	Maksimum
					Alt sınırı	Üst sınır		
0	3	36,4733	1,54714	0,89324	32,6300	40,3166	35,05	38,12
1	3	40,6267	2,47357	1,42811	34,4820	46,7713	38,08	43,02
2	3	57,3633	5,43810	3,13969	43,8543	70,8723	52,39	63,17
3	3	47,9767	1,32613	0,76564	44,6824	51,2710	47,08	49,50



Şekil 4.18. SWCNT oranı ile darbe dayanımı değerleri grafiği.

Darbe dayanımı değerlerinin SWCNT takviye oranına göre olan değişimleri incelendiğinde;

- SWCNT takviye oranına bağlı olarak darbe dayanımı değerlerinde önemli değişimlerin meydana geldiği,
- Bütün CNT takviye oranlarında darbe dayanımı değerlerinin referans numuneden daha büyük olduğu,
- En büyük darbe dayanımı değerinin $57,36\text{kJ/m}^2$ ile CNT2 numunelerinde, en küçük darbe dayanımının ise $36,47\text{kJ/m}^2$ ile referans numunede meydana geldiği,
- CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerindeki darbe dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla %11,4; 57,28 ve 31,6 oranlarında artış gösterdiği görülmektedir.

Wang vd. [349] fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüpler kullanarak ultra yüksek performanslı betonun darbe önleme özelliklerini araştırdığı çalışmada %0,25 ve %0,50 oranında fonksiyonelleştirilmiş CNT'leri UYPB karışımlarında kullanmıştır. Standart CNT'lerin dispesiyonunda ve çimento matrisi ile olan etkileşiminde karşılaşılan sorunlara değinilerek fonksiyonelleştirilmiş CNT'ler ile daha yüksek basınç ve dinamik darbe tokluğuna sahip UYPB'lerin elde edilebileceğini göstermiştir. Dinamik darbe tokluğu ve darbe dağıtım enerjilerinde %10-30 aralığında artışlar sağlandığı görülmektedir. Fonksiyonelleştirilmiş CNT'lerdeki fonksiyonel grupların, nanotüpler ile UYPB matrisi arasındaki kimyasal bağı daha da güçlendiği ve CNT'lerin UYPB matrisine yük transferini iyileştirdiği belirtilmektedir. Fonksiyonelleştirilmiş CNT'lerin bu avantajları,

çatlak geliştirme sürecinde daha fazla enerjinin tüketilmesine neden olan UHPC'nin yapısal homojenliğini önemli ölçüde geliştirmektedir. Çalışmamız kapsamında kullanılan SWCNT'lerin UYPB karışımları içerisinde kullanılması ile çimento matrisi arasındaki bağı mekanik olarak güçlendirdiği ve UYPB matrisine yük transferini iyileştirdiği, darbe dayanımı değerlerindeki artışın bundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.2.9. Renk Analizleri

Spektrofotometre cihazı ile farklı oranlarda SWCNT takviyeli UYPB'lerde 6 farklı noktadan yapılan ölçümlerle, SWCNT'nin UYPB'lerin renk değişimine olan etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Renk ölçümleriyle aynı zamanda SWCNT'lerin UYPB karışımlarının içerisindeki dispersiyonu hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.19'da görülen ölçüm yöntemi ile CIELAB kromatik uzayda bulunan L^* , a^* ve b^* değerleri ölçülmüştür. SWCNT takviyeli UYPB numuneleri üzerinde yapılan renk ölçümleri sonuçlarına ait ortalama renk ölçüm değerleri Çizelge 4.10'te verilmiştir.



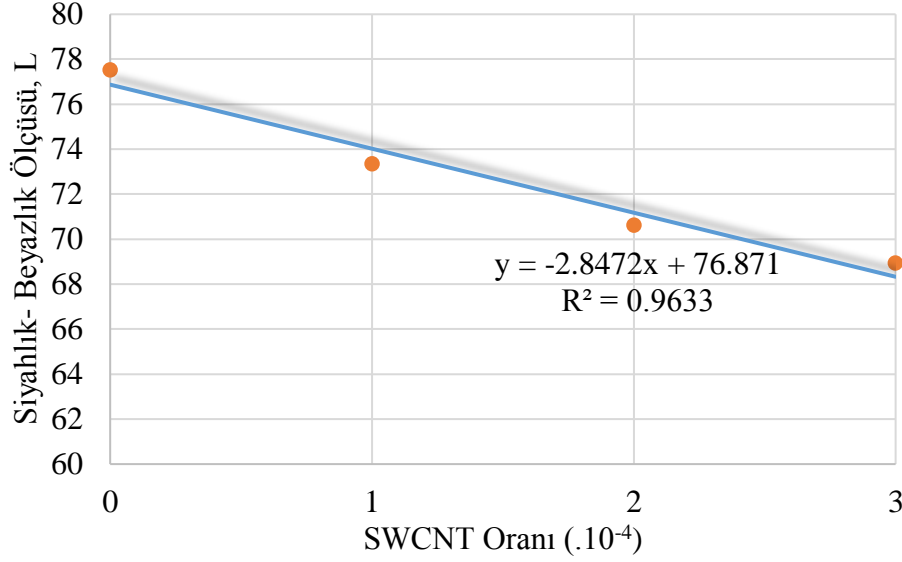
Şekil 4.19. Numuneler üzerinde renk ölçümlerinin yapılması.

Çizelge 4.10. Numuneler üzerinde yapılan ortalama ölçüm sonuçları.

Standard	Referans	%0,01	%0,02	%0,03
L^*	77,511	73,344	70,618	68,929
a^*	-0,252	-1,265	-1,231	-1,342
b^*	4,424	-0,598	0,226	-0,597
C^*	4,431	1,399	1,252	1,469
h°	93,260	205,306	169,597	203,963

SWCNT ile üretilen UYPB numuneler üzerinde yapılan renk ölçümleri sonuçları incelendiğinde; SWCNT kullanımına bağlı olarak renk değerlerinde anlamlı bir

değişimin olduğu görülmüştür. Gri renkteki UYPB karışımının içerisine ağırlıkça katılan SWCNT malzemesinin miktarına bağlı olarak L değerlerinde açık renkten, koyu renge, a* değerlerinde açık yeşilden koyu yeşile, b* değerlerinde ise sarıdan maviye doğru yöneldiği belirlenmiştir. Ayrıca siyah renkli bir nanomateryal olan SWCNT katkı miktarına bağlı olarak değişimi açıklayan ilişki grafiği Şekil 4.20’de verilmiştir.



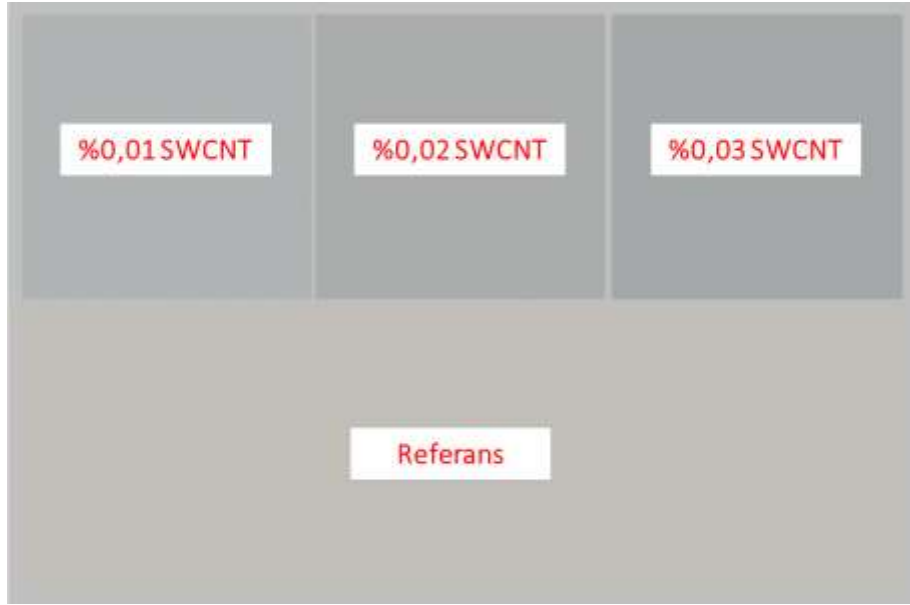
Şekil 4.20. Siyah-Beyazlık ölçüsü olan L ölçüm değerleri ile SWCNT oranı ilişkisi.

Açık gri renkteki UYPB beton karışımı içerisindeki SWCNT miktarı arttıkça L değerlerinde doğrusal bir azalmanın olduğu, beton numunelerindeki renklerin açıktan (beyazdan) koyuya (siyah renge) doğru değiştiği görülmektedir. Bu değişimi açıklayan model denklemi $L = -2,8472X + 76,871$ olarak bulunmuştur. Model denklemin determinasyon katsayısı $R^2 = 0,9633$ olarak hesaplanmıştır. Model denklemde X, SWCNT. 10^{-4} oranını ifade etmektedir.

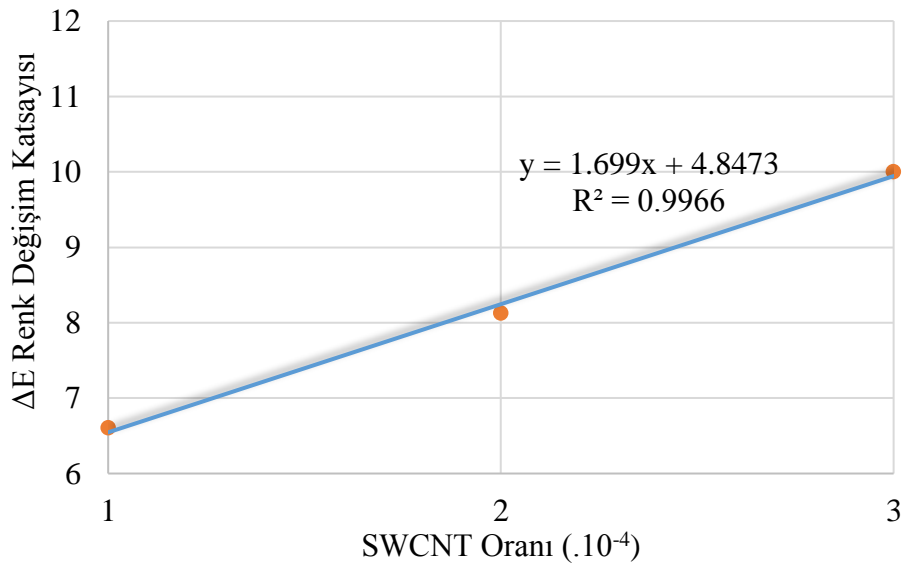
SWCNT katkılı örneklerden elde edilen LAB ölçüm değerleri kullanılarak hesaplanan ortalama ΔL^* , Δa^* , Δb^* , ΔC^* , ΔH^* , ΔE^* değerleri Çizelge 4.11’de verilmiştir. Ayrıca referans ve SWCNT katkılı betonların görselleri Şekil 4.21’de görülmektedir. Şekilde görüleceği üzere UYPB karışımlarındaki SWCNT katkı miktarı arttıkça açık renkten gri tonlara dönüşerek koyu renge yaklaşmaktadır. Şekil 4.22’de SWCNT katkı miktarına bağlı olarak ΔE renk değişimini açıklayan ilişki grafiği görülmektedir.

Çizelge 4.11. Referans numune ile numune ölçüm sonuçlarının kıyaslanması.

Ölçüm değeri	%0,01	%0,02	%0,03
ΔL^*	-4,167	-6,893	-8,582
Δa^*	-1,013	-0,979	-1,090
Δb^*	-5,022	-4,198	-5,021
ΔC^*	-3,032	-3,180	-2,962
ΔH^*	4,13	2,911	4,197
ΔE^*	6,604	8,130	10,002



Şekil 4.21. Değerlere göre oluşturulan dijital görsel.



Şekil 4.22. SWCNT oranı ile ΔE renk değişimi değerleri arasındaki ilişki grafiği.

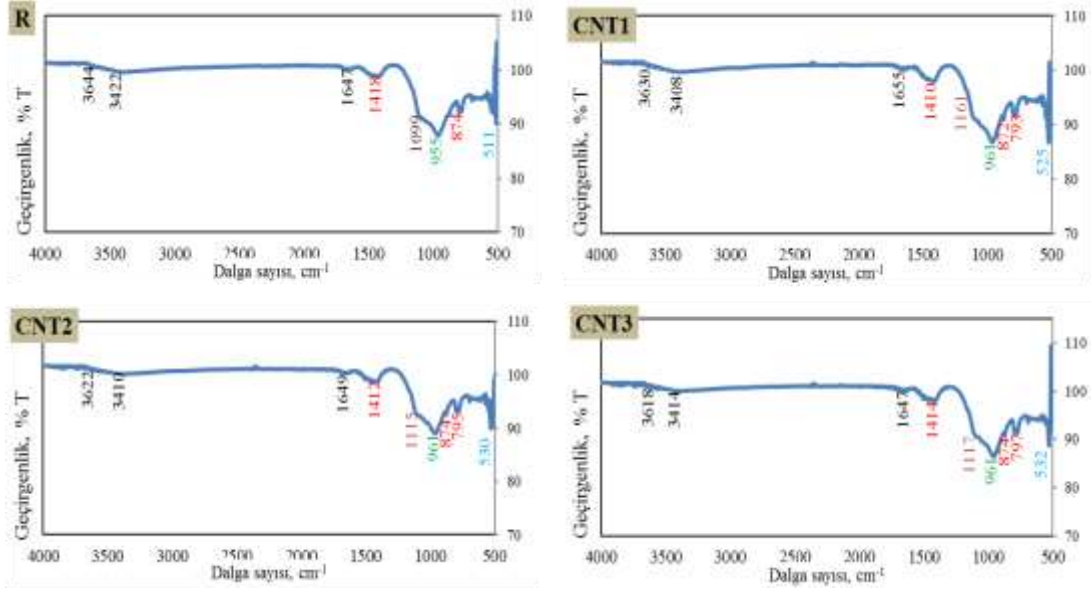
SWCNT katkısız referans numuneye göre olan renk uzaklık (ΔE) değerleri incelendiğinde SWCNT oranı artışı ile orantılı bir şekilde ΔE^* renk uzaklık değerlerinin de arttığı görülmektedir. SWCNT katkı oranına (%0,01; %0,02; %0,03) bağlı olarak sırasıyla 6.604; 8.130 ve 10.002 değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu değişimi açıklayan model denklemi $\Delta E = 1,699X + 4,8473$ olarak bulunmuştur. Model denklemin determinasyon katsayısı $R^2 = 0,9966$ olarak hesaplanmıştır. Model denklemde X, SWCNT $\cdot 10^{-4}$ oranını ifade etmektedir. ΔC Renk parlaklık farkı değerlerinin ise SWCNT katkı oranına göre sırasıyla -3.032; -3.180 ve -2.962 olduğu tespit edilmiştir. ΔH renk tonu açılma farkı değerlerinin ise SWCNT katkı oranına göre sırasıyla 4.130; 2.911 ve 4.197 olduğu görülmektedir.

SWCNT katkı oranı arttıkça UYPB karışımlarında açık renkten koyu renge doğru bir değişimin gözlemlendiği, renk değişiminin UYPB numunelerinin tüm yüzeyinde eşit düzeyde olduğu, bunun SWCNT'nin karışım içerisinde homojen bir şekilde dağıldığının göstergesi olarak kabul edilebileceği ifade edilebilir. Araştırmacılar tarafından metal, polimer ve tekstil kompozit üretimlerinde CNT kullanılan çalışmalarda renk değişimi üzerinde önemli etkilere sahip olduğu, özellikle polimer kompozitlerde CNT miktarındaki artışa bağlı olarak yarı saydam görünümünden, opak görünüme doğru bir değişimin olduğu tespit edilmiştir [350]–[354].

4.3. MİKRO YAPI ANALİZLERİ

4.3.1. FT-IR Analizleri

Farklı oranlarda SWCNT takviyeli UYPB numuneleri üzerinde 90. günden sonra yapılan FT-IR analizlerine ait sonuçlar Şekil 4.23'te görülmektedir.



