

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

LİF DONATILI ÇİMENTOLU İNCE KOMPOZİTLER – MİMARİDE KULLANIMI

MEHTAP TAK YILDIRIM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ.DR. Z. CANAN GİRGİN**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİF DONATILI ÇİMENTOLU İNCE KOMPOZİTLER – MİMARİDE KULLANIMI

Mehtap TAK YILDIRIM tarafından hazırlanan tez çalışması 02.07.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Z. Canan GİRGİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Z. Canan GİRGİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Deniz GÜNEY

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Bekir Y. PEKMEZCİ

İstanbul Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2012-03-01-YULAP05 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne bağlı Mimarlık Anabilim dalında hazırlanan bu Yüksek Lisans Tezi kapsamında lifli çimentolu kompozitler (ECC) kuramsal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda öncelikle lifli çimentolu kompozitlerin (ECC) temel ögesi haline gelen PVA liflerin, karışım tasarımı ve mekanik büyüklüklere olan etkisi literatür ışığında incelenmiş; ayrıca ECC'nin bir tipi olan cam lifli çimentolu kompozit panel üretiminde, cam lif yerine bazalt lif kullanımının olasırlığı ve mekanik büyüklüklerin uygunluğu deneysel bazda araştırılmıştır. Bu araştırma daha kapsamlı bir çalışmanın ilk basamağını oluşturmaktadır.

Tez çalışma süresince, desteği, yardımları ve bana olan inancı ile her zaman yanımda olan, araştırma ve çalışmalarımnda daima yol gösteren değerli tez danışmanım Doç. Dr. Zehra Canan Girgin' e, deneysel çalışmaya göstermiş olduğu yakın destek için Fibrebeton Yönetim Kurulu Üyesi Sn. Muhammed Maraşlı'ya çok teşekkür ederim. Numunelerin üretim ve testlerindeki yoğun gayretleri için Kader Mercanoğlu, S. Alper Yıldız ve Meryem Reis'e; üretim aşamasındaki yardımlarından dolayı Volkan Özda, Ahmet Demirbaş'a; ve ayrıca iletişim açısından Uğur Gülpü'ye teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemi sağlayan ve eğitim hayatım boyunca beni hep destekleyen aileme, bu çalışmayı bitirebilmem konusunda desteğini ve sevgisini her zaman hissettiğim eşim Eyüp Hayri Yıldırım' a sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Haziran, 2014

Mehtap TAK YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Yöntem	3
BÖLÜM 2	
BETON TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞİMİ	4
2.1 Dünya'da Beton Teknolojilerinin Gelişimi.....	4
2.2 Türkiye'de Beton Teknolojilerinin Gelişimi	18
2.3 Lifli Beton Teknolojileri	23
2.3.1 Genel.....	23
2.3.2 Lif Tipleri ve Betonda Kullanımı	24
2.3.3 Lifli Özel Beton Teknolojileri	35
2.3.3.1 Genel.....	35
2.3.3.2 Cam Lifli Çimentolu Kompozit (GFRC)	37
2.3.3.3 Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lifli Beton (SIFCON)	37
2.3.3.4 Ultra Yüksek Performanslı Beton (UHPC)	38
2.3.3.5 Reaktif Pudra Betonu (RPC)	40

BÖLÜM 3

LİFLİ ÇİMENTOLU KOMPOZİTLER	43
3.1 Cam Lifli Çimentolu Kompozit (GFRC).....	43
3.2 Sünekliği Arttırılmış Lifli Çimentolu Kompozit (ECC).....	52
3.2.1 ECC Karışım Tasarımı ve Dayanımlar	54
3.2.2 ECC Mekanik Büyüklükler	72
3.2.3 ECC Uygulama Çalışmaları ve Uygulama Örnekleri	90
3.2.3.1 ECC Uygulama Çalışmaları	90
3.2.3.2 ECC Uygulama Örnekleri	91

BÖLÜM 4

DENEYLER.....	99
4.1 Genel	99
4.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Karakteristik Özellikleri	99
4.3 Karışım Tasarımı ve Üretim	101
4.4 Uygulanan Testler ve Değerlendirilmesi	103
4.5 Deneyler ve Değerlendirilmesi.....	104

BÖLÜM 5

SONUÇ ve ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR	117
EK-A	
YÖNETMELİKLER	135
ÖZGEÇMİŞ	142

SİMGE LİSTESİ

b	Deney numunesinin genişliği
d	Lif çapı
$D_{ort.}$	Ortalama dane boyutu
e	Levha kalınlığı
E	Elastisite modülü
F	Kırılma yükü
f_b	Basınç dayanımı
f_{ζ}	Direkt çekme dayanımı
f_e	Eğilme dayanımı
l	Lif boyu
L	Mesnetler arası mesafe
L_{cr}	Kritik lif boyu
l_s	Mesnet düşey eksenleri arasındaki açıklık
V_f	Hacimsel lif yüzdesi
σ_{fu}	Lif çekme dayanımı
σ_{LOP}	Orantısız sınıra karşı gelen gerilme düzeyi
σ_{MOR}	Kırılma gerilmesi
γ	Birim hacim ağırlık
ε_{LOP}	Orantısız sınıra karşı gelen gerilme şekildeğiştirme
ε_{MOR}	Kırılma şekildeğiştirme
ε_u	Şekildeğiştirme kapasitesi
ϕ	Silindir numunenin çapı
τ	Ortalama aderans dayanımı

KISALTMA LİSTESİ

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü (American Concrete Institute)
AR	Alkali Dayanımlı (Alkali Resistant)
BFRP	Bazalt Lif Takviyeli Plastik (Basalt Fiber Reinforced Plastics)
ECC	Lifli Çimentolu Kompozit (Engineered Cementitious Composites)
FRP	Lif Takviyeli Plastik (Fiber Reinforced Plastics)
GFRC	Cam Lifli Çimentolu Kompozit (Glass Fiber Reinforced Concrete)
GFRP	Cam Lif Takviyeli Plastik (Glass Fiber Reinforced Plastics)
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen (High-density Polyethylene)
HPC	Yüksek Performanslı Beton (High Performance Concrete)
HPMC	Hidroksi Propil bazlı Kıvam Düzenleyici (Hydroxypropyl Methycellulose)
PAN	Poliakrilonitril (Polyacrylonitrile)
PÇ	Portland Çimentosu
PE	Polietilen (Polyethylene)
PP	Polipropilen (Polypropylene)
PVA	Polyvinil alkol (Polyvinyl alcohol)
RPC	Reaktif Pudra Betonu (Reactive Powder Concrete)
SEM	Tarayıcı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SIFCON	Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lifli Beton (Slurry Infiltrated Fiber Concrete)
UHPC	Ultra Yüksek Performanslı Beton (Ultra High Performance Concrete)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1	Panteon tapınağı	5
Şekil 2. 2	Jahrhunderthalle kongre merkezi	5
Şekil 2. 3	Eddystone deniz feneri	6
Şekil 2. 4	Wakefield Arms binası	7
Şekil 2. 5	Kano örnekleri	7
Şekil 2. 6	Chazelet köprüsü	8
Şekil 2. 7	François Coignet evi	8
Şekil 2. 8	Art Nouveau üslup özellikli prekast beton cephe	9
Şekil 2. 9	25 Rue Franklin apartmanı	9
Şekil 2. 10	Ingalls binası	10
Şekil 2.11	Tek dökümde inşa edilen beton evler	10
Şekil 2. 12	Orly uçak hangarları	11
Şekil 2. 13	(a) Medical Arts binası, (b) Notre Dame du Raincy kilisesi	12
Şekil 2. 14	(a) Salginatobel köprüsü, (b) Villa Savoye, (c) Algeciras Market Hall	13
Şekil 2. 15	Hoover baraj	13
Şekil 2. 16	Fallingwater	13
Şekil 2. 17	(a) Guggenheim müzesi, (b) Notre Dame du Haut şapeli	14
Şekil 2. 18	Sdney Opera binası	14
Şekil 2. 19	Water Tower Place	15
Şekil 2. 20	Laurentienne binası	15
Şekil 2. 21	John C. Stennis Space Center	15
Şekil 2. 22	Two Union Square	16
Şekil 2. 23	Sherbrooke yaya köprüsü	16
Şekil 2. 24	Litra Cube aydınlatma ürünü	17
Şekil 2. 25	Mihara köprüsü	17
Şekil 2. 26	Hayder Aliyev Kültür Merkezi	18
Şekil 2. 27	Rumeli Hisarı	19
Şekil 2. 28	Saint Antuan kilisesi	19
Şekil 2. 29	Tayyare Apartmanı	20
Şekil 2. 30	Şişli camii	20
Şekil 2. 31	Mertim binası	21
Şekil 2. 32	Fibrobeton yenilikçi ürünleri (a) fibro-transbeton, (b) fibro-reflexbeton ve (c) fibrobeton-multiform	21
Şekil 2. 33	(a) Sapphire (Levent, İstanbul), (b) Spine Tower	22
Şekil 2. 34	Lif, matris ve kompozitin çekme gerilmesi- şekildeğiştirme değişimleri	23
Şekil 2. 35	Lifli ve lifsiz kolonda tersinir yükler altında çatlak oluşumu	24

Şekil 2. 36	Lif büyüklüklerinin karşılaştırılması.....	25
Şekil 2. 37	Lifler	25
Şekil 2. 38	Çelik lif tipleri	26
Şekil 2. 39	Çelik lifli numunede eğilme altında yük-yerdeğiştirme değişimi.....	27
Şekil 2. 40	(a) Enerji yutma kapasitesi-yerdeğiştirme değişimi (b) Çelik lif yüzdesinin basınç dayanımına etkisi	27
Şekil 2. 41	Çelik lif kullanım örnekleri	28
Şekil 2. 42	Cam lif kullanım örnekleri	29
Şekil 2. 43	Bazalt lif kullanım örnekleri	30
Şekil 2. 44	Lifin yağ ile kaplanmasının çekme gerilmesi-şekildeğiştirmeye etkisi.....	31
Şekil 2. 45	PVA lif kullanım örnekleri.....	31
Şekil 2.46	PP lif kullanım örnekleri	32
Şekil 2. 47	PE lif kullanım örnekleri	33
Şekil 2. 48	HDPE lif kullanım örnekleri (yelken, zırh ve eldiven)	33
Şekil 2. 49	Naylon lif kullanım örnekleri.....	34
Şekil 2. 50	Naylon 6.6 lif kullanım örnekleri.....	34
Şekil 2. 51	PAN lif kullanım örnekleri	35
Şekil 2. 52	Polyester lifin, giysi, tekne ve akustik panelde kullanımı	35
Şekil 2. 53	Çeşitli kompozitler için liflerin yüzdelere göre eğilme dayanımı-şekildeğiştirme değişimi.....	36
Şekil 2. 54	Lif donatılı özel beton uygulama örnekleri	36
Şekil 2. 55	Cam lifli çimentolu kompozit uygulama örnekleri.....	37
Şekil 2. 56	Patlamaya dayanıklı SIFCON örnekleri.....	38
Şekil 2. 57	UHPC örnekleri.....	39
Şekil 2. 58	UHPC ile Jakway Park Köprüsü ve köprü kirişi	40
Şekil 2. 59	UHPC kullanım örnekleri, dekoratif mobilya, peyzaj elemanı, kent mobilyası	40
Şekil 2. 60	Sherbrooke köprüsü.....	41
Şekil 2. 61	Seonyu yaya köprüsü	41
Şekil 2. 62	Hypergreen tower.....	42
Şekil 2. 63	Yve Saint Laurent butik	42
Şekil 3. 1	Cam liflerin SEM (tarayıcı elektronik mikroskop) görüntüsü.....	44
Şekil 3. 2	Cam lif uygulanması	44
Şekil 3. 3	Bağıl nem yüzdesi ve genleşme katsayısı ilişkisi	46
Şekil 3. 4	MOR ve LOP'un donma çözölme çevrimi değişimi	46
Şekil 3. 5	Cam lif yüzdesine göre, (a) eğilme dayanımı değişimleri, (b) tersinir yüklemeli eğilme dayanımı değişimleri.....	47
Şekil 3. 6	(a) Yaşlandırma sonrası numunenin eğilme dayanımı-yerdeğiştirme değişimi, (b) eğilme testi sonrası çatlak durumu	47
Şekil 3. 7	Eğilme altında yük-yerdeğiştirme değişimi.....	48
Şekil 3. 8	Tarihi yapıda bir restorasyon uygulaması	48
Şekil 3. 9	Ofis Binası (Londra) cephe kaplaması, prekast kolonlar	49
Şekil 3. 10	Space Pavilion	49
Şekil 3.11	EMV konut projesi.....	49
Şekil 3. 12	Hayder Aliyev Kültür Merkezi	50
Şekil 3. 13	FNB Stadyumu.....	50

Şekil 3. 14	Kutaisi Gürcistan Parlamento Binası	51
Şekil 3. 15	GFRC'nin kent mobilyası ve peyzaj eleman kullanımına örnek	51
Şekil 3. 16	Türkiye'de cam lifli çimentolu kompozit uygulamaları.....	52
Şekil 3. 17	PVA-ECC uygulama örnekleri	52
Şekil 3. 18	PVA-ECC'nin (a) sünek davranışı ve (b) çekme gerilmesi-şekildeğiştirme eğrisi	53
Şekil 3. 19	PVA-ECC eğilme ve çekme davranışı.....	54
Şekil 3. 20	Çimento, uçucu kül, kum dane boyutu dağılımı	58
Şekil 3. 21	Uçucu kül, cüruf, ince agregaların dane büyüklüğü dağılımı	64
Şekil 3. 22	Malzemelerin dane boyutu dağılımı	68
Şekil 3. 23	Donatı ve PE-ECC matris içindeki davranışı, çekme kuvveti-şekildeğiştirme değişimi.....	72
Şekil 3. 24	Numune çatlak gösterimi ve betonarme elemana kıyasla çatlak oluşumundaki farklılıklar	72
Şekil 3. 25	Çekme testi	73
Şekil 3. 26	(a) %0, (b) %0.3, (c) %1.2 yağ içeriğinin çekme gerilmesi-şekildeğiştirme değişimine etkisi	73
Şekil 3. 27	PVA lif üzerinde yağ maddesinin etkisi	74
Şekil 3. 28	Yağ içeriğinin aderans ve çatlak oluşumuna etkisi.....	74
Şekil 3. 29	Harç içindeki PVA lifin çekme kuvveti altındaki gerçek ve idealleştirilmiş davranışı.....	74
Şekil 3. 30	28 günlük direkt çekme-şekildeğiştirme değişimi.....	75
Şekil 3. 31	Kupon numuneler üzerinde yaşlandırma testinin elektron mikroskobu görünümü	76
Şekil 3. 32	Sıcak su kürünün lif özelliklerine etkisi	76
Şekil 3. 33	Yaşlandırma testi sonucu numunelerin davranışındaki değişimler	76
Şekil 3. 34	Kuruma rötre değişimleri	77
Şekil 3. 35	Eğilme gerilmesi- yerdeğiştirme davranışları.....	77
Şekil 3. 36	Farklı lif boyut ve oranlarının eğilme davranışı.....	78
Şekil 3. 37	Eğilme-çatlak genişliği değişimi	79
Şekil 3. 38	Sıcaklık değişimlerinin boşluk çapı ve birikimli civa hacmine etkisi.....	80
Şekil 3. 39	Çeşitli sıcaklıklara ait SEM (scanning electron microscopy) görüntüleri	80
Şekil 3. 40	Farklı sıcaklıklardaki kütle kaybı ve mekanik büyüklüklerdeki değişim	80
Şekil 3. 41	Kimyasal işlem gören liflerin SEM görüntüsü	81
Şekil 3. 42	6 ve 12.5 mm lik kontrol (V) liflerinin uçucu küllü ve uçucu külsüz yük-yerdeğiştirme değişimi.....	82
Şekil 3. 43	Eksenel yük altında karışımların mekanik değişimi.....	82
Şekil 3. 44	Donma-çözülmeden önce ve sonraki monotonik ve tersinir çekme altındaki değişimler	83
Şekil 3. 45	ECC numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı ve çatlak genişliği değişimleri.....	84
Şekil 3. 46	ECC numunelerin 180 günlük kuruma rötresi değişimleri	84
Şekil 3. 47	Kür süresine göre basınç dayanım değişimi.....	84
Şekil 3. 48	Eğilme davranışı değişimi	85
Şekil 3. 49	Numunelerin çekme gerilmesi-şekildeğiştirme davranışı.....	85
Şekil 3. 50	Direkt çekme testi çatlak yayılımı	86

Şekil 3. 51	CO ₂ emisyonu karşılaştırması	86
Şekil 3. 52	60 gün su kürüne maruz kalan numunelerin önceki ve sonraki çatlak değişimleri.....	87
Şekil 3. 53	Kontrol numunelerinin 28 günlük klorid geçirgenliği-kür süresi değişimi ...	87
Şekil 3. 54	Direkt çekmede çekme gerilmesi-şekildeğiştirme eğrisi	88
Şekil 3. 55	Yarı-statik basınç, gerilmesi-şekildeğiştirme eğrisi	88
Şekil 3. 56	Yük-Yerdeğiştirme değişimleri	89
Şekil 3. 57	Yutulmuş enerji-lif hacim değeri değişimi	89
Şekil 3. 58	Kolon-kiriş birleşimleri enerji yutulması değişimi	90
Şekil 3. 59	Kayma gerilmesi-şekildeğiştirme değişimi	91
Şekil 3. 60	ECC bağlantı döşemesi	91
Şekil 3. 61	Mihara Ohashi köprüsü (Japonya) uygulama öncesi ve uygulama sonrası	92
Şekil 3. 62	Grove Street Köprüsü (Michigan), ECC ile derzin ortadan kaldırılması işlemi	93
Şekil 3. 63	İstinat duvarı onarımı	93
Şekil 3. 64	Püskürtme onarım uygulaması	94
Şekil 3. 65	Mitaka Barajı (Hiroshima) bugünkü hali	94
Şekil 3. 66	Viyadük kiriş onarımı	94
Şekil 3. 67	ECC ile onarılmış su kanalı	95
Şekil 3. 68	Glorio Roppongi binası ve enerji yutulmasını sağlayan ECC bağlantı kirişi	95
Şekil 3. 69	Nabeaure Yokohama Kulesi	96
Şekil 3. 70	(a) 2 mm kalınlığında eğilebilir levha, (b) telefon kılıf tasarımı	96
Şekil 3. 71	PVA-ECC ile tasarım (a) yüzer ev, (b) kano	96
Şekil 3. 72	ECC'nin borularda kullanımı	97
Şekil 3. 73	ECC örnekleri	97
Şekil 3. 74	ECC uygulamaları	98
Şekil 4. 1	Tane boyutu dağılımı (a) çimento, (b) silis kumu	100
Şekil 4. 2	Kullanılan lif tipleri (a) cam lif, (b) bazalt lif	100
Şekil 4. 3	Karışım hazırlama aşamaları	102
Şekil 4. 4	Yayılma ölçümü (a) lifsiz, (b) lifli	102
Şekil 4. 5	Tipik panel, küp numune kalıp formları ve yerleştirilmiş durum	102
Şekil 4. 6	Bazalt lifli püskürtme uygulaması	102
Şekil 4. 7	Panellerden çıkartılan numuneler	103
Şekil 4. 8	Islanma-kuruma etkisi kabin görünümü	104
Şekil 4. 9	24 mm lifli numunelerin 1, 7, 28 gün σ_{MOR} , σ_{LOP} , ϵ_{MOR} , ϵ_{LOP} değişimleri (döküm)	106
Şekil 4. 10	24 mm lifli numunelerin eğilme gerilmesi-şekildeğiştirme değişimi (döküm)	106
Şekil 4. 11	Püskürtme ve döküm yöntemi uygulanmış bazalt lifli (% 2) panellere ait levhaların 7 ve 28 günlük eğilme gerilmesi-şekildeğiştirme değişimleri ...	107
Şekil 4. 12	12 mm bazalt lifli numunelerin (a) 7 , (b) 28 gün eğilme gerilmesi-şekildeğiştirme değişimleri (döküm)	108
Şekil 4. 13	12 ve 24 mm bazalt lifli numunelerin (a)7, (b) 28 gün eğilme gerilmesi-şekildeğiştirme değişimleri (döküm)	108

Şekil 4. 14 24 mm lifli levhaların ıslanma-kuruma testindeki davranış değişimi	110
Şekil 4. 15 2 ıslanma-kuruma testi sonrası numunelerin görünüşleri.....	111
Şekil 4. 16 SEM yüzey analizleri (cam lifler)	112
Şekil 4. 17 SEM yüzey analizleri (bazalt lifler)	112

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1	Çimento kompozit için takviye liflerin özellikleri 26
Çizelge 3. 1	Uçucu kül içeriğinin karışıma ve dayanıma etkisi..... 56
Çizelge 3. 2	Yüksek erken dayanımlı tasarım ve dayanıma etkisi..... 57
Çizelge 3. 3	Uçucu kül tipi, miktarı ve kimyasal katkıların yayılma ve dayanıma etkisi 59
Çizelge 3. 4	Uçucu kül ve metakaolinin karışım tasarımı ve dayanıma etkisi..... 63
Çizelge 3. 5	Sürdürülebilir kaynakların ECC karışımı ve dayanıma etkisi 65
Çizelge 3. 6	Agrega ve mineral katkıların karışım tasarımı ve dayanıma etkisi..... 66
Çizelge 3. 7	ECC karışım tasarımı lif ve kum özellikleri 70
Çizelge 3. 8	İncelenen makalelerin toplu ECC karışım tasarımı..... 71
Çizelge 4. 1	Lif özellikleri..... 100
Çizelge 4. 2	Döküm (premix) karışım bileşenleri 101
Çizelge 4. 3	24 mm’lik liflerle üretilen panellere ait levhaların eğilme test sonuçları (döküm) 105
Çizelge 4. 4	Lifli ve lifsiz 5 cm küp numunelerin basınç dayanımları..... 108
Çizelge 4.5	Levhaların 28 gün bazında birim hacim ağırlıkları ve su emme değişimleri 109
Çizelge 4. 6	Lifli ve Islanma-kuruma testi uygulanmış panellere ait levha sonuçları 110

LİF DONATILI ÇİMENTOLU İNCE KOMPOZİTLER – MİMARİDE KULLANIMI

Mehtap TAK YILDIRIM

Mimarlık Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Z. Canan Girgin

Beton; insanlığa hizmet eden ve yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Beton, geçmişte sadece çelik donatı ile birlikte kullanılırken, günümüzde farklı amaçlara yönelik değişik lif tiplerinin geliştirilmesi, donatılı betonun (çelik donatı, lif, çelik donatı+lif) kullanım alanını genişletmiştir. Farklı süneklik düzeyleri olan lifler laboratuvar ortamı ile sınırlı kalmayıp, amaca uygun uygulama alanlarına girmiştir (perde bağ kirişleri, köprü derzleri, cephe panelleri, estetik tasarım elemanları vb.).

Tez kapsamında, beton teknolojilerinin tarihsel gelişimi, tipleri ile incelenmiş, takiben lifli çimentolu kompozit teknolojileri ele alınmış; lif tipleri, karışım tasarımı, mekanik büyüklükleri ve uygulama alanları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ayrıca bir özel sektör firmasının malzeme, üretim ve laboratuvar desteği ile firma bünyesinde deneysel araştırma çalışmaları yürütülmüş, cephe panellerinde cam lifler yerine bazalt liflerin kullanılabilirliği, karışım özellikleri, yerleşebilirlik, fiziksel ve mekanik büyüklükler açısından araştırılmıştır. Döküm ve püskürtme olmak üzere iki tip uygulama gerçekleştirilmiş ve sonuçları irdelenmiştir.

Yalnız çimento kullanılarak yapılan deneysel üretimlerde bazalt lifin erken yaşlarda (ilk 7 gün) cam liften gerek dayanım gerekse şekildeğiştirme açısından daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. 28 gün bazında bazalt lifli numunelerde maksimum şekildeğiştirme düzeyinde bir miktar azalma olduğu, devamında gerçekleştirilen ıslanma-kuruma testinde ise gevrek davranışın belirginleştiği gözlenmiştir. Bazaltın karışım tasarımında bazı değişikler ile cam life iyi bir alternatif olabileceği düşünölebilir.

Çalışmanın İlk Bölümünde, literatür özeti, amaç ve izlenen yöntem anlatılmıştır.

İkinci Bölümde; beton teknolojilerinin gelişimi hakkında bilgi verilmiş, lifli beton teknolojileri ve mimari uygulamalar incelenmiştir.

Üçüncü Bölümde; cam lifli çimentolu kompozitler (GFRC) ve yeni nesil beton türü olan sünekliği arttırılmış lifli çimentolu kompozitler hakkında genel bilgi verilmiş; karışım tasarımı ve mekanik büyüklükler ile ilgili deneysel veriler, sonuçlar irdelenmiş ve bu alandaki güncel mimari örneklerden bahsedilmiştir.

Dördüncü Bölüm; standart olarak cam lif ile üretilen cephe elemanlarının bazalt lif seçeneği ile olabilirliği üzerine deneysel bir araştırma ve değerlendirmesine ayrılmıştır.

Beşinci bölümde; genel bir değerlendirme yapılarak araştırmanın sonucu ve öneriler aktarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İleri beton teknolojileri, mimari uygulamalar, sünekliği arttırılmış PVA lifli çimentolu kompozitler, karışım tasarımı, mekanik büyüklükler, cephe panelleri, cam lifli çimentolu kompozitler

**FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES – ARCHITECTURAL
APPLICATIONS**

Mehtap TAK YILDIRIM

Department of Architecture

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Z. Canan GİRĞİN

Concrete serves the humanity as an important structural material. While concrete was always used only with steel reinforcement in the past, nowadays, several fiber types have been developed for different application areas. Thus, to reinforce concrete may not be limited only to rebar, fiber addition for enhanced ductility (e.g. link beams in coupled shear walls or bridge joints) or for moderate ductility (e.g. façade panels, aesthetic designs) has been introduced to application areas from laboratory conditions.

In the scope of this Thesis, historical development of concrete technology is summarised. The types and characteristics of fibers and their utilization areas are addressed. Then, especially, the technology of engineered cementitious composites (ECC) has been focused; the types of fibers, mix design, workability, physical and mechanical characteristics are explored in detail. An experimental research study on façade panels were conducted within a private sector firm with their material, production and laboratory support. The utility possibility of basalt fibers instead of glass fibers were experimentally studied on panels in view of the production technique (premix and spraying), fiber sizes, mix design, physical and mechanical characteristics.

From the experimental studies on the panels, that only cement was used, basalt fibers are superior than glass fibers in view of ultimate bending strength and deformation in early curing period (up to 7 days). However, there is a need to enhance ultimate deformation in 28 days and especially the transition from ductile to brittle deformation characteristic in aging period. As a result, it may be concluded that the basalt fibers may be used as an alternative to glass fibers by enhancing final deformation characteristics.

In the First Section of the study, the literature summary, purpose and methodology are given.

The Second Section gives knowledge about the development of concrete technology, fiber reinforced concrete technologies and architectural applications.

In the Third Section; glass fiber reinforced concrete (GFRC) and engineered cementitious concrete (ECC) are investigated in view of mix design, mechanical characteristics through the experimental data and actual architectural applications.

In the Fourth Section; an experimental study was carried out on the utility possibility of basalt fibers instead of standard glass fibers for exterior façade elements.

In the Fifth Section; the results and recommendations of this Thesis are presented.

Keywords: Advanced concrete technologies, architectural applications, PVA-ECC, mix design, mechanical characteristics, façade panel, GFRC.

1.1 Literatür Özeti

Beton; kompozit ve heterojen yapılı, iri ve ince agregalardan oluşan, çimentonun yanında çoğu zaman mineral katkıların da kullanıldığı bir yapı mühendisliği malzemesidir. Betonun uygun maliyeti olması, üretim tecrübesi, bazı durumlarda form özgürlüğü sağlaması bu malzemenin yaygın kullanımı için önemli avantaj sağlamaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte betonun sadece betonarme yapılarda değil, lifli kompozit panellerden lifli püskürtme betona kadar geniş bir alanda uygulanma imkanı oluşmuştur. Lifli beton teknolojileri konusunda yararlanılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

- Bentur, A. ve Mindess, S., (1990), “Fibre Reinforced Cementitious Composites” kitabında lifli betonu bütün özellikleri ile incelemiştir.
- Balaguru, P.N. ve Shah, S.P., (1992), “Fiber-Reinforced Cement Composites” kitabında lifli betonu bütün özellikleri ile incelemiştir.
- Neville, A.M., (1995), “Properties of Concrete (Fourth and Final Edition)” kitabında beton malzeme ve özellikleri ayrıntılı şekilde incelenmiştir.
- Schmidt, M. vd., (2004), “Ultra High Performance Concrete (UHPC)” Uluslararası sempozyumunda ultra yüksek performanslı betonun mekanik büyüklükleri incelenmiştir.
- American Concrete Institute Materials (ACI)’daki ileri beton teknolojileri ile ilgili birçok makaleden yararlanılmıştır.

- Fisher, G. ve Li,V.C., (2002), “Influence of Matrix Ductility on Tension-Stiffening Behavior of Steel Reinforced Engineered Cementitious Composites (ECC)”, makalesinde çelik takviyeli ECC karışımının mekanik büyüklükleri incelenmiştir. ECC, ilk olarak 1998 yılında Victor C. Li ile irdelenmeye başlamıştır ve 2002 araştırması da yapılan ilk çalışmalardandır.
- Kim, Y.Y. vd. (2003), “Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-Mixture Shotcreting” makalesinde püskürtme amaçlı karışım hazırlanmış, mekanik büyüklükleri incelenmiştir.
- Yang, E.H. vd., (2007), “Use of High Volumes of Fly Ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness” makalesinde uçucu külün; basınç dayanımı, kuruma rötresi ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir.
- Sahmaran, M. vd., (2008), “Corrosion Resistance Performance of Steel-Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams” makalesinde PVA liflerin yağ ile kaplanmasının karışım bileşenlerinin korozyona olan etkisi incelenmiştir.
- Ahmed, S.F.U. ve Mishai, H., (2009), “Strain hardening behavior of lightweight hybrid polyvinylalcohol (PVA) fiber reinforced cement composites” makalesinde eğilme altında farklı uzunluk ve mekanik özelliklere sahip iki PVA lif tipi ve silis kumu ile dört tip de hafif kum kullanarak çoklu çatlak davranışını incelemiştir.
- Li, M. ve Li, V.C., (2009), “Influence of Material Ductility on Performance of Concrete Repair” makalesinde yüksek erken dayanımlı sünek ECC tasarımının performansını karşılaştırmıştır.
- Özbay, E. vd. (2013), “Self-Healing of Microcracks in High-Volume Fly-Ash-Incorporated Engineered Cementitious Composites” makalesinde yüksek oranda uçucu kül içeren iki tip karışımın mekanik büyüklüklerindeki değişimi incelemiştir.

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde, standartlaşmış kalıplardan ziyade ihtiyaca en uygun, fonksiyonel, yenilikçi ve estetik nitelikli ince lifli beton eleman tasarımını elde etmek mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, güncel beton teknolojileri konusunda dünyadaki gelişmeleri literatür

ışığında incelemek ve özellikle yeni nesil sünekliği arttırılmış PVA lifli çimentolu kompozitlerin; karışım tasarımı, mekanik büyüklükleri ve uygulama alanlarını irdelenmek hedeflenmiştir.

Çalışmanın ikinci amacı olarak, uygulamada yayginkullanılan cam lifli panellerin mekanik dayanımlarının irdelenmesi ve cam lif yerine bazalt lifin uygulanabilirliğinin deneysel olarak araştırılması hedeflenmiştir.

1.3 Yöntem

Çalışma kapsamında, geçmişten günümüze beton teknolojileri araştırılmıştır. Günümüz lifli beton teknolojileri hakkında ayrıntılı inceleme yapılmış, mühendislik ve mimari uygulamaları incelenmiştir.

Tez kapsamında ayrıca, standart olarak cam lif ile üretilen cephe elemanlarının bazalt lif seçeneği ile olabilirliği üzerine deneysel bir araştırma çalışması yapılmış, sonuçları istatistiksel ve grafiksel yöntemler ile sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 2

BETON TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞİMİ

Beton; agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinden oluşan, J.Aspsdin'in ilk çimentoyu ürettiği 1824'den bu yana insanlığa hizmet eden ve günümüzde yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Bina, köprü, yol, tünel inşaatları yanında baraj, su deposu ve kanal gibi su yapılarında kullanılır. Çoğu zaman taşıyıcı eleman olarak kullanılan beton, değişik üretimleri ile dekoratif malzeme olarak da kullanılmaktadır.

2.1 Dünya'da Beton Teknolojilerinin Gelişimi

Geçmişten günümüze bağlayıcı malzemelerin ve günümüz teknolojisi betonun gelişimi [1-19] kaynaklarından yararlanılarak topluca aşağıda verilmiştir.

Doğal bileşenli bağlayıcı malzemeler binlerce yıldır kullanılmıştır. İlk bulgular **M.Ö.14** bin yıl öncesine dayanmaktadır. 1960-1970 yıllarında İsrail'de bulunan kalıntılar ve Avrupa'nın çeşitli bölgelerinde arkeologlar tarafından yapılan kazılar sonucu İngiltere'de, kilden yapılmış taşların arasına fırınlanmış fındık kabukları yerleştirilerek, yapının güçlendirildiğinin ortaya çıkması buna işaret etmektedir. **M.Ö. 3000**'de Eski Mısırlılar, saman ve çamuru karıştırarak bloklar üretmişler, piramitlerin inşasında kullanmışlardır. **M.Ö 800** yıllarında ise eski Yunanlılar Girit ve Kıbrıs'ta bir tür bağlayıcı kullanmışlardır.

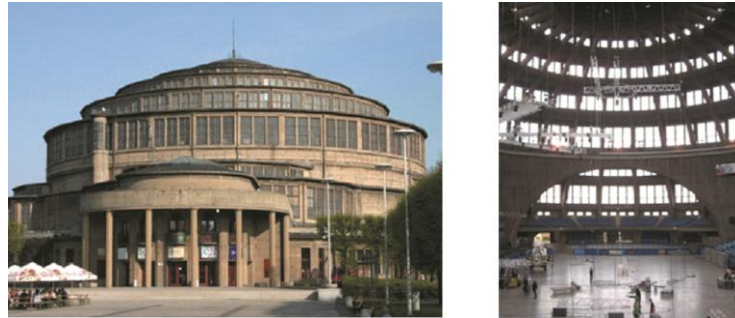
M.Ö. 300'lerde Romalılar, inşaatlarında bağlayıcı olarak puzolan (volkanik kül) ve kireç kullanmıştır. Ayrıca kan, hayvan yağı, süt vb. gibi maddeler ilave etmişlerdir. Roma

dönemi çimentosu denilen bu bağlayıcının karışımını Vitruvius; “2 kısım puzolan bir kısım kireç” (2 ölçek puzolan+1 ölçek kireç, 4 ölçek kum) olarak tarif etmiştir. Su ile karıştırıldığında sertleşen bu çimento, dayanım ve dayanıklılık açısından, günümüz standartlarını dahi sağlamaktadır. Bu bağlayıcı ile Romalılar, kalıcı mimari tasarımlar gerçekleştirmişlerdir, en ünlüsü Roma’daki *Pantheon*’dur¹ (Şekil 2.1). **M.Ö. 27** yılında inşasına başlanmış, birkaç kez onarım görmüş ve **M.S. 140** yıllarında son şeklini almıştır. 43.4 m açıklıklı yarım küre kubbesi bu malzeme ile yapılmıştır, literatürde beton olarak isimlendirilmektedir.

Roma kralı Nero’nun **M.S. 64**’de yapılan evinin duvarları ve **M.S. 532-537** yıllarında inşa edilen İstanbul’daki *Ayasofya* kemerlerinin (açıklık: 45 m) temel kısmı betondur. Ayasofya’nın 33 m çaplı kubbesi **M.S. 557** depremi sonrası çökmüş ve orijinalinden farklı olarak, yeniden yapılmıştır.



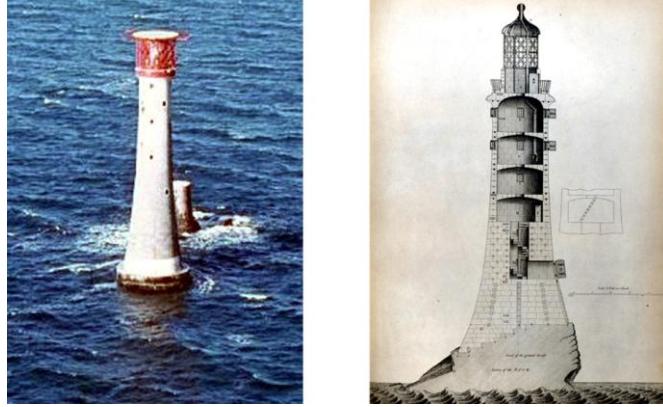
Şekil 2.1 Panteon tapınağı (Roma) [2].



Şekil 2.2 Jahrhunderthalle kongre merkezi (Almanya) [20].

¹ Bu açıklığı aşan bir başka beton ya da betonarme kubbe **1913** yılına kadar yapılamamıştır. Pantheon’dan **1940** yıl sonra; **1913** yılında Breslau’da (Almanya) (bugün:Wrocław/Polonya) betonarme olarak inşa edilen (Şekil 2.2) Jahrhunderthalle Kongre Merkezi açıklığının 65 m olduğu düşünülürse Pantheon’un zamanına göre ne denli önemli bir yapı olduğu anlaşılmaktadır.

Roma imparatorluğunun **M.S. 476** yılında çöküşü ile Romalıların kullandığı çimentonun bileşimi de unutulmuştur. **1755**'de John Smeaton hidrolik çimentoyu yeniden keşfetmiş, Londra'daki *Eddystone* deniz fenerinin inşaatını gerçekleştirmiştir (Şekil 2.3). Smeaton'un keşfetmiş olduğu çimento Portland çimentosuna öncü olmuştur.



Şekil 2.3 Eddystone deniz feneri (Londra) [21].

1779'da Bry Higgins, dış sıva amaçlı stucco denilen hidrolik çimento patenti almıştır.¹

1789'da ilk beton yol (İşkoçya) yapılmıştır.

1804'de ilk beton boru (Fransa) üretilmiştir.

1816'da donatısız olarak Roma çimentosu ile ilk beton köprü (Fransa) inşa edilmiştir. Betonda en büyük gelişim, **1824** yılında duvar ustası Joseph Aspdin'in "Portland" olarak isimlendirdiği çimentoyu geliştirilmesi ve patentini alması ile olmuştur. Aspdin, öğütülmüş kireçtaşı ve kil karışımını pişirdikten sonra toz haline getirerek günümüzdeki çimentonun özelliklerine yakın ilk bağlayıcıyı üretmiştir.² Ancak, üretim sırasında yeterince yüksek sıcaklıklarda pişirilmediği için bugünkü Portland çimentosunun özelliklerine tamamen sahip olamamıştır³. Günümüze kadar gelebilmeyi başarmış

¹ Higgins, **1780**'de de "Experiments and Observations Made with the View of Improving the Art of Composing and Applying Calcareous Cement and of Preparing Quicklime" isimli çalışmayı yayınlamıştır.

² İngiltere'nin Portland şehri kıyılarındaki kayaların rengine benzediğinden dolayı ürettiği çimentoya "Portland çimentosu" adını vermiştir. O dönem, Portland taşı dönemin prestijli yapılarda kullanıldığı için özel bir önemi vardı.

³ Aspdin'in ürettiği çimento C_3S (alite) içermiyordu, bileşiminde sadece belite (C_2S) vardı. Oysa ki erken dayanım için alite gerekliydi. Oğlu William Aspdin, Portland çimentosunu geliştirmeye devam etmiş, 1840'larda daha fazla kireçtaşı, daha fazla yakıt dolayısıyla daha yüksek yanma sıcaklığı ile alite oluşan Portland çimentosunu geliştirmiştir.

İngiltere Kirkgate İstasyonu yanındaki *Wakefield Arms*, Joseph Aspdin'in ürettiği çimento ile inşa edilmiştir (Şekil 2.4).

1828'de I.K. Brunel, Portland çimentosunun ilk mühendislik uygulamasını, önerdiği yeni kazı/destek yöntemi ile Thames tünelinin inşaatında (Londra) gerçekleştirmiştir.

1832'de Dr. E.Gustav Leube Portland çimentosu üretimi için yeni yöntem geliştirmiştir.

1836'da ilk basınç ve çekme test yöntemleri Almanya'da geliştirilmiştir.



Şekil 2. 4 Wakefield Arms binası (İngiltere) [22].

1848'de ilk kez beton, demir çubuklar ve kümes teli ile birlikte J.L. Lambot tarafından kullanılmıştır; beton içerisine hasır yerleştirerek kano yapmıştır (Şekil 2.5 a). Aynı zamanda bu uygulama ilk ince kabuk uygulamasıdır. 1960'dan bu yana beton kano yarışmaları düzenlenmektedir, yarışmalar A.B.D'den dünyaya yayılmıştır (Şekil 2.5 b). Beton teknolojisindeki gelişmeler ile daha hafif, sağlam ve hızlı kanolar üretilmiştir.



Şekil 2.5 Kano örnekleri (a) 1848 (4 m uzunluk, 1.3 m genişlik, 4 cm et kalınlığı), (b) 2012 kano yarışmasından [23-24].

1849'da J.Monier isimli bahçıvan ilk defa donatıyı beton içine (saksıda) koyarak, kompozit çalıştırma kavramını ortaya koymuş, "ciment armé" ismini verdiği yöntemin **1867'**de patentini almış ve böylelikle günümüz betonarme inşaatının temellerini atmıştır. O dönem Monier, çekme dayanımını almak üzere demir kullanarak ilk cephe elemanı (**1869**), yaya köprüsü (**1873**) (Şekil 2.6) ve kirişi (**1878**) üretmiştir.



Şekil 2.6 Chazelet köprüsü (Fransa) [25].

1852 yılında F.Coignett ilk defa beton ve demir profil kullanarak bina inşa etmiştir (Şekil 2.7). **1854**'de İngiliz sıva ustası W.B. Wilkinson benzer bir çalışma yaparak, şerit demir veya tel ile donatılı döşemelerin patentini almıştır¹.



Şekil 2.7 François Coignet evi [26].

1860'larda döner fırının geliştirilmesi modern çimentonun üretilmesinde önemli bir basamaktır.

1862'de E.Langin yüksek fırın cürufunu toz halde çimentoya katarak kullanmaya başlamıştır.

1886'da Jackson ve C.E.W. Döhring, ilk defa öngerilmeli beton elemanın tasarım ilkelerini ortaya koymuştur. Betonda ön gerilmenin ilk uygulaması; Jackson'ın çelik çubukları, ürettiği beton kemer ve suni taşların içinde açılan boşluklardan geçirip, germek ve ankre etmek sureti ile elemana dışarıdan basınç uygulamasıdır.

1887 yılında Ways ve Koenen tarafından yayınlanan, "Monier System" betonarme konusunda ilk teorik çalışma olmuştur.

¹ Patentinde demirin çekme kuvvetlerini, betonunda basınç kuvvetlerinin olduğunu açıklamıştır. Bu açıklama betonarme davranışın ilk tanımıdır.

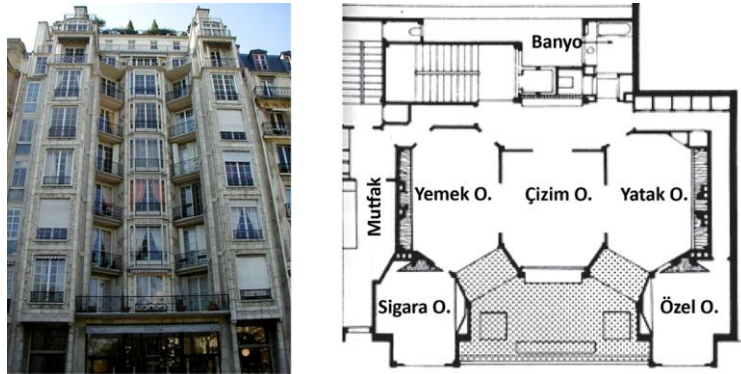
1889'da ilk betonarme mühendislik yapısı, Hennebique tarafından Fransa'da inşa edilmiştir. Hennebique'in "Béton Armé" sistemi **1892-1902** döneminde, dövme demirden donatılar kullanılarak 7000'in üzerinde yapıda uygulanmıştır.

1890'lardan itibaren binaların cepheleri prekast beton elemanlar ile tasarlanmaya başlanmıştır. Emile Arnoud tarafından **1901**'de inşa edilmiş yapının cephesi prekast betondur ve Art Nouveau üslup özelliklerini taşımaktadır (Şekil 2.8).

1902'de ilk defa kiriş ve lentolu sistemin kullanıldığı *25 Rue Franklin* apartmanı A. Perret tarafından inşa edilmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.8 Art Nouveau üslup özellikli prekast beton cephe (Paris) [27].



Şekil 2.9 25 Rue Franklin apartmanı (Paris) [28-29].

1903 yılında Elzer ve Anderson tarafından ilk betonarme yüksek yapı, *Ingalls Building*, Cincinatti'de (A.B.D) inşa edilmiş (O tarihe kadarki en yüksek betonarme yapı 6 katlıydı), betonarme çok katlı yapı yapma konusundaki endişe ve güvensizliği de

yıkılmıştır. Ransome donatılı¹ çerçeve sistem yapı, 16 kat ve 64 m yüksekliği ile o yılların en yüksek yapısı olmuştur (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Ingalls binası (Cincinnati) [30].

İlk Betonarme Yönetmeliği, **1904** yılında Almanya’da, **1906**’da da Fransa’da yayınlanmıştır.

1905’ de C.A.P Turner, Johnson-Bovey binasında (Minneapolis, A.B.D) kirişsiz döşeme kullanmıştır.

1905’de çimento ve beton araştırmaları için American Concrete Institute (ACI) kurulmuştur.

1908’de Thomas Alva Edison dökme demir kalıp sistem ile, ekonomik, hafif, dayanıklı, estetik ve tek dökümde inşa edilebilen evler üretmiştir (1 adedi 6 saatte yapılmıştır) (Şekil 2.11). 11 adet ev yapan Edison, böylece toplu konut yapımını başlatmıştır.



Şekil 2.11 Tek dökümde inşa edilen beton evler (New Jersey) [31-32].

¹ Yüksek aderans sağlayan, burularak form verilmiş, kare kesitli demir çubuğun (nervürlü çelik benzeri) patentini 1884 yılında almıştır. 50.8x50.8 mm boyutuna kadar kare demir çubukları burabilen makineyi de kendisi geliştirmiştir.

Edison'un çimento üretimine kazandırdığı en önemli buluşu, **1909** yılında tasarlayıp imal ederek patent aldığı "uzun döner fırın" olmuştur. 47.5 m boyunda ve 2.1-2.4 m çapında yaptığı döner fırını kullanarak, 3-4 katı daha fazla klinker üretilmesini sağlamıştır.

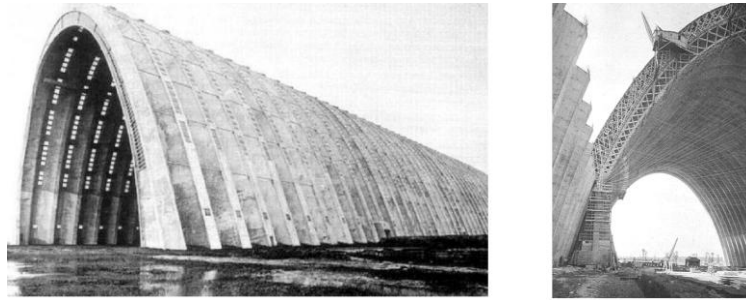
1911'de E.Freyssinet öngermeli beton ile ilgili kendi yöntemini geliştirmiştir. E.Freyssinet; sünme ve gevşeme etkisiyle donatıdaki öngerme kuvvetinin zamanla azaldığını, çatlakların genişlediğini gözlemlemiş; bu durumun yüksek dayanımlı beton ve çelik kullanılarak azaltılabileceği sonucuna varmıştır¹.

1914'de hava ile çalışan çekiçler ile beton yerleştirilmiştir.

1916'da Portland Cement Association kurulmuştur.

Betonda su, çimento miktarları ve oranları ile basınç dayanımı arasındaki ilişki **1896**'da Feret (Fransa), **1919**'da D. Abrams (A.B.D) tarafından tariflenmiştir.

1921'de E. Freyssinet, Orly (Fransa) şehrinde 80 m açıklık, 54 m yükseklik, 300 m uzunluğa sahip uçak hangarları inşa etmiştir. Taşıyıcı sistem, ard arda dizilmiş parabolik kemerlerden oluşmuştur. Bu yapı, II. Dünya savaşında bir hava saldırısı sonucu yıkılmıştır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Orly uçak hangarları (Fransa) [33].

1922'de inşa edilen 69 m yüksekliğindeki *Medical Arts*, o tarihe kadarki en yüksek betonarme binadır (Şekil 2.13 a). Aynı yıl, A. Perret tarafından inşa edilen *Notre Dame du Raincy*, taşıyıcı sisteminde beton kullanılan A.B.D'de ilk, dünyada ikinci kilisedir². (Şekil 2.13 b).

¹ 1928 yılında yaptığı çalışmanın patentini almıştır.

² İlki, İstanbul'daki Saint Antuan Kilisesi'dir.



(a)



(b)

Şekil 2.13 (a) Medical Arts binası (Teksas), (b) Notre Dame du Raincy kilisesi (Fransa) [34-35].

1924'de çimentonun mineralojik bileşimi ilk defa Bogue tarafından tanımlanmıştır.

1926'da Almanya'da 25 m açıklık, 12.5 +3.1 m (kubbe) yükseklik ve 6 cm kalınlığında ilk ince kabuk yapı, Planetarium (gözlem evi) yapılmıştır.

1926'da hava ile çalışan ilk dahili vibratörler Daniav tarafında geliştirilmiştir.

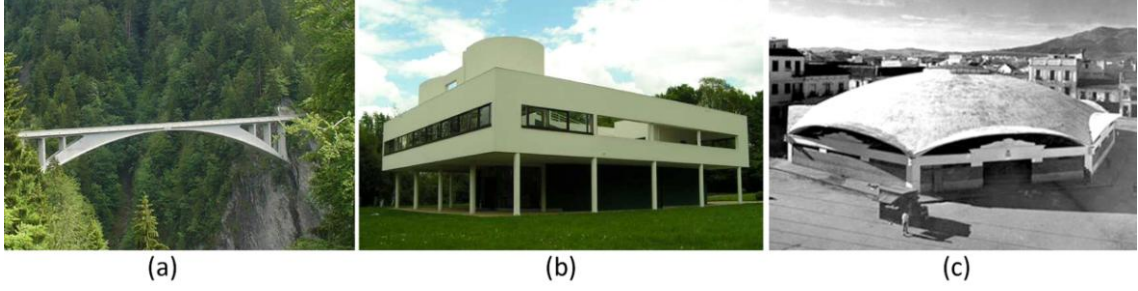
1930'da ilk akışkanlaştırıcı (linyosülfonat) ve hava sürükleyici kimyasal katkıları geliştirilmiştir.

