

**KARBONATLAŞMANIN ÇELİK LİFLİ VE UÇUCU KÜLLÜ
BETONLARDA ETKİSİ**

Seyed Rahim BAHARAVAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2012
ANKARA**

Seyyed Rahim BAHARAVAR tarafından hazırlanan KARBONATLAŞMANIN ÇELİK LİFLİ VE UÇUCU KÜLLÜ BETONLARDA ETKİSİ adlı bu tezin Yüksek Lisans olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr.Osman ŞİMŞEK
Tez Danışmanı, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İlhami DEMİR
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Kırıkkale Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı Gazi Üniversitesi

Tarih: 28/05/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranışımı ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Seyed Rahim BAHARAVAR

KARBONATLAŞMANIN ÇELİK LİFLİ VE UÇUCU KÜLLÜ BETONLARDA ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

SEYED RAHİM BAHARAVAR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAYIS 2012**

ÖZET

Bu çalışmada uçucu külü katkılı betonlar ile normal betonlar çelik lif ile güçlendirilmiş ve betonların karbonatlaşma ve diğer özelliklerine bakılmıştır. Uçucu kül çimento ile kütlece %0, %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. 30 mm uzunluğunda ve %30 mm çapındaki çelik lif ise hacimce olarak %1 oranında betonlara ilave edilmiştir. Betonlar üzerinde birim ağırlık, işlenebilirlik, aşınma, basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı, tokluk, ultra ses hızı ve karbonatlaşma özellikleri incelenmiştir. Uçucu kül oranı tokluğa etkisi olmadı iken liflerin tokluğa önemli etkisi olduğu görülmüştür. Uçucu kül ve çelik lif karbonatlaşmada olumlu etki göstermiştir.

Bilim Kodu : 714.1.143

Anahtar Kelimeler : Çelik Lif, Uçucu Kül, Karbonatlaşma, Tokluk

Sayfa Adedi : 88

Tez Yöneticisi : Yrd.Doç.Osman ŞİMŞEK

**THE EFFECT OF FLY ASH AND STEEL FIBER ON CARBONATION
IN CONCRETE
(M.Sc. Thesis)**

SEYED RAHIM BAHARAVAR

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAY 2012**

ABSTRACT

In this study, we research some of the properties of concrete specially carbonation in those concretes which were reinforced by flyash and fiber steel. Instead of cement, fly ash to the ratio of 0%, 10%, 20%, and 30% and fiber steel by the amount of 1% of the whole concrete's weight are added to the whole concrete. The size of fiber steel is 30 mm in length and 30% mm in diameter. Testes were performed for concrete properties: unit weight, workability, compressive strength, modulus elastisity, flexral strength, toughness, spleting tensil strength, abration, capillary water absorbtion, ultrasonic velocity and carbonation. The ratio of flyash do not effect toughness but fiber steel has alot of on effects toughness. flyash and fiber steel have positive effect on carbonation.

Science Code : 714.1.143

Key Words : Steel Fiber, Fly Ash, carbonation, Toughness

Page Number : 88

Adviser : Yrd.Doç.Osman ŞİMŞEK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Yrd. Doç.Dr. Osman ŞİMŞEK, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocalarım Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU ve Yrd. Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ' a ve Prof.Dr. Metin ARSLAN' a, ayrıca LİMAK Çimento Laboratuvarında Abdullah 'a ve tüm yardım eden arkadaşlara teşekkürlerimi borç olarak takdim ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
RESİMLER LİSTESİ	viii
ÇİZELGELER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1.GİRİŞ	1
2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
2.1.Lifli Betonlar	2
2.1.1. Çelik liflerin beton üzerinde etkisi	5
2.2. Betonda kullanılan Mineral Katkılar	9
2.2.1. Silis dumanı ve betona kazandırdığı özellikler	10
2.2.2. Yüksek fırın cürufu ve betona kazandıran özellikler	12
2.2.3. Uçucu küllü betonlar.....	13
2.2.4. Uçucu külün kullanım alanları.....	21
2.2.5. Uçucu külün betonda beklenen etkileri	23
2.3. Betonda Karbonatlaşma.....	28
2.3.1. Karbonatlaşmanın araştırma nedenleri	29
2.3.2. Karbonatlaşmanın olumlu ve olumsuz etkileri	30
2.3.3. Karbonatlaşmayı etkileyen faktörler.....	31
2.3.4. PH'n değerinin karbonatlaşmada etkisi	35
2.3.5. S/Ç oranının karbonatlaşmaya etkisi	36

2.3.6. İşçilikte hatalar ve karbonatlaşmada olumsuz etkileri.....	37
3. MATERYAL VE METOD	39
3.1. Materyaller	39
3.1.1. Çimento ve özellikleri.....	39
3.1.2. Agregası ve özellikleri.....	40
3.1.3. Uçucu külün sınıfı ve özellikler.....	41
3.1.4. Çelik lifin şekil ve boyut özellikleri	42
3.1.5. Karışım suyunun özellikleri.....	43
3.2. Metod.....	43
3.2.1. Çökme (slump) metodu	46
3.2.2. Yoğunluk tayini	47
3.2.3. Basınç dayanım tayini.....	49
3.2.4. Eğilmede çekme dayanımı tayini.....	50
3.2.5. Ultra ses hızı ile beton testi.....	50
3.2.6. Aşınma deneyi	51
3.2.7. Kapiler su emme katsayı tayini.....	52
3.2.8. Statik elastisite modülü.....	52
3.2.9. Enerji yutma (Tokluk)	53
3.2.10. Karbonatlaşma	55
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR	59
4.1. Betonun Çökme Deneyi Bulguları	59
4.2. Sertleşmiş Betonun Yoğunluk Bulguları.....	61
4.3. Basınç Dayanımı Bulguları	62
4.4. Eğilmede Çekme Dayanımı Bulguları.....	64
4.5. Ultrases Hızı İle Beton Kalite Ölçüm Bulguları.....	67
4.6. Aşınma Deneyi Bulguları.....	69

4.7. Kapilar Su Emme Katsayı Bulguları	71
4.8. Statik Elastisite Modülü Bulguları	72
4.9. Enerji Yutma Kapasitesi.....	74
4.10. Örneklerde Karbonatlaşma	76
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	88

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Çelik lif tipleri.....	4
Şekil 2.2. Lifli ve lifsiz betonların 28 günlük gerilmesi-deformasyon eğrisi i	7
Şekil 2.3. Nem yüzdesinin genel betonda etkisi	32
Şekil 2.4. CO ₂ ‘nin şematik etkisi	35
Şekil 2.5. Fazla buharlaşma ve fazla kılcal delikler.....	37
Şekil 3.1. ASTM C1018 ‘e göre yük-deplasman eğrisi	54
Şekil 3.2. Değişik tuzların nem sağlama miktarları	57
Şekil 4.1. Taze betonda katkı maddesi oranı-işlenebilirlik ilişkisi	60
Şekil 4.2. Taze betonda uçucu küllü lifli betonun işlenebilirlik ilişkisi.....	60
Şekil 4.3. Betonun yoğunluk katkı ilişkisi	62
Şekil 4.4. Basınç dayanımı U_k ve çelik ilişkisi.....	63
Şekil 4.5. Örneklerin eğilme dayanımlarının gösterilişi	66
Şekil 4.6. Beton çeşitleri ve ultra ses hızı ilişkisi.....	68
Şekil 4.7. Beton çeşitleri aşınma miktarı ilişkisi.....	70
Şekil 4.8. Beton çeşitleri ve su emme ilişkisi.....	72
Şekil 4.9. Elastisite modülü grafiği.....	73
Şekil 4.10. I_{ilk} miktarının lifsiz numunelerde eğrisi.....	75
Şekil 4.11. I_{ilk} miktarının lifli numunelerde eğrisi.....	75
Şekil 4.12 Enerji yutma değerlerinin grafiği.....	76
Şekil 4.13. Karbonatlaşma değerlerinin eğrisi	77

RESİMLER LİSTESİ

Resim 2.1. Kancalı lif görüntüsü	6
Resim 2.2. Kancalı lifin beton içinde görüntüsü.....	6
Resim 2.3. Büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar.....	16
Resim 2.4. Uçucu kül taneciklerinin morfolojik yapısı	16
Resim 2.5. Termik santral	18
Resim 2.6. Uçucu kül tipleri sıra ile(a), (b) ve (c)	21
Resim 2.7. Karbonatlaşma sonucu donatı korozyonu.....	30
Resim 3.1. Kullanılan çelik lifin şekli.....	42
Resim 3.2. Tel sepetin su içinde görünümü	48
Resim 3.3. Numunenin havadaki kütlenin ölçülmesi.....	48
Resim 3.4. Silindir kalıbın görüntüsü	49
Resim 3.5. Basınç presisi.....	49
Resim 3.6. Numunelerin eğilme presindeki görüntüsü	50
Resim 3.7. Ultrasonik cihazı	51
Resim 3.8. Aşınma cihazı.....	51
Resim 3.9. Basınç makinesinde statik elastisite modülü deneğinin yapılışı	53
Resim 3.10. Deney presisi	53
Resim 3.11. Numunenin sisteme yerleşmesi.....	54
Resim 3.12. Karbonatlaşmaya bekletilen betonlar.....	56
Resim 3.13. Dikromat tuzu	56
Resim 3.14. Tankın içinde nem miktarı görüntüsü.....	57
Resim 3.15. CO ₂ tüpü	58
Resim 3.16. Karbonatlaşma tankının görüntüsü	58
Resim 4.1. Çelik lifli betonun kırılması	66

Resim 4.2. Çelik lifsiz betonun kırılması.....	66
Resim 4.3. Lifli betonların kırılma modelleri	75
Resim 4.4. betonda karbonatlaşma etkisi.....	78

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. Silikon oranına göre SiO ₂ miktarı.....	11
Çizelge 2.2. Farklı malzemelerin özgül yüzey alanları.....	11
Çizelge 2.3. Yüksek fırın cürufun kimyasal kompozisyonu%.....	13
Çizelge 2.4. Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller	15
Çizelge 2.5. F ve C sınıfların gurupları.....	19
Çizelge 2.6. Uçucu külün beton özelliklerinde etkisi	28
Çizelge 3.1. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	39
Çizelge 3.2. Agreganın karışım analizi ve yoğunluğu	40
Çizelge 3.3. Uçucu külün bileşenlerinin miktarları ve fiziksel özellikleri.....	41
Çizelge 3.4. Çelik lifin özellikleri.....	42
Çizelge 3.5. Kullanılan suyun özellikleri	43
Çizelge 3.6. Numunelerin kodlanması	44
Çizelge 3.7. 1m ³ beton için karışım miktarı	45
Çizelge 3.8. Uçucu küllü beto nların 1m ³ 'de olan malzeme miktarları.....	45
Çizelge 3.9. Deney örneklerinin cinsi ve boyutları.....	46
Çizelge 3.10. ASTM C1018 ‘de belirlenen değişim kapsamı.....	55
Çizelge 4.1. Taze beton işlenebilirlik çökme ve ters koni sonuçları.....	59
Çizelge 4.2. Lifsiz ve lifli betonların yoğunluk değerleri	61
Çizelge 4.3. 7, 28 ve 90 günlük betonların basıncı	62
Çizelge 4.4. Eğilme çekme dayanımı sonuçları	65
Çizelge 4.5. 28 günlük ultrases hızının sonuçları	67
Çizelge 4.6. Ses hızı ile beton kalitesinin tahmin edilmesi.....	68
Çizelge 4.7. 90 ve 28 günlük aşınma miktarları	69
Çizelge 4.8. 28 ve 90 günlük aşınma dayanıklılığı katsayısı	70

Çizelge 4.9. Kapiler su emme miktarları	71
Çizelge 4.10. Günlük basınç ve modül elastisite değerleri	73
Çizelge 4.11. Enerji yutma değerleri.....	74
Çizelge 4.12. Karbonatlaşma derinlikleri.....	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklama
UK	Uçucu kül
ÇL	Çelik lif
Uk₀b	Uçucu külsüz ve çelik lifsiz beton(Kontrol beton)
Uk₁₀b	%10 uçucu küllü çelik lifsiz beton
Uk₂₀b	%20 uçucu küllü çelik lifsiz beton
Uk₃₀b	%30 uçucu küllü çelik lifsiz beton
Uk₀çlb	Uçucu külsüz ,%1 beton ağırlığı çelik lifli beton
Uk₁₀çlb	%10 uçucu küllü, %1 beton ağırlığı çelik lifli beton
Uk₂₀çlb	%20 uçucu küllü,%1 beton ağırlığı çelik lifli beton
Uk₃₀çlb	%30 uçucu küllü,%1 beton ağırlığı çelik lifli beton

1.GİRİŞ

Günlük hayatın her yerinde çeşitli betonlardan yapılmış binalar, yol, depo ve su yapıları vb. rastlanmaktadır. Bu yapılarda çeşitli nedenler bozulmalara oluşur. Bu bozulmalar nedeniyle çeşitli can ve mal kayıpları meydana gelmektedir. Betonun kalitesi beton bileşenlerinin türü, kalitesi ve oranlarıyla ilişkisi var. Eğer beton bileşenlerinin kalitesi, kullandığı yere uygun ise ve oranları, tane yüzey şekilleri, taze betonun kürü iyi ise betondan beklenen özellikleri elde ederek can ve mal kaybı açısından daha güvenli bir beton üretmiş oluruz. Beton üretiminde kullanılan kimyasal ve mineral katkı maddesi betonun bazı eksik görülen özelliklerini iyileştirmesi kaçınılmazdır. Bu özellikleri iyileştirirken bazı olumsuzluklar ortaya çıktığı bilinmektedir. Günümüzde katkı maddesiz beton üretimi nerdeyse mümkün değildir. Kısaca beton tanımı şu şekilde tanımlamak mümkündür. Beton, agrega, çimento, su ve katkı maddesin belirli oranlarda karıştırılarak, plastik kıvamda döküldüğü kalıbın şeklini alan kompozit malzemedir. Betonlar yoğunluklarına, üretildiği yere basınç dayanımına, katkı maddesine, dökülmelerine uygulama yerine göre gibi birçok şekilde gruplara ayıra bilinir. Günümüzde betonların en büyük sorunlarından biri betonların eğilme mukavemetlerinin yetersizliğidir. Bunun için çeşitli boyutlarda ve cinslerde özel liflerle takviye edilir. Bu lifler içinde en yaygın kullanılan ise çelik liflerdir. Çelik lifli betonlar eğer yağmur veya açık havaya maruz kalıyorsa korozyon (paslanmak) tehlikesi ortaya çıkmaktadır. Bu olumsuzlukların etkisini araştırmak üzere bu çalışma planlanmıştır.

