



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YÜKSEK SICAKLIĞA MARUZ KALMIŞ ÇİMENTO ESASLI
LİFLİ KOMPOZİTLERDE TASARIM PARAMETRELERİNİN
SÜLFAT DİRENCİNE OLAN ETKİSİ**

Muhammet Cüneyt ALĞAN

**Ağustos-2024
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YÜKSEK SICAKLIĞA MARUZ KALMIŞ ÇİMENTO ESASLI
LİFLİ KOMPOZİTLERDE TASARIM PARAMETRELERİNİN
SÜLFAT DİRENCİNE OLAN ETKİSİ**

Muhammet Cüneyt ALĞAN

**Danışman
Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN**

**Ağustos-2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammet Cüneyt ALĞAN tarafından hazırlanan “Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalmış Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerde Tasarım Parametrelerinin Sülfat Direncine Olan Etkisi” adlı tez çalışması 07/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Tahir Kemal ERDEM

Danışman

Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Halil DEMİREL

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Muhammet Cüneyt ALĞAN

Tarih: 07/08/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK SICAKLIĞA MARUZ KALMIŞÇİMENTO ESASLI LİFLİ KOMPOZİTLERDE TASARIM PARAMETRELERİNİN SÜLFAT DİRENCİNE OLAN ETKİSİ

Muhammet Cüneyt ALĞAN

**Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN

2024, 66 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN

Prof. Dr. Tahir Kemal ERDEM

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Halil DEMİREL

Yüksek sıcaklık ile birlikte sülfat hücumunun, çimento esaslı lifli kompozitlerin temel mühendislik özellikleri üzerinde oluşturduğu değişim, çalışmanın temel gayesini oluşturmaktadır. Bu maksatla; bünyesinde çelik ve polipropilen lif barındıran çimento esaslı lifli kompozitlerin yangın ve sülfat etkilerine maruz kaldığı bir senaryoda, temel mühendislik özelliklerinin incelenebilmesi amacıyla basınç dayanımı ve UPV değerlerine ait ölçümler gerçekleştirilmiş olup mikroyapısal boyuttaki değişimin gözlemlenebilmesi için numunelere ait Taramalı Elektron Mikroskobu görüntülerinden yararlanılmıştır. Deney kapsamında 6 mm uzunluğa sahip 0.16 ve 0.35 mm çap değerlerindeki çelik lifler ile 0.30 mm çapında polipropilen lif kullanılmıştır. Numuneler 6 farklı karışım parametresi oluşturacak şekilde standart, %5 doygunlukta sodyum sülfat ve %5 doygunlukta potasyum sülfat kür koşullarına maruz bırakılmadan evvel üretimlerine müteakip üçüncü günün sonunda 600 °C sıcaklıkta iki saat bekletilmiştir. Tasarım parametreleri oluşturulurken uçucu kül ihtiva etmeyen karışımlarda su/çimento oranı 0.35 olarak seçilmiş iken uçucu kül barındıran karışımlarda ise uçucu kül/bağlayıcı oranı 0.30 olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde; uçucu külün beton matrisinde poroziteyi düşürerek geçirimsizlik sağladığı bununla birlikte betonda erken yaş dayanımını bir miktar düşürse de zamanla daha mukavemetli bir yapı oluşturduğu tespit edilmiştir. Farklı narinlik oranlarına sahip çelik liflerden, narinlik oranı yüksek olan 0.16 mm çap değerine sahip çelik lifin basınç dayanımına müspet şekilde daha fazla katkı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca sülfat hücumu öncesinde tatbik edilen yüksek sıcaklık nedeniyle eriyen polipropilen liflerin etrenjit gelişimine müsait boşluklar oluşturduğu SEM görüntüleri ile tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Basınç dayanımı, SEM görüntüsü, Sıcaklık, Sülfat hücumu, UPV.

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF DESIGN PARAMETERS ON SULFATE RESISTANCE IN CEMENT-BASED FIBROUS COMPOSITES EXPOSED TO HIGH TEMPERATURES

Muhammet Cüneyt ALĞAN

Batman University Graduate Education Institute

Civil Engineering Department of Science

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Serhat DEMİRHAN

2024, 66 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Serhat DEMİRHAN

Prof. Dr. Tahir Kemal ERDEM

Asst. Prof. İbrahim Halil DEMİREL

The main purpose of the study is to examine the changes in the basic engineering properties of cement-based fiber composites caused by sulfate attack together with high temperature. For this purpose; in a scenario where cement-based fiber composites containing steel and polypropylene fibers are exposed to fire and sulfate effects, compressive strength and UPV values were measured in order to examine the basic engineering properties and Scanning Electron Microscope (SEM) images of the samples were used to observe the changes in microstructural dimensions. Within the scope of the experiment, steel fibers with a length of 6 mm and a diameter of 0.16 and 0.35 mm and a polypropylene fiber with a diameter of 0.30 mm were used. The samples were kept at 600 °C for two hours at the end of the third day after production before being exposed to standard, 5% saturated sodium sulfate and 5% saturated potassium sulfate curing conditions to create 6 different mixture parameters. While the design parameters were being created, the water/cement ratio was selected as 0.35 in mixtures that did not contain fly ash, while the fly ash/binder ratio was determined as 0.30 in mixtures that contained fly ash. As a result of the experiments carried out, it was determined that fly ash provided impermeability by reducing porosity in the concrete matrix, and although it slightly reduced the early age strength in the concrete, it created a more durable structure over time. It was determined that, among the steel fibers with different slenderness ratios, the steel fiber with a diameter value of 0.16 mm, which has a high slenderness ratio, positively contributed more to the compressive strength. In addition, it was determined by SEM images that the polypropylene fibers melted due to the high temperature applied before the sulfate attack created voids that were suitable for the development of ettringite.

Keywords: Compressive strength, SEM image, Sulphate attack, Temperature, UPV.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimime başladığım ilk günden itibaren akademik çalışmalara olan şevkim günbegün artıran, deneyim ve bilgisi ile yorulmadan ve usanmadan her daim yanımda olan, iyi niyetli ve samimi yaklaşımı ile benim için bir hocadan daha fazlasını ifade eden; danışman hocam Sayın Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezin daha da olgunlaşması ve literatüre hedeflenen katkıların sunulması adına çok kıymetli vakitlerini ayırarak sabırla tezimi okuyup değerlendiren ve teze çok önemli yorumlar düşen tez jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Tahir Kemal ERDEM'e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Halil DEMİREL'e;

Gerçekleştirdiğimiz deneyler esnasında değerli yardımları ile birlikte hoşsohbetini ve misafirperverliğini esirgemeyen Sayın Öğr. Gör. Necim KAYA'ya; imkan ve kabiliyetlerinden yararlandığım Batman Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi (BÜMER) Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'na teşekkürü borç bilirim.

Üzerimde maddi manevi emekleri olan aileme ve kız kardeşime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Hayatıma anlam katan bununla birlikte daima yanımda ve kalbimde olan sevgili eşime, varlığı ile bize sevinçler yaşatan oğlum Ömer Kubilay'a gönülden sevgilerimi sunarım.

Muhammet Cüneyt ALĞAN
BATMAN-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Genel Bilgiler	3
2.1.1. Çimento.....	3
2.1.2. Uçucu kül	6
2.1.3. Beton ve özellikleri	9
2.2. Çimento Esaslı Lifli Kompozitler	10
2.3. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Özellikleri.....	12
2.4. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Kullanım Alanları.....	14
2.5. Uçucu Kül Etkisine Bağlı Yapılan Çalışmalar	16
2.6. Isı Değişikliğine Bağlı Yapılan Çalışmalar	21
2.7. Sülfat Etkisine Bağlı Yapılan Çalışmalar	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1. Materyal	27
3.1.1. Çimento.....	27
3.1.2. Agregas.....	28
3.1.3. Su	28
3.1.4. Lifler	29
3.1.4.1. Çelik lifler	29
3.1.5. Polipropilen lifler	29
3.1.6. Kimyasal katkı	30
3.1.7. Uçucu kül	31
3.1.8. Sülfat.....	32
3.1.8.1. Sodyum sülfat	32
3.1.8.1. Potasyum sülfat.....	32
3.2. Deneysel Çalışma	33
3.2.1. Numunelerin hazırlanması	33
3.2.2. Numunelere uygulanan test yöntemleri	36
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	41
4.1. Basınç Dayanımı.....	41

4.2. Ultrases Dalgası Geçiş Hızı (UPV)	47
4.3. SEM Görüntülerinin Değerlendirilmesi.....	50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	59
5.1 Sonuçlar	59
5.2 Öneriler	60
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ	66



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al_2O_3 : Alüminyum Oksit
 CaO : Kalsiyum Oksit
 CH : Kalsiyum Hidroksit
CEM I: Portland Çimentosu
CEM II: Portland Kompoze Çimento
CEM III: Portland Yüksek Fırın Cürufllu Çimento
CEM IV: Puzolanik Çimento
CEM V: Kompoze Çimento
 Fe_2O_3 : Demir Oksit
 SiO_2 : Silisyum Dioksit
 μm : Mikrometre (1/1000 mm)

Kısaltmalar

ASTM: Amerikan Standardı
ÇELK: Çimento Esaslı Lifli Kompozit
ÇL: Çelik Lif
ÇT: Çelik Tel
EFNARC: Özel Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Avrupa Federasyonu
PÇ: Portland Çimentosu
PP: Polipropilen
SEM: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
UK: Uçucu Kül
UPV: Ultrases Dalgası Geçiş Hızı

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun medeniyeti var etme serüveni aralıksız bir şekilde binlerce yıldır devam etmektedir. Bu uzun soluklu serüvene konu olan malzemeler zaman içerisinde değişiklik göstermiştir. Bununla birlikte, günümüzde medeniyetin gelişime katkı sağlama hususunda yoğun şekilde rağbet gören betonarme yapıların ana bileşenini teşkil eden çimento, agrega ve su malzemelerinden oluşan “beton” inşa faaliyetlerinde geniş kullanım alanına sahiptir.

Yukarıda ifade edildiği gibi, betonu oluşturan malzemeler en basit haliyle; çimento, agrega, su olarak nitelendirilmiş olup yüksek basınç kuvvetlerine karşı mukavemetli yapısı ile ön plana çıkmaktadır. Ancak, çimento her ne kadar müspet faydası olan bir yapı malzemesi olsa da bünyesinde barındırdığı dayanım ve dayanıklılık kıstaslarında hatırı sayılır bir iyileştirme yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu maksatla çimento hamuru, kimyasal ve mineral katkıları ile takviye edilmektedir.

Tüm bu malzemelerin bir arada bütünlenmesi sonucunda dahi, betonun sünek olmayan davranışında istenen ilerleme katedilememektedir. Bahse konu sünek davranışın elde edilebilmesi ve betonun çekme kuvvetlerine karşı mukavemetli bir forma getirilebilmesi maksadıyla çeşitli ham maddelere ait lifler kullanılmaktadır. Bu lifler arasında en yaygın kullanılanları çelik, polipropilen, sentetik ve cam kaynaklıdır. Lifler, ele alınan projenin niteliklerine ve kompozit malzemeden talep edilen performansa bağlı olarak fayda, maliyet, etkinlik ölçütleri göz önünde bulundurularak; beton karışımının içerisine cins ve miktar yönünden farklı parametre değişkenleri ile katılım sağlarlar. Ancak, beton içinde bulunan liflerin; homojen şekilde dağılmaması, beton matrisi içindeki yerleşim yönünde oluşan farklılıklar ve çevresel etkilere karşı oluşturduğu tepki betonun dayanım ve dayanıklılığına doğrudan ve/veya dolaylı yönden etki etmektedir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Betonarme yapıım tekniği ile inşa edilmiş bina/tesislerde yaşanması muhtemel bir yangın halinde ortamın sahip olduğu yüksek sıcaklık değeri taşıyıcı sistemi oluşturan beton ve çelik elemanların evsafında ciddi bozulmalara sebebiyet verdiğinden, yapının servis ömrünün çok öncesinde kullanılamaz duruma gelmesine neden olmaktadır.

Çağımızda enerji ihtiyacına istinaden oluşan yüksek talep; konut, işyeri ve özellikle üretim gerçekleştirilen tesislerde yangın ihtimalinin sürekli göz önünde bulundurulmasını elzem kılmaktadır. Hayatın her alanında kendini giderek daha da hissettiren yangın olgusu, konunun giderek ehemmiyetini artırmakta ve yapılar için kritik bir sınav niteliği taşımaktadır.

Betonun servis ömrü boyunca aşması gereken bir diğer imtihan ise; sülfat hücumudur. Sülfat hücumu, hemen hemen her yapıda ortaya çıkan ve betonda yarattığı tahribat nedeniyle kullanım ömründe kısalmaya yol açan bir etkidir. Sülfatın, betonun yapısında oluşturduğu genleşme yüzünden meydana gelen bu tahribat; dayanım ve dayanıklılık problemlerini beraberinde getirmekte mekanik özelliklerde ise menfi yönde değişikliklere kaynaklık teşkil etmektedir.

Betonu muhteviyatında barındıran yapılarda olduğu gibi, çimento esaslı lifli kompozitlerden teşkil edilmiş yapılarda da sıcaklık ve sülfat etkisi yapının uzun yıllar ayakta kalabilmesi noktasında kritik öneme sahip iki bağımsız etkidir.

Mevcut tez çalışmasının amacı; dayanım ve dayanıklılığı hedef alan söz konusu iki etkenin, çimento esaslı lifli kompozitler üzerinde oluşturduğu bütünleşik etkiyi inceleyerek mukavemet açısından gerçekleşen kayıplara yönelik mertebenin tespit edilmesidir. Farklı tasarım parametreleri esas alınarak oluşturulan deney numunelerinin, yangın ve sülfata maruz kaldığı senaryo üzerinden elde edilen veriler ışığında en ideal karışım kombinasyonunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Bununla birlikte, endüstriyel bir atık olan uçucu külün beton karışımı içerisinde çimento yerine ikame edilme hususu; bahse konu senaryo özelinde irdelenecektir.

Mevcut tez çalışması kapsamında; yukarıda ifade edildiği gibi tahrip gücü yüksek iki durabilite problemine laboratuvar ortamında maruz kalan çimento esaslı lifli kompozitlerin sergilediği davranışın tespit edilmesi maksadıyla; UPV (Ultrases Dalgası Geçiş Hızı Ölçümleri) değişimi takip edilmiş olup uygulanan basınç testleri ile oluşan hasarın derecelendirilmesi sağlanacaktır. İcra edilecek deneysel faaliyetlerde; çimento esaslı lifli kompozitlerden teşkil edilen numunelerin 7, 28 ve 90 günlük test sonuçları referans olarak alınmış olup mikroyapısal değişimin gözlemlenebilmesi için Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope – SEM) görüntülerinden yararlanılmıştır.

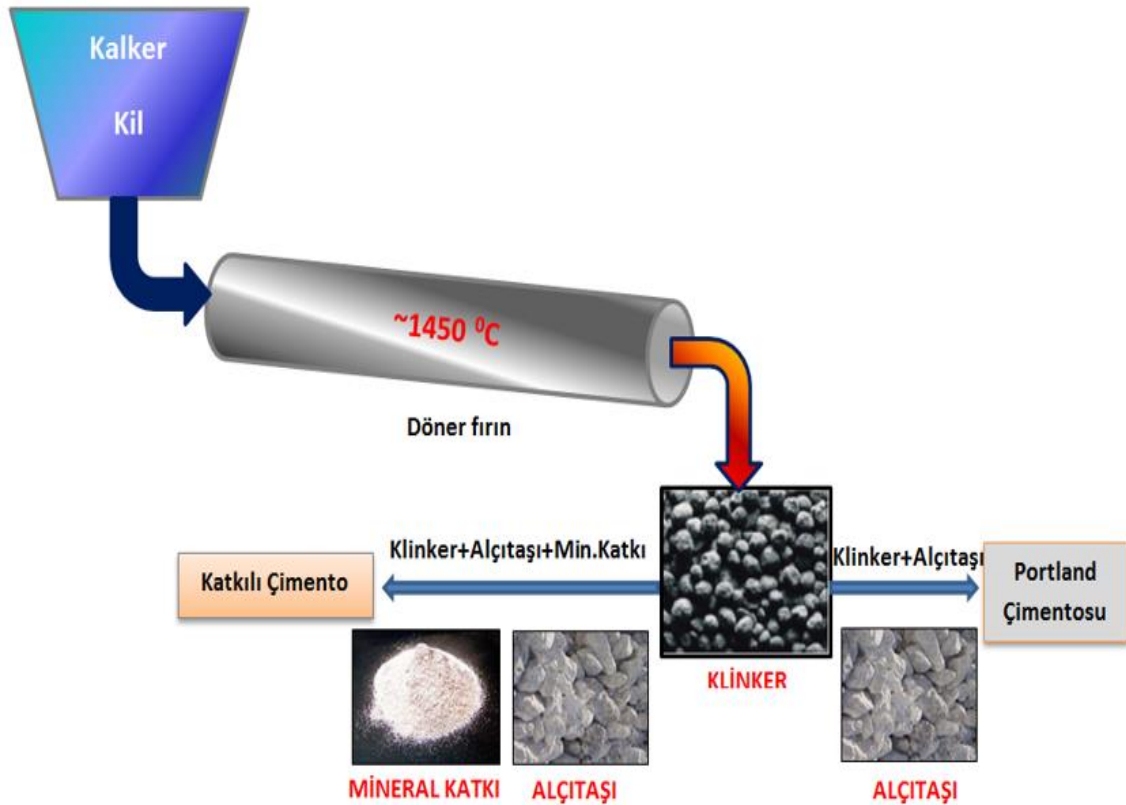
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Genel Bilgiler

2.1.1. Çimento

Çimento; su ile reaksiyonu sonucunda priz alarak sertleşen ve müteakip süreçte su altında dahi dayanım ile dayanıklılığını koruyabilen ve betonun temel hammaddesi olan inorganik hidrolik bağlayıcı olarak tanımlanır (TS EN 197-1, 2012).

Çimento üretiminde hammadde olarak kullanılan kalker ve kil bileşenlerinin yüksek sıcaklık değerlerinde pişirilmesi sonucu klinker isimli yeni bir ürün ortaya çıkar. Klinkerin düşük miktarda alçıtaşı ile öğütülmesi sonucunda elde edilen yeni ürüne ise Portland Çimentosu denilmektedir. Bahse konu son ürün, su ile karıştırılması neticesinde gözlemlenen kimyasal reaksiyonlara müteakip bağlayıcılık özelliği kazanır (Popovics, 1992). Çimentonun oluşum sürecine ilişkin ifade edilen işlem adımları Şekil 2.1.'de şematize edilmiştir.



Şekil 2.1. Çimentonun Oluşum Süreci (Engin, 2014)

Çizelge 2.1. Genel çimento ürünlerinin kütlece yüzde bileşimi (TS EN 197-1) (devamı)

Ana Tipler	Çimento Tipleri ve İşaretleri		Ana Bileşenler										Minör İlave Bileşen
			Klinker	Yüksek Fırın Cürufu	Silis Dumanı	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist	Kalker		
						Doğal	Doğal Kalsine Edilmiş	Silissi	Kalkersi				
			K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM II	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEMII /A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEMII /B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEMII /A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEMII /B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland Pişmiş Şistli Çimento	CEMII /A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEMII /B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portland Kalkerli Çimento	CEMII /A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEMII /B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEMII /A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEMII /B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland Kompoze Çimento	CEMII /A-M	80-94	← 6-20 →									0-5
		CEMII /B-M	65-79	← 20-35 →									0-5
CEM III	Yüksek Fırın Cürufu Çimento	CEMIII /A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMIII /B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMIII /C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Puzolanik Çimento	CEMIV /A	65-89	-	← 11-35 →					-	-	-	0-5
		CEMIV /B	45-64	-	← 36-55 →					-	-	-	0-5
CEM V	Kompoze Çimento	CEMV /A	40-64	18-30	-	← 18-30 →			-	-	-	-	0-5
		CEMV /B	20-38	31-50	-	← 31-50 →			-	-	-	-	0-5

Çizelgede 2.1.'de ifade edildiği üzere, günümüzde Portland Çimentolar yapılan standardizasyon neticesinde 5 ana grup ve toplam 27 alt gruba olmak üzere sınıflandırılmıştır.

CEM I türü olarak adlandırılan Portland Çimentolar, klinker ve %5 mertebesinde alçıtaşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen katkısız çimentolardır (TS EN 197-1, 2012).

CEM II türü olarak isimlendirilen Portland Kompoze Çimentolar, kendi içerisinde 19 adet varyasyona sahip olmakla birlikte muhteviyatında %6 ve %35 mertebesinde değişkenlik gösteren kalker, pişmiş şist, uçucu küller, puzolanik malzemeler, silis dumanı, yüksek fırın cürufu barındırırlar. İçeriğinde bulunan söz konusu malzemelerin yüzdesine istinaden CEM II çimentosu olarak adlandırılır (TS EN 197-1, 2012).

CEM III olarak kategorize edilen Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimentolar, kendi içinde 3 gruba ayrılmakta olup A, B ve C tipleri sırasıyla %36, %66, %81'den fazla oranlarda yüksek fırın cürufunu bileşiminde bulundurulur (TS EN 197-1, 2012).

CEM IV şeklinde ifade edilen Puzolanik Çimentolar, kendi içinde 2'ye ayrılmakta olup A tipi %11-35 arasında değişen puzolan bulunurken B tipinde ise bu oran %36-55'e kadar çıkmaktadır (TS EN 197-1, 2012).

CEM V Kompoze Çimentolar, yüksek fırın cürufu ve klinkere ilave olarak bileşiminde silisli uçucu kül, doğal kalsine edilmiş puzolan ve doğal puzolanları barındırır (TS EN 197-1, 2012).

2.1.2. Uçucu kül

Uçucu küller (UK), düşük kalori değerine sahip kömürlerin öğütülerek termik santrallere ait fırınlarda yakılması esnasında gökyüzüne yükselen partiküllerin baca çıkışında elektro statik veya mekanik yöntemlerle tutulması sonucunda elde edilirler. Bu yönüyle, uçucu küller beton karışımına mineral katkı olarak eklenen yapay bir puzolan olarak tanımlanabilir. UK bulunduğu form itibarıyla, 1-300 µm çapına sahip küresel bir morfolojiye sahiptir (Kocataşkın, 1987).

İnce taneli bir puzolan olan UK, açık ve koyu gri arasında değişen renk tonlarına sahiptir. Gri renge ilişkin koyu veya açık olma durumu elde edildiği kömürün muhteviyatına ve yakılma şartlarına bağlıdır. Yakılma işleminin tam olarak gerçekleşmediği durumlarda siyah renkli yanmamış karbon nedeniyle uçucu kül koyu

gri renktedir. Bununla birlikte iyi yakılma neticesinde oluşan demir içeriğinden kaynaklı olarak UK açık gri renk alır (Görhan ve ark., 2009)

Termik santrallerde gerçekleşen bu yakılma esnasında fırınlara ait sıcaklık değeri 1600 °C'yi bulmaktadır. Bu yüksek sıcaklıklarda, kömürün muhteviyatında yer alan minerallerden çoğunluğu ortaya çıkan üründe yani uçucu külde az miktarda bulunur. Bahse konu kömürün bünyesinde yer alan ana mineraller; karbonatlar, sülfidler, alüminyum silikatlar, kloritler ve silika şeklinde beş kategoride sınıflandırılabilirler ve bu hususa Çizelge 2.2'de yer verilmiştir (Karayığit ve Onocak, 1999).