1930'da R. Moillart tarafından İsviçre'de beton kemerli *Salginatobel* köprüsü inşa edilmiştir (Şekil 2.14 a).

1931'de mimarlık alanında birçok ürün vermiş olan Le Corbusier, donatılı beton kullanarak estetik ve sade görünüme sahip *Villa Savoye* binasını tasarlamıştır (Şekil 2.14 b).

1933'de İspanyol mühendis E. Torroja, İspanya'da çatısı 45.72 m açıklık ve 88.9 mm kalınlığı olan ilk ince betonarme kabuktan oluşan *Algeciras Market Market Hall*'ı tasarlamıştır (Şekil 2.14 c).

1935'de kemer tipi ağırlık barajı olan *Hoover Barajı'nın* (Las Vegas) inşası tamamlanmıştır (Şekil 2.15). Modern baraj mühendisliğinin 6 milyon m³ beton ile üretilen ilk örneğidir. 221 m yükseklik ve 201 m genişliğindedir.



Şekil 2.14 (a) Salginatobel köprüsü (İsviçre), (b) Villa Savoye (Paris), (c) Algeciras Market Hall (İspanya) [36-38].



Şekil 2.15 Hoover barajı (Las Vegas) [39].

1937 yılında Frank Lloyd Wright'ın donatılı beton destekli balkonları olan çarpıcı organik strüktüre sahip, ünlü *Fallingwater* binası inşası tamamlanmıştır (Şekil 2.16). Doğallık açısından bazı kaya parçaları yerinde bırakılarak döşemeden çıkmıştır. Büyük konsolların olması, mühendislik firması ile ciddi çatışmalara neden olmuştur.



Şekil 2.16 Fallingwater (Pennsylvania) [40].

1940 yılında E- tipi cam lifler ilk defa Owens-Corning firması tarafından üretilmiştir.

1956'da Frank Lloyd Wright'ın tasarladığı, taşıyıcı sistemi betonarme olan heykelimsi forma sahip *Guggenheim* müzesi (New York) inşa edilmiştir (Şekil 2.17 a).

1957'de taşıyıcı sistemi betonarme ve taştan oluşan Le Courbusier'in tasarladığı *Notre Dame du Haut Şapeli* inşa edilmiştir. Kalın duvarlar ile kuşatılmış betonarme kolona gömülü kalkık çatısı püskürtme beton ile oluşturulmuştur (Şekil 2.17 b).



Şekil 2.17 (a) Guggenheim müzesi (New York), (b) Notre Dame du Haut şapeli (Fransa) [41-42].

1960'da lifli betonlar üzerine ilk çalışmalar başlamıştır.

1963'de *Sydney Opera* binası inşa edilmiştir. 588 betonarme ayak, deniz seviyesinin 25 m derinliğindeki kumtaşı tabakasına kadar inmiştir. Kabuk, 2194 adet ön üretimli eleman ile oluşturulmuştur (Şekil 2.18).

1970'li yıllardan sonra püskürtme beton uygulamalarında çelik lifler, hasır donatının yerini almaya başlamıştır.



Şekil 2.18 Sydney Opera binası (Avustralya) [43].

1970'de reçine (epoksi vb.) ile çekilmiş ilk plastik donatı (FRP) A.B.D'de geliştirilmiştir¹.

1970, 1980'lerde bugün de yaygın olarak kullanılan naftalin ve melamin bazlı süper-akışkanlaştırıcılar geliştirilmiştir. Böylelikle su/çimento oranı < 0.4 olmasına imkan sağlanmıştır.

¹ Karbon ve özellikle cam lifli donatı ile yaygın kullanıma geçilmesi günümüzde başlamıştır, son dönemde bazalt lifler de eklenmiştir.

1975’de ilk yüksek dayanımlı beton Chicago’da 74 katlı, 267 m yüksekliğindeki *Water Tower Place* binasında kullanılmıştır, kolonların bir bölümü ve çekirdekte C60 betonu kullanılmıştır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 Water Tower Place (Chicago) [44].

1980’lerde FRP donatılar Çin’de inşa edilen iki köprüde uygulanmıştır.

1983’de P.C. Aitcin öncülüğünde ilk defa “yüksek performanslı beton” kavramının temel ilkeleri ortaya konulmuştur.

1984’de ilk yüksek performanslı beton (HPC) ile C106 uygulaması yapılmıştır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 Laurentienne binası (Montreal, 102 m- 27 kat) [45].

1984’de geopolimer beton kavramı oluşmaya başlamıştır. Karışım tasarımında daha az çimento veya çimento kullanılmayarak çevreci bir kullanım başlamıştır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 John C. Stennis Space Center (Mississippi) [46].

1986'da ilk FRP öngerme donatısı Almanya'da geliştirilmiştir.

1986 yılında Okamura tarafından "Kendiliğinden Yerleşen Beton" geliştirilmiştir (ilk prototipi **1988'**de üretilmiştir).

1988'de çok yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı (C131) *Two Union Square* binası (Seattle) inşa edilmiştir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 Two Union Square (Seattle, 226 m- 56 kat) [47].

1996 yılında ilk ultra yüksek performanslı beton uygulaması (UHPC) yapılmıştır.

1990'ların başında Reaktif Pudra Beton (RPC, Lafarge®, Fransa) üretilmiştir. **1997'**de RPC kullanılarak 200-800 MPa basınç dayanımı ile göze çarpan *Sherbrooke* yaya köprüsü (Kanada) inşa edilmiştir (Şekil 2.23).

1997-1998'de sünekliği arttırılmış lifli çimentolu kompozit (ECC), Victor Li tarafından araştırılmaya başlanmıştır.



Şekil 2.23 Sherbrooke yaya köprüsü (Kanada) [48].

Polikarboksil bazlı akışkanlaştırıcıların geliştirilmesi ile **2000'**lerden itibaren, Kendiliğinden Yerleşen Beton yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

2002 yılında Victor Li, Polivinil alkol (PVA) lif kullanarak beton kiriş elemanlar üretmiştir.

2003'de "Lifli Kendiliğinden Yerleşen Beton" üretilmiştir.

2004'de de "Yoğun Donatılı Ultra Yüksek Performanslı Beton" üretilmiştir ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

2004 yılında Macar mimar, A. Losonczi tarafından geliştirilen, esas olarak harç ile optik fiberlerden oluşan Litracon "Saydam Beton", bloklar halinde yapılarda ve iç mekanlarda uygulanabilmektedir. Aynı zamanda mobilyalarda da kullanılabilen dayanımı yüksek (C50), estetik beton ürünler tasarlanabilmektedir. A. Losonczi, bunu kanıtlamak için LTC adını verdiği bir aydınlatma ürünü tasarlamıştır (Şekil 2.24).

2005 yılında Victor Li tarafından, Michigan eyaletinde *Mihara* köprüsü'nde 225 mm kalınlığında ECC köprü döşemesi uygulanmıştır (Şekil 2.25).

2005'de "Hafif Agregalı Reaktif Pudra Betonu" geliştirme çalışmaları başlamıştır.

2007'de "Fotokatalitik Çimento" ile kendini temizleme özelliğine sahip beton üretilmiştir.



Şekil 2.24 Litra Cube aydınlatma ürünü [49].



Şekil 2.25 Mihara köprüsü (Michigan) [50].

2008'de "Sürdürülebilir Reaktif Pudra Betonu" ile (C200) üretimi deneme çalışmaları başlamıştır.

2011 yılında Zaha Hadid'in tasarladığı *Hayder Aliyev Kültür Merkezi*'nde cam lif donatılı paneller kullanılmıştır¹. Değişken eğimli uzay kafes çatı sistemi üzerine maksimum 15 m genişliğinde, 7 m uzunluğunda GFRC panellerden 15000 adet döşenmiştir (Şekil 2.26).

2013 yılında MgO'li çimento geliştirilmiştir. Özellikle hızlı erken dayanım gereken yerlerde uygulanması düşünülmektedir.



Şekil 2.26 Hayder Aliyev Kültür Merkezi (Azerbeycan) [51-52].

2.2 Türkiye'de Beton Teknolojilerinin Gelişimi

Tarihsel süreçte betonun Türkiye'deki gelişimi [53-60] kaynaklarından yararlanılarak topluca aşağıda özetlenmiştir :

İlk kez, Anadolu Hitit Medeniyetinde (özellikle Çorum, Tokat ve Malatya'nın antik yerleşimlerinde) magnezyum oksit (MgO) ile karıştırılmış puzolanik aktif doğal malzemelerin harç yapımında kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca, Güneydoğu Anadolu'da Asurlulardan kalma tarihi kalıntılarda kireç ile puzolanik maddenin kullanılmış olması Anadolu'da Romalılar'dan önce çimento kullanıldığı göstermiştir.

1400'lü yıllarda Osmanlı İmparatorluğu Dönemi'nde hatta onlardan da önce Anadolu'da hüküm süren Selçuklular tarafından kullanılan "Horasan harcı" olarak adlandırılan bağlayıcı malzeme ortaya çıkmıştır. Horasan harcı, yanmış kil tuğlalarının kırılıp ufalanmasından elde edilen malzemenin sönmüş kireç ve su ile karıştırılması ile elde edilmiştir. Mimar Sinan, "Horasan harcı" ile önemli eserler inşa etmiştir.

¹ Zaha Hadid'in tasarladığı birçok yapıda cam lif donatılı paneller kullanılmıştır.

1452’de Horasan harcı, Osmanlı Türkleri tarafından ilk kez *Rumeli Hisarı’nın* yapımında kullanılmıştır (Şekil 2.27).



Şekil 2.27 Rumeli Hisarı (İstanbul) [61].

1796-99 ve **1821-1825** yılları arasında İstanbul Tershanesi’nde kuru havuzların yapımında sönmüş kireç ile karıştırılarak, has harç adı altında horasan harcı kullanılmıştır.

1878’de dünyada çimento üretim ve satışı başlamasına rağmen, Osmanlı İmparatorluğu’nda Sanayi Devrimi ve dönemin gelişmeleri toplumsal yaşama yansıtılamamıştır. Bu dönemde çimento, ithal edilen bir malzemedir.

1906’da ülkemizde ilk betonarme uygulaması olarak bilinen *Saint Antuan Kilisesi* (Beyoğlu, İstanbul) inşa edilmiştir. İtalyan mimar Giulio Mongeri tarafından yapılmıştır, Dünyanın da ilk betonarme kilisesi olduğu sanılmaktadır (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 Saint Antuan kilisesi (İstanbul) [62-63].

1908 yılında Mimar Vedat Bey tarafından inşa edilen *Defter-i Hakani Binası’nda* (Bugünkü Sultanahmet Meydanında bulunan İstanbul Tapu ve Kadastro Müdürlüğü) demir hasır donatılı beton kullanıldığı düşünülmektedir. İnşaat sırasında çekilen fotoğraflarda Hennebique sistemine benzeyen donatı görülmektedir. Ancak evraklarında kaydına rastlanmamıştır.

1910'da Batılılaşma sürecinin başlaması ile ilk çimento fabrikası "Memalik-i Osmaniyye'de Suni Çimento ve Hidrolik Kireç İmaline Mahsus Aslan Osmanlı Anonim Şirketi" (Darıca, Kocaeli) adıyla kurulmuştur.

1910'de Mimar Vedat Bey tarafından tasarlanan *Moda Vapur İskelesi Binası*'nda betonarme kullanılmıştır. Restorasyon çalışmalarında betonarme döşeme gözlenmiştir.

1912 yılında ülkemizde çimento sektörü, özel sektör girişimi ile başlamıştır.

1919-1922'de Türkiye'nin ilk çok katlı betonarme yapısı Mimar Kemalettin Bey tarafından yapılan İstanbul Laleli'deki *Harikzadegan Apartmanları*'dır (Tayyare). 4 adet olan bu yapı aynı zamanda ilk toplu konut özelliği taşımaktadır (Şekil 2.29).



Şekil 2.29 Tayyare Apartmanı, dış görünüş ve iç avludan merdivenlere bakış [64].

1925'de ilk betonarme köprü (açıklık 75 m) Menderes nehri üzerinde inşa edilmiştir.

1930-1936'de Çubuk Çayı (Ankara) üzerinde, 25 m yüksekliğe sahip Çubuk I beton ağırlık barajı inşa edilmiştir.

1949 yılında Türkiye'de ilk betonarme kabuk *Şişli cami* kubbesi (İstanbul) tamamlanmıştır (Şekil 2.30).



Şekil 2.30 Şişli cami (İstanbul) [65].

Beton ilk yıllarda ülkemizde yaygın kullanılmamasına rağmen daha sonraki yıllarda en çok kullanılan yapı malzemesi olmuştur. Bu bağlamda değerlendirilecek olursa, Türkiye’de beton kullanımı **1950** sonrası yaygınlaşmaya başlamıştır.

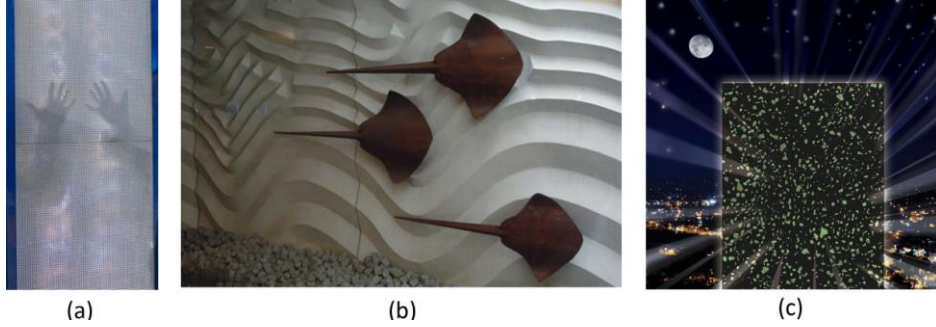
1976 yılında devlet desteği ile, İSTAŞ tarafından ilk hazır beton santrali kurulmuştur.

1987’de Türkiye’deki ilk yüksek bina (tüp sistem) *Mertim Binası* (Mersin, 52 kat, 176.8 m) inşa edilmiştir (Şekil 2.31).



Şekil 2.31 Mertim binası (Mersin) [66].

1987’de Fibrobeton firması tarafından ilk cam lifli beton harcı dökülmüştür. Firmanın fibro-transbeton, fibro-reflexbeton ve fibrobeton-multiform gibi yenilikçi uygulamaları vardır (Şekil 2.32).



Şekil 2.32 Fibrobeton yenilikçi ürünleri (a) fibro-transbeton, (b) fibro-reflexbeton ve (c) fibrobeton-multiform [67].

1988 yılında Türkiye Hazır Beton Birliği¹ kurulmuştur.

¹ Türkiye’de hazır beton sektörü, 2012 verilerine göre 90 milyon m³’e yaklaşan üretim rakamlarını yakalamıştır [227]

1989-2007 yılları arasında Yapı Merkezi Grup tarafından çok yüksek dayanımlı beton projesi kapsamında 10 cm'lik küpler ile 170 MPa (**1994**), 190 MPa (**2006**), 240 MPa (**2007**) basınç dayanım düzeylerine ulaşılmıştır.

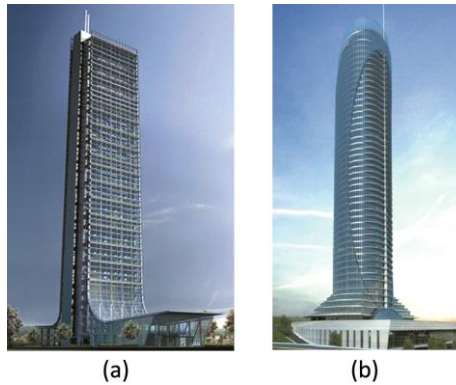
2005 yılında reaktif pudra beton üzerine, Mehmet Ali Taşdemir tarafından yürütülen İTÜ-İston firması ortak araştırma çalışmasında, 10 cm küpler kullanılarak 200°C kür sıcaklığında 350 MPa basınç dayanımı elde edilmiş, bu kapsamda yağmur suyu ızgarası ve rögar kapağı üretilmiştir. Taksim-Elmadağ'da deneme amaçlı olarak yağmur suyu ızgara takımları yerleştirilmiştir. **2007** yılında da Yapı Merkezi AR-GE Bölümü yine reaktif pudra beton konusunda 300 MPa değerine ulaşmıştır.

2000'li yıllarda Türkiye'de kendiliğinden yerleşen beton kullanılmaya başlanılmıştır¹.

2009'dan itibaren Türkiye, Avrupa'da en fazla beton üretimi yapan ülke haline gelmiştir.

2010'da yüksekliği 261.3 m (64 kat) olan Türkiye'nin en yüksek yapısı *Sapphire* (Levent, İstanbul) inşa edilmiştir. Beton sınıfı, temelde C60/75, üst yapıda C50/60'dır (Şekil 2.33 a). Ancak Diamond of İstanbul (Maslak) çelik çerçeve+betonarme çekirdek sistemi ile tamamlandığında, Türkiye'nin en yüksek binası olacaktır (270 m yükseklik).

2014 yılında açılması düşünülen Türkiye'deki en yüksek beton dayanımlı *Spine Tower* Binası'da (Maslak, İstanbul, 47 kat, 201 m yükseklik) kendiliğinden yerleşen C80 kullanılmıştır (Şekil 2.33 b).



Şekil 2.33 (a) Sapphire (Levent, İstanbul), (b) Spine Tower (Maslak, İstanbul) [68-69].

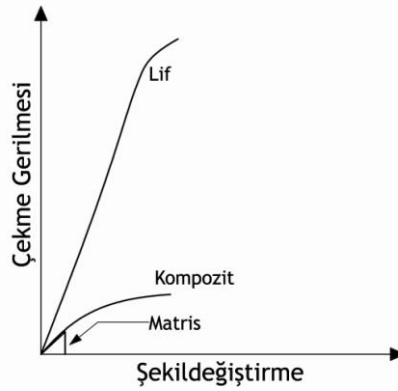
¹ Prof. Dr. M. Hulusi Özkul tarafından çalışmaları yapılmıştır.

2.3 Lifli Beton Teknolojileri

2.3.1 Genel

Beton, günümüzün işlevsel ve çok yönlü yapı malzemesidir. Düşük çekme, kayma, yorulma dayanımı nedeni ile betonun, çekmeye çalışan malzemeler ile (donatı, lif) takviye edilmesi, diğer bir deyişle kompozit çalışması zorunludur. Betonarme yapılarda klasik biçimde donatı ile kullanımın dışında; 1960'lardan itibaren betona lif eklenmesi ve mekanik büyüklüklerdeki değişimin incelenmesi, daha az ve daha ince çatlaklı, depreme karşı daha sünek yapı elemanlarının geliştirilmesi üzerinde çalışılmaktadır.

Lifler¹; en basit anlamda, uygulamadaki kuruma rötresi çatlaklarını azaltmak (polipropilen lifler vb.) veya daha akademik kullanımı ile süneklik ihtiyacı (çelik lif, PVA lif ve daha az sünek cam lif) cevap vermektedir. Lifler, oluşan çatlaklar üzerinden köprü görevi üstlenerek çatlağın büyümesini engellerken; aynı zamanda betonun çekme dayanımını, enerji yutma ve şekildeğiştirme kapasitesini arttırmaktadır (Şekil 2.34) [70-80].



Şekil 2.34 Lif, matris ve kompozitin çekme gerilmesi- şekildeğiştirme değişimleri [80].

Lif donatılı betonun etkinliği; çekme dayanımı, elastisite modülü, boy/çap (l/d) oranı², yönelimi, geometrik biçim (düz, kancalı vb), kullanım oranı (dozaj) ve kimyasallara olan

¹ Lifler, doğal (saman, deniz kavgısı vb.) veya yapay, asırlardır gevrek yapı malzemelerinin (çeşitli harçlar vb.) takviyesinde kullanılmıştır.

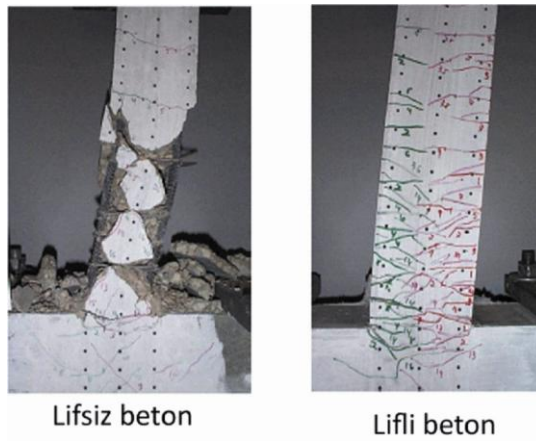
² Lifte boy/çap oranı, göçme durumları açısından önemlidir;

$$L_{cr} = 2\sigma_{fu}A/\rho\tau \quad (\sigma_{fu}=\text{lif çekme dayanımı}, \tau=\text{ortalama aderans dayanımı}, L_{cr}=\text{kritik lif boyu [70], [80].}$$

o 1.durum ($L \leq L_{cr}$) :Lif boyu çok azalır, lif, ara yüzeyden life aktarılan büyük kayma gerilmelerini taşıyamaz ve lif, çekme dayanımına ulaşmadan betondan sıyrılır.

dayanımına bağlıdır (genellikle $l=76$ mm, $d=1000$ μm 'yi geçmez). Lif ilavesi, betona aşağıdaki özellikleri sağlamaktadır: [81].

1. Çekme dayanımını arttırıp, plastik rötrede kaynaklanacak kılcal rötre çatlaklarını azaltır.
2. Çekme, eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesini arttırır.
3. Çatlak genişliğini azaltır, beton bütünlüğünü korur (şekil 2.35).
4. İşçilik ve zamandan tasarruf sağlar.
5. Betonun donma-çözölmeye karşı dayanımını arttırır.
6. Aşınma dayanımını arttırır, tozmayı engeller.
7. Kalıp sökümü sırasında yaşanan kırılmaları azaltır.



Şekil 2.35 Lifli ve lifsiz kolonda tersinir yükler altında çatlak oluşumu [179].

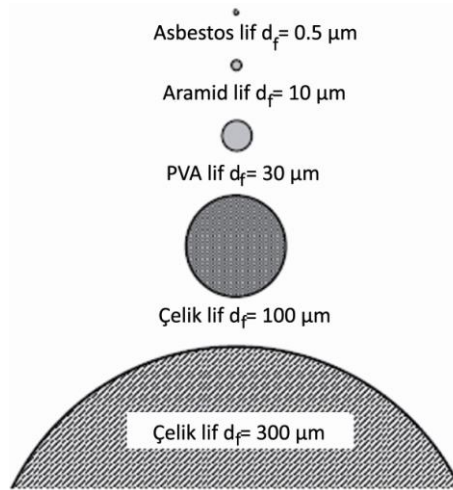
2.3.2 Lif Tipleri ve Betonda Kullanımı

Beton içerisinde kullanılan lifler; çelik, plastik, mineral ve doğal bazlı lifler olarak sınıflandırılır (Şekil 2.36). Günümüzde; betona çelik, cam, polipropilen (PP), polietilen (PE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polyester, poliakrilonitril (PAN), polivinil alkol (PVA), naylon ve organik selülozik lifler eklenmektedir (Çizelge 2.1), (Şekil 2.37). Günümüzde sıklıkla kullanılan lifler aşağıda temel özellikleri ile tanıtılmıştır. Elastisite modülü ve şekil değiştirme kapasitesi yüksek olan I.grup malzemeler, eğilme dayanımı

o 2.durum ($L > L_{cr}$) :Aderans kaybı oluşmaz, lifte lineer olmayan şekildeğştirmeler meydana gelir ve lifin göçmesi (kopma) lifin çekme dayanımına ulaşması ile meydana gelir.

İnşaat mühendisliğinde yapıda sünek davranış istendiğinden 2.durumun oluşması istenir.

yanında, özellikle orta ve yüksek süneklik ihtiyacının olduğu beton üretimlerinde kullanılmaktadır. II.grup malzemeler ise *plastik* grubu olup, daha yüksek uzama kapasitelerine karşılık düşük elastisite modülleri nedeni ile, eğilme dayanımı ve sünekliğin önemli olduğu beton uygulamalarında genellikle kullanılamaz (HDPE istisnadır, bazı kullanımları mevcuttur). Endüstriyel uygulamalardan geri kazanılmış plastik liflerin, dayanımın çok önemli olmadığı durumlarda çok ince ve iri agrega olarak kullanımı mevcuttur [81-87].



Şekil 2.36 Lif büyüklüklerinin karşılaştırılması [87].



Şekil 2.37 Lifler [91-101].

Çizelge 2.1 Çimento kompozit için takviye liflerin özellikleri [87-90], [122], [209-218], [237-261].

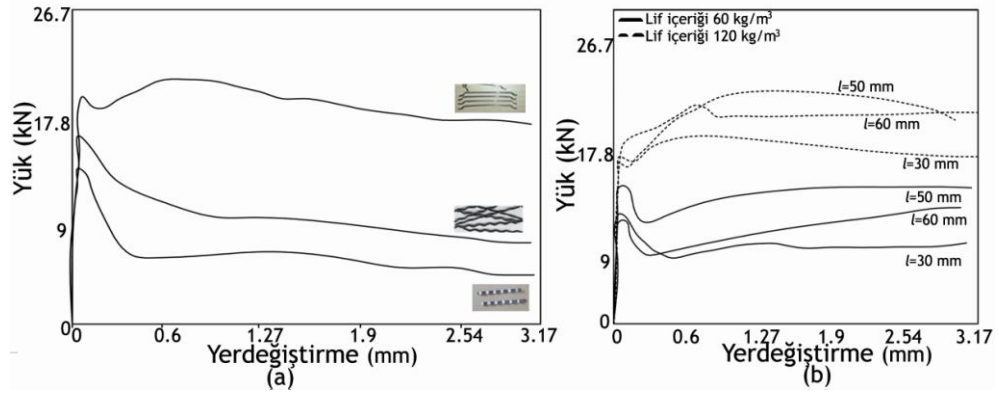
Tür	Lif boyu mm	Lif çapı μm	Boy/çap oranı l/d	Çekme dayanımı MPa	Elastisite modülü GPa	Lif uzaması %	Yoğunluk g/cm^3
Çelik lif	12.5-60	5-500	31-80	345 - 2000	200	3-4	7.84
AR cam lif	12-36	8-20	428-1800	1700-2500	70-80	2.4-3.6	2.68-2.78
Bazalt lif	3-100	9-23	230-5000	4150- 4840	70-120	3.15	2.80
PVA lif	6-24	39-100	150-307	1100 -1631	25 - 42.8	6 - 10	1.30
HDPE lif	6.4	8-38	168-800	2800	120	5	0.93-0.97
Nylon 6.6 lif	6	26	230	82-90	2.32-3.58	3-90	1.14
Nylon lif	6-32	23-400	260-640	750-1000	4.10-5.20	10-35	0.91-1.16
PE lif	6-12	25-1000	≥ 100	80-300	5	3	0.92-0.97
PP lif	12-50	20-760	65-400	300-900	3.50-13.40	8-22	0.9-0.95
PAN lif	6	12.7-57	105-472	295-826	8	10-25	1.18
Polyester lif	3-50	10-25	>300	896-1100	17.50	≥ 15	1.34-1.4

• Çelik Lif

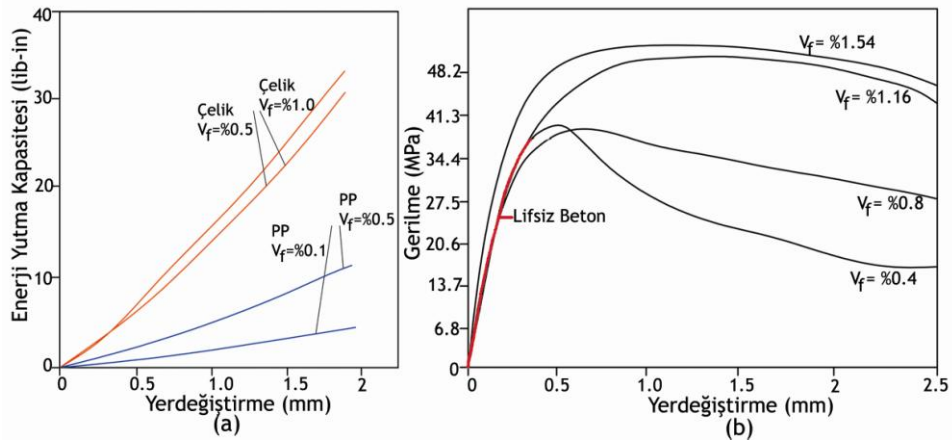
Çelik lifler; farklı biçimlerde ve genellikle daire enkesitlidir (Şekil 2.38). Lifin geometrisi, sünekliği doğrudan etkilemektedir, daha uzun ve kancalı tipteki çelik liflerin performansı daha iyidir (Şekil 2.39). Çelik lifler; yüksek çekme, eğilme dayanımı, elastisite modülü ve şekildeğiştirme kapasitesi ile kompozitin enerji yutma kapasitesini iyileştirmektedir (Şekil 2.40). Yüksek elastisite modülü nedeni ile plastik liflerden (örneğin PP) çok daha fazla enerji yutma kapasitesine sahiptir.



Şekil 2.38 Çelik lif tipleri [101].

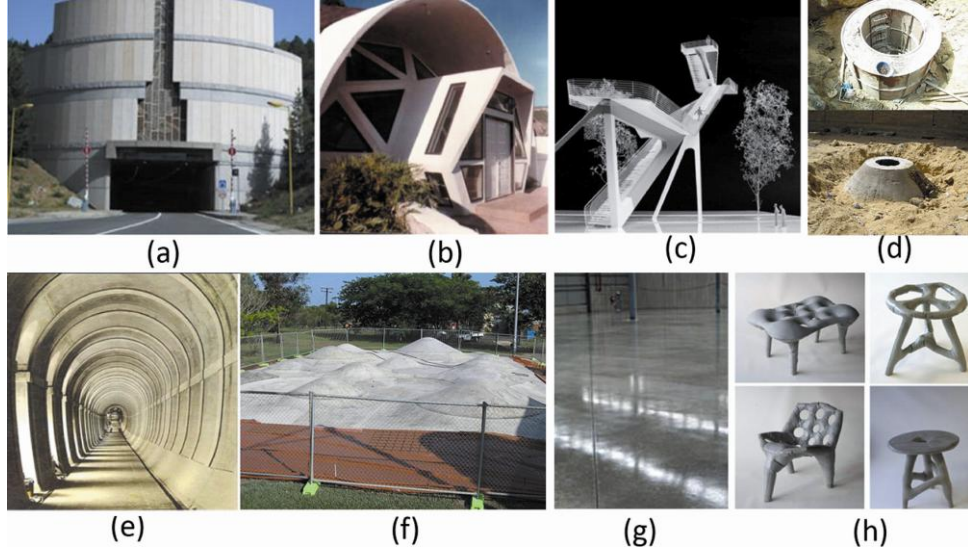


Şekil 2.39 Çelik lifli numunede eğilme altında yük-yerdeğiştirme değişimi, (a) Formun, yük taşıma kapasitesine etkisi, (b) Lif uzunluğu ve miktarının etkisi [81], [102-103].



Şekil 2.40 (a) Enerji yutma kapasitesi-yerdeğiştirme değişimi (b) Çelik lif yüzdesinin basınç dayanımına etkisi [80].

Çelik lifler; depreme dayanıklı yapıların inşasında, kolon-kiriş birleşim bölgesi, şev stabilitesi temini, yol kaplamaları, beton borular ve altyapılar, endüstri yapılarının döşemeleri, havaalanı ve liman kaplamaları, püskürtme beton uygulamaları, ince kabuk yapılar, çok yüksek dayanımlı betonlar, büyük sıcaklık farklarına maruz yapılar, patlamaya karşı dayanıklı yapılar ve dekoratif elemanlarda kullanılmaktadır (Şekil 2.41).

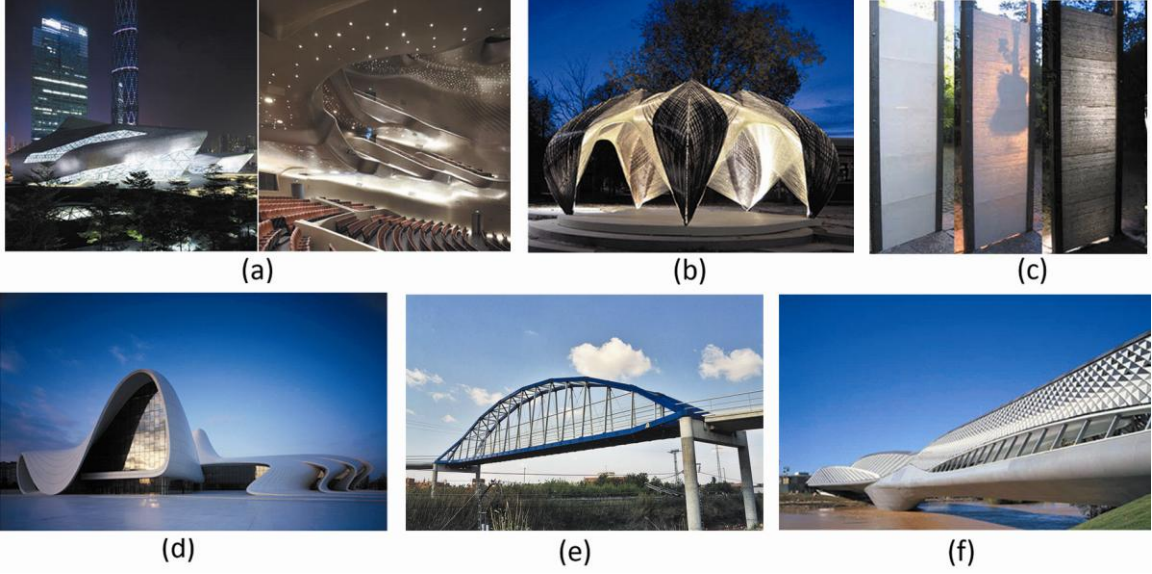


Şekil 2.41 Çelik lif kullanım örnekleri; (a) Puymorens tüneli (Fransa), (b) toprak örtülü jeodetik kubbe (Montana), (c) gözlem kulesi (Hollanda), (d) alt yapı kullanımı, (e) Brunel Thames tüneli (Londra), (f) paten parkı, (g) endüstri yapılarının döşemeleri, (h) dekoratif mobilya [104-111].

• Cam Lif

Cam lifler ortalama düzeyde süneklilik ihtiyacına cevap vermektedir. Çevre kirliliği oluşturmayan, korozyona dayanıklı, hafif, yalıtkan, ses ve ısı izolasyonu sağlayan ancak alkali ortamda zaman içerisinde mekanik büyüklükleri azalan bir malzemedir; yüksek ergime sıcaklığı ($\sim 1100^{\circ}\text{C}$) nedeni ile yangın dayanımlı bir malzemedir. Betondaki alkali ortam, özellikle $\text{Ca}(\text{OH})_2$, E tipi cam lifleri yok ettiği için (alkali çürümesi), 1980'lerde %16-19.5 Zirkonyum eklenmiş AR (Alkali Resistant) tipi cam lif geliştirilmiştir [80].

Çelik donatıya kıyasla daha düşük elastisite modülüne karşılık, üç kat daha hafif ama benzer çekme dayanımlıdır. Cam lifler; inşaat mühendisliğinin giydirmeye cephe elemanlarında yaygın kullanılmaktadır. Epoksi ile çekilen cam lifli donatılar/kablolar, az katlı veya geniş açıklıklı betonarme/öngermeli beton yapılarda (örnek: köprüler), korozyona karşı çelik donatıya alternatiftir. Epoksi ile çekilmiş kılıflar (GFRP) kolon güçlendirmesi amaçlı kullanılmaktadır. Ayrıca, inşaat müh. dışında da cam liflerin yaygın bir kullanım alanı vardır (tekne tasarımı, oyun parkları, tarım elemanları, yangın koruma sistemi bağlantı kutusu vb.) (Şekil 2. 42).

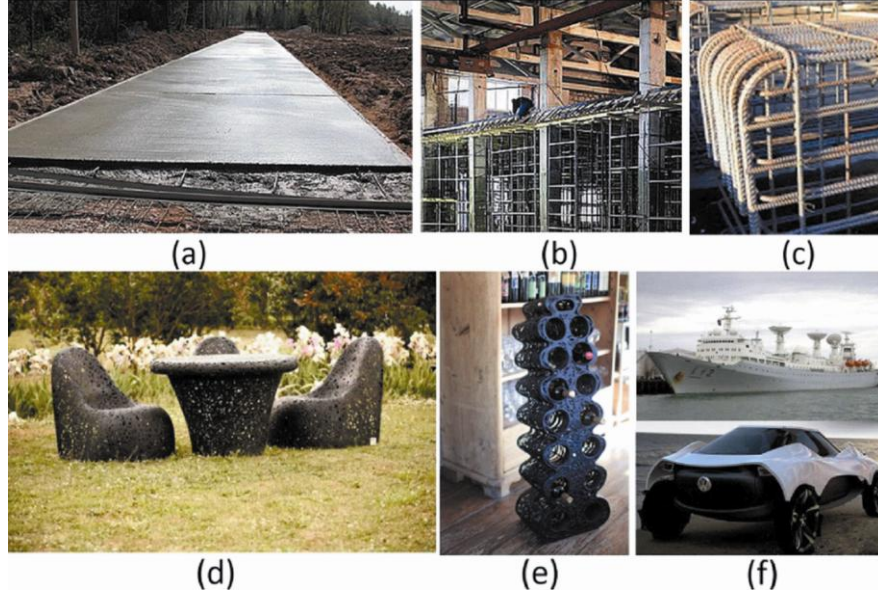


Şekil 2.42 Cam lif kullanım örnekleri (a) Guangzhou Opera Binası (Çin), (b) Research Pavilion (Stuttgart), (c) Bölücü şeffaf duvar¹, (d) Heydar Aliyev Kültür Merkezi (Azerbaycan), (e) Lleida Pedestrian köprüsü (İspanya), (f) Zaragoza Köprü Pavyonu (İspanya) [112-116].

- **Bazalt Lif**

Bazalt lifler, bazalt kayacın yüksek sıcaklıkta ergitilmesi ile elde edilmektedir. Cam life kıyasla çekme dayanımı daha yüksek ama diğer yönleri ile benzer özellikte bir malzemedir, zirkonyum uygulanmamış cam liflere kıyasla (E) alkali dayanımı ise doğal olarak yüksektir. Bazalt lif; cam lif gibi, ortalama düzeyde süneklik ve şekil değiştirme istenen uygulamalarda kullanılır. İnşaat mühendisliği alanında, cam life benzer kullanım alanı sözkonusudur. Kolon ve kiriş güçlendirmesi için epoksi ile kumaş biçiminde örülmektedir (BFRP) veya donatı olarak çekilmektedir (BFRP bar). Ayrıca, başta otomotiv sektörü olmak üzere havacılık, savunma sanayi, denizcilik vb. birçok sektörde de kullanılmaktadır (Şekil 2.43) [117].

¹ Optik özelliğe sahip cam elyaf, ışığı beton içerisinden geçmesini sağlamaktadır ve betonu transparan hale getirmektedir.



Şekil 2.43 Bazalt lif kullanım örnekleri (a) yol yapımında, (b) restorasyon uygulamasında güçlendirme, (c) betonarme donatı, (d) peyzaj öğesi (bahçe mobilyası), (e) iç mekan dekoratif ürün, (f) araba aksesuar ve gemilerde [118-120].

- **Polivinil alkol (PVA) Lif**

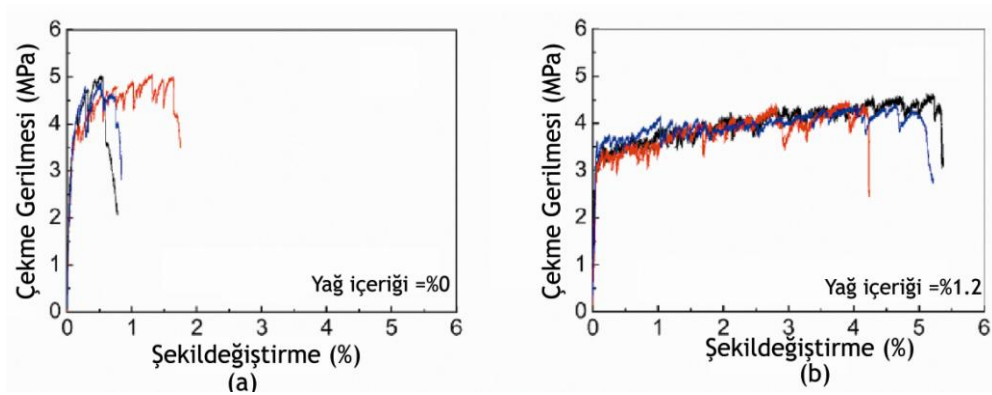
PVA lifler; 1939'da Dr. Sakurada tarafından, Kyoto İmparatorluk Üniversitesi'nde, vinil asetat moleküllerin polimerizasyon ve ardından da hidroliz işlemlerine tabi tutulmasıyla üretilmiştir. Kuraray şirketinin 1950 yılında seri üretimini başlatmasıyla, Japonya'nın ilk organik lifleri olarak endüstrinin hizmetine sunulmuş; yaygın olarak endüstride, tarımda, balıkçılıkta kullanılmıştır, dünya çapında uygulamaları gittikçe artmaktadır.

PVA liflerin yüksek dayanımı ve yüksek şekil değiştirme kapasitesi söz konusudur. PVA lifler ile matris arasında çok güçlü bir kimyasal aderans oluşur¹. Ancak bu güçlü kimyasal aderans, lifin büyük şekil değiştirme yapmasına izin vermez ve lifin kapasitesinden tam olarak yararlanamama tehlikesi mevcuttur. Aderansın belirli ölçüde azaltılması için, lif yüzeyinin yağ ile kaplanması (optimum % 1.2) bir çözümdür (Li, Kim, Yang, Sahmaran ve Lepech'in yaptığı deneyler buna örnektir) (Şekil 2. 44). Son yıllarda

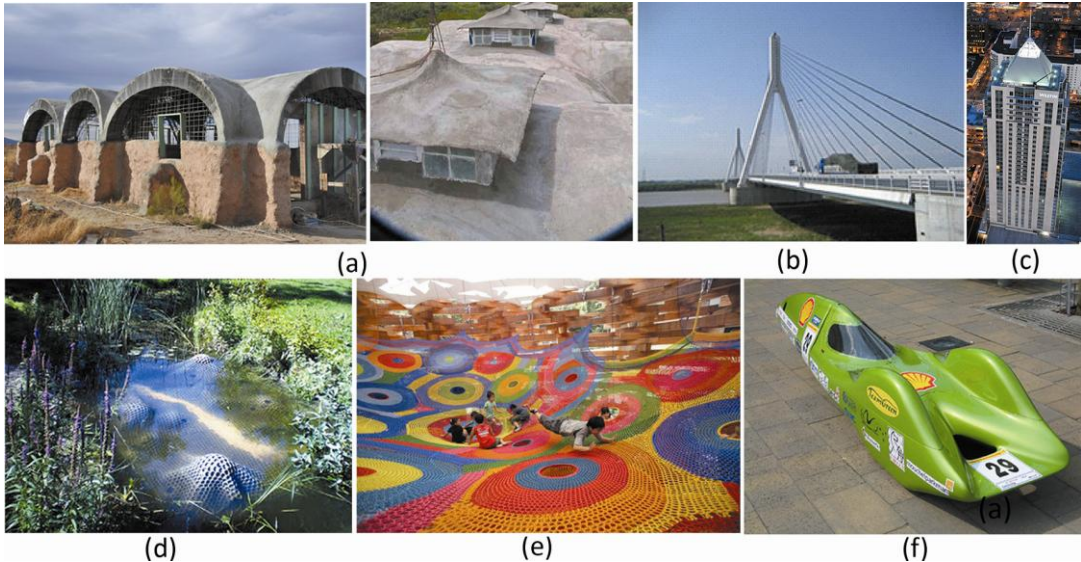
¹ PVA, moleküler zincirlerinde OH⁻ içerir. Ara yüzeydeki Ca(OH)₂'in lif yüzeyini yiyerek tabakalı hale getirmesi ve OH⁻ iyonlarının da etkisiyle matris ile PVA lif arasında çok güçlü bir kimyasal aderans oluşur. Bu nedenle % 4 oranında kullanılsa bile, PVA lif çok küçük şekil değiştirme düzeylerinde (%0.5-1) tabakalanarak kopmaktadır, bir PVA lifin çekme testinde kırılma enerjisi 3-5 J/m² düzeyindedir (örneğin PP liflerde bu değer 0'dır, yani kimyasal aderans yoktur).

mineral katkıların kullanımı veya matrisin zayıflatılması [121] diğer çözümler olarak ortaya çıkmıştır. PVA için yapılan araştırmada işlenebilir l/d oranının 300 olduğu belirlenmiştir [122]. PVA lifler; yüksek süneklik, alkaliye karşı direnç ve yüksek çekme dayanımından dolayı sünekliği arttırılmış lifli çimentolu kompozitler (ECC) için de iyi bir alternatiftir [123].

PVA lifler endüstriyel uygulamaların dışında; inşaat mühendisliği alanında da özellikle sünekliğin gerektiği uygulamalarda (çekirdek bağ kirişi tasarımı, tünel kaplaması, köprü derzleri, endüstriyel zemin, yol yapımı, lifli çimentolu çatı örtüleri (ince tip, RM182) ile çatı ve duvar kaplamalarında (REC15) kullanılmaktadır (Şekil 2.45).



Şekil 2.44 Lifin yağ ile kaplanmasının çekme gerilmesi-şekildeğiştirmeye etkisi (a) %0 yağ içeriği, (b) %1.2 yağ içeriği [122].



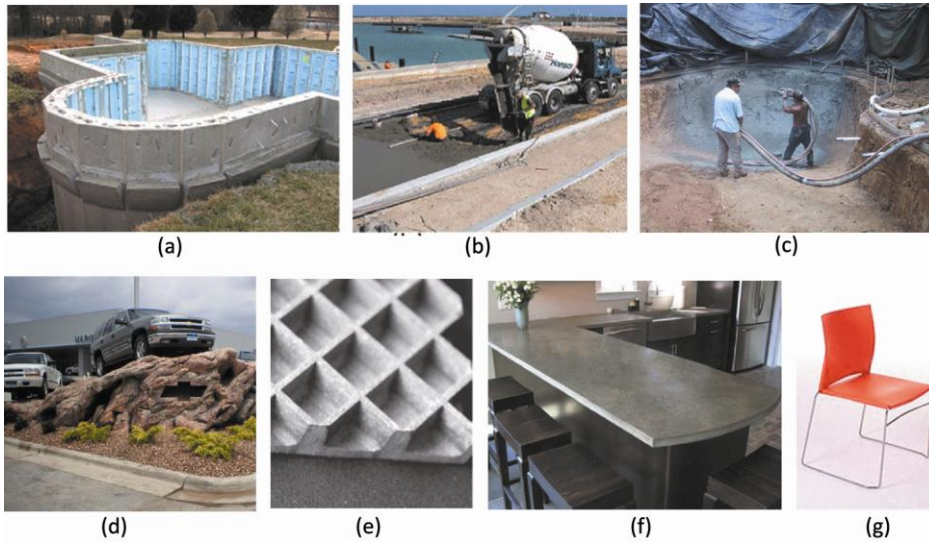
Şekil 2.45 PVA lif kullanım örnekleri (a) çatı örtüsü, (b) Mihara köprüsü, (c) Westin Luxury Otel-Residans cephesi (A.B.D), (d) peyzaj elemanı, (e) el ile örülmüş oyun alanı, (f) yarış arabası [124-130].

- **Polipropilen (PP) Lif**

1965’de Goldfein tarafından önerilen [131] PP lifler, ortalama çekme dayanımlı, alkaliye ortama dirençli, rötre çatlakların oluşumunu engelleyen uygun fiyatlı ürünlerdir. Ayrıca yüzeyindeki su itme özelliği nedeni ile, çimento bazlı matris içinde ıslanarak topaklanmadığından dolayı da tercih edilmektedir. PP liflerde kimyasal aderans yoktur ve sürtünme aderansı kırılmayı yönetir.

PP lifler, mikro ve makro lifler olarak ayrılır. Mikro lifler, özellikle erken dönemde oluşan kılcal çatlaklarda etkilidir (1m^3 'te 0.60 kg-0.90 kg). Makro liflerin yoğunluğu ise daha fazla olup, 1.8 kg/m^3 dozunda betona uygulanır. Özellikle rötre çatlaklarında, çelik liflere ekonomik alternatif olarak kullanılır, korozyon riski yoktur [132].

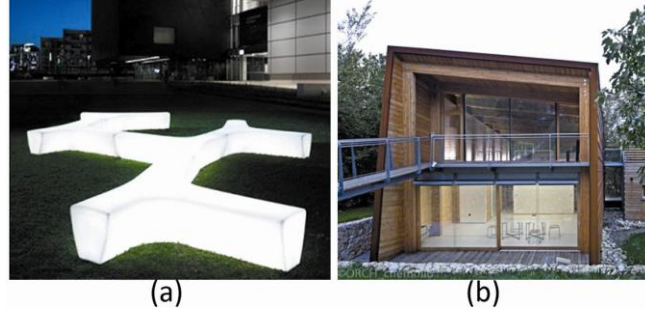
Garaj yer kaplaması, endüstriyel zemin betonu, ön üretimli eleman, tamir ve dolgu harcı, kaba ve ince sıva, yerden ısıtma ve koruma şapı, ambar ve depo alanları taşıyıcı sistem (kolon, kiriş) betonu, püskürtme beton uygulamaları (tünel, şev, suni kaya vb.), anti bakteriyel beton üretimi, kütle ve diyafram betonu ile radye temel uygulamalarında kullanılmaktadır (Şekil 2.46) [131].



Şekil 2.46 PP lif kullanım örnekleri (a) bodrum kat ve temel yapımı, (b) asfalt yapımı, (c) yüzme havuzu (Germantown), (d) Marine Chevrolet suni kaya (Jacksonville), (e) duvar paneli, (f) mutfak tezgahı, (g) dekoratif eleman [133-138].

- **Polietilen (PE) Lif**

Polietilen (PE) lif, rötre ve yorulma dayanımını iyileştirir, kimyasal aderans olmayıp sürtünme aderansı kırılmayı yönetir. PE lifler, ses ve ısı yalıtımı ve enerji tasarrufu sağlamaktadır(şekil 2.47). PET lifli yalıtım malzemesi kullanılan beton ile inşa edilen yapılardaki ısıtma ve soğutmak için harcanan enerji, normal beton ile inşa edilen yapılara kıyasla % 8 daha azdır [139].



şekil 2.47 PE lif kullanım örnekleri (a) kent mobilyası (A.B.D), (b) TVZEB Zero enerji binası (PE lif dolgulu yalıtım paneli) [140-141].

- **Yüksek Moleküler Ağırlıklı PE (HDPE) Lif**

1950'lerde Ruhrchemie tarafından geliştirilen HDPE'nin; yüksek aşınma dayanımı, kimyasal dayanım, kopma dayanımı ve yüksek alkali dayanımı vardır [142]; ancak yüksek maliyeti, kullanımını sınırlamaktadır.