2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çalışmanın bu bölümünde kaynak araştırmasını, lifli beton ve mineral katkı maddesi ile üretilen beton başlıkları altında incelenmiştir.

2.1.Lifli Betonlar

Beton, yapı mühendisliğinde çok kullanılan kompleks ve rastgele dağılmış agregalardan oluşan, heterojen, gözenekli bir yapı malzemesidir. Betonun iç yüzeyinde bulunan kısmi mikro çatlaklar, betonun bozulmasına neden olacak potansiyel çatlak uçlarını görülmektedir. Bu bozulmaları önlemeye günümüzde yaygın olarak kullanılan lifler; çelik, polimer (Polipropilen, PVA), cam ve karbon esaslıdır. Liflerin betona katılması, betonun çekme ve eğilme dayanımını, duktilitesini, enerji tüketme kapasitesini, oyulma ve çarpma direncini artırmak ve çatlak gelişim karakteristiklerini azaltmak için kullanılan en etkin yöntemlerden biridir [1]. Lifli betonlarda beton bileşimine giren parametreler içerisinde beton özelliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörler; narinlik oranı (lif boyu/lif çapı) ile lif miktarıdır. Ayrıca katılan liflerin karışımda homojen olarak dağıtılması, liflerin betonun özellikleri üzerinde yapacağı iyileştirmeyi doğrudan etkilemektedir. Betonda kullanılan lifler, betonlarda oluşan çatlaklar üzerinde köprü görevi üstlenerek çatlağın büyümesini engeller [2-3].

Lifli beton üretiminde en yaygın kullanılan lif çeliktir. Bundan dolayı çalışma çelik lifli beton üzerinde araştırma yapıldığından çelik lif dışında ki lifler üzerinde durulmamıştır.

Genel olarak beton yorulma dayanımını, aşınma dayanımını, çekme dayanımı, çatlama sonrası yük taşıma dayanımını ve enerji emme kapasitesi bakımından zayıf bir malzemedir. Bu zayıf özellikleri olumlu yönde etkileme için çelik lifin betonda kullanılması yararlıdır. Çelik lifler, düşük karbonlu C 1008'den üretilmişlerdir. En belirgin özellikleri: yüksek ve üniform çekme gerilmelerine karşılık düşük uzama özellikleri en önemli nitelikleridir. Çekme gerilmeleri ortalama olarak 1200 MPa olup elastik limitleri %0.2 'nin altındadır.

Lifli beton üretiminde kullanılan çelik lifler farklı şekillerde ve en kesitlerde görülmektedir.

ACI 544'e göre, çelik lifli betonların mekanik özellikleri; lif hacmi, lifin çekme dayanımı, elastisite modülü ve lifin kenetlenme boyuna bağlıdır.

Çelik lifle donatılı betonlar, 60'lı yılların başında geliştirilmiştir. Lif tipleri üzerinde yıllar boyu süregelen araştırmalar ve uygulamalar, bu malzemeyi dünya çapında çeşitli uygulamalarda bilinen bir teknoloji haline getirmiştir. Günümüzde halen, tasarım ve hesap metotları geliştirilmektedir. Çelik lif donatılı betonlar için ilk uygulama alanlarından biri, elastik zemine oturan beton plaklar olduğu bilinmektedir. Bugün milyonlarca metrekare çelik lif donatılı zemin betonu dökülmektedir. Mikro çatlaklar arasında köprü görevini gördükleri ve gerilmeleri geniş bir alana transfer ettikleri için çelik lifler, kırılğan beton yapısını esnek ve dayanıklı hale getirmektedir. Sonuçta, gerilmelerin beton içindeki dağılımı değişmekte, yük taşıma kapasitesi belirgin bir şekilde artmaktadır. Çelik lifler kağıt zımba teli gibi birbirine yapışık durumdadır ve hiç bir zaman yapışık olarak bulunması beton karışımında, her hangi bir sorun meydana gelmemektedir. Tutkallı çelik lifler kolayca betona katılmakta ve homojen dağılmaktadır, Çelik lif donatılı betonları karakterize eden en önemli özellikleri, tokluk ve dinamik yüklere dayanımıdır. Başka bir deyişle, betonun enerji yutma kapasitesindeki büyük artıştır. Basınç ve eğilme-çekme gerilmeleri çelik liflerin rolünden ziyade beton kalitesine, tokluk ise çelik liflerin performansına bağlıdır [4].

Çelik lifli betonlar bu özelliklerinden dolayı, gümrüklerde, depolarda, sulama betonlarında, endüstriyel döşemelerde, tünel ve maden ocaklarında tavan destek kaplamalarında ve su yapılarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Betonda kullanılan çelik lifler genellikle en kesitlerine, şekillerine ve karbon oranına göre gruplandırmaktadır.

TS 10513 (1992)'e göre çelik lif sınıfları ve tipleri şu şekilde verilmektedir.

A Sınıfı: Düz, pürüzsüz yüzeyli lifler

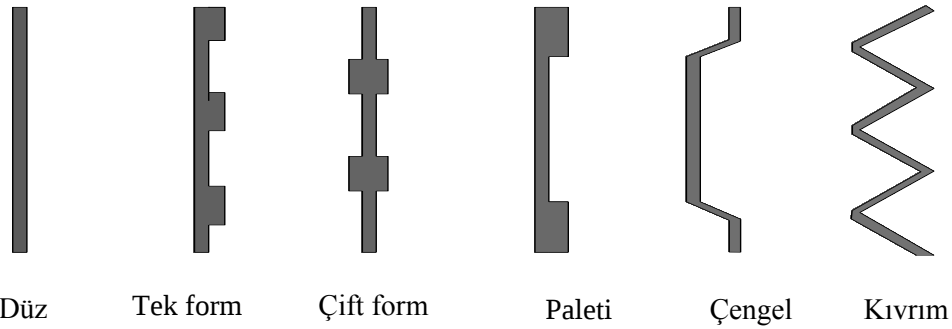
B Sınıfı: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş lifler

- Tip 1: Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış lifler
- Tip 2: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) lifler
- Tip 3: Ay biçimi dalgalı lifler

C Sınıfı: Sonu kancalı lifler

- Tip 1: İki ucu kancalı lifler
- Tip 2: Tek ucu kancalı lifler olarak gruplandırıldığı gibi bunun yanında bazı özelliklere de sahip olması gerekir.

Lifler pas, yağ ve petrolden arınmış ve temiz, çelik lifler düşük karbonlu çelikten soğuk çekme işlemi ile elde edilmiş olmalı, çekme-kopma gerilmesi ortalaması 345 N/mm^2 , her bir lif ise 310 N/mm^2 den az olmamalıdır. Çelik liflerin farklı çapları söz konusudur. Genel olarak çapları 0.13 ile 1.0 mm arasında olup uzunluk/çap oranları, 30 ile 150 arasında değişmektedir lif boyları ise 13 mm'den 70 mm'ye kadar değişebilmektedir. Çelik liflerin beton içerisindeki performansı bu malzemelerin uzunluk/çap oran, liflerin geometrik yapısı ile ilişkilidir. Dalgalanmış ve uçları bükülmüş liflerin çekme kuvvetlere etkisi ile harç fazından ayrılması düz liflere göre daha zordur [3]. TS 10513'un önerdiği lif tiplerinden farklı olarak değişik şekillerde çelik lifler bulunmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Çelik lif tipleri [3]

Çelik lifli betonun karışım esasları normal beton karışım hesabından farklıdır. Normal beton karışım hesabı TS 802 esas alınırken, lifli betonun karışım hesabı TS 10514(1992)'de göre yapılır ve bazı kriterlerde aranır. Buna göre:

- Çimento miktarı en az 320 kg/m^3 ve su/çimento oranı en çok 0.55 olmalıdır.
- Kum (0-4 mm) miktarı, toplam agrega kütlelerinin %40-%45'i olmalıdır.
- En büyük dane büyüklüğü, doğal agregalar için 28 mm, kırma taşlar için 32

mm olmalıdır. 14 mm'den büyük agrega oranı, %15-%20 ile sınırlanmalıdır.

- Betonun karakteristik basınç mukavemeti en az 20 N/mm² olmalıdır.
- Betona işlerlik sağlaması amacı ile akışkanlık verici katkıları kullanılabilir.
- Betonda bulunması gereken 0.25 mm'den küçük ince malzeme miktarı, beton üretiminde kullanılan agrega tane büyüklüğüne göre değişmektedir. Maksimum tane boyutu 16 mm olan lifli betonda 0.25 mm ince malzemeden 450kg/m³ maksimum tane boyutu 32 mm olan lifli betonda 0.25 mm ince malzemeden 400kg/m³ kullanılması önerilmektedir [5].

lif hacmi fraksiyonu betonda belirli bir yüzey alandaki, lif alanını gösteren lif hacmi de%0.5 ile %3 arasında değişmektedir [3].

Şemsi Yazıcı, Gözde İnan Sezer araştırmalarında göstermiştir ki optimum fayda hacimsel oranın %1-2 olması halinde sağlanmaktadır. Bu değerden daha az katılması halinde, normal beton özelliği üzerinde çok büyük bir olumlu gelişme sağlanmamaktadır. Daha yüksek oranda katılması durumunda ise normal betonun basınç dayanımından daha düşük bir değer elde edilmektedir. Buna en büyük etkende yüksek oranda katılmış olan liflerin karışım sırasında daha çok topaklaşmasıdır.

2.1.1. Çelik liflerin beton üzerinde etkisi

Beton, büyük basınç kuvvetlerini iyi taşıyan bir yapı malzemesidir. Betonun dayanımı, tokluğu ve birim boy değişimi, çekme etkisine karşı oldukça küçüktür. Betonda karıştırılan liflerin yapısı onun çekme özelliğine karşı açıkça görüle bilen bir düzeltme ve kullanım özelliği sağlar [6]. Özellikle, çelik liflerin betona belirli oranda karıştırılması ile elde edilen yeni betonun çekme dayanımının yanında birçok mühendislik özelliklerinde de iyileşmeler gözlenmiştir. Çelik lifler, basınç ve çekme kuvvetleri etkisi altında, liflerin çekme mukavemeti tam olarak kullanılmadan önce, beton matrisinde çok sayıda kılcal çatlakların meydana gelmesini önlemektedir. Çelik lifli beton basınç düktilitesi gösterir. Yani taşıma gücüne eriştiği halde yük taşıma özelliği vardır. Ayrıca kesme, burulma ve yorulmaya karşı mukavemeti fazladır. Çatlamlar, dökülme, parçalanma ve dağılmalar azdır. Basınç

mukavemetinde de belirli bir artış görülür. Çekme mukavemetinde ise normal betona göre oldukça önemli artışlar gözlenir [7].

Betonun çekme ve basınç mukavemetinin yanında kırılma enerjisinde oldukça önemli bir malzeme parametresidir. Çelik lifli beton, özellikle ilk kırılma yükünden sonra oldukça yüksek bir dukatilité gösterir. Bu nedenle lif oranı arttıkça kırılma enerjisi de artış kaydetmektedir. Çelik lifli betonun kesme dayanımında normal betona göre oldukça yüksek olmaktadır [8]. Bu nedenle kesme veya burulma elemanlarda kullanımı oldukça avantajlıdır. Özellikle, bina yapılarında; yüksek kirişlerde, betonarme silolarda ve deprem perdelerinde kullanımı çok anlamlı olmaktadır[9].

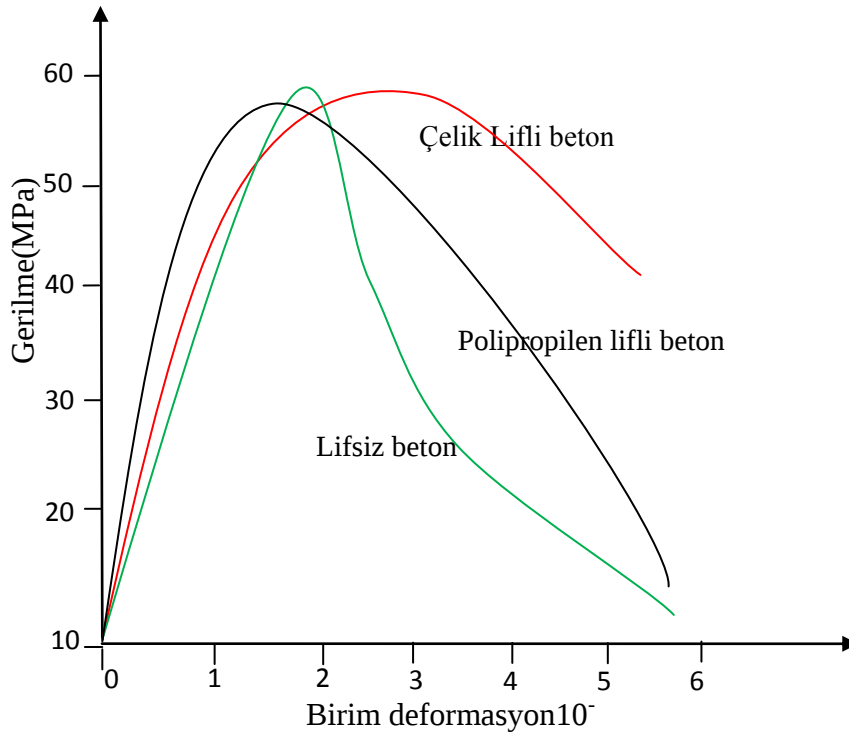


Resim 2.1. Kancalı lif görüntüsü



Resim 2.2. Kancalı lifin beton içinde görüntüsü

Çelik lifler betonda kullanım oranlarına göre basınç üzerinde değişik etkileri görünmüştür. Karışım oranı %0.1 den az olduğunda basınçta yalın betona göre fazla bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Fakat karışım oranı %0.1 den fazla ve %0.3 arasında olduğunda beton basıncında çoğunlukla olumlu ve nadiren iyi karışımlar olmadığında olumsuz etkiler görünebilir. Bu karışım oranı %0.3 den fazla olduğu zaman betonun içinde hava hapsolarak ve karışımda liflerin dik durma nedeniyle betonda basınç açısından olumsuz etkiler görünebilir [3]. Şekil 2.2’de lifli ve lifsiz betonun gerilme farkları açıkça görünebilir.