Çizelge 2.2. Yakılma esnasında inorganik şekilde ortaya çıkan dönüşümler (Mattigod ve ark., 1990)

Kömür İçindeki Mineraller	Uçucu Küldeki Dönüşüm Ürünleri
Fillosilikatlar	Amorf Madde, Mullit ($Al_6Si_2O_{13}$), Kuvars
Kuvars	Amorf Madde, Kuvars (SiO_2)
Pirit (FeS_2), Siderit ($FeCO_3$)	Hematit (Fe_2O_3), Manyetit (Fe_3O_4)
Demiroksitler	
Kalsit ($CaCO_3$)	Kireç (CaO)
Dolomit $Ca Mg (CO_3)_2$	Kireç, Periklaz (MgO)
Jips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	Anhidrit ($CaSO_4$)
Standart şartlardaki fiziksel Ankerit $Ca (Mg Fe Mn) (CO_3)_2$	Kalsiyum Ferrit ($CaFe_2O_4$), Periklaz

UK elde ediliş biçimi ile endüstri sektöründe elde edilen atık bir malzeme hüviyetindedir ve bu malzemenin elverişli şartlar altında depolanmasına ihtiyaç vardır. Uçucu külün, betonun üretimi esnasında çimentonun kısmi ikamesi olarak kullanılması sonucunda CO_2 salınımı azalmakta ve küresel ısınma konusunda daha çevreci bir yaklaşım sergilenmektedir. Uçucu külün çimentoya muadil şekilde kullanılması ile birlikte bu malzemenin depolanmasına ilişkin sorunların bir kısmı ortadan kaldırılmış olacaktır (Mehta ve Gjörv, 1987).

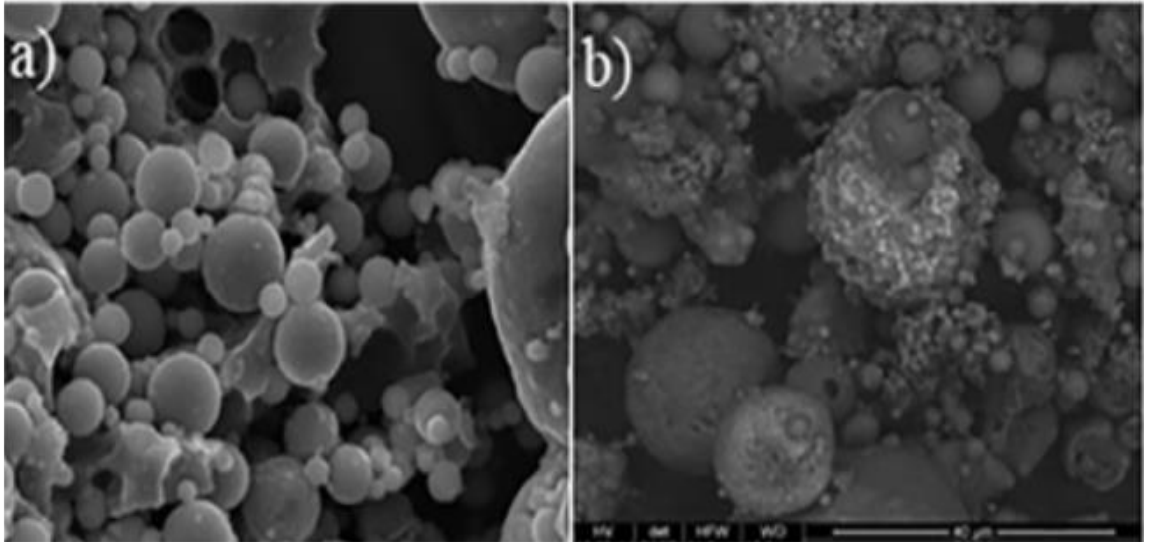
Çoğunlukla, tek başına kullanımında bağlayıcı nitelik taşımayan UK, sönmüş kireçle gerçekleştirdiği hidratasyon tepkimesi sonucunda su içinde sertleşir (Kocataşkın, 1987).

Son yıllarda, yürütülen birçok deneysel çalışma sonucunda uçucu külün çimento ve beton üretiminde değerlendirilebilecek puzolan özellikli bir malzeme olduğu görülmüştür. Belirli oranlarda, doğru kullanımı ile birlikte betona ait karakteristik özelliklerde iyileşme sağladığı ve dış ortamdan kaynaklı kimyasal etkilere karşı dayanıklılık kazandırdığı bilinmektedir (Yazıcı, 2004)

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, malzemenin muhteviyatında barındırdığı kimyasal bileşen yüzdesinin referans alındığı ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları kullanılmaktadır (Görhan ve ark., 2009).

ASTM C 618 standardı incelendiğinde, uçucu küllerin sınıflandırılmasında F veya C tipi olarak gruplandırıldığı görülmektedir. F tipi olarak adlandırılan uçucu küller, bitümlü kömürden elde edilmekte ve toplamda %50'den fazla $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içerirler. Bununla birlikte bu sınıfta yer alan uçucu küller, %18'in altında bulunan CaO nedeniyle düşük kireçli olarak ifade edilmektedir. F tipi uçucu küller pozolanik özellikleri bünyelerinde barındırırlar. C tipi olarak adlandırılan uçucu küller ise, linyit veya yarı bitümlü kömürden elde edilmekte ve toplamda %50'den fazla $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içerirler. Bununla birlikte bu sınıfta yer alan uçucu küller, %18'un üzerinde bulunan CaO nedeniyle yüksek kireçli olarak nitelendirilmektedir. C tipi uçucu küller pozolanik özellikleri bünyelerinde barındırmakla birlikte bağlayıcı özellikte gösterirler (ASTM C 618, 2023).

ASTM C 618 standartlarına uygun olarak kategorize edilen F ve C tipi uçucu kül partiküllerine ilişkin Scanning Electron Microscope (SEM) görüntüsü Şekil 2.2. de sunulmuştur.



Şekil 2.2. Uçucu küllere ilişkin SEM görüntüsü: A) F tipi, b) C tipi (Giergiczny, 2013)

TS EN 197-1 standardı incelendiğinde ise, uçucu küllerin sınıflandırılmasında V (silissi) veya W (kalkerli) tipi olarak gruplandırıldığı görülmektedir. V tipi olarak adlandırılan uçucu küller, genellikle pozolanik özellikleri bünyesinde barındırmakta ve küresel taneciklerden oluşan ince bir toz formunda bulunmaktadır. V sınıfından yer alan

uçucu küller, esasen reaktif silisyum oksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) içeriğini ihtiva etmektedir. Bununla birlikte bu sınıfta yer alan uçucu küller, %10'dan az reaktif kireç ve %25'den fazla reaktif silisi muhteviyatında barındırmaktadır. W tipi olarak adlandırılan uçucu küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri bünyesinde barındırmakta ve küresel taneciklerden oluşan ince bir toz formuna sahip olmaktadır. W sınıfından yer alan uçucu küller, esasen reaktif silisyum oksit (SiO_2), reaktif kireç (CaO) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) bileşenlerini içeriğinde ihtiva etmektedir. Bununla birlikte bu sınıfta yer alan uçucu küller, %10'dan fazla reaktif kireç ve %25'den fazla reaktif silisi muhteviyatında barındırmaktadır (TS EN 197-1, 2012).

2.1.3. Beton ve özellikleri

Beton; farklı tane boyutlarına sahip agregalar ile birlikte su ve çimentonun karışımından elde edilen bir yapı malzemesidir. 150 mm çap ve 300 mm uzunluğa sahip silindirik numunelerin, 28 günlük kür süresi sonunda 50 MPa'ı geçmeyen eksenel basınç dayanım değeri gösterdiği betonlar, geleneksel beton olarak isimlendirilmektedir. Üretiminde doğal agregaların kullanıldığı geleneksel betonların birim ağırlıkları 2800 kg/m³ mertebelerine kadar çıkabilmektedir.

Betonun keşfi ile birlikte; inşaat sektöründe, çimento esaslı malzemelere yönelik rağbet sürekli olarak artış göstermiştir. Bunun en önemli sebebi; betonun diğer yapı malzemelerine kıyasla sahip olduğu avantajlardır.

- İstenen şekil ve boyutlarda yapı elemanları tasarlanmasını mümkün kılmaktadır.
- İnşa edilen yapılarda, yerinde döküm tekniği ile veyahut ön üretimli elemanlar halinde kullanım kolaylığı sağlar.
- Beton, çelik donatı elemanları ile aynı ısı genleşme katsayısına sahip olup mükemmel bir uyum sergilemektedir.
- Tasarım parametrelerine riayet edilerek elde edilen beton, yüksek basınç dayanımı göstermektedir.
- Dış etkenlerin tahrip edici özelliklerine karşı gösterdiği direnç, bakım ve idame harcamalarını düşürmektedir.

Beton, ifade edilen bazı üstün özelliklerine rağmen bir takım olumsuz özelliklere de sahiptir.

- Çekme ve eğilme kuvvetlerine maruz kalan sertleşmiş betonun, kolayca çatlaması hatta kırılması muhtemeldir.
- Dış ortamda oluşan sıcaklık farkları betonda hacimsel değişimlere sebebiyet vermektedir.
- Betonun sünek olmayan gevrek yapısından dolayı özellikle ani yüklemeler ve darbeler karşısında yeterince mukavemet gösterememektedir.
- Sabit yüklemeler karşısında zamanla oluşan kalıcı deformasyonlar görülmektedir.
- Birim ağırlığının fazla olması nedeniyle yapılarda zati yükleri artırır.
- Tam olarak geçirimsizlik özelliği göstermeyen geleneksel beton, bünyesine sızan zararlı kimyasallara karşı yeterli durabiliteyi sergileyememektedir (Erdoğan, 2010).

2.2. Çimento Esaslı Lifli Kompozitler

Geleneksel beton, belirtilen özelliklerden görüleceği üzere, sahip olduğu avantajların yanı sıra iyileştirilmesi gereken dezavantajları muhteviyatında bulundurmaktadır. Bahse konu bazı dezavantajların giderilmesi maksadıyla kimyasal ve mineral katkıları ile desteklenen geleneksel betona, üstün özelliklerinin geliştirilmesi için “lif” adı verilen malzemeler ilave edilir.

Betonda lif kullanımına, Avusturyalı Ludwig Hatschek tarafından 1901 yılında üretilen asbest kullanımı ile başlanmıştır (Bilim, 2019). Asbest; magnezyum silikat, kalsiyum-magnezyum silikat ve sodyum-demir silikat bileşiminde yer alan lif esaslı minerallere verilen isimdir (Atabey, 2014). Fakat, asbest insan sağlığı üzerinde oluşturduğu olumsuz etki nedeni ile günümüzde kullanılmamakta olup asbestin yerine ikame edilen cam, çelik ve sentetik esaslı malzemeler ile lifli beton üretimi gerçekleştirilmektedir (Bilim, 2019).

Özetle, insanoğlu tarafından 19. yüzyılın sonunda ilk defa lif üretimi gerçekleştirilmiştir. Ancak ifade edilen zaman başlangıcına rağmen bahse konu liflerin 60 yıllık bir geçmişinden söz edilebilir. Geçen bu kısa zaman zarfında dahi, insanoğlu tarafından üretimi gerçekleştirilen lifler vazgeçilmez olmayı başarmıştır (Chawla, 1998).

Beton matrisinde yer alan çeşitli lif türlerinin, söz konusu kompozit yapı malzemelerinde gösterdiği davranışın daha iyi anlaşılabilmesi adına farklı ortam ve

şartlar altında gerçekleştirilen çalışmalar zamanla artmaktadır. 1960'lı yıllardan günümüze kadar yapılan çalışmaların nihayetinde, beton karışımına eklenen lifler vasıtasıyla, betonda gelişen çatlak mekanizmasının ilerleme hızı azaltılmıştır. Bununla birlikte, lifli betonlarda maksimum yükten sonra bile oluşan deformasyonlar sayesinde, lifli betonlara ait enerji sönümleme kapasitesinin normal betonlara kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür (Akman, 1990).

Geleneksel betona üstün özellikler kazandırmak için çimento hamuruna eklenen lifler genel kabul gördüğü şekliyle; doğal ve yapay olarak iki kategori halinde sınıflandırılabilir.

1. Doğal lifler aşağıda ifade edildiği üzere üç ana grupta sınıflandırılabilir;
 - a. Bitkisel Lifler: Bambu, hindistan cevizi kabuğu, kenevir, şeker kamışı posası gibi malzemeleri barındırır.
 - b. Hayvansal Lifler: Yün, ipek ve kıl gibi malzemelerden teşkil edilir.
 - c. Madensel Lifler: Asbest, karbon ve metal kaynaklı malzemeleri ihtiva eder (Chawla, 1998).

Doğal lifler yapıları gereği;

- a. Çimento hamurunda bulunan su muhteviyatını kolayca emer.
 - b. Sıcaklık karşısında evsaflarında yumuşama olmaz ve ebatlarında bir değişim gözlenmez.
 - c. Doğrudan gelen güneş ışınlarına karşı hassasiyet gösterir (Türker ve Balanlı, 1992).
2. Yapay lifler iki ana grupta toplanabilir;
 - a. Cam Lifler
 - b. Polimer Lifler: Akrilik, aramid, poliüretan, polipropilen, naylon gibi çeşitli malzemelerden oluşur (Chawla, 1998).

Yapay lif kaynağını oluşturan malzemelerin farklı evsafa bulunmasından dolayı herhangi bir genellemeye tabi tutulamamaktadır. Ancak, cam liflerin; ham şekilde beton matrisinde yer alması halinde betonun alkalitesi söz konusu malzemeyi çözer ve bu olay sonucunda oluşan yerel boşluklar betonun matriste süreksizliklere neden olur (Türker ve Balanlı, 1992).

2.3. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Özellikleri

ASTM C 1116/C 1116M'ye göre lifler ile güçlendirilmiş betonlar üç tip şeklinde gruplandırılmıştır:

- Tip 1: Çelik Lif Takviyeli Betonlar: Paslanmaz çelik, çelik alaşımı veya karbon çeliğini ihtiva ederler.
- Tip 2: Cam Lif Takviyeli Betonlar: Alkalite reaksiyonlarına karşı dirençli cam lifleri içeriğinden barındırırlar.
- Tip 3: Sentetik Lif Takviyeli Betonlar: Çimento hamurunun bünyesinde yer alan ve bozulmayı tetikleyen maddelere karşı direnci kanıtlanmış sentetik lifleri içerirler (ASTM 1116/C 1116M, 2023).

Çelik, cam ve karbon muhteviyatlı lifler gibi elastisite modülü yüksek lifler, gevrek davranışları nedeniyle çimento esaslı kompozitlerin dayanım ve tokluğunu arttıırırlar. Bununla birlikte, polivinil-alkol, polipropilen ve polietilen muhteviyatlı lifler gibi elastisite modülü düşük lifler ise, çimento esaslı kompozitin sünekliğini arttırarak çatlamayı önler (Kawamata ve ark., 2003).

En çok tercih edilen lif türü, çelik liflerdir. Söz konusu life yönelik gösterilen rağbetin temel nedenleri; çelik ile beton arasında kurulan sinerji, kullanım kolaylığı, sağladığı yüksek tokluk, statik ve dinamik yüklemelere karşı göstermiş olduğu direnç olarak ifade edilebilir (Holschemacher ve ark., 2010).

Çimento esaslı lifli kompozitler (ÇELK), geleneksel betona kıyasen plastik şekil değıştirme aşamasında sayıca fazla olan küçük çatlakların oluşmasını engelleyerek bu çatlakların genişlemesini önler (Ersoy, 2001).

Çimento esaslı lifli kompozitlerde farklı nedenlerden dolayı oluşan çatlaklar, malzemenin yük taşımaya başlaması ile birlikte büyümeye başlar. Çatlağın genişlemesinde rol alan gerilme kuvveti öncelikle liflere aktarılarak karşılanır. Ancak, yük aktarılan lifin kopması veya betondan sıyrılması sonucunda gerilme kuvveti beton yapıya aktarılır. Betonda ilerleyen çatlak bir başka lif ile karşılaşıp dek deformasyon oluşturur. Bu döngü, deformasyon miktarı artıkça tekrarlanır. Sonuç olarak, homojen bir yapı sergileyen çimento esaslı lifli kompozitlerde kırılma, yükleme eksenine paralel şekilde oluşan birçok çatlağın oluşumu ile gözlenir (Arısoy, 2005).

Beton matrisinde kullanılan bazı liflere ilişkin teknik özellikleri Çizelge 2.3.'te ifade edilmiştir (Shah ve Balaguru, 1992; Topçu 2006).

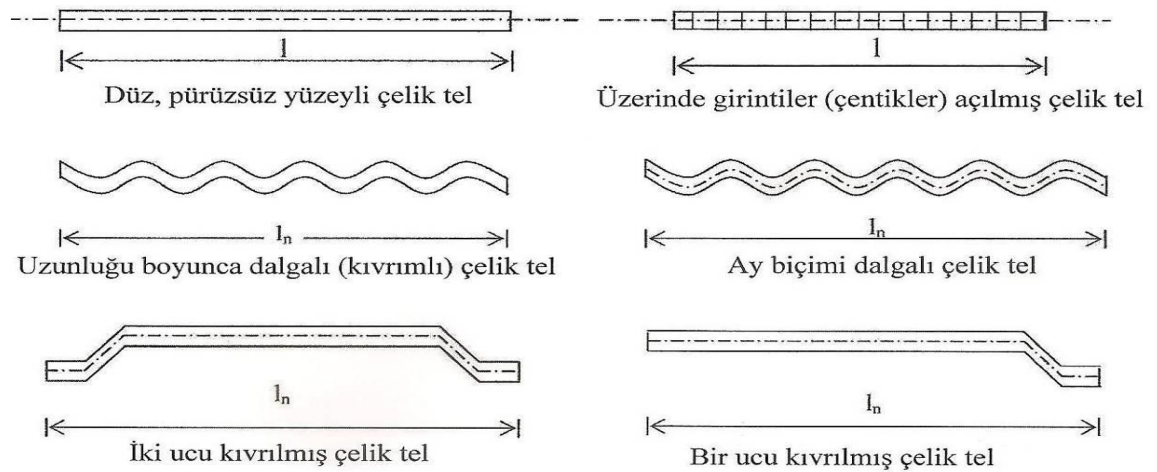
Çizelge 2.3. Bazı lif tiplerine ilişkin teknik özellikler

Lif Tipi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (10^3 , MPa)	Maksimum Uzama (%)	Özgöl Ağırlık
Çelik	276 - 2760	2.1	25 - 45	1.1
Akrilik	207 - 414	83 - 138	0,6	3.2
Asbest	552 - 966	4,8	3 - 10	1.5
Pamuk	414 - 690	69	1.5 - 3.5	2.5
Cam	1035 - 3795	4.1	6 - 20	1.1
Naylon	759 - 828	8.3	11 - 13	1.4
Polyester	724 - 863	0.14 - 0.4	10	0.95
Polietilen	690	3.5	25	0.9
Polipropilen	552 - 759	6.9	10 - 25	1.5
Suni ipek	414 - 621	69 - 117	0.6	2.7
Taş yünü	483 - 759	200	0.5 - 35	7.8

Çelik lifler, bünyesinde düşük miktarda karbon barındıran C 1008 çeliğinden imal edilirler. Çelik lifler, yüksek mertebede tatbik edilen çekme gerilmelerine karşın düşük uzama oranına sahiptir (Topçu, 2006). TS EN 14889-1'e göre beton matrisinde kullanılan çelik lifler üç ana grupta toplanmıştır.

- a. Düz, pürüzsüz teller
- b. Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller
 - Üzerine girintiler (çentikler) açılmış teller
 - Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller
 - Ay biçimi dalgalı teller
- c. Sonu kancalı teller
 - İki ucu kıvrılmış teller
 - Bir ucu kıvrılmış teller

Söz konusu liflere ait şematik gösterim Şekil 2.3.'te sunulmuştur.

**Şekil 2.3.** Çelik liflere ait şekiller (TS 14889-1, 2006)

Muhteviyatında çelik tel (ÇT) barındıran çimento esaslı lifli kompozitlerin kullanımı ile elde edilen yararlar şu şekildedir (Taşdemir ve ark., 2004):

- Eğilme kapasitesi arttırılmış sünek beton elde edilmesi,
- Bünyesinde donatı korozyonu gözlemlenmeyen yapı elemanlarının imali
- Etkin çatlak kontrolünün sağlanması
- Donatı işçiliğine ilişkin emek ve zaman tasarrufu
- Betonun basınç dayanımını %25 mertebesine kadar arttırabilmesi

Muhteviyatında polipropilen lif barındıran ÇELK kullanımı ile elde edilen yararlar şu şekildedir (Bekaert, 1998):

- Priz alan betonda büzülme gerilmelerine karşı direnç sağlaması
- Beton matrisinde homojen dağılım göstermesi
- Düşük özgül ağırlığına rağmen sahip olduğu geniş yüzey alanı
- Büzülme olayı sonucunda gerçekleşmesi muhtemel çatlak riskini düşürmesi
- Beton matrisinde iyi bir aderans göstermesi

2.4. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Kullanım Alanları

Yalın halde bulunan çimento esaslı malzemelerin çekme dayanımları ve tokluk değerleri düşük olduğundan dolayı bahse konu özelliklerin istenilen düzeye getirilebilmesi için beton matrisinin lifler ile takviye edilmesi sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Beton matrisinde yer alan lifler, statik ve dinamik yüklemelere maruz kalan elemanlardaki çatlak oluşum aşamalarını kısmen veya tamamen önler ya da geciktirir. Böylelikle, çatlak gelişimi yavaşlatılan çimento esaslı lifli kompozit yapı elemanlarında ani kırılma riski önemli ölçüde indirgenmiş olur ve servis ömürlerinde artış görülür (Aral, 2006).

Liflerin beton matrisine eklenmesi ile gözlemlenen müspet ilerlemeler, çimento esaslı lifli kompozitlerin geniş kullanım alanlarında kendine yer bulmasına yol açmıştır. Öncelikle çelik lif takviyeli betonların kullanım alanları aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Kozak, 2013):

- Depreme Dayanıklı Yapıların İnşasında: Dinamik etkilere maruz (deprem durumu gibi) bir yapının enerji yutma kapasitesinin arttırılmasında çelik liflerin önemli rolü bulunur.