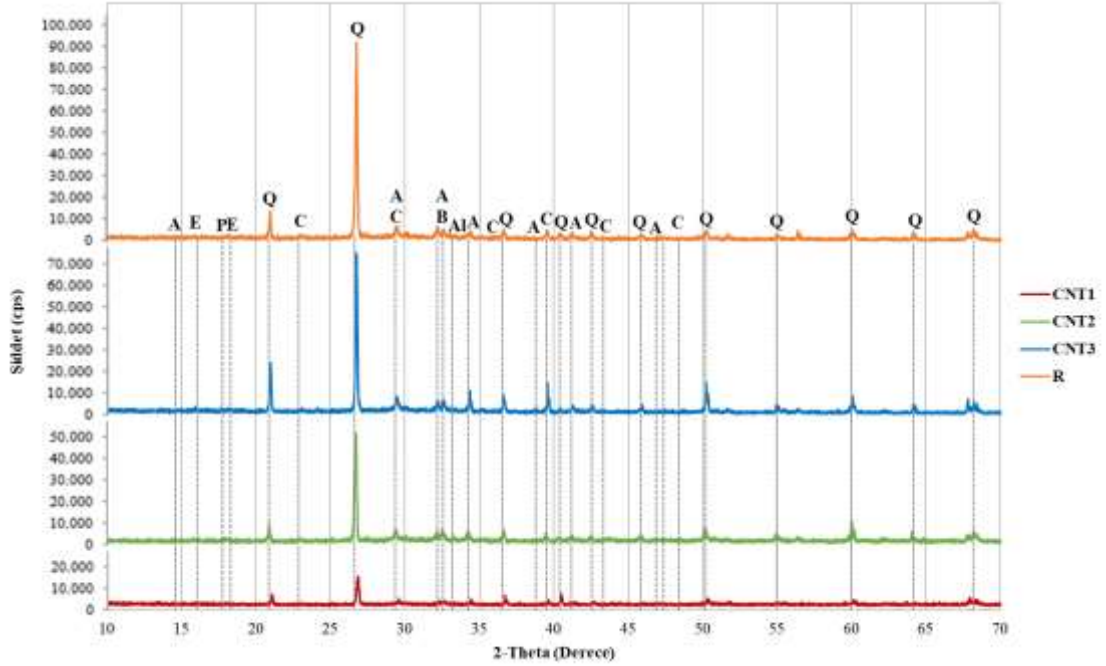
Şekil 4.23. R, CNT1, CNT2, CNT3 UYPB numunelerine ait FT-IR analizleri.

FT-IR grafikleri incelendiğinde bağlanmış ve absorbe edilmiş suyun varlığı 3618-3644 cm^{-1} bölgelerinde görülmektedir. 3408-3422 ve 1647-1655 cm^{-1} bölgelerinde bulunan geniş bir bant yapıya tutunmamış suyu (H_2O 'nun simetrik ve asimetrik gerilme titreşimleri); 1410-1418 - ve 872-874 cm^{-1} aralığındaki pikler portlanditin (CH) karbonasyonundan kaynaklı karbonat fazlarını (CO_3); 1099-1161 cm^{-1} bölgesi sülfat fazlarını; 793-800 cm^{-1} aralığındaki pikler Al-O gerilimle titreşimlerini göstermektedir. Hidrate olmuş kalsiyum silikatlar (C-S-H) 955-961 cm^{-1} ve hidrate olmamış kalsiyum silikatlar (CS) 511-532 cm^{-1} bölgelerinde görülmektedir. 2800-3700 bölgesindeki ve hidrasyon süresi artışı ile zayıflayan geniş absorpsiyon bandı kalsitin (CaCO_3) varlığını temsil etmektedir. 800-1100 bölgesindeki ana pikin sağ ve solunda yer alan; hidrasyon süresi artışı ile azalma göstererek çimento pastasının sertleşmesini ifade eden iki küçük pik C_2S nin varlığını göstermektedir [355]–[360]. 3400-3600 cm^{-1} aralığındaki bölgeye bakıldığında tüm numunelerdeki CH piklerinde azalma görüldüğü, 955-961 cm^{-1} aralığında ise hidrate olmuş kalsiyum silikat (C-S-H) piklerinde belirgin farklılıkların bulunmadığı gözlenmiştir.

4.3.2. XRD Analizleri

Kuars, CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve çimento bileşiminin (C_2S , C_3S) karakteristik tepe noktaları Şekil 4.24'te verilmiştir. Karbon nanotüplerle güçlendirilmiş betonun dayanımı, yalnızca

karbon nanotüpler ve matris arasındaki fiziksel etkiden değil, aynı zamanda bir dizi kimyasal reaksiyondan da etkilenmektedir [361], [362]. Birleştirici etkiler, karbon nanotüp betonun mukavemet gelişimini destekler.



(A: Alite:C3S; Al:Aluminate; B:Belite: C2S; C:Calcite: CaCO₃; E:Ettringite: AFt; P:Portlandite: CH; Q: Quartz)

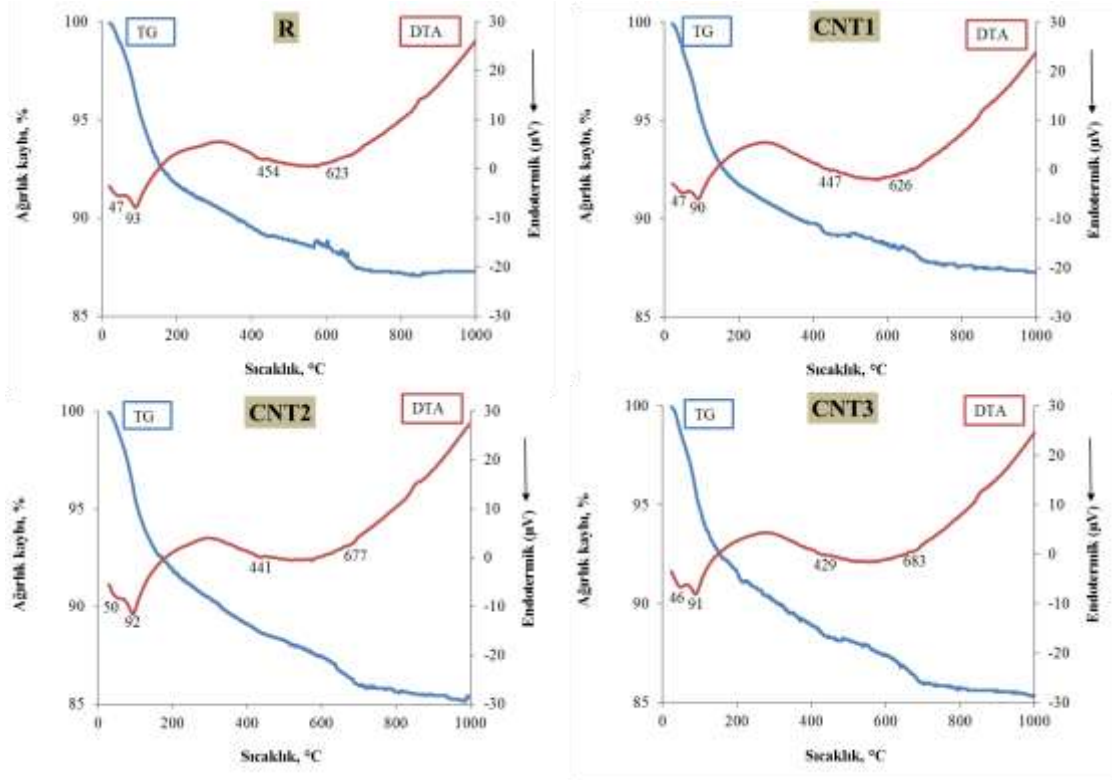
Şekil 4.24. R ve CNT numunelerinin XRD Analizleri.

Referans ve SWCNT katkılı numunelerin XRD desenlerinde yaklaşık 23°; 29°; 26°; 43,1°; 48°'de kalsit (CaCO₃) gözlenmiştir. Silis dumanında 15–30° aralığında bir dağılık bant amorf silikaya karşılık gelmektedir. Silika tozundan elde edilen kuvarsa (SiO₂) karşılık gelen pikler yaklaşık 21°; 27°; 36°; 40°; 42°; 50°; 55°; 60°; 64°; 68°'de tespit edilmiştir. Kuvars pikleri karşılaştırıldığında en yüksek pik şiddeti Referans numunede, en düşük pik şiddeti CNT1 nolu numunede gözlenmiştir (R > CNT2 > CNT3 > CNT1). Bunun yanı sıra kalsite gelen pikler incelendiğinde numuneler benzerlik göstermiştir. 15–20° aralığındaki etrenjit ve portlandit ile ilişkili pikler, kürlenme ve puzolanik reaksiyon nedeniyle tüm numuneler için azalmış, dolayısı ile iyi bir hidrasyon reaksiyonu gerçekleşmiştir. 30–35° aralığındaki klinkerlere (özellikle C₃S ve C₂S) karşılık gelen piklerin yoğunluklarına bakıldığında, CNT2 numunesi için en yüksek, CNT1 numunesi için en düşük şiddette elde edilmiş ve yoğunluk sıralamalarının CNT2 > CNT3 > R > CNT1 şeklinde olduğu gözlenmiştir. Buna bağlı olarak CNT2 numunesinin hidrasyon derecesinin diğer numunelere göre daha düşük olduğu ve nispeten daha az reaksiyona

girdiği söylenebilir. Numunelerin XRD kırınımları, karbon nanotüplerin, betonun hidrasyon reaksiyonunu teşvik etme derecesinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla farklı oranlardaki karbon nanotüplerin beton matrisi üzerindeki fiziksel etkilerinin (çatlakları köprüleme ve gözenekleri doldurma), kimyasal reaksiyonlardan (hidrasyon reaksiyonunu destekleyen) daha yüksek olduğu söylenebilir [146], [337], [361]–[368].

4.3.3. DTA-TG Analizleri

Referans ve SWCNT takviyeli 90 günlük UYPB numunelerinin (R, CNT1, CNT2, CNT3), fark taramalı termal analiz (DTA) ve termal gravimetri analiz sonuçları Şekil 4.25 ve Çizelge 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.25. Fark taramalı termal analiz (DTA) ve termal gravimetri (TG) analizi.

Çizelge 4.12. R, CNT1, CNT2, CNT3 UYPB numunelerinin farklı sıcaklıklardaki ağırlık kayıpları.

Numune	25-200°C (%)	400-500°C (%)	500-750°C (%)	105-1000°C (%)
R	8,17	0,71	1,56	7,89
CNT1	8,08	0,58	1,48	7,50
CNT2	8,18	0,85	2,42	9,70
CNT3	8,32	0,83	2,27	9,08

Tüm DTA eğrilerinde tobermorit (C-S-H) jel, portlandit (CH) ve diğer hidratasyon ürünlerinden oluşan üç ana endotermik tepe ve TGA eğrilerinde ağırlık kaybı gözlenmektedir. 25-200°C sıcaklık aralığındaki endotermik etkiler ve kapiler boşluklardaki suyun dehidrasyonu, C-S-H ve Aft (trisülfoalüminat) fazlarının farklı aşamalardaki dehidrasyonu olarak gelişmiştir. 400-500°C sıcaklık aralığındaki endotermik etkiler, 429°C ve 454°C sıcaklık aralığında CH'in dehidrasyonu olarak gelişmiştir. 500-750°C sıcaklık aralığındaki CaCO₃'ün kalsinasyonu ise 623°C ve 683°C sıcaklık aralığında gelişmiştir. C-S-H jel, C-H ve diğer hidratlı ürünlerin (kimyasal olarak bağlı su veya buharlaşmayan su içeriği) dehidrasyonu ve ayrışmasına bağlı olarak oluşan su kaybı, 105-1000°C sıcaklık aralığında meydana gelmiştir [369]–[372].

Referans ve karbon nanotüp katkılı betonların farklı sıcaklık aralıklarındaki ağırlık kayıpları Çizelge 4.12'de verilmiştir. TG analiz sonuçlarına bakıldığında, en az kütle kaybı R numunesinde, en fazla kütle kaybı ise CNT2 numunesinde meydana gelmiştir. 25-200°C sıcaklık aralığında yapısal ve kristal su ile C-S-H ve Aft (trisülfoalüminat) fazlarının farklı aşamalardaki dehidrasyonundan oluşan ağırlık kayıpları %8,32 ile en fazla CNT3 numunesinde, %8,08 ile en az CNT1 numunesinde meydana gelmiştir. 400-500°C sıcaklık aralığında CH'in ayrışmasından kaynaklanan ağırlık kayıpları %0,85 ile en fazla CNT2 numunesinde, %0,58 ile en az CNT1 numunesinde tespit edilmiştir. 500-750°C sıcaklık aralığındaki CaCO₃'ün dekarbonasyonu sonucu ağırlık kayıpları %2,42 ile en fazla CNT2 numunesinde, %1,48 ile en az CNT1 numunesinde meydana gelmiştir. 105-1000°C sıcaklık aralığında, C-S-H jel, C-H ve diğer hidratlı ürünlerin (kimyasal olarak bağlı su veya buharlaşmayan su içeriği) dehidrasyonu ve ayrışmasına bağlı olarak oluşan su kaybı %9,70 ile en fazla CNT2 numunesinde; %7,50 ile en az CNT1 numunesinde tespit edilmiştir.

CH'nin tüm içeriği, CH dehidrasyonu ve CaCO₃ ayrışmasından kaynaklanan ağırlık kayıpları kullanılarak aşağıdaki Denklem 4.1 ile hesaplanmıştır:

$$CH(\%) = \left(WL_{CH}(\%) \times \frac{MW_{CH}}{MW_{H_2O}} \right) + \left(WL_{CC}(\%) \times \frac{MW_{CH}}{MW_{CO_2}} \right) \quad (4.1)$$

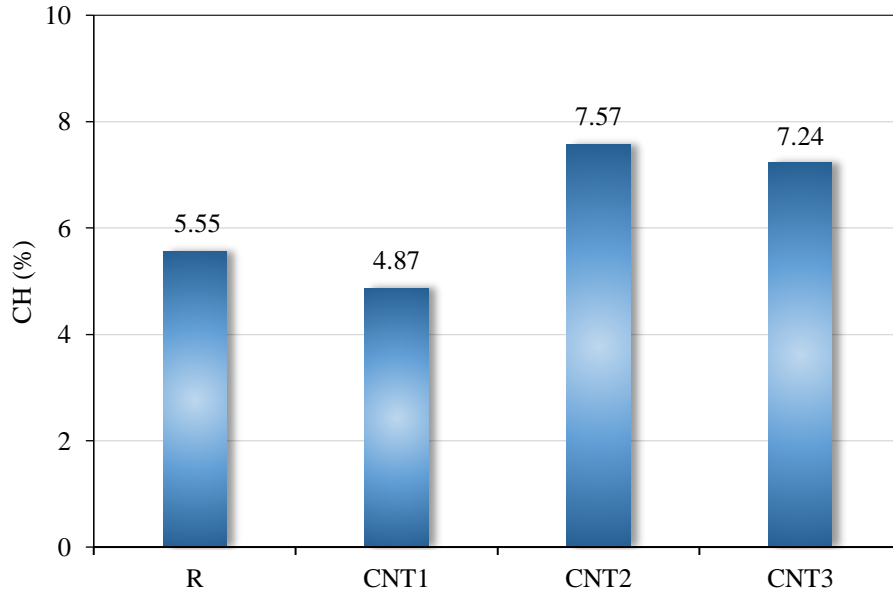
Formülde WL_{CH}: CH'nin dehidrasyonu; WL_{CC}: CaCO₃'ün ayrışmasından kaynaklanan ağırlık kayıplarıdır.

MW_{CH}=74: CH'nin;

MW_{H₂O}=18: H₂O'nun;

MW_{CO₂}=44: CO₂'nin molekül ağırlıklarıdır [373].

Elde edilen verilere göre denklemden hesaplanan CH içeriği R, CNT1, CNT2, CNT3 numunelerinde sırasıyla %5,55; 4,87; 7,57; 7,24 oranlarında meydana gelmiştir. Bu sonuçlara göre, karbon nanotüp ikame oranının referans numumeye göre CNT1 numunesi hariç tüm karışım oranlarında nispeten CH içeriğinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 4.26).