Şekil 2.2. Lifli ve lifsiz betonların 28 günlük gerilmesi-deformasyon eğrisi

Çelik liflerini kullanılan türüne bağlı olarak betonun ayrışmasında farklı etkileri vardır. Örneğin kancalı liflerin taneleri birbirine daha sıkı tutulmaları ve betonun durabilitesini artırmakta olan etkisi düz liflerde hiç bir zaman görünemez veya dalgalı çelik liflerin beton sertleştikten sonra betonun tanelerinin bir yerde tutması kesinlikle göz ardı edilemez. Çelik lif donatılı betonların karakterize eden en önemli özelliklerden biri, onun tokluğudur, başka bir deyişle, enerji yutma kapasitesidir. Tokluk, beton içindeki çelik liflerin rolüne bağlıdır ve lifli betonların işlevselliği değerlendirilirken esas alınan bir parametredir. Bu özellik çelik lifli betonun lif miktarı, narinlik oranı, lif boyu, lif geometrisi ile yükleme hızı ve numune boyutları gibi faktörlerden etkilenir. Bu sözünü ettiğimiz, enerji yutma kapasitesinin ölçümü JSCE-SF4 Japon, ASTM 1018 USA, TS 10515 standartlarında belirtilmiş ve yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanın hesaplanması ile bulunur. Betondaki lif içeriğinin artması, lif boyunun ve narinlik oranının büyümesi ile betonun tokluğu da artmaktadır[9].

Çelik liflerin beton özelliklerine etkileri maddeler halinde açıklana bilir:

Çelik lifin aşınmada etkisi

Aşınma olayı, agrega tanelerinin beton karışımında sık tutulması ve çimento ile agrega arasında iyi bir aderans olduğunda daha azdır. Yani eğer çimento dozajı az veya aksine çimento dozajı optimum miktardan çok fazla oldu ise o zaman aşınmasında etkisi daha fazladır. Bu arada çelik lifler beton içerisindeki agregaların çimentoyla adetasın artırarak aşınma süresinde agreganın çimento jelinden rahat ayrılmamasını sağlayarak beton özelliklerini olumlu etkilemektedir [3].

Çelik lifin işlenebilirliğe etkisi

Çelik liflerin aynen aşınmada olan etkisi gibi işlenebilirlikte de etkisi vardır yani özellikle çengelli lifler taneleri ortalarında tutarak işlenebilirliği azaltırlar. Çelik lifli etkisi işlenebilirlikte liflerin boyutları ve çap/uzunluğuna da bağlıdır bu oran büyüdükçe yani 60'dan fazla olduğunda işlenebilirlik daha da azalmak gösterir [3].

Çelik lifin dayanıklılığa etkisi

Tutkallı demetler halinde bulunan çelik liflerin karışım esnasında tek tek tanelere ayrılamamasından dolayı beton içerisinde dağılması sonucu betonda boşlukların oluşmasından dolayı çelik lifli betonlarda boşluk oranının artması bir gerçektir. Bu şekilde boşluklu betonlar geçirgenliği de olumsuz etkilemektedirler. Geçirgenliğin artması da çelik lifin korozyona uğramasına ya da kimyasal reaksiyonlar sonucu bozulmaları arttırabilecektir. Lifli betonlarda iyi bir karışım, iyi yerleştirme, iyi bir sıkıştırma ve iyi bir bakım sonucu çelik lifli betonlarda dayanıklılık sorunu önlenebilecektir. Çelik liflerin betonların donma-çözülme direncine etkisi önemli düzeyde değildir. Buna karşılık çelik lifler mikro çatlak oluşumunu ve yayılmasını geciktirir. Buna bağlı olarak donma-çözülme esnasında betonun göçme ve hasar görmesini yavaşlatır. Göçme modundaki bu iyileşme çelik lifin çatlak köprüleme etkisine ve çatlak tutma becerisine bağlı olmaktadır. Dolayısıyla çelik lif donatılı betonların donma-çözülme etkisinde kütle kaybı normal betonlardakine benzer olmaktadır. Çelik lifler genel olarak betonların aşınma, erozyon ve kaviteasyon dirençlerini ise arttırmaktadır [10].

2.2. Betonda kullanılan Mineral Katkılar

Çimento betonun bazı özelliklerini iyileştirmek veya betondaki kompoziteyi artırmak, çimentoya ekonomiklik kazandırmak amacıyla beton ve çimentoya uyumlu mikron boyutundaki taneli malzemelere mineral katkıları denir. Bu mineral katkıların olumlu özellikleri yanında olumsuz özellikleride var. Olumsuz özellikleri en aza indirmek için mineral katkıların özellikleri ve kullanılacağı yerin özelliği bilinmesi gerekir.

Betonda farklı amaçlarda katkıları kullanılmaktadır ve bu katkılarda farklı kaynaklardan üretilmektedirler. Bu katkıları doğal veya yapay mineral olarak tanımlanır [11].

Elde edildikleri kaynaklara göre, mineral katkı maddelerini üç grupta toplaya bilmek mümkündür:

- Doğal malzemeler(volkanik küller, traslar, diatomit ve taş unu)
- Beton üretimi ile doğrudan ilgili bir endüstri kolunda yan ürün elde edilen malzemeler(uçucu kül, silis duman ve yüksek fırın cürufu)
- Isıl işlem uygulanmış olan malzemeler (pişirilmiş kil, pişirilmiş tuğla ve kiremit tozu)

Beton katkı maddesi olarak kullanılan mineral malzemelerin mutlaka mikron boyutunda ince taneli durumda olmaları gerekmektedir [12].

Bu mineral katkıların bazıları puzolanik özellik gösterir. Bu puzolanik özellik gösteren mineral katkıları çimento ve betonda yaygın olarak kullanılmaktadır. Puzolanik katkı olarak isimlendirilen katkıları "kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silis veya silisli ve alüminli malzemeler "olarak tanımlanmaktadır [55-47].

Puzolanların yapısında büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yanı sıra, bir miktarda demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir. İnce taneli durumdaki puzolanlar, söndürülmüş kireç ve su ile birleştiğinde, bu malzemeler arasında bir takım kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır. Kalsiyum hidroksit, silis ve su arasındaki reaksiyonlar, aynen portland çimentonun hidrasyonunda olduğu gibi, hidrolik bağlayıcı özelliğine sahip kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerin oluşmasına yol açmaktadır. Bu ürün Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği "puzolanik aktivite" olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda silis+alümin+demir oksit içermesi gerekmektedir. Bu puzolanik maddelerin en yaygın olanları Sili dumanı, Yüksek fırın cürufu ve Uçucu kül dür. Bunlardan silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kısa olarak anlatılırken çalışmanın konusu olan uçucu kül üzerinde daha geniş olarak incelenmiştir.

2.2.1. Silis dumanı ve betona kazandırdığı özellikler

Silikon metalinin veya silikon metal alaşımların üretiminde yüksek saflıktaki kuvars elektrik fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Üretim işleminde çok büyük miktar SiO 'den oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO 'in fırının soğuk bölgelerinde havayla temas etmesiyle ve çok çabuk yoğunlaştırılması ile gazın içerisindeki SiO , amorf yapıya sahip SiO_2 durumuna dönüşmektedir [12].

Yüksek oranda amorf silikon dioksit içeren ve çok düzgün küresel parti küllerden meydana gelen 0.1µm civarında ölçülen ortalama çapları ile çimento tanelerinden yaklaşık 100 kere daha küçüktürler. Alışmadaki silikon miktarı arttıkça silis dumandaki SiO_2 miktarı artmaktadır. Silikon oranı %98 'e eriştiğinde ürün Ferrosilikondan çok silikon metalı olarak isimlendirilmektedir. Silis dumanının SiO_2 miktarının silikon alaşımlarının üretimiyle ilişkisi Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Silikon oranına göre SiO₂ miktarı [2]

Ferro silikon alaşım/metal	Silis duman içindeki SiO ₂ miktarı
%50 Ferrosilikon	%72-77
%75 Ferrosilikon	%84-88
%98 Silikon	%93-98

Silis dumanın önemli özelliklerinden biri özgül yüzey alanıdır. Silis dumanın özgül yüzey alanı klasik blain aleti ile ölçülemez. Ölçüm için nitrojen absorpsiyonun ‘dan yararlanılan B.E.T. yöntemi kullanılır [3].

Son derece ince olduğu benzer malzemeler ve silis dumanın karşılaştırıldığında sonuçlar Çizelge 2.2 ‘de ki gibi gözükür:

Çizelge 2.2. Farklı malzemelerin özgül yüzey alanları [3]

Malzemeler	Özgül yüzey alan(m ² /kg)	Ölçüm yöntemleri
Silis duman	20 000	Nitrojen (Azot)absorblama
Uçucu kül	400-700	Blain
Yüksek fırın cüruf	300-400	Blain
Portland çimento	350-600	Blain

Silis dumanı, portland çimentosu klinkeriyle ve küçük bir miktardaki alçıyla birlikte öğütülerek silis dumanlı çimento elde etmiş olunur ama en çok silis dumanın kullanımı betonda karışım esnasında ince agrega veya çimento yerine kısmen kullanılmaktadır.

Genellikle, beton karışımında yer alan çimento miktarı %10’a kadar azalır ve onun yerine silis duman ilave edilebilir. Silis duman ince tane olması nedeniyle çok sayıda SiO₂ içerir ve bundan dolayı nihai dayanımı yüksek olan betonlarda kullanılması yararlıdır ve söylenen fiziksel nedenden dolayı taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltır ve aşağıda belirlenmiş olan etkileri betonda yaratır:

- Betonda yüksek basınç dayanımı elde edilmesini sağlamaktadır,
- Taze betondaki terlemeyi ve ayrışmayı azaltmaktadır,

- Betonun hidratasyon ısını azaltmaktadır,
- Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır,
- Sertleşmiş betonda alkali-silika reaksiyonunu azaltmaktadır,
- Silis dumanının tane fiziklerine bağlı fazla su ihtiyacı vardır ve bunu telafi etmek için akış kandırıcı kullanmak zorundayız [13],
- Silis dumanı terlemeyi büyük oranda azaltır ama bu nedenle de perdahlaması daha da zor olmaktadır,
- Küçük taneli olup ve betonun birim ağırlığını artırma nedeniyle daha dayanımlı beton elde edilir,
- Çimento ağırlığı %7-%10 'u kadar silis duman katılarak yapılan betonlarda, priz süreleri, katkısız betondan fazla farklılık göstermemektedir [14].

2.2.2. Yüksek fırın cürufu ve betona kazandıran özellikler

Demir elde edebilmek için, demir cevherlerinin(Fe_2O_3 ve Fe_3O_4) yüksek fırın olarak adlandırılan fırınlarda çok sıcaklıklara kadar (1600°C) ısıtılmaları, böylece oksijenden ve yabancı maddelerden arındırılmaları gerekmektedir. Kok kömürünün (karbon) yakıt olarak kullanılan bu fırınlarda, ayrıca arıtma işlemine yardımcı olabilmesi için kalker taşıda cevherlerle birlikte ısınmaya tabi tutulur. Yüksek sıcaklık etkisi ile kok kömürünün karbon ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbon monoksit ve karbon dioksit gazları oluşturarak fırın bacasını terk etmektedir. Geriye kalan maddeler eriyik durumda olan CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , MnO , S ve eriyik olan demirdir. Demirin yoğunluğu fazla olmasından dolayı alta ve diğer eriyik maddelerde yukarıda toplanarak kendi kendine bir birinden ayrışarak meydana gelir. Bu yukarı tabakada toplanan silis alüminat içerikli maddeler "yüksek fırın cürufu" olarak adlanmaktadır [12].

Çizelge 2.3, Türkiye'de yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonunu gösteriyor. Bu Tabloda CaO miktarının diğer puzolanlara göre fazla olduğu dikkat çekiyor. CaO 'nun fazla olması yüksek fırın cürufun kendi kendine az olsa bile bağlayıcı olma özelliğini kazandırmıştır [36].

Çizelge 2.3. Yüksek fırın cürufun kimyasal kompozisyonu % [3]

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	S
34-31	34-36	13-19	0.3-2.5	3.5-7.0	1.0-2.5	1.0-2.0

Portland çimentosunun kalsiyum silikatlı ana bileşenleri ile su arasındaki reaksiyonlar sonucunda, hem bağlayıcılık özelliği olan kalsiyum-silika-hidrat(C-S-H)jelleri, hemde kalsiyum hidroksit oluşmaktadır. Cürufun gösterdi asıl güçlü reaksiyon, alkalili ortamda bu kalsiyum hidroksitle girdiği reaksiyonlardır ve böylece kalsiyum hidroksitleri (C-S-H) jelleri gibi çok kuvvetli bağlayıcı ürünü ortaya çıkarır.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun beton özelliklerinde olumlu ve olumsuz etkileri vardır ki bunları kısaca maddeler halinde özetlenmiştir:

- Taze betonda su emmemesi dolayı işlenebilirliği artırmaktadır,
- Taze betonun priz süresini uzatmaktadır,
- Az su emme dolayı ve prizin uzamasından, hidrasyonu ısı azalmaktadır,
- Sert malzeme olup ve terlemeyi azaltma dolayı sert betonda su geçirimsizliğini azaltmaktadır,
- Sertleşmiş betonda sülfat dayanımını artırmaktadır,
- Geç prizden dolayı kışın betonun erken donmasına yol açar,
- Betonun ilk dayanımını azaltmaktadır.

2.2.3. Uçucu küllü betonlar

En yaygın kullanılan puzolan uçucu küldür. Uçucu kül, termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül tanecikleri çok ince (0.5-150 mikron) olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadır [14].

Son yıllarda dünyada artan enerji ihtiyacı termik santrallerin yaygınlaşmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu santrallerden açığa çıkan atıkların, özellikle de uçucu külün önemli çevre sorunları yarattığı bilinmektedir. Bu atığın inşaat sektöründe, özellikle beton ve çimento üretiminde değerlendirilmesi çevresel, teknik ve ekonomik yönden büyük faydalar sağlamaktadır.

Dünyadaki uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 450 milyon tondur ancak toplam uçucu kül miktarının sadece %6'sı çimento ve beton karışımlarında puzolan olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de halen sadece kömür ile çalışan 15 tane termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallere ait bilgiler, alfabetik olarak Çizelge 2.4'de verilmiştir [15].

Termik santrallerde yakıt olarak, ülke kaynaklarına göre taş kömürü veya linyit kömürü kullanılmaktadır. Bu yüzden uçucu küller orijinlerine göre iki ana gruba ayrılırlar;

- 1) Taş kömürün uçucu külleri
- 2) Linyit kömürün uçucu külleri.

Çizelge 2.4'de görüldüğü gibi; Çatalağzı, Çolakoğlu ve Sugözü yumurtalık termik santrali haricindeki bütün santraller, linyit kömürü ile çalışmaktadır.

Türkiye'de elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının üretildiği termik santrallerde 55 milyon ton/yıl düşük kalorili linyit kömürü yakılmakta ve bunun sonucunda da bacalardan 1993 yılı verilerine göre 13.5 milyon ton/yıl, 1998 yılı verilerine göre ise yaklaşık 13 milyon ton/yıl Uçucu Kül elde edilmektedir [15]. Bu miktarın Türkiye'de daha fazla olduğu bir gerçektir.