- Yol Döşemelerinde: Özellikle trafik yükünün oluşturduğu aşınma etkilerine karşı dayanıklılık sağlarken çekme kuvvetlerine karşı gerekli dayanım kriterlerini sağlar.
- Büyük Sıcaklık Farklarına Maruz Kalan Yapılarda: Çelik lifler, sıcaklık farklarının oluşturduğu termal şok etkilerini minimize eder.
- Su Yapılarında: Baraj, kanal, dolu savak gibi aşınma etkilerinin yüksek olduğu yapılarda kaplama olarak kullanılır.
- Beton Altyapı Elemanları: Beton matrisinde var olan boşluk miktarını azaltarak sızdırmazlığa katkı sağlamaktadır.
- Depo, Fabrika ve Hangar Döşemelerinde: Dinamik yüklemelerin oluşturduğu aşınmaya karşı durabiliteyi korur.
- Havaalanı Kaplamalarında: Tekrarlı yüklere ve açık hava koşullarına maruz geniş saha kaplamalarında dayanım ve dayanıklılık parametrelerinin iyileştirilmesi için kullanılır.
- Püskürtme Beton (Shotcrete) Uygulamalarında: Püskürtme betonların sahip olduğu yüksek çimento dozajı nedeniyle oluşabilecek rötre çatlaklarına ve dış etkenlere bağlı çekme kuvvetlerine karşı direnç oluştururlar.
- Çok Yüksek Mukavemetli Betonlarda: Yüksek mukavemet gösteren betonlar az enerji yutma kapasitelerinden dolayı daha gevrek davranış gösterirler. Bu sorunun giderilebilmesi maksadıyla kullanılan çelik lifler, betona sünek davranış kazandırır.
- Patlamaya Karşı Dayanıklı Yapılarda: İnfilak olasılığı bulunan enerji santralleri ve askeri tesislerin yapımında kullanılması durumunda blast etkisi gibi kuvvetleri sönümleyici etki yapar.

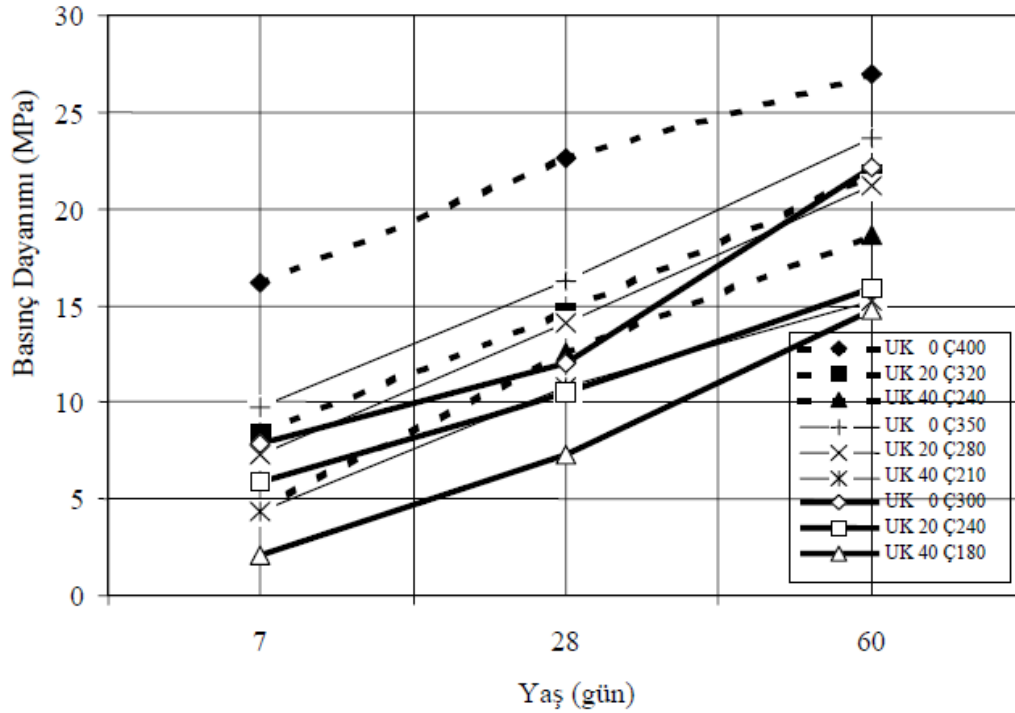
Mevcut tez kapsamında kullanılan bir diğer lif türü olan polipropilen liflerin gündelik hayatta inşaat sektöründeki kullanım alanları aşağıdaki şekilde sunulmuştur (Arazsu, 2012):

- Bitüm İşlerinde: Soğuk hava koşullarına karşı dayanıklılık sağlayan polipropilen lifler aşınma ve yırtılma şeklinde oluşan deformasyonlara karşı bitümlü yapıyı desteklediğinden dolayı onarım ömrünü uzatmaktadır.
- Taşıyıcı Sistem Elemanlarında: Beton matrisi içinde homojen şekilde dağılan polipropilen lifler boşluksuz bir yapı oluşmasını sağlayarak dayanıklılığa olumlu katkıda bulunur.

- Büyük Sıcaklıklara Maruz Yapılarda: Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonların bünyesinde barındırdığı polipropilen lifler eriyerek hava kanalları oluşturarak iç basınç sonucu parçalanmayı önler. Bu nedenden dolayı yangın olasılığı bulunan yapılarda betonun içeriğine polipropilen lifler eklenir.
- Saha Betonu ve Şap İşlerinde: Tekrarlı ve ağır yüklemeler ile kimyasal etkilere karşı zemin kaplamalarında tokluk oluşturarak durabilite sorunlarını giderir.
- Su Yapılarında: Suyun aşındırıcı etkisine dirençli bir beton oluştururlar. Bununla birlikte oluşturdıkları boşluksuz yapı su emilimini önler.
- Püskürtme Sıva ve Betonlarda: Bu uygulamalarda kullanılan polipropilen lifler, yüzeye tutunma kabiliyeti yüksek bir malzeme elde edilmesine olanak sağlar. Ayrıca polipropilen lifler yardımıyla oluşturduğu çatlaksız yapı, sürekli bir tabaka için kilit rol oynar.
- Boya ve Mimari Uygulamalarda: Boya, kartonpiyer, su yalıtımı gibi uygulamalarda kullanılması durumunda daha pürüzsüz yüzeyler meydana getirerek çatlak oluşumlarını engeller.

2.5. Uçucu Kül Etkisine Bağlı Yapılan Çalışmalar

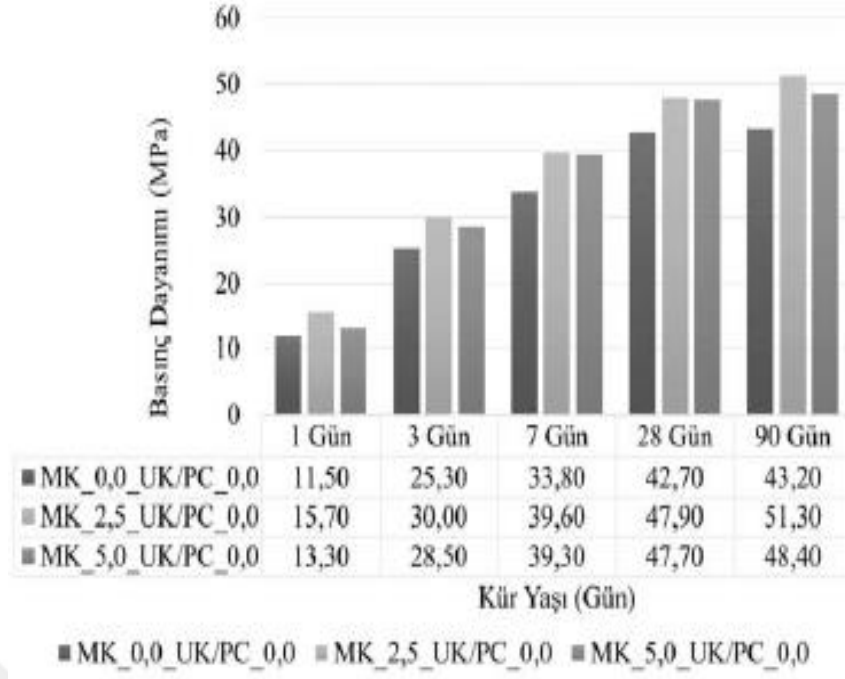
Gerçekleştirilen bir deney kapsamında, dozaj miktarları 300, 350, 400 kg/m³ olarak belirlenen ve bu dozaj miktarlarının her biri için çimento oranına muadil olacak şekilde ağırlıkça %20 ve %40 mertebesinde belirlenen uçucu kül kullanılarak numuneler üretilmiştir. Taze beton ait üretim safhasında yayılma, VeBe, çökme ve birim ağırlık deneyleri icra edilmiştir. Laboratuvar ortamında 7, 28 ve 60 gün bekletilen numuneler üzerinde önce hasarsız deney yöntemlerinden Schmidt sertliği ve UPV deneylerini müteakiben basınç dayanım deneyi icra edilmiştir. Taze beton üzerinde işlenebilirlik yönünden yapılan incelemede; uçucu kül katılan betonlarda, katkısız betonlara nazaran VeBe süresinin kısaldığı bununla orantılı olarak işlenebilirliğin arttığı tespit edilmiştir.



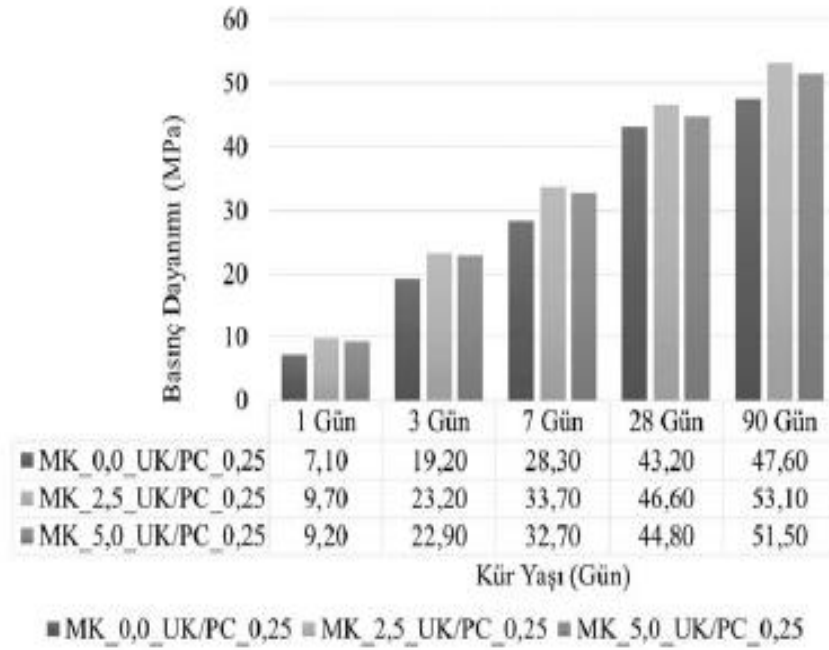
Şekil 2.4. Numunelere ait 7, 28 ve 60 günlük basınç dayanımı

Şekil 2.4.'de görüldüğü üzere uçucu kül kullanımı sonucunda beton basınç dayanımının düştüğü ve söz konusu mineral katkı kullanımı miktarının artırılması durumunda istenen dayanım değerinin daha geç sağlandığı tespit edilmiştir (Topçu ve Canbaz, 2001).

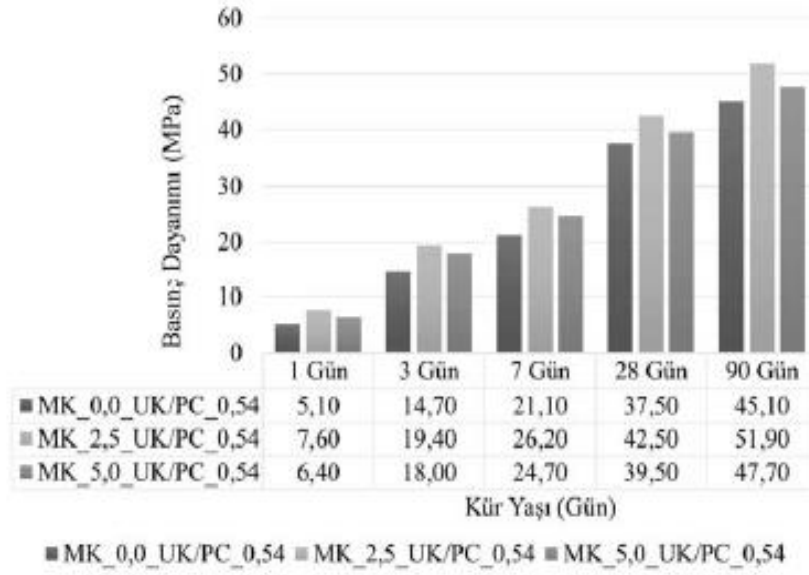
Başka bir çalışmada; mikronize kalsit ve uçucu kül parametrelerine bağlı olarak muhteviyatında yüksek hacimde uçucu kül barındıran katkılı çimento harçlarının sertleşmiş ve mikroyapısal özellikleri deney kapsamında incelenmiştir. Bu maksatla, uçucu kül/çimento oranı 0.0, 0.25, 0.54, 1.0 ve mikronize kalsit ikame oranı %0, %2.5, %5 olan on iki adet karışım planlanmıştır. Bahse konu numuneler; 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım testlerine tabi tutulmuş ayrıca UPV deneyi ve taramalı elektron mikroskop analizi icra edilmiştir. Basınç dayanım testlerine ilişkin yapılan deneyler sonucunda aşağıda yer alan veriler elde edilmiştir.



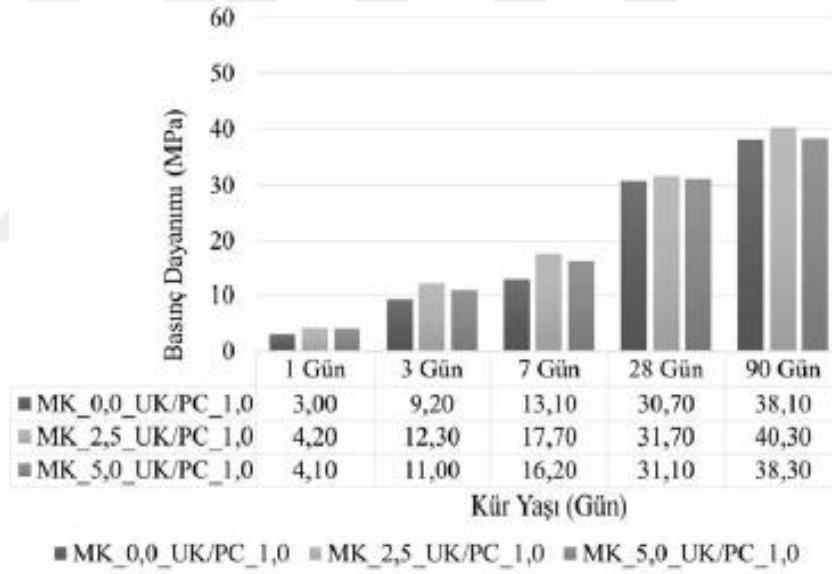
Şekil 2.5. Uçucu Kül /Portland Çimento oranı 0.0 olan numunelere ilişkin elde edilen ortalama basınç dayanım değerleri



Şekil 2.6. Uçucu Kül /Portland Çimento oranı 0.25 olan numunelere ilişkin elde edilen ortalama basınç dayanım değerleri



Şekil 2.7. Uçucu Kül /Portland Çimento oranı 0.54 olan numunelere ilişkin elde edilen ortalama basınç dayanım değerleri



Şekil 2.8. Uçucu Kül /Portland Çimento oranı 1.0 olan numunelere ilişkin elde edilen ortalama basınç dayanım değerleri

Şekil 2.5., Şekil 2.6., Şekil 2.7. ve Şekil 2.8.'de sunulan çimento harçlarının dayanımına sağladığı katkı ve ekonomik kıstaslar göz önüne alındığında; %2.5 seviyesinde mikronize kalsit barındıran karışımların müspet netice verdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, kür yaşının ilerlemesine bağlı olarak hidrasyon tepkimesi sonucunda oluşan ürünlerin artması nedeniyle UPV deneyi değerlerinde artış müşahade edilmiş ancak uçucu kül miktarında yaşanan artış söz konusu değerlerde düşüşü beraberinde getirmiştir. Nihai olarak; mikronize kalsit ile ikame edilmiş ve uçucu kül

ihativa eden karışımlara ait erken yaş sertleşmiş özelliklerinde bariz bir artış tespit edilmiş olup taramalı elektron mikroskobu yardımıyla sonuçları teyit eden görüntüler elde edilmiştir (Demirel ve Demirhan, 2021).

Bir araştırma kapsamında; kendiliğinden yerleşen betonun, taze beton ve mekanik özellikleri üzerinde yapılan çalışmalarda söz konusu kıstasların iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bunun için kireçtaşı tozu, pirinç kabuğu külü ve PÇ içeren üçlü karışımlar hazırlanmıştır. Su/bağlayıcı oranı, bahse konu karışımlar için 0.28 olarak sabit tutulmuştur. Toplam bağlayıcı miktarı 450 kg/m^3 olarak belirlenmiş ancak çimento miktarı %0-20 oranlarında puzolanik malzemeler ile yer değiştirmiştir. Betonların; birim ağırlık, V-hunisi akış süresi, basınç dayanımı ve ultrases dalgası geçiş hızı (UPV) gibi taze ve sertleşmiş hal özellikleri gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, üçlü karışımların; EFNARC kriterlerini sağladığı ve kendiliğinden yerleşen geleneksel betonlara nazaran işlenebilirlik açısından daha olumlu sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir (Sua-iam ve ark., 2016).

Kendiliğinden yerleşen betonda polipropilen lif etkisinin incelendiği bir çalışmada; 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 kg/m^3 miktarında polipropilen kullanılmış ve diğer karışım oranları sabit tutulmuştur. Farklı miktarda polipropilen lif içeren beton numunelerin 25, 250, 500 ve $750 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklara 3 saat süresince maruz bırakılmasını müteakip oda sıcaklığına gelene kadar soğumaya bırakılmıştır. Çalışma neticesinde elde edilen veriler ışığında; lif miktarının basınç mukavemetine etki etmediği ancak çekme mukavemetinde bir miktar artışı beraberinde getirdiği tespit edilmiştir. Sıcaklık etkisindeki artış ile birlikte eriyen polipropilen lifler betonun yapısında boşluklar oluşturmaktadır. Özellikle $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den sonra dayanım kayıplarının belirgin düzeyde olduğu ve en yüksek dayanım kaybı değerine ise $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye maruz numunelerde rastlanıldığı tespit edilmiştir (Adar, 2018)

Muhteviyatında uçucu kül ile birlikte çelik ve polipropilen lif barındıran betonların mekanik özelliklerinin irdelendiği farklı bir çalışmada; portland çimentosu, F sınıfı uçucu kül, azami sınırı %3 olan akışkanlaştırıcı, 12 mm uzunluğa sahip polipropilen lif, uzunlukları 40, 30, 6 mm ve çapları sırasıyla 0.3, 0.3, 0.1 çelik lifler kullanılmıştır. Deney kapsamında, farklı karışım parametreleri baz alınarak üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen testler sonucunda; çok ince boyutlardaki polipropilen lif içeren hibrit liflerin karışımın her noktasına eşit yoğunlukta dağılabilmesi için uçucu kül tarzında tane boyutu küçük bileşenlere ihtiyaç duyulduğu, küçük lif boyutlarına sahip çelik liflerin basınç dayanımına müspet etkide bulunduğu

ancak aynı durumun çekme dayanımlarında gözlemlenmediği, bununla birlikte büyük boyutlardaki çelik liflerde ise durumun tam aksi şekilde müşahade edildiği tespit edilmiştir (Qian ve Stroeven, 2000).

Çelik ve polipropilen lif içeren beton karışımlarına uçucu kül eklenerek taze betona ait işlenebilirlik kriterlerine ilişkin etkilerin gözlemlenmesi maksadıyla yapılan çalışmada; VeBe ve slump deneyleri numunelere uygulanmıştır. Karışımların içerisinde yer alan çimento kütlesi %10, %15, %20, %25, %30 ve %45 oranlarında uçucu kül ile ikame edilmiştir. Hacimce %0.05, %0.1 ve %0.2 oranlarına sahip olacak şekilde 19 mm uzunluğunda polipropilen lif ile hacimce %0.25, %0.5, %1.0 ve %1.5 oranlarına sahip olacak şekilde 0.55 mm çap ile 35 mm uzunluktaki çelik lif kullanılmıştır. Deneyden elde edilen veriler ışığında; karışımlara eklenen uçucu kül oranının %10'dan %45'e kadar artması ile işlenebilirliğin arttığı uygulanan deney metotları ile görülmüş olup polipropilen liflerden ziyade çelik liflerin işlenebilirlik üzerinde olumsuz etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Atiş ve Karahan, 2005).

2.6. Isı Değişikliğine Bağlı Yapılan Çalışmalar

Isı iletkenliği yönünden beton zayıf bir malzemedir. Bundan dolayı, ani şekilde gelişen ısı artışlarında, betonun iç ve dış kısımları arasında oluşan sıcaklık farkı yüksek olduğundan betonun bünyesinde oluşan çatlak mekanizmasının da meydana gelme ihtimali yükselir. Betonun özellikle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalması sonucunda göstermiş olduğu davranış, betona ait ısı iletkenliğine, özgül ısı değerine ve sıcaklığın tatbik koşullarına bağlıdır (Bazant ve Kaplan, 1996).

Beton üzerinde, ısı değişikliklerine bağlı olarak yapılan ilk çalışmalar Lea ve Stradling tarafından 1920'li yıllarda yürütülmüş olup betonun basınç dayanımına ilişkin değişimler irdelenmiştir. Genel bir kanıya göre, ısı değişikliği sonucunda çimento hamuru ile agrega arasındaki termal uyumsuzluğun menfi etkisini öne süren ilk araştırmacılar bu iki bilim insanıdır. Çimento hamuru ile çevrelenen küresel bir toprak parçasının üzerinde yapılan elastik gerilme analizi sonucunda; 100 °C sıcaklığa maruz kalan betonun evsafında bozulmaların yaşanabildiğini ancak 300 °C'ye kadar dayanımda artış gözlemlenebileceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte kullanılan teorik model gerçek davranışı yansıtmıyordu. Çünkü 1950'lerde ortaya çıkarılan ve söz konusu yöntemin kapsamında bulunmayan geçici termal sünme kısmı bahse konu iki bilim insanı tarafından dikkate alınmamıştır. Bununla birlikte birçok önemli buluş, Lea

ve Stradling'in yaptığı çalışmalar neticesinde tespit edilmiştir. Kalsiyum hidroksit $[Ca(OH)_2]$ kirece (CaO) dönüştüğünü belirleyen çalışmaları yapmış olup betonun; soğutulması sonucunda kirecin rehidratasyonunun, ısıtılması sonucunda ise suyun önemli zararları olabileceğine değinmişlerdir. Bununla birlikte soğumaya maruz bırakılan betonun çimento hamuru ile agrega bileşenleri arasında yaşanabilecek ayrışma sonucunda gelişen çatlak mekanizmasına ve bu süreçte soğuma hızının etkisine değinmişlerdir (Khoury, 1992).

Sodyum silikat ve potasyum hidroksit türündeki F sınıfı UK ihtiva eden geopolimer betonların sıcaklığa karşı davranışının incelendiği çalışmada iki farklı agrega kullanılmıştır. Bu agregalardan birincisi, ince yapıda olan nehir kumu; ikincisi ise iri bir yapı formuna sahip bazalt ve cüruftur. Deneysel çalışmalar esnasında hazırlanan beton karışımları 800 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Muhteviyatında bazalt agrega barındıran beton numunesine ait basınç dayanımının 70.5 MPa'dan 29.3 MPa'a düştüğü ve bu azalışın %58.4 mertebesinde olduğu tespit edilmiştir. Bünyesinde cüruf ve bazalt içeren beton numunesine ait basınç dayanımının ise 61.8 MPa'dan 21.9 MPa'a düştüğü ve bu azalışın %64.6 mertebesinde olduğu tespit edilmiştir (Kong ve Sanjayan, 2010).