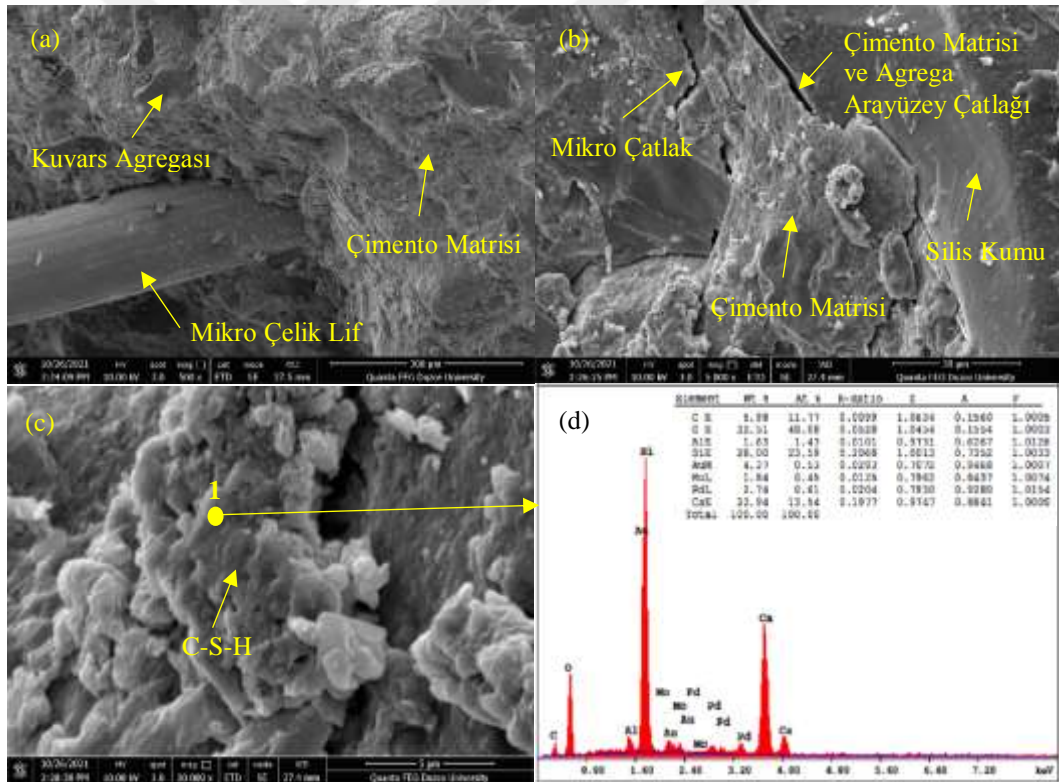
Şekil 4.26. R, CNT1, CNT2, CNT3 UYPB numunelerinin CH içeriği.

25-200°C sıcaklık aralığında karbon nanotüp katkılı numunelerde CNT1 hariç daha fazla yapısal ve kristal su ile C-S-H fazlarının dehidratasyonu şeklinde görülürken, 400-500°C sıcaklık aralığında CH'nin CNT1 numunesi hariç daha fazla dehidrasyona uğradığı gözlenmiştir.

Ayrıca diğerlerine göre nispeten daha yüksek kimyasal bağlı su içeriğine sahip CNT2 numunesinin, daha fazla hidrasyon ürünleriyle daha az gözenekli ve daha kompakt bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. Termal analizlerden elde edilen sonuçların, XRD ve FT-IR analizlerinden elde edilen verilerle uyumlu olarak geliştiğini göstermiştir.

4.3.4. SEM Analizleri

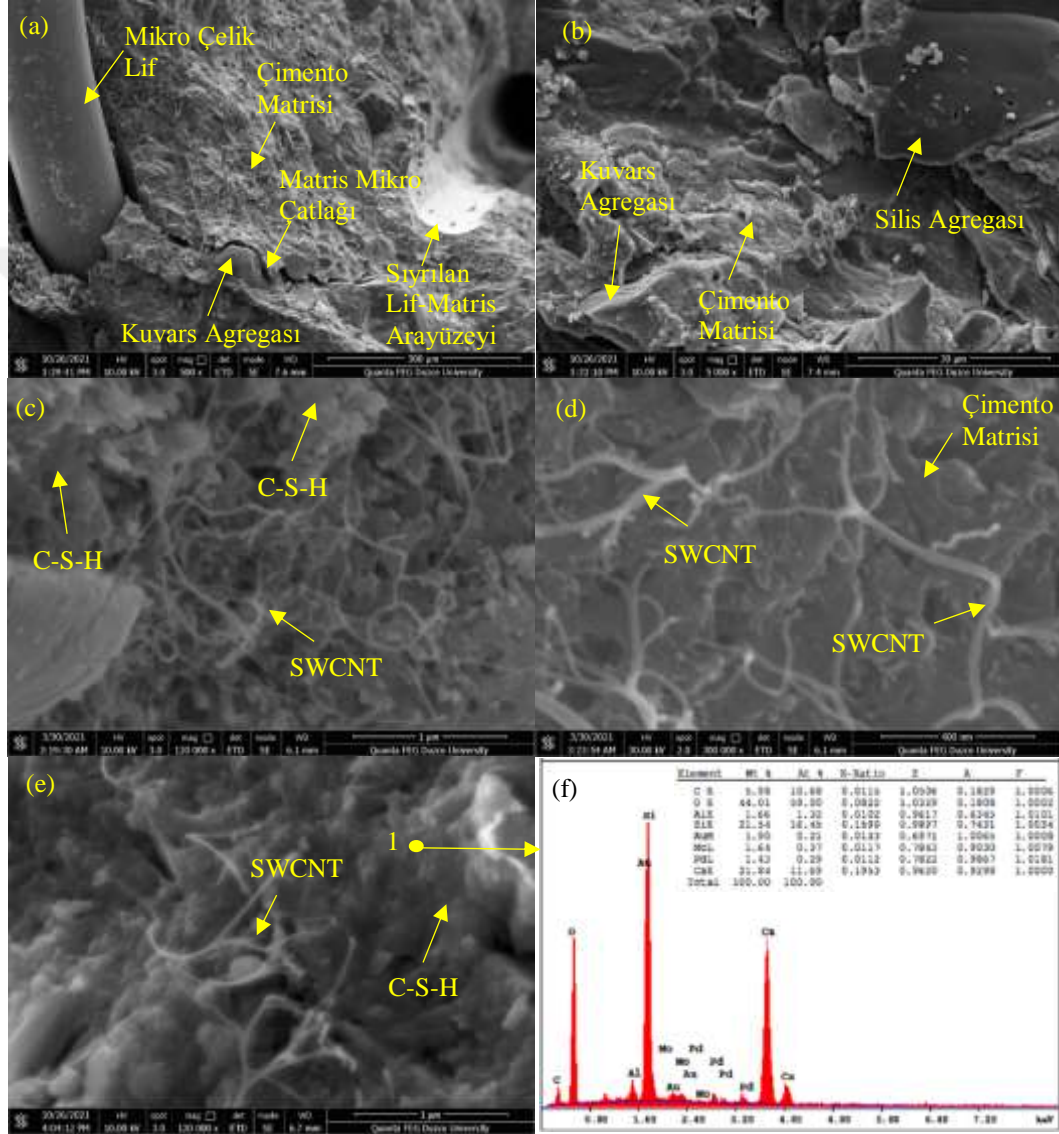
SWCNT takviye edilen ve referans 90 günlük UYPB'lerin mikro yapısının incelenmesi için alınan örnekler üzerinde 500; 5000; 120000 ve 300000 bin FE-SEM görüntüleri Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmiştir. SEM ve EDS analizleri ile çimento matrisi, kuvars ve silis agregaları, C-S-H yapıları ve SWCNT'lerin yapı içerisindeki dağılımları görüntülenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.27. 90 günlük referans UYPB numunesinden alınan SEM ve EDS analizi görüntüleri.

Şekil 4.27-(a)'da UYPB karışımlarında kullanılan çelik lifin çimento matrisi ile iyi bir aderans sağladığı, ancak UYPB kırılma yükleri aşıldığında pürüzsüz bir yüzeye sahip olan mikro çelik liflerin matris içerisinden sıyrıldığı, mikro çelik liflerde herhangi

kopmanın meydana gelmediği görülmektedir. Lif geometrisinin mekanik aderansı sağlayacak şekilde olmadığı, lif boyunun 12 mm ile sınırlı olmasından dolayı çelik liflerin matris yapıdan koparak değil sıyrılarak ayrıldığı anlaşılmaktadır. Farklı boylarda ve geometrilere hibrit lif kullanımı ile lif matris aderansının artırılabilirliği, böylece çekme ve eğilme dayanımlarında kayda değer bir artış sağlanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.28. 90 günlük SWCNT takviyeli UYPB numunleri üzerinde yapılan SEM ve EDS analizi görüntüleri.

SWCNT'lerin çimento matrisi içerisinde herhangi bir aglomerasyona uğramadığı, homojen bir şekilde dağıldığı, çimento matrisi ile fiziksel bir bağ oluşturduğu görülmektedir (Şekil 4.28-(c); (d); (e)). SWCNT'lerin C-S-H ürünleri arasında bir ağ oluşturarak, aralarında iyi bir bağ oluşturduğu gözlenmektedir. Çimento matrisi ile

kurduğu fiziksel bağ nedeniyle matris içerisinde bir kopru gorevi goren SWCNT'ler, matriste mikro çatlakların oluşmasını/gelişmesini engelleyerek, kompoziti olası hasarlardan korumaktadır. Bu, imento esaslı malzemeler için mekanik dayanım ve dayanıklılık açısından onemlidir [374]. C-S-H-gel, matrisin mukavemetini sağlayan birçok onemli muhendislik özelliğine sahip bir imento rundur. SWCNT'lerin bu runlerle etkileşimi, karışımların işlenebilirliğindeki azalmanın nedeni olabileceği düşnlmektedir [305].



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma SWCNT'lerin ultra yüksek performanslı betonun mekanik, fiziksel ve dayanıklılık özelliklerine etkilerini araştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, çimento ağırlığının %0; 0,01; 0,02 ve 0,03 oranlarında olmak üzere 4 farklı oranda SWCNT takviye edilmesi ile UYPB'ler üretilmiştir. Ayrıca üretilen UYPB'ler içerisine toplam hacmin %1,25'i oranında mikro çelik lif takviye edilmiştir.

Hazırlanan UYPB karışımları üzerinde taze beton yayılma çapı, taze beton hava içeriği ve taze beton yoğunluğu ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş UYPB betonları üzerinde ise yoğunluk, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, Charpy darbe dayanımı, Schmidt çekici ile yüzey sertliği, elektriksel özdirenç, Böhme aşınma direnci ve renk değişim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mikro yapı analizleri olarak FT-IR, XRD, TGA, DTA, ve SEM analizleri gerçekleştirilerek SWCNT takviyesinin UYPB özelliklerine olan etkileri çok yönlü bir şekilde incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

Taze UYPB beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre;

- SWCNT oranına bağlı olarak yayılma çapı değerlerinin değişim gösterdiği, SWCNT takviye oranı arttıkça yayılma çapı değerlerinin azaldığı,
- SWCNT takviye oranındaki artış ile doğru orantılı olarak hava içeriği miktarlarının arttığı, SWCNT'lerin nano boyutlu yüksek özgül yüzey alanına sahip olan nanofibril yapıda olması nedeniyle taze beton işlenebilirliklerini düşürdüğü ve dolayısıyla karışım içerisinde hapsolmuş hava miktarının SWCNT takviye oranındaki artış ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Karışımlarda oluşabilecek hava içeriğinin azaltılması için hava atıcı katkıların ve vakumlu mikserlerin kullanılabilmesi, böylece SWCNT gibi nano boyutlu bir malzeme kullanımı ile oluşabilecek dezavantajın ortadan kaldırılabilmesi,
- Taze beton yoğunluğu değerleri incelendiğinde SWCNT takviye oranına bağlı olarak önemli olmayan küçük değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Kullanılan SWCNT oranlarının onbinde 1, 2 ve 3 gibi düşük oranlarda olmasından

dolayı taze beton yoğunluğu değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı,

- UYPB karışımlarının içerisine SWCNT takviyesi ile karışımın erken yaş büzülme ve beton sıcaklığı değerlerinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. UYPB karışımlarında SWCNT'li numunelerdeki ısı artışı Referans numuneye göre daha uzun sürede gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca SWCNT'li numunelerde daha düşük ısı artışı meydana gelmiştir. SWCNT'nin hem büzülme hemde sıcaklık artışını engelleyici bir etki oluşturduğu, böylece otojen büzülme düşürebileceği söylenebilir. UYPB gibi yüksek oranda bağlayıcı içeren ve bundan dolayı özellikle erken yaşlarda büzülme kaynaklı çatlak riskinin yüksek olduğu betonlarda SWCNT kullanımı ile büzülme çatlaklarının engellenebileceği görülmektedir.

Sertleşmiş beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre;

- Yoğunluk değerlerinin beton yaşına bağlı olarak anlamlı bir değişimin olmadığı, ancak SWCNT oranına bağlı olarak anlamlı bir değişimin olduğu, SWCNT oranındaki artışa bağlı olarak yoğunluk değerlerinin azaldığı, farklı yaşlardaki UYPB numunelerinin kendi içerisindeki yoğunluk değerlerinin %0,2-0,6 aralığında değişim gösterdiği, çok küçük oranda meydana gelen bu değişimin lif homejenizasyonundaki farklılıklardan kaynaklanabileceği, buna karşın artan SWCNT miktarı ile beton yoğunluğunun bir miktar düşme eğiliminde olduğu, SWCNT'li numunelerde sertleşmiş beton yoğunluğu artan CNT miktarına karşın düştüğü, CNT takviye oranındaki artış nedeniyle işlenebilirlikteki azalma nedeniyle betonun boşluk yapısında meydana gelen artış nedeniyle yoğunluk değerlerinde azalmanın meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir.
- UGH değerlerinin SWCNT miktarına bağlı olarak anlamlı bir değişiminin olmadığı ancak beton yaşına bağlı olarak UGH değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. SWCNT oranına bağlı olarak 28 günlük numunelerde meydana gelen sınırlı azalmanın yoğunluk değerlerinde azalma ile doğru orantılı olduğu, SWCNT kullanımı ile beton kıvamında meydana gelen azalma ve hapsolmuş hava miktarındaki artış nedeniyle UGH değerlerinde bir miktar azalmanın meydana geldiği görülmüştür.
- SWCNT ve beton yaşına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinde önemli

değişimlerin meydana geldiği, SWCNT miktarındaki artış ile ters orantılı olarak basınç dayanımı değerlerinin azaldığı, beton yaşındaki artış ile doğru orantılı olarak basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür. Basınç dayanımı değerinde SWCNT takviye oranına bağlı olarak 28. günde %6,8-9,8 oranlarında, 90. günde ise %2,8-6,3 oranında bir azalmanın meydana geldiğini, daha yüksek SWCNT katkı oranında kullanılacak hava atıcı ve süperakışkanlaştırıcılar ile kıvamı arttırılmış düşük hava içeriğine ve yüksek yoğunluğa sahip dayanımı arttırılmış UYPB'lerin elde edilebileceği değerlendirilmektedir.

- SWCNT ve beton yaşına bağlı olarak eğilme dayanımı değerlerinde önemli değişimlerin meydana geldiği, SWCNT miktarındaki artış ile ters orantılı olarak eğilme dayanımı değerlerinin azaldığı, beton yaşındaki artış ile doğru orantılı olarak eğilme dayanımı değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür. İşlenebilirliğin sabit tutulduğu UYPB karışımları ile daha düşük hava içeriğine sahip betonların üretilmesi ile SWCNT'nin eğilme dayanımları üzerine olan katkısının daha belirgin bir şekilde değerlendirilebileceği düşünülmektedir.
- SWCNT takviyesi ile elektriksel iletkenlikleri arttırılmış UYPB'lerin üretilabileceği deneysel çalışma bulgularından anlaşılmaktadır. UYPB'lerde iletkenliğin $3 \cdot 10^{-4}$ oranında SWCNT kullanımı ile referans UYPB'ye göre 2,6 kat arttırılabileceği tespit edilmiştir. Çelik liflerin sağladığı iletken ağ, çimento matrisi içerisine katılan 5-30 μm boy ve 1-2 nm çapa sahip olan nano boyutlu SWCNT'ler ile UYPB içerisinde sürekli iletken bir ağ oluşturulmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. SWCNT takviye edilmesi ile UYPB'lerde elektriksel iletkenliğin arttırılabileceği görülmüştür.
- SWCNT ve beton yaşına bağlı olarak ortalama yüzey sertliği değerlerinde önemli değişimlerin meydana geldiği, SWCNT miktarındaki artış ile ortalama yüzey sertliği değerleri arasında doğrusal olarak artışların olduğu, aynı zamanda beton yaşındaki artış ile doğru orantılı olarak ortalama yüzey sertliği değerlerinin artış gösterdiği görülmüştür.
- Üretilen UYPB'lerin yüzey sertliği değerlerinin $3 \cdot 10^{-4}$ oranında SWCNT kullanımı ile farklı beton yaşlarında referans numuneye göre %0,3-6 aralığında artış sağlandığı, beton yaşına bağlı olarak yüzey sertliği değerlerinde meydana gelen değişimin SWCNT takviyesi ile olan değişimden daha belirgin olduğu tespit

edilmiştir.