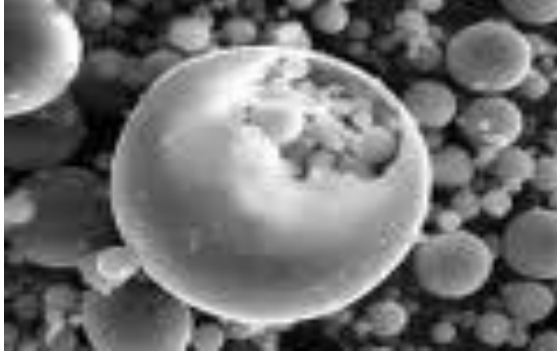
Bu miktar, A.B.D'de 45 milyon ton/yıl ve Hindistan'da 50 milyon ton/yıl dolayındadır [16].

Çizelge 2.4. Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller [17]

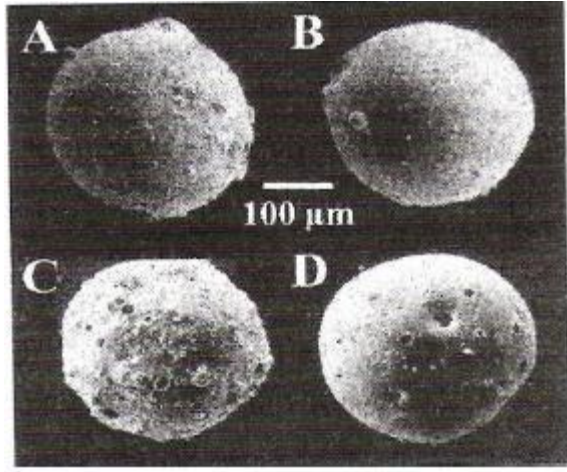
No	Santral adı	Yakıt cinsi	Kurulu güç (MW)	Bulunduğu il
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çatalağzı	Linyit	300	Zonguldak
5	Çayırhan Park	Taşkömürü	620	Ankara
6	Çolakoğlu 2	Linyit	190	Kocaeli
7	Kangal	Taşkömürü	457	Sivas
8	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
9	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
10	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
11	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
12	Sugözü- yumurtalık	Taşkömürü	1210	Adana
13	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
14	Yatağan	Linyit	630	Muğla
15	Yeniköy	Linyit	420	Muğla

Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu $2.2 - 2.7 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır [18].

Camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz küresel yapılar, boşluklu küreler ve büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar(Resim2.3), yüzeyi düzensiz dağılmış, şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıklar bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar deforme yapılar, yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi çeşitli şekiller halinde bulunabilir (Resim 2.4) .



Resim 2.3. Büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar [59]



- A) Yüzeyinde birikintiler ve sıvı damlaları olan küresel tanecik
- B) Camsı küresel tanecik
- C) Yüzeyi düzensiz boşluklar içeren tanecik
- D) Boşluklu küresel tanecik

Resim 2.4. Uçucu kül taneciklerinin morfolojik yapısı [59]

Küresel olmayan tanecikler kömürden geçen ve yanma reaksiyonlarına katılmamış mineraller, düzensiz şekilli ve gözenekli yapılardan oluşmaktadır [19].

Uçucu külün inceliği öncelikle kazana verilen kömürün öğütülme derecesine bağlıdır, inceliği etki eden ikinci faktör, küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına engel olunarak tutulmasıdır. Bacadan kaçan kısım azaldıkça incelik artar. Boyutları genellikle 0,5 ile 150 mikron arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Özgül yüzeyleri $1800 - 5000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ arasında değişmekle birlikte, ortalama $2800 - 3800 \text{ cm}^2/\text{gr}$ dolayındadır. Uçucu külün yoğunluğu, inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu $2.2 - 2.7 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır.

Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık % 5'i (hacminin % 20'si) içi boş (nitrojen veya karbon dioksitle dolu) parçacıklardan oluşmaktadır [19].

Uçucu külün granülometrik bileşiminin çoğunun 40 μm 'nin altında olması ve şeklinin de genellikle küresel olması pozolanik aktiviteye olumlu etki etmektedir. Özellikle yüzeyi pürüzsüz ince küresel tanecikler büyük yüzey alanına sahip olduğu için kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedir.

A)Uçucu külün sınıflandırılması

Kimyasal yapıları bakımından ise uçucu küller 4 ana sınıfa ayırmak mümkündür.

- Silikat-Alümina esaslı uçucu küller: Bunlar taş kömürü uçucu külleridir. Yapılarının büyük kısmını kuvars (SiO_2) ve bir miktar alümina (Al_2O_3) meydana getirmektedir. Bu uçucu küller normal sıcaklıkta ve hidrolik bağlayıcı gibi priz yaparlar.
- Silikat-Kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarındaki ana oksitler kuvars (SiO_2) ve kalsit'tir (CaCO_3). Fakat kalsit miktarı oldukça yüksektir.
- Sülfür-Kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarının büyük bir bölümünü kükürt trioksit (SO_3) ve kalsit'ten (CaCO_3) meydana gelmiştir. Bu sınıfa genellikle linyit kömürü uçucu külleri girmektedir.
- Sınıflandırılmayan uçucu küller: Termik santrallerde ki yanma sisteminin homojen olmamasından dolayı belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küllerdir. Kimyasal yapıları sürekli değişebilmektedir.



Resim 2.5. Termik santral [59]

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 (1998) ve TS EN 197-1 (2002) standartları baz alınır.

Uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerin CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu kül ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %50'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerin CaO yüzdesi %10'dan fazla olduğu için yüksek kireçli olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler [39].

F ve C sınıfı uçucu küllerin kimyasal bileşik oranları toplam olarak Çizelge 2.5'de verilmiştir. Bu tabloda uçucu küller yüksek F, düşük F, yüksek C ve düşük C olarak TS EN 197-1 de sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.5. F ve C sınıfların gurupları [47]

Bileşik	F sınıfı		C sınıfı	
	Düşük F'li	Yüksek F 'li	Düşük C'li	Yüksek C 'li
SiO ₂	46-57	42-54	25-42	46-59
Al ₂ O ₃	18-29	16.5-29	15-21	14-22
Fe ₂ O ₃	6-16	16-24	5-10	5-13
CaO	1,8-5,5	1,3-3,8	17-32	8-16
MgO	1,8-5,5	0.3-1,2	4-12,5	3,2-4,9
K ₂ O	1,9-2,8	2,1-2,7	0,3-1,6	0,6-1,1
Na ₂ O	0,2-1,1	0,2-0,9	0,8-6	1,3-4,2
SO ₃	0,4-2,9	0.5-1,8	0,4-5	0,4-2,3
Li ₂ O	0,6-4,8	1,2-5	0,1-1	0,1-2,3
TiO ₂	1-2	1-1,5	<1	<1

TS EN 197-1 (2002)'e göre uçucu küller silissi V ve kalkersi W gruplarına ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO₂) ve alüminyum oksitten (Al₂O₃) oluşan, geri kalanı demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı küller, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO₂ ve Al₂O₃'den oluşan, geri kalanı demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir [36].

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO olup, diğerleri SO₃, MgO ve alkali oksitlerdir. Ayrıca, yanmamış karbon, titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunabilmektedir.

Temel oksitler olan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO 'in miktarları, uçucu külün silissi ve kireçsi yapıda olmasına göre geniş aralıkta değişmektedir. Buna göre, uçucu külde SiO_2 %25-60, Fe_2O_3 %10-30, Al_2O_3 %1-15 olarak ve CaO %1-40 değerleri arasında bulunmaktadır.

Diğer oksitlerden MgO en fazla %5, alkali oksitler ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) %5'in altında bulunmaktadır. SO_3 genellikle %0.2-2.5 arasında değişmekle birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre %10'a kadar yükselmektedir.

Kızdırma kaybı esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozunması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO kaybını da içine almaktadır. Kızdırma kaybı %1-10 arasında değişmektedir.

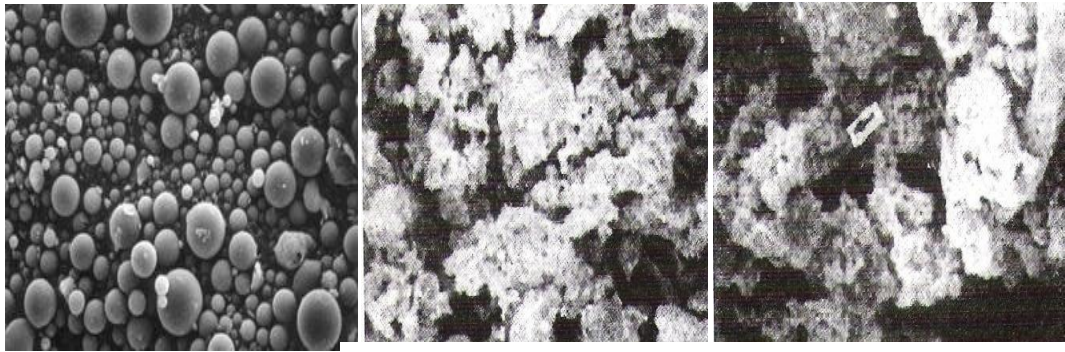
Yüksek kireçli külde ise aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camısı fazının yanı sıra aktif kristalize fazlardır. Burada saf silika camı, Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Bu faz bir bakıma cüruftaki yapıya da benzemektedir. %20'nin üzerinde CaO içeren küllerde kalsiyum Alüminat camısı fazı $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ bileşimindedir. Yüksek kireçli külün camısı ve kristalize fazları külün puzolanik özelliğin yanı sıra kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır.

Yüksek kireçli küllerde mikroyapı içinde hem küresel hem de köşeli düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda resim 2.6'da görüldüğü homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de düşük kireçli küller kadar düzgün değildir [20].

Düşük kireçli uçucu küldeki yüksek silisli camısı faz genellikle kalsiyum, alkali ve hidroksit ilavesi halinde yavaş olarak reaksiyona girerken yüksek kireçli küldeki kalsiyum alumino silikat camısı fazı su ile reaksiyona girerek bağlayıcı fazları oluşturur. Bu nedenle yüksek kireçli uçucu külün camısı fazının düşük kireçliden daha az ancak daha reaktif olduğu bilinmektedir.

Düşük kireçli küllerde çoğunlukla camsı faza karşılık gelen içi boşluksuz tam küresel tanecikler ve bunun yanı sıra senosfer ve plerosferler bulunmakta olup; bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen olan mikroyapıya sahiptirler.

Buna bağlı olarak yüksek kireçli külün aktivitesinde kristalize aktif fazla ve az camsı faz rol oynamakta, düşük kireçli de ise taneciklerin şekli büyüklük dağılımı ve camsı fazın fazlalığı önem taşımaktadır [20].



(a) Yüksek silisli uçucu (b) Yüksek kireçli uçucu kül (c) Düşük kireçli uçucu kül

Resim 2.6. Uçucu kül tipleri sıra ile (a) (b) ve (c) [59]

2.2.4. Uçucu külün kullanım alanları

Uçucu küller dünyada çimento ve beton olarak baraj duvarları köprü ayakları, maden ve diğer yapıların dolgu enjeksiyonlarında ve diğer pek çok inşaat yapılarında tarımda çatı bahçesi ve ağaçlandırma çalışmalarında, agrega olarak otoyol köprü yol ve briket yapımında, endüstride hatıl mineral dolgu maddesi asfalt içinde dolgu maddesi, yol kanallarında kullanılmaktadır Örneğin Frankfurt'ta 163 m yükseklikteki Castor ve Pollux gökdelenleri ile Madrid'le 171 m yükseklikteki Picasso gökdeleninin değişik bölümlerinde %20 ile %40 arasında, Lizbon'da Caixa Gérai Deposite bankasının binasında. Danimarka'da Great Bell East köprüsünün yapımında, Finlandiya'da Permantokoski hidroelektrik santrali yapımında, Fransa'da Puylaurent barajında, Hollanda'da Eindhoven Havaalanı "uçuş pistinde", Avusturya'da yeraltı tren yolu tünellerinde ve İtalya'da yerüstü elektrik direkleri yapımında, İskoçya'da Tornes Nükleer Enerji Santrali yapımında, İngiltere'de denize yapılmış, B P 'ye ait 570,000 varil ham petrol depolama kapasitesine sahip yapıda, Belçika'da 43 ve 60 m yükseklikteki 4 adet uçucu kül depolama kulelerinin

yapımında ve İngiltere ile Fransa'yı birbirine bağlayan ve 100 yıllık kullanım için dizayn edilen hızlı tren hattının tünel inşaatında uçucu kül kullanılmıştır [21].

Uçucu küller kimyasal, mineralojik, fiziksel ve puzolanik özellikleri sebebiyle inşaat sektörü tarafından pek çok alanda kullanılmaktadır. Uçucu külün kullanım alanlarını aşağıdaki başlıklar altında sıralamak mümkündür [22].

Yol ve uçuş pistlerinde

Yol yapımı ve geoteknik uygulamalarında uçucu küller, dolguların stabilizasyonunda, altyapı ve taban malzemesi olarak, alt drenaj tabakası olarak ve zemin enjeksiyonlarında kireçle birlikte kullanılmaktadır. Ayrıca yol alt tabakalarında, çok düşük çimento dozajı ile hiç çökme vermeyen ve titreşimli yol silindirlerini taşıyacak kadar kuru ve bu araçlarla sıkıştırıldıklarında alt tabakalara yapışacak kadar nemlenen silindirle sıkıştırılmış beton kullanılmaktadır. Bu betonlarda bağlayıcı dozajı seçilen yapım sistemine göre 100- 150 kg/m³ ten başlamaktadır. Bağlayıcı içindeki puzolan yüzdesi ise yine yapım sistemine göre %20-%80 arasında değişebilmektedir. Puzolan olarak özellikle uçucu kül kullanılmaktadır [29].

Uçucu külün hava alanı uçuş pistlerinde kullanımının nedeni onun ince taneli olması nedeni ile betonun dolgunluluğunu arttırmak ve su/çimento oranını fiziksel özelliklerine bağlı azaltıp ve beton direncini donma çözülme ve aşınmaya karşı takviye etmesidir.

Konu ile ilgili çalışmaların A.B.D.'de 1930'lu yıllarda başladığı görülmektedir. İlk defa UK, 1938 yılında A.B.D.'nin Chicago şehrinde bir yol inşaatında çimentoya karıştırılarak kullanılmıştır [17].

Barajlar ve iskeleler

Uçucu külün ilk barajlarda kullanımı 1945 yıllarında USA 'da olan barajlardan başlamıştır. Barajlar ve iskeleler zaman zamana su ile karşı karşıya ve dalgalar vasıtası ile darbe ve aşınmaya maruz kalan yapılarıdır, bu yüzden uçucu kül

kullanması kendi fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak bu yapıda kullanılan betonları bu afetlere karşı daha dayanıklı ve uzun ömürlü yapar.