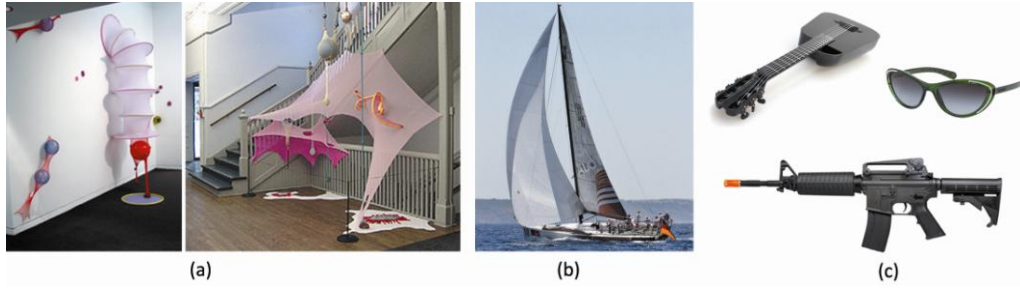
Silo hatları, borular, medikal ve spor ürünleri, dağ bisikletleri, seramikler, dağcılık (tırmanış) elemanları, balık oltaları, gıda sektörü, yüksek performanslı yelkenler, zırhlı araçlar ve askeri alanda] kullanılmaktadır (şekil 2.48) [143-144].



şekil 2.48 HDPE lif kullanım örnekleri (yelken, zırh ve eldiven) [145-147].

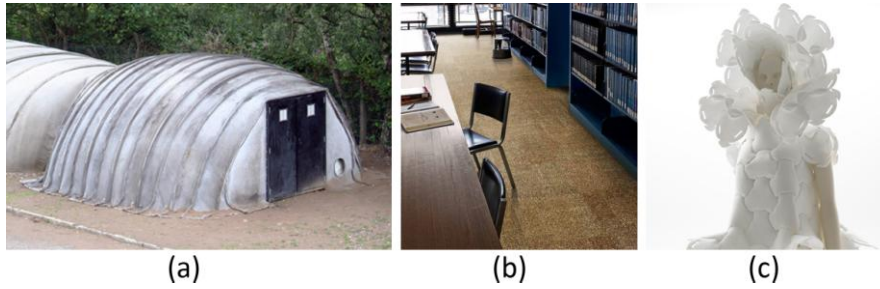
- **Naylon Lif**

1939'da Du Pont tarafından doğrusal poliamid tipi plastiklere verilmiş genel bir isimdir. Beton için geliştirilmiş, **naylon 6** ve **naylon 6.6** olmak üzere iki tip naylon lif bulunmaktadır. Naylon liflerin elastisite modülleri düşüktür; betonda eğilme dayanımı, dayanıklılığı ve tokluğu bir ölçüde arttırmak için kullanılmaktadır [148-151]. Kimyasal etkilere dirençli, alkali dayanımlı olup, yüksek uzama kapasitesi ve mükemmel aşınma dayanımı vardır. Ergime sıcaklığı $\sim 260^{\circ}\text{C}$ 'dir (Şekil 2.49).



Şekil 2.49 Naylon lif kullanım örnekleri (a) Taiyo Kogyo membran (Osaka), (b) gitar, gözlük, silah [152-154].

Naylon 6.6 lifin aşınmaya karşı direnci ve kendinden yağlı olma özelliği vardır. Otomotiv endüstrisi, ticari naylon ürünler ve betonda kullanılmaktadır [155] (Şekil 2.50).



Şekil 2.50 Naylon 6.6 lif kullanım örnekleri (a) beton canvas barınak, (b) modüler halı, (c) heykel [156-158].

- **Poliakrilonitril (PAN) Lif**

Poliakrilonitril (PAN) lif, 1945 yılında fiber adı ile filament halinde piyasaya sürülmüştür. PAN liflerin gelecekte kullanım alanının genişlemesi düşünüldüğü için, firmalar üretimi hakkında bilgi vermemektedir. Yüksek çekme dayanımlı, hafif bir malzemedir; aşınma dayanımı, tokluk ve rötre çatlakları için kullanılır.

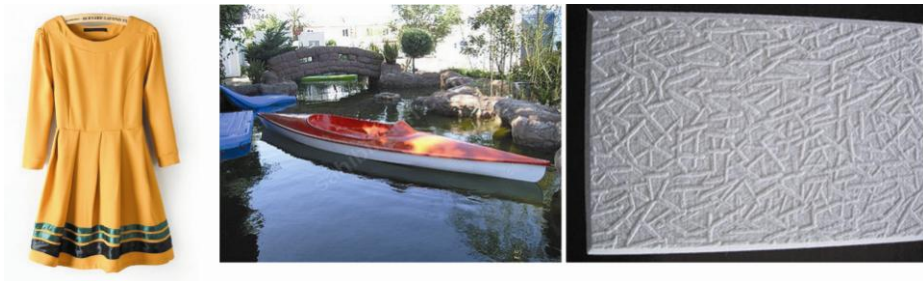
PAN lifler ayrıca; uzay aracı, uçak, gemi, motor, tekstil ve çok dayanıklı olması gereken diğer yüzeylerde kullanılmaktadır (Şekil 2.51) [159].



Şekil 2.51 PAN lif kullanım örnekleri (a) akrilik lif bağlayıcılı Alsecco püskürtme granit, (b) sandalye [160-161].

- **Polyester Lif**

Polyester lifler, diğer plastik grubu liflere göre daha yüksek elastisite modülü ile daha iyi süneklilik sağlamaktadır. Polyester liflerin üstünde silikon tabakası vardır ve bu tabaka lif ile matris arasında iyi bir aderans gelişmesini sağlar. Bu nedenle, polyester lifler kullanılmadan önce herhangi bir kimyasal uygulama gerektirmez. Polyester lifler hazır giyim, filtreler, yalıtım malzemesi ve betonda kullanılmaktadır (Şekil 2.52).

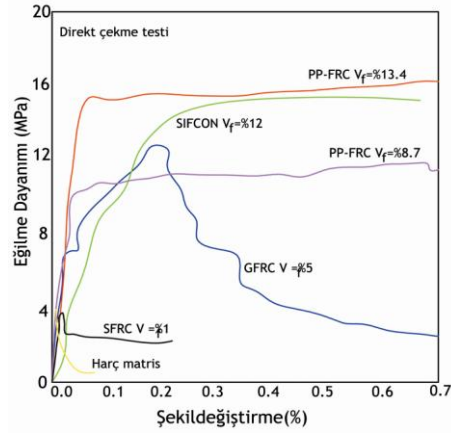


Şekil 2.52 Polyester lifin, giysi, tekne ve akustik panelde kullanımı [162-164].

2.3.3 Lifli Özel Beton Teknolojileri

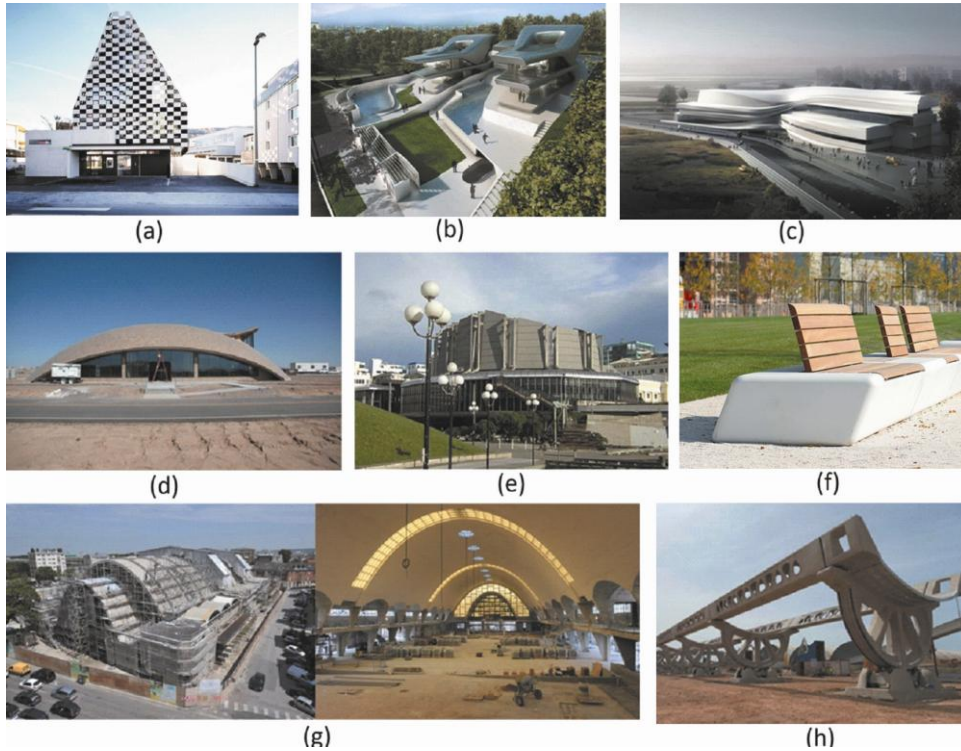
2.3.3.1 Genel

Lifin beton içerisine eklenmesi, betonun mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Lifli betonda, lifsiz betona kıyasla eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesi; kullanılan lifin mekanik büyüklükleri, dozajı, formu ve matris içindeki yönelimi ile çok değişken değerler alabilmektedir (Şekil 2.53) [165]. Çatlak direnci ve darbe dayanımı gibi malzeme özellikleri de enerji yutabilme kapasitesi (süneklilik) ile ilişkilidir.



Şekil 2.53 Çeşitli kompozitler için liflerin yüzdelere göre eğilme dayanımı-şekildeğiştirme değişimi [80].

Lif donatılı betonlar; döşeme betonlarında, püskürtme betonda, yerinde ve önüretimli eleman (kolon, kiriş, cephe elemanları vb.) üretiminde, beton borularda, beton yollarda, köprülerde, patlamaya dayanıklı yapı tasarımı ve balistik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Şekil 2. 54).



Şekil 2.54 Lif donatılı özel beton uygulama örnekleri; (a) BTV Branch Innsbruck ofis binası (Avusturya), (b) Yincuhan sanat müzesi (Çin), (c) Nassim villaları (Singapur), (d) Spaceport, Fire Station (Amerika), (e) Michael Fowler merkezi (Wellington), (f) kent mobilyası, (g) Boulingrin market (Fransa), (h) kollektör [166-173].

Beton teknolojisinde son yıllardaki gelişmeler; lifli, yüksek ve çok yüksek dayanımlı, yüksek performanslı özel betonların (GFRC, UHPC, RPC, ECC vb.) üretilmesine olanak sağlamıştır. Aşağıda son dönemde geliştirilen özel betonların (GFRC, SIFCON, UHPC, RPC) temel özellikleri ve uygulamaları özetlenecektir.

2.3.3.2 Cam Lifli Çimentolu Kompozit (GFRC)

Cam lifli çimentolu kompozit (GFRC), 1940'ların başından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik lifli betonun öncü uygulamalarından biridir. Çimento, silis kumu, su, süperakışkanlaştırıcı katkı, polimer ve cam lif içerir.

GFRC, mimari alanda ve inşaat sektöründe alt yapı ve üst yapı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.55). Bu konu ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 3.1'de daha ayrıntılı incelenecektir.



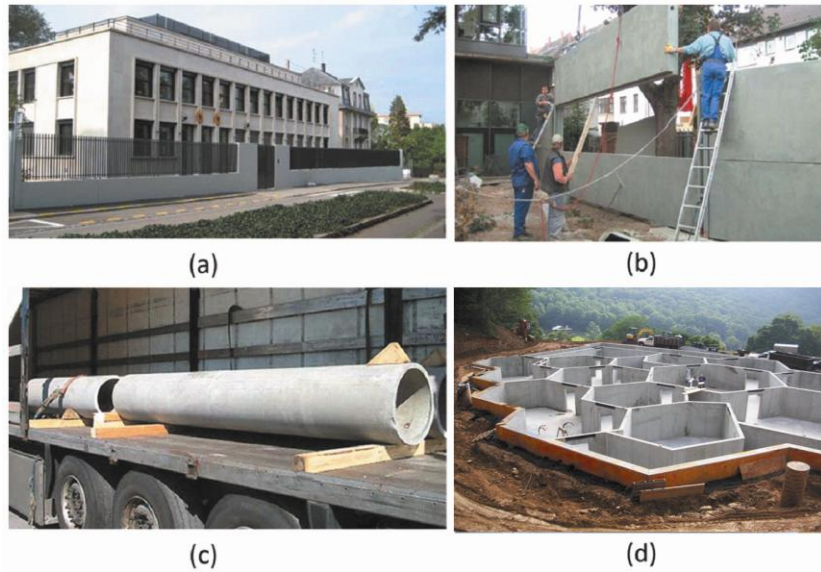
Şekil 2.55 Cam lifli çimentolu kompozit uygulama örnekleri (a) Metropolis Apartment (Danimarka), (b) Eurostar Book Otel (Almanya), (c) heykel formu ev [174-176].

2.3.3.3 Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lifli Beton (SIFCON)

SIFCON ilk kez ABD'de (1979) uygulanmıştır. Bu araştırmada, kalıba yüksek oranda çelik lifler yerleştirilerek elde edilen yoğun lif sistemine çimento bazlı harç enjekte edilmiştir. SIFCON, 1980'lerden beri birçok alanda başarıyla uygulanmıştır. Çimento, ince kum ve/veya uçucu kül-silis dumanı, çelik lif ve hiperakışkanlaştırıcı içerir. Çelik lif yüzdesi çok yüksek olup, %5'den %30'a (çelik, $l=30-60$ mm, $l/d= 60-100$) kadar değişebilmektedir, su/çimento oranı $\sim 0.30-0.45$, basınç dayanımı 190-210 MPa, elastisite modülü $\sim 14-25$ GPa düzeyindedir (Şekil 2.53'de SIFCON gerilme-şekildeğiştirme değişimi gösterilmiştir). Yüksek oranda çelik lif içermesinden dolayı

SIFCON, normal lif donatılı betonlardan çok daha fazla süneklilik ve dayanım göstermektedir [80], [177].

Balistik koruganlar yanında, yapı onarımı, köprü döşemeler, havaalanı asfaltları ve ileri düzeyde aşınma dayanımı gerektirecek yüzeylerde kullanılmaktadır (Şekil 2. 56) [80]. SIFCON betona kıyasla maliyet açısından daha uygundur ve ağır hasar görmüş öngermeli beton köprü kirişlerinin tamirinde daha kısa zamanda kullanıma hazır hale gelir (2 günde 48 MPa basınç dayanımı elde edilebilmektedir) [178], [180].

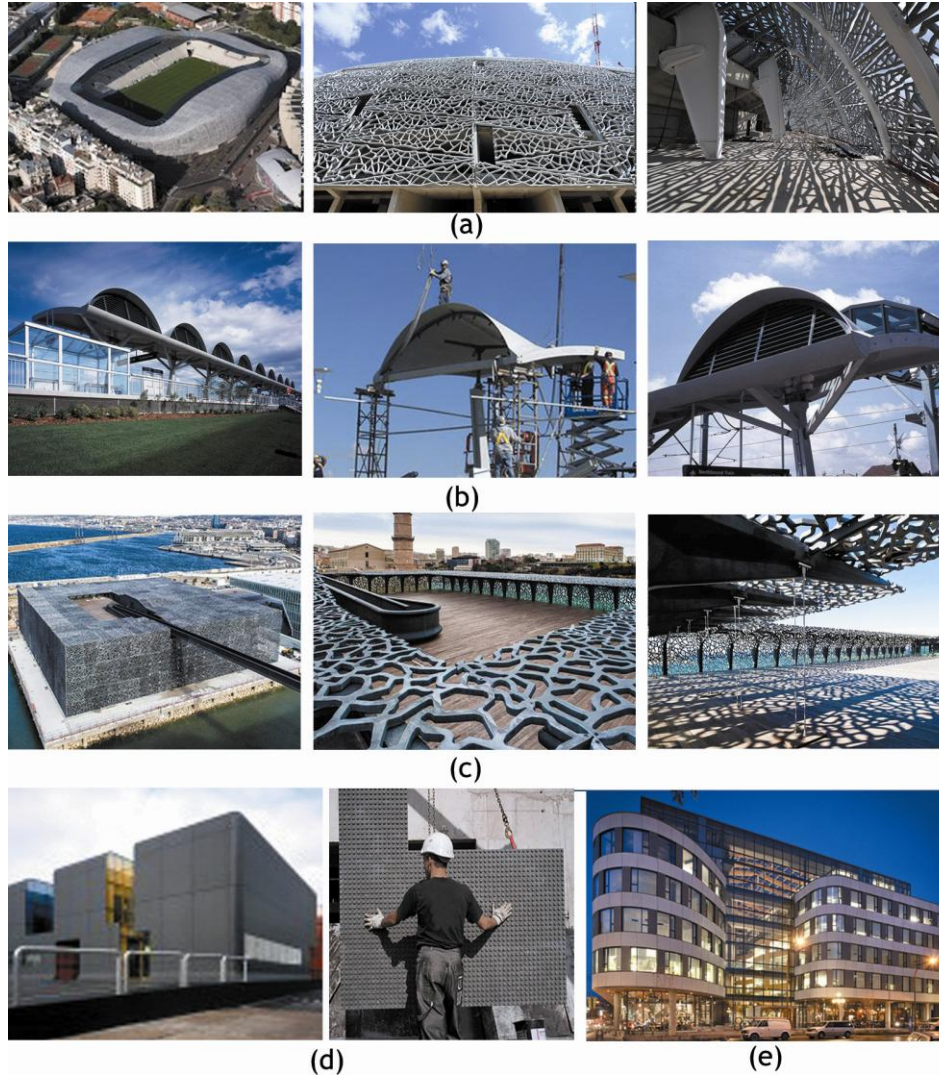


Şekil 2.56 Patlamaya dayanıklı SIFCON örnekleri, (a) konsolosluk binası, (b) prekast panel duvar, (c) Murrah Federal binası (Oklahoma) kolonu, (d) yer altı sığınağı [181-182].

2.3.3.4 Ultra Yüksek Performanslı Beton (UHPC)

UHPC, 1990'ların başında Fransa'da geliştirilmiştir. İlk köprü (yaya köprüsü) 1997'de Kanada'da inşa edilmiş, ilk standart 2002'de Fransa'da yayınlanmıştır, günümüze dek bir çok ülkede bu alanda araştırmalar devam etmektedir. Günümüzde UHPC'nin yapısal ve mimari eleman bazında geniş bir kullanım alanı mevcuttur (Şekil 2.57). Köprülerde, maliyet artışına karşılık, 100 yılın üzerinde dayanım ömrü öngörülmektedir. UHPC, 0.25'den daha düşük su/bağlayıcı madde oranı ve süreksiz mikro boşluklu yapısı, iri agregasız (sadece kum+mikro boyutta kum kullanılır), % 2.5 lif yüzdesi (genellikle çelik lif, özel durumlarda % 6'ya kadar), 140-200 MPa basınç dayanımı, 20-40 MPa eğilme dayanımı, 40-70 GPa elastisite modülü, yüksek yorulma dayanımı ve enerji yutma

kapasitesi ile normal ve yüksek performanslı betona kıyasla üstün bir etkinlik gösterir [183-189].



Şekil 2.57 UHPC örnekleri, (a) Jean-Bouin Stadı (Paris) yüzeyi (örgü), (b) Shawnessy Lrt istasyonu (Kanada) gölgelikleri, (c) Avrupa ve Akdeniz müzesi (MuCEM) dış yüzeyi (Fransa), (d) RATP otobüs merkezi (Fransa) lego dokulu UHPC cephe panelleri (e) Atrium ofis binası (Kanada) dış cephe panelleri [190-195].

UHPC; Danimarka, Fransa, Kanada, Japonya ve A.B.D.'de köprü kirişlerinin birleşim yerlerinde ve tabliyelerde sıklıkla kullanılmaktadır. 2008'de Jakway Park köprüsü (Iowa) yapımında UHPC kirişler kullanılmıştır (Şekil 2.58).



Şekil 2.58 UHPC ile Jakway Park Köprüsü ve köprü kirişi (Iowa) [196].

Geniş renk ve doku oluşturulabilen UHPC, dekoratif mobilya, peyzaj elemanı ve kent mobilyası olarak da kullanılmaktadır (Şekil 2.59).



Şekil 2.59 UHPC kullanım örnekleri, dekoratif mobilya, peyzaj elemanı, kent mobilyası [183].

2.3.3.5 Reaktif Pudra Beton (RPC)

Reaktif pudra beton (RPC), UHPC'nin devamı olarak, 1990 başlarında Paris Bouygues Laboratuvarlarında geliştirilmiştir. RPC, $\sim 0.15-0.25$ 'e kadar düşürülebilen su/çimento oranı, $\sim \% 15-30$ silis dumanı, ince öğütülmüş kuvars tozu, $\% 2-2.5$ çelik lif ($l=13$ mm, $d=150-300$ μm) içerir. Çok düşük su/çimento oranı ve basınç altında yerleştirilmesi ile ultra yüksek dayanım (800 MPa'a kadar), üstün fiziksel ve mekanik özellikler (normal betona kıyasla yaklaşık 300 kat daha fazla süneklik ve çok düşük geçirimsizlik) kazanır [197-199]. Küp basınç dayanımı 200-800 MPa, çekme dayanımı 25-150 MPa, kırılma enerjisi ~ 40000 J/m² ve birim ağırlığı 2500-3000 kg/m³ aralığında değişen yeni nesil betonları temsil etmektedir [200-201].

RPC; ince cidarlı yüksek basınç su ve buhar borularında, altyapıda rögar kapağı olarak [202], ince taşıyıcı paneller, tünel yapıları, yüksek dayanım ve dayanıklılık istenen projeler, deprem sonrası hasar görmüş yapılar, reaktörlerin kullanılmış yakıt çubuklarının depolanması ve balistik amaçlı korugan yapılarında kullanılmaktadır.

RPC'in ilk köprü uygulaması (1997) Kanada'da inşa edilen Sherbrooke köprüsüdür¹ ve halen güvenle kullanılmaktadır. Köprü 60 m uzunluğunda ve 3.3 m genişliğindedir; uzay kafes kiriş olarak tasarlanmış olup, her birinin boyu 10 m olan 6 adet ön üretimli elemanın montajı ile inşa edilmiştir (Şekil 2.60) [203].



Şekil 2.60 Sherbrooke köprüsü (Kanada) [204].

2002 yılında Seoul'de inşa edilen Seonyu yaya köprüsünde RPC kullanılmıştır. Köprü 120 m uzunluğunda ve 15 m yüksekliğindedir. Ön üretimli 6 parçadan oluşan köprünün tabliye kalınlığı 3 cm'dir (Şekil 2.61).



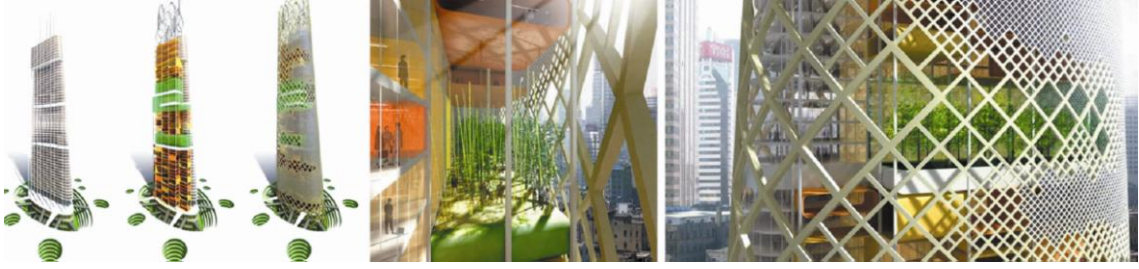
Şekil 2.61 Seonyu yaya köprüsü (Kore) [205-206].

Bir yarışma projesi için 246 m yükseklik ve min. sayıda iç kolonlu tasarlanan ancak uygulanmayan Hypergreen tower'ın (Paris)² diagrid sistem formunun, ön üretimli RPC

¹ 200 MPa basınç dayanımı mevcuttur; 40 MPa eğilme dayanımı ve 50 GPa'lık elastisite modülüne herhangi bir çelik donatı kullanılmadan erişmektedir. Diyagonal elemanların yük aktardığı alt kiriş 320x380 mm boyutlarında olup iki kirişin içinde öngerme donatıları yer almaktadır.

² Kendi enerjisini üretmek üzere 3000 m² fotovoltaik hücre+rüzgar türbinleri ve jeotermal ısı pompaları tasarlanan yapıda yağmur suyunun toplanarak yeşil alanlar için kullanımı sağlanmakta.

elemanlar ile sağlanması önerilmiştir (Bu bağlamda, ilk beton diagrid sistem uygulaması olacaktı) (şekil 2.62).



şekil 2.62 Hypergreen tower (Paris) [207].

Yves Saint Laurent, RPC'yi butiğin (Paris) iç mekan tasarımımda (sandalye, raf, bölücü eleman vb.) kullanmıştır (şekil 2.63).



şekil 2.63 Yves Saint Laurent butik (Paris) [208].

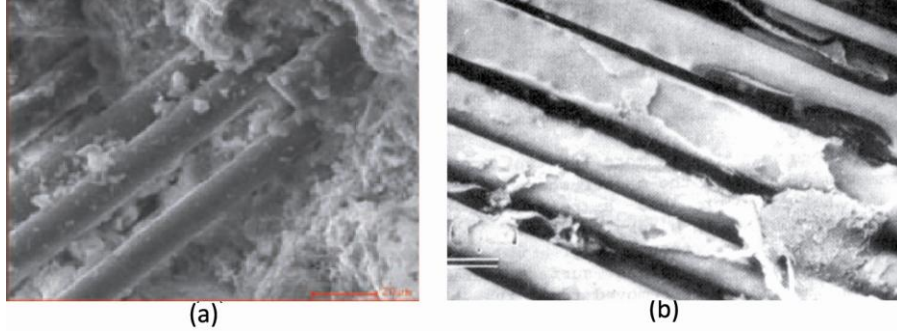
LİFLİ ÇİMENTOLU KOMPOZİTLER

Lifli çimentolu kompozitlerin modern anlamda kullanımı cam lifler ile başlamış olup (1980) [209], 1990 sonrası süneklilik ihtiyacı ile farklı lif tipleri ve karışım bileşenlerindeki değişimler ile önemli gelişme göstermiştir [210-214]. Bu nedenle öncelikle GFRC hakkında ayrıntılı bilgi verilecek, takiben günümüzün diğer önemli lif tipi olan PVA ile yapılan uygulamalar incelenecektir.

3.1 Cam Lifli Çimentolu Kompozitler (GFRC)

Cam lifli çimentolu kompozit (GFRC), ismini karışımın içerisine katılan cam liflerden almıştır. 1940'ların başında beton içerisinde soda kireçsilikat cam (A-alkali cam) ve borosilikat cam (E-elektrik dayanımlı) kullanılmıştır. Bu lifler çok yüksek çekme dayanımı (280-3500 MPa) ve yüksek elastisite modülüne ($\sim 64-72$ GPa) sahiptir; ancak kısa sürede yüksek alkali düzey ($\text{pH} \geq 12.5$), özellikle Ca(OH)_2 , nedeni ile liflerin yaşlandırma testlerinde beton içinde hızla yok olduğu görülmüştür.

Bu nedenle ilk olarak E cam lifler ağırlıkça (%7-10) lateks polimer ile kaplanarak, alkali dayanımı iyileştirilmeye ve yaşlandırma azaltılmaya çalışılmıştır (aynı koruma özelliği silis dumanı kullanılması durumunda da sağlanmaktadır). 1960'larda geliştirilmeye başlamış ve 1980'lerden itibaren ise %16-19.5 zirkonyum ile kaplanmış [215] alkali dayanımlı AR lifler (CEM-FIL) kullanılmaya başlamıştır (Şekil 3.1) [80].

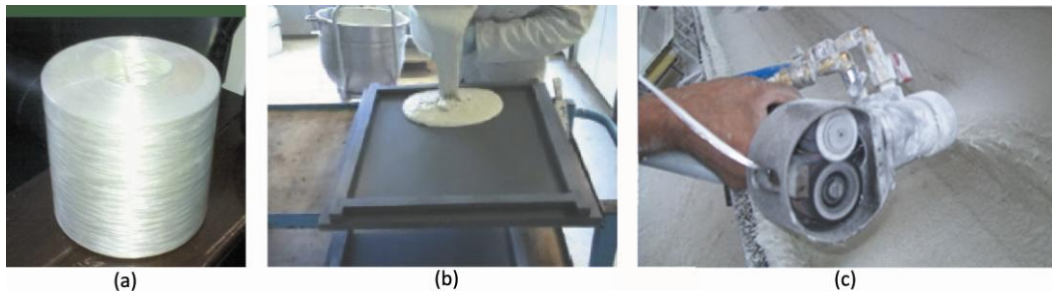


Şekil 3.1 Cam liflerin SEM (tarayıcı elektron mikroskop) görüntüsü (a) yaşlandırma testi öncesi lifli kompozitte AR lif, (b) yaşlandırma testi sonrası polimer ilaveli kompozitte AR lif [216].

- **Karışım Tasarımı;**

GFRC; çimento¹, silis kumu (%96 SiO₂, $D_{maks.}=1-2$ mm), su, süperakışkanlaştırıcı katkı ve cam liflerin ($l=12-36$ mm, $d=13-20$ µm) belirli oranlarda karıştırılması ile üretilmektedir (gerektiğinde hava sürükleyici katkı da eklenebilir). Ayrıca karışım içerisine, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin, lateks polimer ve renklendirici pigmentler de katılabilmektedir [190], [217-218]. Çimento/kum oranı başlangıçta 3:1 iken rötreyi azaltmak için günümüzde 1:1 oranına kadar azaltılmıştır. Erken dayanımlı çimento kullanımı ile kalıpta bekleme sürelerinin birkaç saate kadar azaltılması mümkün olmuştur [215].

Cam lifler iki şekilde uygulanmaktadır. Bunlar, püskürtme yöntemi (*spraying*) ve yerinde döküm (*premix*) yöntemidir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Cam lif uygulanması, (a) Cam lif, (b) yerinde dökme ve (c) püskürtme yöntemi [219-220].

¹ Genellikle PÇI tavsiye edilmektedir ama erken dayanım istenilen durumlarda PÇ III de kullanılmaktadır.

○ Püskürtme yönteminde; çimento, kum, su ve kimyasal katkıları yüksek devirli mikserde karıştırılır ve oluşan harç karışımı hazneye yerleştirilir. Harç, püskürtme tabancası ve kırıcıdan gelen alkali dayanımlı cam lif ile birlikte kalıba püskürtülür. $V_f = \% 5$ ($l = 12-36$ mm) cam lif kullanılır, su/çimento oranı genellikle 0.33'tür [190], [221-222].

○ Yerinde döküm yönteminde kullanılan lif yüzdesi püskürtme yöntemine göre daha azdır (V_f maks. % 3) ve lif boyları genellikle 12 mm düzeyindedir, kalıp büyüklüğüne bağlı olarak 24 mm'ye kadar artabilir. Karışım yüksek devirli mikserde hazırlandıktan sonra; lifler, hızı düşürülen mikser azar azar eklenir. Döküm öncesi yerleşebilirliğin yeterli olması gereklidir, yayılma miktarına bakılır. Oluşan harç, titreşimli bir kalıba serbest dökülerek yerleştirilir. Su/çimento oranı < 0.35 'dir [190], [223-224].

- **Mekanik Büyüklükler;**

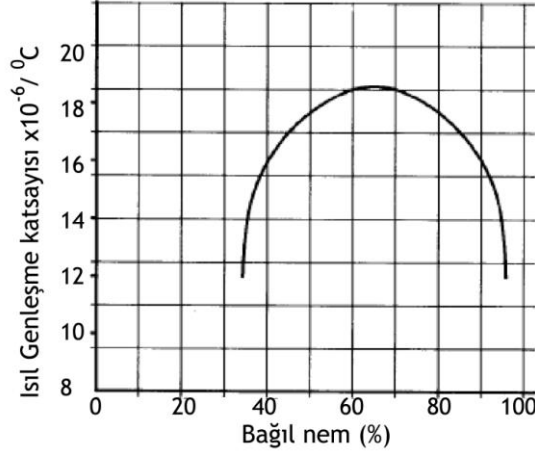
○ Cam lifli betonlar, lifsiz betonlara kıyasla daha düşük yoğunlukta olup, çelik donatısız ortalama düzeyde bir süneklik elde edilebilmektedir, bu da GFRC cephe panelleri için yeterlidir. Liflerin varlığı, aynı zamanda taze betonda terlemeyi ve olası segregasyonu gidermeye olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Cam lifli betonların mekanik büyüklükleri; kullanılan bağlayıcılar, su/çimento oranı, kum içeriği, lif boy/çap oranı ve homojen dağılımı ile kür şekline bağlıdır [74]. GFRC'nin ısı iletkenliği, yoğunluk ve nem içeriğine bağlıdır ($11-1.6 \times 10^{-5}$ mm/mm/°C). Betonun 2×10^{-5} mm/mm/°C olan ısı genleşme katsayısı nem oranına bağlı olarak daha düşük ve daha değişken değerler alır; % 60 nem düzeyinde maksimumdur (Şekil 3.3). Ayrıca ısı genleşme katsayısı agrega tipine göre de değişir [80]. Kuvars kumunun ısı genleşme katsayısı diğer agregalara göre daha fazla olmasına rağmen, sünmesi en düşük ince agrega tipidir.

○ 1987 yılında Prestressed Concrete Institute tarafından, cam lifler 50°C 0-26 hafta değişen yaşlandırma testine tabi tutulmuştur. Yaşlandırma testi ile orantısal gerilme¹ düzeyi artmıştır. Ancak, asıl önemli olan kopma dayanımı, donma-çözülme çevrimi uygulanmadan da 26 haftada ~% 50 azalmaktadır. Kopma dayanımı açısından

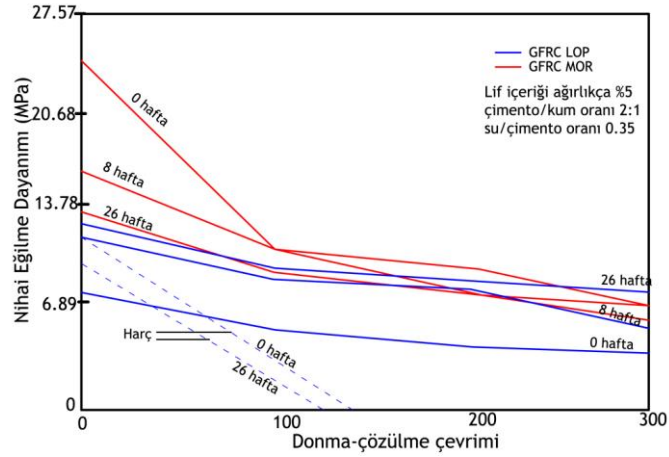
¹ Yük düzeyi ve kopma dayanımı cinsinden (LOP ve MOR ile ilgili detaylı bilgi EK-A'da mevcuttur):

LOP: Orantısal sınıra karşı gelen gerilme düzeyi, MOR: Kırılma gerilmesi

yaşlandırma testi donma çözülme çevrimine göre daha etkindir. En dramatik düşüş 0'dan 100'e kadar olan bölgede gerçekleşmektedir (Şekil 3.4) [225].



Şekil 3.3 Bağıl nem yüzdesi ve genleşme katsayısı ilişkisi [225].

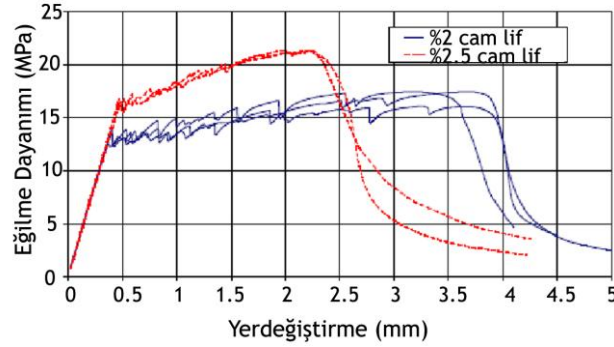


Şekil 3.4 MOR ve LOP'un donma çözülme çevrimi değişimi [80].

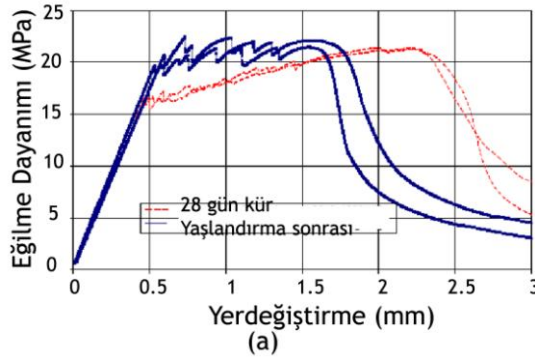
- Cam lifli beton, yangın dayanımı ve tutuşmazlık özelliği nedeniyle binaların cephelerinde tercih edilen bir malzemedir. Fakat içeriğine polimer eklenmesi halinde, cam lifli beton yangın dayanımı standartlarına uymamaktadır. Bu nedenle panel birleşimlerinin ankraj yerlerinde boşluk bırakılarak izolasyon sağlanmaktadır [80].
- Su/bağlayıcı madde oranı 0.25-0.30, C120-140 sınıfı, $V_f = \% 2-2.5$ AR lif kullanılmış ultra yüksek performanslı, kendiliğinden yerleşen GFRC numunesinin dört noktalı eğilme testleri¹ sonucunda, % 2.5 lif kullanımının % 2 'ye kıyasla maks. dayanımının ~%

¹ 24 saat kalıpta bırakıldıktan sonra 28 gün boyunca 20 °C, %100 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında tutulmuştur.

23 arttırdığı gözlenmiştir, maks. dayanıma karşı gelen yerdeğiştirme ise $\sim$ % 67 azalarak $\sim$ 2.3 mm olarak gerçekleşmiştir (Şekil 3.5). Bu değişim kıvam ve yerleşim ile açıklanabilir. V_f =% 2.5 AR lif kullanılan numunenin yaşlandırma testi¹ sonucunda, LOP 20 MPa düzeyine ulaşmış, elastisite modülü değişmemiş, maks. yerdeğiştirme ise % 40 azalmıştır (Şekil 3.6). Basınç dayanımı yaşlandırma testinden sonra % 2.5 AR cam lifli numunede 170 MPa (28 günlük basınç 120-140 MPa'dır) değerine ulaşmıştır [223].



Şekil 3.5 Cam lif yüzdesine göre eğilme dayanımı değişimi [223].

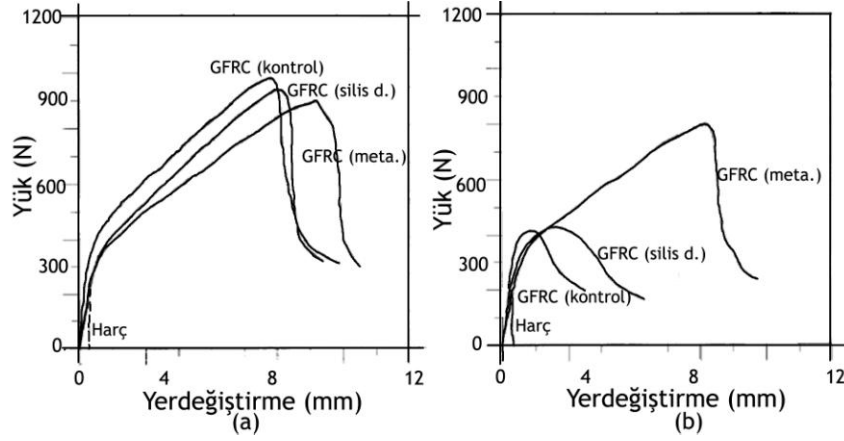


(b)

Şekil 3.6 (a) Yaşlandırma sonrası numunenin eğilme dayanımı-yerdeğiştirme değişimi, (b) eğilme testi sonrası çatlak durumu [223].

○ Sıcak suyun (50°C) cam lifli çimentolu kompozitlere etkisinin incelenmesi amacı ile üç çeşit karışım hazırlanmış (GFRC kontrol, GFRC+% 25 silis dumanı, GFRC+% 25 metakaolin) ve eğilme testi sonucunda (50x10x225 mm, açıklık: 6.25 mm) 84 gün sıcak su küründe bekletilen metakaolinli karışım, diğerlerinden farklı olarak yaşlandırma testinden olumsuz etkilenmemiştir (Şekil 3.7) [225].

¹Bir ay boyunca 20 °C, %100 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında tutulan numunelere kalıptan çıkarıldıktan 24 saat sonra 3 ay boyunca 50 °C'de su kürü uygulanmıştır.



Şekil 3.7 Eğilme altında yük-yerdeğiştirme değişimi (a) 28 gün normal kür uygulanmış, (b) 84 gün 50°C sıcak su kür uygulanmış [225].

- **Uygulama Alanları ve Uygulama Örnekleri;**

Alkali dayanımlı cam lifli beton; hafifliğinin yanında çeşitli renk, doku ve biçime sahip; aynı zamanda hava koşulları, korozyon, yangın, UV ve sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklı bir beton türüdür. Yaratıcı formları üretim kolaylığı, mimarlar için tasarım özgürlüğü ve yenilikçi kullanımlara olanak sağlamaktadır. GFRC, mimari alanda çok kullanılan bir beton türü olmakla birlikte mühendislik alanında da çeşitli ürünler vermektedir. Prekast beton elemanlar, duvar panelleri, kolon kaplama, mimari süslemeler, harpuşta, istinat duvarı elemanları, kent mobilyaları, peyzaj elemanları, çatılar, restorasyon ve onarımlar, temeller, modüler binalar, köprü ve tüneller, fenni-sihhi tesisler, akustik elemanlar ile su ve drenaj için tercih edilen elemanlarda kullanılmaktadır [80], [190].

- Mumbai'deki *Taj Heritage* otelinde orijinali 100 yıllık olan balkonlar GFRC panel kullanılarak yenilenmiştir (orijinali ile aynı şekilde yapılmıştır) (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Tarihi yapıda bir restorasyon uygulaması [228].

- Londra’da Lane Park ve Curzon Caddesi’ndeki Hilton Otelı’nin yanında bulunan 2002’de tamamlanan ofis binası 20 mm kalınlığında cam lifli kolon kaplaması (GFRC) ve Portland ‘Grove Whitland’ kesme taş tekstürü görünümüne sahip 4 mm kalınlığında cam lifli beton paneller kullanılmıştır. (Şekil 3. 9) [229].



Şekil 3.9 Ofis Binası (Londra) cephe kaplaması, prekast kolonlar [229].

- Alan D. ve Alvin H. tarafından tasarlanan ve 2006 yılında yarışma ile kazanılan *Space Pavilion* (Londra), 15-20 mm GFRC paneller ile tasarlanmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Space Pavilion (Londra) [230-231].

- Madrid’de 2005 yılında tamamlanan *EMV konut* projesinde 3 değişik renk tonunda cam lifli beton panel kullanılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 EMV konut projesi (Madrid) [232].

○ Zaha Hadid, tasarladığı birçok yapıda GFRC’den yararlanılmıştır¹. Yapımına 2007 yılında başlanan, 57 519 m² alana inşa edilen *Hayder Aliyev Kültür Merkezi* de bunlardan biridir. Binanın taşıyıcı sistemi, uzay kafes taşıyıcı sistem, kompozit kriş ve döşemelerden oluşmaktadır. Bina dış yüzeyi; sünek UV ışınlarına dayanımlı, kolay temizlenebilir, kullanım ömrü uzun ve bakım giderleri düşük 15.000 GFRC panel ile kaplanmıştır. Yapıda bulunan her bir eğrilik için maksimum 15 m genişliğinde, 7 m uzunluğunda ayrı ayrı panel üretilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Hayder Aliyev Kültür Merkezi (Azerbeycan) [113].

○ Afrika su kabağından yapılan çanaklardan esinlenerek, Populous firması tarafından 2009 yılında yenilenen *FNB Stadyumunun* yüzeyi GFRC paneller ile kaplanmıştır. Her biri 13 mm kalınlıklı, 1.2x1.8 m’lik panellerin 16’sı bir arada modüllerden, toplam 2100 adet monte edilmiştir. Oluşan kabuk, prekast betona kıyasla onda biri ağırlığındadır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 FNB Stadyumu (Güney Afrika) [233].

○ 2012 yılında tamamlanan *Kutaisi Gürcistan Parlamento Binası*, büyük bir kubbeden oluşmaktadır. % 70’i cam panellerden oluşan bu yapının dış strüktüründe aynı zamanda beyaz bant izlenimi vermek için GFRC paneller kullanılmıştır (Şekil 3. 14).

¹ Guangzhou Opera House (Çin), Neil Barret”shop in shop” (Kore), Capital Hill Residence (Rusya) vb.



Şekil 3.14 Kutaisi Gürcistan Parlamento Binası [234].

- Cam lifli çimentolu kompozitler, mimari kullanımı yanında kent mobilyası ve peyzaj eleman olarak da kullanılmaktadır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 GFRC'nin kent mobilyası ve peyzaj eleman kullanımına örnek [235-236].

- Cam lifli çimentolu kompozitler, Türkiye'de genellikle binaların cephelerinde tercih edilmektedir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Türkiye’de cam lifli çimentolu kompozit uygulamaları; (a) Noterler Birliği binası (Ankara), (b) Anadolu Vakfı Johns Hopkins Hastanesi (Kocaeli), (c) Angora Apartmanı (İstanbul), (d) Marbella Oteli (Marmaris) [214], [226].

3.2 Sünekliği Arttırılmış Lifli Çimentolu Kompozitler

Sünekliği arttırılmış lifli çimentolu kompozitler, yüksek performansı, artan enerji yutma kapasitesi ve sürdürülebilir özelliği ile farklı bir lifli çimentolu kompozit grubudur. Bu kompozit grubunda yüksek süneklik amaçlı uygulamalarda genellikle PVA lif kullanılsa da; HDPE, polyester gibi liflerden de az da olsa yararlanılmaktadır. 1990’dan itibaren geliştirilmiş tipik bazı uygulamalar olarak, PVA lifli ECC; Japonya, Avrupa ve A.B.D’de Mitaka barajı, Grove street köprüsü ve Glorio Roppongi binası yapısal uygulamalarında kullanılmıştır ve halen araştırma-geliştirme çalışmaları devam etmektedir (Şekil 3.17).

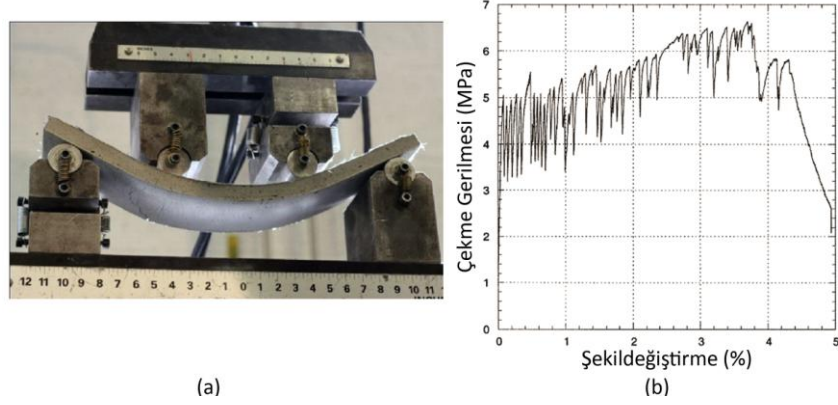


Şekil 3.17 PVA-ECC uygulama örnekleri [269], [278], [281].

Lifsiz betona kıyasla PVA-ECC’nin 300-500 kat daha sünek olması, PVA-ECC’yi diğer betonlardan ayıran en önemli özelliklerinden biridir. PVA-ECC’li karışım, bağlayıcı olarak, $190-918 \text{ kg/m}^3$ çimento, $183-1063 \text{ kg/m}^3$ uçucu kül içerir. Diğer bileşenler

olarak, $435-918 \text{ kg/m}^3$ silis kumu ve genellikle % 2 PVA lif mevcuttur. Genellikle, su/bağlayıcı madde oranı ~ 0.26 ve kum/ bağlayıcı madde oranı ~ 0.36 'dır¹. [237-251]. Agreg a çapının artması, lifin topaklaşması ve lif dağılımının bozulmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı, tasarım kriteri olarak agreg a boyutunun maks. 0.25 mm olması önerilmiştir [237]. Ancak, Sahmaran vd. (2009) kaynağında, maks. agreg a boyutunun 2.38 mm'ye kadar olumsuz etki oluşturmadağı belirtilmiştir [238].

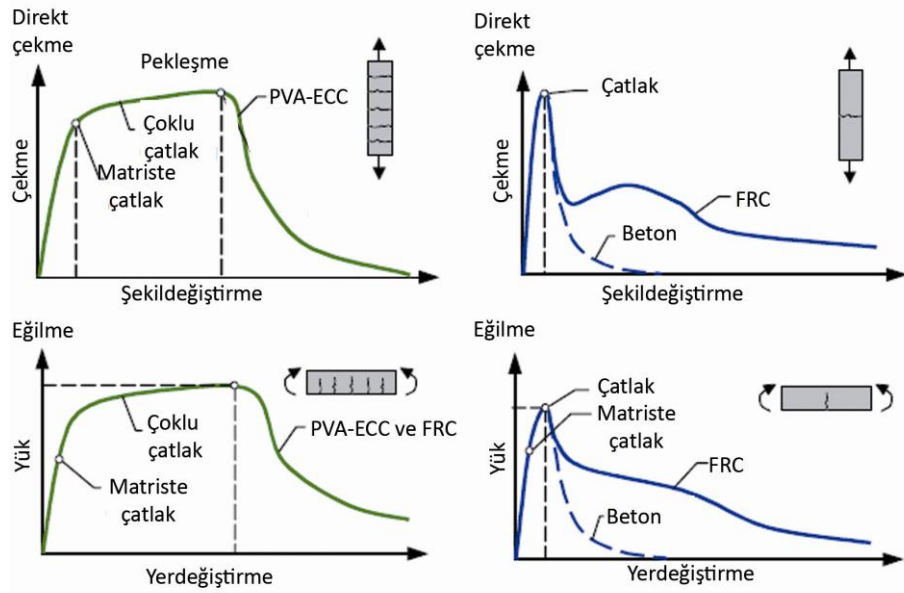
Standart PVA lifli ECC'nin genellikle, eğilme dayanımı 10-30 MPa, basınç dayanımı 20-95 MPa, elastisite modülü 18-34 GPa'dır [239-240]. PVA lifli ECC'de, sünek ve pekleşen malzeme özelliğı mevcuttur ve çoklu çatlak davranışı gözlenir (Şekil 3.18). Bu özelliğı ile direkt çekme ve eğilme grafiğı klasik lifli betonunkinden ayrılır (Şekil 3.19).



Şekil 3.18 PVA-ECC'nin (a) sünek davranışı ve (b) ekme gerilmesi-şekildeğ iştirme eğrisi [209].

Çekme şekildeğ iştirmesinin; % 2 yüksek moleküler ağırlıklı polietilen lif (HDPE) kullanıldığında % 6-8'e [240], % 2 PVA kullanıldığında % 4-5'e ulaştığı saptanmıştır [209]. Ayrıca, PVA kullanımı ile şekildeğ iştirme kapasitesinin % 7 düzeyine artma potansiyeli vardır [240], [241].