- SWCNT katkı oranına bağlı olarak kütle kaybı değerlerinde değişimlerin meydana geldiği, CNT1 ve CNT2 takviye oranlarında referans numuneye göre bir artış meydana gelirken CNT3 takviye oranında ise referans numuneye göre kütle kaybının azaldığı görülmektedir.
- SWCNT miktarı artışı ile dayanım ve yoğunluk değerlerindeki azalmaya paralel olarak UYPB'lerin aşınma direncinin CNT2 oranına kadar azaldığı, ancak CNT3 oranında diğer sonuçlarla ters orantılı bir şekilde aşınma direncinin arttığı tespit edilmiştir.
- SWCNT takviye oranına bağlı olarak darbe dayanımı değerlerinde önemli değişimlerin meydana geldiği, CNT1, CNT2 ve CNT3 numunelerindeki darbe dayanımı değerlerinin referans numuneye göre sırasıyla %11,4; 57,28 ve 31,6 oranlarında artış gösterdiği görülmektedir. SWCNT'lerin UYPB karışımları içerisinde kullanılması ile çimento matrisi arasındaki bağı mekanik olarak güçlendirdiği ve UYPB matrisine yük transferini iyileştirdiği, darbe dayanımı değerlerindeki artışın bundan kaynaklandığı düşünülmektedir.
- SWCNT katkı oranı arttıkça UYPB karışımlarında açık renkten koyu renge doğru bir değişimin gözlemlendiği, renk değişiminin UYPB numunelerinin tüm yüzeyinde eşit düzeyde olduğu, bunun SWCNT'nin karışım içerisinde homojen bir şekilde dağıldığının göstergesi olarak kabul edilebileceği ifade edilebilir.
- FT-IR değerleri incelendiğinde SWCNT katkı oranlarına bağlı olarak CH piklerinin artış ve azalma gösterdiği, hidrate olmuş kalsiyum silikat (C-S-H) piklerinde belirgin farklılıkların bulunmadığı, FT-IR ölçümlerinden elde edilen sonuçların XRD ve Termal Analiz sonuçları ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.
- Numunelerin XRD kırınımları incelendiğinde, SWCNT'lerin betonun hidratasyon reaksiyonunu teşvik etme derecesinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla farklı oranlardaki karbon nanotüplerin beton matrisi üzerindeki fiziksel etkilerinin (çatlakları köprüleme ve gözenekleri doldurma), kimyasal reaksiyonlardan (hidrasyon reaksiyonunu destekleyen) daha yüksek olduğu söylenebilir.
- DTA-TGA sonuçları incelendiğinde; CH içeriği R, CNT1, CNT2, CNT3

numunelerinde sırasıyla %5.55, 4.87, 7.57, 7.24 oranlarında meydana gelmiştir. Bu sonuçlara göre, karbon nanotüp ikame oranının referans numuneye göre CNT1 numunesi hariç tüm karışım oranlarında CH içeriğini artırdığı gözlenmiştir. Ayrıca en yüksek kimyasal bağlı su içeriğine sahip CNT2 numunesinin daha fazla hidratasyon ürünü olduğu, en yüksek C-S-H tüketimi ile CNT2 numunesinin gözenekliliğin azaltılması ve mukavemete katkı sağladığı görülmüştür. Termal analizlerden elde edilen sonuçların, XRD ve FT-IR analizlerinden elde edilen verilerle uyumlu olarak geliştiğini göstermiştir.

- SEM analizlerine göre ise SWCNT'lerin çimento matrisi içerisinde herhangi bir aglomerasyona uğramadığı, homojen bir şekilde dağıldığı, çimento matrisi ile fiziksel bir bağ oluşturduğu görülmektedir (Şekil 4.28-(c), (d), (e)). SWCNT'lerin C-S-H ürünleri arasında bir ağ oluşturarak, aralarında iyi bir bağ oluşturduğu gözlenmektedir.

Nanoteknoloji sayesinde mevcut malzemelerdeki kalite ve performansın en üst düzeye çıkarılması, var olan kusurların giderilerek hizmet ömrünün uzatılması, ağırlık ve/veya hacminin azaltılması, üretim yöntemlerini geliştirerek aşamalarını kolaylaştırma, daha verimli malzemelerle üretimini sağlama, işletme veya bakım-onarım ihtiyaçlarını en aza indirme gibi faydalar sağlanabilir. Özellikle mikro ve nano ölçekte gerçekleşen, nanoteknolojik olarak da adlandırılan araştırmalar sayesinde çok daha üstün özelliklere sahip yeni nesil malzemeler keşfedilmektedir. Yapılan bu tez çalışması ile, maksimum matris yoğunluğu sağlayacak, optimize edilmiş kuru karışım reçetesine sahip ve standart karışım prosedürü oluşturulmuş UYPB üretimi gerçekleştirmiştir. Bu çerçevede bazı özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla SWCNT takviyeli UYPB'lerin taze ve sertleşmiş özellikleri araştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde erken dönem davranışları bakımından agresif bir davranış gösteren UYPB'lerin priz süresi, hidratasyon sıcaklıkları ve büzülme davranışları bakımından iyileştirmeler sağlanabileceği görülmüştür. UYPB karışımlarına SWCNT'lerin başarılı bir şekilde disperse edilerek katılabileceği UYPB erken dönem davranışlarının yanında sertlik, darbe dayanımı, elektriksel iletkenlik ve aşınma direnci gibi özelliklerinin iyileştirilebileceği tespit edilmiştir. Nano malzeme olan SWCNT'lerin kullanımı ile UYPB'lerin dayanım özelliklerinde sınırlı azalmaların meydana geldiği

görülmektedir. Ancak farklı süperakışkanlaştırıcı katkı oranlarında işlenebilirliğin artırılması ile yoğunluk, UGH ve dayanım değerlerinde de iyileşmelerin sağlanabileceği düşünülmektedir.

Her geçen gün inşaat sektöründeki kullanımının gideren artacağı öngörülen UYPB'lerin mekanik, fiziksel, elektriksel ve durabilite özelliklerinin geliştirilmesine yönelik fonksiyonelleştirilmiş farklı nano malzemelerin, miktar, geometri, boyut ve tür olarak farklı liflerin kullanımı ile ilgili çalışmaların araştırmacılar tarafından yapılmasında fayda olduğu düşünülmektedir.



6. KAYNAKLAR

- [1] F. Özalp, “Ultra yüksek performanslı betonların mekanik davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye 2006.
- [2] Flavia Ribeiro Furtado de Mendonca, “Proportion and Evaluation of Ultra-High Performance Concrete Using Local Materials”, Yüksek Lisans Tezi, Nebraska üniversitesi, Lincoln, ABD, 2019.
- [3] Z. Li, “Proportioning and properties of ultra-high performance concrete mixtures for application in shear keys of precast concrete bridges”, Doktora Tezi, Clemson Üniversitesi, ABD, 2015.
- [4] R. Yu, P. Spiesz, ve H. J. H. Brouwers, “Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses”, *Cement and Concrete Composites*, c. 55, ss. 383-394, 2015.
- [5] P. Richard ve M. Cheyrezy, “Composition of reactive powder concretes”, *Cement and concrete research*, c. 25, sayı 7, ss. 1501–1511, 1995.
- [6] A. Syed, “Development of ultra high performance fiber reinforced concrete”, Yüksek Lisans Tezi, Aalto Üniversitesi, Finlandiya , 2018.
- [7] S. Allena ve C. M. Newton, “Shrinkage of fiber-reinforced ultrahigh strength concrete”, *Journal of materials in civil engineering*, c. 24(5), ss. 612-614. 2012.
- [8] P. Roco, M. C., Williams, R. S., ve Alivisatos, “Nanotechnology Research Directions: vision for nanotechnology in the next decade.”, National Science and Technology Council, Washington, DC., 2000.
- [9] S. Mann, (2008, 15 Nisan). “‘Nanotechnology and Construction’, Nanoforum”, [Online]. Erişim: <http://www.nanoforum.org>
- [10] S. Leydecker, “Nano Materials in Architecture, Interior Architecture and Design”, Birkhauser, Boston, 2008.
- [11] W. Meng ve K. H. Khayat, “Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers”, *Composites Part B: Engineering*, c. 107, ss. 113–122, 2016.
- [12] W. W. Li, W. M. Ji, Y. C. Wang, Y. Liu, R. X. Shen, ve F. Xing, “Investigation on the mechanical properties of a cement-based material containing carbon nanotube under drying and freeze-thaw conditions”, *Materials*, c. 8, sayı 12, ss. 8780–8792, 2015.
- [13] B. Yıldız ve N. P. Seçkin, “Mimaride malzemelerin algısal farklılıklarının değerlendirilmesi”, *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, c. 1, sayı 2, ss. 6–14, 2019.
- [14] Seda Altıntaş Şahinoğlu, “Reaktif Pudra Betonlar”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2010.
- [15] M. A. Bajaber ve I. Y. Hakeem, “UHPC evolution , development , and utilization in construction : a review”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 10,

ss. 1058–1074, 2020.

- [16] Türkiye Hazır Beton Birliği, “Geçmişten Geleceğe Vazgeçilmez Yapı Malzemesi: Beton”, Türkiye, 2019.
- [17] M. Maraşlı, “Cam lifli takviyeli betonlarda olgunluk indeksi yöntemi ile eğilme ve basınç dayanımlarının tahmin modelinin geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2019.
- [18] M. A. Taşdemir ve F. Bayramov, “Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı”, *İtü Mühendislik Dergisi*, c. 1, sayı 2, ss. 125–144, 2002.
- [19] Z. Li, Introduction to concrete. *Advanced Concrete Technology*. John Wiley and Sons., 2011.
- [20] N. M. Azmee ve N. Shafiq, “Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications”, *Case Studies in Construction Materials*, c. 9, e00197. 2018.
- [21] E. Deniz, “Kür şeklinin yüksek performanslı betonların mekanik özelliklerine etkisi”, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2011.
- [22] Fırat Üniversitesi, “Beton teknolojisi, Ders Notları”, Elazığ, 2020.
- [23] Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, “TS 802, 2016.
- [24] J. Xue, B. Briseghella, F. Huang, C. Nuti, H. Tabatabai, ve B. Chen, “Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering”, *Construction and Building Materials*, c. 260, ss. 119844, 2020.
- [25] M. Farzad, M. Shafieifar, ve A. Azizinamini, “Experimental and numerical study on bond strength between conventional concrete and ultra High-Performance Concrete (UHPC)”, *Engineering Structures*, c. 186, sayı 1, ss. 297–305, 2019.
- [26] O. Mishra ve S. P. Singh, “An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete”, In *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2019, c. 8, sayı 2, ss. 97–143.
- [27] N. M. Azmee ve N. Shafiq, “Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications”, *Case Studies in Construction Materials*, c. 9, s. e00197, 2018.
- [28] S. Ahmad, I. Hakeem, ve M. Maslehuddin, “Development of an optimum mixture of ultra-high performance concrete”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, c. 20, sayı 9, ss. 1106–1126, 2016.
- [29] V. Y. L. Nematollahi Behzad, Saifulnaz M. R. Raizal, Mohd. Jaafar Saleh, “A review on ultra high performance ‘ductile’ concrete (UHPdC) technology”, *International Journal of Civil & Structural Engineering*, c. 2, sayı 3, ss. 1003–1018, 2013.
- [30] M. H. Richard, P., & Cheyrezy, “Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength.”, *Special Publication*, sayı 144, ss. 507–518, 1994.
- [31] P. Racky, “Cost-effectiveness and sustainability of UHPC”, In *Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2004, ss. 797–805.
- [32] A. Arora, Y. Yao, B. Mobasher, ve N. Neithalath, “Fundamental insights into the

- compressive and flexural response of binder- and aggregate-optimized ultra-high performance concrete (UHPC)”, *Cement and Concrete Composites*, c. 98, sayı 1, ss. 1–13, 2019.
- [33] J. Li, Z. Wu, C. Shi, Q. Yuan, ve Z. Zhang, “Durability of ultra-high performance concrete – A review”, *Construction and Building Materials*, c. 255, s. 119296, 2020.
- [34] M. C. Tang, “High performance concrete-past, present and future”, *In Proceedings of the international symposium on UHPC*, Kassel, Germany, 2004, ss. 3–9.
- [35] L. I. U. Juanhong, S. Shaomin, ve W. Lin, “Durability and Micro-structure of Reactive Powder Concrete”, *Journal of Wuhan University of Technology Science Edition*, c. 24, sayı 3, ss. 506–509, 2009.
- [36] A. Cwirzen, “The effect of the heat-treatment regime on the properties of reactive powder concrete”, *Advances in cement research*, c. 19, sayı March, ss. 25–33, 2007.
- [37] E. Sarika, S. ve John, “A Study on Properties of Reactive Powder Concrete”, *International Journal of Engineering Research & Technology*, sayı 4(11), ss. 110–113, 2015.
- [38] Richard C. Mielenz, “History of chemical admixtures for concrete”, *Concrete International*, c. 6, sayı 4, ss. 40–54, 1984.
- [39] Roy D. M., Gouda G. R., Bobrowsky A., “Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques”, *Cement and Concrete Composites*, c. 2, ss. 349–366, 1972.
- [40] G. G. R. Roy D. M., “High strength generation in cement pastes”, *Cement and Concrete Composites*, c. 3, ss. 807–820, 1973.
- [41] B. S. Yudenfreund M, Odler I, “Hardened Portland cement pastes of low porosity, I. ‘Materials and experimental methods’”, *Cement and Concrete Composites*, sayı 2(3), ss. 313–330, 1972.
- [42] G. G. Parinita Baruah, Sudip Basack, “Compressive strength of interlocking concrete compressive strength of interlocking concrete pavement block influenced by admixtures”, *Compressive Strength of Interlocking Concrete*, 2020, s. 5.
- [43] İ. B. Topçu ve C. Karakurt, “Reaktif pudra betonları”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, ss. 25–30, 2005.
- [44] M. Mohabbi Yadollahi ve S. Varolgüneş, “Farklı Kür Koşullarının Reaktif Pudra Betonların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi”, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, c. 11, sayı 1, ss. 353–361, 2020.
- [45] M. Helmi, M. R. Hall, L. A. Stevens, ve S. P. Rigby, “Effects of high-pressure/temperature curing on reactive powder concrete microstructure formation”, *Construction and Building Materials*, c. 105, ss. 554–562, 2016.
- [46] Y. Wang, M. An, Z. Yu, ve X. Hou, “Durability of Green Reactive Powder Concrete”, *Ltlgb* 2012, 2012, ss. 863-877.
- [47] S. Abbas, M. L. Nehdi, ve M. A. Saleem, “Ultra-high performance concrete: mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, c. 10, sayı 3, ss. 271–295, 2016.