Sulama kanalları ve borular

Uçucu küllerin kullanım alanlarından biride sulama kanalları ve borulardır. Sulama kanalları ve su borularında uçucu küle beraber çelik liflerin kullanılması betonun dayanımı artıp ve su geçirimsizliğini artırarak betona daha uzun ömür ve kendi kimyasal özelliklerine dayanarak sülfattı ve alkali ortamlarda betonun daha iyi bir performans göstermesinde yardımcı olan malzemedir.

2.2.5. Uçucu külün betonda beklenen etkileri

Uçucu külün betonda kullanım oranı, betonun özellikleri ile doğrudan bir ilişkisi var. Bu nedenle uçucu külün betonda olan etkisi uçucu külün oranına ve kullanılan agrega, su ve diğer malzemelere bağlıdır. Ama genelde önceki çalışmalara göre genel olarak uçucu külün beton üzerinde bazı etkilerini aşağıdaki gibi olabilir diye göz önüne alabiliriz:

Terleme, hava sürüklenme, ayrışma

Uçucu küllerin ince ve küresel taneciklerden meydana gelmesi kuma ve ayrışmayı azaltan bir faktördür. Agregalar arasına yerleşen Uçucu kül tanecikleri kuma kanallarının daralmasına neden olarak bu etkiyi yaratırlar [23].

Beton üretiminde Uçucu kül kullanımı, kanamayı ve ayrışmayı azaltmaktadır [24].

Betonun işlenebilirliği ve su ihtiyacı

Genellikle, çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül konularak kullanılması betonun su ihtiyacını, uçucu külsüz olarak üretilecek betona göre aynı slump değeri için azaltmaktadır. Uçucu külün su ihtiyacını azaltmaktaki rolü esas olarak inceliğine dayanmaktadır. İnceliğin artması su ihtiyacını artırırken, küresel şekillenmiş olan taneler içsel sürtünmeyi azaltmaktadır, dolayısıyla su ihtiyacında azalma olmaktadır. Bu nedenle beton karışım oranları su ihtiyacı üzerinde etkin rol oynar. Uçucu külün puzolanik reaksiyonundan yararlanarak çimento miktarı azaltılarak ve uçucu küllü

betonlarda uçucu külsüz betonla aynı slump değerini elde etmek için su-çimento oranı azaltılır. Diğer taraftan uçucu kül ince agreganın yerine kısmi yerleşim yapılırsa su ihtiyacı yüksek olabilir. Uçucu külün kullanımı bağlayıcı hamurun hacmini arttırır. Uçucu kül çimentonun kısmi bir yer değişimi ağırlık bazında yapıldığında, uçucu külün yoğunluğu çimentodan az olduğundan, yer değişimde bağlayıcı maddenin hacminde bir artış olmaktadır. Boşlukların yeterli miktarda bağlayıcı hamuru ile doldurulması sonucu yapışkanlık, plastiklik ve agrega tanelerinin kayganlığı sağlanır. Uçucu küllerin inceliği ve tanelerinin küresel olması işlenebilme üzerinde faydalı etkilere sahiptir. Küresel şekil agregalar arasındaki sürtünmeyi bilyalı yatak etkisi ile azaltmakta ve betonun daha rahat hareket etmesini sağlamaktadır. İnce taneler boşlukların daha iyi dolmasını sağlar ve perdahlanmayı kolaylaştırır. Aynı zamanda uçucu külün tanelerinin küresel şekli, agregalar arasındaki sürtünmeyi azaltır, dolayısıyla beton ve pompa hattındaki sürtünmeyi azalttığından betonun pompalanabilirliğini arttırmaktadır.

Taze betonda priz suresi

Uçucu küllü beton, diğer bütün puzolanik betonlar gibi, daha uzun priz zamanına sahiptir. Uçucu külün priz zamanı üzerindeki etkisi uçucu külün karakteristiklerine ve kullanıldığı miktara bağlıdır. Uçucu kül betonlarının priz zamanının normal betona göre daha uzun olmasından dolayı, bu tür betonun bitirilmesi normal betona göre daha geç yapılmalıdır. Priz süresinin fazla olması ilk dayanımı etkileyen C_3A miktarının uçucu külde çok az olup ve betonda bu ana bileşenin oranı düşürmesidir [25].

Betonun hidrasyonunda etkisi

Uçucu kül ve portland çimentosunun hidrasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasındaki kimyasal reaksiyon, çimentonun hidrasyonu işleminden daha yavaş bir işlemdir. Bu durum daha yavaş ısı oluşmasına ve beton içinde daha az iç gerilmeye ve daha az rötreye sebep olur. Uçucu külün bu özelliği onun özellikle

baraj yapılarında kütle betonlarında ortaya çıkan yüksek ısıları kontrol etmede kullanılır.

Betonda donma çözülme dayanımında etkisi

Karışımındaki Uçucu Kül miktarının artması ile daha çok hava sürükleyici katkıya ihtiyaç duyulmaktadır [26].

Uçucu Kül kullanımı, hava sürükleyici katkı kullanılmadıkça donma-çözülme direncini azaltmaktadır. Bununla birlikte Uçucu Kül betonlarında sadece %1'lik hava sürükleyici katkısının kullanılması, kontrol betona göre çok üstün performans göstermektedir. Dayanımlar sabit tutulduğunda Uçucu Küllü betonun donma-çözülme dayanımı, Portland Çimento'lu beton ile benzer olmaktadır [27].

%20, %25 ve %30 Uçucu Kül içeren beton kirişleri 14 gün ıslak olarak kür ettikten sonra donma-çözölmeye maruz bırakmışlar ve Uçucu Kül miktarının artmasıyla donma-çözölme dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir [28].

Eğilme ve basınç dayanımı

Betonun basınca olan yüksek dayanımına rağmen su geçirimsizlik açısından aynı özelliği göstermediği belirlenmektedir. Bu zayıf özelliği ortadan kaldırmak veya azaltmak için beton çeşitli mineral katkı maddesi ile değişik oranlarda katılarak iyileştirme araştırmaları devam etmektedir. Bu malzemelerin en önemlisi uçucu küldür. Yapılan çalışmalara göre uçucu küllü betonlarda su emme daha az ve ilerledi yaşlarda dayanım ve betonun kimyasal etkilere ve direnci gibi özellikleri de olumlu yönde artış göstermektedir [3].

Uçucu küllü betonun geçirgenliği genelde Uçucu külsüz olarak yapılan betonun geçirgenliğinden daha düşüktür. Geçirgenliğin böyle düşük olmasının nedeni uçucu kül ile çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasındaki pozolanik reaksiyon sonucu ortaya çıkan ilave C-S-H jelleridir. Bu jeller kapiler boşlukları azaltmaktadır [29].

Uçucu kül içeren ve düşük su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan karışımlar yüksek su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan karışımlara göre daha iyi dayanım göstermektedir. Ayrıca beton karışımlarda Uçucu külün dayanıma olan katkısı harç karışımlara göre daha iyi olmaktadır. Uçucu küllü betonun erken yaşlarda nispeten zayıf karakteristiklere sahip olduğunu fakat uzun dönemde silis dumanlı betonun dayanım ve taşıma karakteristiklerine ulaştığını söylemektedirler. Çimentonun, Uçucu kül ile %50 ve %70 gibi yüksek oranlarda ağırlıkça yer değiştirmiş olmasına rağmen, silindirle sıkıştırılabilen betonlara ait çekme ve basınç dayanımlarının oldukça yüksek çıktığını nedeninin ise, su bağlayıcı malzeme oranlarının oldukça düşük olması ve kompasitenin bu su bağlayıcı malzeme oranlarında maksimum değerine ulaşmasından kaynaklandığını belirtmektedir. Katkı maddesi olarak Uçucu küllerin kullanılmasının beton dayanımına etkileri, ince taneli doğal puzolan etkisine benzemektedir. Normal olarak, ilk zamanlarda, Uçucu küllü betonun dayanımı katkısız beton dayanımına kıyasla birazcık daha az olmaktadır. Ancak nihai dayanım oldukça yüksektir. İlk günlerdeki dayanım artışı, Uçucu külün inceliğine ve tipine göre değişiklik göstermektedir [3].

Sülfat ve diğer zararlı kimyasallara karşı dayanıklılık

Uçucu kül içeren betonların sülfat dirençlerini etkileyen faktörler Uçucu kül içermeyen betonlar ile aynı olmaktadır. En önemli faktörler, maruz kaldığı sülfat, su/bağlayıcı oranı, kür koşulları ve permeabilite dayanımıdır. Genel olarak F sınıfı Uçucu külün permeabilitesi daha düşük olduğu için, betonun sülfat direncini arttırmaktadır.

%1'lik hidroklorik asit, sülfirik asit ve nitrik asit çözeltilerinde 28 gün bekletilen Uçucu küllü, meta kaolinli ve silis dumanlı harçların pek etkilenmediğini fakat aynı harçların %5'lik sülfirik asit, asetik asit ve fosforik asit gibi daha yüksek konsantrasyonlu asitlere maruz kaldıklarında, kötü performans gösterdiklerini belirtmektedirler. Katkı miktarlarının %0-10 arasında kullanılmasıyla kimyasal dayanımının arttığını fakat %15-30 arasında kullanıldığında kimyasal dayanımın

azaldığını ve buna karşı olarak su/bağlayıcı oranı 0.36'da 0.40'a yükseldiğinde ise kimyasal dayanımın arttığını ileri sürmektedirler.

Uçucu kül inceliğinin harçların su ihtiyacına ve bazı özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Sodyum sülfat çözeltisine maruz ince Uçucu kül içeren harç çubuklarının genleşmesinde azalma olduğunu ve harçların su/bağlayıcı oranlarını azalttığını, dolayısıyla harçların daha sıkı ve daha dayanımlı olmalarına neden olduğunu söylemektedirler. Kaba Uçucu küllerin kullanılmasıyla ve harçların su/bağlayıcı oranlarının oldukça yüksek tutulmasıyla genleşmede artma meydana getireceğini bildirmektedirler. İnce ve kaba Uçucu küllerin sülfirik asit direncinde de önemli artış gösterdiğini fakat yüzeyi pürüzlü kaba taneciklerin çimento hamuruna daha iyi yapışması nedeniyle, kaba Uçucu küllerin daha iyi dayanım gösterdiğini ifade etmişlerdir [30].

Betonda 28 günden önce ve sonraki etkisi

Puzolanların yukarıda söylendiği gibi piriz ve ilk dayanımı azaltma nedeni ile asıl etkisini zaman ilerledikçe göre biliriz ve bu özellikte tüm puzolanlar ortaklırlar. Bu nedenle uçucu külün 28 gün ve sonrasında beton özelliklerin daha fazla etkilemesini bekleriz. Çizelge 2.6 uçucu külün tüm etkilerini toplam olarak yansıtmaktadır[3]:

Çizelge 2.6. Uçucu Külün Beton Özelliklerinde Etkisi [3]

Beton özelliği	Etkisi
Taze beton su ihtiyacını	Azaltır
Taze betonda tane ayrışmasını	Azaltır
Taze betonda işlenebilirliği	Artırır
Taze betonda piriz süresini	Artırır
Taze betonda terlemeyi	Azaltır
Sertleşmiş betonda erken dayanımı	Azaltır
Sertleşmiş betonda su geçirgenliği	Azaltır
Alkali agrega reaksiyonu	Azaltır
Sülfat direncini	Artırır

Uçucu külün karbonatlaşmada beklenen etkisi

Betondaki karbonatlaşma derinliğinin Uçucu kül miktarının artmasıyla arttığını, her %10'luk Uçucu kül miktarı artışının karbonatlaşma derinliğinde yaklaşık 0.3 mm'lik bir artışa sebep olduğunu belirtmektedirler. Maksimum karbonatlaşma miktarının 2 mm olduğunu ve %40 Uçucu kül içeren betona ait olduğunu söylemektedir. Karbonatlaşma mevcut kireç ve permeabilitenin karmaşık bir fonksiyonudur[34].

Uygun dizayn edilen ve iyi kür edilip, iyi sıkıştırılmış Uçucu kül ikameli betonların karbonatlaşması diğer tip betonlardan çok farklı değildir [27].

Kuru kür ve ıslak kür ortamlarında, %70 Uçucu kül içeren betonun, %50 Uçucu kül içeren betona ve normal portland çimentolu betona göre karbonatlaşma miktarının daha fazla olduğunu belirtmektedir. Yine her iki kür ortamında %50 Uçucu kül içeren betonun normal portland çimentolu betona göre daha az karbonatlaşma yaptığını söylemektedir. Bu çalışmada karbonatlaşma araştırmanın önemli bir konusu olduğu için geniş olarak ayrı bir başlık altında incelenecektir.

2.3. Betonda Karbonatlaşma

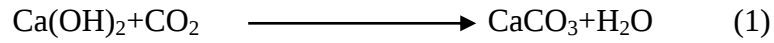
Çimento klinkerinin ana bileşenleri trikalsiyum silikat (C_3S), dikalsiyum silikat (C_2S) gibi silikatlar ile trikalsiyum alüminat (C_3A), tetrakalsiyum alüminoferrit (C_4AF) gibi alüminatlardır. Çimento içinde bu ana bileşenlerden başka belirli oranlarda CaO , MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O gibi oksitler de bulunur. Silikatların ve alüminatların su ile birleşmesi sonucu silikat hidratlar ($C-S-H$) ve alüminat hidratlar ($C-A-H$) meydana gelir. Silikatların hidratasyonundan ayrıca ($C-H$) açığa çıkar, bu serbest kireç baz ortam oluşturarak betonarme elemanlarda donatıyı korozyona karşı korur. Serbest kireç havanın CO_2 etkisi ile betonun hava ile temas eden yüzeyinden başlayarak karbonatlaşır, beton yüzey sertliği artar ve suda çözünmez hale gelir. Karbonatlaşmamış bölgelerdeki serbest kireç su ile karşılaştığında erir ve yeri boşluk kalır, betonun dayanımı düşer, dayanıklılığı azalır. Basit tarifle alkalin birleşimi sayesinde betonarme donatılarını korozyondan koruyan beton, zamanla karbonatlaşarak bu niteliğini kaybeder.

Alkali nitenin kaybolmasına neden, çimento hidratasyon ürünlerinin ve özellikle $Ca(OH)_2$ 'nin havanın CO_2 gazı ile birleşerek nötr bir tuz olan $CaCO_3$ 'e

dönüşmesidir ve olgu betonarme yapı elemanlarının servis ömrünü etkileyen bir faktördür [31].