¹ Hesaplanan değ erlerde incelenen makaleler dikkate alınmıştır.



Şekil 3.19 PVA-ECC eğilme ve çekme davranışı [87].

Aşağıdaki bölümlerde ağırlıklı olarak PVA lifli çimentolu kompozitlerin karışım tasarımı, mekanik büyüklükleri ve uygulama alanları sırası ile incelenecektir.

3.2.1 Sünekliliği Arttırılmış Lifli Çimentolu Kompozitlerde Karışım Tasarımı ve Dayanımlar

Bu bölümde PVA lifli çimentolu kompozitler ağırlıklı olmak üzere yapılan deneysel çalışmalar ve karışım tasarımları incelenecektir.

- Li ve diğ. (2002) [209]; PVA liflerin yağ¹ maddesi ile kaplanmasının karıştırma aşaması ve mekanik büyüklüklere etkisini incelemiştir. Karışım tasarımı²; PÇ I, ince kum (50-150 μm , $D_{ort.} = 110 \mu\text{m}$) ve yüzeyi yağ (% 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.2) ile kaplanmış 26 kg/m^3 PVA lif³ ($V_f = 2\%$; $l = 12 \text{ mm}$, $d = 39 \mu\text{m}$, $l/d = 307$) kullanılmıştır. Kıvam için; toz halde hidroksi propil metil selüloz kıvam düzenleyici (HPMC) (% 0.15), kıvam düzenleyiciden

¹ Kuraray Co. tarafından üretilen PVA'in liflerin çeperinde $\sim 100\text{nm}$ yağ mevcuttur, karışım sırasında çok azı kaybolmaktadır.

² Malzeme miktarları hakkında bilgi verilmemiştir.

³ PVA liflerin genel özelliği : $\gamma = 1300 \text{ kg/m}^3$, $\sigma_{fu} = 1600 \text{ MPa}$, $E = 40 \text{ GPa}$, $\varepsilon_u = \% 6$ (aşağıdaki anlatımlarda tekrar verilmeyecektir)

kaynaklanan hava kabarcıklarını azaltan toz katkı (% 0.05) ve hiperakışkanlaştırıcı (% 2) eklenmiştir¹. Su/çimento oranı 0.45, kum/çimento oranı 0.6'dır.

Karışım hazırlama işlemi şu aşamalardan oluşmaktadır :

1. PÇ I, kum, hava azaltıcı katkıdan oluşan kuru karışım 1-2 dk. düşük hızda karıştırılırken, ölçülen suyun bir kısmında HPMC'de çözündürülerek sıvı hale getirilmiştir.
2. Suyun kalan kısmı kuru karışıma eklenip 2 dk. düşük hızda karıştırılmıştır.
3. Çözdürülen HPMC eklenmiş, karışım içerisinde tam aktivasyona ulaşana dek karıştırılmış (~10 dk.), takiben hiperakışkanlaştırıcı eklenerek 1-2 dk. hızlı bir şekilde karıştırılmıştır.
4. Parça parça PVA lif eklenmiştir.
5. Karışım kalıplara dökülerek 3-4 dk. vibrasyon uygulanmıştır.

Direkt çekme testi için 304.8x76.2x12.7 mm (LxWxH) dikdörtgen kupon numunesi alınmıştır. Numuneler 24 saat kalıpta bırakıldıktan sonra çıkarılmış daha sonra 14 gün 21°C'de su kürü uygulanmıştır (7 günden sonra ECC kompozitin çekme karakteristiklerinde çok fazla değişiklik olmadığı test 14 gün sonra uygulanmıştır).

- Yang vd. (2007) [244]'de uçucu külün; basınç dayanımı, kuruma rötresi ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Karışım tasarımı; PÇ I, F tipi uçucu kül, 456 kg/m³ ince silis kum ($D_{maks}= 250 \mu m$, $D_{ort}= 110 \mu m$) ve yüzeyi yağ (%1.2) ile kaplanmış 26 kg/m³ PVA lif ($V_f=2\%$; $l=8 \text{ mm}$, $d=39 \mu m$, $l/d=205$) kullanılmıştır. Su/çimento (s/ç) 0.58, uçucu kül/çimento oranı (uk/ç) 1.2-5.6'dır (Çizelge 3.1). 13 l'lik karışım hazırlanmıştır ve şu aşamalardan oluşmaktadır :

1. Çimento, uçucu kül, silis kumu birkaç dakika karıştırılmıştır.
2. Sonra suyun tamamı ve hiperakışkanlaştırıcı eklenerek 3 dk. karıştırılmıştır.
3. Ardından azar azar PVA lif eklenerek homojen kıvama gelene kadar karıştırılmıştır.
- 3, 28, 90 günlük basınç dayanımı testi için $\phi 75 \times 150 \text{ mm}$ numune, direkt çekme testi için 152x76x13 mm kupon numune, 3 noktalı eğilme testi için 305x76x38 mm kiriş numune (açıklık: 254 mm) alınmış ve ayrıca 8 karışımdan kuruma rötresi testi yapılmıştır.

¹ Ayrıca belirtilmemiştir, katkıların çimentonun ağırlığına oranla verildiği tahmin edilmektedir.

Numuneler 24 saat kalıpta, 7 gün boyunca 20°C’de % 45±5 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında tutulmuştur.

Çizelge 3.1 Uçucu kül içeriğinin karışıma ve basınç dayanımına etkisi [244].

Çimento	Uçucu kül	Silis kumu	Su	Hiperak.	PVA lif	uk/ç	s/bm	$f_{b,3}$	$f_{b,28}$	$f_{b,90}^1$
kg/m ³								MPa		
571	685	456	332	6.80		1.2		30.6 ± 2.1	52.6 ± 0.2	54.0 ± 1.4
477	763	456	330	6.05		1.6		26.3 ± 1.0	47.5 ± 0.4	49.0 ± 4.8
412	824	456	326	5.52		2.0		16.9 ± 0.4	34.2 ± 2.8	35.5 ± 2.9
362	870	456	323	5.10	26	2.4	0.26	17.1 ± 0.4	38.4 ± 1.6	43.4 ± 0.6
324	906	456	320	5.29	(%2)	2.8		14.6 ± 3.2	35.2 ± 1.3	38.9 ± 1.1
292	935	456	312	5.52		3.2		17.0 ± 0.5	26.7 ± 4.4	28.2 ± 1.2
266	959	456	309	5.80		3.6		15.0 ± 0.2	23.9 ± 1.0	25.9 ± 0.1
190	1063	456	300	6.45		5.6		8.2 ± 0.2	21.4 ± 1.0	22.2 ± 1.4

• Sahmaran vd. (2008) [245]; PVA liflerin çevresindeki yağ maddesinin karıştırma aşaması ve mekanik büyüklüklere etkisini incelemiştir. Karışım tasarımı; bağlayıcı olarak 570 kg/m³ PÇ I, 684 kg/m³ F tipi uçucu kül (% 10.44 CaO); 455 kg/m³ silis kumu ($D_{maks.}$ = 200 µm, $D_{ort.}$ = 110 µm) ve % 1.2 yağ kaplı 26 kg/m³ PVA lif (V_f = % 2, l = 8 mm, d = 39 µm) kullanılmıştır. Kıvam için 4.9 kg/m³ hiperakışkanlaştırıcı eklenmiştir. Su/bağlayıcı madde oranı 0.27, kum/bağlayıcı madde oranı 0.36, uçucu kül/çimento oranı 1.2’dir. 12 l’lik karışım hazırlanmıştır ve şu aşamalardan oluşmaktadır :

1. Çimento, uçucu kül, silis kumu 1 dk. karıştırılmıştır (100 devir/dk.).
 2. Sonra suyun tamamı ve hiperakışkanlaştırıcı eklenerek homojen bir kıvama gelene kadar 3 dk. karıştırılmıştır (300 devir/dk.).
 3. Ardından PVA lif eklenerek 150 devir/dk. ile 3 dk. karıştırılmıştır.
- 7 ve 28 günlük basınç dayanımı testi için ϕ 75x150 mm numuneler (ASTM C39), direkt çekme testi için 152x76x13 mm kupon numuneler alınmıştır. Numuneler, 7 güne kadar 23±2°C ve % 95±5 nem düzeyinde plastik kalıplarda, daha sonra 28 güne kadar 23±2°C ve % 50±5 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında tutulmuştur.

¹ $f_{b,3}$, $f_{b,28}$, $f_{b,90}$: 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarına denk gelmektedir.

- M.Li ve V.C.Li (2009) [246]; yüksek erken dayanımlı 2 grup PVA lifli ECC tasarımının performansını karşılaştırmıştır (Çizelge 3.2).

○ Lifsiz erken dayanımlı kontrol betonu; PÇ III, kireçtaşı agregası (14 mm) ve silis kumu kullanılmıştır. Karışıma ek olarak kancalı çelik lif ($V_f = 1\%$; $l = 30$ mm, $d = 500$ μ m) eklenmiştir.

○ 918 kg/m^3 PÇ III, 918 kg/m^3 silis kumu ($D_{ort} = 110$ μ m), 58.8 kg/m^3 strafor köpüğü (4 mm) ve 26.1 kg/m^3 PVA lif ($V_f = 2\%$, $l = 12$ mm, $d = 40$ μ m) kullanılmıştır. Kıvam için; 6.9 kg/m^3 hiperakışkanlaştırıcı, 36.7 kg/m^3 hızlandırıcı katkı kullanılmıştır.

Hazırlanan 13 l'lik karışım şu aşamalardan oluşmaktadır [247]:

1. Çimento, kum, strafor köpüğü (iri agrega gibi) 1 dk. karıştırılmıştır.
2. Sonra suyun tamamı eklenerek 3 dk. karıştırılmış, takiben hiperakışkanlaştırıcı eklenerek homojen bir kıvama gelene kadar karıştırılmıştır.
3. Karışıma parça parça PVA lif eklenmiştir.
4. Priz hızlandırıcı katkı eklenmiş, tüm karıştırma işlemi 8-10 dk. sürmüştür.

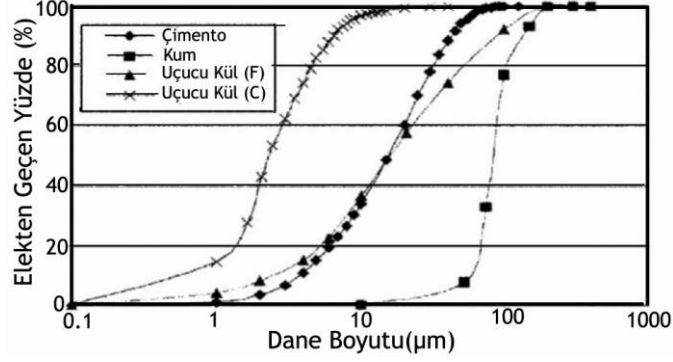
Her bir karışımdan direkt çekme testi için $228.6 \times 76.2 \times 12.7$ mm kupon numune, kuruma rötresi için $1600 \times 100 \times 100$ mm çubuk numune alınmıştır. Numunelere 6 saat su kürü uygulanmış, sonra hızlandırıcı hava kürü (trafik sahası şartlarına uygun hızlandırma işlemi), ve 28 güne kadar nem kürü uygulanmış, sonra $15-21^\circ\text{C}$ ve $\% 35-55$ bağıl nem düzeyinde laboratuvar şartlarında 150 gün tutulmuştur.

Çizelge 3.2 Yüksek erken dayanımlı tasarım ve dayanıma etkisi [246].

Çimento	Agrega			Su	Kimyasal katkı		Lif		$f_{b,7}$	$f_{b,28}$	ε_u
	strafor köpüğü	silis kumu	kireç taşı		Süper ak.	Priz hızl.	Çelik	PVA			
kg/m ³									MPa		%
918	–	–	1193.4	367.2	4.6	36.7	13.05	–	51.5 ± 2.4	57.0 ± 2.0	0.01
	58.8	918	–	300.7	6.9	36.7	–	26.1	47.5 ± 1.9	55.6 ± 2.2	3-5

- Yang vd. (2009) [248]; uçucu kül tipi, miktarı ile akışkanlaştırıcı ve kıvam düzenleyici miktarının taze betonun kıvamı ve sertleşmiş betonun mekanik büyüklüklerine etkisini araştırmıştır (Çizelge 3.3). Karışım tasarımında; PÇ I, F ve C tipi uçucu kül (toplam

bağlayıcı madde içeriği 1229 kg/m^3), silis kumu ($D_{maks} = 250 \text{ }\mu\text{m}$, $D_{ort.} = 110 \text{ }\mu\text{m}$) (Şekil 3.20) ve %1.2 yağ kaplı 26 kg/m^3 PVA lif ($V_f = \% 2$; $l = 8 \text{ mm}$, $d = 39 \text{ }\mu\text{m}$) kullanılmıştır. Kıvam için; polikarboksil bazlı hiperakışkanlaştırıcı ve $0-0.2 \text{ kg/m}^3$ toz halde HPMC eklenmiştir.



Şekil 3.20 Çimento, uçucu kül, kum dane boyutu dağılımı [248].

Karışım hazırlama şu aşamalardan oluşmaktadır :

1. Çimento, uçucu kül, silis kumu 1 dk. karıştırılmıştır (100 devir/dk.).
2. Su, hiperakışkanlaştırıcı ve HPMC eklenerek 1 dk. (150 devir/dk.), takiben homojen karışım için 2 dk. daha karıştırılmıştır (300 devir/dk.).
3. Karışıma PVA lif eklenerek 3 dk. daha karıştırılmıştır (150 devir/dk.).

Düşey eksenli cebri karıştırmalı beton mikseri kullanılarak 9 tip karışım hazırlanmış, 28 günlük basınç dayanımı testi için her bir karışımdan 3 adet $\phi 75 \times 150 \text{ mm}$ numune ve direkt çekme testi için 4 adet $152.4 \times 76.2 \times 12.7 \text{ mm}$ kupon numunesi alınmıştır. Numuneler ilk 7 gün $23 \pm 2^\circ\text{C}$ suda, takiben 28 güne kadar $\%50 \pm 5$ nem düzeyinde $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de laboratuvar şartlarında tutulmuştur.

- Ahmed ve Mihashi (2010) [249]; eğilme altında farklı uzunluk ve mekanik özelliklere sahip iki PVA lif tipi ve silis kumu ile dört tip de hafif kum kullanarak çoklu çatlak davranışını incelemiştir. Karışım sırasında artan kum hacminin hava içeriğini arttırdığı görülmektedir.

- PÇ I, silis kumu ($D_{maks.} = 110 \text{ }\mu\text{m}$, $\gamma = 2.61 \text{ gr/cm}^3$) ve iki tip PVA lif ($V_f = \% 0-3$) kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.62, kum/çimento oranı 0.4'tür.

- PÇ I, düşük yoğunluklu ince kum ($5-150 \text{ }\mu\text{m}$ volkanik kum, $\gamma = 0.29 \text{ gr/cm}^3$), diğer üç karışımda obsidiyen kayasından elde edilmiş düşük yoğunluklu üç tip kum (1.tip $D_{maks.} =$

0.6 mm, $\gamma=0.675 \text{ gr/cm}^3$; 2.tip 0.6–1.2 mm, $\gamma=0.22 \text{ gr/cm}^3$; 3.tip 1.2–2.5 mm, $\gamma=0.11 \text{ gr/cm}^3$), iki tip PVA lif ($V_f\%$ 0-3) kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.62, hafif kumun hacimce oranları % 10, 14, 20 ve 27'dir.

İki gruba da karışım suyu miktarının % 1.4'ü oranında HPMC eklenmiştir.

İnce PVA lif; $l=6, 8, 12 \text{ mm}$, $d=40 \mu\text{m}$, $l/d=150, 200, 300$, $\sigma_u=1600 \text{ MPa}$, $E=40 \text{ GPa}$, $\varepsilon_u=\%$ 6

Kalın PVA lif; $l=12, 24 \text{ mm}$, $d=100 \mu\text{m}$, $l/d=120, 240$, $\sigma_u=1100 \text{ MPa}$, $E=25 \text{ GPa}$, $\varepsilon_u=\%$ 10

Karışım hazırlama işlemi şu aşamalardan oluşmaktadır :

1. Çimento, kum ve HPMC 1 dk. karıştırılmıştır.
2. Suyun tamamı eklenerek 3 dk. daha karıştırılmıştır.
3. Ardından PVA lif eklenerek 5 dk. daha karıştırılmıştır.

6 tip karışım hazırlanmış ve her bir karışım 4 tip seriden oluşmaktadır. Karışım hazırlandıktan sonra 3 noktalı eğilme testi için her bir karışımdan 40x40x160 mm prizma numune alınmıştır. Numuneler kalıpta 24 saat tutulmuş ve 7 gün boyunca su kürü uygulanmıştır. Eğilme testi yükleme hızı 0.4 mm/dk'dır.

Çizelge 3.3 Uçucu kül tipi, miktarı ve kimyasal katkıların yayılma ve dayanıma etkisi [248].

Çimento	Uçucu Kül		Kum	Su	Kimyasal Katkılar		PVA lif	s/bm	Lifsiz		Lifli	f _{b,28}	f _{c,28} ¹	ε _u ²
	C Tipi	F Tipi			Hiperak.	HPMC			Yayılma süresi*	Yayılma çapı				
kg/m ³									sn	mm	mm	MPa	%	
323	0	906	456	262	9.3	0.2	26	0,21	21.03	366	205	53.4	5.9	2.69
				282	6.3	0.1		0,23	12.56	369	220	51.5	4.10	2.70
				302	3.3	0		0,24	11.01	306	210	50.9	4.29	2.71
				262	6.3	0		0,21	20.22	365	225	55.9	5.53	2.72
	226	680		282	3.3	0.2		0,23	28.69	199	115	53.6	5.02	2.73
				302	9.3	0.1		0,24	8.88	408	235	50.1	4.07	2.74
				262	3.3	0.1		0,21	35.00	129	100	58.1	6.44	2.75
				453	453	283		9.3	0	0,23	13.58	418	223	55.3
	302	6.3				0.3		0,24	11.02	365	218	52.8	4.64	2.77

*Marsh konisi sonuçları

¹ $f_{c,28}$: direkt çekme test sonucu

² ε_u : şekildeğiştirme katsayısı

- Sahmaran vd. (2010) [250]; karışım tasarımının yüksek sıcaklıktaki davranışına etkisini incelemiştir. Karışım tasarımında; 558 kg/m³ PÇ I, 669 kg/m³ F tipi uçucu kül, 446 kg/m³ silis kumu ($D_{maks.}=200\text{ }\mu\text{m}$, $D_{ort.}=110\text{ }\mu\text{m}$) ve %1.2 yağ kaplı 26 kg/m³ PVA lif ($V_f=\% 2$; $l=8\text{ mm}$, $d=39\text{ }\mu\text{m}$, $l/d=205$) kullanılmıştır. Kıvam için 2.30 kg/m³ hiperakışkanlaştırıcı eklenmiştir. Su/bağlayıcı madde oranı 0.27, uçucu kül/çimento oranı 1.2, kum/bağlayıcı madde oranı 0.36'dır. Karışım hazırlama aşaması hakkında bilgi yoktur.

Karışım hazırlandıktan sonra direkt çekme testi için 200x75x13 mm kupon numune alınmış (28 günlük çekme dayanımı 5.1 MPa, 28 günlük çekme şekildeğiştirmesi % 2.72 bulunmuştur), basınç dayanımı testi için 50 mm'lik 6 küp numune hazırlanmıştır. Numuneler kalıpta 24 saat tutulduktan sonra, 28 güne kadar 23±2°C'de, % 95±5 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında kür uygulanmıştır. Takiben, fırında ~15 °C/dk. ile öngörülen sıcaklığa ulaşana kadar ısıtılmıştır (200, 400, 600 ve 800°C), hedeflenen ısıya ulaşıldığında ortam sıcaklığı sabitlenmiş, sonra numuneler oda sıcaklığına alınmıştır.

- Yun vd. (2011) [251]; PVA ve ultra yüksek moleküler PE takviyesinin donma-çözülme etkisinde çekme performansına etkisini incelemiştir. Karışım tasarımında; PÇ I, % 50.3¹ silis kumu (105-120 μm), % 35 F tipi uçucu kül, % 5 silis dumanı (Norveç, % 95 SiO₂), % 3.2 akrilik polimer (Forton BV) ve 2 tip lif; PVA lif ($V_f=\% 2$; $l=12\text{ mm}$, $d=40\text{ }\mu\text{m}$) ve PE lif ($V_f=\% 1.5$; $l=12\text{ mm}$, $d=12\text{ }\mu\text{m}$) kullanılmıştır. Ayrıca, kalsiyum sülfat (CSA) bazlı genleşen katkı (Denka) (% 5.1), HPMC (% 1), naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcı (% 1), rötre azaltıcı katkı ve düşük oranda hava azaltıcı katkı eklenmiştir. Su/bağlayıcı madde oranı 0.35'tir.

Karışım hazırlama işlemi şu aşamalardan oluşmaktadır :

1. Çimento, uçucu kül, silis kumu, silis dumanı homojen bir kıvama gelene kadar karıştırılmıştır.
2. Su ve kimyasal katkıların tamamı eklenerek 3 dk. daha karıştırılmıştır.
3. Lifler parça parça eklenmiştir (ilk yarısı karıştırma devam ederken 30 sn'de eklenmiştir).

¹ Yüzdelerin hepsi toplam bağlayıcı madde miktarına oranla (ağırlıkça) verilmiştir.

4. Bütün lifler eklendikten sonra karışım 1.5 dk. daha karıştırılmıştır.

Karışım hazırlandıktan sonra basınç dayanımı testi için 8 adet $\phi 100 \times 200$ mm numune alınmış, her karışımdan donma-çözülme etkisini gözlemlemek için ayrı 6 numune hazırlanmış, diğer kalan numuneler ise yüksek nemli kür odasında tutulmuştur. Numuneler 24 saat 23°C 'de plastik kalıplarda ıslak çuval bezine sarılı tutulmuş, daha sonra 23°C 'de ve % 65 bağıl nem düzeyinde laboratuvar şartlarında bekletilerek 14 gün kür uygulanmıştır.

- Mechtcherine vd. (2012) [252]; PVA lif kullanılarak yapılan karışım tasarımının farklı sıcaklıklarda çekme performansına etkisini incelemiştir. Karışım tasarımında; 505 kg/m^3 PÇ I, 613.5 kg/m^3 uçucu kül (türü bilinmiyor), 534.2 kg/m^3 kuvars kumu ($60-200 \mu\text{m}$) ve 29 kg/m^3 PVA lif ($V_f = 2.2\%$; $l = 12 \text{ mm}$) kullanılmıştır. Kıvam için; 19.3 kg/m^3 süperakışkanlaştırıcı ve 3.2 kg/m^3 HPMC eklenmiştir. Ayrıca 2 kg/m^3 süper emici polimer¹ (kuru durumda dane boyutu $70 \mu\text{m}$) kullanılmıştır. Karışım hazırlama işlemi şu aşamalardan oluşmaktadır :

1. Kuru içerik homojen kıvama gelene kadar karıştırılmıştır.
2. Akıcı kıvama gelene kadar su ve süperakışkanlaştırıcı eklenmiştir.
3. Karıştırma işlemi devam ederken PVA lif eklenmiş ve homojen dağılana kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir.

Karışımdan $330 \times 30 \times 30$ mm kupon numunesi alınmış, 22°C oda sıcaklığında üstü örtülü olarak tutulmuş, daha sonra kalıplardan çıkartılarak test için 28 güne kadar yine oda sıcaklığında plastik beze sarılı tutulmuştur. Takiben 22 , 60 ve 100°C sıcaklıkta ve farklı hızlarda direkt çekme testine tabi tutulmuştur.

- M.Li ve V.C.Li (2011) [253]; yüksek erken dayanımlı karışımın karıştırma aşaması ve mekanik büyüklükleri hazırlanan iki grupta incelenmiştir:

- Lifsiz erken dayanımlı kontrol betonunda PÇ III, iri agregası (10 mm), nehir kumu kullanılmıştır.

¹ Elemanın donma-çözülme direncini arttırmak, rötre ve mikro çatlakları azaltmak ve yüksek şekildeğiştirme kapasitesi için eklenmektedir. Sulu ortamda kendi ağırlığının 22 katı kadar emici özellik kazanır.

- PÇ III, ince silis kumu ($D_{maks.} = 270 \mu m$, $D_{ort.} : 110 \mu m$), strafor köpüğü (4 mm) ve %1.2 yağ kaplı PVA lif ($V_f = \% 2$; $l = 12 \text{ mm}$, $d = 40 \mu m$) kullanılmıştır.

Kıvam için; her iki karışımda da hiperakışkanlaştırıcı ve hızlandırıcı katkı eklenmiştir. Hidratasyon kontrol katkısı sadece ECC'li karışıma eklenmiştir (Döküm süresi karışım tamamlandıktan sonra 15 dk.'dan fazla sürdüğünde kullanılmaktadır.).

12 l'lik karışım hazırlanmıştır ve şu aşamalardan oluşmaktadır:

1. Çimento ve kum 1 dk. karıştırılmıştır.
 2. Sonra yavaşça su eklenerek 1-2 dk. karıştırılmaya devam edilmiştir. Ardından hiper akışkanlaştırıcı eklenerek homojen bir kıvama gelene kadar 1-2 dk. daha karıştırılmıştır.
 3. Karışıma parça parça PVA lif eklenmiş ve homojen dağılına kadar 2 dk. karıştırılmıştır.
 4. Ardından strafor köpüğü eklenmiş ve 1-2 dk. karıştırılmıştır.
1. Hidrotasyon kontrol katkısı eklenerek 1 dk. karıştırılmıştır (Bütün karışım 15 dk. içinde tamamlanmamışsa).
 2. Kalıplanmadan önce hızlandırıcı katkı eklenerek 1 dk. karıştırılmıştır. Bütün karışım her grup için 10-15 dk. sürmüştür.

Karışımın farklı zaman aralıklarında mekanik özelliklerine bakılmıştır. Basınç dayanımı testi için $\phi 75 \times 150 \text{ mm}$ numune, direkt çekme testi için $228.6 \times 76.2 \times 12.7 \text{ mm}$ levha numune, 3 noktalı eğilme testi için $406.4 \times 76.2 \times 101.6 \text{ mm}$ kiriş numune (açıklık 304.8 mm), kuruma rötresi için 21 karışım hazırlanmış ve her bir karışımdan $200 \times 40 \times 40 \text{ mm}$ prizma numune alınmış ve kısıtlanmış rötre çalışması için 25.4 mm kalınlığında rijit çelik halka tasarlanmıştır. Numunelere 4 saat su kürü uygulanmış sonra $20 \pm 3^\circ \text{C}$ ve $\% 40 \pm 5$ bağıl nem düzeyinde oda şartlarında tutulmuş ve farklı yaşlarda testler yapılmıştır.

- Özbay vd. (2012) [254]; 2 grup karışımda uçucu kül ve metakaolinin etkisini incelemiştir. İlk grup, yüksek oranda uçucu kül içermektedir, diğer grupta ise daha az oranda metakaolin de içermektedir. Toplam bağlayıcı madde miktarı $1220\text{-}1250 \text{ kg/m}^3$, su/bağlayıcı madde oranı 0.27'dir. % 1.2 yağ ile kaplı 26 kg/m^3 PVA lif ($V_f = \% 2$; $l = 8 \text{ mm}$, $d = 39 \mu m$) kullanılmıştır. Kıvam için; $3.7\text{-}7.5 \text{ kg/m}^3$ polikarboksil bazlı hiperakışkanlaştırıcı eklenmiştir.

- Karışım tasarımındaki iki üretimde; PÇ I, % 55 ve 70 F tipi¹ uçucu kül (3060 cm²/g)², ~450 kg/m³ silis kumu ($D_{maks.}=200\ \mu\text{m}$, $D_{ort.}=110\ \mu\text{m}$) mevcuttur.
- Karışım tasarımındaki diğer iki üretimde; PÇ I, % 45 ve 56 uçucu küle ilave olarak % 10 ve 12.5 metakaolin (122, 150 kg/m³) eklenmiştir. Toplam mineral katkı içeriği sabit kalmıştır (Çizelge 3.4).

Karışım hazırlama işlemi şu aşamalardan oluşmaktadır :

1. Çimento, mineral katkılar, silis kumu 1 dk. karıştırılmıştır (100 devir/dk.).
2. Su ve kimyasal katkıların tamamı eklenerek 1 dk. karıştırılmıştır (150 devir/dk.), takiben homojen karışım için 2 dk. daha karıştırılmıştır (300 devir/dk.).
3. PVA lif eklenerek 3 dk. daha karıştırılmıştır (150 devir/dk.).

Hazırlanan 4 tip karışımın herbirinden kuruma rötresi testi için 285x25x25 mm çubuk numune, 4 noktalı eğilme testi için 355x50x76 mm prizma numune, hızlandırılmış klor geçirgenliği testi için $\phi 100 \times 200$ mm numune ve 28 günlük basınç dayanımı testi için 50 mm küp numune alınmıştır. Numuneler 24 saat kalıpta tutulmuş ve ilk 7 gün $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de %95 $\pm$ 5 nem düzeyinde plastik kalıplarda, daha sonra 28 güne kadar $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de, %50 $\pm$ 5 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında kür uygulanmıştır.

Çizelge 3.4 Uçucu kül ve metakaolinin karışım tasarımı ve dayanıma etkisi [254].

Çimento	Uçucu kül	Metakaolin	Silis kumu	Su	Hiper ak.	PVA Lif	uk/ç	mk/ç	$f_{b,28}$	$f_{e,28}^3$
kg/m ³									MPa	
570	684	–	455	331	4.9	26 (%2)	1.2	–	46.4	11.01
386	847	–	448	327	3.7		2.2	–	46.8	8.57
558	547	122	446	326	7.5		0.98	0.22	55.5	11.33
375	673	150	435	318	6.5		1.80	0.4	52.8	8.75

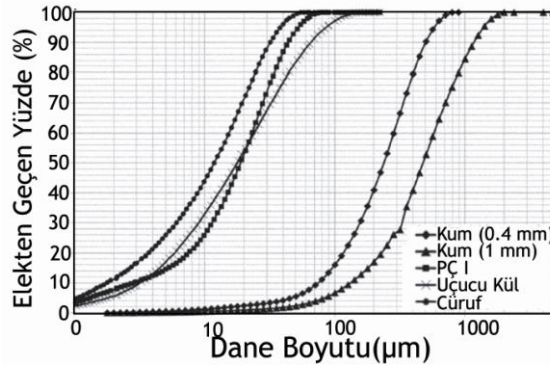
- Sahmaran vd. (2012) [255]; agrega boyutu ve içeriği yanında, mineral katkıların uzun süreli kür uygulamasında süneklik ve rötreye etkisini araştırmıştır. Karışım

¹ Uçucu külün toplam bağlayıcı madde miktarına oranı

² Blaine inceliği

³ $f_{e,28}$: 28 günlük eğilme dayanımı test sonucu

tasarımında; PÇ I, F tipi uçucu kül, cüruf, iki farklı boyutta ince kuvars kumu ($D_{maks.}=400, 1000 \mu m$) (Şekil 3.21) ve PVA lif ($V_f=\% 2$; $l=8 \text{ mm}$, $d=39 \mu m$) kullanılmıştır¹. Kıvam için; polikarboksil bazlı hiperakışkanlaştırıcı eklenmiştir. Toplam agrega/bağlayıcı madde oranı 0.36, 0.45, 0.55; su/bağlayıcı madde oranı 0.27'dir.



Şekil 3. 21 Uçucu kül, cüruf, ince agregaların dane büyüklüğü dağılımı [255].

Karışım hazırlama işlemi şu aşamalardan oluşmaktadır :

1. Kuru karışım 1 dk. karıştırılmıştır (100 devir/dk.).
2. Su ve hiperakışkanlaştırıcı eklenerek 1 dk. (150 devir/dk.), takiben homojen karışım için 2 dk. daha karıştırılmıştır (300 devir/dk.).
3. Karışıma PVA lif eklenerek 3 dk. daha karıştırılmıştır (150 devir/dk.).

24 tip karışım tasarımı hazırlanmıştır. 7, 28, 90 ve 180 günlük testler için her bir numuneden basınç dayanımı testi için 50 mm küp numuneler, 4 noktalı eğilme testi (açıklık 304 mm) ve tokluk testi için 360x75x50 mm prizma numuneler alınmıştır. Numuneler 24 saat kalıpta tutulmuş, ilk 7 gün boyunca $23\pm 2^{\circ}C$ 'de $\% 95\pm 5$ nem düzeyinde tutulmuş, daha sonra test olacağı güne kadar $23\pm 2^{\circ}C$ 'de, $\% 50\pm 5$ nem düzeyinde laboratuvar şartlarında kür uygulanmıştır.

- Choi vd. (2012) [213]; geri kazanılmış malzemelerin karışıma etkisini görmek için dört noktalı eğilme testi ve direk çekme testleri uygulamıştır. Karışım tasarımı; PÇ I, F tipi uçucu kül, silis kumu ($D_{maks.}= 105-120 \mu m$), geri kazanılmış agrega² ($D_{maks.}= 2.5$

¹ PVA V_f değeri ve çimento miktarı Sahmaran vd. (2010) kaynağından alıntıdır.

² Geri dönüştürülmüş agrega özellikleri [] makalesinde mevcuttur.

mm) ve 2 tip lif; (REC-15) PVA lif (V_f =% 2; l =12 mm, d =39 μ m, l/d =307, σ_u =1600 MPa, E =40 GPa), PET lif (V_f =% 1.6; l =10 mm, d =33 μ m, l/d =300, σ_u =953 MPa, E =11 GPa) kullanılmıştır. Kıvam için; HPMC, süper akışkanlaştırıcı ve hava azaltıcı katkı eklenmiştir. Su/bağlayıcı madde oranı 0.48'dir. Karışım hazırlama işlemi hakkında bilgi verilmemiştir. Basınç dayanımı testi için ϕ 100x200 mm numune, eğilme testi için 100x100x400 mm prizma numunesi alınmıştır. Numunelere 14 gün boyunca $40\pm5^\circ\text{C}$ 'de nem kürü uygulanmıştır (Çizelge 3.5).

- Özbay vd. (2013) [256]; yüksek oranda uçucu kül içeren iki tip karışımın mekanik büyüklüklerindeki değişimi incelemiştir. Karışım tasarımında; PÇ I, F tipi uçucu kül (%1.64 CaO), silis kumu (D_{maks} : 400 μ m) ve PVA lif (V_f =% 2; l =8 mm, d =39 μ m, l/d =205, σ_u =1610 MPa) kullanılmıştır. Kıvam için; 5.1 ve 3 kg/m^3 hiperakışkanlaştırıcı eklenmiştir. Su/bağlayıcı madde oranı 0.27, uçucu kül/ çimento oranı 1.2 ve 2.2 alınmıştır. Karışım hazırlama işlemi hakkında bilgi verilmemiştir.

Hazırlanan karışımların herbirinden basınç dayanımı testi için 50 mm'lik 6 küp numune (28 günlük basınç dayanım düzeyleri 69.3 ve 46.1 MPa düzeyindedir), direkt çekme testi için 152.4x76.2x12.7 mm 6 kupon numune, ayrıca yarma çekme dayanımı ve klorür geçirgenliği için ϕ 100x200 mm numuneler alınmıştır. Numuneler 24 saat kalıpta tutulmuş ve ilk 7 gün boyunca $23\pm2^\circ\text{C}$ 'de % 95 $\pm$ 5 nem düzeyinde plastik kalıplarda saklanmış, daha sonra test olacağı güne kadar $23\pm2^\circ\text{C}$ 'de, % 50 $\pm$ 5 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında kür uygulanmıştır (Çizelge 3.6).

Çizelge 3. 5 Sürdürülebilir kaynakların ECC karışımı ve dayanıma etkisi [213].

Çimento	Uçucu Kül	Agrega		Su	Kimyasal Katkı			Lif		s/bm	f _{b,14} f _{e,14}	
		RC*	silis kumu		HPMC	Süper ak.	Hava azaltıcı	PVA	PET			
kg/m ³								%			MPa	
916	–	–	586	440	0.079	0.015	0.07	2	–	0.48	23.48	14.60
916	–	176	410					2	–		23.11	15.63
916	–	293	293					2	–		26.01	15.95
733	183	–	586					2	–		18.53	15.72
916	–	–	586					1.6	0.4		24.76	13.08
733	183	–	586					1.6	0.4		17.98	13.02

*geri kazanılmış agrega

Çizelge 3. 6 Agregâ ve mineral katkıların karışım tasarımı ve dayanıma etkisi [256].

Çimento	Uçucu Kül C Tipi	Cüruf	Agrega	Su	Kimyasal Katkı	Lif	A/bm	uk/ç	yfc*/ç	f _{b,7}	f _{b,28}	f _{b,90}	f _{b,130}	f _{e,7}	f _{e,28}	f _{e,90}	f _{e,130}
			İnce Kuvars		HRWR	PVA				7	28	90	180	7	28	90	180
			gün		gün	gün				gün	gün	gün	gün	gün	gün	gün	
kg/m³							MPa							MPa			
323	387.6	-	255.8	191.8	5.1	26	0.36	1.2	-	40.07	69.30	75.80	78.56	8.48	12.73	12.80	12.91
			319.7		5.1		0.45			40.91	69.84	72.50	76.20	7.51	11.92	12.19	12.59
			390.8		5.0		0.55			37.39	62.61	67.60	73.80	7.69	11.41	12.42	12.87
			255.8		4.9		0.36			37.49	60.75	65.50	71.40	7.88	11.63	12.04	12.44
			319.7		5.0		0.45			40.03	63.48	66.80	71.90	7.96	11.12	11.98	12.18
			390.8		5.0		0.55			41.62	69.44	72.70	77.30	8.52	12.17	12.62	12.93
	710.6	-	372.1	279.0	3.0		0.36	2.2		30.22	46.13	54.70	59.10	7.36	10.19	11.58	11.64
			465.1				0.45			29.04	45.84	56.80	62.30	7.04	10.79	11.23	11.78
			568.4				0.55			30.32	47.94	58.70	63.40	7.26	10.14	10.03	11.01
			372.1				0.36			27.90	48.74	57.70	63.10	6.59	9.39	10.59	11.17
			465.1				0.45			29.34	50.51	56.50	61.80	7.28	10.27	10.96	11.83
			568.4				0.55			28.62	47.47	54.20	60.03	7.14	9.35	10.13	10.94
	-	387.6	255.8	191.8	5.8		0.36	1.2	59.90	88.55	91.20	92.10	9.92	12.58	12.63	12.71	
			319.7		5.9		0.45		58.00	90.0	93.20	95.20	9.89	12.38	12.70	12.98	
			390.8		6.0		0.55		56.90	86.5	90.70	92.60	9.23	12.19	12.24	12.66	
			255.8		4.9		0.36		60.00	89.6	92.20	95.10	9.78	12.04	12.36	12.87	
			319.7		5.0		0.45		58.10	91.4	94.20	95.80	9.55	12.68	12.90	13.07	
			390.8		5.0		0.55		58.50	87.9	91.10	94.30	9.11	12.50	12.51	12.87	
	-	710.6	372.1	279.0	4.7		0.36	2.2	51.80	76.3	80.30	83.70	8.44	11.50	11.78	12.02	
			465.1		4.1		0.45		50.60	78.5	88.70	88.90	8.69	11.89	11.73	12.11	
			568.4		4.3		0.55		52.80	81.5	86.60	88.60	8.45	11.42	11.35	11.63	
			372.1		3.5		0.36		52.90	79.4	84.20	87.10	8.63	11.29	11.15	11.47	
			465.1		3.6		0.45		50.40	78.0	88.10	89.60	8.73	11.73	11.46	11.88	
			568.4		4.0		0.55		52.60	79.2	82.30	85.30	8.82	11.58	11.82	12.13	

*yfc: yüksek fırın cürufu

- Chen, Yang ve Yao, (2013) [257]; 4 farklı oranda cüruf kullanılan (%50, %60, %70, %80) karışım tasarımının basınç davranışlarına etkisini incelemiştir. Karışım tasarımında; PÇİ, cüruf, ince silis kumu ($D_{ort.} = 110 \mu m$) ve yüzeyi yağ (% 1.2) ile kaplanmış 26 kg/m^3 PVA¹ lif ($V_f = \% 2$, $l = 8 \text{ mm}$, $d = 39 \mu m$, $l/d = 205$, $\sigma_u = 1600 \text{ MPa}$, $E = 42 \text{ GPa}$) kullanılmıştır. Kıvam için; polikarboksil bazlı hiperakışkanlaştırıcı² eklenmiştir. Su/bağlayıcı madde oranı 0.27'dir.

Karışım hazırlama işlemi şu aşamalardan oluşmaktadır :

1. Çimento, silis kumu ve cüruf 1-2 dk. karıştırılmıştır.
2. Su ve kimyasal katkının tamamı eklenerek 3-4 dk. karıştırılmıştır.
3. Yavaşça karıştırılıyorken azar azar PVA lif eklenerek 6-8 dk. daha karıştırılmıştır.

¹ Kuraray Co. Ltd., Japonya.

² by HIT-QIANGSHI concrete technology development Co., Ltd., Çin.

Direkt çekme testi için 12x40x160 mm kupon numune alınmıştır. Numuneler 24 saat kalıpta tutulmuş ve ilk 7 gün $20\pm0.2^{\circ}\text{C}$ 'de % 95 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında, daha sonra test olacağı güne kadar 20°C 'de, % 45 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında kür uygulanmıştır.

- Kim vd. (2003) [2598]; püskürtme amaçlı karışım hazırlamış ve mekanik büyüklüklerini incelenmiştir. Karışım tasarımı; PÇ I ($D_{ort.}=11.7\pm6.8\ \mu\text{m}$), uçucu kül ($D_{ort.}=26.9\pm7.0\ \mu\text{m}$), silis kumu ($D_{ort.}=110\pm14.8\ \mu\text{m}$), kalsiyum alüminat CA ($D_{ort.}=5.5\pm1.5\ \mu\text{m}$) (% 0-5) ve % 0.8 yağ ile kaplı PVA lif ($V_f=\% 1.5$, %2; $l=8.12\ \text{mm}$) kullanılmıştır. Kıvam için; HPMC (% 0.05) ve hiperakışkanlaştırıcı (% 0.75-0.20) eklenmiştir. Su/bağlayıcı madde oranı 0.36, kum/çimento oranı 0.80-0.84'tür. Karışım hazırlama işlemi hakkında bilgi verilmemiştir.

4 tip karışım hazırlanmış ve direkt çekme testi için düşey pozisyonundaki ahşap kalıba (305x300x13 mm) püskürtülen karışımdan 305x76x13 mm boyutlarında kupon numuneler alınmıştır.

- Li vd. (2004) [259]; sıcak ve nemli koşullarda hızlandırılmış yaşlanma testleri ile mekanik büyüklüklerin değişimini incelemiştir. Karışım tasarımı; PÇ I, uçucu kül, ince kum ve yağ kaplı PVA lif ($V_f=\% 2$; $l=12\ \text{mm}$, $d=39\ \mu\text{m}$) kullanılmıştır. Kıvam için; hiperakışkanlaştırıcı (%1.2), HPMC (% 0.049), hava azaltıcı toz katkı (% 0.048)¹ eklenmiştir. Su/bağlayıcı madde oranı 0.42, kum/çimento oranı 1, uçucu kül/çimento oranı 0.11'dir. Karışım hazırlama işlemi hakkında bilgi verilmemiştir.

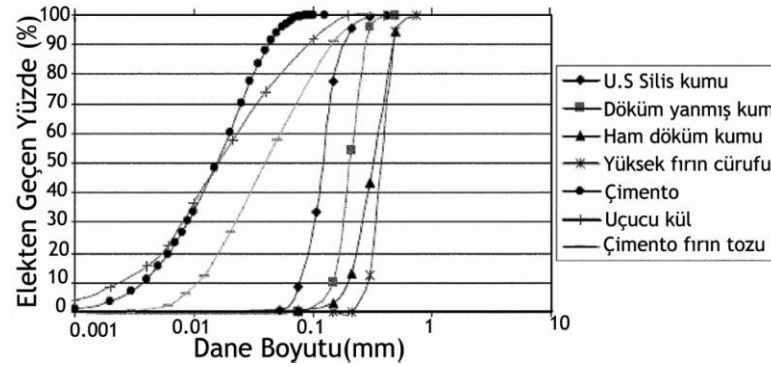
Karışımdan alınan 80x13x30 mm kupon numunelere önce 20°C 'de 28 günlük standart su kürü, daha sonra 60°C 'de 4, 13, 26 hafta su kürü uygulanmıştır. Çekme testi yükleme hızı 0.2 mm/dk'dır.

- Rouse ve Billington (2007) [211]; yüksek moleküler ağırlıklı PE lifin karışım ve dayanıma etkisini araştırmıştır. Karışım tasarımı; PÇ I, silis dumanı, silis kumu ($D=0.3-0.15\ \text{mm}$) ve yüksek moleküler ağırlıklı PE lif ($V_f=\% 1.6$; $l=6.4\ \text{mm}$, $d=8\ \mu\text{m}$, $l/d=800$) kullanılmıştır. Kıvam için; hiperakışkanlaştırıcı eklenmiştir. Su/çimento oranı 0.35'tir. Karışım hazırlama işlemi hakkında bilgi verilmemiştir.

¹ Karışıma giren miktarlar ve karıştırma işlemi hakkında bilgi verilmemiştir.

Kontrol ve lifli 2 karışım hazırlanmış, her karışımından $\phi 75 \times 650$ mm numune alınmıştır. Numunelere 14 gün boyunca standart su kürü uygulanmış, takiben 30°C 'de, % 45 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında tutulmuştur.

- Lepech vd. (2008) [260]; özel alt yapılarda kullanım amaçlı karışımda yüksek oranda mineral katkıları kullanmıştır. Karışım tasarımı; PÇ I, üç farklı tip kum (silis kumu, $D_{maks.}=300 \mu\text{m}$, $D_{ort.}=110 \mu$; ham döküm kumu; yanmış kum) (Şekil 3.22), F tipi uçucu kül ($10-20 \mu\text{m}$) ve yağ (% 0.3-1.2) ile kaplanmış PVA lif ($V_f=\% 2$; $l=8 \text{ mm}$) kullanılmıştır. Kıvam için; hiperakışkanlaştırıcı eklenmiştir. Karışım hazırlama işlemi hakkında bilgi verilmemiştir.



Şekil 3. 22 Malzemelerin dane boyutu dağılımı [260].

- Rathod ve Patodi (2010) [212]; çeşitli çimento/kum oranları ile farklı uzunluk ve yönelimli polyester liflerin çekme dayanımına etkisini incelemiştir. Karışım tasarımı; PÇ I, silis kumu ($D_{maks.}= 300$) ve 0, 15, 30, 45° yönlendirme ile $l=6$ ve 12.5 mm 'lik üç farklı tip polyester esaslı lif kullanılmıştır. Kıvam için; hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.35 alınmış, farklı çimento/kum oranları (1/0.5; 1/1; 1/1.5; 1/2) denenmiştir. Uçucu kül % 10, 20, 30 oranında çimento ile ikame edilmiştir. Karışım hazırlama işlemi hakkında bilgi verilmemiştir. Numunelere deney öncesi 28 gün standart su kürü uygulanmıştır.
- Yamada vd. (2010) [261]; yüksek moleküler ağırlıklı polietilen lifin uzun süreli eğilme,sünme davranışını incelemiştir. Karışım tasarımı; PÇ I (JIS R 5210 Yüksek dayanımlı), uçucu kül tip B (JIS A 6201), silis kumu ($D_{maks.} = 200 \mu\text{m}$), genleşen katkı ve yüksek dayanımlı PE lif ($V_f=\% 1.5$; $l=12 \text{ mm}$, $d=12 \mu\text{m}$) kullanılmıştır. Kıvam için; polkarboksil bazlı hiperakışkanlaştırıcı ve rötre azaltıcı katkı maddesi (alkali oksit alkol) kullanılmıştır. Su/bağlayıcı madde oranı % 30, toplam bağlayıcı madde miktarı 1264

kg/m³'dir. Karışım hazırlama işlemi hakkında bilgi verilmemiştir. Hazırlanan karışımlardan alınan numuneler ile direkt çekme testi ve dört noktalı eğilme testi yapılmıştır.

- Jun ve Mechtcherine (2010) [262]; monotik ve devirli çekme yüklemesi karşısında ECC metaryelin mekanik büyüklükleri incelenmiştir. Karışım tasarımında; PÇİ, uçucu kül, kuvars kumu ($D_{maks} = 60-200$ mm) ve PVA lif (Rec-15, $V_f = 2.25\%$, $l = 12$ mm, $d = 40$ µm, $l/d = 300$, $d = 1.300$ kg/m³) kullanılmıştır. Kıvam için; süperakışkanlaştırıcı, kıvam düzenleyici eklenmiştir. Karışımın basınç dayanımı 33.7 MPa'dır. Karışım hazırlama işlemi hakkında bilgi verilmemiştir. Hazırlanan karışımdan direkt çekme testi için 24x40x100 mm prizma numune alınmıştır. Bütün numuneler 2 gün boyunca 25 °C'de % 65 nem düzeyine sahip kutuda kür uygulanmıştır. Daha sonra 28-32 gün boyunca test olacağı güne kadar plastik folya ile sarılmış ve oda koşullarında saklanmıştır.

- Atahan vd. (2013) [284]; farklı su/çimento oranlarının, PVA lifli ECC'nin mekanik büyüklüklerine etkisini incelemiştir. Karışım tasarımında; PÇİ, silis kumu ($D_{maks} = 0-250$ µm) ve (RSC 15) PVA lif ($l = 8$ mm, $d = 40$ µm) kullanılmıştır (mineral katkı kullanılmamıştır). Kıvam için; polkarboksil bazlı hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır, su/çimento oranı 0.25 ve 0.35'dir. Karışım hazırlama işlemi hakkında bilgi verilmemiştir. Hazırlanan karışımdan 350x600x15 mm plak numune ve 70x70x70 mm küp numune alınmıştır. Numunelere $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de su kürü uygulanmıştır.

Aşağıda bu bölümde incelenmiş olan karışım tasarımlarına ait lif ve kum özelliklerini içeren çizelge yer almaktadır (Çizelge 3.7). Karışım tasarımları ile ilgili daha detaylı tablo Çizelge 3.8'da verilmiştir.

Çizelge 3. 7 ECC karışım tasarımı lif ve kum özellikleri [209-214], [237-261].