- [48] B. A. Tayeh, A. S. Aadi, N. N. Hilal, B. H. A. Bakar, M. M. Al-Tayeb, ve W. N. Mansour, “Properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPRFC) - A review paper”, *In IP Publishing*, c. 2157, sayı 1, s. 13, 2019.
- [49] M. Schmidt ve E. Fehling, “Ultra-high-performance concrete: Research, development and application in Europe”, *ACI special publication*, c. 228(1), ss. 51-78, 2005.
- [50] S. P. Li, W., Huang, Z., Zu, T., Shi, C., Duan, W. H., & Shah, “Influence of nanolimestone on the hydration, mechanical strength, and autogenous shrinkage of ultrahigh-performance concrete.”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, sayı 28(1), ss. 1–9, 2016.
- [51] G. J. Wille, K., Naaman, A. E., Parra-Montesinos, “Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way”, *ACI Materials Journal*, s. 108 (1), 2011.
- [52] F. De Larrard ve T. Sedran, “Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model”, *Cement and concrete research*, c. 24, sayı 6, ss. 997–1009, 1994.
- [53] B. A. Graybeal, “*Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections*”, Federal Highway Administration (FHWA), ABD, FHWA-HRT-14-084, 2014.
- [54] B. A. Graybeal, “*Development of Non-Proprietary Ultra-High Performance Concrete for Use in the Highway Bridge Sector*”, Federal Highway Administration, ABD, FHWA-HRT-13-100, 2013.
- [55] W. Meng, “Design and performance of cost-effective ultra-high performance concrete for prefabricated elements”, Doktora Tezi, Missouri University, ABD, 2017.
- [56] M. Schmidt ve E. Fehling, “Ultra-high-performance concrete: Research, development and application in Europe”, *Seventh International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete*, c. 5, sayı September 2015, ss. 51–78.
- [57] E. Ghafari, M. Arezoumandi, H. Costa, ve E. Júlio, “Influence of nano-silica addition on durability of UHPC”, *Construction and Building Materials*, c. 94, ss. 181–188, 2015.
- [58] M. Talebinejad, I., Bassam, S. A., Iranmanesh, A., & Shekarchizadeh, “Optimizing mix proportions of normal weight reactive powder concrete with strengths of 200–350 MPa.”, *In Proceedings of the International Symposium on UHPC*, 2004, ss. 133–141.
- [59] F. Findik ve F. Findik, “Civil engineering materials”, *Heritage. Sustainable. Development*, c. 3, sayı 2, ss. 154–172, 2021.
- [60] P. Xincheng, *Super-high-strength high performance concrete*. CRC Press., 2012. ss. 258.
- [61] P. Persoon, “Characterization of the mechanical properties of ultra high performance fibre-reinforced concretes (UHPRFC)”, Yüksek Lisans Tezi, University of Girona, İspanya, 2017.
- [62] Ali Alshaab Milad Ramroom, “Taguchi metodu ile üretilen ultra yüksek performanslı betonda (uypb) mineral katkıların etkisi ve optimizasyonu”, Yüksek

Lisans Tezi, Kastamonu üniversitesi, Türkiye, 2020.

- [63] P. Rossi, “Influence of fibre geometry and matrix maturity on the mechanical performance of ultra high-performance cement-based composites”, *Cement and Concrete Composites*, c. 37, ss. 246–248, 2013.
- [64] S. H. Park, D. J. Kim, G. S. Ryu, ve K. T. Koh, “Composites tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete”, *Cement and Concrete Composites*, c. 34, sayı 2, ss. 172–184, 2012.
- [65] A. S. El-Dieb, “Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers”, *Materials & Design*, c. 30, sayı 10, ss. 4286–4292, 2009.
- [66] B. A. Tayeh, B. H. Abu Bakar, M. A. Megat Johari, and Y. L. Voo, “Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay”, *Construction and Building Materials*, c. 36, ss. 538–548, 2012.
- [67] A. M. T. Hassan, S. W. Jones, ve G. H. Mahmud, “Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete(UHPFRC)”, *Construction and Building Materials*, c. 37, ss. 874–882, 2012.
- [68] L. Nilsson, “Development of UHPC concrete using mostly locally available raw materials”, Yüksek Lisans Tezi, Luleå University of Technology, İsveç, 2018.
- [69] E. Fehling, M. Schmidt, ve S. Sturwald, “Ultra High Performance Concrete:(UHPC)”, In *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 2008, s. 160.
- [70] J. A. A. Hernandez, “Development and Laboratory Testing of Ultra High Performance Concrete”, Yüksek Lisans Tezi, The University of Texas at Austin, ABD, 2016.
- [71] Standard Specification For Silica Fume Used In Cementitious Mixtures, ASTM C 1240, 2003.
- [72] M. B. Eide ve J.-M. Hisdal, “Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art”, 2012.
- [73] S. Shihada and M. Arafa, “Effects of silica fume, ultra fine and mixing sequences properties of ultra high-performance concrete”, *Asian Journal of Materials Science*, c. 2, sayı 3, ss. 137–146, 2010.
- [74] R. Kumar, A. K. Samanta, ve D. K. S. Roy, “Characterization and development of ecofriendly concrete using industrial waste –A review”, *Journal of Urban and Environmental Engineering*, c. 8, sayı 1, ss. 98–108, 2014.
- [75] M. C. By S. Collepardi, L. Coppola, R. Troli ve Synopsis:, “Mechanical properties of modified reactive powder concrete.”, *ACI special publication*, c. 173, sayı 1, ss. 1–22, 2014.
- [76] E. H. Kadri, S. Aggoun, S. Kenai, ve A. Kaci, “The compressive strength of high-performance concrete and ultrahigh-performance”, *Advances in Materials Science and Engineering*, c. 2012, sayı 1, s. 7, 2012.
- [77] A. Tfraoui, G. Escadeillas, S. Lebailli, ve T. Vidal, “Metakaolin in the formulation of UHPC”, *Construction and Building Materials*, c. 23, sayı 2, ss. 669–674, 2009.

- [78] F. Toutlemonde, *Designing and building with UHPFRC*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 101, 2011.
- [79] Y. W. Chan ve S. H. Chu, “Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete”, *Cement and concrete research*, c. 34, sayı 7, ss. 1167–1172, 2004.
- [80] F. de Larrard, “Ultrafine particles for the making of very high strength concretes”, *Cement and concrete research*, c. 19, sayı 2, ss. 161–172, 1989.
- [81] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, ve O. Copuroglu, “Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash”, *Cement and concrete research*, c. 41, sayı 11, ss. 1104–1111, 2011.
- [82] K. Soutsos, M. N., Millard, S. G., & Karaiskos, “Mix design, mechanical properties and impact resistance of reactive powder concrete (RPC)”, *In International workshop on high performance fibre-reinforced cementitious composites in structural applications*, ss. 549–560, 2005.
- [83] H. Yazıcı, “The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures”, *Building and environment*, ss. 2083–2089, 2007.
- [84] P. Nallathambi, B. L. Karihaloo, ve B. S. Heaton, “Effect of specimen and crack sizes, water/cement ratio and coarse aggregate texture upon fracture toughness of concrete”, *Magazine of concrete research*, c. 36, sayı 129, ss. 227–236, 1984.
- [85] M. P. and N. B. Christiane Foy, “Freeze-thaw durability and deicer salt scaling resistance of a 0,25 water-cement ratio concrete”, *Cement and concrete research*, c. 18, sayı 2, ss. 604–614, 1988.
- [86] H. Russel, G ve B. A. Graybeal, “Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community”, *Federal Highway Administration*, ABD, FHWA-HRT-13-060, 2013.
- [87] J. Yang vd., “Tribological behaviors of plasma sprayed CuAl/Ni-graphite composite coating”, *Tribology International*, c. 90, ss. 96–103, 2015.
- [88] R. N. Maten, Ultra high performance concrete in large span shell structures. Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, Hollanda, 2011.
- [89] C. Schrö, M. Gruber, ve J. Plank, “Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC)”, *Cement and Concrete Research*, c. 42, ss. 1401–1408, 2012.
- [90] J. F. Lamond ve J. H. Pielert, *Significance of tests and materials and concrete-making properties of concrete*. 2006. s. 169.
- [91] N. V. Tue, J. Ma, ve M. Orgass, “Influence of addition method of superplasticizer on the properties of fresh UHPC”, *In Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 2008, sayı Mart 2008, ss. 93–100.
- [92] S. Fehling, E., Schmidt, M., Stürwald, “Ultra High Performance Concrete: (UHPC)”, *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, March 05-07, 2008 (Vol. 10). kassel university press GmbH., 2008.
- [93] M. Courtial vd., “Effect of polycarboxylate and crushed quartz in UHPC:

- Microstructural investigation”, *Construction and Building Materials*, c. 44, ss. 699–705, 2013.
- [94] A. M. Soliman, "Early-Age Shrinkage of Ultra High-Performance Concrete : Mitigation and Compensating Mechanisms", Doktora Tezi, The University of Western Ontario, London-Canada, 2011.
- [95] B. A. Graybeal, “Material property characterization of ultra-high performance concrete”, *Federal Highway Administration*, ABD, FHWA-HRT-06-103, 2006.
- [96] O. Bayard ve O. Pl, “Fracture mechanics of reactive powder concrete : material modelling and experimental investigations”, 70, ss. 839–851, 2003.
- [97] D. Wang, C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, Z. Huang, ve Z. Fang, “A review on ultra high performance concrete : Part II . Hydration , microstructure and properties”, *Construction and Building Materials*, c. 96, ss. 368–377, 2015.
- [98] Y. Orgass, M., Klug, “Fibre-reinforced ultra-high strength concretes”, *In Proceedings of the International Symposium on ultra-High Performance Concrete, Kassel, Germany*, 2004, ss. 637–648.
- [99] V. Y. G. Yanni, “Multi-scale investigation of tensile creep of ultra-high performance concrete for bridge applications”, Georgia Institute of Technology, Georgia, ABD 2009.
- [100] T. E. T. Buttignol, T. N. Bittencourt, and J. L. A. O. Sousa, “Ultra high-performance fiber-reinforced concrete (UHPC): a review of material properties and design procedures”, *Revista IBRACON de estruturas e materiais*, c. 10, sayı 4, ss. 957–971, 2017.
- [101] Shi, C., and Wu, Z. , Ultra-high performance concrete. *Kirk-othmer encyclopedia of chemical technology*, 2000, ss. 1–8.
- [102] Y. S. Wu, Chengqing, and Jun Li, Ultra-high performance concrete columns. *Ultra high performance Concrete against Blasts*, 2018, ss. 215-218.
- [103] P. Ross, Development of new cement composite materials for construction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, c. 219(1), ss. 67-74. 2005.
- [104] G. D. Ashkezari, F. Fotouhi, and M. Razmara, “Experimental relationships between steel fiber volume fraction and mechanical properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete”, *Journal of Building Engineering*, c. 32, s. 101613, 2020.
- [105] K. Soutsos, M. N., Millard, S. G., and Karaiskos, “Mix design, mechanical properties and impact resistance of reactive powder concrete (RPC)”, *In International workshop on high performance fibre-reinforced cementitious composites in structural applications*, sayı February 2005, ss. 549–560, 2005.
- [106] S. Abbas, A. M. Soliman, and M. L. Nehdi, “Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages”, *Construction and Building Materials*, c. 75, ss. 429–441, 2015.
- [107] W. Meng, Y. Yao, B. Mobasher, and K. H. Khayat, “Effects of loading rate and notch-to-depth ratio of notched beams on flexural performance of ultra-high-performance concrete”, *Cement and Concrete Composites*, c. 83, ss. 349-359,

2017.

- [108] P. Rossi, “Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes”, *Concrete international*, c. 23, sayı 12, ss. 46–52, 2001.
- [109] A. E. N. and J. R. Homrich, “Tensile Stress-Strain Properties of Sifcon”, *Materials Journal.*, c. 86, sayı 3, ss. 244–251, 1989.
- [110] P. Rossi, “Ultra high performance concretes”, *Concrete international*, sayı 30(2), ss. 31–34, 2008.
- [111] C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, ve Z. Fang, “A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design”, *Construction and Building Materials*, c. 101, ss. 741–751, 2015.
- [112] H. J. H. Brouwers and H. J. Radix, “Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study”, *Cement and concrete research*, c. 35, sayı 11, ss. 2116–2136, 2005.
- [113] N. A. Soliman and A. Tagnit-Hamou, “Using particle packing and statistical approach to optimize eco-efficient ultra-high-performance concrete”, *ACI Materials Journal*, c. 114(6), ss. 847-858, 2017.
- [114] R. Yu, P. Spiesz, and H. J. H. Brouwers, “Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)”, *Cement and concrete research*, c. 56, ss. 29–39, 2014.
- [115] H. H. C. Wong and A. K. H. Kwan, “Packing density of cementitious materials: Part 1-measurement using a wet packing method”, *Materials and structures*, c. 41, sayı 13, ss. 689–701, 2008.
- [116] M. F. Cyr ve S. P. Shah, “Advances in concrete technology”, *Advances in Building Technology*, vc 1, ss. 17-27, 2002.
- [117] B. Q. T. AL-HITY, “Farklı kür koşullarının reaktif pudra betonlarının özelliklerine etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Türkiye, 2019.
- [118] M. Hunger ve H. J. H. Brouwers, “Development of self-compacting eco-concrete”, *In Proceedings 16th Ibausil, international conference on building materials (Internationale Baustofftagung)*, Weimar, 2006, ss. 2-0189.
- [119] S. El-Tawil, Y.-S. Tai, B. Meng, W. Hansen, and Z. Liu, “Commercial production of non-proprietary ultra high performance concrete”, Department of Transportation, Research Administration, Michigan, No. RC-1670, 2018.
- [120] M. G. Sohail vd., “Advancements in concrete mix designs: high-performance and ultrahigh-performance concretes from 1970 to 2016”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, c. 30, sayı 3, s. 04017310, 2018.
- [121] A. H. M. Andreasen, “Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)”, *Kolloid-Zeitschrift*, c. 50, sayı 3, ss. 217–228, 1930.
- [122] F. de Larrard ve T. Sedran, “Mixture-proportioning of high-performance concrete”, *Cement and concrete research*, c. 32, ss. 1699–1704, 2002.
- [123] R. Yu, P. Spiesz, and H. J. H. Brouwers, “Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)”, *Cement and concrete research*, c. 56, ss. 29-39, 2014.

- [124] Martin Hunger, “An integral design concept for ecological Self-Compacting Concrete door Hunger geboren”, Doktora Tezi, Eindhoven Teknik Üniversitesi, Hollanda, 2010.
- [125] G. Hüsken and H. J. H. Brouwers, “A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study”, *Cement and concrete research*, c. 38, sayı 10, ss. 1246–1259, 2008.
- [126] Shweta Mishra, “Reviewing Some Properties of Ultra High Performance Concrete”, *International journal engine research*, c. V9, sayı 06, ss. 108–121, 2020.
- [127] K. Wille, A. E. Naaman, and S. El-Tawil, “Optimizing ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: Mixtures with twisted fibers exhibit record performance under tensile loading”, *Concrete international*, c. 33, sayı 9, ss. 35–41, 2011.
- [128] B. A. Graybeal, "Development of Non-Proprietary Ultra High Performance Concrete for Use in the Highway Bridge Sector". Federal Highway Administration, ABD, FHWA-HRT-13-100, 2013.
- [129] W. Meng, M. Valipour, ve K. H. Khayat, “Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete”, *Materials and structures*, c. 50, sayı 1, ss. 1–16, 2017.
- [130] T Sedran, F De Larrard, F Hourst, C Contamines, "Mix design of self-compacting concrete (SCC)", *In Production methods and workability of concrete*, 2004, ss. 451-462.
- [131] S. A. A. M. Fennis and J. C. Walraven, “Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design”, *Heron*, c. 57, sayı 2, ss. 73–101, 2012.
- [132] A. B. Yu and N. Standish, “An analytical-parametric theory of the random packing of particles”, *Powder technology*, c. 55(3), ss. 171-186. 1988.
- [133] S. A. A. M. Fennis, J. C. Walraven, ve J. A. Den Uijl, “The use of particle packing models to design ecological concrete”, *Heron*, c. 54, sayı 2–3, ss. 185–204, 2009.
- [134] M. Taghaddos, H., Mahmoudzadeh, F., Pourmoghaddam, A., Shekarchizadeh, “Prediction of compressive strength behaviour in RPC with applying an adaptive network-based fuzzy interface system”, *In Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 2004, ss. 273–284.
- [135] E. Ghafari, H. Costa, ve E. Júlio, “Statistical mixture design approach for eco-efficient UHPC”, *Cement Concrete Composites*, c. 55, ss. 17–25, 2015.
- [136] S. El-tawil, M. Alkaysi, A. E. Naaman, W. Hansen, ve Z. Liu, “*Development, characterization and applications of a non proprietary ultra high performance concrete for highway bridges*”, Michigan. Dept. of Transportation, No. RC-1637, 2016.
- [137] S. L. Yang, S. G. Millard, M. N. Soutsos, S. J. Barnett, and T. T. Le, “Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)”, *Construction and Building Materials*, c. 23(6), ss. 2291-2298, 2009.
- [138] C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, ve Z. Fang, “A review on ultra high performance concrete : Part I . Raw materials and mixture design”, *Construction and Building Materials*, c. 101, ss. 741–751, 2015.