Eurocode Modeli'ne ait ön kriterler sağlanarak, beton malzemeye yüksek sıcaklık etkisinin tatbik edildiği deneysel çalışmada; betonun mekanik özelliklerinde gerçekleşen değişimler gözlemlenmiş ve betonarme bir yapının yangın anındaki davranışı irdelenmiştir. Yüksek ısı etkisinin tatbik edildiği betonun, fiziksel ve kimyasal değişikliklere uğraması sonucunda mekanik hasar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, söz konusu aşamaların komplike şekilde ilerlemesi nedeniyle beton davranışının belli standartlara her zaman tam anlamıyla uymadığı müşahade edilmiştir. Bu nedenle, betonun yüksek sıcaklık değerleri karşısında göstermiş olduğu davranışın belirlenebilmesi için beton karışımlarına ait reçetelere kati bir şekilde uyularak üretimlerin gerçekleştirilmesinin elzem olduğu belirlenmiştir. Betonun karakteristik özelliği nedeniyle yangından sonra dahi betonun muhteviyatında bulunan bileşenlere ait sıcaklığın yükselebildiği hatta bu durumun beton mukavemetinde yaşanan düşüşü daha da ileri boyutlara götürebildiği tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık tatbik edilmiş ve aniden soğutulmuş betonda dayanım kaybının riskli seviyelerde olduğu sıcaklık farkı 200 °C ile 300 °C arasında olan değerlerdir. Bu durum; beton elemanlarda termal parçalanma ve ani kesit düşüşleri gibi olaylara yol açacağından çok tehlikelidir (Kowalski, 2010).

Çelik lif (ÇL) oranı %1 seviyesinde bulunan betonlar, yapılan bir deneysel çalışma esnasında 105 °C ile 1200 °C arasında değişen yüksek sıcaklıkların etkisine maruz bırakılmıştır. Değişken sıcaklık değerlerinin beton numuneler üzerinde oluşturduğu etki elastisite modülü, porozite, basınç dayanımı ve eğilme mukavemeti referans alınarak irdelenmiştir. Yürütülen çalışmalar için 10x20 cm ebatlarında silindir ve 10 cm boyutlu küp numuneler üretilmiştir. 400 °C'den düşük sıcaklık değerlerine maruz numunelerde basınç dayanımına ilişkin kaybın çok az olduğu tespit edilmiştir. Beton numunelerinin tamamı için 400 °C'den yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımının önemli seviyede düştüğü gözlemlenmiştir. 600 °C'yi aşan sıcaklıklarda, normal betona nazaran yüksek mukavemetli betonlarda söz konusu basınç dayanımındaki kayıplar daha fazla yaşanmıştır. Bununla birlikte, 1200 °C'ye kadarki sıcaklıklarda lif kullanımının beton üzerinde herhangi bir olumsuz etkisine rastlanılmamış aksine mekanik özellikleri iyileştirildiği kanısına varılmıştır (Lau ve Anson, 2006).

Deneysel bir çalışmada; içerisinde %0, %0.5 ve %1 miktarlarına sahip ÇL barındıran betonun yüksek sıcaklıklarda göstermiş olduğu performans özelliklerini öngörebilmek adına Box-Behnken deney tasarımı kullanılmıştır. Çalışmanın akabinde elde edilen veriler doğrultusunda; çelik liflerin kullanım yüzdesindeki artışla birlikte betonun basınç mukavemetinde de artış görülmüştür. Çelik lif miktarının %0 olarak belirlendiği numunelerde, sıcaklığın yükseldikçe basınç mukavemetinde düşüşün olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sıcaklık artışı nedeniyle basınç mukavemetinde yaşanan düşüş, normal betonlara kıyasla ÇL içeren betonlarda daha azdır. Sonuç olarak, betona ait basınç dayanımındaki azalma, çelik lif miktarındaki artış ile birlikte en aza indirgenmektedir (Nair, 2016).

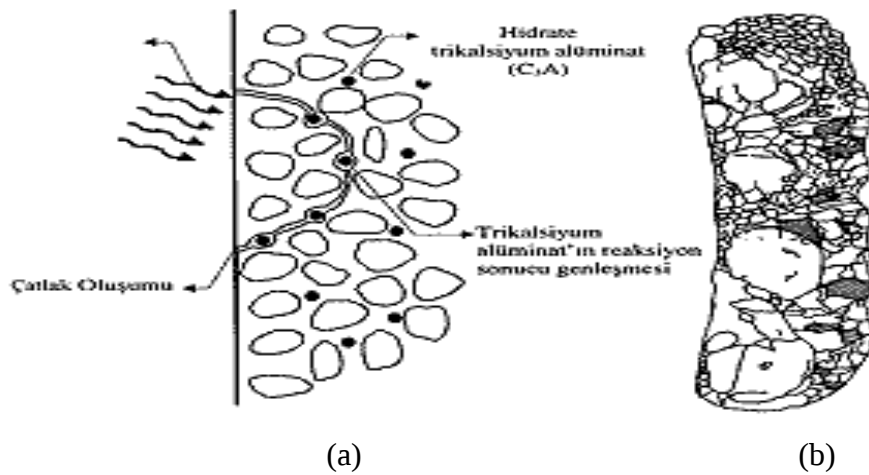
2.7. Sülfat Etkisine Bağlı Yapılan Çalışmalar

Beton içerisinde yer alan bileşenlerin sülfat ile kimyasal tepkimeye girebileceğinde ilk bahseden kişi Louis Vicat olup bu çalışmasını 1818 yılında açıklamıştır. Gelişen süreç ile birlikte; 1890 yılında Candlot tarafından, kalsiyum sülfat ve kalsiyum alümina sulu çözeltisinde genleşen bir ürünün varlığı tespit edilmiş olup 1892 yılında Michealis tarafından, sülfat ile çimento bileşenlerinin tepkimesi sonucunda etrenjitin meydana geldiği belirlenmiştir (Al-Amoudi, O.S.B., 2002)

Betonun hızlı bir şekilde alacağı prizinin önüne geçilebilmesi maksadıyla çimento içerisine katılan %3 - %6 oranlarındaki alçıtaşı, iç etkenlere bağlı oluşan sülfatın nedenlerinden biridir. Bünyesinde yüksek miktarda sülfat barındıran çimento kullanılan ve üretim aşamasında buhar kürü veya yüksek sıcaklıklara ulaşan bakımın tatbik edildiği betonlarda iç kaynaklı sülfat etkisi gözlemlenmektedir. Araştırmaya konu olan yüksek sıcaklıklar, betonun üretimi esnasında meydana gelen yüksek çevre sıcaklıklarından ya da hidrasyon sonucu ortaya çıkan ısıdan kaynaklanabilir. Yüksek sıcaklıktaki kür ortamında üretimine müteakip nemli ortam şartlarına tabi tutulan betonda iç kaynaklı sülfat etkisi sonucunda etrenjit oluşmaktadır. Literatürde “gecikmiş etrenjit oluşumu” ifadesi ile isimlendirilen bu olay, yüksek sıcaklıklarda üretilen betonun içeriğinde yer alan sülfatın etkisiyle ortaya çıkmaktadır (Skalny ve ark., 2002).

Sülfat çözeltileri, betonarme yapı elemanlarında bulunan mevcut çelik üzerinde doğrudan korozyon oluşturmamakta fakat betonda sertleşmiş çimentoya etki ederek mevcut çimento tipine ve sülfat yapısına bağlı olarak iki tip reaksiyon meydana getirmektedir. Bunlardan birincisi, sülfatın çimentonun bünyesinde alçıtaşı oluşturmak için serbest kalsiyum hidroksit ile girdiği reaksiyondur. İkincisi ise; trikalsiyum alüminat ve alçıtaşı varlığında trikalsiyum sülfoalüminat oluşturması ile meydana gelir (Arslan, 2001).

Yeraltı/yerüstü sulardan ve/veya topraktan kaynaklı olarak; beton yüzeyinden nüfuz ederek çimentonun bünyesinde bulunan $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{C}_3\text{A})$ ile tepkimeye giren sülfat iyonları, yan ürünler meydana getirirler. Bu yan ürünler neticesinde oluşan boşluk beton dayanımını düşürmektedir. Bu çalışma esnasında; betonda, sülfat iyonlarının etkisiyle oluşan bozulma Şekil 2.9'daki gibi gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Sülfat etkisiyle betonun bozulması

Dış ortamdan betona etkiyen sülfat Şekil 2.9. (a)'da ok şeklinde tasvir edilmiştir. Geçirgenliği fazla olan betonun iç yapısına kadar sirayet eden sülfat, betonun muhteviyatında bulunan çimento cinsine bağlı olarak farklı oranlardaki C_3A ile reaksiyona girerek hacimsel anlamda artış meydana getirerek Şekil 2.9. (b)'de yer aldığı gibi bozulmalara neden olur (Baradan ve ark., 2002).

Sülfat etkisine maruz harçlarda oluşan etkinin belirlenmesi maksadıyla basınç ve genleşme dayanımlarına ilişkin değerlerde yaşanan değişimin irdelendiği bir çalışmada; birbirinden boyut ve çeşit olarak farklı lifler kullanılmıştır. Yürütülen çalışmalarda karışımların hacimsel anlamda %1'i seviyesinde lif kullanılmış olup bu lifler; 6, 12 mm uzunluktaki cam lifler ve 6, 12, 18 mm uzunluğuna sahip polipropilen lifler şeklindedir. Üretilen numuneler CEM I ve IV sınıfına ait çimentolar ile oluşturulmuştur. Harç numunelerinden bir kısmı, konsantrasyon miktarı %5 ve %10 olan sodyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilirken diğer bir kısmı ise %4.2 ve %8.4 oranında magnezyum sülfat ihtiva eden çözeltide bekletilmiştir. Bu süreç boyunca, numunelerin; 7, 28, 120 ve 270 günlük basınç dayanımları ölçülmüş ve 32 haftayı kapsayacak şekilde periyodik boy değişimi gözlemlenmiştir. Genleşme ve basınç dayanımına yönelik yapılan testlerde, oluşturulan çözelti ortamlarından magnezyum sülfatın numuneler üzerinde daha çok menfi etki bıraktığı tespit edilmiş olup çözelti yoğunluğunun artması ile olumsuz etki her iki sülfat çeşidi içinde şiddetlenmiştir. Kullanılan lif tiplerinde yapılan boy artışlarının, lif türü fark etmeksizin genleşme miktarında iyileştirme sağladığı belirlenmiştir. CEM I sınıfı çimento ihtiva eden numunelerin, çözelti yoğunluğundan bağımsız şekilde ve her iki sülfat ortamında da azami derecede dayanım kaybı yaşadığı müşahade edilmiştir. Bununla birlikte; aynı boyda lifler gözetilerek yapılan kıyaslama neticesinde; polipropilen liflerin cam liflere nazaran daha düşük seviyede dayanım kayıpları yaşadığı belirlenmiştir (Altunç, 2023).

Betonun dayanım ve dayanıklılık parametrelerinde, yüksek miktarda sülfat sonucunda gerçekleşen değişimin irdelenmesi için yapılan bir çalışmada; hazırlanan numuneler 150 gün boyunca, 150 gr/l ölçüsü esas alınarak oluşturulan sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılmıştır. Ayrıca sülfat etkisine maruz numunelerin karşılaştırılabilmesi maksadıyla su küründe bekletilmiş numuneler de üretilmiştir. Bu süreç zarfında, sülfat çözeltisi içinde bulunan numunelerin basınç dayanımı, yüzey sertlikleri ve ağırlık değişimi irdelenmiş olup numuneler üzerinde oluşan yüzey bozulmaları gözlemlenmiştir. Deney kapsamında; sülfatın, üretilen beton numuneler üzerinde beyaz lekelenmelere ve yüzeysel tahribatlara neden olduğu görülmüştür.

Bununla birlikte; içeriğinde UK bulunan numunelerde %0.86 oranında, mineral katkı bulunmayan numunelerde ise %4.37 oranında basınç dayanımına yönelik kayıp yaşandığı tespit edilmiştir (Doğruyol ve Karaşin, 2011).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Deney kapsamında teste tabi tutulan numunelerin üretimi aşamasında kullanılan malzemeler olan; CEM I 52,5 R Süper Beyaz Portland Çimento, agrega, su, kimyasal katkı (süperakışkanlaştırıcı), polipropilen lif, çelik lif, uçucu kül, sodyum sülfat ve potasyum sülfata ilişkin bilgilere aşağıda yer verilmiştir.

3.1.1. Çimento

Deneyisel çalışmamızda OYAK Çimento Fabrikaları A.Ş. firması tarafından TS EN 197-1 (2012) ile uyumlu şekilde üretilen Süper Beyaz Portland Çimentosu (CEM I 52,5 R) ürünü kullanılmıştır. Kullanılan çimento, firmaya ait Mardin Çimento Santrali'nde üretilmiş olup kimyasal bileşimine ait bilgilere Çizelge 3.1.'de, fiziksel özelliklerine ait bilgilere ise Çizelge 3.2.'de yer verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan Portland Çimentosuna ait kimyasal özellikler

Kimyasal Özellikler		Elde Edilen Değerler	TS EN 197-1 Sınır Değerleri	Deney Metotları
SO ₃ – Kükürt Trioksit	(%)	3.21	Max. 4.0	TS EN 196-2
Na ₂ O – Sodyum Oksit	(%)	0.68	-	TS EN 196-2
K ₂ O – Potasyum Oksit	(%)	0.24		TS EN 196-2
Kızdırma Kaybı	(%)	3.32	Max. 5.0	TS EN 196-2
Çözünmeyen Kalıntı	(%)	0.09	Max. 5.0	TS EN 196-2
Cl ⁻ - Klorür	(%)	0.0167	Max. 0.1000	TS EN 196-2

Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan Portland Çimentosuna ait fiziksel özellikler

Fiziksel Özellikler		Elde Edilen Değerler	TS EN 197-1 Sınır Değerleri	Deney Metotları
Özgül Ağırlık		3.08	-	TS EN 196-6
Özgül Yüzey	(cm ² /g)	4317	-	TS EN 196-6
Priz Başlangıcı	(Dakika)	142	Min. 45	TS EN 196-3
Hacim Genleşmesi	(mm)	1.0	Max. 10	TS EN 196-3
2 Günlük Basınç Dayanımı	(MPa)	33.1	Min. 30.0	TS EN 196-1
28 Günlük Basınç Dayanımı	(MPa)	54.4	Min. 52.5	TS EN 196-1
Beyazlık	(%)	85.66	Min. 85	TS 21

3.1.2. Agrega

Betonun bileşenlerinden olan agrega malzemesi için, 0 – 2 mm tane boyutlarına sahip doğal agrega kullanılmıştır. Kullanılan agregaya ait; görsel Şekil 3.1.'de sunulmuş olup içeriğinde bulunan tanelere ilişkin analiz sonuçlarına Çizelge 3.3'te yer verilmiştir.



Şekil 3.1. Deney esnasında kullanılan agregaya ait görsel

Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan agreganın tane boyutlarına ilişkin elek analiz sonuçları

Elek Açıklıkları (mm)	Elek Üzerinde Kalan Miktar (gr)	Elek Üzerinde Kalan Miktar (%)	Elek Üzerinde Kalan Yığılımlı Miktar (%)	Elekten Geçen Miktar (%)
2	0	0	0	100
1	74	4	4	96
0.5	389	23	27	73
0.25	940	54	81	19
0.125	283	16	98	2
0	42	2	100	0

3.1.3. Su

Yürütülen deneysel çalışmalar esnasında betonun hazırlanması ve oluşturulan numunelerin kür havuzunda bekletilmesi için Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'ne ait Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan içilebilir musluk suyu kullanılmıştır. Deney süreci boyunca kullanılan şebeke suyu içilebilir niteliğe sahip ve TS EN 1247 standartlarına uygundur.

3.1.4. Lifler

3.1.4.1. Çelik lifler

Çelik lifli betonun hazırlaması için 6 mm uzunluğunda pirinç kaplı çelik lifler seçilmiştir. Ancak çelik liflerin uzunluğu sabit tutulurken 0.16 ve 0.35 mm çap değişkenlerine sahip iki çeşit çelik lif deney kapsamında kullanılmıştır. Kullanılan pirinç kaplı çelik life ait görsel Şekil 3.2.'de sunulmuştur.



Şekil 3.2. Deney esnasında kullanılan ve 0.35 mm çapa sahip pirinç kaplı çelik life ait görsel

Kullanılan 0.35 mm çaplı pirinç kaplı çelik life ait bilgi föyünde; çekme dayanımına ilişkin test sonucunda çekme dayanımının $3,437.5 \text{ N/mm}^2$ olduğu verilmiştir.

Kullanılan 0.16 mm çaplı pirinç kaplı çelik life ait bilgi föyünde; çekme dayanımına ilişkin test sonucunda çekme dayanımının $3,000.0 \text{ N/mm}^2$ olduğu verilmiştir.

3.1.5. Polipropilen lifler

Beton üretiminde kullanılan polipropilen lifler 6 mm uzunluk değerine sahip 0.30 mm çaplı liflerdir. Kullanılan polipropilen life ait görsel Şekil 3.3.'te sunulmuş olup teknik özelliklere Çizelge 3.4'te yer verilmiştir.



Şekil 3.3. Deney esnasında kullanılan polipropilen life ait görsel

Çizelge 3.4. Deneyde kullanılan polipropilen life ait teknik özellikler

Teknik Özellikler	
Malzemenin Yapısı	%100 saf polipropilen
Enine Kesit	Dairesel
Çekme Dayanımı	467 - 548 MPa
Uzama	%20 – 25
Özgül Ağırlık	0,91
Erime Noktası	160 °C
Asit / Alkali Dayanımı	Mükemmel
Çimento Uyumu	Mükemmel

3.1.6. Kimyasal katkı

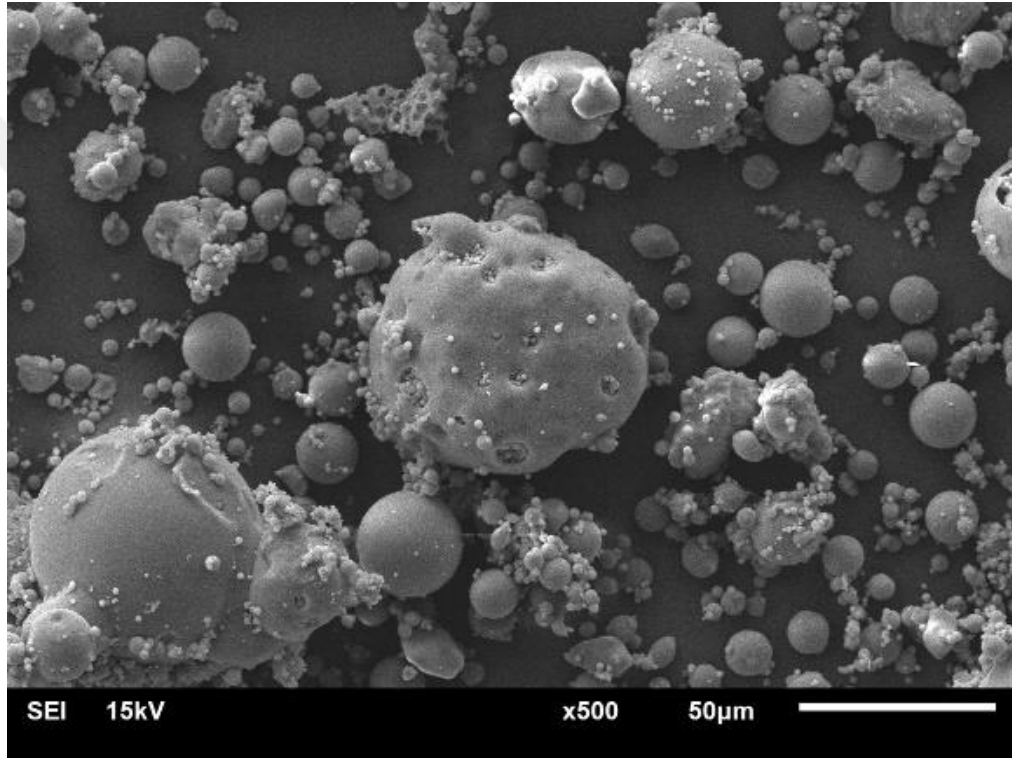
Deneyisel çalışmalarda betonun işlenebilirliğini artırmak maksadıyla Master Builder Solutions firmasına ait ve TS EN – 934 – 2 : T 3.1/3.2/7 standartlarına uygun şekilde üretilen MasterGlenium 51 isimli süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Deney esnasında kullanılan süperakışkanlaştırıcıya ait teknik özelliklere Çizelge 3.5.'te yer verilmiştir.

Çizelge 3.5. Deneyde kullanılan süperakışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler

Teknik Özellikler	
Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Görünüm	Kahverengi – Sıvı
Özgül Ağırlık (20°C'de)	1.082 – 1.142 kg/lit
pH Değeri	6 – 7
Alkali İçeriği (%)	≤ 3,00 (ağırlıkça)
Klor İyon İçeriği (%)	≤0,10 (ağırlıkça)
Korozyon Davranışı	Sadece EN934-1:2008, EkA.1'de verilen bileşenleri kapsar

3.1.7. Uçucu kül

Deney kapsamında üretilen karışımların muhteviyatında İskenderun Sugözü Termik Santralinde açığa çıkan F tipi uçucu kül bulunmaktadır. Kullanılan mineral katkı türüne ait özgül ağırlık 2.38 ve özgül yüzey alanı 3.490 cm²/g'dır. Bununla birlikte hazırladığımız beton karışımlarının bir parametresi olan uçucu küle ait; SEM görüntüsü Şekil 3.4.'te sunulmuş olup kimyasal bileşenlerine ilişkin özelliklere Çizelge 3.6.'te yer verilmiştir.



Şekil 3.4. Deney esnasında kullanılan uçucu küle ait SEM görüntüsü

Çizelge 3.6. Deneyde kullanılan uçucu küle ait fiziksel özellikler

Kimyasal Bileşen (%)	
SiO ₂	58.59
Al ₂ O ₃	20.91
Fe ₂ O ₃	10.99
MgO	2.25
CaO	2.08
SO ₃	0.25
Na ₂ O	1.10
K ₂ O	1.99
Kızdırma Kaybı	1.84

3.1.8. Sülfat

3.1.8.1. Sodyum sülfat

Çalışma kapsamında hazırlanan beton numunelerin maruz kalacağı sülfat türlerinden birini teşkil eden sodyum sülfat için; MERCK İlaç Ecza ve Kimya Tic.A.Ş.'ne ait 1.06649 ürün numaralı sodyum sülfat ürünü kullanılmıştır.

Bahse konu sodyum sülfat ürününe yönelik teknik özelliklere Çizelge 3.7.'de yer verilmiştir.