Kaynak	LİFLER									KUM	
	Lif	Yağ (%)	V _f (%)	Lif boyu (mm)	Lif çapı (μm)	Boy/çap oranı (l/d)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)	Tür	Dane boyutu
Li vd. (2002)	PVA*	0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.2	2	12	39	307	1620	42.8	6	ince kum	D _{ort} = 110 μm
Fisher vd. (2002)	PE		1.5							ince agrega	D _{ort} = 300 μm
Kim vd. (2003)	PVA*	0.8	1.5,2	8.12	39	205	1620	42.8	6	silis kumu	D _{ort} = 110 μm
Li vd. (2004)	PVA	var ?	2	12	39	307	1631	38.9	6.4	ince kum	
Yang vd. (2007)	PVA	1.2	2	8	39	205	1600			ince silis kumu	D _{maks} = 250 μm, D _{ort} = 110 μm
Rouse ve Billigton (2007)	HDPE		1.6	6.4	8	800				silis kumu	D _{maks} = 300 μm, D _{ort} = 150 μm
Sahmaran vd. (2008)	PVA	1.2	2	8	39	205	1620	42.8	6	silis kumu	D _{maks} = 200 μm, D _{ort} = 110 μm
Lepech vd. (2008)	PVA	0.3-1.2	2	8	39	205	1620	40	6	silis kumu, ham döküm kum, yanmış kum	Silis; D _{maks} = 300 μm, D _{ort} = 110 μm
Yang vd. (2009)	PVA	1.2	2	8	39	205	1600			silis kumu	D _{maks} = 250 μm, D _{ort} = 110 μm
M.Li ve V.C.Li (2009)	PVA		2	12	40	300				silis kumu	D _{ort} = 110 μm
Ahmed ve Mihashi (2009)	PVA ince*		0-3	6, 8, 12	40	150, 200, 300	1600	40	6	silis kumu	D _{maks} = 110 μm
	PVA kalın		0-3	12, 24	100	120, 240	1100	25	10	volkanik kum	D _{maks} = 600 μm
Sahmaran vd. (2010)	PVA	1.2	2	8	39	205	1620	42.8	6	silis kumu	D _{maks} = 200 μm, D _{ort} = 110 μm
Rathod ve Patodi (2010)	Polyester lif V, SR, CT			6, 12.5						silis kumu	D _{maks} = 300 μm
Yamada vd. (2010)	PE		1.5	12	12	100	2600	88		silis kumu	D _{maks} = 200 μm
M.Li ve V.C.Li (2011)	PVA	1.2	2	12	40	300	1620			silis kumu	D _{maks} = 270 μm, D _{ort} = 110 μm
Yun vd. (2011)	PVA		2	12	40	300	1600	40		silis kumu	D _{maks} = 120 μm
	HDPE		1.5	12	12	100	2600	88			
Mechtcherine vd. (2012)	PVA		2.2	12	40	300				kuvars kumu	D _{maks} = 200 μm
Özbay vd. (2012)	PVA	1.2	2	8	39	205	1600			silis kumu	D _{maks} = 200 μm, D _{ort} = 110 μm
Choi vd. (2012)	PVA		2	12	39	307	1600	40		silis kumu	D _{maks} = 105-120 μm
	PET		1.6	10	33	300	953	11			
Sahmaran vd. (2012)	PVA		2	8	39	205				ince kuvars kumu 2 farklı boyutta	D _{maks} = 400, 1000 μm

*Kuraray Co., Ltd. Firmasından alınan PVA lifler kullanılmıştır.

Çizelge 3.8 İncelenen makalelerin toplu ECC karışım tasarımı [209-214], [237-261].

Yıl	Kaynak	Çimento*	Uçucu kül		Kum**	Su	Kimyasal Katkılar				Lif				Diğ. Bileşenler
		F tipi	C Tipi			Hiper akış.	HPMC	Hava azal.	Diğ.	PVA	HDPE	Diğ.	I/d		
		kg/m³					kg/m³				%				
2002	Li vd.	+	–	–	+	+	+	+	+	–	2	–	–	307	–
2003	Kim vd.	+		+ ¹	+	+	+	+	–	–	1.5-2.0	–	–	205	–
2004	Li vd.	+	+	–	+	+	+	–	–	–	2	–	–	307	–
2007	Yang vd.	190-571	683-165	–	456	300-332	5.10-6.80	–	–	–	2	–	–	205	–
	Rouse ve Billigton	+	–	–	+ ³	+	+	–	–	–	–	1.6	–	800	+ ⁴
2008	Sahmaran vd.	570	684	–	455	331	4.9	–	–	–	2	–	–	205	–
	Lepech vd.	+	+	–	+ ⁵	+	+	–	–	–	2	–	–	205	–
2009	Yang vd.	323	453-906	0-453	456	262-302	3.3-9.3	0-0.2	–	–	2	–	–	205	–
	M.Li ve V.C.Li	918 ⁶	–	–	918	300.7	6.9	–	–	36.7 ⁷	2	–	–	300	58.8 ⁸
2010	Sahmaran vd.	558	669	–	446	326	2.30	–	–	–	2	–	–	205	–
	M.Li ve V.C.Li	+ ⁶	–	–	+	+	+	–	–	+ ⁷	2	–	–	300	+ ⁸
2011	Yun vd.	+	+	–	+ ⁹	+	+	+	–	–	2	1.5	–	300 ¹⁰ /100 ¹¹	–
2012	Mechtcherine vd.	505		613.5 ¹	534.2 ¹³	359.3	19.3	3.2	–	–	2.2	–	–	300	2 ¹⁴
	Özbay vd.	375-570	547-847	–	435-455	318-331	3.7-7.5	–	–	–	2	–	–	205	0-150 ¹⁵
	Choi vd.	733-916	0-183	–	293-586 0-293 ¹⁶	440	0.015	0.079	0.07	–	2	–	0-1.6 ¹²	307 ¹⁰ / 300 ¹²	–
	Sahmaran vd.	323	–	0-710.6	255.8-390.8 ¹⁷	191.8-279	3-5.1	–	–	–	2	–	–	205	0-710.6 ¹⁸
2013	Özbay vd.	375,558	669,823	–	435,446	318,326	3, 5.1	–	–	–	2	–	–	205	–
	Chen vd.	246-613	–	–	446	326	13-17.5	–	–	–	2	–	–	205	613-981 ¹⁸

*aksi belirtilmedikçe kullanılan çimento PÇ I tip çimentodur. **aksi belirtilmedikçe kullanılan kum, silis kumu D_{ort} :110 µm'dir.

¹ uk türü bilinmiyor ² CA kalsiyum alüminat ³ Silis kumu D :150 µm ⁴ Silis dumanı ⁵ silis kumu, ham döküm kum, yanmış kum

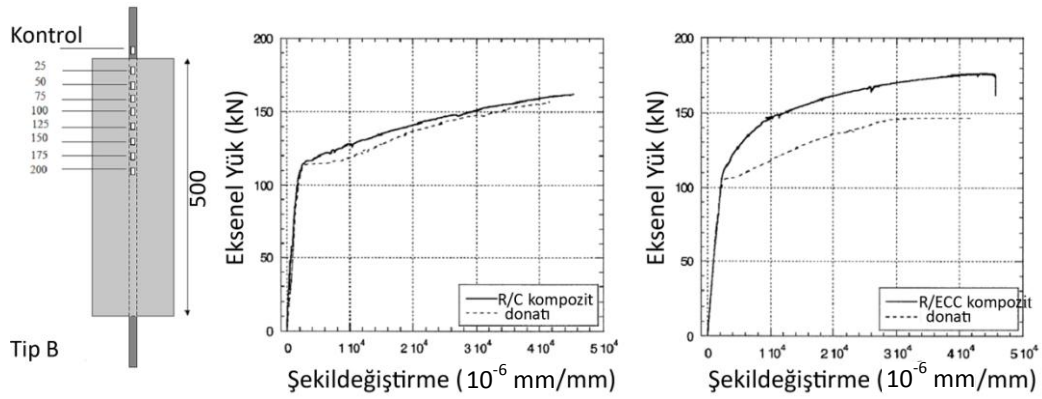
⁶ PÇ III ⁷ Hızlandırıcı katkı ⁸ Strafor köpüğü ⁹ Silis kumu D_{maks} :120 µm ¹⁰PVA ¹¹ PE ¹² PET ¹³ kuvars kumu D: 60-200 µm

¹⁴ Süper emici polimer ¹⁵ Metakaolin ¹⁶ Geri kazanılmış agrega ¹⁷ Kuvars kumu D: 400-1000 µm ¹⁸ Cüruf

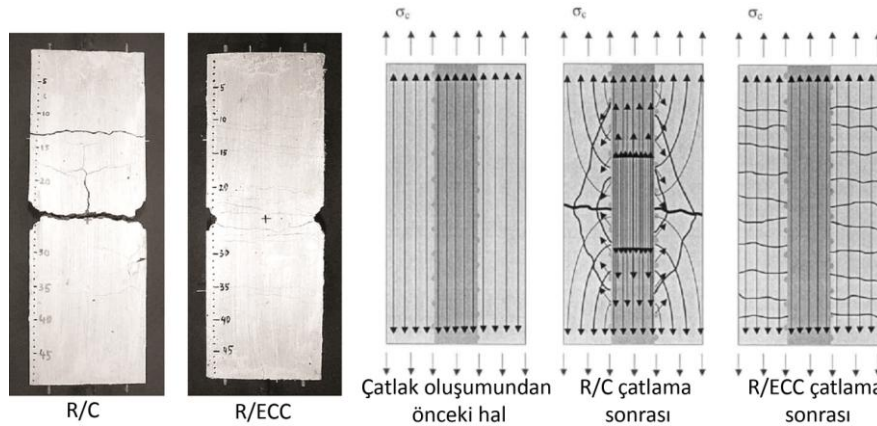
3.2.2 Sünekliği Arttırılmış Lifli Çimentolu Kompozitlerin Mekanik Büyüklükleri

Çoğunluğu PVA olan ayrıca PE, HDPE, PET ve polyester liflerin de kullanıldığı sünekliği arttırılmış lifli çimentolu kompozit deneyleri [209-214], [249-251], [254-259] aşağıda temel özellikleri ile irdelenmiştir.

- $\phi 19$ çelik donatılı PE lifli 120x120x500 mm prizma elemanda aderans deneyi yapılmıştır (Fischer ve Li, 2002). Çekme kuvveti-şekildeğiştirme değişimi incelendiğinde PE liflerin % 4.5 şekildeğiştirme kapasitesi ile süneklikte artış sağladığı ancak dayanımdaki artışın sınırlı kaldığı görülmektedir (Şekil 3.23). ECC numunede ($f_b=80$ MPa) ilk çatlağın oluştuğu düzey 4.5 MPa ($\epsilon=\% 0.01$) olarak belirlenmiştir, maks. çekme gerilmesi 6.5 MPa, maks. şekildeğiştirme $\epsilon_u=\% 4.5$ 'dir. Akma dayanımı 420 MPa olan çelik donatının akma durumuna geldikten sonraki ilave taşıma kapasitesi PE lifler ile sağlanmaktadır, lokal sıyrılma ve ince-sık çatlak oluşumu mevcuttur (Şekil 3.24).

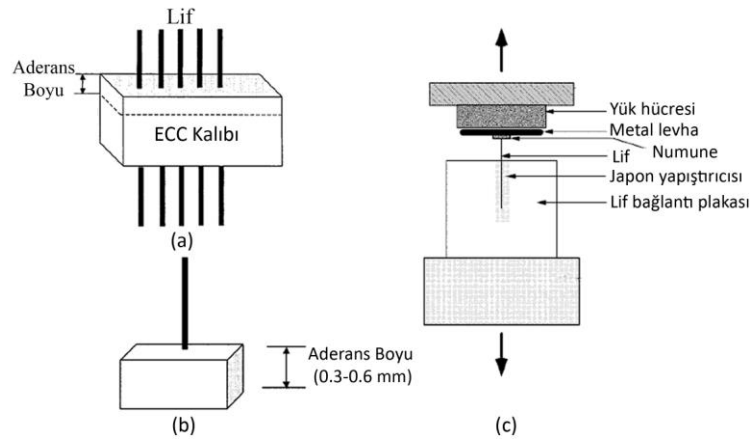


Şekil 3.23 Donatı ve PE-ECC matris içindeki davranışı, çekme kuvveti-şekildeğiştirme değişimi [214].

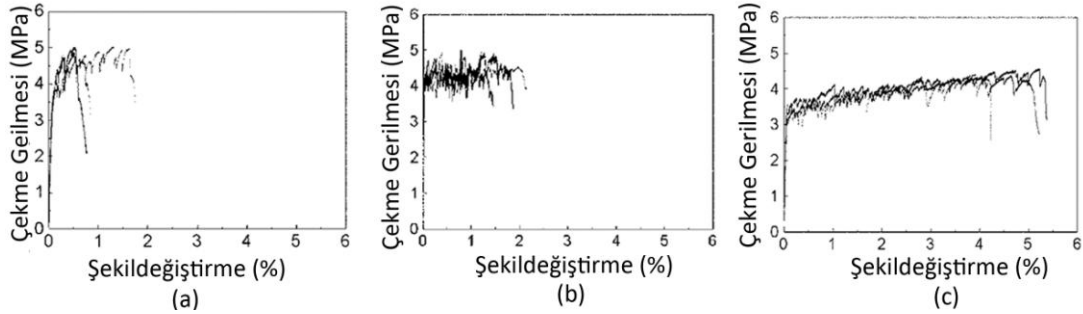


Şekil 3.24 Numune çatlak gösterimi ve betonarme elemana kıyasla çatlak oluşumundaki farklılıklar [214].

- PVA liflerin farklı oranlarda yağ¹ (% 0, 0.5, 0.8, 1.2) ile kaplanmasının mekanik büyüklüklere tek bir lif bazında etkisi incelendiğinde (Li vd., 2002), yağ oranı arttıkça kimyasal aderansın zayıfladığı ve uzama şekildeğiştirmelerinin arttığı görülmüş, en uygun yağ oranı % 1.2 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.25, 3.26). Bu oranda lif, yeterli şekildeğiştirme düzeyine (~%5) ulaşarak sıyrılırken kopmaktadır, tabakalaşma gözlenmemiş, sünek davranış moduna geçilmiştir. Lifler ile matris arasında bağlar koparken yük artmaya devam etmektedir, diğeri bir deyişle pekleşme özelliğı mevcuttur (Şekil 3.27).

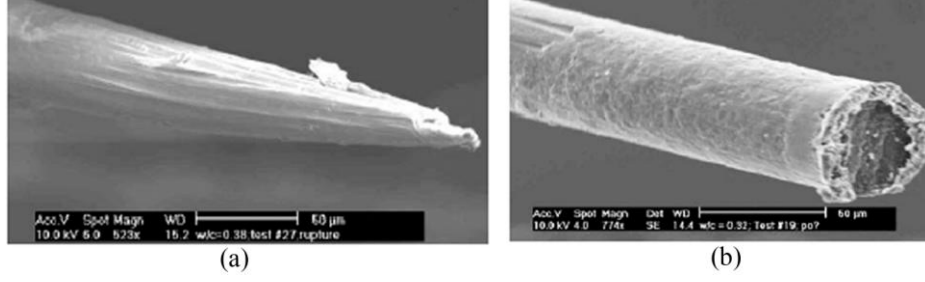


Şekil 3.25 Çekme testi, (a) numune ve liflerin yerleşimi, (b) tek lifli numune, (c) tek lifli numunenin çekme testi kurulumu [209].



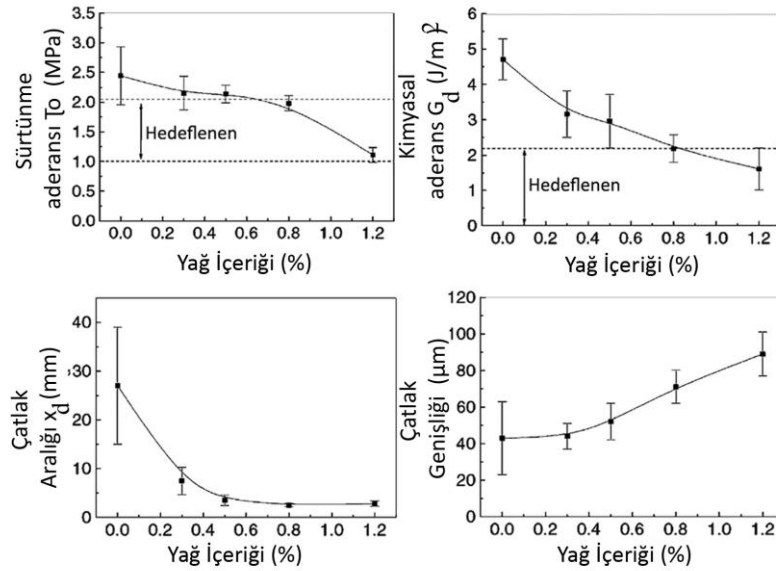
Şekil 3.26 (a) %0, (b) %0.3, (c) %1.2 yağ içeriğinin çekme gerilmesi-şekildeğiştirme değişimine etkisi [209].

¹ Nem almayı azaltıcı madde. Üretici firma tarafından tedarik edilen yağ maddesinin aderans için en uygun kalınlığı 100nm' dur ve karışım sırasında az bir kısmı kaybolmaktadır.

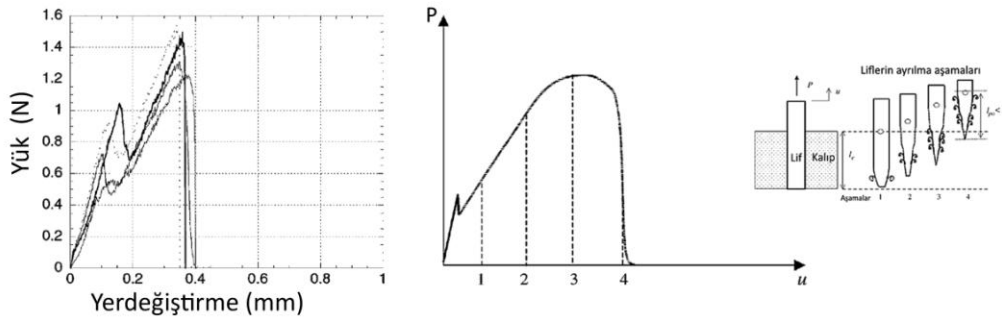


Şekil 3.27 PVA lif üzerinde yağ maddesinin etkisi, (a) yağ maddesi kullanılmayan lif, tabakalanarak kopma; (b) yağ maddesi kullanılmış lif, sıyrılma [209].

Kırılma enerjisi hedeflenen maks. 2 J/m^2 'nin altına düşmüştür. Sürtünme bazlı aderanstaki azalma hızı, kimyasal aderanstakine göre daha yavaştır (Şekil 3.28, 3.29). Artan yağ içeriği ile birlikte çatlak aralığı azalırken çatlak genişliği artmaktadır. Ancak, deneyler tek bir lif üzerinde uygulandığı için yağ etkisinin eleman bazında gözlenmesi gereklidir.

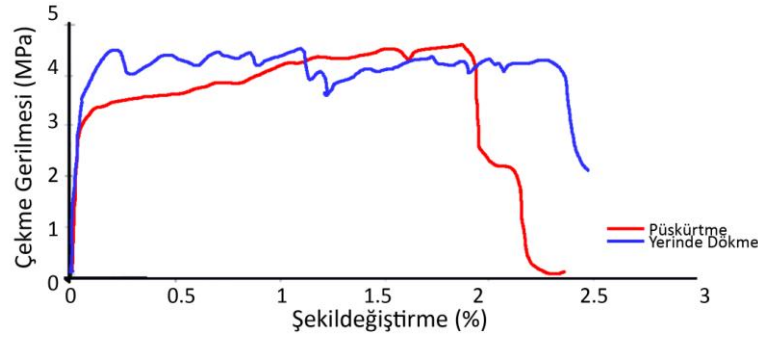


Şekil 3.28 Yağ içeriğinin aderans ve çatlak oluşumuna etkisi [209].



Şekil 3.29 Harç içindeki PVA lifin çekme kuvveti altındaki gerçek ve idealleştirilmiş davranışı [209].

- Püskürtme yöntemi ile yapılan PVA lifli püskürtme ECC ile yerinde döküm, Kim, Kong ve Li, (2003) kaynağında karşılaştırılmıştır. % 0.8 yağ ile kaplı PVA lif ($V_f = \% 1.5$, % 2; $l = 8$ mm), bağlayıcı olarak PÇİ, % 5'i oranında CA çimentosu ve toplam çimentonun % 30'u oranında uçucu kül kullanılmıştır. Maks. dane boyutu 3 mm, su/bağlayıcı madde oranı 0.46, kum/çimento oranı 0.8 alınmıştır. Kıvam için, akışkanlaştırıcının yanında HPMC eklenmiştir. Farklı lif boyları ve dozajları için deneme yapılmıştır. $l = 8$ mm'lik lif ($V_f = \% 2$) pompalanabilirlik açısından en uygun sonucu vermiştir (12 mm'lik lif pompa içerisine yapışmıştır. Ayrıca, yüksek pompa basıncı ile uygulandığında geri sıçrama da yüksek olmuştur). Püskürtme uygulamasında elde edilen maks. şekildeğiştirme % 1.5-2.25 aralığında çıkmıştır (Yerinde döküm, % 25 daha yüksek şekildeğiştirme ile ~ aynı dayanımı vermiştir). Ort. çatlak genişliği ~ 100 μm 'dur. Geri sıçrama oranlarının çok düşük olduğu belirtilmiştir¹ (Şekil 3. 30).

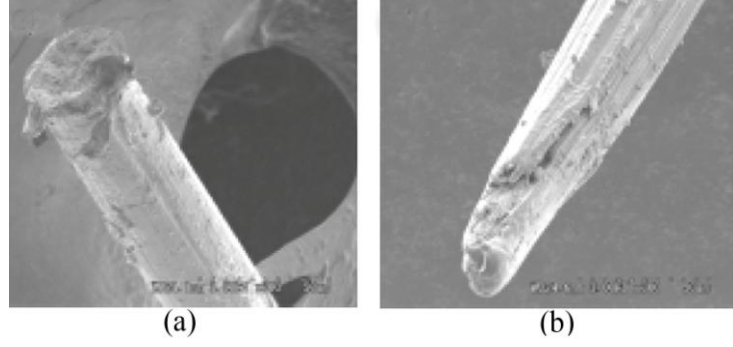


Şekil 3.30 28 günlük direkt çekme-şekildeğiştirme değişimi [258].

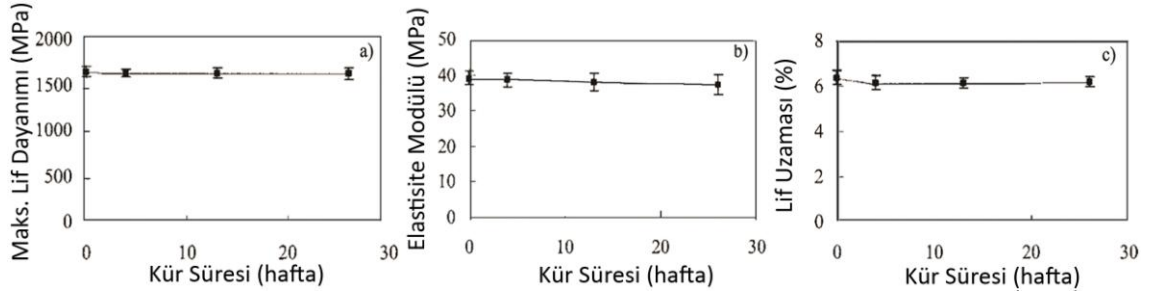
- Yaşlandırma testinin PVA lifli numuneler üzerindeki etkisinin gözlenmesi amacıyla kupon numunelere 28 günlük standart su kürü sonrası 60°C'de 4, 13, 26 hafta su kürü uygulanmıştır (Li vd., 2004), bu süre 70 yıldan daha fazla süreye denk gelmektedir (Şekil 3.31). PVA lifler ($V_f = \% 2$, $\varepsilon_u = \% 6.4$) yağ ile kaplanmıştır, uçucu kül/çimento oranı 0.11'dir. Toplam 26 haftalık yaşlandırma sonunda lifin dayanımı, maks. uzama ve elastisite modülü büyüklüklerinde değişim olmamış (Şekil 3.32), ancak uzama şekildeğiştirme kapasitesi % 4.5'den % 2.7'ye kadar azalmıştır² (Şekil 3.33).

¹ Bir lifli püskürtme beton uygulamasında hava basıncı optimum 0.45 MPa olarak bulunmuştur. Buna karşı gelen geri sıçrama miktarı da % 7.5 olarak elde edilmiştir [121].

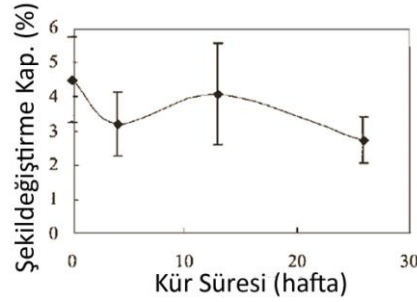
² Dalgalı bu değişim yeniden incelenebilir.



Şekil 3.31 Kupon numuneler üzerinde yaşlandırma testinin elektron mikroskobu görünümü (a) 0,4,13 haftada sıyrılma, (b) 26 haftada tabakalaşma [259].



Şekil 3.32 Sıcak su kürünün lif özelliklerine etkisi [259].

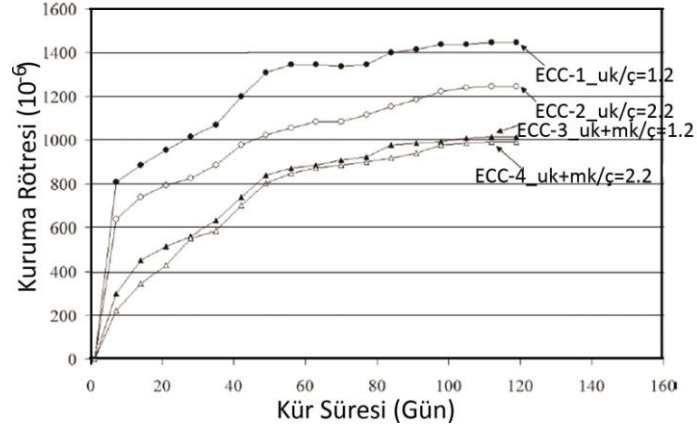


Şekil 3.33 Yaşlandırma testi sonucu numunelerin davranışındaki değişimler [259].

- ECC'de beton basınç dayanımı genellikle 50-80 MPa aralığındadır. Kırılma tokluğunu kontrol etmek için genellikle az miktarda ince kum gereklidir. Yüksek oranda çimento içeriğinin kuruma rötresi üzerindeki negatif etkisi ve çatlak genişliğini azaltmak için E.Yang, Y.Yang ve Li, (2007), % 85'e varan oranda uçucu kül eklemiştir. Kuruma rötresi azalmasına (Şekil 3.34) karşın klor geçirgenliği artmıştır (7 gün boyunca nemli ortamda tutulduktan sonra, $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de 50 ± 4 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında kür uygulanmıştır). Bu nedenle Özbay vd., (2012), kullandığı F tipi uçucu küle ilave olarak metakaolin¹ ekleyerek kuruma rötresini azaltmayı başarmıştır. Ayrıca,

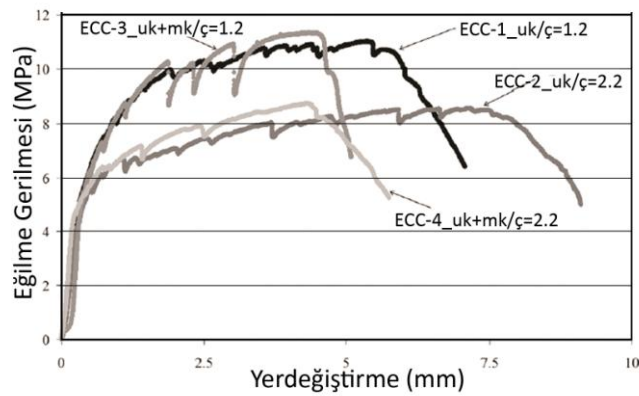
¹ Metakaolin (%60 SiO₂, %30 Al₂O₃, incelik 1390 m²/g) erken dönem mekanik büyüklükleri iyileştirirken alkali-silika reaksiyonu, sülfat etkisi ve klorid- iyon geçirgenliğini azaltır.

metakaolinin inceliği ($1390 \text{ m}^2/\text{g}$) nedeniyle yüksek aktivitesi boşluk oranını hızla azaltmaktadır. Buna karşılık metakaolin, matris yapısını gevrekletirmiş, eğilme dayanımı ~aynı kalırken, yerdeğiştirme ve çatlak miktarı azalmış, çatlak genişliği artmıştır.



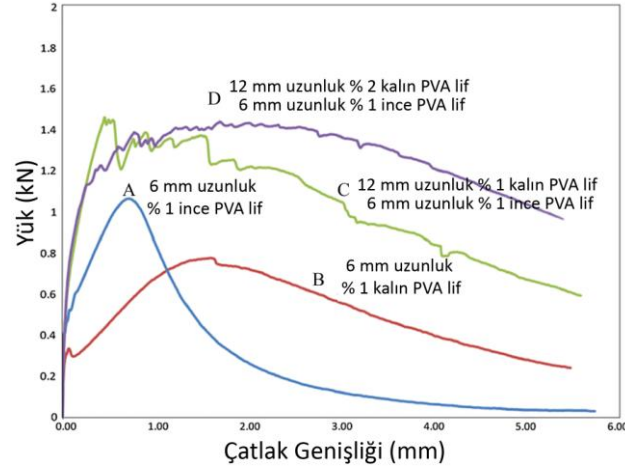
Şekil 3.34 Kuruma rötresi değişimleri [254].

Uçucu külün yüksek miktarda kullanımı, PVA ile matris arasında güçlü kimyasal aderansı azaltma yönünde etki etmiştir. Uçucu küldeki artış çatlak genişliğini azaltırken çatlak sayısı artmıştır. Uçucu külün klorür geçirgenliğini olumlu etkisi daha ileriki yaşlarda görülebilir, zira 7 günden sonra hava kürü uygulanmıştır ve aktivitesi metakaoline göre daha zayıftır. Metakaolinin hızlı aktivasyonundan dolayı kısa dönemdeki klorür iyon geçirgenliği azalır (Şekil 3.35).



Şekil 3.35 Eğilme gerilmesi- yerdeğiştirme davranışları [254].

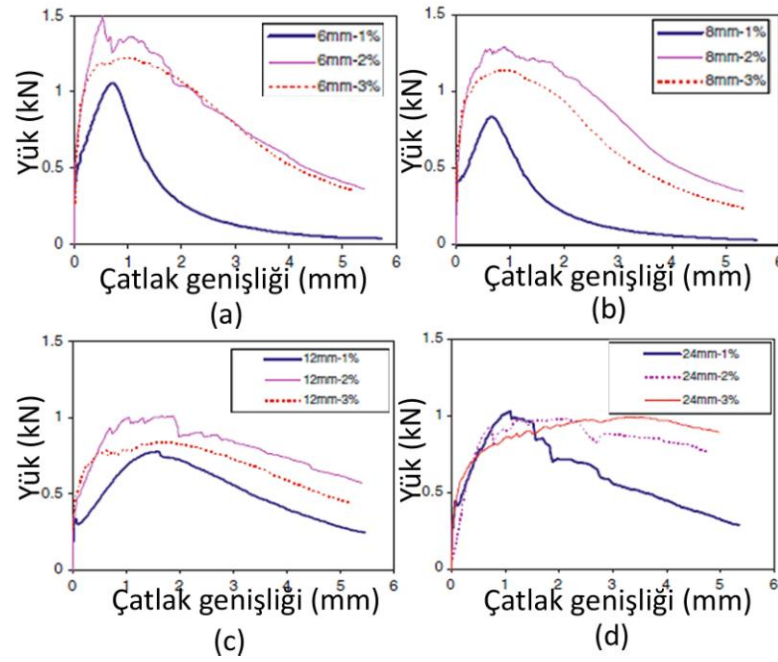
- Ahmed ve Mihashi (2010) çalışmasında, ince ($V_f=\% 1$) ve kalın ($V_f=\% 2$) PVA liflerin¹ eğilmeye etkisi incelenmiştir (Şekil 3.36).



Şekil 3.36 Farklı lif boyut ve oranlarının eğilme davranışı [249].

İnce liflerin daha yüksek elastisite modülü nedeni ile taşıma kapasitesini arttırdığı, kalın liflerin ise büyük çatlaklar arasında köprü kurarak sünekliliği arttırdığı görülmektedir (Şekil 3.37). Ayrıca kısa liflerin hacimce % 2-3 kullanılmasının tokluk, enerji yutma kapasitesi, nihai dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Lif içeriğinin artması, tek tip lif kullanılan kompozitlerin yükleme davranışlarını iyileştirmiştir. %3 lif içeriğinin ise yük taşıma kapasitesini azalttığı sonucuna varılmıştır.

¹ İnce PVA lif ($l=6, 8, 12$ mm; $d=40\mu\text{m}$, $l/d=150, 200, 300$; $\sigma_u=1600$ MPa, $E=40$ GPa, $\epsilon_u=\%6.0$), kalın PVA lif ($l=12, 24$ mm, $d=40\mu\text{m}$, $l/d=120, 240$; $\sigma_u=1100$ MPa, $E=25$ GPa, $\epsilon_u=\%10$).

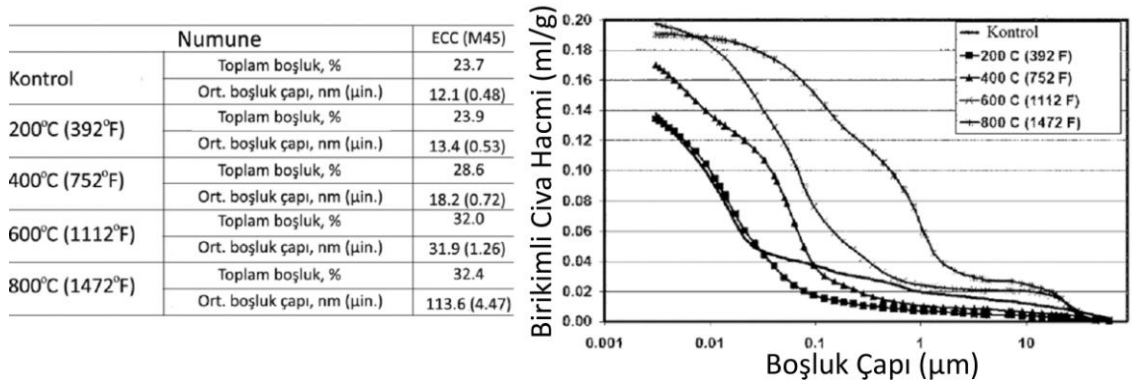


Şekil 3.37 Eğilme-çatlak genişliği değişimi (a,b) ince PVA lifler, (c,d) kalın PVA liflere göre değişimi [249].

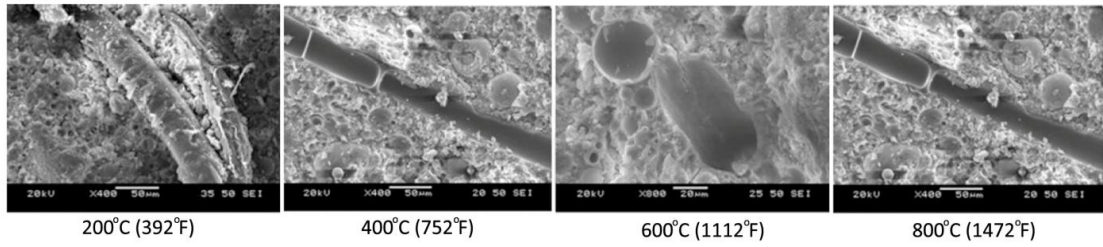
- Özellikle yüksek dayanımlı betonlarda önem kazanan gevreklik özelliği nedeni ile 170°C’de eriyerek buhar basıncının betondan uzaklaşmasını sağlayan PP lif kullanımına alternatif olabilirlik açısından, 45 MPa dayanımlı¹ ECC içinde PVA liflerin² yangın davranışı 1 saat süre ile 200, 400, 600, 800°C’lik sıcaklıklarda denenmiştir (Sahmaran, Lachemi ve Li, 2010). 200°C’de PVA lifli numunelerin mikro yapısında değişiklik gözlenlenmemiş; 400°C’de, PVA lifler eridiği için küçük kanallar oluşarak boşlukların arttığı gözlenmiş, numune yüzeyinde saç teli çatlaklar görülmüştür (Şekil 3.38, 3.39). Basınç dayanımı 200°C, rijitlik 400°C’den itibaren hızla azalmaktadır. 400°C’ye kadar kütle kaybı artarak devam etmiştir, 800°C’de basınç dayanımının sadece 1/5’i kalmıştır (Şekil 3.40). Yüksek oranda uçucu külün kullanıldığı numunelerde 400-600°C’de basınç dayanımdaki azalma normal betona kıyasla daha azdır. Bu durum sözkonusu sıcaklıklarda bozunan Ca(OH)₂’in olmaması ile açıklanabilir.

¹ Uçucu kül/çimento oranı 1.2, su/bağlayıcı madde oranı 0.27, silis kumu ortalama çapı 110 µm’dur.

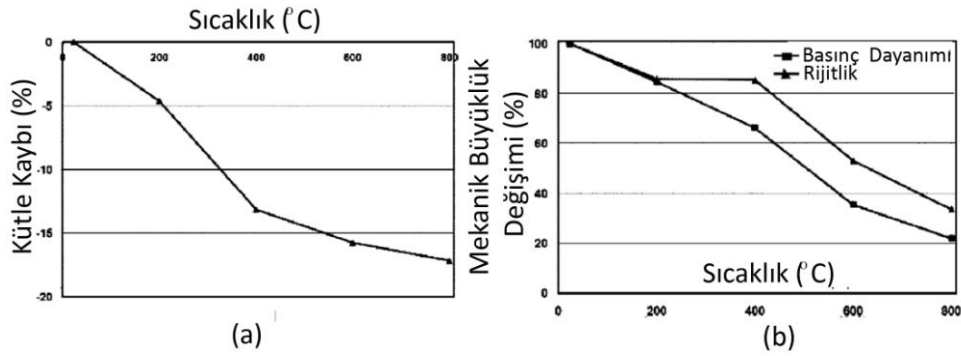
² Ergime sıcaklığı 230°C’dir. % 2 oranında kullanılan PVA liflerin etrafı % 1.2 yağ kaplıdır.



Şekil 3.38 Sıcaklık değişimlerinin boşluk çapı ve birikimli civa hacmine etkisi [250].



Şekil 3.39 Çeşitli sıcaklıklara ait SEM (scanning electron microscopy) görüntüleri [250].



Şekil 3.40 Farklı sıcaklıklardaki kütle kaybı ve mekanik büyüklüklerdeki değişim [250].

- Rathod ve Patodi (2010), farklı uzunluklarda¹ ve kimyasal işlem görmüş polyester tip (SR, CT) liflerin çekme davranışını gözlemiştir. Su/çimento oranı 0.35'dir; 1:05, 1:1, 1:1.5, 1:2 çimento/kum (ç:k) oranları kullanılmış; uçucu kül, çimento ile % 10, 20 ve 30 oranında ikame edilmiştir. Kesilen uzun polyester liflerin ECC matris içinde bırakılan kısımları 6 mm ve 12.5 mm'dir, matris içine 15,30,45° açılar ile yerleştirilmiştir. Çalışma, polyester lifin silikon tabakası etkinliği üzerine odaklanmıştır, üç farklı durum söz konusudur :

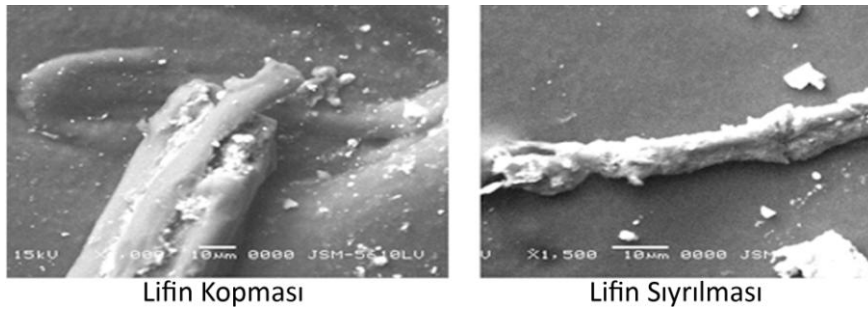
¹ Polyester lifin (Uzunluğuna $d=30 \mu\text{m}$, $\gamma=1.3$, $\sigma_u=1600 \text{ MPa}$) enkesiti üçgen biçimindedir ve eşdeğer daire enkesitin % 45'i kadar alanı mevcuttur.

o “SR” tipi lif aseton çözeltisi, “CT” tipi lif ise NaOH çözeltisinde bırakılarak silikon kaplaması kaldırılmıştır.

o Kontrol numunesinde “V” tipi lif orjinal haldedir, silikon tabakası mevcuttur.

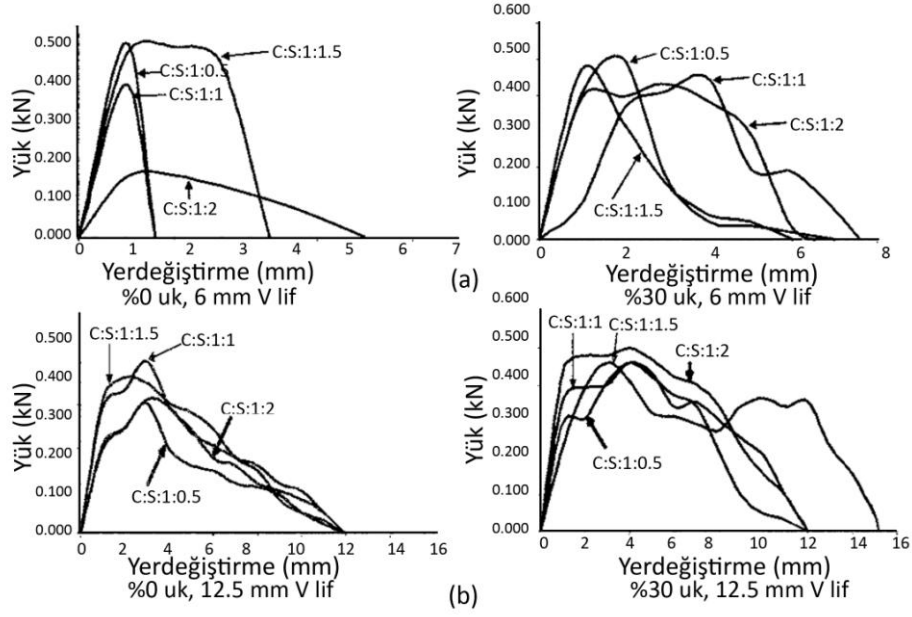
Her bir durum için 6 numune alınmış, 28 gün standart su kürü uygulanmıştır.

Kimyasal işlemler ile SR ve CT liflerin performansı, zayıf ve önceden tahmin edilemez hale gelmiştir (CT polyester liflerin yüzeyi hasar görmüştür). 6 mm liflerde sıyrılma, 12 mm liflerde kopma modu hakimdir (Şekil 3.41). Aderans dayanımı, 6 mm uzunluğundaki SR tipi lifler için V tipi liflerin ~% 50’si düzeyindedir (12 mm liflerde böyle bir farklılık gözlenmemiştir).



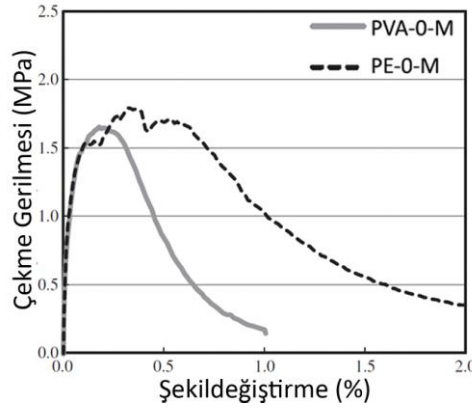
Şekil 3.41 Kimyasal işlem gören liflerin SEM görüntüsü [212].

Aderans dayanımı, çimento/kum oranı 1:1’den itibaren, V tipi 6 mm liflerde uçucu kül yüzdesinden genellikle bağımsızdır. Uçucu kül oranı arttıkça çekip çıkartma enerjisi (uçucu kül/kum oranı 1:1.5 olana kadar) artmaktadır. Uçucu kül oranından bağımsız olarak V liflerde kırılma enerjisi, çimento/kum oranı 1:1.5 için en yüksektir; bu orandan sonra hızla azalmaktadır (Şekil 3.42).



Şekil 3.42 6 ve 12.5 mm lik kontrol (V¹) liflerinin uçucu küllü ve uçucu külsüz yük-yerdeğiştirme değişimi (a) 6 mm, (b) 12.5 mm [212].

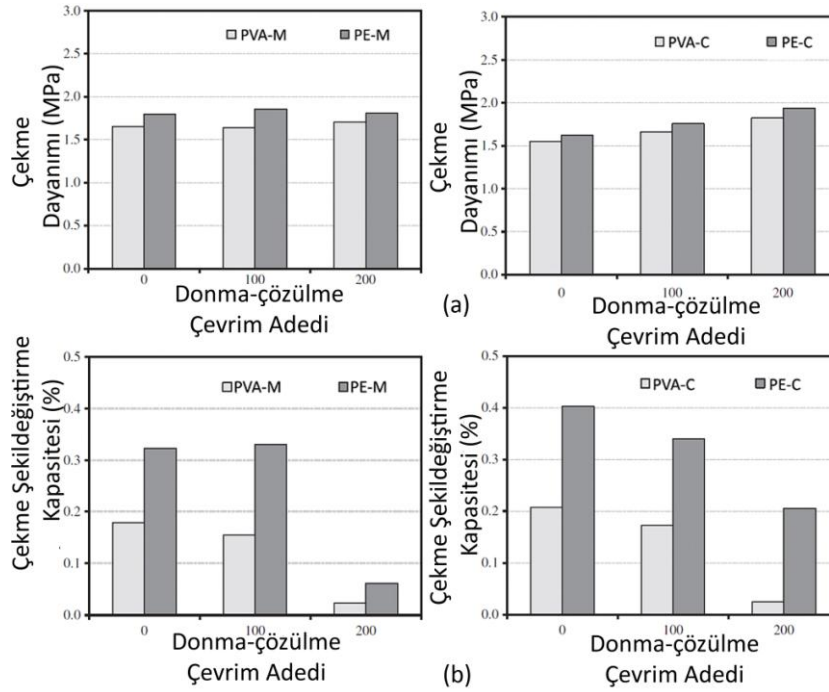
- PVA ve HDPE takviyesinin donma-çözülme etkisinde çekme performansına etkisini incelenmesi amacıyla Yun vd. (2011) kaynağında, $\phi 100 \times 200$ mm numunelere basınç dayanımı ve direkt çekme testi uygulanmıştır, bu deneyler sonucunda PE lifli ($V_f = \% 1.5$, $\sigma_u = 1600$ MPa) karışım PVA lifli ($V_f = \% 2$, $\sigma_u = 2600$ MPa) karışıma göre daha yüksek şekildeğiştirme kapasitesi göstermiştir (Şekil 3. 43).



Şekil 3.43 Eksenel yük altında karışımların mekanik değişimi [251].

¹ V= Orijinal (Virgin) lif

Donma-çözölmeye maruz bırakılan numelerin çekme dayanımlarında belirgin bir değişim meydana gelmemiştir. Tersinir çekme dayanımında az da olsa artış vardır, buna karşılık şekildeğiştirme kapasitesi 200 çevrimde dramatik şekilde azalmıştır (Şekil 3.44).

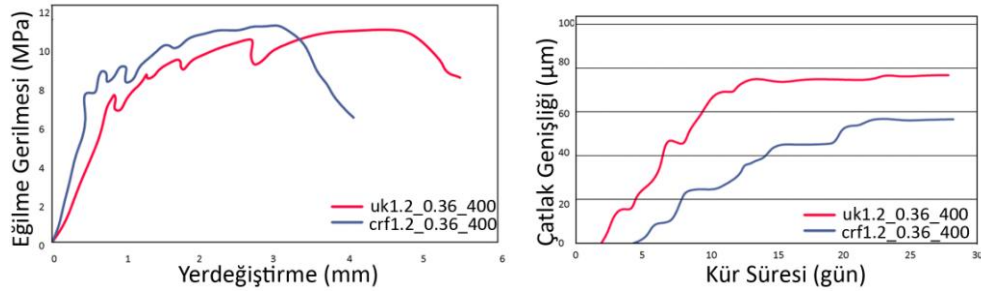


Şekil 3.44 Donma-çözölmeden önce ve sonraki monotonik ve tersinir çekme altındaki değişimler (a) ort. çekme dayanımları, (b) ort. çekme şekildeğiştirme kapasitesi [251].

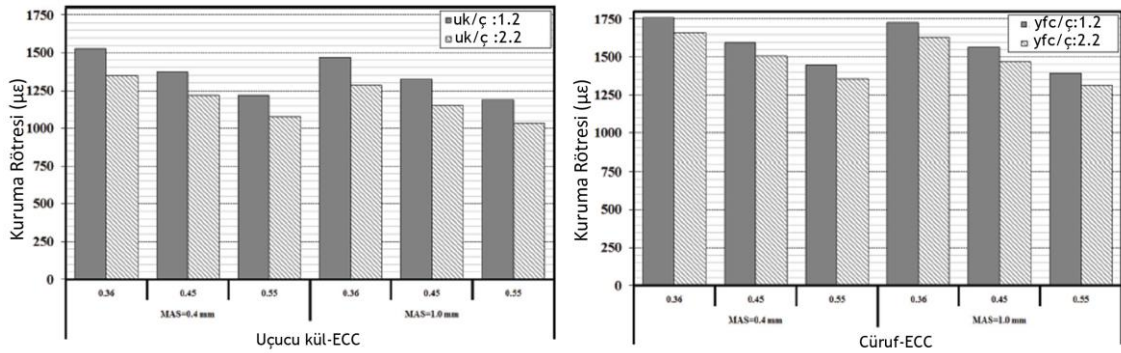
- Agreg a boyutu ve içeriği yanında, mineral katkıların uzun süreli kür uygulamasında süneklik ve rötreye etkisinin gözlenmesi amacıyla yapılan araştırmada (Sahmaran vd., 2012), basınç testi için 50 mm küp numune ve ayrıca prizma numune alınmış, test olacağı güne kadar $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'de, % 50 ± 5 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında kür uygulanmıştır. Çimentoya yakın incelikte F tipi uçucu kül ($290\text{ m}^2/\text{kg}$), daha ince yüksek fırın cürufu ($425\text{ m}^2/\text{kg}$), iki farklı boyutta ince kuvars kumu (D_{maks} 400, 1000 μm) ve PVA lif ($V_f=\%2$, $l=8\text{ mm}$) kullanılmıştır. Su/ bağlayıcı madde oranı sabit ve 0.27'dir.

Çalışmada, 4 tip agrega/bağlayıcı madde oranı (0.36, 0.45, 0.55) kullanılmıştır. Uçucu küllü numuneler, cüruf lu olanlara kıyasla daha düşük çatlak genişliği ve daha fazla yerdeğiştirme kapasitesine sahiptir. Agreg a miktarı ve maks. agrega boyutunun ECC numunelerin ilk çatlak dayanımı üzerinde neredeyse hiç etkisi yoktur. İlk çatlaklağ a kadar olan eğim, cüruf kullanılması durumunda daha diktir. Maks. agrega boyutunun 400 μm ile 1000 μm arasında değişimi durumunda, eğilme dayanımı ve rötreye açısından belirgin

bir farklılık görülmemiştir. Kuruma rötresi, uçucu kül oranının 2.2 olması durumunda 1.2'ye göre daha azalmıştır. Cüruf içeren numunelerde uçucu kül içeren numunelere göre kuruma rötresi biraz daha yüksektir (Şekil 3.45,3.46).