Diğer bir tanımla bakmış olursak; betonun içerisindeki çimentonun hidratasyon sonucunda ortaya çıkmış olan ve çimento hamurunun yapısında yer alan, kalsiyum hidroksitin bir kısmı beton içerisine sızan sular tarafından çözünmektedir. Kalsiyum hidroksit eriği içeren sular, kapiler hareketle, beton yüzeyine veya yüzeye yakın bölgelere hareket etmektedir [12].

Kalsiyum hidroksitin havadaki karbon dioksit ile temas etmesi sonucunda kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşmakta ve ayrıca bir miktar su açığa çıkarmaktadır. Bu reaksiyon 1. formülle gösterir ve ayrıca burada bulunan suyun kuruduğu zaman betonda karbonatlaşma büzülmesi meydana çıkarak çatlamaya neden olur ve karbonatlaşmanın hızlanmasını sağlar [12].



2.3.1. Karbonatlaşmanın araştırma nedenleri

Karbonatlaşma veya bazı kaynaklarda beton kanseri diye geçen olay beton ve betonarme yapılarda bazı sorunlar meydana çıkarmaktadır. Bu sorunlar bazen gözle görünmediği için veya çok yavaş ilerlediği için zarara sebep olmadan önce fark etmesi çok zordur. Mesela bir kolonun depremde aniden kırılmasının nedeni karbonatlaşma olabilir. Çünkü beton karbonatlandığı zaman su ve oksijen daha rahat betonun içine girerek donatıların korozyona (pasa) maruz kalmasını sağlar ve böylece dışarıdan gelen doğal afet(deprem, rüzgâr...) veya kaza olarak araba çarpması ve diğer olaylardan gelen yüklerle donatı kırılarak kolon ve dolayısı ile binaya zarar verir.

Betonda karbonatlaşma olmasının beton özelliklerine olumsuz etkileri vardır. Öte yandan, karbonatlaşma olayı, çok az da olsa, betona bazı yararlar sağlanmaktadır.



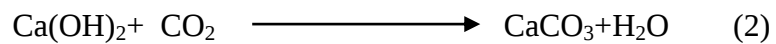
Resim 2.7. Karbonatlaşma sonucu donatı korozyonu [59]

2.3.2. Karbonatlaşmanın olumlu ve olumsuz etkiler

Karbonatlaşmanın beton üzerinde farklı etkileri vardır. Bu etkiler çok az olsa bile bazen betona yararda bulunmaktadır. Karbonatlaşma olayının olumlu etkileri şu şekilde sıralanabilir:

- Beton dayanımında çok az artış meydana gelmektedir. Bunun nedeni, karbonatlaşma olayı sonunda bir miktar suyun serbest kalmasıdır. Serbest kalan su, çimentoda yer alan hidratasyona yardımcı olmaktadır.

Karbonatlaşma nedeniyle oluşan CaCO_3 kristalleri, çimento hamurundaki kapiler boşlukların içerisine yerleştikleri için, beton nispeten daha geçirimsiz olabilmektedir [12].



2 numaralı formülde görüldüğü gibi çimentoda yer alan kalsiyum hidroksitin yapısındaki su açığa çıkarak buharlaşma veya benzeri nedenlerle Kayıp olmaktadır. Bünyedeki suyun bir bölümünü bu şekilde kaybeden çimento ister istemez bir miktar büzülme göstermektedir, bu büzülme karbonatlaşma büzülmesi olarak adlanır [32].

Karbonatlaşma olayını gerçekleşmesi için karbon dioksitin beton boşluklarında bulunan doygun kireç çözeltisine kadar difüzlenmesi gerekir. Yüzeye yakın olan bölgede belli kalınlıkta bir karbonat tabakası meydana geldikten sonra CO₂ beton içine girmesi zorlaşır ve böylece karbonatlaşma hızı yavaşlar. Karbonatlaşma sonucu oluşan kalsiyum karbonat beton boşluklarında çökerek poroziteyi azaltır. Bu nedenle az miktardaki karbonatlaşmanın beton dayanımı üzerinde olumlu etkisi vardır [33].

Yukarıda söylenen olumlu etkilere rağmen karbonatlaşmanın betonda olan olumsuz etkisi olumlu etkisinden daha önemlidir ve zararı yararından fazladır. Karbonatlaşmada olan olumsuz etkiler şu şekilde sıralanır:

- Karbonatlaşma sonucunda sertleşmiş çimento hamuru büzülme göstermektedir, dolayısı ile betonda çatlaklar oluşmaktadır.
- Karbonatlaşma sonucunda, kalsiyum hidroksitin çözünmesi nedeniyle, betonun içerisindeki mevcut olan alkalın ortam daha düşük seviyeye inmektedir.

Alkali nitenin azalması ile betonda karbonatlaşmanın yer aldığı bölgelerdeki betonarme demirlerinin korozyonu daha hızlı olabilmektedir [12].

2.3.3. Karbonatlaşmayı etkileyen faktörler

Betonda karbonatlaşmayı etkileyen iç ve dış faktörler vardır. Bu faktörler kimyasal veya fiziksel olarak ikiye ayrılır. Bu nedenlerden bir kaçını aşağıdaki şekilde gösterebiliriz:

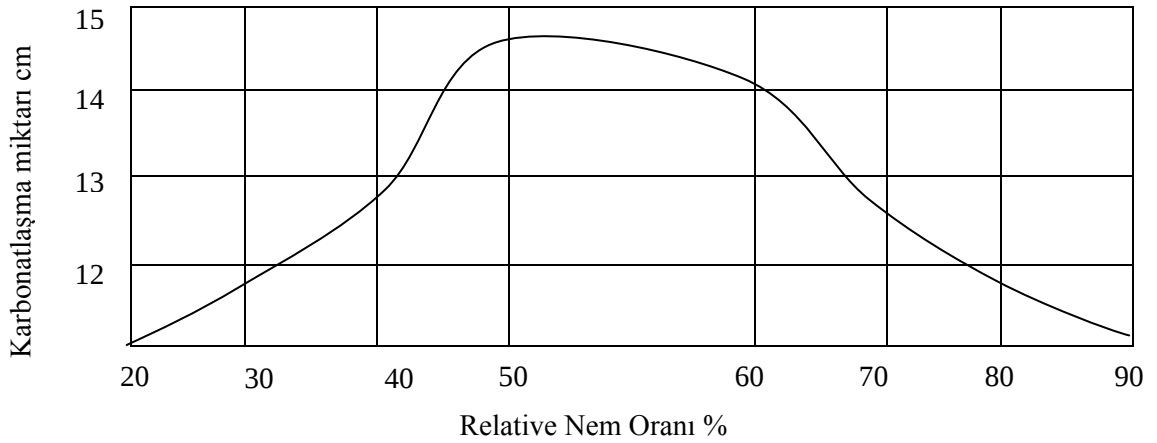
- a) Havada olan nem yüzdesi
- b) Beton porozitesi
- c) Su çimento oranıdır.

Eğer nem oranı %25 den az oldu ise CO₂ gazının betona girme olasılığı yoktur çünkü nem oranı %25den az olduğu zaman nemin CO₂ gazını kendi içinde eritmeye yeterli olmaz ve bu nedenle CO₂ de betonun içine nüfuz edemez. Bunun tam tersine eğer relativ nem %90'dan fazla oldu ise karbonatlaşma görünmemektedir. Bunun nedeni

ise nemin yüzdesi fazla olduğu zaman karbonatlaşmaya gereken faktörlerinin birinin ortadan kalkmasıdır, bu faktör CO_2 faktörüdür. Nem oranı %90'dan fazla ise CO_2 betonun içine nüfuz edemez çünkü beton içerisindeki boşluklar su ile doludur [34].

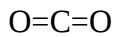
Karbonatlaşma için en iyi nem oranı önceki çalışmalara göre %50 ile %60 arasındadır [25].

Bu miktar nem betonun hızlandırılma deneylerinde kullanıla bilir orandır. En iyi nem yüzdesi dediğimizde amacımız karbonatlaşmanın fazla görüldüğü yüzde demektir.



Şekil 2.3. Nem yüzdesinin genel betonda etkisi [35]

Karbondioksit, normal şartlar altında renksiz, kokusuz ve düşük konsantrasyonlarda tatsız bir gazdır. CO_2 sembolü ile gösterilir. Bir Karbon, iki Oksijen atomunun bir araya gelmesinden oluşur:



Karbonik asit

Su ile birleşmesinden zayıf bir asit olan, karbonik asit (H_2CO_3) oluşur. Genellikle karbonik asitten bahsedildiğinde, bu terim doğru olmasa da, bu hafif asitten ziyade CO_2 nin kendisi kastedilir.

CO₂'nin faz durumu CO₂, mevcut basınç ve sıcaklığa bağlı olarak 3 şekilde bulunur:

1. Katı

Uygun basınç ve sıcaklık sağlandığında karbondioksit sıvı fazda bulunur. Ancak CO₂ atmosferik basınçta *SIVI* halde bulunamaz.

CO₂, kritik nokta sıcaklığının altında (31°C) ve Üçlü noktanın üstünde (-56,6°C ve 5,18 bar basınç) sıvı halde bulunur.

Kritik Nokta Özellikleri:

Kritik Sıcaklık: 31°C

Kritik Basınç: 73,825 bar

Kritik Yoğunluk: 464 kg/m³

Kritik sıcaklık ve basıncın üzerinde, gaz halinden sıvı haline dönüştürmek imkânsız hale gelir. Sıvı hali CO₂ nin depolanmasında ve taşınmasında, ayrıca soğutma ve dondurma işlemlerinde önem taşır. Sıvı haldeyken basınç serbest bırakılırsa, gaz ve katkı Karbondioksit oluşur ve -79°C sıcaklığa erişir. Bu durum sıvı CO₂ nin basıncının ortadan kaldırılması sonucu çevreden soğurduğu buharlaşma ısısı ile bağlantılıdır [56].

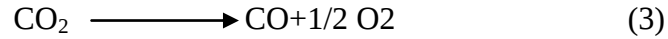
2. Sıvı

Sıvı haldeyken atmosferik basınca püskürtüldüğünde, CO₂ sıvı fazdan gaz fazına atlamak için gerekli enerjiyi kendinden alır ve kendini dondurarak kuru buzu oluşturur. Bu sırada oluşan Katı Karbondioksit; ticari adı olan **KURUBUZ** olarak ta bilinir.

Üçlü Noktanın altında (5.18 bar ve -56,6 C) CO₂ yalnız katı ve gaz halinde bulunur. Kar blok ya da granül şeklinde preslenir. İzolasyonlu kaplarda depolanır ve taşınır.

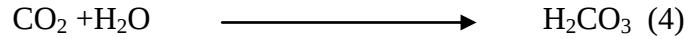
3. Gaz

CO₂ kritik noktanın üstünde gaz halinde bulunur. CO₂ gazı, dengeli bir moleküler yapıya sahiptir ve reaksiyona zor girer. Ancak yaklaşık 1700 °C den sonra %2 oranında 3. formüldeki Şekilde ayrışır ve difüzyon başlar, Bu nedenle inert gaz olarak birçok endüstride kullanım olanağı bulur.

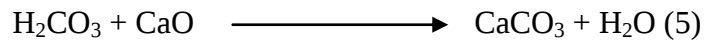


CO₂ gazının önde gelen özelliklerinden biri, yoğunluğunun normal şartlarda (1013 mbar, 0°C) 2 kg/m³ olmasıdır. Ayrıca daha evvel moleküler ağırlığının 44 olduğundan da bahsetmiştik. Bu durumda CO₂ havadan 1.5 kat daha ağırdır.

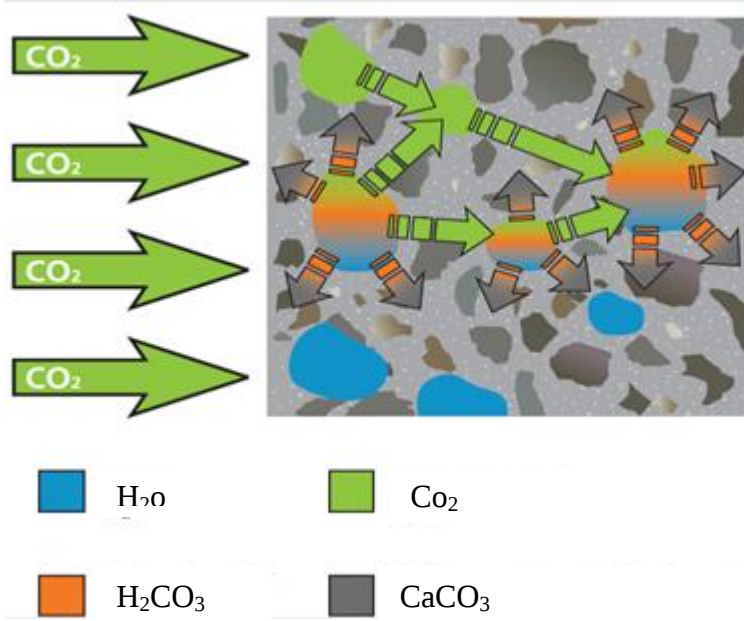
Karbonatlaşma prosesi CO₂ gazının betona nüfuz etmesi ve reaksiyonlara başlaması ile ortaya çıkar. Bu reaksiyonda karbon hidroksit karbonat kalsiyuma dönüşür. Bu dönüş CO₂ gazının olmadan imkânsızdır. CO₂ tek başına aktif değil ama nem ortamda olduğu zaman 4. formülünde görüldüğü gibi karbonik aside dönüşerek betonda reaksiyona geçer [56].



Genelde doğanın temiz havasında %0.03 kadar CO₂ bulunmaktadır. Bu oran büyük şehirlerin kirli havasında %0.3 'e kadar vara biliyor. Ama eğer tünellerin içinde hava sirkülasyonu iyi olmadı ise o zaman bu CO₂ yüzdesi %1 'e kadar yükselebilir. Bu betonun zaman açısından karbonatlaşma hızını yaklaşık 30 kata kadar çabuklaştırır [12]. 5. formülde görünen formülde elde edilen asit betonun içindeki serbest kireçle reaksiyona girerek ortaya çıkan ürün kalsiyum hidroksit ve içine nüfuz eden sudur.



Ortamda CO₂ fazla olduğu zaman karbonatlaşmada artış kaçınılmazdır bu karbonatlaşma ortamda daha fazla olan CO (monoksit karbon) gazı ile etkilenip ve reaksiyon daha fazla hızlanır. Şekil 2.4' de CO₂ ve diğer maddelerin etkisini göre biliriz.