Çizelge 3.7. Deneyde kullanılan sodyum sülfata ait teknik özellikler

Teknik Özellikler	
Fiziksel Hali	Kristal
Erime Noktası	888 °C
İlk Kaynama Noktası	108.9 °C
pH	5.2 – 8.0
Su İçinde Çözünürlüğü	445.5 g/l
Yoğunluk	2.70 g/cm ³
Kütle Yoğunluğu	1.4 – 1.6 kg/m ³

3.1.8.1. Potasyum sülfat

Deney esnasında numunelere tatbik edilecek sülfat türlerinden bir diğerini oluşturan potasyum sülfat için MERCK İlaç Ecza ve Kimya Tic.A.Ş.'ne ait 1.05153 ürün numaralı potasyum sülfat ürünü kullanılmıştır.

Bahse konu potasyum sülfat ürününe yönelik teknik özelliklere Çizelge 3.8.'de yer verilmiştir.

Çizelge 3.8. Deneyde kullanılan potasyum sülfata ait teknik özellikler

Teknik Özellikler	
Fiziksel Hali	Kristal
Erime Noktası	1.067 °C
İlk Kaynama Noktası	1.689 °C
pH	7
Su İçinde Çözünürlüğü	120 g/l
Yoğunluk	2,662 g/cm ³
Kütle Yoğunluğu	800 kg/m ³

3.2. Deneysel Çalışma

Yürütülen tez çalışması kapsamında 6 adet farklı karışım üretilmiştir. Üretilen karışımlardan üç adetinde bağlayıcılık özelliği taşıyan tek malzeme PÇ iken diğer üç adetinde ise UK karışımlarda bulunan bir başka bağlayıcılık özelliği taşıyan malzemedir.

Hazırlanan her bir karışım farklı 3 kür koşuluna, 3 farklı kür yaşı boyunca maruz bırakılmış ve bu maksatla toplam 54 adet prizmatik numune oluşturulmuştur.

Deneysel faaliyetler, numunelerin hazırlanması ve numunelere uygulanan test yöntemleri olarak iki kategori altında incelenebilir.

3.2.1. Numunelerin hazırlanması

Materyal kısmında fiziksel ve kimyasal özelliklerine yer verilen malzemelerin, karışımlar içerisindeki miktarlarına gram cinsinden Çizelge 3.9.'da yer verilmiştir.

Karışım kodu ibaresinde yer alan ifadeler şu şekilde isimlendirilmiştir:

ÇL16 : Bünyesinde 0.16 mm çap değerine sahip çelik lif barındıran karışım,

ÇL35 : İçeriğinde 0.35 mm çap değerine sahip çelik lif barındıran karışım,

PP30 : Muhteviyatında 0.30 mm çap değerine sahip polipropilen lif barındıran karışım,

UK : Mahiyetinde uçucu kül bulunan karışım

Çizelge 3.9. Deneylerde kullanılan malzemelere ait miktarlar

Karışım Numarası	Karışım Kodu	Çimento	Uçucu Kül	Agrega	Su	ÇL16	ÇL35	PP	Akışkanlaştırıcı Katkı
1	ÇL16	4620	-	6028	1617	429	-	-	29.0
2	ÇL35	4620	-	6028	1617	-	429	-	27.0
3	PP30	4620	-	6028	1617	-	-	52	39.0
4	ÇL16-UK	3168	1359	5869	1584	429	-	-	26.0
5	ÇL35-UK	3168	1359	5869	1584	-	429	-	25.0
6	PP30-UK	3168	1359	5869	1584	-	-	52	37.5

Deney kapsamında üretilen numunelere ait karışım tablosu incelendiğinde; çelik lif oranının %1 olarak belirlendiği bununla birlikte UK barındırmayan karışımlara ait su/çimento oranının 0.35 olduğu görülmektedir. Çimento yerine UK ikamesi yapılan karışımlarda UK/bağlayıcı miktarı oranı 0.50 olarak belirlenmiştir.

Deneylerde kullanılan malzemeler, Şekil 3.5. (a) ve Şekil 3.5. (b)'de görseline yer verilen mikserde harmanlanıp karıştırılmıştır.



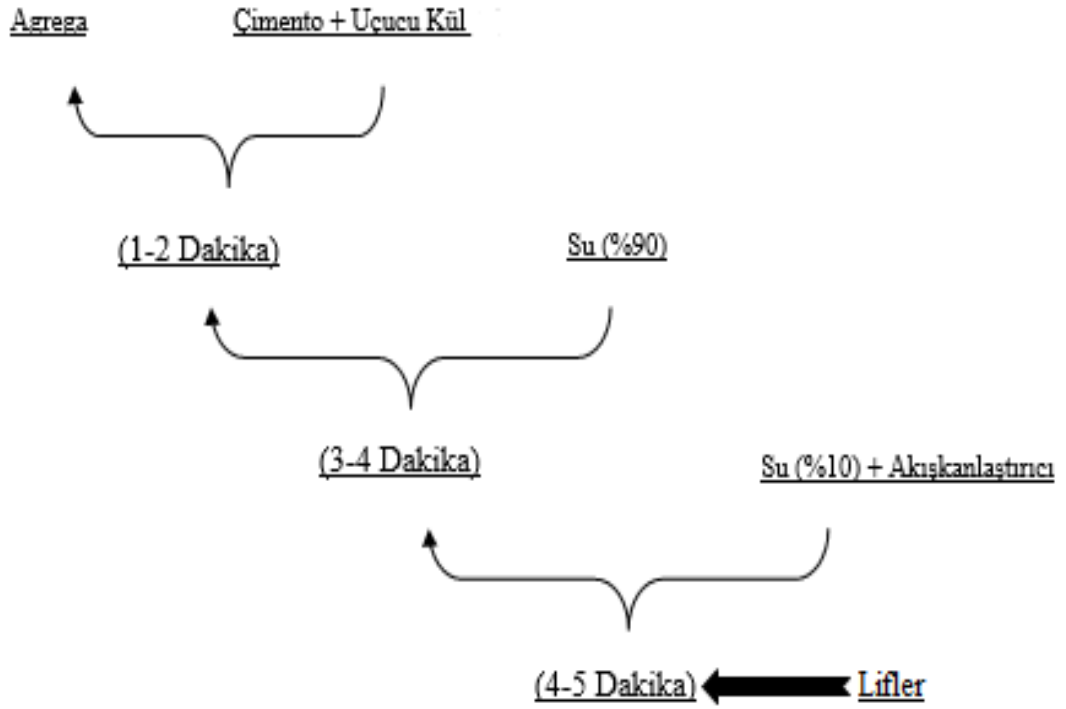
(a)



(b)

Şekil 3.5. a) Malzemelerin mikserde eklenmesi b) Deneylerde kullanılan malzeme mikserine ait görsel ve karışımın harmanlanma aşaması

Karışımın homojen şekilde oluşturulmasına yönelik olarak ilk aşamada agrega, çimento ve içeriğe göre uçucu kül mikserde 1-2 dakika arasında harmanlanmıştır. Harmanlanan kuru karışıma öngörülen su miktarının %90'ı ilave edilmek suretiyle 3-4 dakika arasında harmanlanmıştır. Son olarak kalan %10'luk ilave su miktarına belirtilen ağırlıkta akışkanlaştırıcı katkı eklenerek mevcut harcın istenen işlenebilirlik seviyesine gelmesini müteakip karışımda yer alan ilgili lif türü eklenerek lifli çimento harcının 4-5 dakika daha karıştırılmasına devam edilmiştir. Deneyler için üretilen karışımlara ait işlem adımlarına Şekil 3.6.'da yer verilmiştir.



Şekil 3.6. Deney kapsamında üretilen karışımlara ilişkin işlem adımları

Hazırlanan beton karışımı Şekil 3.7’de sunulduğu üzere; yağlama prosedürü tamamlanmış 4 x 16 cm taban alanı olan ve 4 cm yükseklik değerine sahip kare prizması şeklindeki numune kalıplarına dökülmüştür.



Şekil 3.7. Hazırlanan beton karışımlarına ait kalıplar ve yağlama prosedürü

Gerçekleştirilen beton yerleşiminde hava kabarcıklarının oluşturduğu boşlukların en aza indirgenmesi amacıyla Şekil 3.8.'de sunulduğu üzere vibrasyon masasından faydalanılmıştır.



Şekil 3.8. Hazırlanan beton karışımlarının kalıp içerisindeki vibrasyon işlemi

Kalıp içerisinde yer alan numunelerin üstü ilk 24 saat boyunca rötre çatlaklarının oluşumunun engellenmesi amacıyla naylon bir örtü ile kapatılmıştır. 24 saatin sonunda kalıplardan çıkarılan prizmatik deney numuneleri 48 saat boyunca standart kür havuzunda bekletilmiştir.

3.2.2. Numunelere uygulanan test yöntemleri

Kür havuzundan çıkarılan numuneler öncelikle, içilebilir su ile yıkanmış ardından kağıt havlu vasıtasıyla yüzeylerindeki ıslaklık absorbe edilmiştir. Islaklığı giderilen numuneler, laboratuvar ortamında 15 dakika boyunca kurumaya bırakıldığı esnada Proceq marka ultrasonik beton test cihazının kalibrasyonu kontrol edilmiştir. Cihazın kalibrasyonunda tespit edilen olası bir problem durumunda kalibre malzemesi ile gerekli standardizasyon sağlanmıştır.

Kuruyan prizmatik numuneye ait ölçüm yapılacak yüzeye bir miktar ultrason jeli sürülmüştür. Söz konusu cihaz marifetiyle ASTM C 597’de belirtilen işlem adımlarına uygun şekilde numuneler tahribatsız test yöntemine tabi tutulmuştur. Bu safhada icra edilen faaliyet Şekil 3.9.’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Hazırlanan beton karışımlarına ait UPV değerlerinin tespit faaliyeti

Müteakip süreçte, Şekil 3.10.’da sunulduğu üzere; üretim aşamasının 72’nci saatinde (3 günlük kür yaşı) bulunan deney numuneleri ısıtma işlemine tabi tutulmak amacıyla kül fırınına yerleştirilmiştir. Numuneler, 600 °C sıcaklık değerine sahip fırında 2 saatlik süre zarfında bekletilmiştir.



Şekil 3.10. Hazırlanan beton karışımlarının ısıtılma tabi tutulması

Isıl işlem ile ilgili prosedürün uygulanmasından sonra fırından çıkarılan numuneler oda sıcaklığındaki su havuzuna bırakılarak hızlı bir soğuma sürecine tabi tutulmuştur.

Soğuyan numunelere ilişkin yeniden UPV ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Gelinen aşamaya kadar gerekli veri tespitlerinin gerçekleştirildiği numuneler standart, %5 doygunlukta bulunan sodyum sülfat ve %5 doygunlukta potasyum sülfat kür kaplarında Şekil 3.11'deki şekliyle bırakılmıştır.



Şekil 3.11. Numunelerin ilgili kür havuzlarına bırakılması

Her bir karışımdan 9 adet numune üretilmiştir. Böylelikle standart, sodyum sülfat ve potasyum sülfat kür koşullarına maruz bırakılan üçer adet numune elde edilmiştir. Bu üç adet numuneden her biri 7, 28 ve 90 günlük kür yaşlarını ifade edecek şekilde ilgili kür koşullarında bekletilmiştir. Bunun neticesinde; her bir karışımın farklı dış etkenler altında sergilediği mekanik ve fiziksel özelliklerin incelenebilmesi mümkün kılınmıştır.

Kendileri için hazırlanan kür şartlarında 7, 28 ve 90 gün boyunca bekletilen numuneler için belirlenen beton yaşlarında ilk değer tespitlerindeki esaslar dahilinde tekrardan UPV ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Akabinde, Şekil 3.12.'de görüleceği üzere; beton numuneler üç noktalı eğilme test düzeneğine yerleştirilmiş ve numuneler iki parça olacak şekilde kırılıncaya dek 0.25 (N/mm²)/s yükleme hızı ile eksenel yük uygulanmıştır. Söz konusu test aşamaları, çimento deney metotları olarak çimento harcı dayanım tayini için TS EN 196-1'de belirtildiği doğrultuda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12. Numunelerin ilgili kür yaşlarında basınç testi

Yükleme eksenine paralel şekilde kırılan ve Şekil 3.13’de görüldüğü üzere yaklaşık olarak eşit iki parçaya ayrılan numuneler, müteakiben basınç test cihazına alınmıştır.



Şekil 3.13. Basınç testine tabi tutulmuş bir deney numunesi

Bu süreçte aynı numuneye ait iki adet prizmatik parçaya $0,50 \text{ (N/mm}^2\text{)}/s$ yükleme hızı ile basınç uygulanmış ve bu kuvvet her bir parça yenilinceye kadar tatbik edilmiştir. Numunenin yenildiği an, elde edilen azami kuvvet değeri kaydedilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölüm başlığı altında; çalışma kapsamında üretilen numunelere ait farklı kür koşulları ve kür yaşlarına ait deney sonuçları sunulmuştur. Bu bölüme ait birinci alt başlık altında basınç dayanımına ilişkin sonuçlar mütalaa edilirken, ikinci alt başlık kısmında UPV değerlerine ait sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.1. Basınç Dayanımı

Mevcut tez çalışması kapsamında, yüksek sıcaklık (600 °C), kür rejimi (*standart kür koşulları, sodyum sülfatlı kür koşulları ve potasyum sülfatlı kür koşulları*), kür yaşı (7, 28 ve 90 gün), mineral katkı (*uçucu kül*) ve lif türlerinin (*narınlıkları farklı iki mikro çelik lif ve yine farklı narınlıkta polipropilen lif*) etkileri ikili ve/veya münferit olarak araştırılmıştır. Böylece, tez kapsamında gerçekleştirilen basınç dayanımına ilişkin deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar 3 farklı parametrenin karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Bu değişkenler aşağıdaki kıstasları irdeleme fırsatı sunmuştur.

- Boyları aynı ama çapları farklı olarak kullanılan üç lif türünün yüksek sıcaklık sonrasında basınç dayanımına olan etki düzeyleri,
- Numunelere tatbik edilen kür rejimlerinin basınç dayanımına olan etkisi,
- Uçucu kül gibi mineral katkıların hem yüksek sıcaklık hem de sülfatlı kür rejimlerinde matrise olan etkisi,
- Hem karışım parametrelerinin hem de çevresel şartların kür yaşına bağlı olarak matriste oluşturacağı etki incelenmiştir.

Deneysel olarak yürütülen mevcut çalışma kapsamında tasarlanan karışımlara ait numunelerin kür yaşına bağlı ortalama basınç dayanımı değerleri Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'te verilmiştir.

Çimento esaslı yapı malzemesinin yüksek sıcaklık altında kabuk atmasının iki ana nedeni, termal gerilmelerin düzensiz dağılımı ve gözeneklerde buhar basıncının oluşmasıdır (Ding ve ark., 2016). Mekanik, geometrik ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı olan lifler, yüksek sıcaklık altında çimento esaslı lifli kompozitlerin performansını iyileştirmede çeşitli roller üstlenir ve bu durum çimento esaslı lifli kompozitlere farklı özellikler kazandırabilir. Şekil 4.1.'de görüldüğü üzere, tüm numunelerin kür yaşına, kür rejimlerine ve uçucu kül ikamesine bakılmaksızın, üç günlük kür yaşı sonrası yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra farklı kür koşullarına

bırakılan tüm numunelerde en yüksek basınç dayanım değerlerinin ÇL16 liflerini içeren karışımlarda tespit edildiği görülmüş olup, bu durum genel olarak, sırasıyla ÇL35 ve PP30 tarafından takip edilmiştir. ÇL16 ve ÇL35 çelik liflerinin boyları aynı olmasına rağmen narinlik oranları farklı olduğundan dolayı birim hacimdeki lif sayısı farklılığından dolayı farklı neticeler elde edilmiştir. ÇL16 lifinin narinlik oranı daha yüksek olduğundan dolayı nispeten daha etkili çalışmış ve mikro çatlakların gelişimini daha fazla kısıtlamıştır. Bu duruma istinaden en yüksek dayanım değerlerinin ÇL 16 lifini içeren karışımlarda görüldüğü tespit edilmiştir.

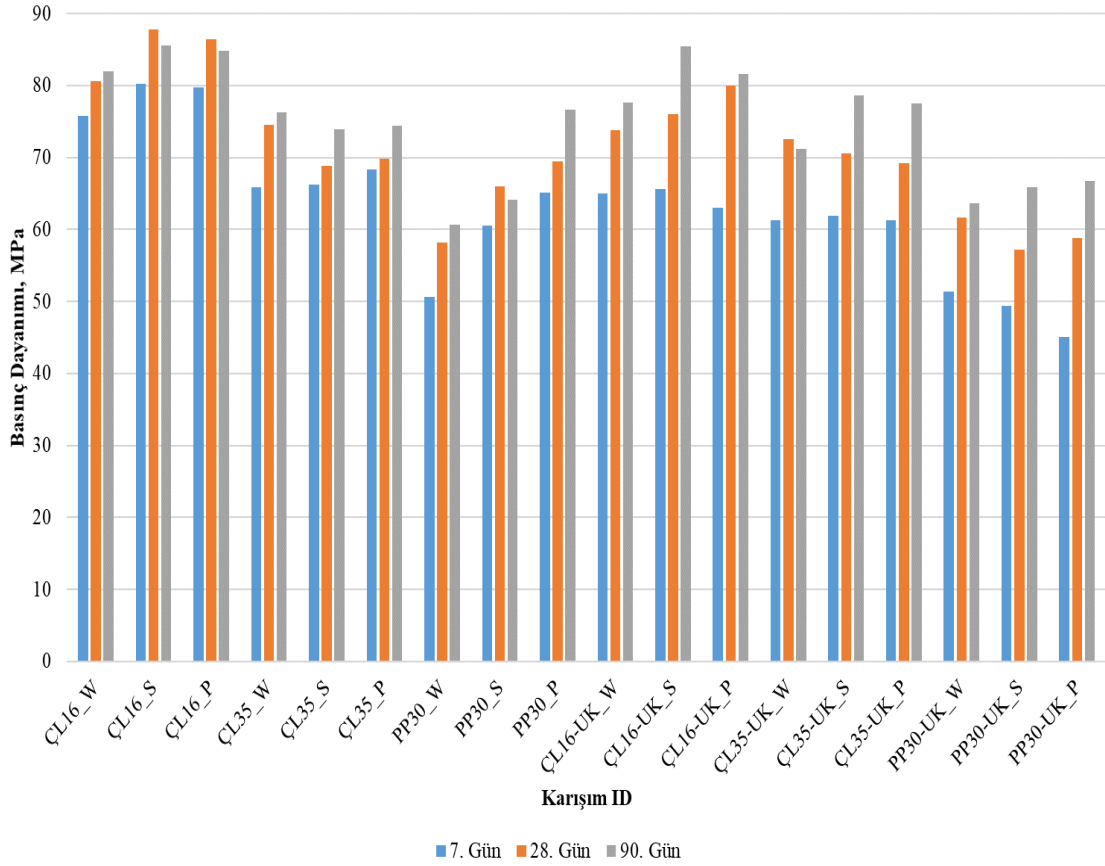
Porozite, gözenek boyutu ve gözenek dağılımı, çimento bazlı malzemenin dayanımını, dayanıklılığını ve geçirgenliğini etkileyen en temel faktörlerdir. Yüksek sıcaklık etkisiyle gözeneklilik artar ve gözenek boyutları büyür (Li ve ark., 2020). Deney süreci gözetildiğinde 600 °C'yi bulan yüksek sıcaklığa maruz numunelerin içeriğinde bulunan polipropilen liflerine erimesine (Adar ve ark., 2020) bağlı olarak oluşan boşluklar nedeniyle basınç dayanımına önemli ölçüde katkı sağlayamadığı görülmüştür (Li ve ark., 2017). Bir başka ifadeyle, PP30 lifinin ergime noktası düşük olduğundan dolayı yüksek sıcaklık etkisi altında eriyerek matris içinde oluşan buhar basınçlarının tahliyesine imkân sağlamasına rağmen liflerin erimesi sonucu artan boşluk oranı nedeniyle basınç dayanımında düşüş tespit edilmiştir. (Eidan ve ark., 2019; Xie ve ark., 2018; Aslani ve Kelin, 2018; Mahsanlar, 2006). Çelik liflerin termal kararlılığı yüksek iken polipropilen liflerin termal kararlılığı düşüktür (Wu ve ark., 2020). Bu nedenle PP30 lifine kıyasla, çelik lif yüksek sıcaklıklarda daha fazla gerilime dayanabilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda çelik lif, sıcaklık derecesine bağlı olarak tamamen deforme olmadan uzayarak iç gerilimin önemli hale geldiği bir noktaya ulaşır (Alhamad ve ark., 2022). Sonuç olarak, PP30 lifine kıyasen boyutsal kararlılığın mikro çelik lif içeren karışımlarda nispeten daha yüksek seviyelerde tespit edilmesinin temel nedeni bu şekilde gözlemlenmiştir. Bu durumun bir başka nedeni olarak; pirinç kaplı mikro çelik lifler diğer çelik lif türlerine nazaran daha pürüzsüz bir yüzey dokusuna sahip olduğundan dolayı işlenebilirlikte iyileşme meydana gelmekte olup nispeten daha yüksek kompoziteye sahip bir matris elde edildiğinden dolayı nispeten daha yüksek basınç dayanımı elde edilmesine bir neden olarak gösterilebilir (Yazıcı, 2017; Ünal ve Ark., 2007).