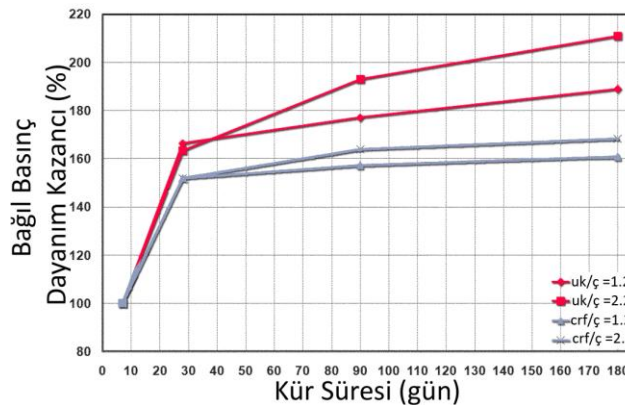


Şekil 3.45 ECC numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı ve çatlak genişliği değişimleri [255].



Şekil 3.46 ECC numunelerin 180 günlük kuruma rötresi değişimleri [255].

F tipi uçucu külün kullanılması cürufa kıyasla 28 günden itibaren hidrasyon hızını daha fazla arttırmıştır. 90 gün ve 180 gün bazında en iyi sonuçlar uçucu kül/çimento oranı 2.2 için elde edilmiştir (Şekil 3.47).

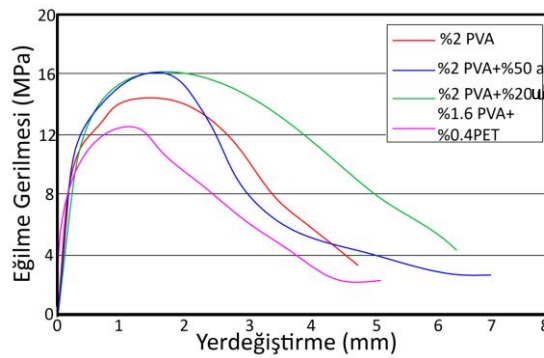


Şekil 3.47 Kür süresine göre basınç dayanım değişimi [255].

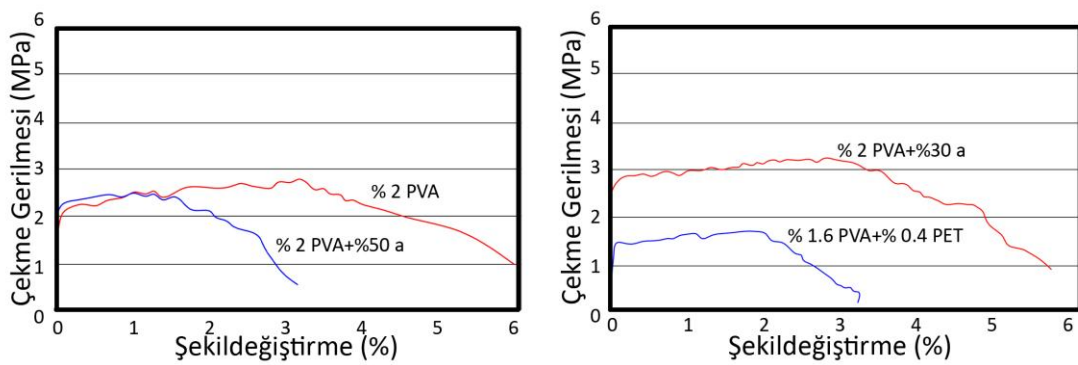
- Sürdürülebilir kaynakların mekanik özelliklere etkisi, Choi vd., (2012) kaynağında, PVA lif (REC 15, $l=12$ mm) ve PET lif ($l=10$ mm) alınarak incelenmiştir. Toplam lif

yüzdesi % 2'dir (% 2 PVA, % 1.6 PVA+ % 0.4 PET, her iki lif için $l/d = 300$). Ayrıca, F tipi uçucu kül (uk) ve geri kazanılmış kum (a) da kullanılmıştır. Su/bağlayıcı madde oranı 0.48'dir. Silis kumunun % 30 ve % 50'si geri kazanılmış kumdur. Eğilme için 100x100x400 mm prizma ve direkt çekme testi için kupon numune almıştır, 14 gün boyunca $40 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de nem kürü uygulanmıştır.

Geri kazanılmış agrega ve uçucu külün karışım tasarımında kullanılması eğilme dayanımını % 8 arttırmıştır. Ancak, PET liflerin kullanımı eğilme dayanımını $\sim$ % 10 azaltmıştır (Şekil 3.48)¹. PVA % 2 durumu için, geri kazanılmış agreganın % 50 oranında kullanılması direkt çekmede maks. şekildeğiştirmeyi % 50 düşürmüştür. Benzer biçimde % 1.6 PVA+% 0.4 PET kullanılması durumunda da şekildeğiştirmeler azalmıştır (Şekil 3.49) ve daha az sayıda daha geniş çatlak elde edilmiştir, çatlaklar arasında köprülenme oluşmamıştır ve mikro çatlaklar düzenli değildir (Şekil 3.50).

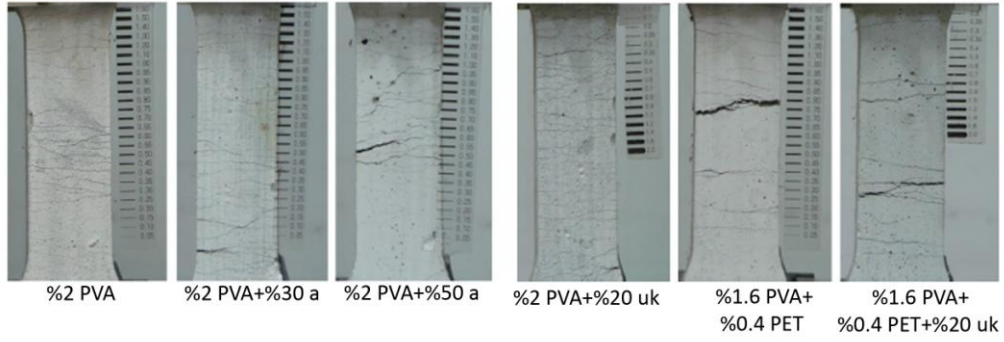


Şekil 3.48 Eğilme davranışı değişimi [213].



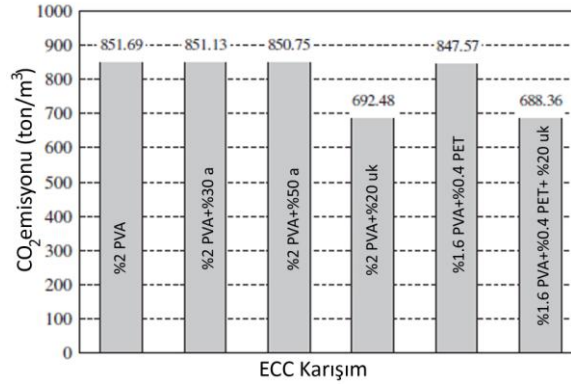
Şekil 3.49 Numunelerin çekme gerilmesi-şekildeğiştirme davranışı [213].

¹ %20 uk ve %50 geri kazanılmış agrega durumları fazla sapma olduğu için tez kapsamında karşılaştırılmamıştır.



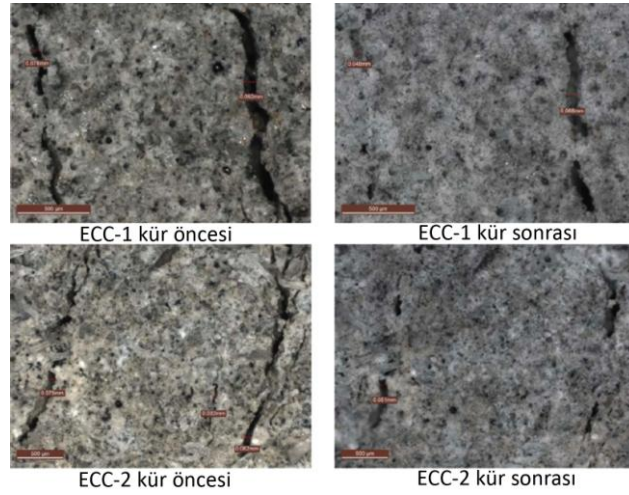
Şekil 3.50 Direkt çekme testi çatlak yayılımı [213].

Çimento+% 2 PVA karışımının CO_2 emisyonu 850 ton/m^3 iken, % 20 uçucu kül kullanıldığında %20 azalmıştır (Şekil 3.51).



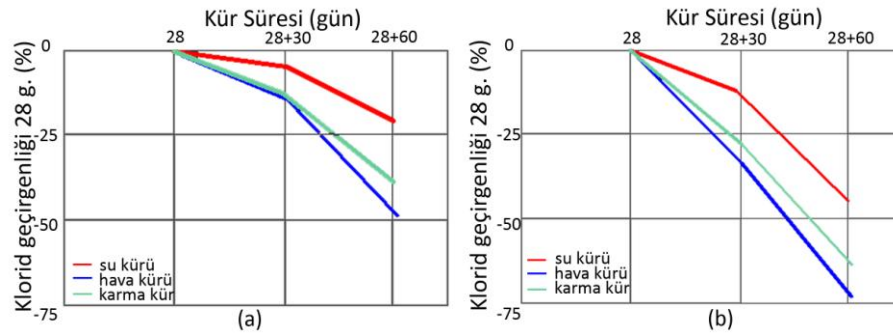
Şekil 3.51 CO_2 emisyonu karşılaştırması [213].

- Yüksek oranda uçucu külün (uk/ç=1.2-2.2) kendiliğinden iyileşme özelliğine etkisi Özbay vd., (2013) kaynağında incelenmiştir. Karışımda F tipi uçucu kül (% 1.64 CaO) ve PVA lif (V_f =% 2, l =8 mm) kullanılmış, su/bağlayıcı madde oranı 0.27 olarak alınmıştır. Hazırlanan karışımlardan yarmada çekme dayanımı testi için $\phi 100 \times 200$ mm numuneler alınmış, 5 cm kalınlığında kesilmiş ve her karışımdan 6 tane disk numune test edilmiştir. Numuneler 7 gün boyunca $23 \pm 2^\circ \text{C}$ 'de % 95 ± 5 nem düzeyinde bekletilmiş, daha sonra test olacağı güne kadar hava kürü uygulanmıştır. Numunelere 28 günden sonra 30 ve 60 gün esas olmak üzere sürekli su kürü (Şekil 3.52), % 50 ± 5 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında hava kürü ve karma kür uygulanmıştır.



Şekil 3.52 60 gün su kürüne maruz kalan numunelerin önceki ve sonraki çatlak değişimleri [256].

28 güne kadar hava kürü uygulanan numunelerde çatlak genişliği ve sayısında belirgin bir değişiklik olmamıştır. 28 gün+60 günlük su kürü ve karma kür; iyon geçirgenliği, özellikle çatlak genişliği ve sayısını azaltmıştır. Deneysel çalışmalarda 2. en iyi sonucu veren kuru ıslak kür rejimidir, sonuçlar su kürüne oldukça yakın çıkmıştır. Artan uçucu kül içeriği, çatlak genişliğini $\sim 70 \mu\text{m}$ 'den $40 \mu\text{m}$ seviyesine azaltmıştır. Sonuç olarak, daha önceki çalışmaların aksine karışımda uçucu kül oranının artması, suda nem koşulları altında klorür-iyon geçirgenliğini azaltmıştır. ECC-2 numunelerinde bu durum belirgin bir şekilde gözlenmiştir (Şekil 3.53).

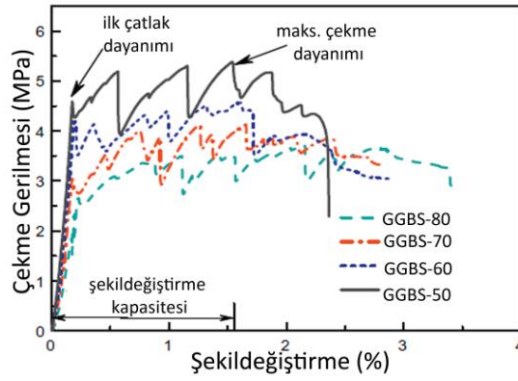


Şekil 3.53 Kontrol numunelerinin 28 günlük klorid geçirgenliği-kür süresi değişimi (a) ECC-1, (b) ECC-2 [256].

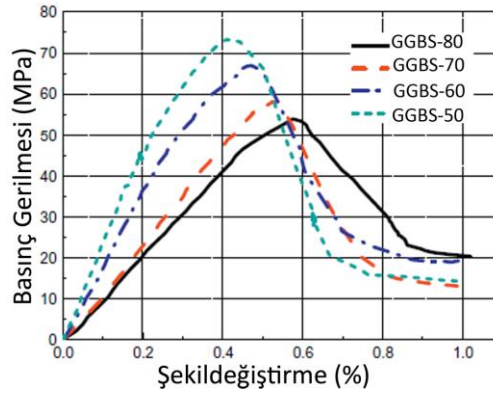
- 4 farklı oranda cüruf kullanılan (% 50, 60, 70, 80) karışım tasarımının basınç davranışlarına etkisi, Chen, Yang ve Yao, (2013) kaynağında incelenmiştir. Karışımda cüruf, yüzeyi yağ (%1.2) ile kaplanmış PVA lif ($V_f = 2\%$, $l = 8 \text{ mm}$) kullanılmıştır. Su/bağlayıcı madde oranı 0.25'tir. Hazırlanan karışımlardan, direkt çekme testi için $12 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ kupon numune, yarı-statik basınç testi için $70.7 \times 70.7 \times 220 \text{ mm}$ prizma

numune, dinamik basınç testi için ϕ 40 mm numune alınmıştır. Numuneler 24 saat kalıpta tutulmuş ve ilk 7 gün $20 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 'de %95 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında, daha sonra test olacağı güne kadar 20°C 'de, %45 nem düzeyinde laboratuvar şartlarında kür uygulanmıştır.

Cürufu ECC dayanımının uçucu küllü olana kıyasla daha yüksek ve maks. şekildeğiştirmesinin daha düşük olduğu belirtilmiştir [263-264]. % 50 cürufu ECC'nin 28 günlük yarı-statik basınç dayanımı 73 MPa'a, % 80 cürufu olanın 53 MPa'dır (Şekil 3.54). Cüruf içeriği % 50'den % 80'e arttırıldığında direkt çekme testinde ilk çatlak dayanımı 4.5 MPa'dan 2.5 MPa'a azalmıştır. Maks. şekildeğiştirme ise % 2.4'den artarak % 3.5 düzeyine ulaşmıştır (Şekil 3.55).



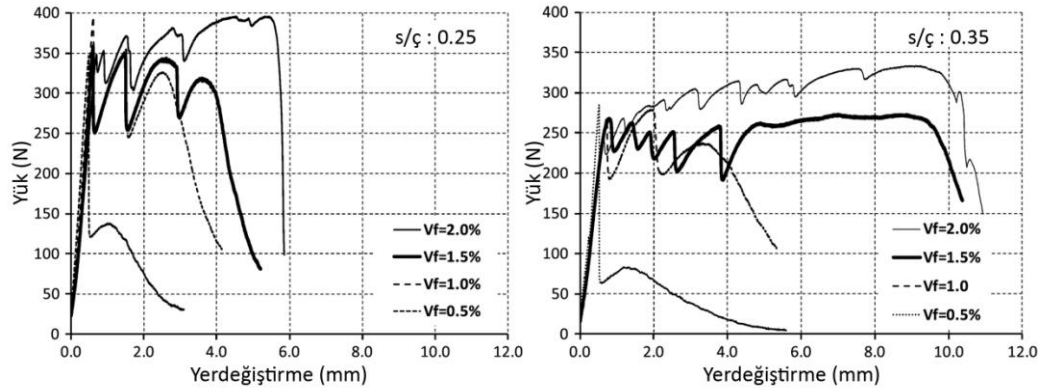
Şekil 3.54 Direkt çekmede çekme gerilmesi-şekildeğiştirme eğrisi [257].



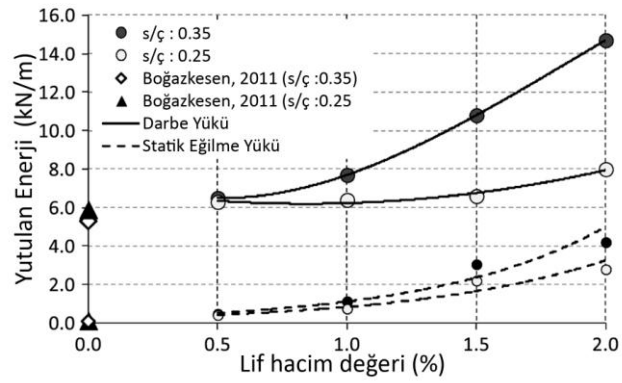
Şekil 3.55 Yarı-statik basınç, gerilmesi-şekildeğiştirme eğrisi [257].

- 2 farklı tip su/çimento oranı (0.25, 0.35) ve farklı PVA lif yüzdelerinin mekanik büyüklüklere etkisi Atahan vd. (2013) kaynağında incelenmiştir. Su/çimento oranındaki artış, diğer bir deyişle ara yüzey aderansındaki azalma, yerdeğiştirmeyi olumlu etkilemiştir ancak doğal olarak yük düzeyi azalmıştır (Şekil 3.56). PVA lifli elemanda,

darbe etkisi altında enerji yutma kapasitesi, statik yükleme durumuna kıyasla oldukça artmaktadır. Yutulan enerji, lif yüzdesi ve su/çimento oranına bağlı olarak artmaktadır (Şekil 3.57).



Şekil 3.56 Yük- yerdeğiştirme değişimleri [284]



Şekil 3.57 Yutulan enerji- lif hacim değeri değişimi [284]

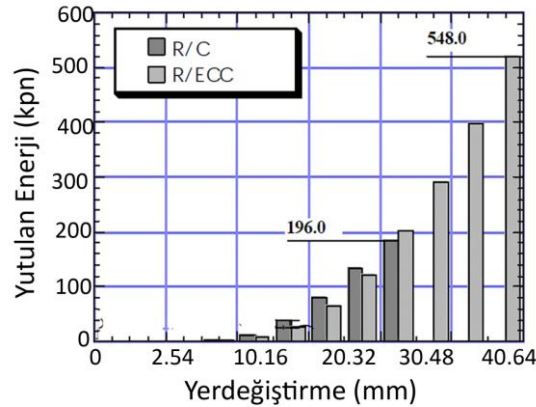
3.2.3 Sünekliği Arttırılmış Lifli Çimentolu Kompozitlerin Uygulama Çalışmaları ve Uygulama Örnekleri

PVA lifli ECC; kendiliğinden yerleşebilir özellikte, istenen şekli alabilen, çevresel etkilere karşı (aşınma, darbe, klor) dayanıklı ve hepsinden önemlisi sünekliği yüksek bir malzemedir. Aynı zamanda azalan çimento içeriği nedeniyle CO₂ emisyonlarının azaltılması açısından da sürdürülebilir bir malzemedir. Yüksek süneklik özelliği ile yerinde dökme betonarme yapılarda onarım ve güçlendirme, perde bağ kirişleri, ön üretimli elemanlar ve kaya patlamasına karşı lifli püskürtme beton tasarımı için uygundur. Son yıllarda kullanım alanları artmıştır; seyyar rampalar, istinat duvarı, köprülerde dilatasyon derzi tabliye birleşimleri, perde bağ kirişleri, taşıyıcı ve dekoratif amaçlı beton bloklar, koruma kanalları ve baraj onarımı alanlarında başarıyla uygulanmıştır [265-266].

3.2.3.1 ECC Uygulama Çalışmaları

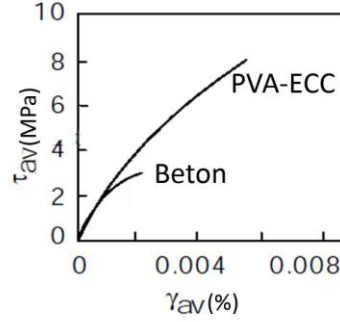
Michigan Üniversitesi, Tokyo Üniversitesi, Kajima Şirketi ve Japonya'daki Araştırma Enstitüsü tarafından; ECC'nin kiriş-kolon birleşimlerinde, korozyona karşı betonarme kirişlerin kaplanması, betonarme perde duvar davranışının iyileştirilmesi, betonarme yapı takviyesi ve yük altında kayma davranışları ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir :

- Mishra ve diğ. (1995) [267]; betonarme yapıda kiriş-kolon birleşim bölgesinde PE lifli ECC kullanımını araştırmıştır. Eğilme etkisinde yutulan enerji, betonarme birleşim bölgesine kıyasla 2.8 kat artmıştır (Şekil 3.58).



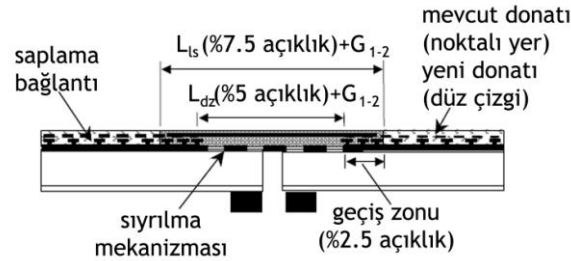
Şekil 3.58 Kolon-kiriş birleşimlerinin enerji yutulması değişimi [267].

- Kabele vd. (1997) [265]; betonarme perdelerin kayma davranışının iyileştirilmesi amacı ile PVA-ECC sismik paneller kullanılmıştır. Yapı dayanımı ve sünekliğin arttığı izlenmiş, daha büyük sismik yüklerin daha fazla şekildeğiştirme kapasitesi ile taşınabileceği görülmüştür (Şekil 3. 59).



Şekil 3. 59 Kayma gerilmesi-şekildeğiştirme değişimi [265].

- Köprü kirişlerinin birleşim yerlerindeki genleşme derz bölgeleri problemli bölgelerdir, kullanılan malzemelerin dayanım ömrü kısadır. Oysa, hizmet ömrü boyunca çekme gerilmeleri ve çatlak oluşumuna dayanıklı malzemeler gereklidir. PVA lifli ECC, bu süreksizlik bölgelerinin süreklilik kazanması ve kalıcı onarımına olanak sağlamıştır (Şekil 3.60).



Şekil 3. 60 ECC bağlantı döşemesi [268].

3.2.3.2 ECC Uygulama Örnekleri

ECC; Japonya, Kore, İsviçre ve daha birçok ülkede birçok kez uygulanmıştır [266]. Uygulamalar ve faydaları aşağıda özetlenmiştir :

1. Köprü kirişlerinin yorulma etkisinde çekme şekildeğiştirme kapasitesini olumlu etkiler.
2. Betonarme yapılarda iyi bir enerji sönümleyicidir.
3. Yüksek çekme gerilmelerine maruz kalsa da çatlak genişliği 50-70 μm ile sınırlıdır.

Ayrıca,

4. Baraj ve sulama kanallarının beton yüzeyinde meydana gelen aşınmaların onarımı,

5. Alkali-silika reaksiyonunun neden olduğu bozulmaların onarımı,
 6. Viyadük yüzeylerinde karbonatlaşma kökenli korozyon hasarının onarımı
- gibi amaçlarla kullanılır.

- **Köprü tabliyesi uygulaması;**

Köprülerde ECC katmanı ilavesi eğilme dayanımını arttırmaktadır. 2004’de Hokkaido’da (Japonya) trafiğe açılan uzunluğu ~1000 m, orta açıklığı 340 m olan olan Mihara O’hashi Köprüsü tipik bir örnektir. Çelik tabliye üzerine 4 cm kalınlığında (toplam 800 m³) dökülen ECC katmanı ile yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir (Şekil 3.61).



Şekil 3. 61 Mihara Ohashi köprüsü (Japonya) uygulama öncesi ve uygulama sonrası [269].

- **Dayanıklı ve sürdürülebilir altyapı uygulaması;**

Donma-çözülme, yaşlandırma, yorulma ve aşınma testlerine maruz kalabilmesi ECC malzemenin dayanıklılığını belirtmektedir. Yapılarda kullanı beton ve çeliğe kıyasla uygulandığı yapının hizmet ömrünü arttırmaktadır. 2005’de 94 nolu yol üzerindeki Grove Street köprüsü (Şekil 3.62) PVA lifli ECC (225 mm kalınlık) ile sürdürülebilir şekilde onarılmıştır (Enerji ve CO₂ emisyonunu açısından). Böylece köprülerin 60 yıllık ekonomik servis ömürleri % 16 düzeyinde artabilmektedir. Hem Michigan Üniversitesi hem de Michigan Department of Transportation; ECC’nin uzun ömürlü olduğunu doğrulamak için geçen 4 yıllık gözlem sonrası performansın azalmadan devam ettiğini ifade etmiştir [270].



Şekil 3. 62 Grove Street Köprüsü (Michigan), ECC ile derzin ortadan kaldırılması işlemi [271-272].

- **İstinat duvarı uygulaması;**

Japonya'daki Gifu istinat duvarı 70 yıl önce inşa edilmiştir. İstinat duvarının genişliği 18 m ve yüksekliği ~5 m'dir. Alkali-silika reaksiyonu nedeni ile 1994'de istinat duvarının çatlakları epoksi ile doldurulmuştur. 2003'de ise çatlaklar, PVA lifli ECC enjekte edilerek onarılmış (Şekil 3.63), 7 ay sonra bu kısımlarda çatlak gözlenmemiştir. 10 ayda 0.05 mm, 24 ayda 0.12 mm'den daha küçük çatlak gözlenmiştir, sonraki bir yıl yalnızca mikro çatlaklar görülmüştür.



Şekil 3. 63 İstinat duvarı onarımı (a) onarımdan önce, (b) onarımdan sonra [273].

- **Püskürtme onarım baraj uygulaması;**

Tünel kaplamaları, güçlendirme/onarım çalışmalarında püskürtme işlemi uygulanmaktadır. Hiroshima yakınlarındaki Mitaka barajı aşırı zarar görmüş, baraj yüzeyinde çatlaklar, pul pul dökülmeler ve su sızıntıları oluşmuştur. Baraj, ilk olarak akıntı yönünde 33 m'den 44 m'ye yükselmiştir (Şekil 3.64). 2003 yılında 500 m²'lik baraj yüzeyi, çatlaklara karşı geçirgenliği azaltmak üzere püskürtülen 30 m³ PVA lifli ECC (kalınlık 30 mm) ile onarılmıştır (Şekil 3.65), yeni tabaka 1.5 m² aralık ile alttaki beton yüzeye sabitlenmiştir.



Şekil 3. 64 Püskürtme onarım uygulaması (a) püskürtme uygulaması, (b) anlatımlı gösterim [273].



Şekil 3. 65 Mitaka Barajı (Hiroshima) bugünkü hali [273].

- **Viyadük kiriş uygulaması;**

ECC'nin matris yapısının düşük gaz ve sıvı geçirgenliğinin karbonatlaşmayı geciktirdiği düşünülmektedir (Genellikle, demiryolu viyadük yüzeylerinde karbonatlaşmaya karşı organik astar boya kullanılmaktadır.). Shizuoka'da bulunan viyadük kirişlerinde trafik yüklerinden dolayı oluşan eğilme çatlaklarına karşı, 2005'de Kajima firması tarafından, 10 mm kalınlığında PVA lifli ECC ($V_f = \% 2.1$) enjekte edilmiştir (Şekil 3.66), karbonatlaşmayı engellediği hızlandırılmış karbonatlaşma testi ile tespit edilmiştir.

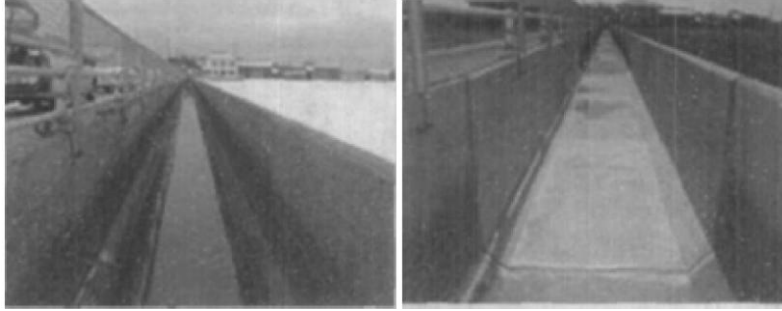


Şekil 3.66 Viyadük kiriş onarımı [271], [273].

- **Su kanal uygulaması;**

Su kanallarında kanal yüzeylerinde agregalar belirlemekte, kanalın yan duvarları pul pul dökülmekte ve aşınmaktadır. Shinga'da bulunan Chau su kanalı'nda (yan duvar yüksekliği 1.1 m, genişliği 1.5 m) kanal yüzeylerinde agregalar belirmiş, yan duvarları aşınmış ve 1 m

uzunluğunda 1 mm genişliğinde çatlaklar meydana gelmiştir. Keza Seridanno kanalı'nda da (yan duvar yüksekliği 1.1 m, kaya şev yüksekliği 2.4 m, genişliği 2.05 m) zamanla aynı hasar oluşmuştur. Bu iki su kanalında oluşan hasar önce suyla temizlenmiş, normal harç ve çok yüksek dayanımlı polimerli harç kullanılarak onarılmaya çalışılmıştır. Ancak bir ay sonra çatlaklar oluştuğu gözlenmiş, 2005 yılında Seridanno kanalının yan duvarına 6 mm, alt duvarına 10 mm kalınlıkta ECC püskürtülerek onarım yapılmıştır. Daha sonra gözlem yapıldığında herhangi bir çatlağa rastlanmamıştır (Şekil 3.67).



Şeki 3. 67 ECC ile onarılmış su kanalı [266], [272].

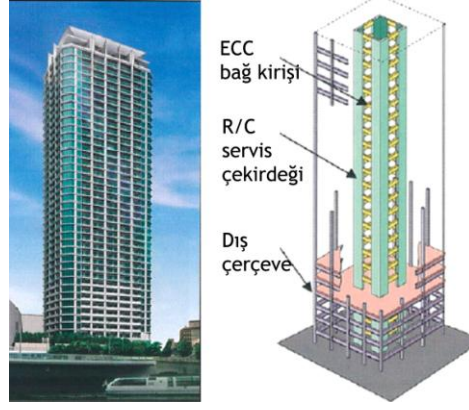
- **Yüksek katlı binalarda, deprem direncine karşı;**

Yapımı 2006'da tamamlanmış Tokyo'da 27 katlı, 95 m yüksekliğinde Glorio Roppongi binasında, deprem sırasında sismik enerjinin yutulması ve kayma şekildeğiştirmelerini azaltmak için 54 PVA lifli ECC bağ kirişi (her katta 2 kiriş) tasarlanmıştır (Şekil 3.68), aynı zamanda inşaat maliyeti de azaltılmıştır.



Şekil 3. 68 Glorio Roppongi binası ve enerji yutulmasını sağlayan ECC bağlantı kirişi [273].

Yapımı 2007'de tamamlanmış 41 katlı Nabeaure Yokohama Kulesi de benzer yapıya sahiptir, her katta 4 adet bağ kirişi mevcuttur (Şekil 3. 69).



Şekil 3. 69 Nabeaure Yokohama Kulesi [273].

- **Estetik olarak istenilen şeklin verilebilmesi;**

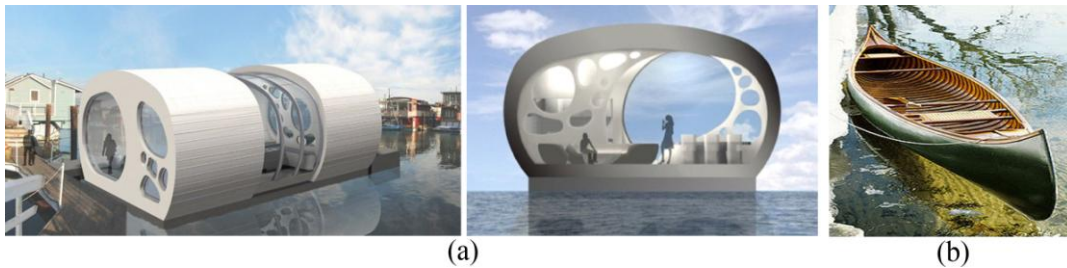
Yüksek süneklik ve pekleşme özelliği sayesinde çeşitli amaçlar için ince kesitli levhalar üretilabilmektedir (Şekil 3.70).



Şekil 3. 70 (a) 2 mm kalınlığında eğilebilir levha, (b) telefon kılıf tasarımı [274-275].

- **Düşük yoğunlukta hafif ECC;**

ECC; hava boşlukları, cam kabarcıklar, polimer küreler ve/veya agrega eklenerek geliştirilmiştir. Çok üstün çekme dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesi özelliği nedeni ile yüzer ev, kano ve filikalar yapılabilmektedir (Şekil 3.71).



Şekil 3. 71 PVA-ECC ile tasarım (a) yüzer ev, (b) kano [276].

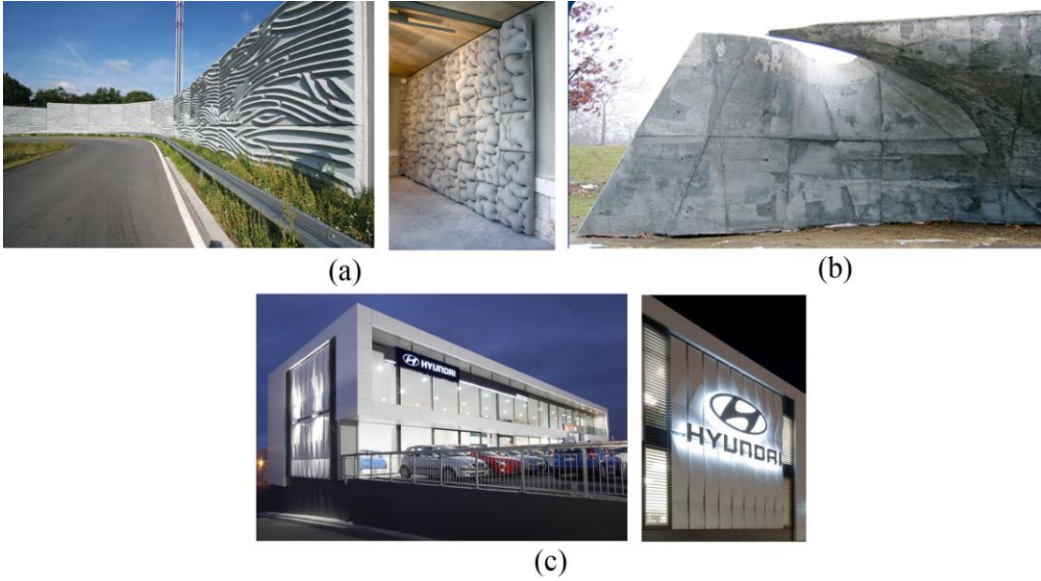
- **Kalıplanabilir ECC;**

Preslenebilir ECC ilk kez 1998’de geliştirilmiştir (Şekil 3.72); böylece preslenmiş boruların, diğer lif takviyeli kompozit borulara kıyasla yük ve şekildeğiştirme kapasitesi daha fazla olmaktadır.

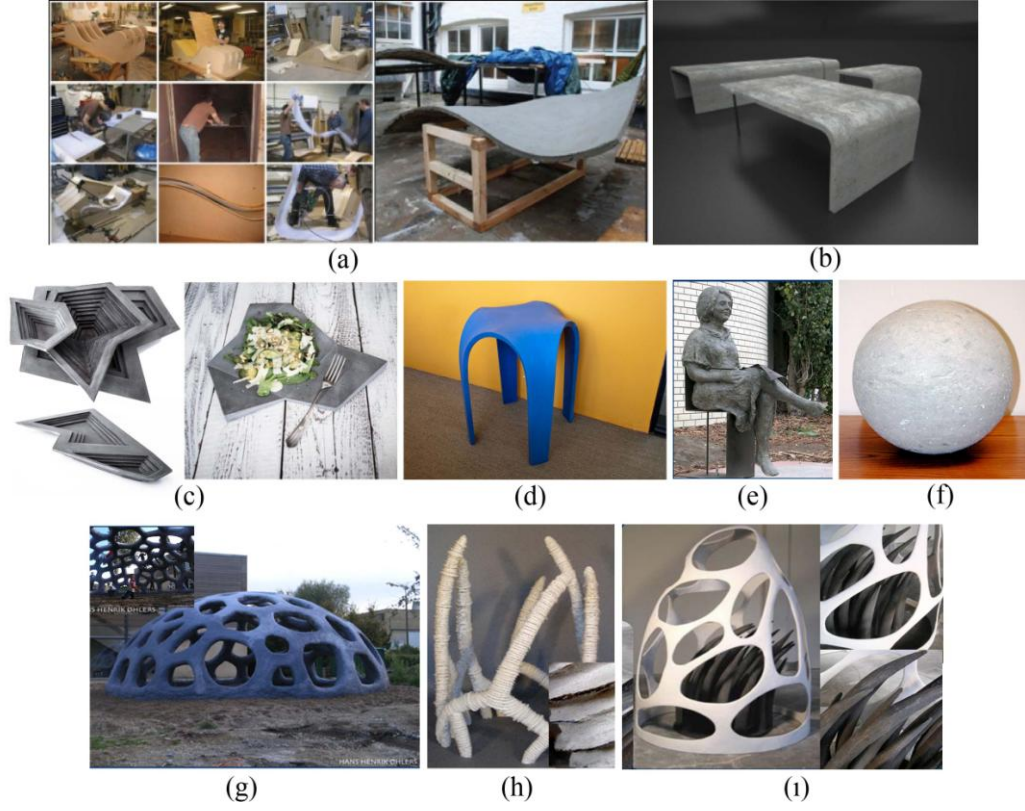


Şekil 3. 72 ECC’nin borularda kullanımı [273].

Kalıplanabilir özelliği son zamanlarda cephelerde (Şekil 73), dekoratif malzemeler vb. uygulamalarda (Şekil 3.74) sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 3. 73 ECC örnekleri, (a) duvar kaplaması olarak, (b) duvar elemanı olarak, (c) Hyundai binasında cephe kaplaması olarak [277-279].



Şekil 3. 74 ECC uygulamaları, (a) kalıplama örneği, (b) mutfak tezgahı, (c) yemek tabağı, (d) sandalye, (e) E. Yonza kadın heykeli (Kanada), (f) bowling topu (2002), (g) heykel kubbe (Danimarka), (h) heykel "Consensus" (California), (i) heykel "Transformation" (California) [280-283].

BÖLÜM 4

DENEYLER

4.1 Genel

Standart olarak cam lif ile üretilen GFRC cephe elemanlarının bazalt lif seçeneği (BFRC) ile olabilirliği üzerine, Fibrobeton Düzce Tesislerinde, 9 Ocak 2014’de başlayan deneysel bir araştırma çalışması yürütülmüştür. Çalışma kapsamında, cam lif ve bazalt lif kullanılarak yerleşebilirlik, fiziksel ve mekanik büyüklükler araştırılmıştır. Söz konusu deneyler daha sonraki deneyler için kontrol amaçlı olup, çimentolu klasik tasarım uygulanmıştır; araştırma daha kapsamlı bir deneysel sürecin ilk basamağını oluşturmaktadır.

4.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Karakteristik Özellikleri

Deneylerde standart malzemeler aynen uygulanmış; TS-EN 197-1 CEM II/B-L 42.5R¹, agrega olarak sadece ince silis kumu², lateks polimer³ ve kıvam için polikarboksil bazlı hiperakışkanlaştırıcı⁴ kullanılmıştır.

Çimento ve silis kumu dane boyutunun hacimsel tane dağılımı Şekil 4.1’de verilmiştir. Buna göre çimento için en yaygın tane aralığı 10-31 μm ’dur, hacimsel olarak %60’ı bu aralıktadır. Silis kumu için en yaygın tane aralığı 160-500 μm ’dur, hacimsel olarak %70’i bu aralıkta yer

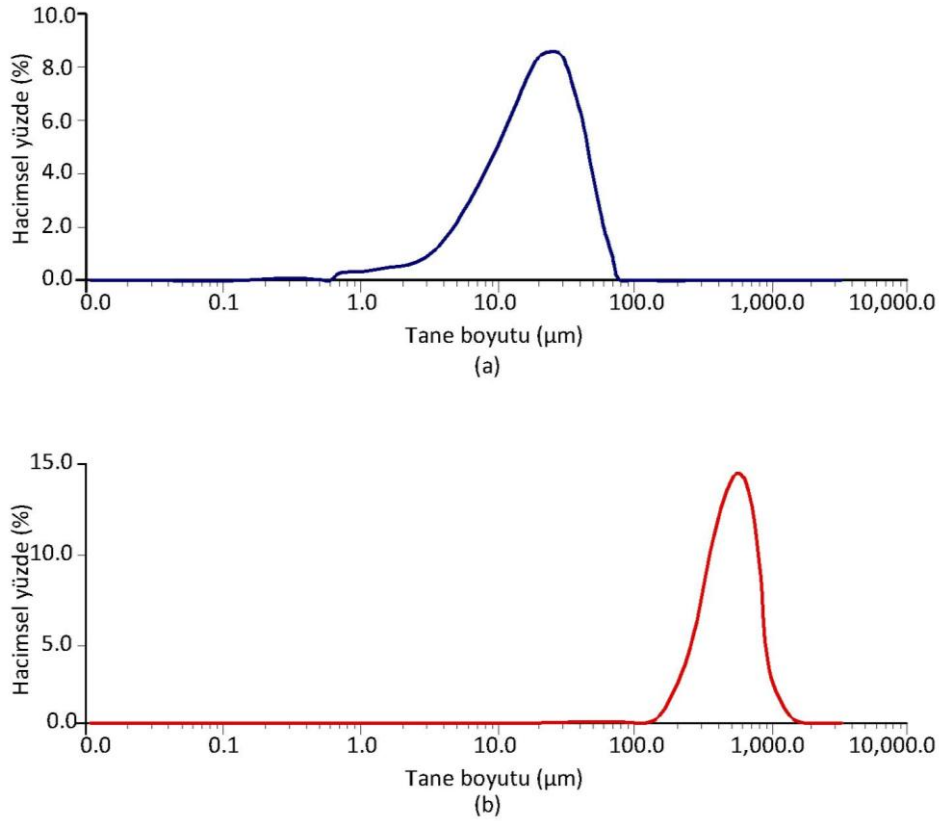
¹Çimsa CEM II/B-L 42.5 R (SiO_2 : % 17.5, CaO : % 63.5, Al_2O_3 : % 3.3, Blaine inceliği : 5500 cm^2/gr , priz baş: 120 dk., priz sonu : 145 dk.)

²Çeliktaş firmasından temin edilmektedir.

³Forton® fiziksel hali sıvı, yoğunluğu 1.1 g/cm^3 .

⁴Betton® fiziksel hali sıvı, beyaz renkli, 20°C’deki yoğunluğu 1.2 g/cm^3 .

almaktadır. Cam lif ve bazalt lifin (Şekil 4.2) fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4. 1 Tane boyutu dağılımı (a) çimento, (b) silis kumu

Çizelge 4.1 Lif özellikleri

Lif	Lif boyu (mm)	Lif çapı (µm)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Kopma uzaması (%)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Kaynak
Cam	12-24	14-20	3500	72	4.5	2.68	Vetrotex CEM-FIL®
Bazalt		13	4840	89	3.15	2.80	Technobasalt®



(a)



(b)

Şekil 4.2 Kullanılan lif tipleri (a) cam lif, (b) bazalt lif

4.3 Karışım Tasarımı ve Üretim

Deneylerde iki tip üretim biçimi uygulanmıştır: Döküm (*premix*) ve püskürtme (*spraying*).

o Döküm için karışım bileşenleri topluca Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu aşama için herhangi bir mineral katkı kullanılmamıştır. Deneylerde su/çimento oranı 0.33, silis kumu/çimento oranı 1.13 olup, polimer ve hiperakışkanlaştırıcının çimentoya ağırlıkça oranı sırasıyla % 4 ve 1.3’dir. Püskürtme tipi üretim için, hiperakışkanlaştırıcı hariç karışım aynen uygulanmıştır.

o Döküm tekniğinde 12, 24 mm’lik cam ve bazalt lifler ($V_f = \% 2$), püskürtme tekniğinde ise sadece 24 mm’lik bazalt lifler ($V_f = \% 2$) kullanılmıştır.

o Sonuçların kontrolü açısından lifsiz üretimler (panel ve küp) de gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2 Döküm (*premix*) karışım bileşenleri

Lif Tipi	Çimento	Silis kumu	Su	Polimer	Hiperakış *	Lif
	kg/m ³					
Cam	862	978	284.5	34.5	11.2	53.6
Bazalt						56

* Püskürtme tipi üretimde kullanılmamaktadır.

Döküm için karışım hazırlama işlemi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır¹;

1. Su, polimer ve akışkanlaştırıcı karıştırılarak homojen dağılım sağlanmıştır².
2. Önce çimentonun 1/3’ü eklenmiş, daha sonra kum ve çimentonun kalanı sırasıyla eklenerek homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır².
3. Hazırlanan lifsiz karışım 300 devir/dk.’lık düşey eksenli mikserde 2.5 dk. karıştırılmıştır.
4. Ardından hazırlanan harç, 50 devir/dk.’lık yatay eksenli mikserde konulmuş ve üzerine lifler azar azar eklenerek 0.5 dk. karıştırılmıştır³ (Şekil 4.3).

¹Yerleşebilirliğin araştırıldığı ilk denemede, harç karışımı düşey eksenli mikserde 300 devir/dk. ile 2.5 dk. karıştırılmış, ardından aynı mikserde karışım azar azar lif eklenmiştir. Ancak, bazalt lifli karışımda pamuklaşma olmuş yayılma oluşmamıştır. Benzer biçimde üretilen cam lifli karışımda ise yayılma 3.1 cm olarak ölçülmüştür. Yerleşebilirliğin sağlanabilmesi açısından liflerin karıştırma yöntemi değiştirilmiştir.

²Standart prosedür gereği

³Daha uzun süreli karıştırma slump kaybı/topaklanmaya neden olmaktadır.



Şekil 4.3 Karışım hazırlama aşamaları

Karışım da topaklanmaya rastlanmamıştır. Yayılma değeri lifsiz için 21 cm; bazalt lifli karışım da 12 mm lif için 16 cm, 24 mm lif için 14 cm; cam lifli karışım da 12 mm lif için 19 cm, 24 mm lif için 17 cm ölçülmüştür (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Yayılma ölçümü (a) lifsiz, (b) lifli

Döküm yöntemi ile üretilen her bir karışım dan 1,7 ve 28 günde kırılmak üzere 6 adet 600x600x12 mm boyutlarında panel ve 12 adet 50 mm'lik küp numune alınmıştır (Şekil 4.5). Püskürtme yönteminde ise sadece panel numuneler alınmıştır (Şekil 4.6). Üretilen tüm numuneler 1 gün kalıpta tutulduktan sonra levhalar (270^{mm}x50^{mm}x12^{mm}) halinde kesilerek, 20±2°C ve % 35 nem düzeyindeki laboratuvar ortamında kür süresince bekletilmiştir.



Şekil 4.5 Tipik panel, küp numune kalıp formları ve yerleştirilmiş durum

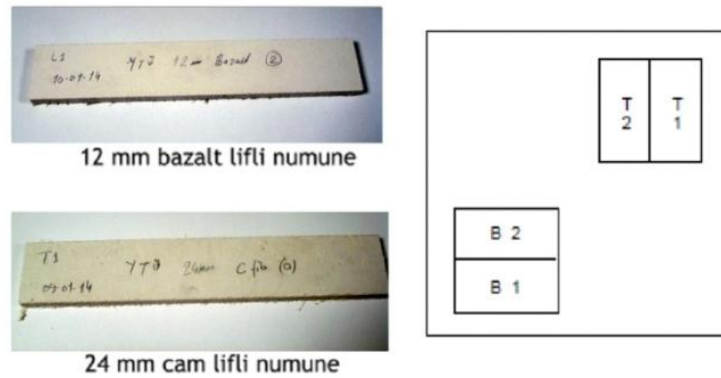


Şekil 4.6 Bazalt lifli püskürtme uygulaması

4.4 Uygulanan Testler ve Değerlendirmesi

Üretilen numunelere aşağıdaki testler uygulanmıştır. Deneyler ile ilgili yönetmelikler ise özet olarak EK A'da verilmiştir.

o Panellerden, birbirine dik doğrultuda alttan ve üstten çıkartılan levhalardan 1,7 ve 28 günde en az 4'er numuneye (Şekil 4.7), TS-EN 1170-5:1997 standardı esas alınarak, Testometric Mikro350 tipi cihaz ile dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır¹.



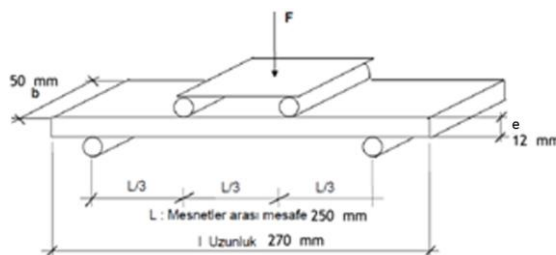
Şekil 4.7 Panellerden çıkartılan numuneler

50 mm'lik küp numunelere TS-EN 1170-4/5:1997 standardı esas alınarak, TCS tipi cihaz ile basınç testi uygulanmıştır.

o TS-EN 1170-6:1997 standardına göre, 28 günlük levhalar üzerinde Nuve FN-400 tipi cihaz ile kuruma tayini ve RANTEK tipi cihaz ile su emme testi uygulanmıştır.

o Fibrobeton firmasının TS-EN 1170-6:1997 standardına uygun olarak tasarladığı ve ürettiği tam otomatik kabine yerleştirilen paneller üzerinde, 50 çevrimde ıslanma-kuruma etkisi incelenmiştir. Her bir çevrim 6 saat olmak üzere, süreç 13 günde tamamlanmaktadır (Şekil 4.8) .

¹Tipik eğilme test düzeneği ve standart mesafeler aşağıda verilmiştir.





Şekil 4.8 Islanma-kuruma etkisi kabin görünümü

4.5 Deneyler ve Değerlendirilmesi

Cam ve bazalt lifler ile üretilen numunelerin deney sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir.

- *Döküm* yöntemi ile üretilmiş 24 mm cam ve bazalt lifli panellerden çıkartılan levhaların eğilme testi sonuçları, istatistiksel büyüklükleri ile birlikte Çizelge 4.3, Şekil 4.9 ve 4.10'da verilmiştir. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.9 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır :

- o Maks. eğilme gerilmesi σ_{MOR} , harçta ilk çatlağın oluştuğu ve lifler vasıtasıyla lineer olmayan şekildeğiştirmelerin başladığı σ_{LOP} gerilme düzeyinin 1,7 ve 28 gün bazında ~2 katıdır.

- o Erken dayanımlı ve inceliği yüksek bir çimento kullanılması ve lif ile matris arasında sıyrılmayı azaltan yönde aderans artışı nedeni ile, numunelerin ilk 7 günde 28 günlük σ_{MOR} düzeyine ulaştığı söylenebilir, 7 günden 28 güne kadar dikkate değer bir artış söz konusu olmamaktadır.

- o Cam ve bazalt lifli numunelerde 1 günlük σ_{MOR} dayanımı, 7 günlük dayanımın % 65'i mertebesindedir.