- [139] M. Alkaysi ve S. El-Tawil, “Effects of variations in the mix constituents of ultra high performance concrete (UHPC) on cost and performance”, *Materials and Structures*, c. 49, sayı 10, ss. 4185–4200, 2016.
- [140] I. Ferdosian ve A. Camões, “Effective low-energy mixing procedure to develop high-fluidity cementitious pastes”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, c. 21, sayı 1, ss. 11–17, 2016.
- [141] C. M. Tam, V. W. Y. Tam, ve K. M. Ng, “Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong”, *Construction and Building Materials*, c. 26(1), ss. 79–89, 2012.
- [142] I. Faraji, “Challenges in High Performance Clusters With”, *International journal engineering sci emerging technology*, c. 2, sayı July, ss. 73–80, 2012.
- [143] A. Feylessoufi, M. Crespin, P. Dion, F. Bergaya, H. Van Damme, ve P. Richard, “Controlled rate thermal treatment of reactive powder concretes”, *Advanced cement based materials*, c. 6, sayı 1, ss. 21–27, 1997.
- [144] M. C. S. Collepardi, L. Coppola, R. Troli ve Synopsis, “Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete”, *ACI Special Publications*, c. 173, ss. 1–22, 1997.
- [145] A. Cwirzen, “The effect of the heat-treatment regime on the properties of reactive powder concrete”, *Advances in cement research*, c. 19, sayı 1, ss. 25–33, 2007.
- [146] H. Zanni, M. Cheyrezy, V. Maret, S. Philippot, and P. Nieto, “Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using ^{29}Si NMR”, *Cement and Concrete Research*, c. 26(1), ss. 93-100.1996.
- [147] A. Kamen, E. Denarie, and E. Brühwiler, “Thermal effects on physico-mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete”, *ACI Materyals Journal*, c. 104, sayı 4, s. 415, 2007.
- [148] Z. Yunsheng, S. Wei, L. Sifeng, J. Chujie, and L. Jianzhong, “Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static – dynamic behaviors”, *Cement & Concrete Composites*, c. 30(9), ss. 831-838. 2008.
- [149] S. Masse, and H. Zanni, “ ^{29}Si solid state NMR study of tricalcium silicate and cement hydration at high temperature”, *Cement and concrete research*, c. 23, ss. 1169–1177, 1993.
- [150] M. Monosi, S., Pignoloni, G., Collepardi, S., Troli, R., & Collepardi, “Modified reactive powder concrete with artificial aggregates”, *Special Publication*, c. 195, ss. 447–460, 2000.
- [151] D. Mostofinejad, M. R. Nikoo, and S. A. Hosseini, “Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC)”, *Construction and Building Materials*, c. 123, ss. 754–767, 2016.
- [152] A. Ş. Karabulut, “Reaktif pudra betonunun (RPB) özelliklerinin mineral katkılarla geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2006.
- [153] T. Uygunoğlu ve O. Ünal, “Buhar kürü uygulanmış pomzalı hafif betonun özellikleri”, *Politeknik Dergisi*, c. 10(1), ss. 111-116.2007.
- [154] S. Ahmad, I. Hakeem, and M. Maslehuddin, “Development of an optimum mixture of ultra-high performance concrete”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, c. 20, sayı 9, ss. 1106–1126, 2016.

- [155] B. A. Tayeh, B. H. A. Bakar, M. A. M. Johari, and Y. L. Voo, “Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation—a review”, *Procedia Engineering*, c. 54, ss. 525–538, 2013.
- [156] P. Camacho, E., López, J. Á., & Serna, “Definition of three levels of performance for UHPFRC-VHPFRC with available materials”, *Proceedings of Hipermat*, ss. 249–256, 2012.
- [157] K. Habel, M. Viviani, E. Denarié, and E. Brühwiler, “Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)”, *Cement and concrete research*, c. 36, sayı 7, ss. 1362–1370, 2006.
- [158] D. Y. Yoo, J. J. Park, S. W. Kim, and Y. S. Yoon, “Early age setting, shrinkage and tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 41, ss. 427–438, 2013.
- [159] K. Sadegh ve A. S. Lubell, “Influence of Specimen Size and Fiber Content on Mechanical Properties of UHPFRC”, *ACI materials Journal*, 109(6), 2012.
- [160] S. Ingo, S. Jurgen, M. Ollver, “Effect of mixing and placement methods on fresh and hardened ultra-high performance concrete”, *In Proceeding of Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2004, ss. 575–586.
- [161] J. Tue, N., Orgass, M., & Ma, “Influence of addition method of superplasticizer on the properties of fresh UHPC”, *In Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 2008, ss. 93–100.
- [162] A. Sadrekarimi, “Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, c. 2, sayı 3, ss. 409–417, 2004.
- [163] T. L. Vande Voort, M. T. Suleiman, S. Sri, “Design and Performance Verification of Ultra-High Performance Concrete Piles for deep foundations”, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, IHRB Project TR-558, 2008.
- [164] A. C. L. Wong, P. A. Childs, R. Berndt, T. Macken, G. Peng, and N. Gowripalan, “Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre Bragg grating sensors”, *Cement and Concrete Composites*, c. 29, ss. 490–497, 2007.
- [165] H. Erten, E., Yalçınkaya, Ç., Beglarigale, A., Yiğiter, H., & Yazıcı, “Erken yaş büzülme çatlaklarının lif içeren/içermeyen ultra yüksek performanslı betona gömülü donatı korozyonuna etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 32, sayı 4, ss. 1347–1364, 2017.
- [166] L. Wu, N. Farzadnia, C. Shi, Z. Zhang, ve H. Wang, “Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review”, *Construction and Building Materials*, c. 149, ss. 62-75, 2017.
- [167] D. Wang, C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, Z. Huang, and Z. Fang, “A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties”, *Construction and Building Materials*, c. 96, ss. 368–377, 2015.
- [168] C. M. Tam, V. W. Y. Tam, and K. M. Ng, “Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong”, *Construction and Building Materials*, c. 26(1), ss. 79-89, 2012.
- [169] E. Ghafari, S. A. Ghahari, H. Costa, E. Júlio, A. Portugal, and L. Durães, “Effect

- of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 127, ss. 43–48, 2016.
- [170] V. Y. Garas, L. F. Kahn, and K. E. Kurtis, “Short-term tensile creep and shrinkage of ultra-high performance concrete”, *Cement and Concrete Composites*, c. 31, sayı 3, ss. 147–152, 2009.
- [171] R. I. Gilbert, *Time effect in concrete structure. ABD*, 1988.
- [172] B Barr, S.B Hoseinian, and M.A Beygi, “Shrinkage of concrete stored in natural environments”, *Cement and Concrete Composites*, c. 25, ss. 19–29, 2003.
- [173] B. Boivin, S., Acker, P., Rigaud, S., Clavaud, “Experimental assessment of chemical shrinkage of hydrating cement pastes. Autogenous Shrinkage of Concrete”, *Lafarge Lab. Centrel Rech.*, ss. 81–92, 1999.
- [174] M. H. Zhang, C. T. Tam, and M. P. Leow, “Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete”, *Cement and Concrete Research*, c. 33, ss. 1687–1694, 2003.
- [175] A. PC., *Autogenous shrinkage measurement*. London, United Kingdom, 1999.
- [176] W. Meng and K. Khayat, “Effects of saturated lightweight sand content on key characteristics of ultra-high-performance concrete”, *Cement and concrete research.*, c. 101, sayı February, ss. 46–54, 2017.
- [177] Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, ASTM C157/C157M-17, 2017.
- [178] D. Y. Yoo, J. J. Park, S. W. Kim, and Y. S. Yoon, “Influence of reinforcing bar type on autogenous shrinkage stress and bond behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete”, *Cem. Concr. Compos.*, c. 48, ss. 150–161, 2014.
- [179] D. Y. Yoo, K. H. Min, J. H. Lee, and Y. S. Yoon, “Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age”, *Construction and Building Materials*, c. 73, ss. 357–365, 2014.
- [181] P. Aitcin, “Demystifying autogenous shrinkage”, *Concrete International*, sayı 21(11), ss. 54–6, 1999.
- [182] N. F. Holt, “Medical Students Need More Radiology Education”, *Academic Medicine*, c. 76(1), ss. 1–5, 2001.
- [183] A. Darquennes, S. Staquet, and B. Espion, “Determination of time-zero and its effect on autogenous deformation evolution.”, *European journal of environmental and civil engineering*, sayı 15(7), ss. 1017–29, 2011.
- [184] Standard Test Method For Autogenous Strain Of Cement Paste And Mortar, ASTM, ASTM C 1698, 2009.
- [185] E. B. Hadı Kazemi-Kamyab, Emmanuel Denarié, “Very early age Stiffness development of UHPFRC matrices in low temperatures”, In *Proceedings 8th fib PhD symposium in Kgs, Lyngby*, 2014, sayı January 2010, s. 6.
- [186] Tazawa E, “Autogenous shrinkage of concrete”, Japan Concrete Institute, Committee report, 1999.
- [187] M. Cheyrezy, G. Khoury, and M. Behloul, “Mechanical properties of four high-performance concretes in compression at high hemperatures”, *Revue Française de*

Génie Civil, c. 5, sayı 8, ss. 1159–1180, 2001.

- [188] A. Loukili, A. Khelidj, and P. Richard, “Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete”, *Cement and Concrete Research*, c. 29, sayı 4, ss. 577–584, 1999.
- [189] V. T. A. Van, C. Röbler, D. D. Bui, and H. M. Ludwig, “Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete”, *Cement and Concrete Composites*, c. 53, ss. 270–278, 2014.
- [190] O. M. Jensen, “Use of superabsorbent polymers in concrete”, *Concrete International*, c. 35, sayı 1, ss. 48-52, 2013.
- [191] L. Dudziak and V. Mechtcherine, “Mitigation of volume changes of ultra-high performance concrete (UHPC) by using Super Absorbent Polymers”, *In Proceedings of the 2nd international symposium on ultra high performance concrete*, Kassel University, German, 2008, ss. 425–432.
- [192] Ocel, J. and Graybeal, "Fatigue behavior of an ultra-high performance concrete I-girder," *Proceedings of the Precast/Prestressed Concrete Institute National Bridge Conference*, 2007, s. 82.
- [193] T. Xie, C. Fang, M. S. Mohamad Ali, and P. Visintin, “Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): An experimental study”, *Cement Concrete Composites*, c. 91, sayı April, ss. 156–173, 2018.
- [194] V. Perry ve K. Habel, “Standardization of ultra-high performance concrete the canadian perspective”, *International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, 2017.
- [195] H. Zhang, T. Ji, X. Zeng, Z. Yang, X. Lin, and Y. Liang, “Mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) using recycled fine aggregate cured under different conditions and the mechanism based on integrated microstructural parameters”, *Construction and Building Materials*, c. 192, ss. 489-507, 2018.
- [196] A. Naser, A. Ghani, and N. F. Abas, “Sustainable building and infrastructure systems: our future today”, *International Buildings Infrastructure Technology Conference*, ss. 1–140, 2011.
- [197] M. M. Reda, N. G. Shrive, and J. E. Gillott, “Microstructural investigation of innovative UHPC”, *Cement Concrete Composites*, c. 29, sayı 3, ss. 323–329, 1999.
- [198] S.T. Kang and G.S. Ryu, “The Effect of Steel-Fiber Contents on the Compressive Stress-Strain Relation of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPC)”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, c. 23, sayı 1, ss. 67–75, 2011.
- [199] D. Yoo, J. Lee, and Y. Yoon, “Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites”, *Composite structures*, c. 106, ss. 742–753, 2013.
- [200] B. Magureanu, C., Sosa, I., Negrutiu, and C., Heghes, “Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete”, *ACI Materials Journal*, s. 109 (2), 2012.
- [201] J. Lappa, E., Braam, and C., Walraven, “Static and fatigue bending tests of UHPC.”, *In Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 2004, ss. 449–458.

- [202] R. Pansuk, W., Sato, Y., Sato, and H., Shionaga, “Tensile behaviour and fibre orientation of UHPC”, *In Proceedings of the 2nd International Symposium on UHPC*, 2008, ss. 161–168.
- [203] E. Stiel, T., Karihaloo, B. L., & Fehling, “Effect of casting direction on the mechanical properties of CARDIFRC”, *In International Symposium on Ultra High Performance*, 2004, ss. 481–493.
- [204] I. H. Yang, C. Joh, and B. S. Kim, “Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending”, *Engineering structures*, c. 32(11), ss. 3478-3487, 2010.
- [205] G. J. Wille, K., and Parra-Montesinos, “Effect of Beam Size, Casting Method, and Support Conditions on Flexural Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete”, *ACI Materials Journal*, s. 109 (3), 2012.
- [206] Z. Ye, Y., Hu, S., Daio, B., Yang, S., Liu, “Mechanical behavior of ultra-high performance concrete reinforced with hybrid different shapes of steel fiber.”, *In CICTP 2012: Multimodal Transportation Systems-Convenient, Safe, Cost-Effective, Efficient*, 2012, ss. 3017–3028.
- [207] S. Bornemann, R., Faber, “UHPC with steel- and non- corroding high strength polymer fibres under static and cyclic loading”, *In Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Kassel, Germany*, 2004, ss. 673–681.
- [208] S. Lohaus, L., Anders, “Effects of polymer- and fibre modifications on the ductility, fracture properties and micro crack development of ultra-high performance concrete”, *In Proceedings of the International Symposium on UHPC, Kassel, Germany*, 2004, ss. 625–636.
- [209] D. L. Nguyen, G. S. Ryu, K. T. Koh, and D. J. Kim, “Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete”, *Composites Part B: Engineering*, c. 58, ss. 279–292, 2014.
- [210] Ultra-high performance fibre reinforced concretes, recommendations provisoires-interim recommendations, AFGC, 2002.
- [211] K. Habel, E. Denarié, and E. Brühwiler, “Time dependent behavior of elements combining ultra-high performance fiber reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete”, *Materials and structures*, c. 39, sayı 289, ss. 557–569, 2006.
- [212] S. T. Kang, Y. Lee, Y. D. Park, and J. K. Kim, “Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber”, *Composite structures*, c. 92, sayı 1, ss. 61–71, 2010.
- [213] K. Wille, D. J. Kim, and A. E. Naaman, “Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents”, *Materials and structures*, c. 44, ss. 583-598, 2011.
- [214] S. T. Kang and J. K. Kim, “Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution”, *Construction and Building Materials*, c. 28, sayı 1, ss. 57–65, 2012.
- [215] Y. Lee, S. T. Kang, and J. K. Kim, “Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix”, *Construction and Building Materials*, c. 24, sayı 10, ss. 2030–2041, 2010.
- [216] K. Wille, A. E. Naaman, S. El-Tawil, and G. J. Parra-Montesinos, “Ultra-high

- performance concrete and fiber reinforced concrete: Achieving strength and ductility without heat curing”, *Materials and structures*, c. 45, ss. 309-324, 2012.
- [217] B. A. Graybeal and J. L. Hartmann, “Strength and durability of ultra-high performance concrete”, *Concrete Bridge Conference*, 2003, s. 20.
- [218] P. Konrád, “Experimental procedure for determination of the energy dissipation capacity of ultra- reinforced concrete under localized impact loading”, *International Journal of Protective Structures*, c. 10.2, ss. 251–265, 2019.
- [219] Z. Wu, C. Shi, W. He, and L. Wu, “Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 103, ss. 8–14, 2016.
- [220] H. K. S. Eldin, H. A. Mohamed, M. Khater, and S. Ahmed, “Mechanical Properties of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete”, *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, c. 4, sayı 4, ss. 1–10, 2014.
- [221] R. Sovják, D. Shanbhag, P. Konrád, and J. Zatloukal, “Response of thin UHPFRC targets with various fibre volume fractions to deformable projectile impact”, *Procedia Engineering*, c. 193, ss. 3–10, 2017.
- [222] S. T. Kang, B. Y. Lee, J. K. Kim, and Y. Y. Kim, “The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 25, sayı 5, ss. 2450–2457, 2011.
- [223] D. D. Mindess, S. and Young J.F, “Concrete”, *NJ Prentice Hall*, 1991.
- [224] P. C. Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., Aitcin, “Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes”, *Materials Journal*, sayı 94(4), ss. 286–290, 1997.
- [225] S. Holschemacher, K., Weiße, D., Klotz, “Bond of reinforcement in ultra high strength concrete”, *In Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 2004, ss. 375–388.
- [226] M. Rebentrost, G., Wight, and E. Fehling “Experience and applications of ultra-high performance concrete in Asia”, *In Proceedings of the 2nd International Symposium on UHPC*, 2008, ss. 19-30.
- [227] M. Farnam, Y., Mirdamadi, A., Shekarchi, “Experimental investigation of impact behavior of high strength fiber reinforced concrete panels.”, *In Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 2008, ss. 751–758.
- [228] B. Bindiganavile, V., Banthia, N., Aarup, “Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite.”, *ACI Materials Journal*, sayı 99 (6), ss. 543-548., 2002.
- [229] W. Sun, C. Jiao, “Experimental study on impact tensile behavior of reactive powder concrete.”, *Journal Guangzhou University*, sayı 10(1), ss. 42–47.
- [230] S. Astarlioglu and T. Krauthammer, “Response of normal-strength and ultra-high-performance fiber-reinforced concrete columns to idealized blast loads”, *Engineering structures*, c. 61, ss. 1–12, 2014.
- [231] S. G. Millard, T. C. K. Molyneaux, S. J. Barnett, and X. Gao, “Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fibre-reinforced concrete