Gerçekleştirilen deneyler kapsamında numunelere tatbik edilen kür koşullarını simgeleyen harfler şu şekildedir:

W : Kireçli su (Water) havuzundan teşkil edilmiş kür koşulu

S : Sodyum sülfat çözeltisinden teşkil edilmiş kür koşulu

P : Potasyum sülfat çözeltisinden teşkil edilmiş kür koşulu



Şekil 4.1. Kür yaşına göre karişım basınç dayanımı değerleri

Çimento esaslı malzemelerin hidrasyon mekanizması sıcaklık etkisi ile birlikte artmakta ve erken dönemde artma hidrasyon ürünlerinden dolayı dayanımda belirgin düzeyde gelişme meydana gelmektedir. Temel hidrasyon reaksiyonları neticesinde C-S-H jellerine ilave olarak CH da oluşmaktadır. Etrenjitin ayrışması sıcaklık etkisi altında 50 ile 110 °C arasında meydana gelirken, sönmüş kireç ise 450 ile 500 °C arasında ayrılmaktadır (Alhamad ve ark., 2022). Çimento hamurundaki hasar özellikle 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda tespit edilir (Pasztetnik ve Wróblewski, 2021). Genel olarak, çimento hamuru yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında mikroyapıyı oluşturan bileşenlere bağlı olarak çeşitli düzeylerde fiziko-kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Bağlı suyun buharlaşması, kalsiyum hidroksitin ayrışması ve kalsiyum silikat hidratın ayrışması sırasıyla; yaklaşık olarak 100, 500 ve 700 °C mertebelerinde

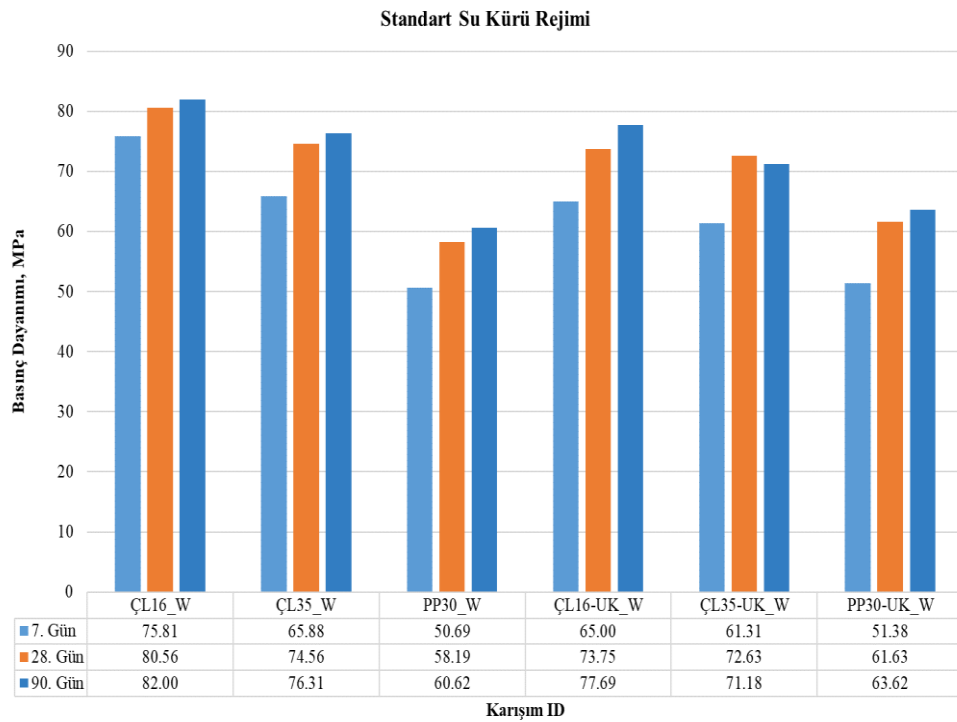
meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar, çimento hamurunun mekanik özelliklerinin zarar görmesine neden olur (Pasztetnik ve Wróblewski, 2021; Türkmen ve Fındık, 2013; Luccioni ve ark., 2003). Buna binaen, Şekil 4.2.'de görüldüğü üzere; sıcaklık etkisi sonrası kür rejimlerinin çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı üzerinde belirgin düzeyde bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.2. (a), Şekil 4.2. (b) ve Şekil 4.2. (c)'de görüldüğü üzere, standart su küründe en düşük dayanım gelişimi elde edilirken sülfatlı kür rejimlerinde ise daha yüksek değerler elde edilmiştir. Sodyum sülfat ve potasyum sülfat kür rejimlerinde elde edilen değerler genel olarak birbirine yakın olmakla birlikte potasyum sülfatlı kür rejimlerinde nispeten daha yüksek basınç dayanım değerleri gözlemlenmiştir.

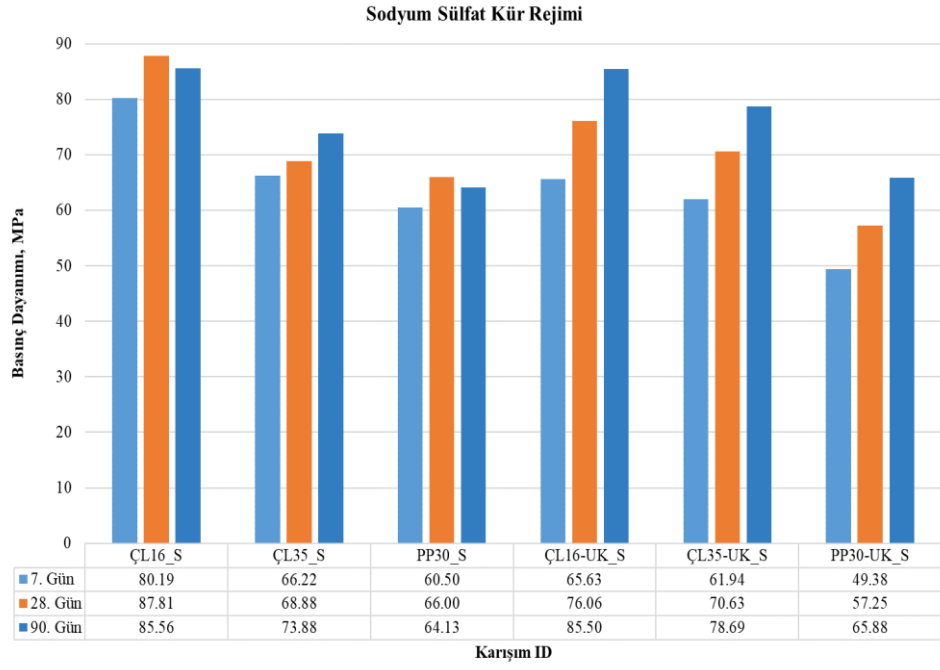
Erken dönemde, yani üç günlük kür yaşında, uygulanan sıcaklık etkisinin bir neticesi olarak tüm karışımlarda artan hidrasyon mekanizması nedeniyle dayanım gelişiminde artış elde edilmiştir. Standart suda kür edilen numunelerin 7 ile 90 günlük kür yaşları arasındaki basınç dayanımı değişimi Şekil 4.2. (a) ve Şekil 4.3.'de sunulduğu üzere uçucu külsüz karışımlarda en fazla %19.60 (PP30_W) olup, uçucu kül ihtiva eden karışımlarda ise bu oran %23.83 (PP30-UK_W) olarak elde edilmiştir. Bu iki karışım, PP30 lifi içeren ve sıcaklık etkisi sonrası liflerin erimesi nedeniyle artan mikroyapısal boşluklara sahip olan karışımlardır. Hem sodyum sülfat hem de potasyum sülfat içeren kür rejimlerindeki numunelerin kür yaşına bağlı olarak basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Çimento esaslı kompozitlerde sodyum sülfat çözeltisinin oluşturduğu yıpratıcı etki potasyum sülfata nazaran daha fazla olmasına rağmen, (Skalny ve ark., 2002) mevcut çalışmada yer alan bazı karışımlarda en yüksek artış potasyum sülfatlı kür rejimlerinde ortaya çıkmış ve genel olarak sülfatlı kür rejimlerinde yakın değerler elde edilmiştir. Bu artış, uçucu küllü sistemlerde çok daha belirgin bir düzeydedir. Uçucu külsüz karışımlarda, hidrasyon reaksiyonları neticesinden meydana gelen sönmüş kireç etrenjit oluşum süreçlerine dahil olduğundan dayanım artışı daha azdır. Bununla birlikte, uçucu küllü sistemlerde; puzolanik malzemenin bünyesinde yer alan oksitler, ilave C-S-H jelleri ile neticelenen puzolanik reaksiyonlara dahil olduğundan dolayı basınç dayanımlarında nispeten çok daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Öte yandan, çimento yerine ikame edilen uçucu külün, erken dönem basınç dayanımı değerlerini belirli bir oranda düşürdüğü ancak ilerleyen süreçte çimento esaslı matriste devam eden puzolanik etki ile daha dayanım yüksek bir yapı oluşturduğu tespit edilmiştir (Naik ve ark., 2002; Erdinç, 1995). UK gibi mineral katkıların filler etkisi de olduğundan dolayı azalan porozite nedeniyle nispeten daha

yoğun bir mikro yapı elde edildiğinden (Abid ve ark., 2017; Afroughsabet ve ark., 2016; Jang ve ark., 2016) çimento yerine ikame edilen mineral katkıların bağlayıcı malzeme olarak kullanılması lif donatılı kompozitlerin performansı üzerine önemli bir etki oluşturmaktadır.

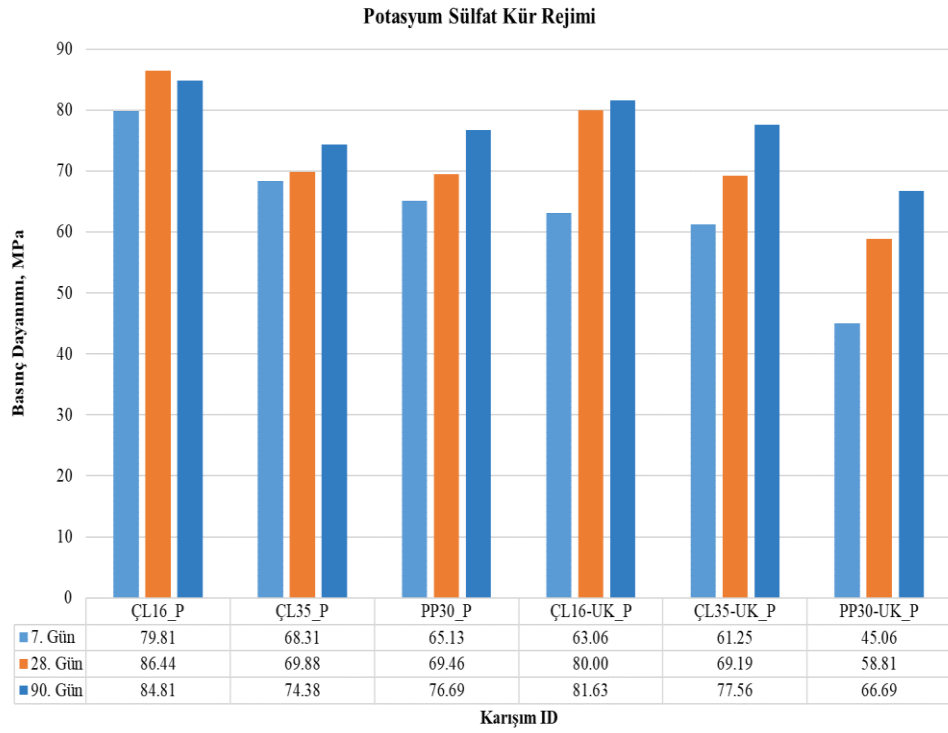
Bunlara ilave olarak; mikroyapısal gözenek özelliklerinin, uzun vadeli sülfat direncini etkileyen bozulma ürünlerinin miktarından daha önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir. %20 ve %25 UK içeren harçların sülfat etkisi altında ilk üç aya kadar önce bir artış ve ardından zamanla bir düşüş gösterdiği Lv ve ark. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada tespit edilmiş olup, mevcut çalışmamızda kür süreçleri bu zaman diliminde kaldığından benzer sonuçlar elde edilmiştir.



(a)

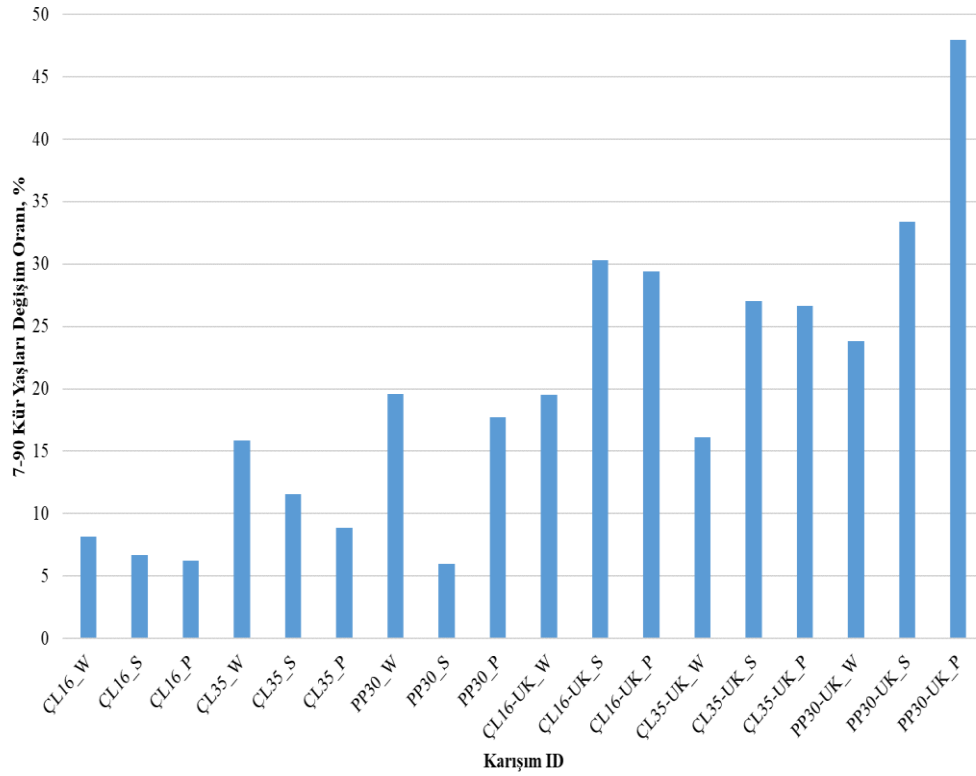


(b)



(c)

Şekil 4.2. Kür rejimlerine göre dayanım değerleri (a) Standart, (b) Sodyum sülfatlı, (c) Potasyum sülfatlı



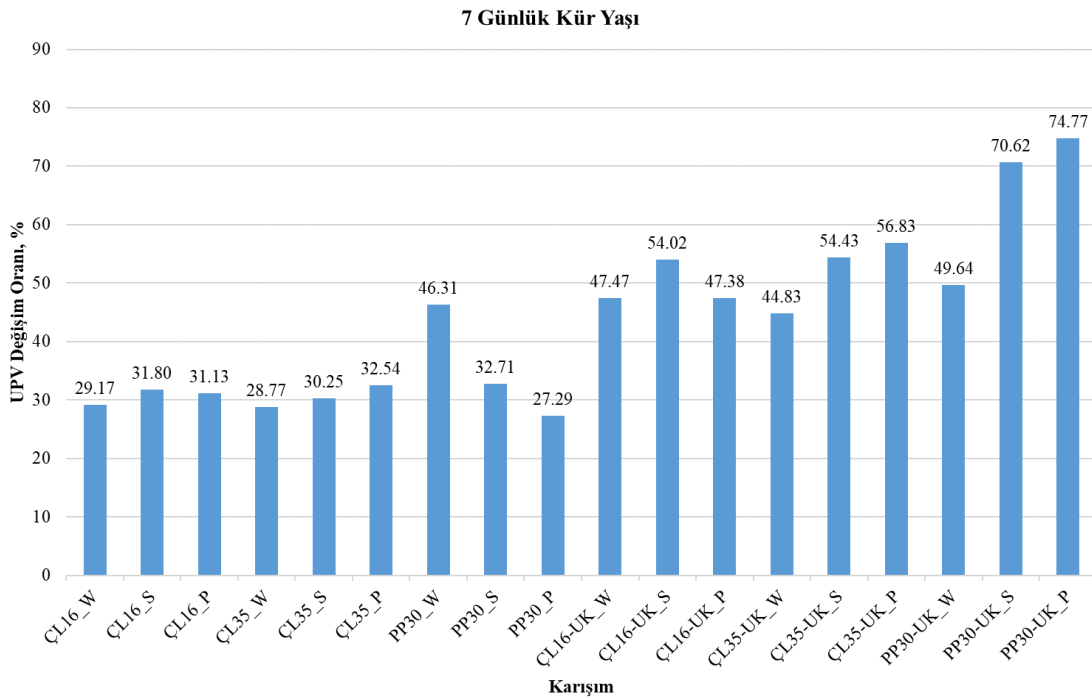
Şekil 4.3. 7 – 90 günlük kür yaşlarına ilişkin dayanım değişim oranları

4.2. Ultrases Dalgası Geçiş Hızı (UPV)

7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için UPV değişim değerleri sırasıyla Şekil 4.4., Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.’da verilmiştir. Materyal ve metot kısmında da belirtildiği üzere üretilen numuneler üç günlük kür yaşında 600 °C’ye maruz bırakılmış ve bunu müteakip ilgili kür yaşlarına kadar numuneler standart kür ortamı, sodyum sülfatlı kür rejimi ve potasyum sülfatlı kür rejimi olmak üzere farklı kür rejimlerinde bekletilmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere kür yaşı ve karışımların üretildiği karışım parametrelerine bağlı olarak farklı seviyelerde değişimler elde edilmiştir.

7 günlük kür yaşı için UPV değişimlerinin verildiği Şekil 4.4.’te görüldüğü üzere; en yüksek UPV değişimlerinin PP içeren liflerde olduğu tespit edilmiş olup, ÇL16 ve ÇL35 liflerini içeren karışımlarda ise genel olarak birbirine yakın ve PP30 içeren karışımlardan daha düşük çıkmıştır. Sülfat etkisine maruz bırakılmadan evvel numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığı ve eriyen PP liflerinden dolayı kür rejimlerindeki sudan dâhile daha fazla su girdiği için uçucu kül içersin veya içermesin mikroyapısal değişim bu tür karışımlarda daha fazla tespit edilmiştir. Öte yandan,

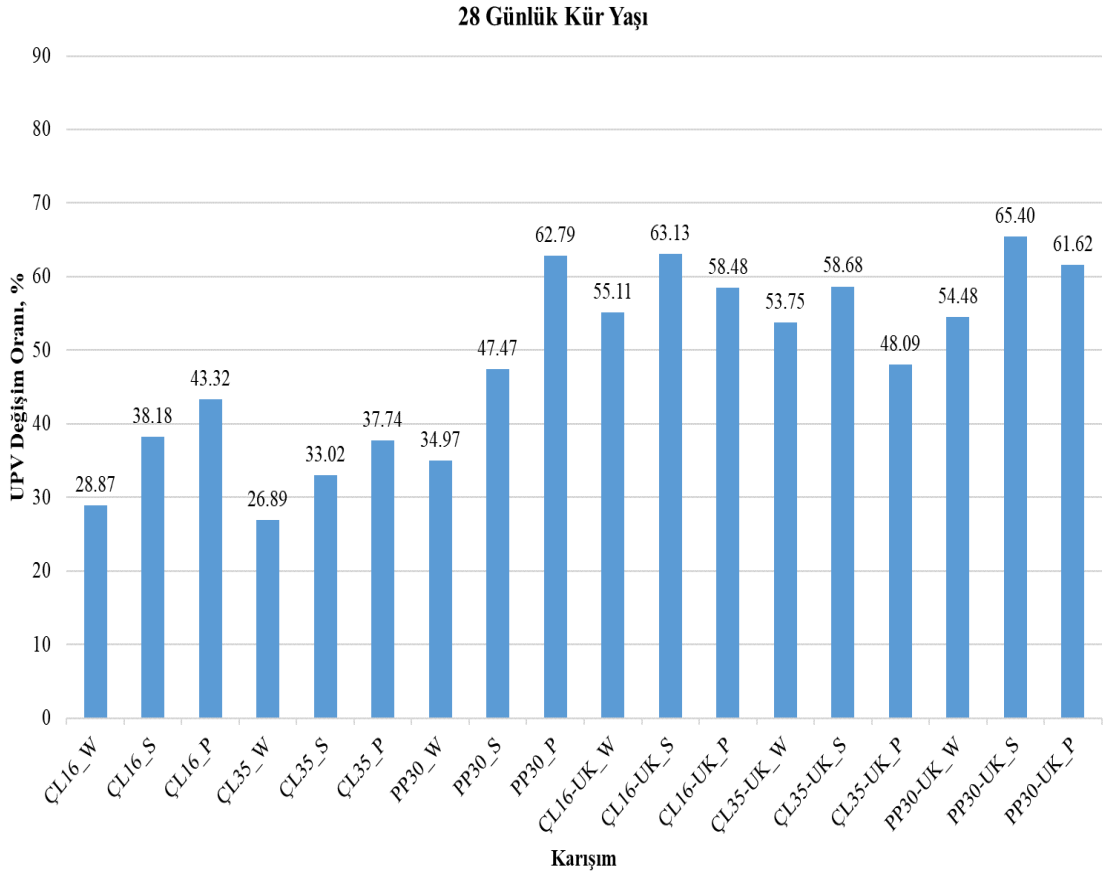
basınç dayanımı bölümünde de belirtildiği üzere; sülfatlı kür rejimlerinden dolayı çimento esaslı malzemenin mikroyapısında oluşan ilave sülfat esaslı ürünlerin bir neticesi olarak yoğunluk artmış ve UPV değerlerinde genel olarak daha fazla bir değişim elde edilmiştir. Sülfatlı kür rejimlerine göre, standart suda kür edilen numunelerde nispeten daha düşük UPV değişimi gözlemlenmiştir. Ayrıca uçucu küllü sistemlerde de, erken dönemde mikroyapısal gelişim yüksek seviyelerde olmadığı ve özellikle bu süreç yüksek sıcaklık ile bir nevi hızlandırıldığı ve erken dönemde nispeten daha yüksek poroziteye sahip olduğu için özellikle kür rejiminden dolayı mikroyapısal değişim daha fazla oluşmuştur. Bunun bir neticesi olarak uçucu küllü sistemlerde en fazla UPV değişimi tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. 3 günlük kür yaşına kıyasen 7 günlük kür yaşı için UPV değişim oranları

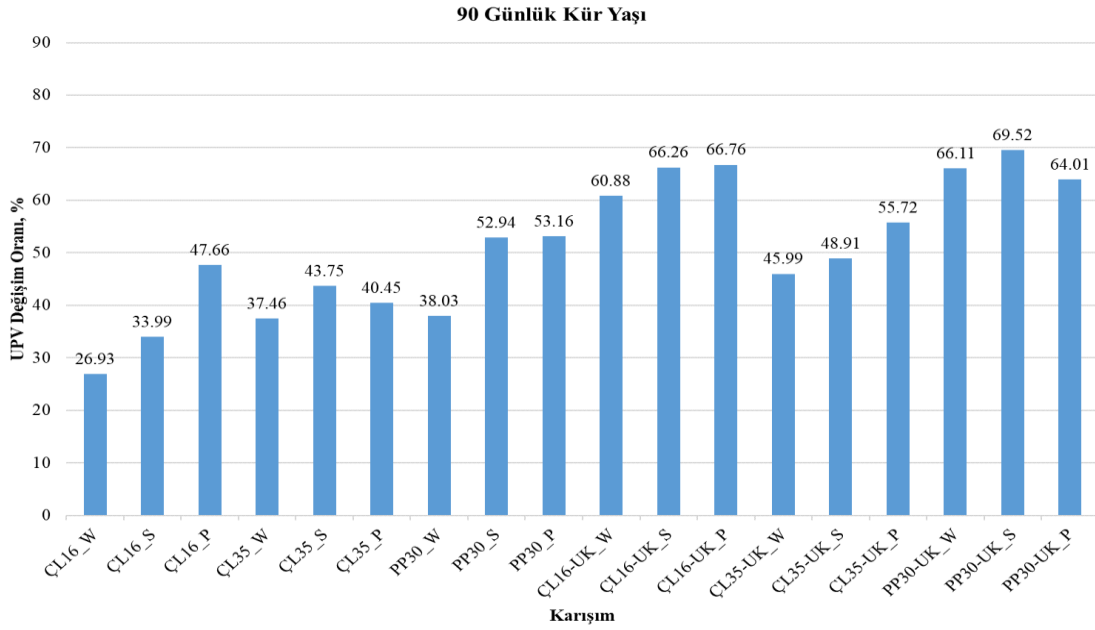
28 günlük kür yaşı için UPV değerlerindeki değişim oranlarını gösteren sonuçlar Şekil 4.5.'te verilmiştir. Genel olarak ÇL16 ve ÇL35 liflerinin kullanıldığı karışımlardaki UPV değişim oranları birbirine yakın tespit edilmiş olup en yüksek değişim oranı PP30 liflerinin kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere bu durumun daha yüksek poroziteye sahip bir mikroyapının sonucu olduğunu net bir şekilde görebilmekteyiz. 7 günlük kür yaşına benzer şekilde kür rejimi olarak hem sodyum sülfatlı hem de potasyum sülfatlı kür koşullarında bekletilen numunelerde değişim oranı daha fazla olarak elde edilmiş olup

standart kür koşullarında kür edilen numunelerde ise nispeten daha düşük değişim oranları gözlemlenmiştir. Gelişen ve oluşan ilave hidrasyon ürünlerinin de bir neticesi olarak 28 günlük kür yaşında UK içeren karışımlarda daha yüksek değişim oranları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. 3 günlük kür yaşına kıyasen 28 günlük kür yaşı için UPV değişim oranları

90 günlük kür yaşı için UPV değişim oranları Şekil 4.6.'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere; uçucu küllü numunelerde daha yüksek oranlarda UPV değişimleri elde edilmiştir. ÇL16 ve ÇL35 içeren karışımların değişim oranları genel olarak benzer elde edilmiştir. PP30 lifi içeren karışımlarda ise önceki bölümlerde de açıklandığı üzere en yüksek seviyelerde tespit edilmiştir. Genel olarak potasyum sülfat ve sodyum sülfatlı kür rejimlerinde en yüksek değişimler tespit edilmiş ve normal kür yaşında ise nispeten daha düşük değerler elde edilmiştir. Uçucu küllü sistemlerde ise daha yüksek değişim elde edilmiştir.