- o Sadece çimento kullanılarak, döküm yöntemi ile 7 ve 28 günde, σ_{MOR} için 15.5 MPa düzeyi elde edilebilmektedir.

- o Cam lifli numunelerde, ϵ_{MOR} 'un 7 ve 28 gün bazında birbirine denk olduğu söylenebilir.

- o Bazalt lif ile 7 günde ulaşılan ϵ_{MOR} cam life denk olup, % 1'e yaklaşmaktadır. 28 gün bazında ise, cam lifli numunelerin ϵ_{MOR} değerlerinde bir değişim gözlenmezken, bazalt lifli numunelerde % 33 azalma meydana gelmiştir.

- o İstatiksel olarak, dayanım ve şekildeğiştirmelerdeki değişkenlik katsayısı maks. %16.5'dur.

Çizelge 4.3 24 mm'lik liflerle üretilen panellere ait levhaların eğilme test sonuçları (döküm)

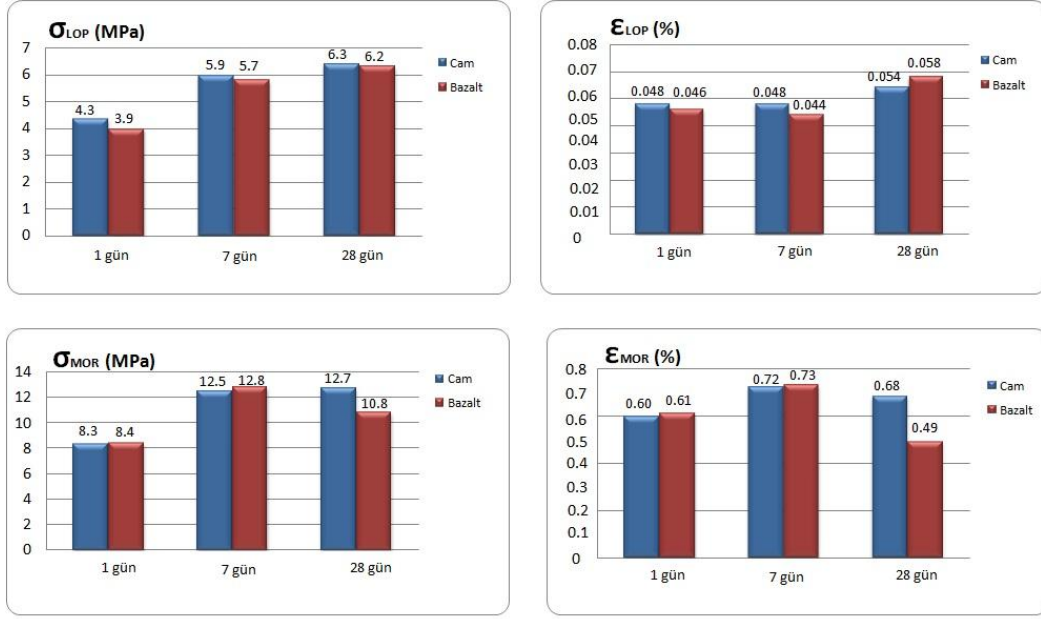
Gün	24 mm Cam Lif				24 mm Bazalt Lif			
	σ_{LOP}	σ_{MOR}	ϵ_{LOP}	ϵ_{MOR}	σ_{LOP}	σ_{MOR}	ϵ_{LOP}	ϵ_{MOR}
	MPa		%		MPa		%	
1	4.578	9.866	0.053	0.709	4.318	9.791	0.053	0.660
	4.573	9.332	0.049	0.630	4.782	7.758	0.051	0.583
	3.976	9.049	0.052	0.611	3.383	7.053	0.044	0.601
	4.068	7.341	0.057	0.557	3.734	9.785	0.046	0.642
	4.393	7.311	0.041	0.546	3.782	7.186	0.050	0.601
	4.928	9.071	0.046	0.621	3.569	8.240	0.043	0.609
	4.583	6.932	0.044	0.546	3.810	8.235	0.041	0.652
	3.577	7.785	0.046	0.575	4.289	9.438	0.041	0.549
$X_{ort.}^1$	4.334	8.335	0.048	0.600	3.958	8.435	0.046	0.612
S^2	0.43	1.11	0.0052	0.050	0.46	1.11	0.0046	0.030
$V(\%)^3$	9.9	13.3	10.8	9.3	11.7	13.2	10.1	6.1
7	6.311	10.948	0.050	0.677	5.747	11.778	0.056	0.631
	6.435	10.958	0.049	0.650	5.375	15.390	0.039	0.901
	5.493	10.793	0.046	0.663	5.178	13.711	0.039	0.782
	5.204	14.554	0.045	0.84	5.501	12.128	0.045	0.695
	5.532	14.270	0.055	0.787	5.880	11.913	0.043	0.689
	6.120	14.039	0.048	0.750	6.212	12.358	0.042	0.731
	6.399	10.757	0.054	0.668	6.741	14.020	0.042	0.783
	6.017	13.976	0.044	0.760	5.624	11.342	0.044	0.659
$X_{ort.}$	5.938	12.537	0.048	0.724	5.782	12.830	0.044	0.734
S	0.47	1.79	0.004	0.069	0.50	1.39	0.0054	0.086
$V(\%)$	7.9	14.3	8.3	9.6	8.6	10.8	12.3	11.8
28	6.691	11.356	0.067	0.641	7.012	11.089	0.054	0.408
	6.493	11.87	0.060	0.659	5.245	9.465	0.053	0.463
	4.761	11.610	0.055	0.601	5.900	9.972	0.066	0.477
	5.673	14.290	0.051	0.733	7.044	9.647	0.070	0.489
	5.235	12.635	0.057	0.783	5.437	10.836	0.064	0.501
	7.361	14.584	0.048	0.729	7.073	10.892	0.060	0.601
	6.952	13.043	0.046	0.585	4.974	12.378	0.053	0.521
	7.761	12.773	0.047	0.739	6.488	12.607	0.048	0.487
$X_{ort.}$	6.365	12.770	0.054	0.683	6.286	10.860	0.058	0.493
S	1.05	1.18	0.0073	0.072	0.85	1.17	0.0077	0.054
$V(\%)$	16.5	9.3	13.5	10.5	13.6	10.8	13.1	11.1

8 adet numunenin,

¹ aritmetik ortalamasıdır.

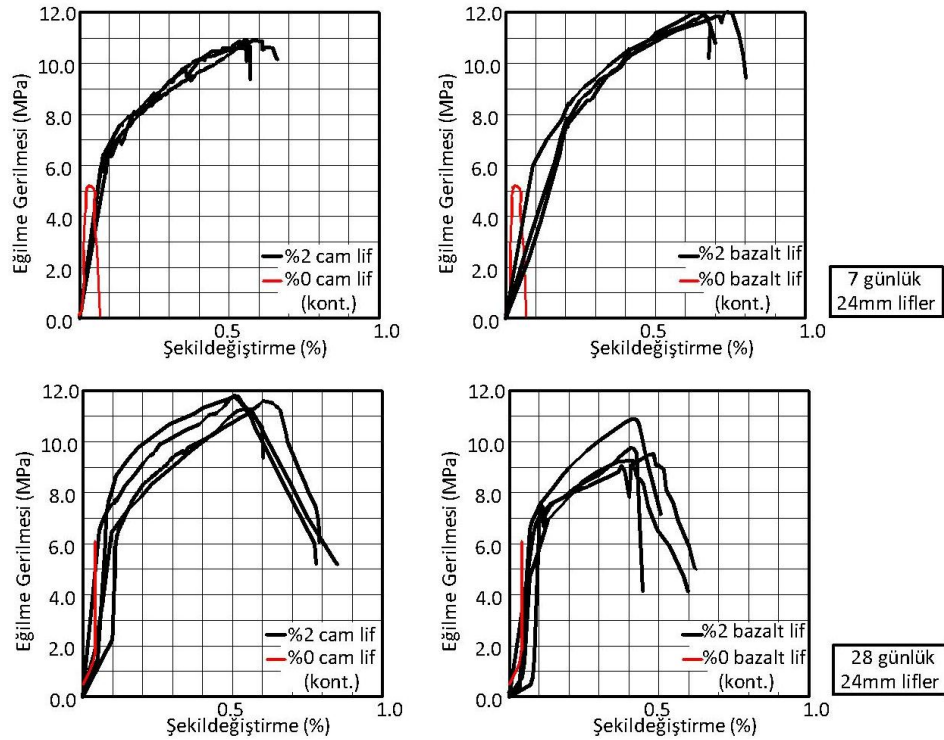
² standart sapmasıdır.

³ değişkenlik katsayısıdır ($V=S/X_{ort} \cdot 100$)



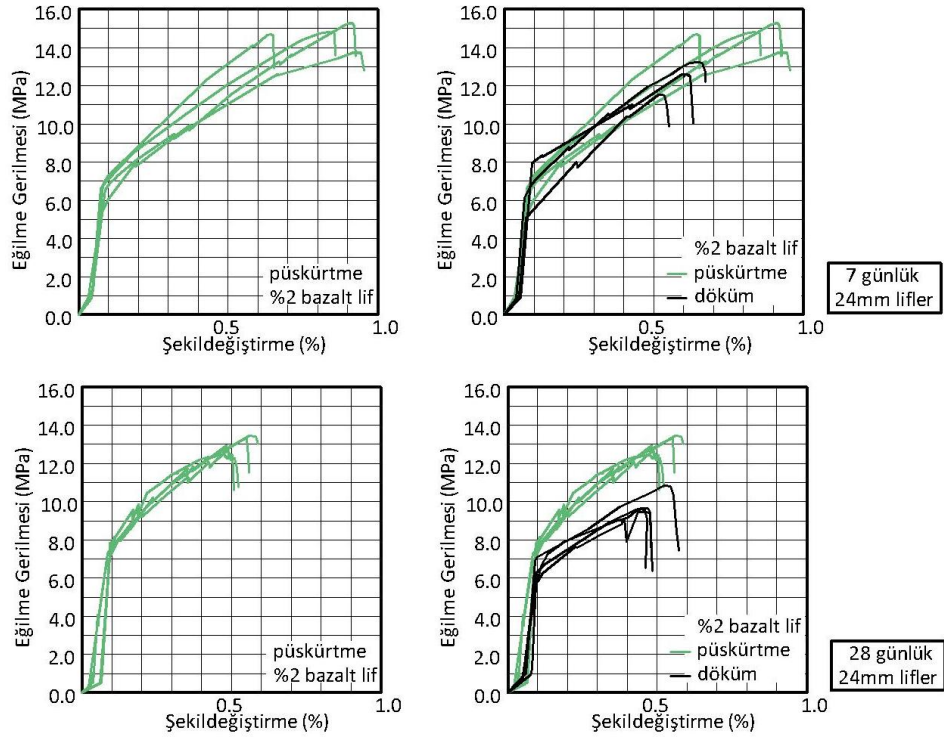
Şekil 4.9 24 mm lifli numunelerin 1, 7, 28 gün σ_{MOR} , σ_{LOP} , ϵ_{MOR} , ϵ_{LOP} değişimleri (döküm)

Çizelge 4.3’de verilen eğilme-şekildeğiştirme değerlerinden homojen olanları seçilerek, Şekil 4.10’da eğilme gerilmesi-şekildeğiştirme değişimleri verilmiştir. Bazalt liflerin 7 gün bazındaki ϵ_{MOR} değerinin ve buna bağlı olarak σ_{MOR} eğilme dayanımının 28 günde azaldığı burada izlenmektedir.



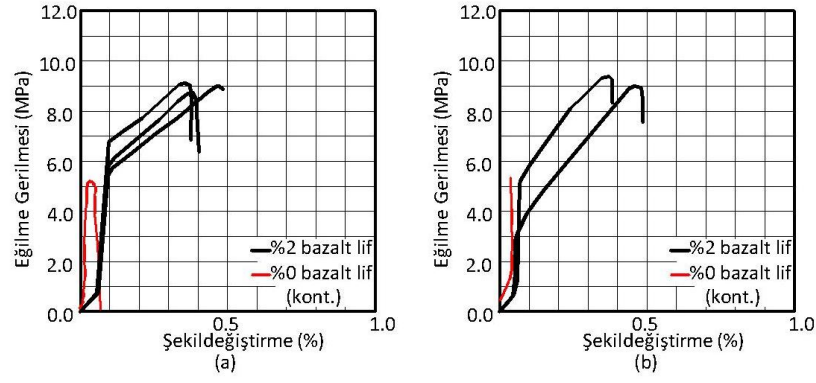
Şekil 4.10 24 mm lifli numunelerin eğilme gerilmesi-şekildeğiştirme değişimi (döküm)

- 24 mm'lik bazalt lifler ile *püskürtme* yöntemine göre üretilen panellerden çıkartılan levha numunelerin eğilme test sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.11);
- o Bazalt lifli karışımın oluşturma zorunluluğu ve yerleşim sorunlarının püskürtme yönteminde olmaması, bu nedenle yerleşimde üniformluk sağlanması nedeni ile, daha homojen ve daha yüksek eğilme gerilmesi ve şekildeğiştirme değerleri elde edildiği,
- o 28 gün bazında ise, bazalt liflerin dayanım ve şekildeğiştirmesindeki azalımın püskürtme yönteminde de mevcut olduğu görülmektedir.

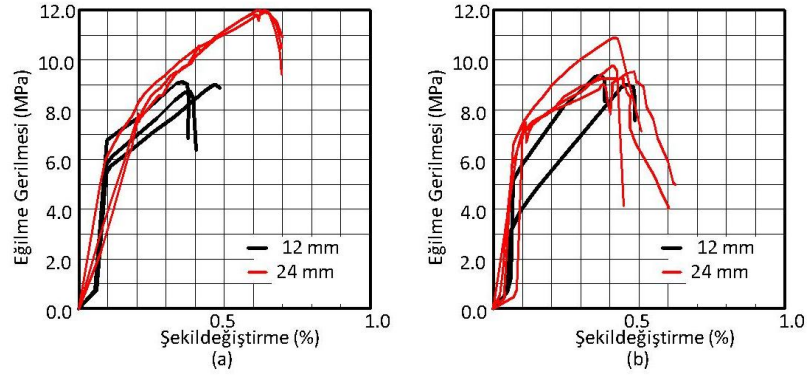


Şekil 4. 11 Püskürtme ve döküm yöntemi uygulanmış bazalt lifli (% 2) panellere ait levhaların 7 ve 28 günlük eğilme gerilmesi-şekildeğiştirme değişimleri

- *Döküm* yöntemi ile 12 mm'lik liflerin kullanıldığı levhalarda, maks.eğilme dayanımı ve şekildeğiştirmesi, 24 mm lif içerenlere göre, özellikle 7 gün bazında, % 50 daha azdır; σ_{MOR} ve ϵ_{MOR} , sırası ile, 7 günde 11 MPa ve % 0.5'dir. Ancak bu farklılık, bazalt liflerin şekildeğiştirme kapasitesindeki azalma nedeniyle, 28 gün bazında büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır (Şekil 4.12, 13).



Şekil 4. 12 12 mm bazalt lifli numunelerin (a) 7 , (b) 28 gün eğilme gerilmesi-şekildeğiştirme değışimleri (döküm)



Şekil 4. 13 12 ve 24 mm bazalt lifli numunelerin (a)7, (b) 28 gün eğilme gerilmesi-şekildeğiştirme değışimleri (döküm)

- Döküm yöntemi ile üretilen % 2 cam ve bazalt lifli 5'er adet küp numune ile lifsiz (kontrol) küp numuneler arasında, 1 ve 7 gün bazında basınç dayanımları açısından bir farklılık olmadığı görülmektedir (Çizelge 4.4). 28 gün bazındaki farklılık ise % 5'dir (Lif yüzdeleri çok yüksek olmadığı sürece, basınç dayanımları arasında farkın % 5-15 düzeyinde kalacağı literatürden bilinmektedir). 1 günlük dayanımların 28 güne oranı 0.67-0.69, 7 günlüklerin oranı ise 0.83-0.88 aralığındadır.

Çizelge 4.4 Lifli ve lifsiz 5 cm küp numunelerin basınç dayanımları

Gün	Cam lif		Bazalt lif		Lifsiz
	12 mm	24 mm	12 mm	24 mm	
	MPa		MPa		
1	21.16	21.50	21.37	21.82	20.80
7	31.15	31.34	31.63	31.84	31.14
28	37.65	36.24	37.12	38.04	35.23
1/28	0.68	0.69	0.68	0.69	0.67
7/28	0.83	0.86	0.85	0.84	0.88

- Döküm yöntemi ile üretilen levhaların birim hacim ağırlığı 2.1 g/cm^3 , fırın kuru birim hacim ağırlığı 2.0 g/cm^3 , su emmesi % 5.3-7.6 aralığındadır.

Çizelge 4.5 Levhaların 28 gün bazında birim hacim ağırlık ve su emme değişimleri

Özellik		12 mm Cam Lif	24 mm Cam Lif	12 mm Bazalt Lif	24 mm Bazalt Lif
Birim hacim ağı.	g/cm^3	2.15	2.13	2.13	2.10
Kuru birim hacim ağı.		2.01	2.00	2.06	2.03
Su emme	%	7.6	7.2	6.1	5.3

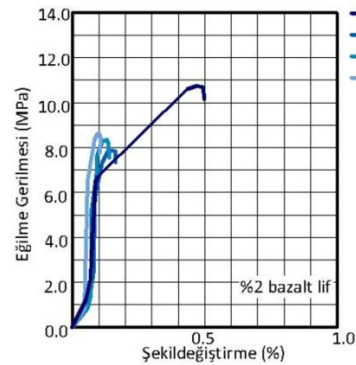
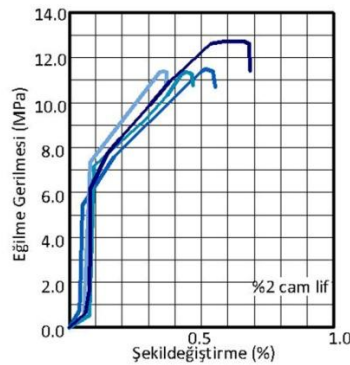
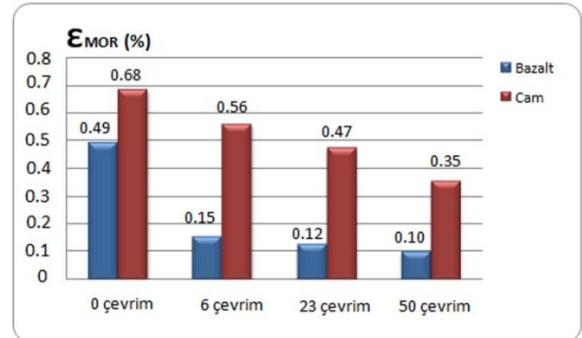
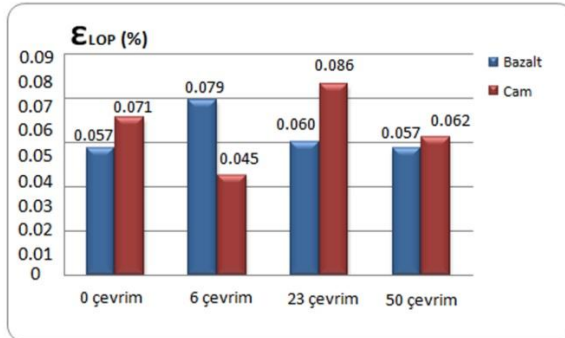
- Cam ve bazalt lifli elemanların yıpranma etkisi altında nihai performansının da araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, üretilen panellerin 6 (3 cam+ 3 bazalt) adedi, 28 gün sonrası tam otomatik Islanma-Kuruma Test kabine (TS-EN 1170-6:1997 standardına uygun) dizilmiştir. 13 günlük, toplam 50 çevrimlik süreçte (her bir çevrim 6 saat sürmektedir) belirli çevrim sayılarında (6., 23. ve 50. çevrim) birer cam ve bazalt lifli panel kabin dışına alınarak, levhalara bölünmüş ve eğilme dayanımları bulunmuştur. Testte ulaşılan eğilme büyüklükleri, bunların grafiksel değerlendirilmesi ve kırılmış ara yüzey fotoğrafları Çizelge 4.6, Şekil 4.14 ve 4.15’de verilmiştir. Ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir :

- o 6, 23 ve 50 çevrimde ε_{LOP} değerlerinde sistematik bir değişim görülmemektedir.
- o Levhaların ε_{MOR} ve buna bağlı olarak σ_{MOR} değerleri, özellikle bazalt lifli numunelerde çevrim sayısı arttıkça dramatik biçimde azalmaktadır. 50 çevrim sonunda bazalt lifli levhanın şekildeğiştirme kapasitesi 28 güne kıyasla % 75 daha azdır, maks. şekildeğiştir-menin olduğu 7 günlük kür süresi ile kıyaslandığında ise % 90 azalma olduğu görülmektedir. Bazalt lifler uzayarak değil, koparak gevrek biçimde göçmektedir.
- o Cam lifli numunelerde, ε_{MOR} ve buna bağlı olarak σ_{MOR} değerlerinin, çevrimlerde bazalt lifli olanlara kıyasla azalımı daha azdır. 50 çevrim sonunda cam lifli levhanın şekildeğiştirme kapasitesi 28 güne kıyasla % 50 azalmıştır, liflerin kısmen uzayarak koptuğu görül-mektedir (Şekil 4.15).

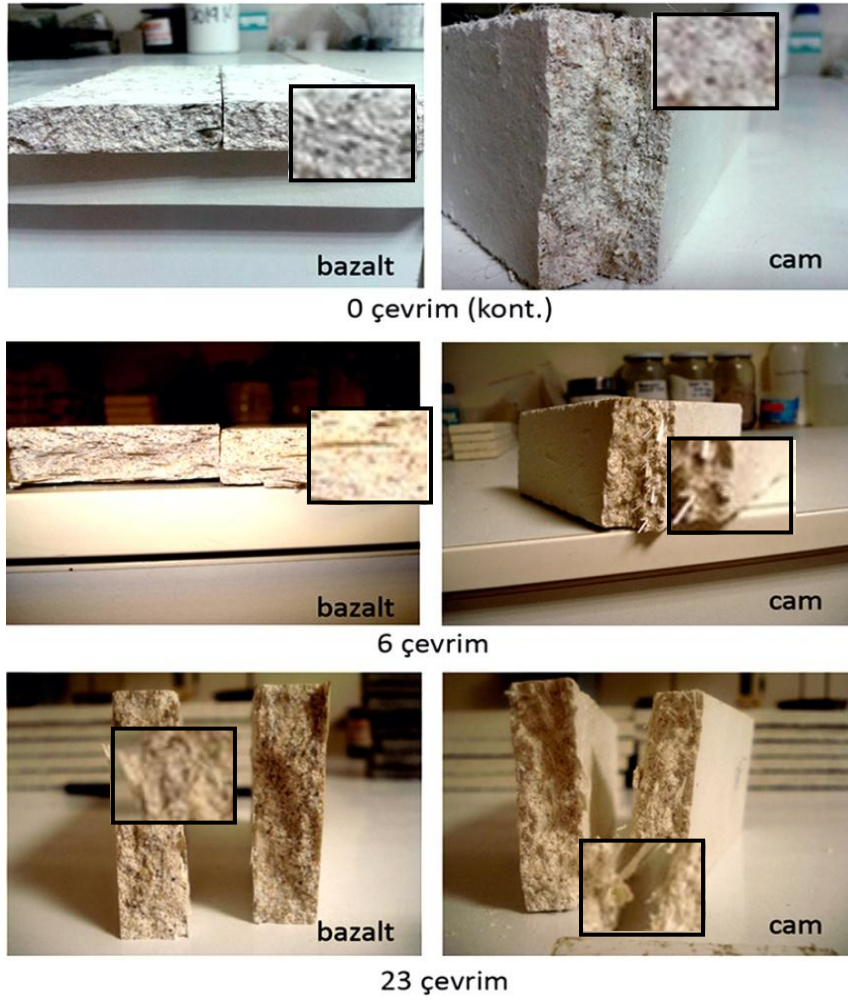
o Bağlayıcı olarak sadece çimentonun kullanıldığı bu deneyler en olumsuz durumu yansıtmaktadır, mineral katkıların kullanımı performansı iyileştirecektir.

Çizelge 4.6 Islanma-kuruma testi uygulanmış panellere ait levha sonuçları

Tür	Çevrim		Min.	Maks.	$X_{ort.}$	Tür	Çevrim		Min.	Maks.	$X_{ort.}$
24 mm Cam Lif	0. (kont.)	σ_{LOP} MPa	3.548	7.761	6.100	24 mm Bazalt Lif	0. (kont.)	σ_{LOP} MPa	3.974	8.857	6.105
		σ_{MOR}	11.36	14.584	12.770			σ_{MOR}	9.465	12.607	10.860
		ϵ_{LOP} %	0.029	0.219	0.071			ϵ_{LOP} %	0.037	0.081	0.057
		ϵ_{MOR}	0.585	0.783	0.683			ϵ_{MOR}	0.408	0.601	0.493
	6.	σ_{LOP} MPa	4.720	5.851	5.194		6.	σ_{LOP} MPa	6.037	6.924	6.480
		σ_{MOR}	9.498	12.901	11.378			σ_{MOR}	7.892	8.099	7.995
		ϵ_{LOP} %	0.041	0.050	0.045			ϵ_{LOP} %	0.06	0.099	0.079
		ϵ_{MOR}	0.464	0.718	0.562			ϵ_{MOR}	0.149	0.161	0.155
	23.	σ_{LOP} MPa	5.079	9.434	7.217		23.	σ_{LOP} MPa	2.402	6.487	4.290
		σ_{MOR}	10.253	13.832	11.246			σ_{MOR}	7.580	9.130	8.161
		ϵ_{LOP} %	0.005	0.140	0.086			ϵ_{LOP} %	0.051	0.074	0.060
		ϵ_{MOR}	0.304	0.647	0.475			ϵ_{MOR}	0.126	0.129	0.128
	50.	σ_{LOP} MPa	7.383	8.112	7.359		50.	σ_{LOP} MPa	3.124	7.651	5.891
		σ_{MOR}	9.938	12.023	11.032			σ_{MOR}	7.618	8.482	8.032
		ϵ_{LOP} %	0.059	0.080	0.062			ϵ_{LOP} %	0.025	0.078	0.057
		ϵ_{MOR}	0.301	0.374	0.358			ϵ_{MOR}	0.097	0.105	0.101

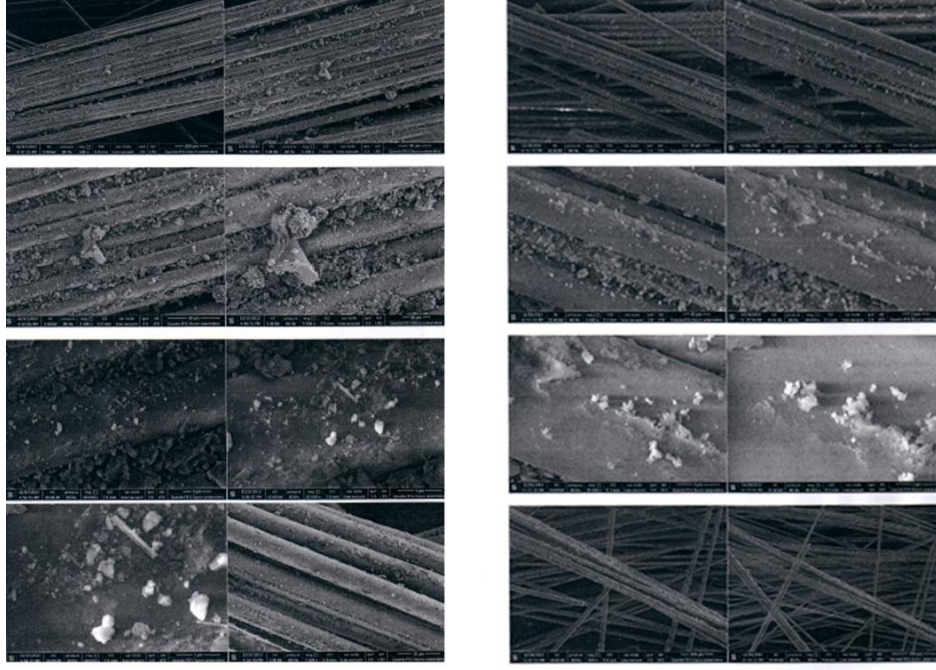


Şekil 4.14 24 mm lifli levhaların ıslanma-kuruma testindeki davranış değişimi



Şekil 4.15 Islanma-kuruma testi sonrası numunelerin görünüşleri

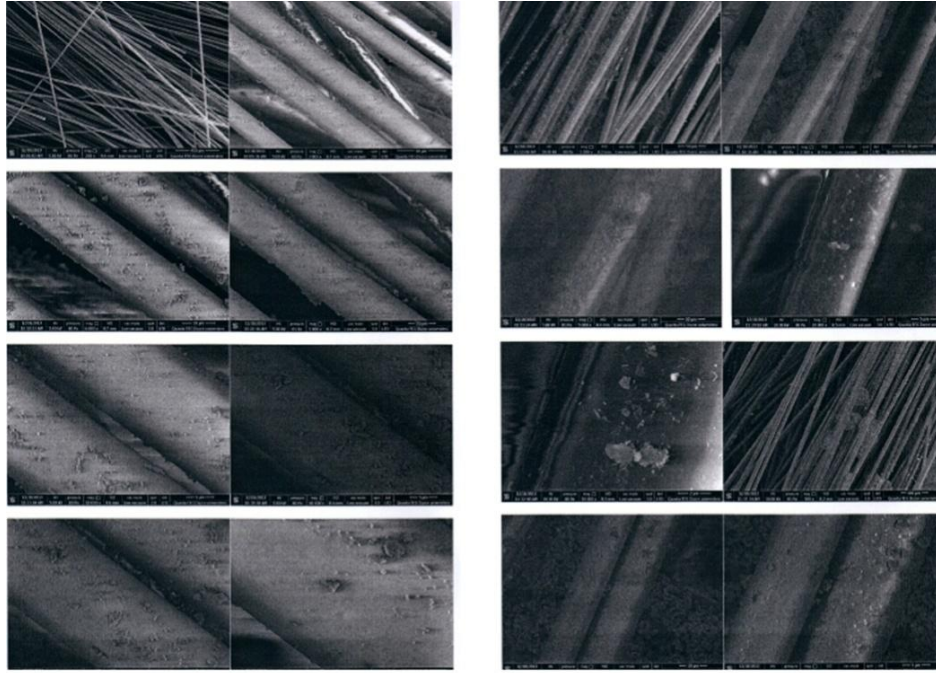
- Islanma-kuruma testinin bitiminde, uzama şekildeğiştirmelerindeki azalmanın nedenini belirlemek için, cam ve bazalt lifli levhalarda SEM (scanning electron microscope) fotoğrafları çekilmiştir. Fotoğraflarda, çevrim sonrası gerek cam gerekse bazalt lifli numunelerin yüzey görünümünde bozulma (örneğin, alkali Ca(OH)_2 nedeniyle) izlenmemiştir (Şekil 4.16, 4.17). Dolayısıyla, şekildeğiştirmelerdeki azalmanın lif-matris ara yüzeyindeki bağ kuvvetlerinin (aderans) fazlalığından kaynaklandığı, bu güçlü bağın uzamayı engellediği yorumu yapılabilir.



12 mm cam lif

24 mm cam lif

Şekil 4. 16 SEM yüzey analizleri (cam lifler)



12 mm bazalt lif

24 mm bazalt lif

Şekil 4.17 SEM yüzey analizleri (bazalt lifler)

SONUÇ VE ÖNERİLER

Beton, günümüzde birçok alanda tercih edilen fonksiyonel bir malzemedir. Gelişen beton teknolojileri sayesinde beton içerisine liflerin katılması ile birlikte betonun kullanım alanının artması yanında taşıyıcılık ve estetik açıdan değişik formların oluşturulabilme imkanı sağlamıştır. Ayrıca, betona lif eklenmesi uygulamadaki kuruma rötresi çatlaklarını azaltmakta (polipropilen lifler vb.) veya artan süneklik ihtiyacına (çelik lif, PVA lif ve daha az sünek cam lif) cevap vermektedir.

Günümüzde beton içerisinde kullanılan lifler; çelik, cam, polipropilen (PP), polietilen (PE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polyester, poliakrilonitril (PAN), polivinil alkol (PVA), naylon ve organik selülozik liflerdir.

Çelik lifler; yüksek çekme, eğilme dayanımı, elastisite modülü ve şekil değiştirme kapasitesi ile kompozitin enerji yutma kapasitesini iyileştirmektedir. Yüksek elastisite modülü nedeni ile plastik liflerden (PP vb) çok daha fazla enerji yutma kapasitesine sahiptir.

Cam lifler; ortalama düzeyde süneklik ihtiyacına cevap vermektedir. Çelik donatıya kıyasla daha düşük elastisite modülüne karşılık, üç kat daha hafif ama benzer çekme dayanımlıdır. Bazalt lifler; cam life kıyasla çekme dayanımı daha yüksek ama diğer yönleri ile benzer özellikte bir malzemedir, E cam liflere kıyasla alkali dayanımı ise doğal olarak yüksektir.

PVA lifler; yüksek süneklik, alkaliye karşı direnç ve yüksek çekme dayanımından dolayı sünekliği arttırılmış lifli çimentolu kompozitler için de iyi bir alternatiftir. Lifsiz betona

kıyasla 300-500 kat yüksek şekildeğiştirme kapasitesininin getirdiği süneklik, pekleşme ve çoklu çatlak davranışı özelliğinin sonucu olarak, direkt çekme ve eğilme grafiği klasik lifli kompozitlerden ayrılmaktadır. Yüksek sünekliği nedeniyle, çok katlı yapıların perde bağ kirişlerinden, köprü derzleri yada değişik onarım-güçlendirme çalışmalarına kadar geniş bir alanda kullanılabilmektedir. PVA lifli ECC elemanlar üzerine literatürdeki mekanik büyüklük deneylerinden aşığıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- PVA liflerin OH- içeren yapısı nedeniyle matris ile arasındaki aderansın bir ölçüde azaltılması gerekmektedir. Bu amaçla lif çeperinin % 1.2 yağ kaplanması veya mineral katkıları kullanılması ön plana çıkmaktadır.
- Maks. agrega boyutunun 400 µm ile 1000 µm arasında değişimi durumunda, eğilme dayanımı ve rötre açısından belirgin bir farklılık görülmemiştir.
- Yüksek oranda uçucu kül kullanımı (uk/ç=1.2-2.2) + su kürünün mikro çatlak genişliğini azaltma özelliği mevcuttur.
- Yüksek fırın cürufu % 50 oranında kullanıldığında maks. çekme dayanımı elde edilirken, % 80 oranında çekme dayanımındaki azalmaya karşılık maks. şekildeğiştirme elde edilmiştir.
- Kuruma rötresi, uçucu kül oranı arttıkça azalmaktadır. Cüruf içeren numunelerin kuruma rötresi uçucu kül içerenlere göre biraz daha yüksektir.
- Uçucu kül kuruma rötresini azaltırken, kür şartlarına bağlı olarak klor geçirgenliği artabilmektedir. Uçucu kül yerine metakaolin, kuruma rötresi ve klor geçirgenliğini azaltmakta, ancak matris gevreklemektedir.

Diğer taraftan ECC için HDPE lifler de uygun bir alternatiftir ancak yüksek maliyeti yaygın kullanımını engellemektedir.

ECC içinde kullanılan mineral katkıları açısından bakıldığında, F tipi uçucu külün kullanım oranı arttıkça basınç dayanımı artmaktadır; örneğin u.k/ç =2.2 için, 180 gün bazında 28 güne kıyasla en yüksek artış (% 25) sözkonusudur. Yüksek fırın cürufu açısından ise, dayanımdaki artış 28 günde büyük ölçüde kapanmaktadır.

Ayrıca, Tez kapsamında deneysel bir çalışmada yürütölmüştür. Çalışmanın amacı, cephe panellerinde cam lif yerine alternatif olarak bazalt lifin uygulanabilirliğinin

araştırılmasıdır. Bu amaçla, ağırlıklı olarak estetik cephe panelleri üreten bir özel sektör firmasının üretim ve laboratuvar imkanlarından yararlanılmıştır. 12,24 mm cam ve bazalt lifler döküm tekniği ile paneller ve küpler üretilmiş, ayrıca panellerde en çok kullanılan 24 mm boyutu, bazalt lifler için püskürtme tekniği ile de denenmiştir. Sonraki çalışmalar için ilk basamak oluşturması açısından, klasik (sadece çimentolu) karışım tasarımı tercih edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Min. 14 cm (çap) lifli yayılma esas alınmıştır, bazalt lifler cam liflere kıyasla karıştırma ve yerleşim sürecine daha hassastır. Tamamen aynı tasarımda, bazalt lifler ile, cam liflere kıyasla 2-3 cm (çap bazında) daha düşük yayılma değerleri elde edilmiştir.
- Döküm yöntemi ile üretilen 24 mm cam lifli numunelerine eğilme testlerinde, ilk 7 günde 28 günlük kırılma yüküne erişildiği izlenmiştir; keza, ϵ_{MOR} şekil değiştirmesi 7 ve 28 gün bazında birbirine denktir. Bazalt lif açısından ise, 7 günde ulaşılan ϵ_{MOR} düzeyi cam life denk olup, % 1'e yaklaşmaktadır; ancak 28 gün bazında % 33 azalma meydana gelmiştir. Bu durum bazalt lif ile matris arasındaki aderansın yüksek olmasına, bu nedenle yeterli sıyrılma oluşmamasına bağlanabilir.
- 12 mm'lik lif ve sadece çimento kullanarak, 7 gün bazında 11 MPa eğilme dayanımı ve ancak % 0.5 şekil değiştirmeye ulaşılmaktadır.
- Püskürtme yöntemi uygulanan 24 mm'lik bazalt lifli numunelerde, yerleşimde uniformluk sağlanması nedeni ile, döküm yöntemine kıyasla yüksek eğilme gerilmesi ve şekil değiştirme elde edilmiştir. Döküm yönteminde 28 günlük numunelerde eğilme şekil değiştirmesindeki azalmanın, püskürtme yönteminde de mevcut olduğu görülmüştür.
- % 2 cam ve bazalt lifli (döküm) 5'er adet küp numune ile lifsiz (kontrol) küp numunelerde, 1 ve 7 gün bazında basınç dayanımları açısından bir farklılık olmadığı görülmektedir, 28 gün bazında ise farklılık % 5'dir.
- İslanma-kuruma testine tabi tutulan numuneler incelendiğinde, bazalt lifli olanlarda şekil değiştirme kapasitesinin çevrim sayısı arttıkça azaldığı izlenmiştir, 50 çevrim sonunda 28 güne kıyasla % 75 azalma mevcuttur; buna bağlı olarak eğilme dayanımı da azalmıştır. Bazalt lifler uzayarak değil, koparak gevrek biçimde göçmektedir. Cam lifli

numunelerde ise, 50 çevrim sonunda şekildeğiştirme kapasitesi 28 güne kıyasla % 50 azalmıştır, liflerin kısmen uzayarak koptuğu görülmektedir.

- Islanma-kuruma testinin bitiminde, uzama şekildeğiştirmelerindeki azalmanın nedenini belirlemek için, cam ve bazalt lifli levhalarda SEM (scanning electron microscope) fotoğrafları çekilmiştir. 28 günlük kontrol numuneleri ile çevrim sonrası gerek cam gerekse bazalt lifli numunelerin görünümü arasında belirgin bir farklılık ve alkali $[Ca(OH)_2]$ nedeniyle bir bozulma izlenmemektedir. Lif-matris ara yüzeyindeki aderans artışının, bazalt lifin sıyrılarak kopmasına engel olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmadan çıkan sonuçların ışığında aşağıda bazı öneriler verilmiştir;

- Bağlayıcı olarak sadece çimentonun kullanıldığı bu deneyler en olumsuz durumu yansıtmaktadır;çimento+mineral katkı kullanımının, daha önce panellerde denenmemiş olan bazalt lifinperformansını iyileştirerek yeni bir uygulama alanı sağlayacağı düşünülmektedir.

- Beton teknolojilerinin gelişmesi (özellikle kendiliğinden yerleşen beton), lif çeşitliliğindeki artış ve sünekliği arttırılmış liflerin(PVA)ortaya çıkması gerek taşıyıcı sistem gerekse mimari açıdan önemli gelişmelere yol açmıştır. Farklı amaçlara yönelik değişik lif tiplerinin geliştirilmesi, donatılı betonun (çelik donatı, lif, çelik donatı+lif) kullanım alanını genişletmiştir (patlamaya dayanıklı sığınak tasarımı, perde bağ kirişlerinde enerji yutma kapasitesinin arttırılması, cephe panelleri, şehir mobilyaları vb).

- Farklı lif tipleri ile farklı süneklik düzeyleri gerektiren, gerek taşıyıcı sistem ihtiyaçlarına cevap veren, gerekse mimari ve estetik açıdan prefabrikasyon alanında ürün yelpazesi çoğaltılabilir. Ayrıca, deprem gerçeğine karşı,sünekliği arttırılmış lifler kullanılarak hızlı güçlendirme teknikleri geliştirilebilir.

- Türkiye'de prefabrikasyon sektöründe, farklı lif tipleri ile istenen süneklik düzeyine uygun, gerek taşıyıcı sistem ihtiyaçlarına cevap veren, gerekse mimari ve estetik açıdan ürün yelpazesi çoğaltılabilir.

- Türkiye'nin deprem gerçeğine karşı,sünekliği arttırılmış lifler kullanılarak hızlı, ekonomik ve etkin güçlendirme teknikleri geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Schaeffer, R.E., (1992). “ Reinforced Concrete, Preliminary design for Architects and Builders”, Handout on Skyscrapers World Book Encyclopedia, <http://www.arch.mcgill.ca/prof/siipkes/abc-structures/2005/concrete/timeline.html>, 22 Ekim 2013.
- [2] Pantehon Tapınağı (Roma), <http://en.wikipedia.org/wiki/Pantheon>, Rome, 22 Ekim 2013.
- [3] Mainstone, R. J., (2001). Hagia Sophia. London: Thames & Hudson, 90–93.
- [4] Majdalany, F., (1959). The Red Rocks of Eddystone. London: Longmans, 86.
- [5] Francis, A.J., (1977). The Cement Industry 1796-1914: a History, David & Charles.
- [6] Barfoot, R.J., (1975). “The Aspdin Triangle”, Journal of the American Concrete Institute, 257-261.
- [7] Ali, M.A., (2001). “Evolution of Concrete Skyscrapers: from Ingalls to Jin mao”, Electronic Journal of Structural Engineering, 1:1:2-14.
- [8] Arslan H. M., (2010). “Dairesel Kesitli Plastik Malzeme Kullanarak Üretilen Betonarme Elemanların Yapısal Davranışlarının İrdelenmesi”, Beton Prefabrikasyon, 95:13-19.
- [9] Çakır, H., “Yapıda Şeffaf Beton (Litracon) Dönemi”, <http://www.yapi-yorum.com/?p=beton>, 20 Ekim 2013.
- [10] World Business Council for Sustainable Development, (2011). “CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standart for the Cement Industry”, The Cement CO₂ and Energy Protocol.
- [11] Li, V.C., (2006). “Bendable Composites”, Structure Magazine, 45-47.
- [12] The Concrete Pavement Technology Program, (2010). “Geopolymer Concrete”.
- [13] Erdoğan T.S ve Erdoğan Y.T., (2007). Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi, ODTÜ Yayıncılık.

- [14] Chanson, H. ve James, D.P., (2002). "Historical Development of Arch Dams. from Cut-Stone Arches to Modern Concrete Designs", http://staff.civil.uq.edu.au/h.chanson/arch_dam.html, 22 Ekim 2013.
- [15] Seydioğlu, S., (2008). Ön Üretimli İskelet Sistemlerin Dünyadaki Gelişimi ve Depreme Dayanıklı Tasarım Yaklaşımları, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı Yapı Programı, İstanbul.
- [16] Ayış, H.İ., (2010). Tünel Açma Sistemlerinde Çelik Lifli Püskürtme Betonun Uygulanabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı Yapı Programı, İstanbul.
- [17] Ernst Gustav Leube, http://de.wikipedia.org/wiki/Ernst_Gustav_Leube, 22 Kasım 2013.
- [18] Honer, T., (2008). İlklerin Kitabı, A'dan Z'ye Herşeyin İlk Çıkış Noktası, Pegasus Yayınları.
- [19] Heun, R.C. ve Moss, H.R., (1987). "Thomas A. Edison's Adventures in Concrete", ACI Journal, Concrete International, 12-14.
- [20] Jahrhunderthalle Kongre Merkezi (Almanya), <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=490916&page=73>, 22 Ekim 2013.
- [21] Eddystone Deniz Feneri (Londra), http://en.wikipedia.org/wiki/Eddystone_Lighthouse, 22 Ekim 2013.
- [22] Wakefield Arms Binası (İngiltere), <http://www.flickr.com/photos/kpmarek/2664490787/>, 22 Ekim 2013.
- [23] Kano, (1848). <http://www.befestigungsfuchs.de/blog/veranstaltungen-magdeburg-betonkanu-regatta/>, 22 Ekim 2013.
- [24] Kano, (2012). <http://www.standard.net/slideshows/2013/04/10/regional-concrete-canoe-competition?page=1,0>, 22 Kasım 2013.
- [25] Chazelet Köprüsü (Fransa), en.wikipedia.org/wiki/File:Monier_bridge_Chazelet.jpg, 22 Kasım 2013.
- [26] Maison de François Coignet ilk demir profil bina, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Saint-Denis_Maison_Fran%C3%A7ois_Coignet_-1.JPG, 22 Kasım 2013.
- [27] Art Nouveau üslup özellikli prekast beton cephe (Paris), <http://parisisinvisible.blogspot.com/2011/10/where-systeme-hennebique-lives-on.html>, 22 Kasım 2013.
- [28] 25 Rue Franklin Binası (Paris), <https://fp.auburn.edu/heinmic/ConcreteHistory/Pages/29bRueFranklin.htm>, 22 Ekim 2013.
- [29] 25 Rue Franklin Binası (Paris), <http://fr.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0008987>, 22 Kasım 2013.

- [30] Ingalls Binası (Cincinnati), <https://fp.auburn.edu/heinmic/ConcreteHistory/Pages/IngallsBuilding.htm>, 22 Ekim 2013.
- [31] Thomas Edison's Concrete House, (1965). <http://www.flickr.com/photos/22202402@N06/2993407354/>, 22 Ekim 2013.
- [32] Thomas Edison's Concrete House, (1965). http://en.wikipedia.org/wiki/File:Thomas_Edison_concrete_house.jpg, 22 Ekim 2013.
- [33] Orly Uçak Hangarları (Fransa), http://www.tecnologos.it/index.php?option=com_content&view=article&id=322:short-history-of-concrete&catid=73:10&Itemid=95, 22 Ekim 2013.
- [34] Medical Arts Binası (Teksas), <http://www.panoramio.com/photo/31824245>, 23 Ekim 2013.
- [35] Notre Dame du Raincy kilisesi (Fransa), <https://fp.auburn.edu/heinmic/ConcreteHistory/Pages/NotreDameRaincyExterior.htm>, 23 Ekim 2013.
- [36] Salginatobel köprüsü (İsviçre), <https://fp.auburn.edu/heinmic/ConcreteHistory/Pages/SalginatobelBridge.htm>, 23 Ekim 2013.
- [37] Villa Savoye (Paris), <https://fp.auburn.edu/heinmic/ConcreteHistory/Pages/VillaSavoye1.htm>, 23 Ekim 2013.
- [38] Algeciras Market Hall (İspanya), <https://fp.auburn.edu/heinmic/ConcreteHistory/Pages/AlgecirasMarketHall1.htm>, 23 Ekim 2013.
- [39] Hoover Barajı (Las Vegas), <https://fp.auburn.edu/heinmic/ConcreteHistory/Pages/HooverDam1.htm>, 23 Ekim 2013.
- [40] Fallingwater (Pennsylvania), <http://www.wright-house.com/frank-lloyd-wright/fallingwater-pictures/F1SW-fallingwater-in-fall.html>, 22 Kasım 2013.
- [41] Guggenheim müzesi (New York), <https://fp.auburn.edu/heinmic/ConcreteHistory/Pages/Guggenheim1.htm>, 22 Ekim 2013.
- [42] Notre Dame du Haut Şapeli (Fransa), <https://fp.auburn.edu/heinmic/ConcreteHistory/Pages/Ronchamp.htm>, 22 Ekim 2013.
- [43] Sydney Opera binası (Avustralya), <https://fp.auburn.edu/heinmic/ConcreteHistory/Pages/SydneyOperaHouse1.htm>, 22 Ekim 2013.

- [44] Water Tower Place (Chicago), <https://fp.auburn.edu/heinmic/ConcreteHistory/Pages/WaterTowerPlace.htm>, 22 Ekim 2013.
- [45] Laurentienne Binası (Montreal), <http://wikimapia.org/4402767/La-Laurentienne-Building>, 23 Ekim 2013.
- [46] Uzay Merkezi, http://www.nasa.gov/vision/space/gettingtospace/stennis_40th.html, 23 Ekim 2013.
- [47] Two Union Square (Seattle), <http://hugeasscity.com/2008/08/19/seattles-best-modern-skyscraper/>, 23 Ekim 2013.
- [48] Sherbrooke Yaya Köprüsü (Kanada), http://www.ductal-lafarge.com/wps/portal/ductal/2_3_1-Detail?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connect/lib_ductal/Site_ductal/English_version/Page.Navigation.Structural.Footbridges/KeyProjectDuctal%20Page/KeyProjectDuctal_1278712507168, 23 Ekim 2013.
- [49] Litra Cube aydınlatma ürünü, http://litracon.hu/images/content/highres/LiTraCube01_HR.jpg, 23 Ekim 2013.
- [50] Mihara Köprüsü (Michigan), http://www.cement.org/tech/cct_con_design_bendable.asp, 23 Ekim 2013.
- [51] Hayder Aliyev Kültür merkezi (Azerbeycan), <http://www.icholding.com.tr/tr/projedetay/haydar-aliyev-kultur-merkezi>, 23 Ekim 2013.
- [52] Hayder Aliyev Kültür merkezi (Azerbeycan), http://proplan-pmc.com/web/16-75-1-1/proplan_tr/referanslarimiz_detay/referanslarimiz_detay/haydar_aliev_kultur_merkezi_projesi, 23 Ekim 2013.
- [53] Akakın, T. vd., (2013). “Hazır Beton Sektörü ve Beton Kullanımındaki Gelişmeler”, Türkiye Hazır Beton Birliği, 66-72.
- [54] Batur, A., “Geç Osmanlı Mimarlığında Betonarme Yapım Tekniği” İTÜ Mimarlık Fakültesi.
- [55] Erdoğan T.S ve Erdoğan Y.T., (2007). Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi, ODTÜ Yayıncılık.
- [56] Dölen, E. ve Koraltürk, M., (2004). “İlk Çimento Fabrikamızın Öyküsü 1910-2004”, Türkiye Ekonomik ve Toplumsal Tarih Vakfı, 9.
- [57] Tokman, B. ve Eryılmaz, B., (2004). “Prefabrik Beton Endüstrisinin Türkiye’deki Gelişimi”, Betonart Dergisi, 3:51.
- [58] Sey, Y., (2004), “Modernleşmenin Simgesi Betonarmenin Türkiye’deki Kısa Öyküsü”, Betonart Dergisi, 2:59.