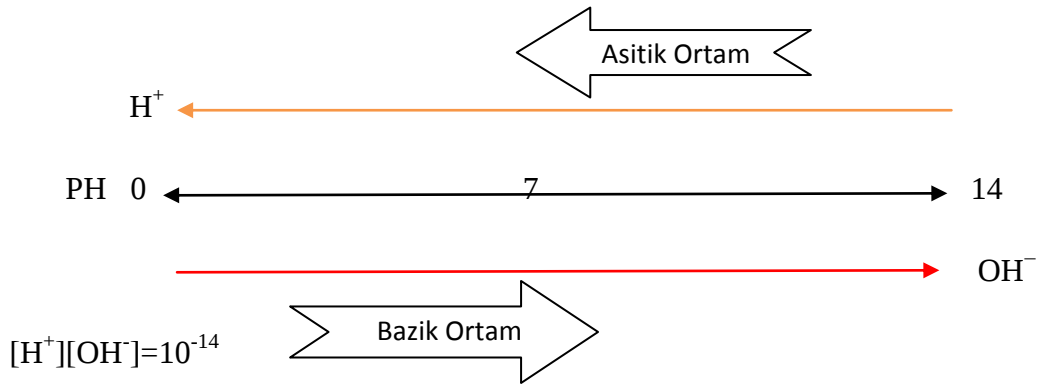


Şekil 2.4. CO₂ 'in Şematik Etkisi

Fosil ve madeni Yakıtların yarım yakılması ile havada olan kirlilik oranı yükselmektedir. Bu yakıtların kaynaklarından araba yakıtları ve fabrikalarda kullanılan yakıtlar ve diğer tüketicilere işaret edebiliriz. Yakıtların ana bileşeni karbondur(C) ve bu karbon yarım yakılsa havada CO ve CO₂ meydana çıkarak bizim karbonatlaşmamızı da hızlandırmaktadır.

2.3.4. PH'n değerinin karbonatlaşmada etkisi

PH'n değeri 0 ile 14 arasında değişmektedir, eğer bu değer 0-7 arasında oldu ise yani H⁺ fazladır ve ortam asidik bir ortamdır ama eğer bu değer 7 ve 14 arası oldu ise OH⁻ faktörü burada hakimdir ve ortam alkalidir ve üçüncü bir ortam PH 'ın 7 olması yani H⁺ faktör ile OH⁻ faktörünün eşit olmasıdır. OH⁻ ve H⁺ arasında olan bağlantı bizim ortamın Ph değerini belirlemektedir.



Taze betonun PH değeri genellikle 12.5-13.2arasındadır bu PH ortamda betonarme demirleri pasif halde bulunur [12].

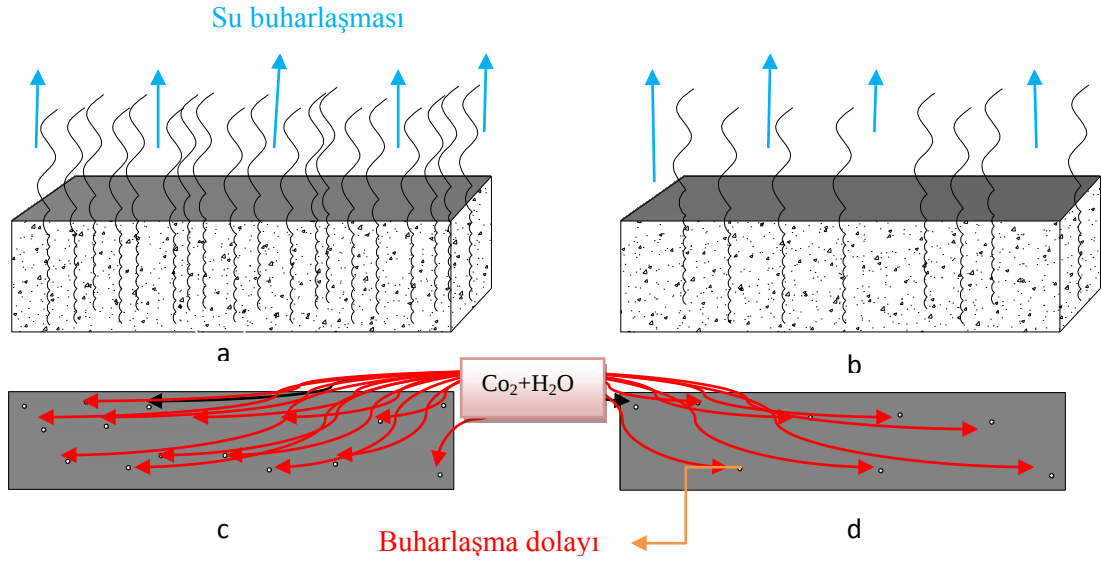
Eğer bu PH değeri düşüp ve 8 ile 9 arasında oldu ise o zaman bizim ortamımız alkali olarak betonun karbonatlaşma reaksiyonuna ve demirlerin paslanmasına hazırlamak demektir [35].

2.3.5. S/Ç oranının karbonatlaşmaya etkisi

Betonun esas karbonatlaşma faktörlerinden biri betonun poroziteliğinin fazla olmasıdır. Eğer bizim döktüğümüz betonun içinde boşluklar minimum olmuş olsa o zaman bizim betonumuz daha geçirimsiz ve dışarıdan gelen afetlere daha dayanıklıdır çünkü betonun arasındaki boşluklar az olduğu zaman geçirimliliği azalır ve buda bizi betonu tüm afetlerden korumaya yararlıdır [3].

Betonu daha geçirimsiz yapma metotlardan birisi su/çimento oranının az olmasıdır [29].

S / Ç oranı az olduğu zaman bizim betonun karışım suyu az olarak beton kuruduktan sonra daha az boşluk görünmektedir, bunun nedeni suyun az olduğu zaman, beton kururken betondan az su buharlaşır ve bu buharlaşma sonucu kılcal boşlukların az oluşmasıdır [3].



Şekil 2.5. Fazla buharlaşma ve fazla kılcıal delikler

Şekil 2.5 a'da S/Ç oranı fazla olan bir beton görünür ve bu beton kuruduktan sonra yani şekil c gibi daha fazla kılcıal delikleri olması dolayısı daha fazla CO_2 ve H_2O emerek daha fazla karbonatlaşır. Tam tersi şekil 2.5 b'de suyun az olma dolayısı buharlaşma az ve CO_2 ve H_2O nüfuzunda az olur ve karbonatlaşmaya gereken maddelerin az olması dolayısı karbonatlaşmada azalır.

Burada bu noktaya dikkat etmemiz gerekir ki eğer betonda su/çimento oranı düşük olmasına rağmen yerleştirme iyi olmadı ise yine bizim betonumuz porozite olarak dışarıdan nüfuz eden maddeler için gözenekli bir beton olacaktır.

2.3.6. İşçilikte hatalar ve karbonatlaşmada olumsuz etkileri

Betonda ve betonarme yapılarda her zaman karşı karşıya olabileceğimiz sorunlardan biri işçilik hatalarıdır. İşçilik hataları betonu her yönden zayıf hale düşürebilir. İşçilik hatalarından bazıları bunlardır:

Karışım hataları

Bazen betonun karışımında sorunlar yaşanmaktadır. Eğer oranlarımızı dikkatle uygulamadıysak betonumuzun bileşenlerinde hata oluşturarak bizim tasarlanmış olan betondan beklediğimiz özellikleri elde edemeyiz [3].

Taşıma hataları

Betonun kendine ayıt taşıma kuralları vardır ve bu kurallar hazır beton ve şantiye betonun kapsıyor. Eğer betonun taşıma süresi fazla ise beton yalancı pirize geçebilir veya tane ayrışması gibi sorunlar yaşanabilir [3].

Kalıbın içine taşımak tada kurallara uymamız gerekir zira ki bazen kolon veya kirişin ayana kadar iyi karışım ve iyi taşınan bir beton elemanların içine yerleştirilirken yükseklikten dökülerek tane ayrışmasına sebep olabilir.

Yerleştirme hataları

Bizim elde ettiğimiz beton en iyi beton oldu ise bile bizim yerleştirmemiz iyi ve hatasız olmadı ise kesin betonumuz poresiteli olur ve buda bizim betonun kalite ve dayanımını kötü etkiler. İyi vibratör ve kurallara uygun yapılması bizim betonun son adımıdır. Yani eğer son adımda hata oluşsa o zaman bizim betonumuz tüm harcanan emeklere rağmen yani A ve B bölümlerinde söylenenler bile doğru olsa hatalı bir beton olacaktır [3].

Yerleştirmesi doğru olmayan bir beton her zaman poresiteli beton olur ve buda CO₂ ve suyun nüfuzunu artırarak karbonatlaşmayı hızlandırır.

Betonun dökümünde zamanlama hataları

Betonun dökümü mevsim ve dökülen kentin hava durumuna göre değişebilir. Eğer kış ise beton dökmek günün sıcak zamanlarında daha iyidir. Eğer çok sıcak bir şehirde beton dökülecek ise o zaman gece beton dökmek veya malzeme soğutma yöntemleri ile beton dökmeliyiz [3].

Her zaman binanın ve kara yolların beton dökmesi uygun mevsimlerde oldu ise o zaman uygulanan beton daha ekonomik ve daha uygun bir beton olmaktadır. Çünkü fazla sıcaklıkta dökülen beton fazla buharlaşarak kılcal çatlaklara maruz kalabilir ve tabi ki dondurucu havada dökülen betonda donarak çözüldükten sonra bu afete tutulur, bu çatlaklarda bizim betonumuzu klorlar ve CO₂ ve diğer zararlı maddelere karşı dayanıksız yapabilir [16].

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyaller

Bu çalışmada agregalar Ankara limak hazır beton santralinden alınan 0-4 mm ve 4-11.2 mm ve 11.2-22.4 mm tane boyutlu olarak alınmıştır aynı firmadan temin edilen CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Beton takviyesinde kullanılan iki ucu kancalı, soğukta çekilmiş Dramix RC-35/35- BN çelik lif kullanılmıştır. Tüm karışımlarda S/Ç oranı 0.49 olarak sabit tutulmuştur. Beton karışımında Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.1. Çimento ve özellikleri

TS EN 197-1 (2002)'e uygun olarak üretilen CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmış ve Ankara'nın Limak çimento fabrikasından alınmıştır. Çimentonun özellikleri Limak çimento laboratuvarından alınarak Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikler		Fiziksel özellikler	
Bileşen	Değerler(%)	Özellik	Miktar
SiO ₂	19,3	Yoğunluk (gr/cm ³)	3,33
Al ₂ O ₃	5,57	Özgül yüzey (cm ² /gr)	3634
Fe ₂ O ₃	3,46	Priz başlangıç süresi (dak)	105
Mn ₂ O ₃	0,1	Priz final süresi (dak)	189
CaO	63,56	Hacim genleşmesi(mm)	1
MgO	0,86	2 Günlük basınç dayanımı	27,1
SO ₃	2,91	28Günlük basınç dayanımı	53,9
Na ₂ O	0,19	Çimento ana bileşenleri	
K ₂ O	0,80	Çimento kimyasına göre sembolü	Miktarı(%)
Serbest CaO	1,22	C ₃ S	52,48
Cl ⁻	0,0089	C ₂ S	19,63
Çözünmeyen kalıntı	0,25	C ₃ A	8,02
Kızdırma Kaybı	2,93	C ₄ AF	9,15

3.1.2. Agregave özellikleri

Hazırlanan beton numunelerinde kullanılan agregalar 0-4 mm, 4-11.2 mm ve 11.2-22.4 mm boyutlarda kırma agregası olarak, limak hazır beton tesisatından temin edilmiştir. Beton üretiminde kullanılan agregalar, TS 707 (1980) ve TS EN 932-2 (1999) agregalardan numune alma ve laboratuvar numunelerinin azaltılması ile deneyi ile hazırlanmıştır. Agregası tane büyüklüğü dağılımı, TS 3530 EN 933-1(1999) standardına uygun olarak belirlenmiştir. İri ve ince agregalara ait numunelerin tane büyüklüklerine göre dağılımı elek analizi sonucunda belirlenmiştir. Fuller eğrisine uygun olarak agregası karışım oranları hesaplanarak agregası granülometrisi ayarlanmıştır. Buna göre 0-4 mm aralığındaki agregası %39, 4-11.2 mm agregadan %30 ise 11.2-22.4 mm %31 olarak düzenlenmiştir. Lif takviyeli betonların işlenebilirliğini kolaylaştırmak amacıyla ince agregası oranı fazla seçilmiştir.

Çizelge 3.2. Agreganın karışım analizi ve yoğunluğu

Elek açıklığı(mm)	Agregası grupları			Fuller	Karışım
	0-4 (mm)	4-11,2 (mm)	11,2-22,4 (mm)		
22.4	100	100	100	100	100
16,0	100	100	54	84	86
11,2	100	100	7	71	71
8,0	100	66	0	60	59
5,6	100	36	0	50	50
4,0	100	10	0	42	42
2,0	78	1	0	30	30
1,0	46	0	0	21	18
0,5	35	0	0	15	14
0,25	27	0	0	11	11
0,125	18	0	0	7	7
Karışım oranları	%39	%30	%31	100	100
Yoğunluk kg/dm ³	2,69	2,70	2,71		

3.1.3. Uçucu külün sınıfı ve özellikler

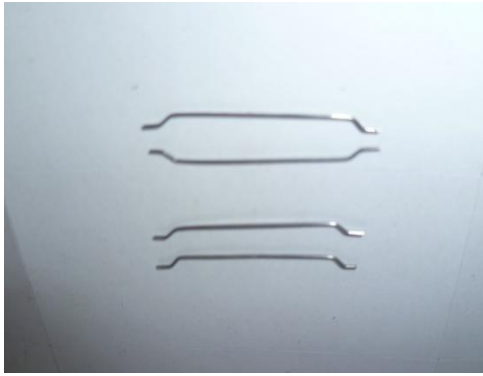
Çalışmada kullanılan çayırhan uçucu külün limak çimento fabrikasında yapılan kimyasal analizi Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Uçucu külün bileşenlerinin miktarları ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşenler	Çayırhan Uçucu kül bileşenleri (%)	Düşük C	Yüksek C
SiO ₂	50,88	25-42	46-59
Al ₂ O ₃	13,34	15-21	14-22
Fe ₂ O ₃	10,09	5-10	5-13
CaO	13,09	17-32	8-16
MgO	5,58	4-12,5	3,2-4,9
K ₂ O	2,72	0,3-1,6	0,6-1,1
Na ₂ O	2,59	0,8-6	1,3-4,2
SO ₃	3,32	0,4-5	0,4-2,3
Li ₂ O	0,2	0,1-1	0,1-2,3
TiO ₂	1,2	<1	<1
Cr ₂ O ₃	0,043	0-0,1	0-0,1
KK	1,7	0,2-1,2	0,3 - 1,9
Total	101,99	≈100	≈100
Uçucu külün tane boyutu		Miktar	
1-45 µ		%72	
45-90 µ		%16	
90-120 µ		%8	
120-150 µ		%4	
İnceliği (g/cm ²)		2140	
Yoğunluğu (g/cm ³)		2,32	
Gevşek ağırlığı		728	

Kullandığımız külün SiO_2 miktarının fazla olması ve CaO miktarının az olması nedeni ile bizim ürettiğimiz betonda karbonatlaşmaya karşı olumlu etkileri olmasını beklemekteyiz. çünkü karbonatlaşmayı etkileyen ana bileşimin CaO olduğu bilinmektedir. CaO uçucu külde az miktarındadır ve bu sebeple çimento yerine kullandığımız zaman bizim betonda olan CaO miktarımız düşmektedir.