Şekil 4.5. 3 günlük kür yaşına kıyasen 90 günlük kür yaşı için UPV değişim oranları

4.3. SEM Görüntülerinin Değerlendirilmesi

Mevcut tez çalışması kapsamında, yüksek sıcaklık etkisi sonrası hem karışım parametrelerinin hem de kür rejimlerinin değerlendirilmesi adına ilk üç günlük kür yaşına ulaşmış ve farklı karışım parametrelerine göre tasarlanmış olan çimento esaslı lifli kompozitlerin 600 °C'lik yüksek sıcaklık koşulları sonrasında performansları incelenmiştir. Önceki bölümlerde hem mekanik hem de mikroyapısal karakteristiği basınç dayanımı ve UPV analizi ile belirlenmiş olup, mevcut bölümde ise taramalı elektron mikroskopu (SEM) aracılığı ile mikroyapısal karakteristiği oluşan ürünler ve meydana gelen değişimler penceresiyle yalnızca 28 günlük kür yaşı için numuneler değerlendirilecektir.

Resim 4.1., 4.2., 4.3., 4.4., 4.5. ve 4.6.'da verilen görsellerde de görüldüğü üzere başta C-S-H, CH ve etrenjit gibi genel hidratasyon ürünleri tespit edilmiştir. Özellikle sülfatlı rejimlere maruz kalan numunelerde nispeten daha yoğun etrenjit minerallerine rastlanılmıştır.

Hidratlı bir kalsiyum alüminyum sülfat minerali olarak bilinen etrenjit, esas olarak çimentonun hidratasyonu sırasında dayanıma katkısı olmayan bir hidratasyon ürünü olarak oluşur ve sülfatlar kalsiyum alüminat fazları ile reaksiyona girdiğinde ortaya çıkmaktadır. Bu özel oluşum, çimento esaslı malzemelerin yapısında etrenjit gelişimini daha da kolaylaştıran ve artıran harici sülfatların varlığı ile karakterize edilen

sülfat saldırısı koşullarında özellikle yoğunlaşır. Bu etki mekanizmasının bir neticesi olarak, SEM kullanılarak elde edilen görsellerde, kirece doymuş standart suda kür edilen numuneler ile iki farklı sülfat çözeltisine sahip ortamlara maruz bırakılan numuneler arasında etrenjit oluşumu itibariyle önemli farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. SEM görüntüleri, sülfat çözeltilerine maruz bırakılan karışımlardaki etrenjit konsantrasyonunun, suda kür işlemine tabi tutulanlara kıyasla önemli ölçüde arttığını açıkça göstermiştir. Standart suda kürleme yapılan karışımlarda gözlemlenen etrenjit seviyelerindeki nispeten daha düşük oran, etrenjit oluşumu için gerekli olan sülfat iyonlarının, çimento ve uçucu kül bileşenlerinde doğal olarak bulunanlarla sınırlı olduğu dikkate alındığında, bu sonuç beklenen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna karşılık, sodyum sülfat ve potasyum sülfat içeren çözeltilere daldırılan numuneler, sürekli olarak harici kaynaklardan sülfat iyonları ile beslendiğinden dolayı bu harici sülfat kaynaklarına kür yaşları boyunca (7, 28 ve 90 gün) sürekli maruz kalma, numuneler içinde etrenjit oluşumunun artmasına neden olmuştur. Bunlara ilave olarak, her ne kadar sodyum sülfat ve potasyum sülfat rejimlerinde sülfat etkisine maruz bırakılan karışımlardan sodyum sülfatlı rejimlerde kür edilen numunelerde daha çok etrenjit tespit edilmiş olsa da genel olarak oluşan etrenjit formasyonunun birbirine yakın seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.

Mikro yapısal gelişimin gelişmeye devam ettiği ve porozitenin nispeten çok daha yüksek oranlarda olduğu ilk üç günlük kür yaşına sahip olan numuneler, 600 °C'lik sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle, genel olarak, hem hidratasyon mekanizması teşvik edilerek nispeten daha fazla hidratasyon ürünü oluşmuş hem de PP içeren karışımlardaki PP lifi ise 165-175 °C'lik sıcaklıklarda eridiği ve ilave kanal oluşturduğu için mikro yapısal porozite yüksek olmaktadır. Böyle bir mikro yapıya sahip çimento esaslı malzeme, sülfat rejimlerinden daha fazla sülfat alacağından dolayı daha fazla etrenjit formasyonu/minerali gözlemlenmiştir.

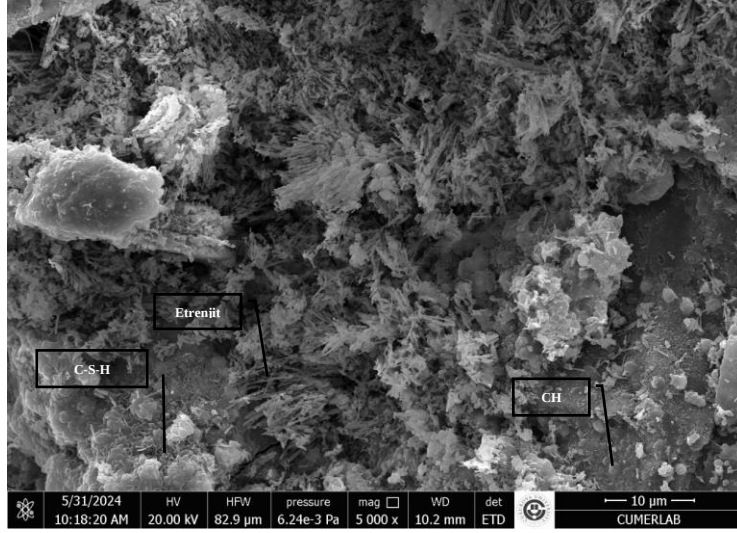
Sülfat saldırısı, sülfat iyonlarının çimento esaslı malzemenin matrisine sızması ile karakterize edilen ve çimentolu malzemelerde geniş çapta belgelenmiş bir olgudur. Bu iyonlar, malzemede bulunan kalsiyum hidroksit ve alüminatlarla reaksiyona girerek etrenjit gibi genişleyici bileşiklerin oluşmasına neden olur. Bu reaksiyonların neden olduğu genleşme, matris içinde iç gerilimler oluşturma potansiyeline sahiptir ve bu da çatlakların oluşmasına, dökülmelere ve nihayetinde malzemenin hem mekanik dayanımında hem de dayanıklılığında bir azalmaya yol açabilmektedir. Bir tür puzolanik malzeme olan uçucu kül, puzolanik reaksiyonunun bir parçası olarak

kalsiyum hidroksit tüketerek betonun dayanıklılığını artırma yeteneği ile bilinmektedir. Bu reaksiyon, ek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli oluşumuna yol açmakta ve sonuçta çimento esaslı malzemenin mikro yapısının yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Ancak, sülfatların varlığında, artan etrenjit üretimi nedeniyle uçucu külün olumlu etkileri özellikle erken dönemde azalabilmektedir. Çünkü, erken dönemde sülfat etkisine maruz kalan çimento esaslı malzemelerde mikro yapı tam gelişmediğinden geçirimsizlik nispeten daha yüksek olmakta ve uçucu kül gibi mineral katkıları da hidrasyon reaksiyonları neticesinde oluşan sönmüş kireç ürününü yüksek oranda daha tüketmediğinden dolayı bu şartlardaki kompozitlerin sülfata maruz kalma oranları daha yüksek olabilmektedir.

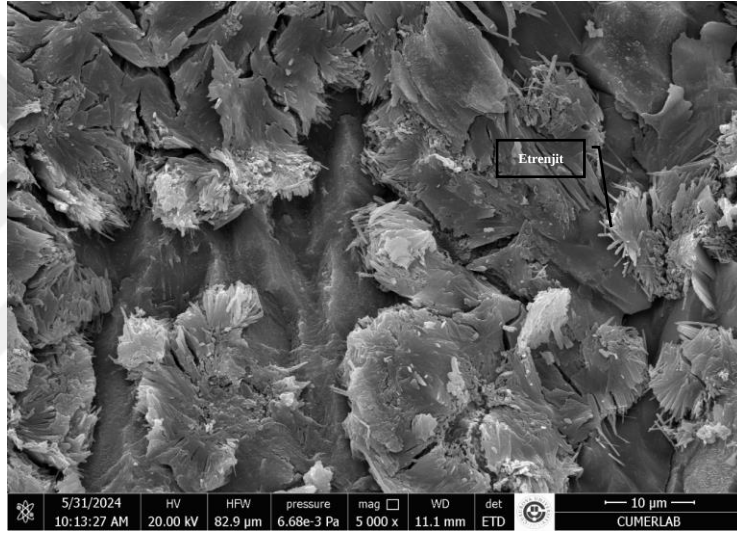
Araştırma çalışmasında SEM kullanılarak yapılan analiz, uçucu kül ilavesinin karışımların genel mikro yapısal özelliklerinde iyileşmelere yol açtığını ortaya koymuştur. Ancak, uçucu külün sülfat saldırısı koşullarına maruz kaldığında etrenjit oluşumunu önemli ölçüde azaltmadığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, uçucu külün çimento bazlı malzemelerin belirli dayanıklılık özelliklerini geliştirme potansiyeline sahip olmasına rağmen, özellikle yüksek sıcaklık etkisi sonrası numuneler sülfat etkisine maruz bırakıldığından dolayı sülfat saldırısıyla mücadelede etkinliğinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

ÇL16

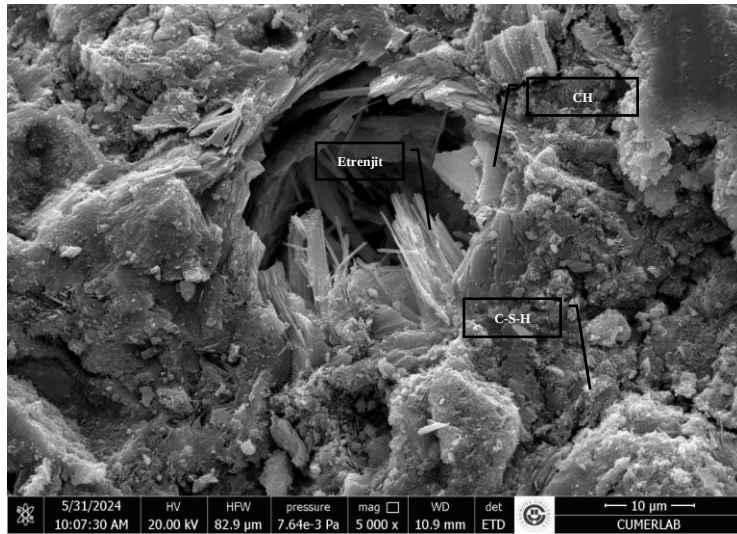
Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi



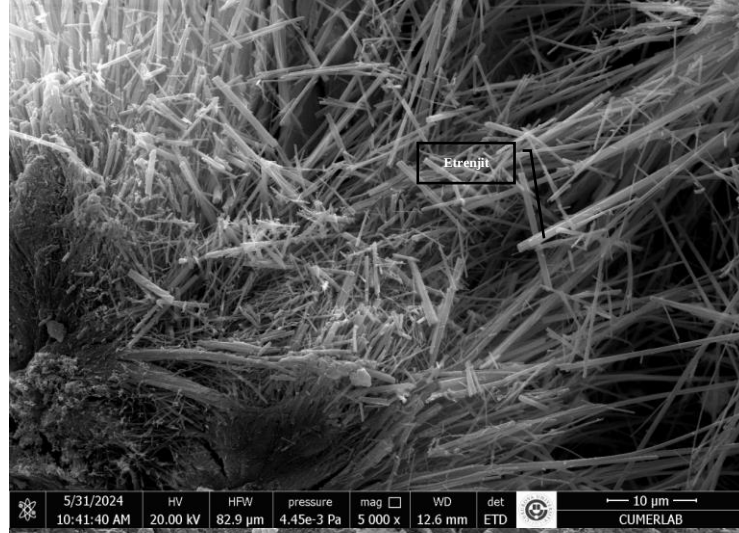
Standart Kür Rejimi



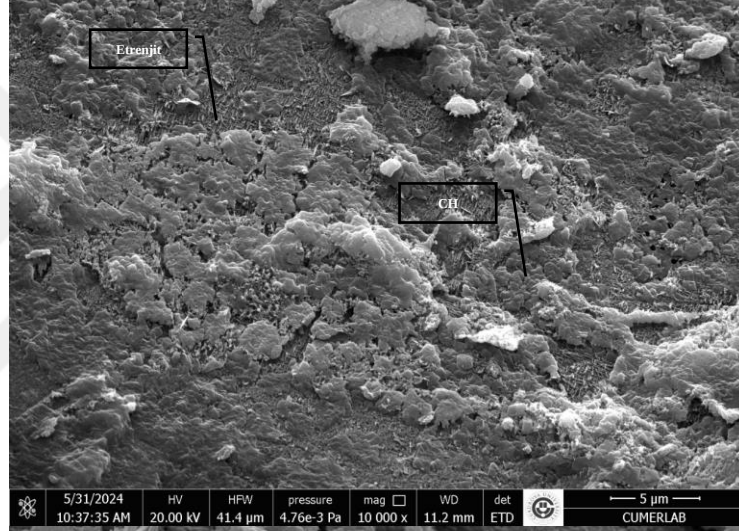
Resim 4.1. Kür rejimine göre ÇL16 kodlu karışım için SEM görüntüleri

ÇL35

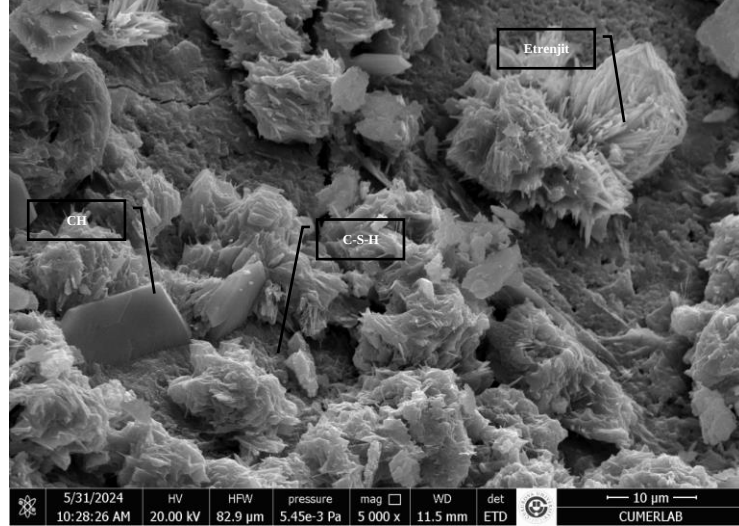
Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi



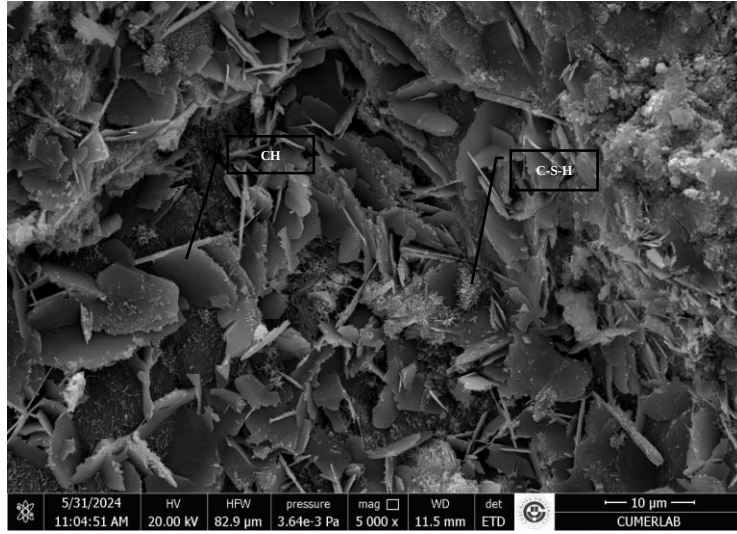
Standart Kür Rejimi



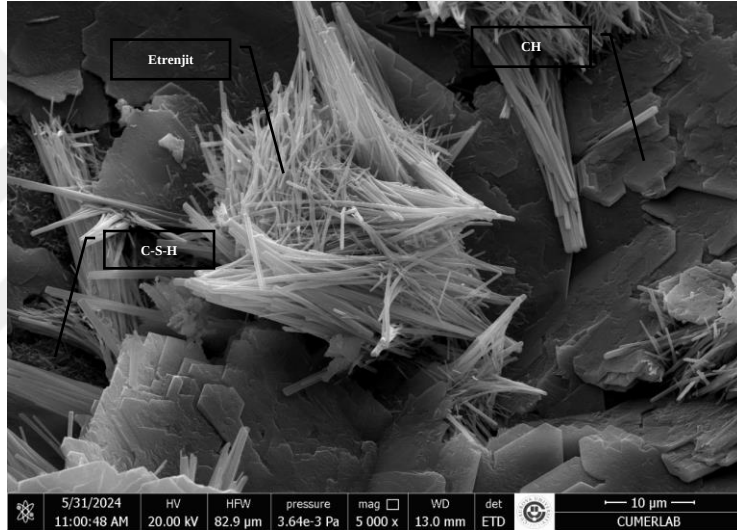
Resim 4.2. Kür rejimine göre ÇL35 kodlu karışım için SEM görüntüleri

PP30

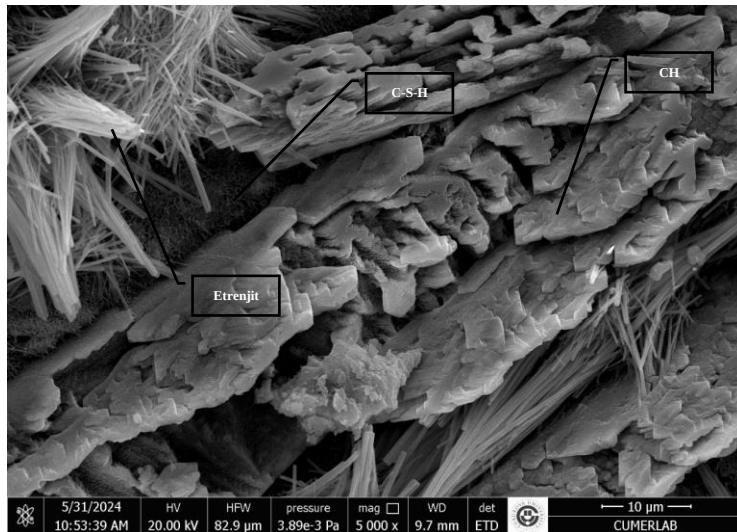
Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi



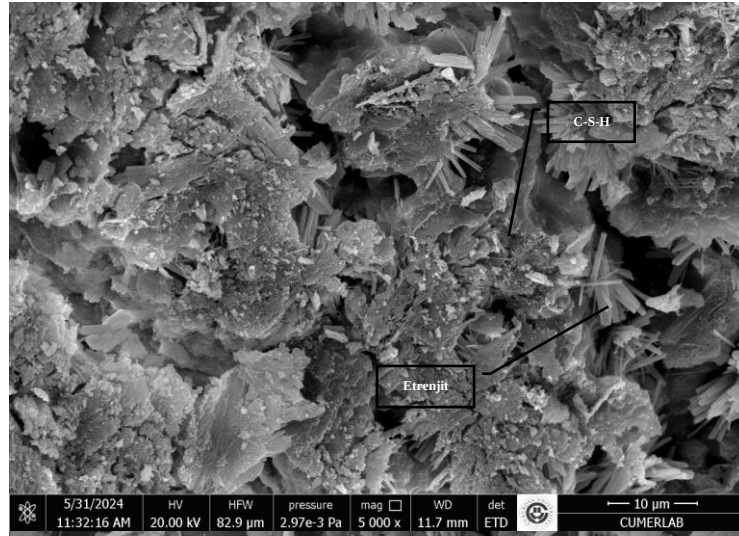
Standart Kür Rejimi



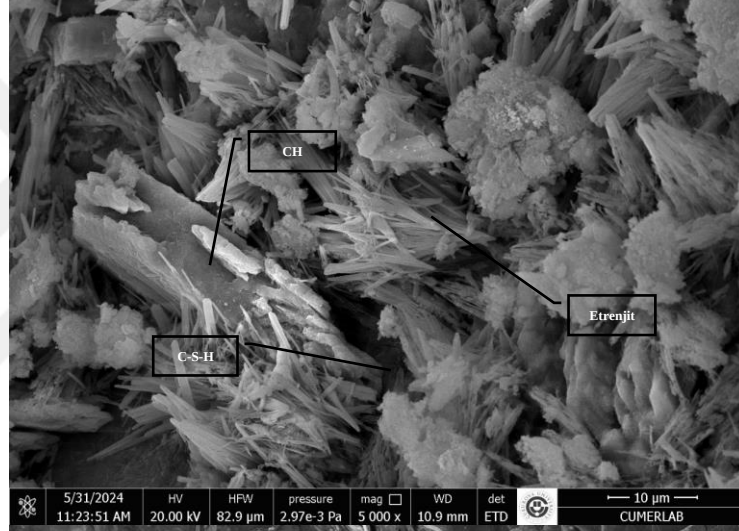
Resim 4.3. Kür rejimine göre PP30 kodlu karışım için SEM görüntüleri