- under flexural and shear loading”, *International Journal of Impact Engineering*, c. 37, sayı 4, ss. 405–413, 2010.
- [232] G. Schleyer, G. K., Barnett, S. J., Millard, S. G., Rebstrost, M., Wight, “UHPFRC panel testing.”, 2011. ss. 34-39.
- [233] L. Mao, S. J. Barnett, A. Tyas, J. Warren, G. K. Schleyer, and S. S. Zaini, “Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading”, *Construction and Building Materials*, c. 93, ss. 822–830, 2015.
- [234] H. Aoude, F. P. Dagenais, R. P. Burrell, and M. Saatcioglu, “Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading”, *International Journal of Impact Engineering*, c. 80, ss. 185–202, 2015.
- [235] E. A. H. Shaheen, “Carbon fibre reinforced reactive powder concrete (CFRRPC) anchorage system”, Doktora Tezi, University of Calgary (Canada), 2003.
- [236] B. Georgali and P. E. Tsakiridis, “Microstructure of fire-damaged concrete . A case study”, *Cement and Concrete composites*, c. 27, ss. 255–259, 2005.
- [237] İ. B. Topçu, E. Sarıkaya, ve E. Akkan, “Reaktif pudra betonlarındaki gelişmeler”, Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, c. 29, sayı 3, ss. 440–449, 2021.
- [238] K. Way, R., Wille, “Material characterization of an ultra-high performance fibre-reinforced concrete under elevated temperature”, *In Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, 2012, ss. 565–572.
- [239] Y. S. Tai, H. H. Pan, and Y. N. Kung, “Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C, *Nuclear Engineering and Design*, c. 241(7), ss. 2416-2424. 2011.
- [240] H. Li and G. Liu, “Tensile Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Reactive Powder Concrete After Exposure to Elevated Temperatures”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, c. 10, sayı 1, ss. 29–37, 2016.
- [241] D. Erosemiah, N. Sakthieswaran, and R. Viji, “Microstructural Analysis of A Reactive Powder Concrete at Elevated Temperature”, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2019, c. 7, sayı 2, ss. 1–8.
- [242] A. A. Al-Attar, M. B. Abdulrahman, H. M. Hamada, and B. A. Tayeh, “Investigating the behaviour of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete beams after exposure to elevated temperatures”, *J. Mater. Res. Technol.*, c. 9, sayı 2, ss. 1966–1977, 2020.
- [243] H. W. Ye vd., “Research on fire resistance of ultra-high-performance concrete”, *Advances in Materials Science and Engineerin*, c. 2012, sayı 2, 2012.
- [244] J. Shin, “Ultra-high performance concrete (UHCP) precast segmental bridges”, Doktora Tezi, Technische Universität Hamburg, 2016.
- [245] W. M. O’Neil, E. F., & Dowd, “Reactive powder concrete: A new material for the construction industry”, *In Third National Concrete and Masonry Engineering Conference*, 1995, ss. 15–17.
- [246] P. C. Aitcin, “The durability characteristics of high performance concrete: A review”, *Cement and concrete composites*, c. 25(4-5), ss. 409-420. 2003.

- [247] Y. Lei Voo and S. J. Foster, “Characteristics of ultra-high performance ‘ductile’ concrete and its impact on sustainable construction”, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, c. 3(3), ss. 168-187. 2010.
- [248] Y. L. Voo, S. J. Foster, and R. I. Gilbert, “Shear strength of fiber reinforced reactive powder concrete prestressed girders without stirrups”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, c. 4(1), ss. 123-132.2006.
- [249] K. Türker, T. Birol, A. Yavaş, ve U. Hasgül, “Ultra yüksek performanslı lifli beton içeren kirişlerde etkin çelik lif tipi incelemesi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilim. Derg.*, c. 16, sayı 3, ss. 776–785, 2016.
- [250] C. Gülşen, “Ultra yüksek performanslı betonun çatı ve cephelerde kullanımının incelenmesi”, 8. *Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, 2016, ss. 1–12.
- [251] M. Cheyrezy, V. Maret, and L. Frouin, “Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)”, *Cement and concrete research*, c. 25, sayı 7, ss. 1491–1500, 1995.
- [252] M. A. Roux, N., Andrade, C., & Sanjuan, “Experimental study of durability of reactive powder concretes”, *Journal of materials in civil engineering*, sayı 8(1), ss. 1–6, 1996.
- [253] A. R. Lubbers, “Bond performance between ultra-high performance concrete and prestressing strands”, Yüksek Lisans Tezi, Ohio Üniversitesi, 2003.
- [254] N. Roux ve G. Bernier, “Mechanical properties of reactive powder concretes”, c. 29, sayı May, ss. 233–240, 1996.
- [255] N. K. Man, “Studying the production process and mechanical properties of reactive powder concrete made using local available materials”, Yüksek lisans Tezi, Hong Kong Üniversitesi, 2009.
- [256] C. Dauriac, “Special concrete may give steel stiff competition”, *The Seattle Daily Journal of Commerce*, sayı 9, ss. 15–17, 1997.
- [257] P. C. Aïtcin, “Cements of yesterday and today-concrete of tomorrow”, *Cement and concrete research.*, c. 30, sayı 9, ss. 1349–1359, 2000.
- [258] R. Selvaraj and R. Priyanka, “Reactive Powder Concrete with and without Fibers”, *International Journal of Engineering Research.*, c. V4, sayı 9, ss. 884–890, 2015.
- [259] H. Yazici, M. Y. Yardimci, S. Aydin, ve A. Ş. Karabulut, “Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes”, *Construction and Building Materials*, c. 23, sayı 3, ss. 1223–1231, 2009.
- [260] Mohammad Reza Moallem, “Flexural Redistribution in Ultra-High Performance Concrete Lab Specimens”, Doktora Tezi, Ohio Üniversitesi, OH, USA, 2010.
- [261] B. Graybeal *vd.*, “The Structural Design of Ultra-High Performance Concrete”, Emerging technology report (ETR), 2018.
- [262] Grand View Research (GVR), “Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Market Analysis By Product, By Application, And Segment Forecasts 2014 – 2025”, 2017.
- [263] L. G. Voo, Y. L., Foster, S., Pek, “Ultra-high performance concrete-technology for present and future”, Proceedings of the High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet”, 2017, ss. 12–14.
- [264] W. Zheng, B. Luo, and Y. Wang, “Compressive and tensile properties of reactive

- powder concrete with steel fibres at elevated temperatures”, *Construction and Building Materials*, c. 41, ss. 844-851. 2013.
- [265] P. S. Ros, *Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties*. 2013.
- [266] Ductal-Lafarge. (2023, 23 May). [Online]. Erişim: <http://www.ductal.com>
- [267] Çimsa, “Ultra yüksek performanslı beton uygulama alanları”, 2018. ss. 25.
- [268] J. Bozoğlu ve D. Arditi, “Yapılarda ve yapım yönetiminde nanoteknoloji uygulamaları”, 2. *Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi*, 2012, s. 13-16.
- [269] M. F. Leone, “Nanotechnology for Architecture. Innovation and eco-efficiency of nanostructured cement-based materials”, *Journal of architectural engineering technology*, c. 1, sayı 1, ss. 1–9, 2012.
- [270] W. Zhu, M. Bartos, and A. Porro, “Application of nanotechnology in construction”, *Materials Structure*, c. 37, sayı November, ss. 649–658, 2004.
- [271] P. Khandve, “Nanotechnology for building material”, *International Journal of Basic and Applied Research*, c. 4, sayı Special Issue, ss. 146–151, 2014.
- [272] A. K. Mukhopadhyay, “Next-generation nano-based concrete construction products: a review”, *Nanotechnology in Civil Infrastructure: A Paradigm Shift*, ss. 207–223, 2011.
- [273] B. Birgisson, A. K. Mukhopadhyay, G. Geary, M. Khan, ve K. Sobolev, “Nanotechnology in concrete materials: a synopsis”, *Transportation research circular E-C170*, 2012.
- [274] Rattan A, Sachdeva P, ve Chaudhary A, “Use of nanomaterials in concrete”, *International Journal Latest Research Engineering Technology.*, c. 02, sayı 05, ss. 81–84, 2016.
- [275] İ. Atik ve M. B. Bilgin, “Mimarlıkta nanoteknolojinin yeri”, *Kent Akademisi*, c. 11, sayı 2, ss. 232–242, 2018.
- [276] S. Arslan Selçuk ve İ. Ayçam, “Nanotechnology in built environment: pros and cons of nanomaterial usage in architecture”, In *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings*, 2018, c. 6, sayı Isbs 2017, ss. 269–281.
- [277] Y. Korkmaz ve S. Sayın, “Mimarlık planlama ve tasarım alanında araştırma ve değerlendirmeler”, *Nanoteknolojik Malzemelerin Yapı Sektöründe Kullanımı*, Konya, 2021, ss. 57–80.
- [278] P. K. Mehta, *Concrete Structure, Properties and Materials*, First Edit. Prentice-Hall, 1986.
- [279] H. M. Jennings, J. W. Bullard, J. J. Thomas, J. E. Andrade, J. J. Chen, ve G. W. Scherer, “Characterization and modeling of pores and surfaces in cement paste: Correlations to processing and properties”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, c. 6, sayı 1, ss. 5–29, 2008.
- [280] J. Han, B., Yu, X. ve Ou, “Multifunctional and smart carbon nanotube reinforced cement-based materials”, In *Nanotechnology in Civil Infrastructure: a paradigm shift*, ss. 1–47, 2011.
- [281] J. Makar, “The Effect of SWCNT and Other Nanomaterials on Cement Hydration and Reinforcement”, In *Nanotechnology in civil infrastructure: a paradigm shift*, ss. 103–130, 2011.

- [282] K. Sobolev ve A. Amirjanov, “The development of a simulation model of the dense packing of large particulate assemblies”, *Powder technology*, c. 141(1-2), ss. 155-160, 2004.
- [283] I. Panas, A. Martinelli, ve A. Matic, “Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium – silicate – hydrate formation in cement”, *Chemical physics letters*, c. 392, ss. 242–248, 2004.
- [284] E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, ve L. Durães, “The effect of nanosilica addition on flowability , strength and transport properties of ultra high performance concrete”, *Materials & Design*, c. 59, ss. 1–9, 2014.
- [285] E. Ghafari, M. Bandarabadi, H. Costa, ve E. Júlio, “Design of UHPC using artificial neural networks”, *Brittle Matrix Composites*, c. 10, sayı 1, ss. 61–69, 2012.
- [286] I. Falikman, V., Vajner, A., Zverev, “New photocatalytic cementitious composites containing modified titanium dioxide nanoparticles”, *In Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, 2012, ss. 147–152.
- [287] H. Li, H. Xiao, ve J. Ou, “A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials”, *Cement and Concrete research*, c. 34(3), ss. 435-438, 2004.
- [288] J. Lee, S. Mahendra, ve P. J. J. Alvarez, “Potential Environmental and Human Health Impacts of Nanomaterials Used in the Construction Industry”, *In Nanotechnology in Construction 3: Proceedings of the NICOM3*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, ss. 1–14.
- [289] V. B. Boduroğlu, “Karbon nanotüp katkılı betonda karışık modda arcan yüklemesinde boyut etkisi”, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2014.
- [290] B. Han, X. Yu, ve J. Ou, “Multifunctional and Smart Carbon Nanotube Reinforced Cement-Based Materials”, *In Nanotechnology in civil infrastructure*, ss. 1–47, 2011.
- [291] S. S. Shang ve X. Bin Song, “Experimental research on mechanicals performance of carbon nanotubes reinforced concrete”, *Applied Mechanics and Materials*, c. 858, ss. 173–178, 2016.
- [292] İ. Mutlay, “Karbon Nanotüpler: Özellikler ve Uygulamalar”, *Grafen Chemical Industries Co.* Ankara, Türkiye 2014.
- [293] J. Lok vd., “Synthesis of nano cementitious additives from agricultural wastes for the production of sustainable concrete”, *Journal of Cleaner Production*, c. 171, ss. 1150–1160, 2018.
- [294] R. Siddique ve A. Mehta, “Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars”, *Construction and Building Materials*, c. 50, ss. 116–129, 2014.
- [295] J. M. and J. L. Jon Makar, “Carbon nanotube/cement composites—early results and potential applications”, *In Proceedings of the 3rd international conference on construction materials: performance, innovations and structural implications*, Vancouver Canada, ss. 1-10, 2005.
- [296] B. Han, S. Sun, S. Ding, L. Zhang, X. Yu, ve J. Ou, “Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites”, *Composites Part A: Applied*

Science and Manufacturing, c. 70, ss. 69–81, 2015.

- [297] T. Vodenitcharova, K. Mylvaganam, ve L. C. Zhang, “Mechanical interaction between single-walled carbon nanotubes during the formation of a bundle”, *Journal of materials science*, c. 42, sayı 13, ss. 4935–4941, 2007.
- [298] J. L. G. Lim, S. N. Raman, M. Safiuddin, M. F. M. Zain, ve R. Hamid, “Autogenous shrinkage, microstructure, and strength of ultra-high performance concrete incorporating carbon nanofibers”, *Materials*, c. 12, sayı 2, 2019.
- [299] Z. Chen, J. L. G. Lim, ve E. H. Yang, “Ultra high performance cement-based composites incorporating low dosage of plasma synthesized carbon nanotubes”, *Materials & Design*, c. 108, ss. 479–487, 2016.
- [300] J. M. Makar ve G. W. Chan, “Growth of cement hydration products on single-walled carbon nanotubes”, *Journal of the American Ceramic Society*, c. 92, sayı 6, ss. 1303–1310, 2009.
- [301] K. D. Ausman, R. Piner, O. Lourie, R. S. Ruoff, ve M. Korobov, "Organic solvent dispersions of single-walled carbon nanotubes: Toward solutions of pristine nanotubes", *The Journal of Physical Chemistry B*, c. 104(38), ss. 8911-8915. 2000.
- [302] A. Chaipanich, T. Nochaiya, W. Wongkeo, ve P. Torkittikul, “Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes-fly ash cement composites”, *Materials Science and Engineering: A*, c. 527, ss. 1063-1067, 2010.
- [303] Y. Hu, D. Luo, P. Li, Q. Li, ve G. Sun, “Fracture toughness enhancement of cement paste with multi-walled carbon nanotubes”, *Construction and Building Materials*, c. 70, ss. 332-338, 2014.
- [304] M. D. C. Camacho, O. Galao, F. J. Baeza, E. Zornoza, ve P. Garcés, “Mechanical properties and durability of CNT cement composites”, *Materials*, c. 7, sayı 3, ss. 1640–1651, 2014.
- [305] M. Seis, S. Subaşı, M. Maraşlı, ve H. Dehghanpour, “Investigation of mechanical and electrical properties of ultra-low rate SWCNT added UHPC”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c. 38, sayı 1, ss. 509–519, 2023.
- [306] K. Shimoda, T. Hinoki, ve A. Kohyama, “Effect of carbon nanofibers (CNFs) content on thermal and mechanical properties of CNFs / SiC nanocomposites”, *Composites science and technology*, c. 70, sayı 2, ss. 387-392, 2010.
- [307] M. Ardanuy, M. A. Rodríguez-perez, ve I. Algaba, “Electrical conductivity and mechanical properties of vapor-grown carbon nanofibers / trifunctional epoxy composites prepared by direct mixing”, *Composites Part B: Engineering*, c. 42, sayı 4, ss. 675-681, 2011.
- [308] H. Wang, X. Gao, J. Liu, M. Ren, ve A. Lu, “Multi-functional properties of carbon nanofiber reinforced reactive powder concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 187, ss. 699-707, 2018.
- [309] L. Wu, N. Farzadnia, C. Shi, Z. Zhang, ve H. Wang, “Autogenous shrinkage of high performance concrete : A review”, *Construction and Building Materials*, c. 149, ss. 62-75, 2017.
- [310] G. M. Kim, H. N. Yoon, ve H. K. Lee, “Autogenous shrinkage and electrical characteristics of cement pastes and mortars with carbon nanotube and carbon