- [59] Batur, A., (2003). M. Vedat Tek: Kimliğinin İzinde Bir Mimar, Yapı Kredi Kültür Sanat Yayınları, s. 154-155
- [60] Türkiye Çimento Müstahsiller Birliği, "Çimento Üretiminin Tarihçesi", <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=50>, 23 Ekim 2013.
- [61] Rumeli Hisarı (İstanbul), <http://www.hakanalemdar.com/fotograf-galerisi/bogazici-albumu/rumeli-hisari>, 24 Ekim 2013.
- [62] Saint Antuan Kilisesi (İstanbul), http://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:St_Antoine.JPG, 24 Ekim 2013.
- [63] Saint Antuan Kilisesi (İstanbul), http://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:San_Antuan_Kilisesi2.JPG, 24 Ekim 2013.
- [64] Tayyare Apartmanı (Laleli), http://tr.wikipedia.org/wiki/Tayyare_Apartmanlar%C4%B1, 24 Ekim 2013.
- [65] Şişli Cami (İstanbul), <http://www.tarihnotlari.com/fotograflarla-istanbul/sisli-cami-by-hakan/>, 24 Ekim 2013.
- [66] Mertim Binası (Mersin), http://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:126_Mersin.07.2006_resize.JPG, 24 Ekim 2013.
- [67] Fibrobeton yenilikçi ürünler, <http://www.fibrobeton.com.tr/urunler/>, 24 Ekim 2013.
- [68] Sapphire (İstanbul), <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=341647>, 24 Ekim 2013.
- [69] Spine Tower (Maslak), <http://www.urbika.com/projects/view/2099-maslak-spine-tower>, 24 Ekim 2013.
- [70] Do, M.T., Chaa O. ve Aitcin P.C., (1993). "Fatigue Behavior of High-Performance Concrete", ASCE JM., 96–111.
- [71] Gao L. ve Hsu C.T.T., (1998). "Fatigue of Concrete under Uniaxial Compression Cyclic Loading", ACI Mater J, 575–581.
- [72] Hordijk D.A., Wolsink G.M. ve Vries J., (1995). "Fracture and Fatigue Behaviour of High Strength Limestone Concrete as Compared to Gravel Concrete", Heron, 40 (2):125–146.
- [73] Hsu T.C., (1981). "Fatigue of Plain Concrete", ACI Journal, 78:292–305.
- [74] Otter D.E. ve Naaman A.E., (1988). "Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete under Cyclic Loading", ACI Material Journal, 254–261.
- [75] Ramakrishnan V. vd. (1996). Cyclic Behavior, Fatigue Strength, Endurance Limit and Models for Fatigue Behavior of FRC, High performance fiber reinforced cement composites, London.
- [76] Su E.C.M. ve Hsu T.T.C., (1988). "Biaxial Compression Fatigue and Discontinuity of Concrete", ACI Material Journal, 178–188.

- [77] Cachim, P.B., Figueiras, J.A. ve Pereira, P.A.A., (2002). "Fatigue Behavior of Fiber-Reinforced Concrete in Compression, Cement and Concrete Composites", 24:211–217.
- [78] Singh, S.P. ve Kaushik, S.K, (2003). "Fatigue Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete in Flexure", Cement and Concrete Composites, 25.
- [79] Taşdemir M.A., İlki A., Yerlikaya M. (2002). "Mechanical Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Used in Hydraulic Structures". Hydro 2002 International Conference on Hydropower and Dams , 159-166.
- [80] Balaguru, P.N. ve Shah, S.P., (1992). Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill International Editions, Newyork.
- [81] Bayasi, Z. ve Soroushian P., (1991). "Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, 88:129-134.
- [82] Pereira, E.B., vd. (2012), "Direct assessment of tensile stress-crack opening behavior of Strain HardeningCementitious Composites (SHCC)", Cement and Concrete Research, 42:834–846.
- [83] Klimov, U.A. ve Piskun, R.A. (2010). Report on the results of experimental research to determine strength, hardness, and crack resistance of concrete elements reinforced by non-metallic composite rebar produced by Technobasalt-Invest LLC , Kiev.
- [84] Mihashi, H. ve Ishikawa , N., (2012). "Quantification of Fresh and Mechanical Properties of HFRCC by Excess Paste Thickness", RILEM:HPFRCC 6, 67-74.
- [85] Aljewifi, H., Fiorio, B., Gallias, J-L., (2012). Groups of Physical Parameters Influencing the Three Stages Pull-Out Behavior of Glass Multi-filament Yarns Embedded in Micro-concrete", RILEM:HPFRCC 6, 117-125.
- [86] Paegle, I. ve Fischer, G., (2002). "Shear Crack Formation and Propagation in Fiber Reinforced Cementitious Composites (FRCC)", RILEM:HPFRCC 6, 231-238.
- [87] Lofgren, İ., (2005). Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction, Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Civil and Environmental Engineering Structural Engineering, Sweden.
- [88] Vetrotex Cem FIL broşür,Cam lif.
- [89] Teknoblast Basalt Fiber, Bazalt Lif.
- [90] Çelik Lif, http://www.diytrade.com/china/pd/5136387/Carbon_Steel_Fiber.html, 18 Kasım 2013.
- [91] Cam Lif, <http://www.blueconcrete.com/reinforcement/>, 18 Kasım 2013.
- [92] Bazalt Lif, <http://www.spinteks.com/tr/urunler/bazalt/elyaf/>, 18 Kasım 2013.
- [93] PVA Lif, http://flysoulsbb.en.busytrade.com/selling_leads/info/1985523/Pva-Fiber-For-Making-Paper.html, 20 Kasım 2013.

- [94] PP Lif, http://v1.raf.com.tr/dergisayfa_2966_polipropilen-elyaf-sanayi---polipropilen-lifler.html, 20 Kasım 2013.
- [95] PE Lif, <http://www.forta-ferro.com/products/specialty-fibers/pe-2/>, 21 Kasım 2013.
- [96] HDPE Lif, <http://www.uhmwpe-pipe.com/Products/Others/4.html>, 20 Kasım 2013.
- [97] Nylon Lif, http://jiushenghuaqian.en.alibaba.com/product/268111882-209530209/Nylon_triangle_fiber.html, 21 Kasım 2013.
- [98] Nylon 6.6 Lif, <http://zihongyuan.en.made-in-china.com/product/OeoxISqYfiWH/China-Nylon-6-Staple-Fiber.html>, 21 Kasım 2013.
- [99] PAN Lif, <http://www.ishaid.com/en/ProductsShow.asp?ProBid=133>, 21 Kasım 2013.
- [100] Polyester Lif, <http://www.sonmezlerpolyester.com/uretim.htm>, 26 Aralık 2013.
- [101] Çelik Lif Tipleri, <http://turkish.alibaba.com/product-gs-img/steel-concrete-fiber-281318199.html>, 15 Kasım 2013.
- [102] Kancalı çelik lif, http://img.alibaba.com/photo/512562537/Concrete_Hooked_Steel_Fiber.jpg, 26 Aralık 2013.
- [103] Biçimsiz çelik lif, <http://www.cesur.com/tr/products/05.asp>, 26 Aralık 2013.
- [104] Puymorens Tüneli (Fransa), http://routes.wikia.com/wiki/Tunnel_de_Puymorens, 18 Kasım 2013.
- [105] Toprak Örtülü Geodzik Kubbe (Montana), <http://earthshelters.com/tour/building-the-worlds-first-earth-sheltered-geodesic-dome/>, 18 Kasım 2013.
- [106] Brunel Thames Tüneli (Londra), <http://www.tunneltalk.com/Fibrecrete-Oct10-20-years-of-fibrecrete-in-the-UK.php>, 26 Kasım 2013.
- [107] Gözlem Kulesi (Hollanda), <http://www.archdaily.com/173500/>, 26 Kasım 2013.
- [108] Paten Parkı, <http://www.bosfa.com/projects/other-apps.aspx>, 19 Aralık 2013.
- [109] Endüstri yapılarının döşemeleri, <http://www.bosfa.com/applications/formula-floors.aspx>, 19 Aralık 2013.
- [110] Alt yapı kullanımı, <http://matrixco.net/duracrete/duracrete-applications/duracrete-infra-structure/>, 19 Aralık 2013.
- [111] Dekoratif Mobilya, <http://www.remyveenhuizen.nl/work/furniture/concrete-furniture>, 26 Kasım 2013.

- [112] Guangzhou Opera Binası (Çin), <http://www.dezeen.com/2011/02/25/guangzhou-opera-house-by-zaha-hadid-architects/>, 26 Kasım 2013.
- [113] Heydar Aliyev Kültür Merkezi (Azerbaycan), <http://www.architectureoflife.net/zaha-hadid-mimarliktan-haydar-aliyev-kultur-merkezi/>, 26 Kasım 2013.
- [114] Zaragoza Köprü Pavyonu (İspanya), <http://www.architonic.com/ntsht/architectural-bridge-building-for-the-expo-2008/7000076>, 26 Kasım 2013.
- [115] Araştırma Pavyonu (Stuttgart), <http://www.achimmenges.net/?p=5561>, 26 Kasım 2013.
- [116] Bölücü Şeffaf Duvar, <http://fikironline.com/2008/08/08/seffaf-beton/>, 26 Kasım 2013.
- [117] Sim, J., Park, C. ve Moon, D., (2005). "Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures", Composites: Part B , 36:504–512.
- [118] Betonarme Donatı, <http://www.beyond.com/articles/basalt-fiber-reinforced-rebar-testing-in-ireland-8779-article.html>, 26 Kasım 2013.
- [119] Bahçe Mobilyası, Peyzaj Öğeleri, İç Mekan Dekoratif Ürünler, <http://mobilyalar1.com/genel-ev-dekorasyonu/elyapimifibermobilya/>, 26 Kasım 2013.
- [120] Yol Yapımı, Restorasyon Uygulamaları, <http://www.directindustry.com/prod/technobasalt-invest-llc/basalt-fiber-reinforced-polymer-bars-bfrp-65468-1007959.html>, 26 Kasım 2013.
- [121] Girgin, Z., C., ve Ayış, H., İ., (2011). Tünellerde Püskürtme Beton Kaplamada Çelik Liflerin Uygulanabilirliği ve Maliyet Analiz, 8.Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- [122] Li, V.C., (2003). "On Engineered Cementitious Composites (ECC) A Review of the Material and Its Applications", Journal of Advanced Concrete Technology, 1:215-230.
- [123] Horikoshi, T. vd., (2005), "Properties Of Polyvinylalcohol Fiber As Reinforcing Materials For Cementitious Composites".
- [124] Mihara Köprüsü, <http://www.panoramio.com/photo/13806659>, 26 Kasım 2013.
- [125] PVA lifli çatı örtüsü, <http://annesley.wordpress.com/vaulted-dome-roof-project/>, 19 Aralık 2013.
- [126] Westin Luxury Otel-Residans (A.B.D) PVA dış cephe kaplaması, <http://www.slenderwall.com/projects/va-beach.shtml>, 19 Aralık 2013.
- [127] Konik çatı örtüsü, <http://www.greenhomebuilding.com/conics.htm>, 19 Aralık 2013.

- [128] Üretiminde PVA lif kullanılan Yarış arabası, <http://staff.bath.ac.uk/ensaig/tg/vehicles.htm>, 19 Aralık 2013.
- [129] El ile örülmüş Oyun alanı, <http://socializarg.com/arg/play/>, 19 Aralık 2013.
- [130] Araba Aksesuar ve Gövdeleri, <http://psipunk.com/vw-buggy-%E2%80%93-a-practical-and-sporty-concept-with-hybrid-powertrain-by-victor-uribe/>, 26 Kasım 2013.
- [131] Ersoy H., (2001), Kompozit Malzeme, Literatür yayınları, 121-122, İstanbul.
- [132] Portland Cement Association, (1983). "Concrete Floors on Ground", Second Edition.
- [133] PP lif kullanım örnekleri, <http://www.nelsonhomesva.com/Basements>, 22 Kasım 2013.
- [134] PP lif kullanım örnekleri, <http://360urban.co.nz/lounge/2011/09/advanced-polypropylene-fibre/>, 22 Kasım 2013.
- [135] PP lifli sandalye, <http://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene>, 26 Kasım 2013.
- [136] Forta Ferro (yüzme havuzu, suni kaya), <http://www.forta-ferro.com/pdfs/applications/fiber-reinforced-shotcrete%20technical-report.pdf>, 26 Kasım 2013.
- [137] Duvar paneli, http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392008000400019&script=sci_arttext, 26 Kasım 2013.
- [138] Mutfak Tezgahı, <http://blog.patterson-online.com/reinforcing-fibers-for-concrete-countertops-more/>, 26 Kasım 2013.
- [139] Elzafraney, M., Soroushian, P. ve Deru M., (2005). "Development of Energy-Efficient Concrete Buildings Using Recycled Plastic Aggregates", Journal of Architectural Engineering, 122-130.
- [140] PE Lif Donatılı Mobilya, <http://www.publicspacefanatic.com/twig-bench-architectural-record-top-pick/>, 22 Kasım 2013.
- [141] PE Lif Dolgulu Yalıtım Paneli, <http://www.archdaily.com/340669/>, 25 Kasım 2013.
- [142] Visjager, J.F., (2001). "Ultra-High Molecular Weight Polymers, Processing And Properties of Polyethylene and Poly(Tetrafluoroethylene)", Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Doktora tezi.
- [143] Coughlan, J.J. ve Hug, D.P. (1986). in Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Newyork.
- [144] Monty P. ve Lou D. (2003). "Outfitting the Army of One – Technology has Given Today's Troops Better Vision, Tougher Body Armor, Global Tracking Systems – and more Comfortable Underwear"(Nassau and Queens edition ed.), Newsday, B.06.
- [145] Yelken, <http://www.infonews.co.nz/news.cfm?id=105666>, 20 Aralık 2013.

- [146] Eldivenler, <http://turkish.alibaba.com/product-gs/superior-touch-hppe-fiber-speckled-string-knit-glove-with-polyurethane-coated-palm-safety-work-cut-resistant-1008827517.html>, 20 Aralık 2013.
- [147] Askeri alanda kullanım, [http://qxl-fibre.en.alibaba.com/productshowimg/680387537-213949529/Stab and bullet proof vest.html](http://qxl-fibre.en.alibaba.com/productshowimg/680387537-213949529/Stab%20and%20bullet%20proof%20vest.html), 20 Aralık 2013.
- [148] Shah, B., (1995). "Fiber-Reinforced Composites", American Concrete Institute, Detroit U.S.A.
- [149] 7. Songa, P.S., Hwang, S. ve Sheub, B.C., (2005). "Strength Properties of Nylon and Polypropylene Fiber Reinforced Concretes", Cement and Concrete Research, 35: 1546-1550.
- [150] Rafalco, S.D. vd., (2008). "Fiber Reinforcement for Rapid Stabilization of Soft Clay Soils", Transportation Research Board of the National Academies, 2026:21-29.
- [151] History of Nylon US Patent 2,130,523 "Linear polyamides suitable for spinning into strong pliable fibers", U.S. Patent 2,130,947 "Diamine dicarboxylic acid salt" ve U.S. Patent 2,130,948 "Synthetic fibers", (1938).
- [152] Silah, <http://www.airgundepot.com/king-arms-colt-m4a1-nylon-fiber-aeg.html>, 20 Aralık 2013.
- [153] Oyun alanı, <http://mouthtomouthmag.com/wfw7.html>, 20 Aralık 2013.
- [154] Yelken, http://specialtyfabricsreview.com/articles/0610_f2_composites.html, 20 Aralık 2013.
- [155] Tübitak, Bilim ve Teknik (dergi), (2009). 504:68-73.
- [156] Beton Canvas Barınak, <http://www.concretecanvas.com/concrete-canvas-shelters/what-is-it/>, 24 Kasım 2013.
- [157] Modüler Halı, <http://www.archdaily.com/catalog/us/products/1343/modular-carpet-straightedge-interface>, 24 Kasım 2013.
- [158] Naylon lif kullanılmış heykel, <http://www.dezeen.com/2009/04/16/tokyo-fiber-senseware-09-in-milan/>, 25 Kasım 2013.
- [159] Fiber comparison PAN fibers, DOLANİT, [http://www.lenzing.com/fileadmin/template/pdf/plastics and filaments/ptfe/PAN fiber comparison.pdf](http://www.lenzing.com/fileadmin/template/pdf/plastics_and_filaments/ptfe/PAN_fiber_comparison.pdf), 25 Kasım 2013.
- [160] Püskürtme Granit, <http://www.alsecco.com.tr/product/alsecco-puskurtme-granit/80/>, 24 Kasım 2013.
- [161] PAN lif kullanılmış sandalye, <http://www.dezeen.com/2012/06/27/x-federation-by-victor-vetterlein/>, 24 Kasım 2013.
- [162] Tekstil ürünü, <http://www.cichic.com/multicolor-color-block-pleated-belt-polyester-fiber-dress.html>, 26 Aralık 2013.

- [163] Kano, <http://www.sahibinden.com/ilan/alisveris-bahce-yapi-market-yapi-malzemeleri-kano-ctp-cam-takviyeli-polyester-fiber-124578344/detay/>, 26 Aralık 2013.
- [164] Akustik panel, <http://www.woodacousticpanels.com/china-polyester-fiber-acoustic-panel-wall-board-bd-new-pattern-1531341.html>, 27 Aralık 2013.
- [165] Li, V.C., (2002). "Large Volume, High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering", Journal of Applied Polymer Science, 83:660-686.
- [166] BTV Branch Innsbruck ofis binası(Avusturya), <http://www.dezeen.com/2012/09/23/btv-branch-innsbruck-by-rainer-koberl/>, 11 Aralık 2013.
- [167] Yincuhan Sanat Müzesi (Çin), <http://www.dezeen.com/2012/06/08/yinchuan-art-museum-by-waa/>, 11 Aralık 2013.
- [168] Nassim villaları (Singapur), <http://www.evolo.us/architecture/nassim-villas-in-singapore-zaha-hadid/>, 11 Aralık 2013.
- [169] Boulingrin market (Fransa), <http://www.architecte-chatillon.com/site/en/project-halles-centrales-du-boulingrin-reims/>, 11 Aralık 2013..
- [170] Spaceport, Fire Station (Amerika), <http://www.es2eng.com/industrial/projects/161-spaceport-america-fire-station>, 11 Aralık 2013.
- [171] Michael Fowler merkezi (Wellington), <http://openbuildings.com/buildings/michael-fowler-centre-profile-28803#>, 11 Aralık 2013.
- [172] Kollektör, <http://www.airlightenergy.com/new-dimensions-in-trough-technology>, 11 Aralık 2013.
- [173] Kent mobilyası, <http://www.archiproducts.com/en/products/77472/concrete-modular-fiber-reinforced-concrete-bench-arpa-tlf.html>, 11 Aralık 2013.
- [174] Metropolis Apartment (Danimarka), <http://www.architravel.com/architravel/building/metropolis-apartment-building/>, 11 Aralık 2013.
- [175] Eurostar Book Otel (Almanya), <http://www.architonic.com/aisht/eurostars-book-hotel-rieder-reference-projects/5101532>, 11 Aralık 2013.
- [176] Heykel formlu ev, <http://www.mortarsprayer.com/thin-shell-construction/flying-concrete/>, 11 Aralık 2013.
- [177] Lankard, D.R., (1985). "Preparation, Properties and Applications of Concrete-Based Composites Containing 5 % to 20 % Steel Fiber", Steel Fiber Concrete, US-Sweden Joint Seminar, 199-217.
- [178] Normal and High Volume Steel Fibre Concrete Composites for Special Applications' by Dr. V.S. Parameswaran, President & Chief Executive, Design

Technology Consultants, Chennai Chief Executive, International Centre for FRC Composites (ICFRC), Chennai, Former Director, SERC & Past President, ICI.

- [179] Fischer, G. ve Li, V.C., (2002). "Influence of Matrix Ductility on Tension-Stiffening Behavior of Steel Reinforced Engineered Cementitious Composites (ECC)", ACI Structural Journal, 99: 104-111.
- [180] Schneider, B. vd. (1988). "Design and Construction Techniques for SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete)" , 58.
- [181] Konsolosluk binası, Prekast panel duvar, patlamaya dayanıklı panel, güvenlik amaçlı panel, Murrah Federal Binası (Oklahoma) kolon, <http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=600>, 13 Aralık 2013.
- [182] Yeraltı sığınağı, <http://www.editinternational.com/photos.php?id=4e1d8eb940e32>, 13 Aralık 2013.
- [183] Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center, (2013). "Ultra-High Performance Concrete:A State-of-the-Art Report for the Bridge Community".
- [184] NPCA White Paper, "Ultra-High Performance Concrete (UHPC): Guide to Manufacturing Architectural Precast UHPC Elements".
- [185] Graybeal, B., (2011). "One higher Ultra-high-performance concrete proves its worth", FHWA's Turner-Fairbank Highway Research Center in McLean, 18.
- [186] FHWA, (2006). Material Property Characterization of Ultra High Performance Concrete, Federation Highway Administration Report, 1:1-231.
- [187] KCI Standard, (2007). Commentary of Concrete Structure Design Specifications, Kimoondang Publishing Cooperation, 1: 67-68.
- [188] Acker, P., ve Behloul, M., (2004). Ductal Technology: a large spectrum of properties, a wide range of application, In Proceedings of the International Symposium on UHPC Kassel, Germany, 11-23.
- [189] Buitelaar, P., (2004). Heavy reinforced ultra high performance concrete, Proceedings of the Int. Symp. on UHPC, Kassel, Germany, 25-35.
- [190] Bentur, A. ve Mindess, S., (1990). Fibre Reinforced Cementitious Composites Jean-Bouin Stadi (Paris), <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=517108&page=26>, 22 Aralık 2013.
- [191] Jean-Bouin Stadi (Paris), <http://www.info-stades.fr/fr/article/64/paris-nouveau-stade-jean-bouin-francais-oeuvre-art>, 22 Aralık 2013.
- [192] Shawnessy Irt istasyonu (Kanada), <http://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/vol-6-no-2-aprilmay-2006/ductal-a-solution-looking-for-problems/?startRow=37&nextNID=E031BAEB-0418-8A66-DA394F35AAD12DB8>, 22 Aralık 2013.

- [193] Avrupa ve Akdeniz müzesi (Fransa) <http://www.urdesign.it/index.php/2013/06/05/mucem-the-museum-of-european-and-mediterranean-civilizations-by-rudy-ricciotti/>, 22 Aralık 2013.
- [194] Atrium ofis binası (Kanada), <http://precast.org/2012/12/thin-uhpc-cladding-exhibits-green-curves/>, 22 Aralık 2013.
- [195] RATP otobüs merkezi (Fransa), <http://www.archdaily.com/14493/ratp-bus-center-in-thiais-ecdm/>, 22 Aralık 2013.
- [196] Jakway Park Köprüsü , <http://www.fhwa.dot.gov/publications/focus/10oct/06.cfm>, 22 Aralık 2013.
- [197] Bonneau, O. vd. (1997). P-C. "Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes", ACI Materials Journal, 94:286-290.
- [198] Richard, P. ve Cheyrezy, M., (1995). "Composition of Reactive Powder Concrete", Cement and Concrete Research, 25:1501-1511.
- [199] Dugat, J., Roux, N. ve Bernier, G., (1996). "Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes", Materials and Structures, 29:233-240.
- [200] Alexander, M. G., (1993). Nanometres to Gigapascals Cementing Future, A University of Cape Town Publication, Inaugural Lecture, 23.
- [201] Walraven, J., (1999). "The Evolution of Concrete, Structural Concrete", Journal of fib, 1:3-11,
- [202] Taşdemir, M. A. vd. (2004). "Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler", Beton 2004 Kongresi Bildiriler, İstanbul, 24-57.
- [203] Gilliland, S. K., (1996). "Reactive Powder Concrete (RPC), A New Material For Prestressed Concrete Bridge Girders", Building an International Community of Structural Engineers Structures Congress – Proceedings, , New York, 1:125-132.
- [204] Sherbrooke köprüsü (Kanada), http://www.ductal-lafarge.com/wps/portal/ductal/2_3_1-Detail?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connect/lib_ductal/Site_ductal/English_version/Page.Navigation.Structural.Footbridges/KeyProjectDuctal%20Page/KeyProjectDuctal_1278712507168, 15 Aralık 2013.
- [205] Seonyu yaya köprü (Seoul), <http://www.panoramio.com/photo/11901507>
- [206] Seonyu yaya köprü (Seoul), <http://www.planete-tp.com/en/peace-bridge-in-seoul-a892.html>, 15 Aralık 2013.
- [207] Hypergreen tower (Paris), , <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1053305&page=6>, 15 Aralık 2013.
- [208] Yev Sain Laureenne butik tasarımı (Paris), <http://www.archiexpo.com/prod/lafarge/coloured-concrete-flooring-70029-968622.html>, 15 Aralık 2013.

- [209] Li, V.C. (2000). "Large Volume, High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering", Journal of Applied Polymer Science, (2002), 83:660-686.
- [210] Li, V.C. vd., (2002). "Interface Tailoring for Strain-Hardening Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC)", ACI Materials Journal, 99: 463-472.
- [211] Rouse, J.M. ve Billington, S.L., (2007). "Creep and Shrinkage of High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites", ACI Materials Journal, 104:129-136.
- [212] Rathod, J.D. ve Patodi, S.C., (2010). "Interface Tailoring of Polyester-Type Fiber in Engineered Cementitious Composite Matrix against Pullout", ACI Materials Journal, 107: 114-122.
- [213] Choi, W.C. vd., (2012). "Development of recycled strain-hardening cement-based composite (SHCC)for sustainable infrastructures", Composites: Part B, 43:627-635.
- [214] Anadolu Vakfı Hatahanesi ve Angora Apartmanı (İstanbul), <http://www.fibrobeton.com.tr/>, 27 Aralık 2013.
- [215] Ball, H., (2011). 27 35 year review of the GRC Technology, Equipment and Markets, Ball Consulting Ltd., Glassfibre Reinforced Concrete Association Congress, İstanbul
- [216] Ball, H., Durability of naturally aged, GFRC mixes containing Forton Polymer and SEM analysis of the facture interface, Ball Consulting Ltd.
- [217] Majumdar, A.J. ve Laws, V., (1991). Glass Fibre Reinforced Cement, BSP Professional Books, London.
- [218] Taylor, H.P.J., (1992). Precast Concrete Cladding, Halsted Press, New York.
- [219] Cam lif bobin, <http://turkish.alibaba.com/product-gs/fiber-glass-spray-gun-roving-1122846645.html>, 27 Aralık 2013.
- [220] Prestressed Concrete Institute (PCI), (1987). Recommended Practice for Glass Fiber Reinforced Panels, PCI, Chicago, 87.
- [221] Brookes, A., (1998). Cladding of Buildings, New York.
- [222] Johnston, C. D., (2003). "Fiber Reinforced Cements and Concretes", Advances in Concrete Technology, 3.
- [223] Rigaud, S., Chanvillard, G. ve Chen, J., (2012). "Characterization of Bending and Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete Containing Glass Fibers", RILEM:HPFRCC 6, 373-380.
- [224] GRC Industry Group of National Precast Concrete Association Australia, (2006), "Design, Manufacture and Installation of Glass Reinforced Concrete (GRC)", TechMedia Publishing Pty Ltd.Dr.
- [225] Marikunte, S., Aldea, C. ve Shah, S.P., (1997). "Durability of Glass Fiber Reinforced Cement Composites: Effect of Silica Fume and Metakaolin", Elsevier Science, 100-108.

- [226] Marbella Otel, http://www.tripadvisor.com.tr/LocationPhotoDirectLink-g298033-d316253-i34304945-Hotel_Marbella-Marmaris_Mugla_Province_Turkish_Aegean_Coast.html, 22 Aralık 2013.
- [227] Akakın, T. vd., (2012). “Hazır Beton Sektörü ve Beton Kullanımındaki Gelişmeler”, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- [228] Taj Heritage oteli , <http://wallpapermest.blogspot.com/2012/06/wallpaper-taj-superel.html>, 27 Aralık 2013.
- [229] Bennett, D., (2005), The Art of Precast Concrete (Colour Texture Expression), Birkhäuser Basel.
- [230] Space Pavilion (Londra), <http://www.flickrriver.com/photos/blahflowers/2440655827/>, 22 Aralık 2013.
- [231] Space Pavilion (Londra), <http://archinect.com/synthesisdna/project/c-space-pavilion>, 22 Aralık 2013.
- [232] EMV Konut Projesi (Madrid), http://www.danda.be/gallery/emv_social_housing/9/, 9 Aralık 2013.
- [233] FNB Stadyumu (Güney Afrika), <http://www.dreamstime.com/stock-photo-fnb-stadium-national-stadium-soccer-city-image15932280>, 9 Aralık 2013.
- [234] Kutaisi Gürcistan Parlamento Binası, <http://www.fibrobeton.com.tr/proje/kutaisi-gurcistan-parlamento-binası/125/>, 9 Aralık 2013.
- [235] Heykel, <http://gfrc-products.com/sculptures-gfrc/atlantis346/>, 9 Aralık 2013.
- [236] Cephe, <http://www.architecturalmaterials.com/gfrc-high-performance-cement-cladding>, 9 Aralık 2013.
- [237] Li, V. C., Mishra, D. K. ve Wu, H. C., (1995). “Matrix Design for Pseudo Strain-Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites,” Materials and Structures, 28:586-595.
- [238] Sahmaran, M. vd. (2009). “Influence of Aggregate Type and Size on the Ductility and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites,” ACI Materials Journal, 106:308-316.
- [239] Fischer, G. ve Li, V.C., (2003). “Deformation Behavior of Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Engineered Cementitious Composite (ECC) Flexural Members under Reversed Cyclic Loading Conditions. ACI Structural J., 100:25-35.
- [240] Li, V.C., (1993). “From Micromechanics to Structural Engineering – The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications”, Structural Engineering and Earthquake engineering, Japan Society of Civil Engineers, 37-48.
- [241] Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Nakano, K. and Sato, Y. (1999). “Structural Performance of Beam Elements with PVA-ECC”, Proceedings of High

- Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3 (HPFRCC 3), Ed. H.W. Reinhardt and A. Naaman, RILEM Publications S.A.R.L., PRO 6, 531-541.
- [242] Li, V. C., (1998). "Engineered Cementitious Composites—Tailored Composites Through Micromechanical Modeling," Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future, N. Banthia, A. Bentur, and A. Mufti, eds., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, 64-97.
 - [243] Li, V.C., (2007). " Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance", Book Chapter in Concrete Construction Engineering Handbook.
 - [244] Yang, E.H., Yang, Y. ve Li, V.C., (2007). "Use of High Volumes of Fly Ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness", ACI Materials Journal, 104:620-628.
 - [245] Sahmaran, M, Li, V.C., Andrade, C., (2008). "Corrosion Resistance Performance of Steel-Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams", ACI Materials Journal, 105:243-250.
 - [246] Li, M., ve Li, V.C., (2009). "Influence of Material Ductility on Performance of Concrete Repair", ACI Materials Journal, 106:419-428.
 - [247] Wang, S. ve Li, V. C., (2006). "High-Early-Strength Engineered Cementitious Composites", ACI Materials Journal, 103:97-105.
 - [248] Yang, E.H. vd., (2009). "Rheological Control in Production of Engineered Cementitious Composites", ACI Materials Journal, 106:357-366.
 - [249] Ahmed, S.F.U. ve Mihashi, H., (2010). "Strain hardening behavior of lightweight hybrid polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced cement composites", Materials and Structures.
 - [250] Sahmaran, M., Lachemi, M. ve Li, V.C., (2010). "Assessing Mechanical Properties and Microstructure of Fire-Damaged Engineered Cementitious Composites", ACI Materials Journal, 107: 297-304.
 - [251] Yun, H.D. vd., (2011). "Tensile behavior of synthetic fiber-reinforced strain-hardening cement-based composite (SHCC) after freezing and thawing exposure", Cold Regions Science and Technology, 67: 49-57.
 - [252] Mechtcherine, V. vd., (2012). "Coupled strain rate and temperature effects on the tensile behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCC) with PVA fibers", Cement and Concrete Research, 42: 1417-1427.
 - [253] Li, M., ve Li, V.C., (2011). "High-Early-Strength Engineered Cementitious Composites for Fast, Durable Concrete Repair—Material Properties", ACI Materials Journal, 108:3-12.
 - [254] Özbay, E. vd., (2012). "Investigation of Properties of Engineered Cementitious Composites Incorporating High Volumes of Fly Ash and Metakaolin", ACI Materials Journal, 109:565-571.

- [255] Sahmaran, M. vd., (2012). "Combined Effect of Aggregate and Mineral Admixtures on Tensile Ductility of Engineered Cementitious Composites", *ACI Materials Journal*, 109:627-638.
- [256] Özbay, E. vd., (2013). "Self-Healing of Microcracks in High-Volume Fly-Ash-Incorporated Engineered Cementitious Composites", *ACI Materials Journal*, 110: 33-43.
- [257] Chen, Z., Yang, Y. ve Yao, Y., (2013). "Quasi-static and dynamic compressive mechanical properties of engineered cementitious composite incorporating ground granulated blast furnace slag", *Materials and Design*, 44:500-508.
- [258] Kim, Y.Y., Kong, H.J. ve Li, V.C., (2003). "Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-Mixture Shotcreting", *ACI Materials Journal*, 100:511-518.
- [259] Li, V.C. vd., (2004). "Micromechanics-Based Durability Study of Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite", *ACI Materials Journal*, 101: 242-248.
- [260] Lepech, M.D. vd., (2008). "Design of Green Engineered Cementitious Composites for Improved Sustainability", *ACI Materials Journal*, 105:567-575.
- [261] Jun, P. ve Mechtcherine, V., (2010). "Behaviour of Strain-hardening Cement-based Composites (SHCC) under monotonic and cyclic tensile loading Part 1 – Experimental investigations", *Cement & Concrete Composites*, 32:801-809.
- [262] Holschemacher K. vd. (2010). "Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete". *Mater*, 31:2604–15.
- [263] Li V.C vd. (2001). "Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)". *ACI Mater Journal*, 98(6):483–92.
- [264] Yamada, Y. vd., (2010). "Flexural creep behavior of SHCC beams with or without cracks", *Advances in Cement-Based Materials*, 43-49.
- [265] Kabele, P. vd., (1997). "Use of BMC for Ductile Structural Members", in *Proc. of 5th International Symposium on Brittle Matrix Composites (BMC-5)*, 579-588.
- [266] Zhao, Y., (2008). "The Application of the New materials ECC in Structural Engineering", *Enterprise Science and Technology and Development*, 22.
- [267] Mishra, D., (1995). "Design of Pseudo Strain-Hardening Cementitious Composites for a Ductile Plastic Hinge", *Michigan Üniversitesi Doktora Tezi*.
- [268] Li, V.C., (2005). "Design and Field Demonstration of ECC Link Slabs for Jointless Bridge Decks".
- [269] Mihara Ohashi Köprüsü, armacoatings.com, 26 Aralık 2013.
- [270] Keoleian, G.A. vd., (2005). "Life Cycle Modeling of Concrete Bridge Design: Comparison of Engineered Composites Cementitious Composite Link Slabs and Conventional Steel Expansion Joints", *ASCE J. Infrastructure Systems*, 11:51-60.

- [271] Grove Street Köprüsü (Michigan), http://ace-mrl.engin.umich.edu/NewFiles/projects/linkslab_timeline.html, 3 Aralık 2013.
- [272] Rokugo, K., (2010). "Tension tests and structural applications of strain-hardening fiber-reinforced cementitious composites", Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 1533-1540.
- [273] İstinat duvarı onarımı, Püskürtme onarım uygulaması, Viyadük kiriş onarımı, Mitaka Barajı (Hiroshima), Glorio Roppongi Binası, Nabeaure Yokohama Kulesi, ECC'nin borularda kullanımı, duvar elemanı, <http://ace-mrl.engin.umich.edu/NewFiles/eccapp.html>, 3 Aralık 2013.
- [274] Hoshiro, H., Ogawa, A. ve Hitomo, Y., (2008). "Super Ductile Pva-Fiber Reinforced Cement Board", 11 th Int. Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference, 37-45.
- [275] Telefon kılıf tasarımı, <http://technabob.com/blog/2013/07/15/luna-concrete-iphone-skin-2/>, 10 Aralık 2013.
- [276] Yüzen ev (ECC) , <http://www.wardom.org/yeni-nesil-yasam-alani-yuzen-bot-ev-339052/>, 10 Aralık 2013.
- [277] Duvar kaplaması, <http://www.bdcnetwork.com/8-innovations-will-rock-your-next-concrete-project>, 10 Aralık 2013.
- [278] Duvar kaplaması, <http://matsysdesign.com/tag/flexible-formwork/>, 10 Aralık 2013.
- [279] Hyundai binasında cephe kaplaması, <http://www.flexus.co.nz/flexus-bendable-concrete-products/flexus-decorative-panels/> , 10 Aralık 2013.
- [280] Yemek tabağı, <http://buro247.ru/all/term/arxitekrtura>, 10 Aralık 2013.
- [281] Sandalye, <http://www.instructables.com/id/Bent-Concrete-Side-Table-from-a-Rubber-Mold/>, 10 Aralık 2013.
- [282] E. Yonza kadın heykeli (Kanada), bowling topu (2002), heykel kubbe (Danimarka), heykel "Consensus" (California), heykel "Transformation" (California), <http://ace-mrl.engin.umich.edu/NewFiles/artnfun.html>, 10 Aralık 2013.
- [283] Kalıplama örneği, mutfak tezgahı, <http://jasonlloydffletcher.com/U-Bench-2008>, 10 Aralık 2013.
- [284] Atahan, H., N., Pekmezci, B., Y. ve Tuncel, E., Y., (2013). "Behavior of PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composites under Static and Impact Flexural Effects", Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), 1438-1445.

YÖNETMELİKLER

- **Eğilme Dayanımı Tayini (TSEN 1170-5:1997)**

ISO 7500-1’de belirtilen sınıf 2 ihtiyacını karşılayacak doğrulukta bir eğilme deneyi makinesi, 4 noktadan yüklemeli bir eğilme cihazı (min. mesnet çapı 6 mm) ve deney cihazının ters simetri eksenine üzerine yerleştirilebilen ve 0,01 mm doğruluklu deformasyon sensörü. Deney cihazı yük/deformasyon eğrisi çizebilecek bir sisteme uygun olmalıdır (bilgisayarlı veya bilgisayarsız).

- Gerçek imalatı temsil edecek şekilde aynı şartlar altında iki düz plaka üzerinde lifli numune hazırlanır (Püskürtme veya ön karışımli),
- 24 saat sonra numune panel kalıptan çıkarılır ve 6 günlük olana kadar gerçek imalatı temsil edecek şekilde aynı şartlar altında depolanır,
- Şekil EK-1’de gösterildiği yerlerden sekiz deney parçası kenarlardan $50 \pm 1_0$ mm olacak şekilde testere ile kesilir.

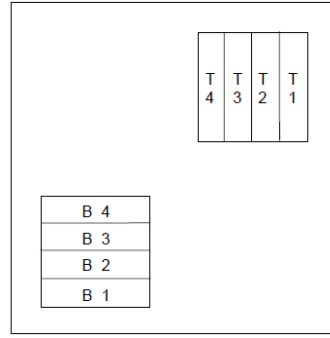
Deney parçalarının boyutları :

a) Mesnetler arası mesafesi sabit olan deney makineleri için;

- genişlik 50 ± 2 mm, uzunluk $225 \pm 25_0$ mm

b) Mesnetler arası mesafesi ayarlanabilir deney makineleri için ;

- genişlik 50 ± 2 mm, uzunluk kalınlığa bağlı ve Çizelge EK-1’de gösterildiği gibi

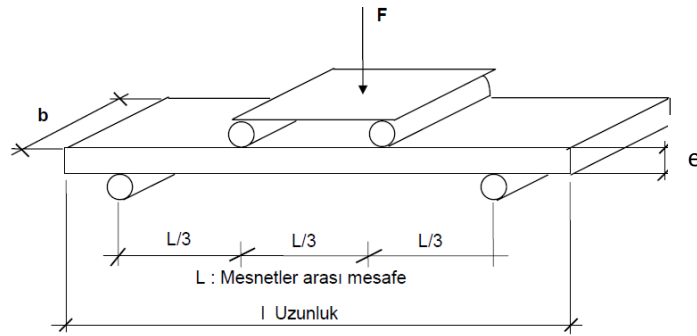


Şekil EK-1 Deney parçalarının yerleri ve işaretlenmesi

Çizelge EK-1 Kalınlığa bağlı olarak deney parçalarının uzunluğu (boyutlar mm'dir)¹

0,5 mm toleransla kalınlıklar (d)	$\leq 6,7$	6,8 - 10,0	10,1 - 12,5	$\geq 12,6$
$+ \begin{smallmatrix} 25 \\ 0 \end{smallmatrix}$ mm toleransla uzunluklar (l)	160	225	275	325

Deney parçaları Şekil EK-2'de gösterildiği gibi Çizelge EK-2'de belirlenmiş L mesnet açıklığına uygun olacak şekilde alt mesnetler üzerine yerleştirilirler.



Şekil EK-2 Deney parçalarının deney makinesine yerleşimi

Çizelge EK-2 Deney parçalarının uzunluklarına bağlı olarak mesnet açıklıkları²

Uzunluk, l	160	225	275	325
Mesnet açıklığı, L	135	200	250	300

Deney parçaları T1, T3, B1 ve B3 alttaki mesnetler üzerine kalıp yüzeyi aşağı gelecek şekilde yerleştirilir. Deney parçaları T2, T4, B2 ve B4 kalıp yüzeyine üst mesnetler temas edecek şekilde yerleştirilirler.

¹Deney parçalarının kalınlıklarındaki değişkenlik %5'i geçmeyecek ve 0,5 mm'den fazla olmamalıdır. Fazlalıklar alınabilir.

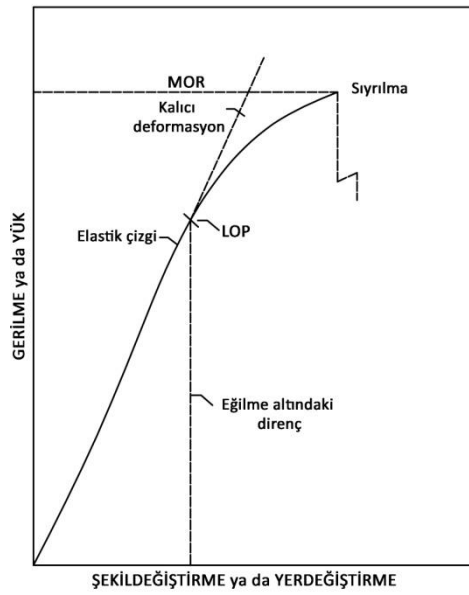
²Boyutlar mm'dir.

Deneye başlamak için yükün uygulanma hızı ayarlanır :

- otomatik yük kontrollü olarak $10 \pm 0,3$ N/s,
- otomatik deformasyon kontrollü olarak $0,03 \pm 0,003$ mm/s.

NOT -Orantısal limitin doğruluğunu değerlendirebilmek için yük ve deformasyon sensörleri deney parçası üst mesnetlerle temasa geçtiği anda sıfırlanmalıdır.

- deney parçasının tamamıyla kırılmasına kadar deneye devam edilir,
- $0,9 F_{MOR}$ değerinde kaydetme durdurulur,
- deney parçalarının kalınlıkları ve genişlikleri kırılma yerlerinden 0,1 mm doğrulukla ölçülür,
- her deney parçası tartılır, mw (g)



Şekil EK-3 Genel yük- yerdeğiştirme eğrisi

$$MOR: 3F_{I_s}/2be^2$$

Burada;

F : Kırılma yükü, N,

I_s : Mesnet düşey eksenleri arasındaki açıklık, mm,

b : Deney numunesinin genişliği, mm,

e : Kalınlık, mm

dir.

Kalınlık e aşağıda verilen şekilde tayin edilir:

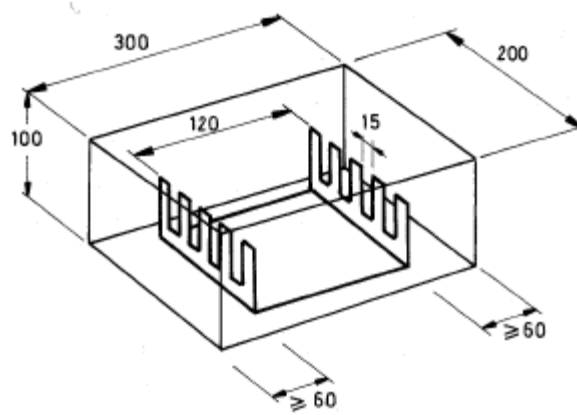
- Desensiz levhalarda, her bir kırılma yükü doğrultusunda alınan iki ölçme değerinin aritmetik ortalamasıdır.
- Yüzeyi desenli levhalarda, su ile yer değiştirme yoluyla belirlenen hacim kullanılarak hesaplanır.

Levhanın/levhaların eğilmede kopma modülü, beş (on) değer (her doğrultuda iki değer) aritmetik

ortalamasıdır.

- **Suya Daldırma Yoluyla Su Emme Ve Kuru Yoğunluk Tayini (TS-EN 1170-6:1997)**

~300x200x100 mm boyutlarında ve $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 'da su ile doldurulmuş düz tabanlı ve Madde 4.2'ye uygun şekilde konumları ayarlanabilen bir cihazla donatılmış tank. Örneğin, Şekil EK-4'de görüldüğü gibi paslanmaz ızgaralı tarak tipinde malzeme,



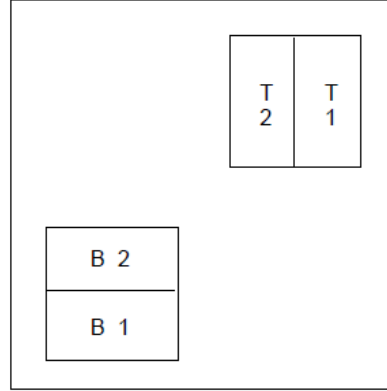
Şekil EK-4 Deney parçalarının doğru yerleştirilebilmesi için bir cihaz örneği (ölçüler mm'dir)

- Gerçek imalatı temsil edecek şekilde aynı şartlar altındandüz plaka üzerinde lifli numune hazırlanır (Püskürtme veya ön karışımli),
- 24 saat sonra numune panel kalıptan çıkarılır ve 6 günlük olana kadar gerçek imalatı temsil edecek şekilde aynı şartlar altında depolanır,
- Şekil EK-5'de gösterildiği şekilde kenarlardan 50 ± 1 mm olacak şekilde 4 deney parçası testere ile kesilir.

Deney parçalarının boyutları :

a) Mesnetler arası mesafesi sabit olan deney makineleri için;

- genişlik 50 ± 2 mm, uzunluk 225 ± 25 mm



Şekil EK-5 Deney parçalarının yerleri ve isimleri

Deney parçaları 6 gün müddetle saklandıktan sonra, yaklaşık 24 saat süresince $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 'lık oda sıcaklığında 7 günlük olana dek saklanır.

Her numunenin boyutu en yakın mm'ye yuvarlatılarak ölçülür ve her birinin hacmi hesaplanır ve cm^3 olarak ifade edilir.

NOT -Hidrostatik tartma metodu ile hacim belirlenmesi de mümkündür.

Dört deney parçası $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 'da su ile dolu düz tabanlı tank içerisine yerleştirilir. Deney parçaları taraklar tarafından düşey olarak yerlerinde tutulur ve uzunlukları doğrultusundaki kenarlarının üzerinde yerleştirilirler. Parçaların su ile kaplanma derinlikleri en az 20 mm olmalıdır.

Suda bekletme süresi karışım bileşimine bağlı olarak

- Polimer içermeyen bileşimler için 24 saat,
- 24 saatte bir ara ölçümü olanlar için 7 gün'dür.

Sudan alındıktan sonra ve tartmadan önce deney parçaları nemli bir bezle yüzey suyu iyice alınana kadar silinir.

Deney parçaları tartılır ;

mw1 : 24 saat suda bekletildikten sonraki numune kütlesi, g,

mw7 : 7 gün sonunda suda bekletildikten sonraki numune kütlesi, g,

Daha sonra deney parçaları sabit kütle “m_d” değerine ulaşınca kadar hava dolaşımli etüv içerisine konur (24 saat aralıkla yapılan iki tartım sonuçlarında %0,1’den daha fazla fark olmamalıdır).

- **Islanma ve Kuruma Etkisi Tayini** (TS-EN 1170-6:1997)

Teslime hazır hâle getirilmiş levhalardan 10 adet levha numune olarak alınır.

Madde 7.3.2’de tarif edilen eğilme deneyine uygun olacak şekilde 10 adet numune çifti kesilir. Her numune çifti, imalât doğrultusunda, birbirine bitişik yerlerden, Şekil 5’te verilen konumda, aynı levhadan kesilmeli ve daha sonra, deney sonuçlarının kıyaslanabilmesi için çifti oluşturan her iki numuneye de aynı numara verilmelidir.

Aynı anda, ikinci grupta bulunan 10 adet numune ise, aşağıda verilen ıslanma-kuruma çevrimlerine,

- Ortam sıcaklığındaki (5 °C’tan daha fazla) su içerisine 18 saat süreyle batırma,
- Sıcaklığı (60 ± 5) °C’ta ve bağıl nemi % 20’den daha düşük oranda ayarlanmış hava dolaşımli etüv içerisinde 6 saat süreyle kurutma. % 20’lik bağıl nem oranına, 6 saatlik kurutma süresinin bitiminden en az 3 saat öncesinde ulaşılmış olmalıdır.

Zorunlu hâllerde, iki çevrim arasında 72 saati geçmemek şartıyla ara verilmesine müsaade edilir. Bu bekleme esnasında, numuneler su içerisinde bekletilmelidir.

Numuneler, gerekli sayıda ıslanma-kuruma çevrimi tamamlandıktan sonra, lâboratuvar ortamında 7 gün süreyle bekletilir.

Numuneler bu sürenin sonunda, Madde 7.3.2’ye uygun şekilde eğilme dayanımı tayini deneyine tâbi tutulur.

Her bir (i) numune çifti için (i = 1’den 10’a kadar), *M*R_i oranı, aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$MR_i = MOR_{fi} / MOR_{fci}$$

Burada;

MORfi : i'inci numunenin (ikinci gruptaki), ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonraki eğilmede kopma modülü,

MORfci : i'inci şahit numunenin (birinci gruptaki) eğilmede kopma modülüdür.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Mehtap TAK YILDIRIM
Doğum Tarihi ve Yeri :24.12.1987
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :mehtaptk@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Mimarlık	YTÜ Mimarlık Fakültesi Mimarlık Anabilim Dalı	
Lisans	Mimarlık	Maltepe Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümü	2010
Lise	Sayısal	Rafet Kahraman Anadolu Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012	Enspd	Mimar
2011	Sepin Mimarlık	Mimar
2010	İnfaş Çelik Konstrüksiyon	Mimar
2009	Yalkı+d tasarım ve danışmanlık bürosu	Mimar