ÇL16-UK

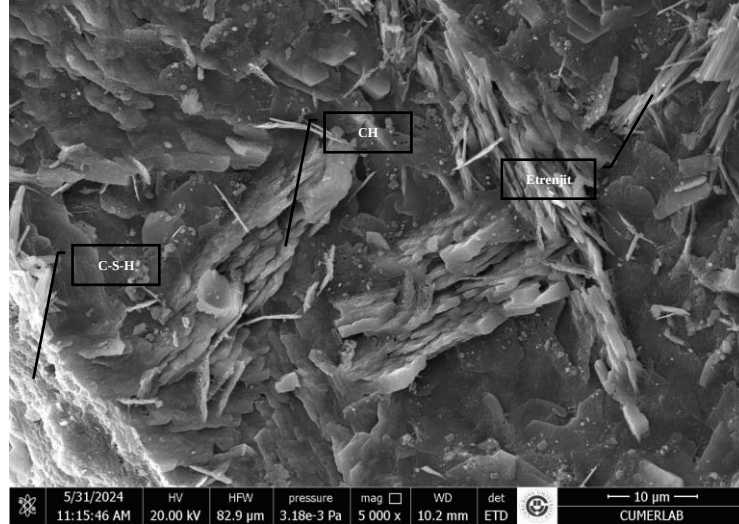
Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi



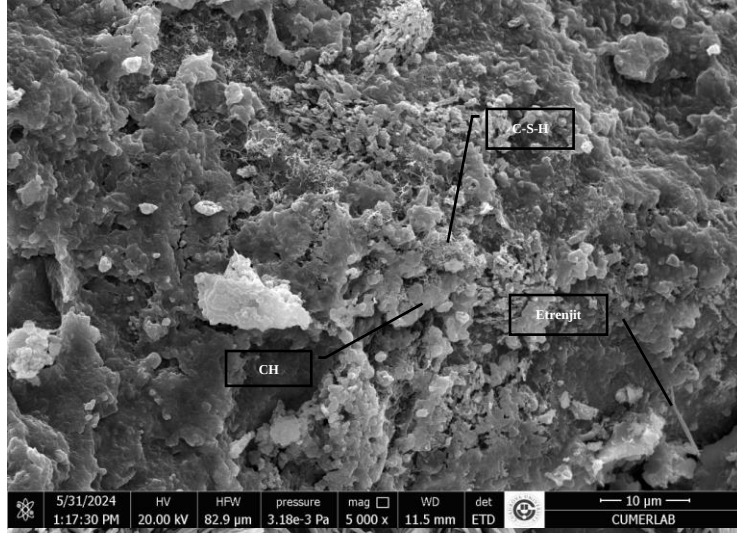
Standart Kür Rejimi



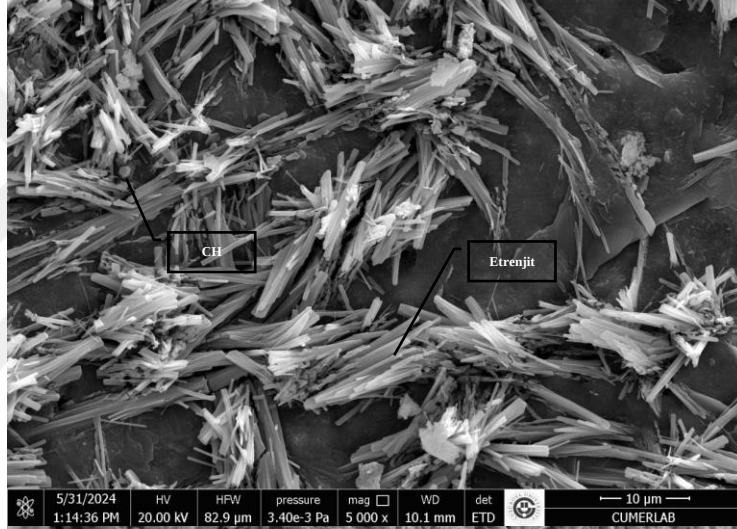
Resim 4.4. Kür rejimine göre ÇL16-UK kodlu karışım için SEM görüntüleri

ÇL35-UK

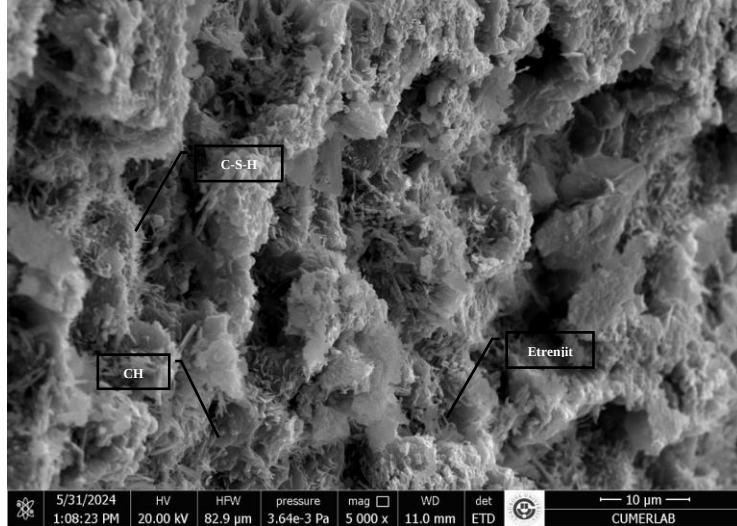
Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi



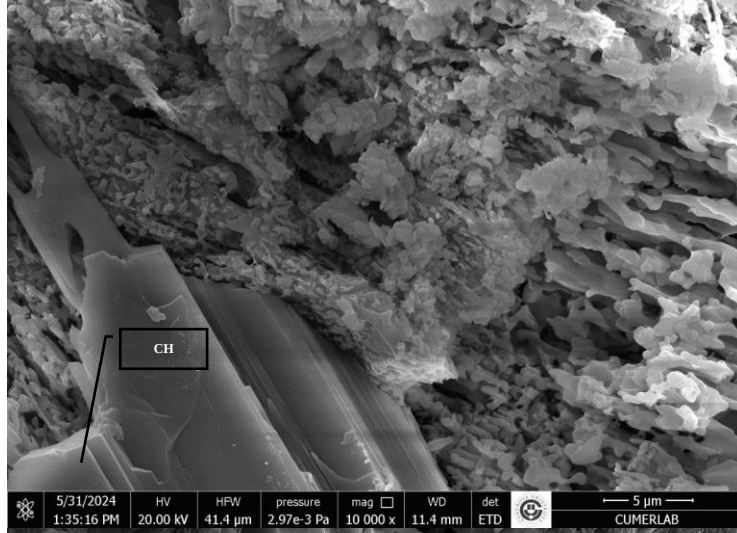
Standart Kür Rejimi



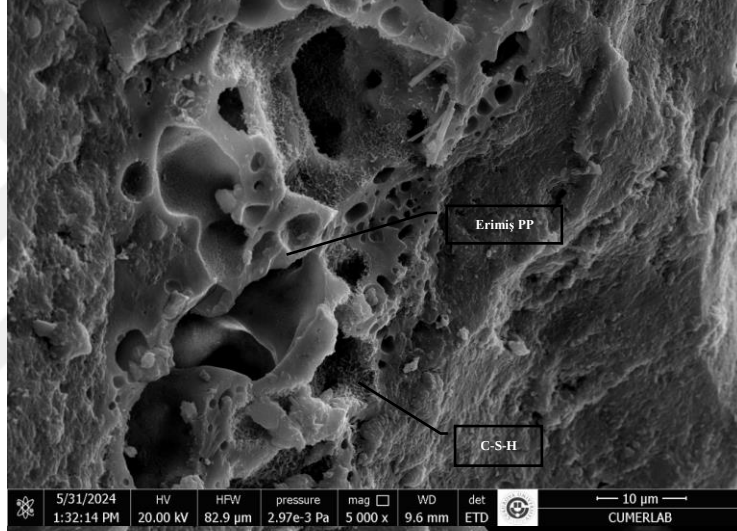
Resim 4.5. Kür rejimine göre ÇL35-UK kodlu karışım için SEM görüntüleri

PP30-UK

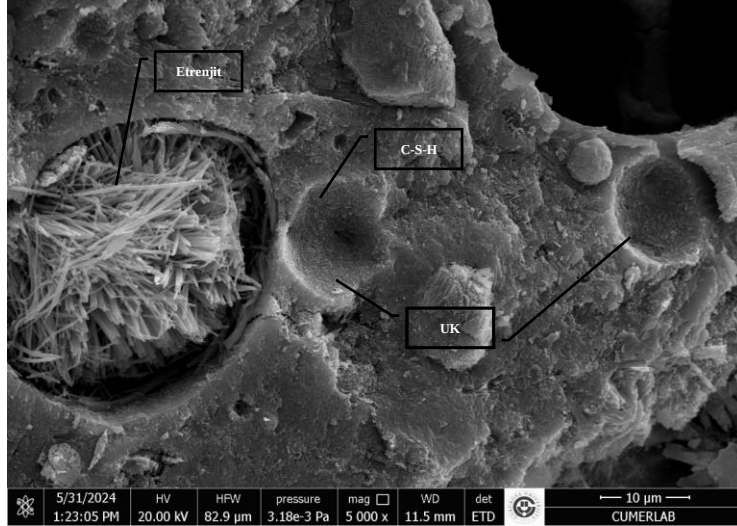
Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi



Standart Kür Rejimi



Resim 4.6. Kür rejimine göre PP30-UK kodlu karışım için SEM görüntüleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Çimento esaslı lifli kompozitlerde; mineral katkı kullanımı göz önünde bulundurularak farklı lif türleri ve kür koşulları altında sıcaklık etkisini de kapsayacak şekilde basınç dayanımı ve UPV değerlerindeki değişim 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için incelenmiş olup sonuçlar SEM görüntüleri ile desteklenmiştir.

- Çelik liflerde artan narinlik oranının numunelere ait basınç dayanım değerlerinde iyileştirmeyi beraberinde getirdiği tespit edilmiştir.
- Polipropilen liflerin yüksek sıcaklıklarda erimesine bağlı olarak beton matrisinde hava kanalları şeklinde boşlukların oluştuğu ancak bu boşlukların basınç dayanımını düşürdüğü tespit edilmiştir.
- Çelik liflerin polipropilen liflere nazaran sahip olduğu pürüzsüz yüzey dokusunun işlenebilirliği arttırdığı ve buna bağlı olarak oluşan yüksek kompasitenin basınç dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir.
- Yüksek sıcaklık etkisine bağlı olarak hidrasyon mekanizmasının arttığı ve özellikle uçucu kül ihtiva eden karışımlarda gerçekleşen puzolanik reaksiyonların basınç dayanımını arttırdığı belirlenmiştir.
- Sülfat hücumunun mineral katkı bulunmayan numunelerde yıkıcı etkiye sahip olduğu ve kür yaşına bağlı olarak en yüksek dayanım artışının standart kür koşullarında elde edildiği belirlenmiştir.
- Bünyesinde uçucu kül bulunan numunelerde ise mineral katkı malzemesinde yer alan oksitlerin sülfat hücumu sonucunda kalsiyum silika hidrat jellerinin oluşumuna katıldığı tespit edilmiştir.
- Sülfatlı kür rejimlerinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda oluşan mikroyapısal değişimler beton matrisinde mevcut olan ürünlerin miktarını artırarak daha yoğun bir yapı oluşturmaktadır.
- 7 ile 90 günlük kür yaşları arasındaki basınç dayanımı değişimi UK ihtiva etmeyen karışımlar incelendiğinde polipropilen lif kullanılan standart kür koşullarında %19.60 ile elde edilmiştir. Benzer durum, bünyesinde UK barındıran karışımlarda yine polipropilen lif içeren standart kür koşullarındaki numunelerde %23.83 ile elde edilmiştir.

- Tatbik edilen yüksek sıcaklık neticesinde eriyen polipropilen liflerin oluşturduğu boşluklar ilerleyen kür yaşı ve özellikle sülfatlı kür rejimlerinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda etrenjit gibi ürünler ile dolarak yoğunluğu en çok değişen numuneler olduğu UPV testleri ile tespit edilmiştir.

5.2 Öneriler

- Betonun yangın ihtimali yüksek olan yerlerde karşılaşılabileceği sıcaklık değerleri karşısında iç ve dış yapısı arasındaki termal farkların engellenebilmesi için polipropilen lif kullanımı önerilir.
- Uçucu kül gibi endüstriyel atıkların beton yapı elemanlarında kullanılması, her ne kadar erken yaşlarda istenen basınç dayanım değerlerinin sağlanması hususunda zafiyet oluştursa da zamanla daha mukavemetli elemanların elde edilmesi için önerilir.
- Çelik ve polipropilen liflerin özellikle yüksek sıcaklık karşısında birbirinden tamamen bağımsız göstermiş oldukları davranış nedeniyle iki lif türünün hibrit olarak beton karışımlarında oluşturduğu etkinin araştırılması önerilir.
- Çimento esaslı lifli kompozitlerde benzer durabilite problemleri karşısında eğilme dayanımına ve boy değişimine ait değerlerin uzun vadede ortaya çıkardığı sonuçların incelenmesi önerilir.
- Liflerin, inşa edilecek bir yapıda kullanılması durumunda deney kapsamındaki durabilite problemleri karşısında göstereceği davranışın statik ve maliyet açısından incelenmesi önerilir.

KAYNAKLAR

- Abid, M., Hou, X., Zheng, W. Ve Hussain, R.R., 2017, High temperature and residual properties of reactive powder concrete—a review, *Construction and Building Materials*, 147, 339-351.
- Adar, M., 2018, Uçucu kül ve polipropilen lif içeren kendiliğinden yerleşen betonun yüksek sıcaklık altında özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- Adar, M., Bingöl, A.F. ve Adar, E., 2020, Kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirliğine ve yüksek sıcaklık direncine polipropilen lifin etkisi, *Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (2), 719-732.
- Afroughsabet, V., Biolzi, L. ve Ozbakkaloglu, T., 2016, High-performance fiber-reinforced concrete: a review, *Journal of Materials Science*, 51, 6517-6551.
- Akman, S., 1990, Yapı Malzemeleri, *İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yayını*, İstanbul, 83-84.
- Al-Amoudi, O.S.B., 1997, Sufate attack and reinforcement corrosion in plain and blended cements exposed to sulfate environments, *Building and Environment*, 33, 53-61.
- Al-Amoudi, O.S.B., 2002, Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments, *Cement and Concrete Composites*, 24, 305-316.
- Alhamad, A., Yehia, S., Lublóy, É. ve Elchalakani, M., 2022, Performance of different concrete types exposed to elevated temperatures: A Review, *Materials*, 15(14), 5032.
- Altunç, Ö.Ş., 2023, Sülfat etkisine maruz çeşitli lif katkılı harçların genleşme ve basınç dayanımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Aral, M., 2006, Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Arazsu, U., 2012, Polipropilen lifli betonların taze ve sertleşmiş beton özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Arisoy, B., 2005, Lifli hafif betonların optimum karışım tasarımı, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli.
- Arslan, M., 2001, Beton (Dökümü, kalıpları, kusurları ve dayanıklılığı), Atlas Yayın Dağıtım, yayın no:3, 1. Baskı, İstanbul, 157.
- Aslani, F. ve Kelin, J., 2018, Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber

- aggregates exposed to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 200, 1009-1025.
- ASTM C 618, 2023, Standard spesification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *The American Society for Testing and Materials*, ABD.
- ASTM C 1116/C 1116M, 2006, Standard specification for fiber-reinforced concrete, *The American Society for Testing and Materials*, ABD.
- Atabey, E., 2014, Türkiye asbest haritası (Çevresel asbest maruziyeti akciğer kanseri-mezotelyoma), *Tuberkuloz ve Toraks*, 63 (3), 199-219.
- Atış, C.D. ve Karahan, O., 2005, Lif takviyeli uçucu küllü betonların İşlenebilirlik özellikleri, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20 (1), 139-150.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., 2002, Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite), *DEÜ Müh.Fak. Yayınları*, İzmir, 89-185.
- Bazant, Z.P. ve Kaplan, M.F., 1996, Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models, Longman, London.
- Bekaert, 1998, Duomix hakkında genel bilgiler kılavuzu, *Bekaert*, Belçika.
- Bertron, A., Duchesne, J. ve Escadeillas, G., 2005, Attack of cement pastes exposed to organic acids in manure, *Cem. Concr. Compos.*, 27, 898-909.
- Bilim, E., 2019, Karma lif kullanılan yüksek performanslı nano beton üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Düzce.
- Chawla, K.K., 1998, Fibrous materials, *Cambridge University Press*, Cambridge.
- Demirel, Ö. ve Demirhan, S., 2021, Mikronize kalsit içeren yüksek hacimde uçucu kül katkılı çimento harçlarının mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36 (4), 2255-2270.
- Ding, Y., Zhang, C., Cao, M., Zhang, Y. ve Azevedo, C., 2016, Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire, *Consruction and Building Materials*, 113, 456-469.
- Doğruyol, M. ve Karaşin, H., 2011, Sülfatın beton ve betonarme elemanlara olumsuz etkisi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 2 (2), 79-85.
- Eidan, J., Rasoolan, I., Rezaeian, A. ve Poorveis, D., 2019, Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating, *Construction and Building Materials*, 198, 195-206.
- Engin, Y., 2014, Çimento [online], <https://www.betonvecimento.com/cimento/cimento> [Ziyaret Tarihi: 31 Ekim 2023]

- Erdinç, M., 1995, uçucu küllü betonlarda dayanım ve klor geçirimsizliği, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Erdoğan, T., 2010, Beton, *ODTÜ Yayıncılık*, 3. Basım, 6-10, Ankara.
- Ersoy, H.Y., 2001, Kompozit malzeme, *Literatür Yayınları*, İstanbul.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G., 2012, Betonarme I, *Evrin Yayinevi*, 3. Basım, 1, İstanbul.
- Giergiczny, Z., 2013, Fly ash in cement and concrete composition, *Wydawnictwo Politechniki Slaskie, Gliwice*.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S. ve Demir, İ., 2009, Uçucu kül bölüm II: kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5 (2), 33-42.
- Holschemacher, K., Mueller, T. ve Ribakov, Y., 2010, Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete, *Materials and Design*, 31(5), 2604-2615.
- Jang, H.S., So, H.S. ve So, S., 2016, The properties of reactive powder concrete using PP fiber and pozzolanic materials at elevated temperature, *Journal of Building Engineering*, 8, 225-230.
- Karahan, O., 2006, Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Karayığit, A. ve Onocak, T., 1999, Çayırhan termik santrali uçucu küllerinden zeolit elde edilmesi, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, *YDAPÇAG-536 nolu proje*, 188.
- Kawamata, A., Mikashi, H. ve Fukuyama, H., 2003, Properties of hybrid fiber reinforced cement based composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 283-290.
- Khoury, G.A., 1992, Compressive strength of concrete at high temperatures, *Magazine of Concrete Research*, 44 (161), 291-309.
- Kocataşkın, F., 1987, Yeni gelişen beton malzemeleri, *İleri Beton Teknolojisi Ders Notları*, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Kong, D.L.Y. ve Sanjayan, J.G., 2010, Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete, *Cement and Concrete Research*, 40, 334-339.
- Kowalski, R., 2010, Mechanical properties of concrete subjected to high temperature, *ACEE 02/2010*, The Silesian University of Technology, Poland.
- Kozak, M., 2013, Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması, *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, 3(5), 26-35.

- Lau, A. ve Anson, M., 2006, Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 36, 1698-1707.
- Li, L., Shi, L., Wang, Q., Liu, Y., Dong, J., Zhang, H. ve Zhang, G., 2020, A review on the recovery of fire damaged concrete with post-fire-curing, *Construction and Building Materials*, 237, 117564.
- Li, X., Bao, Y., Wu, L., Yan, Q., Ma, H., Chen, G., ve Zhang, H., 2017, Thermal and mechanical properties of high-performance fiber-reinforced cementitious composites after exposure to high temperatures, *Construction and Building Materials*, 157, 829-838.
- Luccioni, B.M., Figueroa, M.I. ve Danesi, R.F., 2003, Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures. *Engineering Structures*, 25(6), 729-742.
- Lv, X., Yang, L., Li, J. ve Wang, F., 2022, Roles of fly ash, granulated blast-furnace slag, and silica fume in long-term resistance to external sulfate attacks at atmospheric temperature, *Cement and Concrete Composites*, 133, 104696.
- Mahsanlar, N., 2006, Yüksek sıcaklık etkisinde beton davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Mattigod, S.V., Dhanpat, R., Eary, L.E. ve Ainsworth, C.C., Geochemical factor controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: I review of the major elements, *Journal of Environmental*, 19, 188-201.
- Mehta, P.K. ve Gjörv, O.E., 1982, Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica fume, *Cement and Concrete Research*, 12(5), 587-595.
- Naik, T.R., Singh, S.S. ve Ramme, B.W., 2002, Effect of source of fly ash on abrasion resistance of concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 417-426.
- Nair, D.S., 2016, Performance of steel fiber reinforced concrete under elevated temperature, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13 (3).
- Paszetnik, M. ve Wróblewski, R., 2021, A literature review of concrete ability to sustain strength after fire exposure based on the heat accumulation factor, *Materials*, 14(16), 4719.
- Popovics, S., 1992, Concrete materials; properties, specifications and testing, *Noyes Publications*, New Jersey, USA.
- Postacıoğlu, B., 1986, Beton bağlayıcı maddeler, *Teknik Kitaplar Yayınevi*, 175, İstanbul.
- Qian, C.X. ve Stroeven, P., 2000, Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 30, 63-69.

- Shah, S.P. ve Balaguru, P.N., 1992, Fiber-reinforced cement composites, *McGraw-Hill*, Singapur.
- Skalny, J., Marchand, J. ve Odler, I., 2002, Sulfate attack on concrete, *Spon Press*, New York.
- Sua-iam, G., Sokrai, P. ve Makul, N., 2016, Novel ternary blends of type 1 portland cement, residual rice husk ash and limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 125, 1028-1034.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N. ve Yerlikaya M., 2004, Betonun performansına göre tasarımında yeni gelişmeler, Hazır Beton Kongresi, 24-57, İstanbul.
- Topçu, İ.B., 2006, Beton Teknolojisi, *Uğur Ofset A.Ş.*, Eskişehir.
- Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., 2001, Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14 (2), 11-23.
- TS EN 14889-1, 2006, Lifler – betonda kullanım için – bölüm 1: çelik lifler – tarifler özellikler ve uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 197-1, 2012, Çimento-bölüm 1: genel çimentolar – bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Türker, S. ve Balanlı, A., 1992, Yapı malzemeleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Türkmen, İ. ve Fındık, S.B., 2013, Several properties of mineral admixtured lightweight mortars at elevated temperatures, *Fire and Materials*, 37(5), 337-349.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T. ve Gençel, O., 2007, Çelik liflerin beton basınç ve eğilme özelliklerine etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13 (1), 23-30.
- Wu, H., Lin, X. ve Zhou, A., 2020, A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 135, 106117.
- Xie, J., Zhang, Z., Lu, Z. ve Sun, M., 2018, Coupling effects of silica fume and steel-fiber on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperature, *Construction and Building Materials*, 184, 752-764.
- Yazıcı, H., Termik santral atığı yapay alçı - uçucu kül – taban külü esaslı yapı malzemesi geliştirilmesi, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Yazıcı, Ş., 2017, Çelik lif boyu ve kullanım oranının çelik lifli betonun özelliklerine etkisi, 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Baku.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammet Cüneyt ALĞAN
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti

EĞİTİM

Derece	Adı, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, KONYA	2016