- fiber”, *Construction and Building Materials*, c. 177, ss. 428-435, 2018.
- [311] G. Y. Li, P. M. Wang, ve X. Zhao, “Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes”, *Carbon N. Y.*, c. 43, sayı 6, ss. 1239-1245, 2005.
- [312] M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, ve S. P. Shah, “Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites”, *Cement and Concrete Composites*, c. 32, sayı 2, ss. 110-115, 2010.
- [313] B. Zou, S. J. Chen, A. H. Korayem, F. Collins, C. M. Wang, ve W. H. Duan, “Effect of ultrasonication energy on engineering properties of carbon nanotube reinforced cement pastes”, *Carbon*, c. 85, ss. 212–220, 2015.
- [314] L. Lu, D. Ouyang, ve W. Xu, “Mechanical properties and durability of ultra high strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes”, *Materials*, c. 9, sayı 6, s. 419, 2016.
- [315] A. Cwirzen, K. Habermehl-Cwirzen, ve V. Penttala, “Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites”, *Advances in cement research*, c. 20, sayı 2, ss. 65-73, 2008.
- [316] J. Liu, H. Jin, X. Zhao, ve C. Wang, “Effect of multi-walled carbon nanotubes on improving the toughness of reactive powder concrete”, *Materials*, c. 12, sayı 16, s. 2625, 2019.
- [317] S. H. Lee, S. Kim, ve D. Y. Yoo, “Hybrid effects of steel fiber and carbon nanotube on self-sensing capability of ultra-high-performance concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 185, ss. 530-544, 2018.
- [319] Standard Test Method For Slump Flow Of Self-Consolidating Concrete, ASTM C1611/C1611M-18, 2018.
- [320] Beton - Taze Beton Deneyleri, Bölüm 7: Hava İçeriğinin Tayini - Basınç Yöntemi, Türk Standartlar Enstitüsü, TS EN 12350-7, 2019.
- [321] Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk, Türk Standartlar Enstitüsü, TS EN12350-6, 2019.
- [322] Prediction Of Creep, Shrinkage, And Temperature Effects İn Concrete Structures, ACI 209R, 1997.
- [323] Standard Test Method For Unrestrained Linear Thermal Shrinkage Of Plastic Film And Sheeting, American Society For Testing Materials, ASTM D 2732, 1989.
- [324] K. J. Rao, K. Keerthi, ve S. Vasam, “Case studies in construction materials acid resistance of quaternary blended recycled aggregate concrete”, *Case studies in construction materials*, c. 8, sayı January, ss. 423-433, 2018.
- [325] K. J. Rao, K. Keerthi, ve S. Vasam, “Acid resistance of quaternary blended recycled aggregate concrete”, *Case studies in construction materials*, c. 8, sayı March, ss. 423-433, 2018.
- [326] Pulse Velocity Through Concrete, ASTM C 597-16, 2003.
- [327] Standard Test Method For Rebound Number Of Hardened Concrete, C805/C805M-18, 2019.
- [328] Sertleşmiş Beton Testleri - Bölüm 3: Basınç Dayanımının Belirlenmesi, TS

EN12390-3,2002.

- [329] Sertleşmiş Beton Testleri - Bölüm 5: Test Numunelerinin Eğilme Dayanımının Belirlenmesi, TS EN 12390-5, 2006.
- [330] Plastikler - Charpy Darbe Özelliklerinin Tayini-Bölüm 1: Ölçü Aletsiz Darbe Deneyi, TS EN ISO179-1, 2011.
- [331] Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları-Gerekli Şartlar Ve Deney Metotları. TS 2824 EN 1338/AC.
- [332] S. Subaşı, S. Güntepe, M. Maraşlı, ve V. Özdal, “Effect of SWCNT usage on color change in glass fiber reinforced (GRC) concretes”, *9th International Adventure Technology Symposium.*, 2021, ss. 350-358.
- [333] A. López, J. M. Tobes, G. Giaccio, ve R. Zerbino, “Advantages of mortar-based design for coloured self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Composites*, c. 31, sayı 10, ss. 754-761, 2009.
- [334] Standard Practice For Calculation Of Color Tolerances And Color Differences From Instrumentally Measured Color Coordinates, ASTM D2244, 2021.
- [335] A. M. Rashad, “Effect of carbon nanotubes (CNTs) on the properties of traditional cementitious materials”, *Construction and Building Materials*, c. 153, ss. 81-101, 2017.
- [336] S. Xu, Y. Lyu, S. Xu, ve Q. Li, “Enhancing the initial cracking fracture toughness of steel-polyvinyl alcohol hybrid fibers ultra high toughness cementitious composites by incorporating multi-walled carbon nanotubes”, *Construction and Building Materials*, c. 195, ss. 269-282, 2019.
- [337] J. Seo vd., “Material characterization and piezoresistive sensing capability assessment of thin-walled CNT-embedded ultra-high performance concrete”, *Cement and Concrete Composites*, c. 134, sayı October, s. 104808, 2022.
- [338] S. Chatterji, J. W. Jeffery, V. S. Ramachandran, P. J. Sereda, ve R. F. Feldman, “The volume expansion of hardened cement paste due to the presence of ‘dead-burnt’ CaO”, *Magazine of Concrete Research*, c. 19, sayı 58, ss. 49-50, 1967.
- [339] J. Seo, S. Park, H. N. Yoon, ve H. K. Lee, “Effect of CaO incorporation on the microstructure and autogenous shrinkage of ternary blend Portland cement-slag-silica fume”, *Construction and Building Materials*, c. 249, s. 118691, 2020.
- [340] S. Xu, Y. Lyu, S. Xu, ve Q. Li, “Enhancing the initial cracking fracture toughness of steel-polyvinyl alcohol hybrid fibers ultra high toughness cementitious composites by incorporating multi-walled carbon nanotubes”, *Construction and Building Materials*, c. 195, ss. 269-282, 2019.
- [341] R. Hamid, K. M. Yusof, ve M. F. M. Zain, “A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume”, *Construction and Building Materials*, c. 24, sayı 1, ss. 94-98, 2010.
- [342] J. Kang, S. Al-Sabah, ve R. Théo, “Effect of single-walled carbon nanotubes on strength properties of cement composites”, *Materials*, c. 13, sayı 6, ss. 1-12, 2020.
- [343] J. Keriene, A. Špokauskas, ve M. Aleknevic, “The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes”, *Construction and Building Materials*, c. 49, ss. 527-535, 2013.

- [344] S. Musso, J. Tulliani, G. Ferro, ve A. Tagliaferro, “Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites”, *Composites Science and Technology*, c. 69, ss. 1985-1990, 2009.
- [345] H. Dehghanpour, K. Yilmaz, F. Afshari, ve M. Ipek, “Electrically conductive concrete: A laboratory-based investigation and numerical analysis approach”, *Construction and Building Materials*, c. 260, s. 119948, 2020.
- [346] H. Dehghanpour, K. Yilmaz, ve M. Ipek, “Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes”, *Construction and Building Materials*, c. 221, 2019.
- [347] A. D’Alessandro, M. Rallini, F. Ubertini, A. L. Materazzi, ve J. M. Kenny, “Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications”, *Cement and Concrete Composites*, c. 65, ss. 200-213, 2016.
- [348] H. Dehghanpour, S. Subasi, S. Guntepe, M. Emiroglu, ve M. Marasli, “Investigation of fracture mechanics, physical and dynamic properties of UHPCs containing PVA, glass and steel fibers”, *Construction and Building Materials*, c. 328, ss. 1-16, 2022.
- [349] J. Wang, S. Dong, S. D. Pang, X. Yu, B. Han, ve J. Ou, “Tailoring anti-impact properties of ultra-high performance concrete by incorporating functionalized carbon nanotubes”, *Engineering*, c. 18, ss. 232-245, 2021.
- [350] H. Chu, Z. Zhang, Y. Liu, ve J. Leng, “Silver particles modified carbon nanotube paper/glassfiber reinforced polymer composite material for high temperature infrared stealth camouflage”, *Carbon*, c. 98, ss. 557-566, 2016.
- [351] Z. Ge, F. Ye, H. Cao, G. Leng, Y. Qin, ve Y. Ding, “Carbonate-salt-based composite materials for medium- and high-temperature thermal energy storage”, *Particuology*, c. 15, ss. 77-81, 2014.
- [352] M. Yang, J. Pan, L. Luo, A. Xu, ve J. Huang, “CNT / cotton composite yarn for electro- thermochromic textiles”, *Smart Materials and Structures*, c. 28(8), s. 085003. 2019.
- [353] X. Sun, H. Sun, H. Li, ve H. Peng, “Developing polymer composite materials: Carbon nanotubes or graphene?”, *Advanced Materials*, c. 25, sayı 37, ss. 5153-5176, 2013.
- [354] S. A. Hashemi ve S. M. Mousavi, “Effect of bubble based degradation on the physical properties of Single Wall Carbon Nanotube/Epoxy Resin composite and new approach in bubbles reduction”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, c. 90, ss. 457-469, 2016.
- [355] Y. Kocak, E. Tasci, ve U. Kaya, “The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements”, *Construction and Building Materials*, c. 47, ss. 720-727, 2013.
- [356] M. E. S. I. Saraya, “Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study”, *Construction and Building Materials*, c. 72, ss. 104-112, 2014.
- [357] A. Hidalgo, S. Petit, C. Domingo, C. Alonso, ve C. Andrade, “Microstructural characterization of leaching effects in cement pastes due to neutralisation of their

- alkaline nature. Part I: Portland cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, c. 37, sayı 1, ss. 63-70, 2007.
- [358] P. Feng, H. Chang, X. Liu, S. Ye, X. Shu, ve Q. Ran, “The significance of dispersion of nano-SiO₂ on early age hydration of cement pastes”, *Materials & Design*, c. 186, s. 108320, 2020.
- [359] M. Falk, M. Gil, ve N. Iza, “Self-association of caffeine in aqueous solution: An FT-IR study”, *Canadian Journal of Chemistry*, c. 68, sayı 8, ss. 1293-1299, 1990.
- [360] H. C. Pedrosa, O. M. Reales, V. D. Reis, M. das D. Paiva, ve E. M. R. Fairbairn, “Hydration of portland cement accelerated by C-S-H seeds at different temperatures”, *Cement and Concrete Research*, c. 129, sayı August 2019, s. 105978, 2020.
- [361] K. M. Liew, M. F. Kai, ve L. W. Zhang, “Carbon nanotube reinforced cementitious composites: An overview”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, c. 91, sayı October, ss. 301-323, 2016.
- [362] P. Van Tonder ve T. T. Mafokoane, “Effects of multi-walled carbon nanotubes on strength and interfacial transition zone of concrete”, *In Construction Materials and Structures. IOS Press*, ss. 718-727, 2014.
- [363] M. Jung, S. gul Hong, ve J. Moon, “Ozone treatment on the dispersion of carbon nanotubes in ultra-high performance concrete”, *Materials & Design*, c. 193, s. 108813, 2020.
- [364] K. Scrivener, R. Snellings, and B. Lothenbach, (Eds.) *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*. Crc Press., 2018.
- [365] H. E. D. H. Seleem, A. M. Rashad, ve T. Elsokary, “Effect of elevated temperature on physico-mechanical properties of blended cement concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 25, sayı 2, ss. 1009-1017, 2011.
- [366] Y. Li, E. H. Yang, ve K. H. Tan, “Effects of heating followed by water quenching on strength and microstructure of ultra-high performance concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 207, ss. 403-411, 2019.
- [367] Y. Yao ve H. Lu, “Mechanical properties and failure mechanism of carbon nanotube concrete at high temperatures”, *Construction and Building Materials*, c. 297, s. 123782, 2021.
- [368] M. Jung, J. seul Park, S. G. Hong, ve J. Moon, “Micro- and meso-structural changes on electrically cured ultra-high performance fiber-reinforced concrete with dispersed carbon nanotubes”, *Cement and Concrete Research*, c. 137, sayı September, s. 106214, 2020.
- [369] Y. Kocak, “Effects of metakaolin on the hydration development of Portland-composite cement”, *Journal of building engineering*, c. 31, sayı January, s. 101419, 2020.
- [370] J. Zhu, G. Li, C. Feng, L. Wang, ve W. Zhang, “Effect of delaminated MXene (Ti₃C₂) on the performance of cement paste”, *Journal of Nanomaterials.*, c. 2019, 2019.
- [371] R. J. Wu, J. G. Wu, M. R. Yu, T. K. Tsai, ve C. T. Yeh, “Promotive effect of CNT on Co₃O₄-SnO₂ in a semiconductor-type CO sensor working at room temperature”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, c. 131, ss. 306-312, 2008.

- [372] B. Zhang, H. Tan, W. Shen, G. Xu, B. Ma, ve X. Ji, “Nano-silica and silica fume modified cement mortar used as Surface Protection Material to enhance the impermeability”, *Cement and Concrete Composites*, c. 92, sayı January, ss. 7-17, 2018.
- [373] A. Peschard, A. Govin, P. Grosseau, B. Guilhot, ve R. Guyonnet, “Effect of polysaccharides on the hydration of cement paste at early ages”, *Cement and Concrete Research*, c. 34, sayı 11, ss. 2153-2158, 2004.
- [374] T. N. M. Nguyen, D. Yoo, ve J. J. Kim, “Cementitious material reinforced by carbon nanotube-nylon 66 hybrid nanofibers: mechanical strength and microstructure analysis”, *Materials Today Communications*, s. 37, 2019.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Muhammet SEİS

Yabancı Dili :İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Kompozit Malzeme Teknolojileri	Düzce Üniversitesi	2023
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2018
Y. Lisans	Yapı Eğitimi	Düzce Üniversitesi	2012
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	2019
Lisans	Yapı Öğretmenliği	Abant İzzet Baysal Üniversitesi	1997
Lise	Yapı Ressamlığı	Endüstri Meslek Lisesi	1993

TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR

A. Uluslararası Hakemli Dergilerde yayınlanan makaleler

- 1- M. Seis, S. Subaşı, M. Maraşlı, ve H. Dehghanpour, “Investigation of mechanical and electrical properties of ultra-low rate SWCNT added UHPC”, *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, c. 38, sayı 1, ss. 509–519, 2023. **(SCI-Expanded)**

B. Ulusal hakemli dergilerde yayınlanan yayınlar:

- 2- M. Seis, B. Isbilir Kula, V. Ozdal, M. Maraşlı, S. Subaşı, Ve H. Dehghanpour, “Investigation of Different Superplasticizers Effect on Workability and Strength Parameters in Ultra High Performance Concretes”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, c. 10, sayı 3, ss. 519–531, 2022.

C. Uluslararası Bilimsel Etkinliklere Ait Kitaplarda Yayımlanan Tam Metin Bildiriler

- 1-** M. Seis, H. Dehghanpour, S. Subaşı, and M. Maraşlı, “Effects Of Swcnts Dispersed By Different Methods On UHPC Properties”, 6nd International Conference On Material Science And Technology In Cappadocia (Imstec’21), 2021, ss. 151-156.
- 2-** M. Seis, S. Subaşı, H. Dehghanpour, and M. Maraşlı, “Effect of Superplasticizer Dosage On UHPCs Containing Different Ratios Of SWCNT”, *6nd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC’21)*, 2021, ss. 157-162.
- 3-** M. Seis, S. Subaşı, B. İ. Kula, ve M. Maraşlı, “Karbon Nanotüplerin Ultra Yüksek Performanslı Betonların Mekanik Ve Fiziksel Özelliklerine Etkileri”, *Cumhuriyet Zirvesi 4 . Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, 2021, sayı Nisan, ss. 148–157.