3.1.4. Çelik lifin şekil ve boyut özellikleri



Resim 3.1. Kullanılan çelik lifin şekli

Araştırmada kullanılan çelik lif BEKSA firmasından temin edilen düşük karbonlu 35/0.35 boyutunda kancalı (çengelli)lif kullanılmıştır. Beksa firmasından alınan çelik liflere ait teknik özellikler Çizelge 3.4’de ve görünüşü Resim 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çelik lifin özellikleri

Lif Tipi	Çengelli 35/0,35
Boy (mm)	35
Çap (mm)	0,35
Narinlik oranı	100
Çekme dayanımı (MPa)	1150
Elastisite modülü (MPa)	200000
Özgül ağırlık	7,48
1 Kg lifin sayısı (Adet)	13000

3.1.5. Karışım suyunun özellikleri

Bu çalışmada beton karışımı ve karışımdan sonra kürde kullanılan su, Ankara şehir şebekesinin içme suyudur. Bu çalışmada kullanılan suyun Aski'den alınan özellikleri Çizelge 3.5' te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kullanılan suyun özellikleri [58]

Ankara içme suyu günlük ortalama değerleri			
Parametre	Analiz sonucu	EPA'da izin verilebilir değer	TS 266'da izin verilebilir değer
İletkenlik $\gamma=(25^{\circ}\text{C},\text{mS/m})$	22,6		250
Amonyum(mg/l)	<0,06	<1	0,5
Nitrit(mg/l)	<0,006	1	0,5
Sülfat (mg / lt)	23,6	250	250
Demir (μg / lt)	19	200	200
Al (μg / lt)	61	200	200

3.2. Metod

Bu çalışmada agrega, çimento, uçucu kül ve çelik lif ile farklı karışımlar elde edilmiştir. Bu karışımlarda kullanılan malzemelerin oranları bir biri ile de farklıdır.

Çalışmada kimyasal katkı maddesi kullanılmamıştır ve %0, %10, %20 ve %30 çimento yerine uçucu kül ikame edilmiştir. Bu karışım oranıyla her bir özellik ve yaş için 3'er adet lifli ve lifsiz olmak üzere numune hazırlanmıştır. Basınç ve eğilme dayanımı numunelerinde 7, 28 ve 90 günlük, aşınma ve karbonatlaşma numunelerinde 28 ve 90 günlük, su emme ve tokluk numunelerinde ise 90 günlük numuneler üzerinde testler yapılmıştır

Deneysel çalışmada hazırlanan tüm beton karışımlardaki agrega oranları, %39 ince (0-4 mm) ve %30 orta (4-11.2 mm) ve %31 iri (11.2-22.4 mm) kullanılmıştır.

Uçucu kül ağırlıkça ikame yoluyla betona %0, %10, %20 ve %30, oranlarında çimento ile yer değiştirilerek karışıma katılmıştır. Beton takviyesinde kullanılan iki ucu kancalı, soğukta çekilmiş Dramix RC-35/35- BN çelik lif ağırlıkça %1 oranında sabit kullanılmıştır.

C25 için karışım miktarlarının hesabı TS 802 (2009) esas alınarak, lifli betonun karışım hesabı TS 10514(1992)'de göre yapılmıştır. Hesaplarda bağlayıcı miktarı 301 kg/m^3 ve su/bağlayıcı oranı 0.49 sabit olarak seçilmiş ve hapsolmuş hava miktarı ise 20 dm^3 alınmıştır. Gerekli agrega miktarının hacmi hesaplanmış ve daha sonra ağırlıklar bulunmuştur. Çizelge 3.6'da kısaltılmış olan beton karışım kodları verilmiştir.

Çizelge 3.6. Numunelerin kodlanması

Kodlar	Açıklamalar
Uk ₀ b	Uçucu külsüz ve çelik lifsiz beton(Kontrol betonu)
Uk ₁₀ b	%10 uçucu küllü çelik lifsiz beton
Uk ₂₀ b	%20 uçucu küllü çelik lifsiz beton
Uk ₃₀ b	%30 uçucu küllü çelik lifsiz beton
Uk ₀ çlb	Uçucu külsüz ,%1 beton ağırlığı çelik lifli beton
Uk ₁₀ çlb	%10 uçucu küllü, %1 beton ağırlığı çelik lifli beton
Uk ₂₀ çlb	%20 uçucu küllü,%1 beton ağırlığı çelik lifli beton
Uk ₃₀ çlb	%30 uçucu küllü,%1 beton ağırlığı çelik lifli beton

Bir metreküp beton içinde bulunan malzeme miktarlarda Çizelge 3.7'de açıklanmıştır.

Çizelge 3.9. Deney örneklerinin cinsi ve boyutları

Deney örneği	Boyutları (mm)	Üzerinde yapılan deney
Küp	100x100x100	Aşınma
Silindir	100 x 200	Basınç, ultra ses ve modül elastisite
Plak	80 x 500x500	Enerji yutma(Tokluk)
Kiriş	100x100x500	Eğilme
Prizma	100x100x400	Karbonatlaşma

3.2.1. Çökme (slump) metodu

Çökme deneyi, lifsiz betonlarda ASTM C143 'e göre yapılmıştır. Deneyin sonucu, ölçüleri belli olan huniye doldurularak sıkıştırılan taze beton yüksekliğinin, huni çekilip alındıktan sonraki beton yüksekliği ile kıyaslanması ile elde edilmiştir.

Çelik lifli taze betonların işlenebilirliği ASTM C995 standardına uygun olarak ters çevrilmiş koni deneyi ile belirlenmiştir. Bu deneyde, dâhili vibratör hareketi ile ters koniden, koni ağzı açıklığı boyunca akması için geçen süre ölçülmüştür.

Çelik lifli betonlarda ASTM C 995'e uygun olarak ters koni. Yüksekliği ve çapı daha büyük olan bir kabın üzerine mont edilerek sabitleştirilmiştir. Sonra ters koninin 1/3 ü betondan doldurulmuştur ve üzeri kabaca düzeltilmiştir. Tekrar koninin diğer 1/3'ü aynı işlemle doldurulduktan sonra kalan 1/3 kısmı da betonla doldurulmuş ve şişleme çubuğu ile düzeltildikten sonra koninin üst kısmından çıkan çelik lifler alınmıştır.

Uç çapı 3 cm olan daldırma vibratörü taze betonla dolu olan ters koniye düşey doğrultuda daldırılmış ve daldırma süresi 2-3 sn içerisinde gerçekleştirilerek vibratörün ucunun koniye dokunmadan betonun geçme süresi kayıt edilmiştir.

3.2.2. Yoğunluk tayini

Kütle Tayini:

Kütlenin belirlenmesi esnasında numunenin suya doygun ve etüv kurusu durumuna göre iki türlü yapılmıştır

a)Suya doygun durum

b)Etüv kurusu durum

Bu iki kütle tayinini geniş olarak izah ederek ölçümleri kayıt altına alabiliriz.

Suya doygun durumdaki numune kütlesi

Numune, (20 ± 2) °C sıcaklıktaki su içerisinde, 24 saat aralıkla yapılan tartımda kütle değişimi % 0,2'den daha az hale gelinceye kadar batırılmıştır. Bu tartımlarda numune yüzeyindeki serbest su silinerek temizlenmiştir ve suya doygun numune *kütlesi*, kilogram olarak kaydedilmiştir

Etüv kurusu durumdaki numune kütlesi

Numune, (105 ± 2) °C sıcaklıktaki hava dolaşımli etüvde, 24 saat aralıkla yapılan tartımdaki kütle değişimi % 0,2'den daha az hale gelinceye kadar beklenmiştir. Daha sonra numuneler her tartımdan önce oda sıcaklığına gelinceye kadar desikatörde bekletilerek soğutulduktan sonra tartılmıştır ve kuru kütlesi, kilogram olarak kaydedilmiştir.

Numunenin hacim tayini

Numune tel sepeti su içinde boş kütlesi, kilogram olarak kaydedilmiştir. Daha sonra suya batırılmış numune ve tel sepetin toplam görünür kütlesi kilogram olarak kaydedilmiştir.



Resim 3.2. Tel sepetin su içinde görünümü

Havadaki kütle

Numune teraziye yerleştirilir ve havadaki kütle belirlenerek, kilogram cinsinden kaydedilir.



Resim 3.3. Numunenin havadaki kütlenin ölçülmesi

Yoğunluk tayini deney sonuçları, en yakın 10 kg/m^3 'e yuvarlatılarak gösterilmiştir.

3.2.3. Basınç dayanım tayini

Basınç deneyini yapmak için Resim 3.4'de görüldüğü gibi 100x200 mm silindir kalıplar kullanılmıştır.



Resim 3.4. Silindir kalıbın görüntüsü

Bu Standard, sertleşmiş beton deney numunelerinde basınç dayanımı tayini için uygulanacak deney metodunu kapsar. Numuneler, EN 12390-4'e uygun olarak yapılır. Başlıklar yapıldıktan sonra Resim 3.5'de gördüğümüz basınç makinesinde, betonlar TS EN12390-3 standardında önerdiği şekilde kırılmıştır



Resim 3.5. Basınç presi

Bu deneyde aletin yükleme hızı 1.0 MPa/S sabit alınarak yapılmıştır.

3.2.4. Eğilmede çekme dayanımı tayini

Uçucu kül oranlarıyla lifli ve lifsiz olarak üretilen kiriş numuneler, deney için sudan çıkartıldıktan sonra, yüzeylerindeki fazla su, eğilme presine yerleştirilmeden önce, silinerek temizlenmiştir. Presin yükleme hızı 0.04 MPa/s sabit gerilme artış hızı sağlanacak şekilde ayarlanmıştır.



Resim 3.6. numunelerin eğilme presindeki görüntüsü

3.2.5. Ultra ses hızı ile beton testi

ASTM C 597 standardı esas alınarak ultrasonik hız metodu ile beton içerisinden geçen ultrasonik dalganın, geçme hızı bulunmuştur. Deney 200×100 mm boyutundaki örnekler üzerinde yapılmıştır.



Resim 3.7. Ultrasonik cihazı

Ölçüm noktaları, cihazın gönderici ve alıcı uçları karşılıklı kontak maddesi sürülerek, paralel olacak şekilde tutulmuştur. Alıcı ve gönderici cm cinsinden ölçülmüş ve eşitlikle km cinsinden kullanılmıştır. Uçlar beton ölçüm noktalarına sıkıca bastırılmış ve cihazdan geçiş süresi mikro saniye cinsinden okunarak eşitlikle yerine saniye cinsinden konulmuştur.

3.2.6. Aşınma deneyi

Aşınma dayanımı deneyi, 100×100×100 mm'lik numuneler üzerinde ASTM C 944 "Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method" standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney, Resim 3.8'deki aşınma cihazın 28 ve 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Standarda uygun olarak her yüzey için aşınma zamanı 2 dakika, numune üzerindeki etki eden yük 197 N olarak alınmıştır. Cihaz dönme hızı 200 devir dakikada olarak ayarlanmıştır. Deney numunenin 3 ayrı yüzeyinde 2 dakika olmak üzere toplam 6 dakika sürmüştür. Her 2 dakika sonunda numune üzerinde kırıklar ve tozlar silinmiş numune tartılıp ve tekrar işlem yapılmıştır.



Resim 3. 8. Aşındırma cihazı

3.2.7. Kapiler su emme katsayı tayini

Beton numunelerin kapiler su emme durumunun belirlenmesi $100 \times 100 \times 100$ mm'lik numuneler üzerinde yapılmıştır. Öncelikle numuneler 24 saat boyunca 105°C deki etüv kurusu haline getirilmiştir. Etüv kurusu ağırlıkları tartıldıktan sonra her bir deney numunesi için beton numunenin sadece alt yüzeyi suya temas edeceğinden dolayı beton numunelerin yan yüzeyleri silikon ile izole edilmiştir.

Silikon ağırlıkları da tartıldıktan sonra su yüksekliği yaklaşık olarak 5 mm olan deney düzeneğine yerleştirilmişlerdir. Deney numuneleri 1, 2, 4, 8, 12, 24 saat sonrası su emme miktarları ölçülmüştür.

3.2.8. Statik elastisite modülü

Betonda elastisite modülü, beton deney numunelerinde elastik bölgede uygulanan kuvvetin oluşturduğu basınç gerilmelerinin numunelerde boyuna kısalmaya oranı olarak ifade edilmektedir. Betondaki gerilme-birim deformasyon ilişkisi TS 3502'ye (1981) uygun deneysel olarak belirlenmiş ve bu amaçla 100×200 mm boyutlu standart silindir 28 günlük numuneler kullanılmıştır. Lineer artan yüklere numunedeki eksene göre değişimler doğrudan bilgisayara kayıt edilmiştir.

Kaydedilen değerlerden gerilme dikey eksene, birim deformasyonlar ise yatay eksene yerleştirilerek gerilme-birim deformasyon eğrisi elde edilmiştir. Betonların σ - ϵ eğrisinin üzerinde herhangi bir nokta belirlenmiş ve hem σ - ϵ eğrisinin başlangıç noktasından (0 noktasından) hem de belirlenen bu noktadan geçen bir doğru çizilmiştir. Bu noktanın seçiminde, genellikle betonun maksimum gerilme değerinin %40'ına karşılık gelen gerilme değeri temel alınmıştır. Çizilen bu doğru çizgi, betonun σ - ϵ eğrisi imiş gibi kabul edilerek, bu doğrunun eğiminden sekant elastisite modülü bu formül ile hesaplanmıştır.



Resim 3.9. Basınç makinesinde statik elastisite modülü deneğinin yapılışı

3.2.9. Enerji yutma (Tokluk)

Bu deneyde kullanılan betonun yük karşısında ne kadar dayanıp ve alt kısımda sehim miktarı ve enerji yutma değerini belirleme amaçlanmıştır. Bu deneyde gereken malzemelerde 100 ton kapasitesinde basınç makinesi (Resim 3.10) ve deney cihazıdır. Betonlar $500 \times 500 \times 80$ mm döküldükten sonra numuneler kürde bekletilmiştir. Deneye tabi tutulmadan 1 saat önce kürden çıkarılıp ve laboratuvar ortamında tutulmuştur.

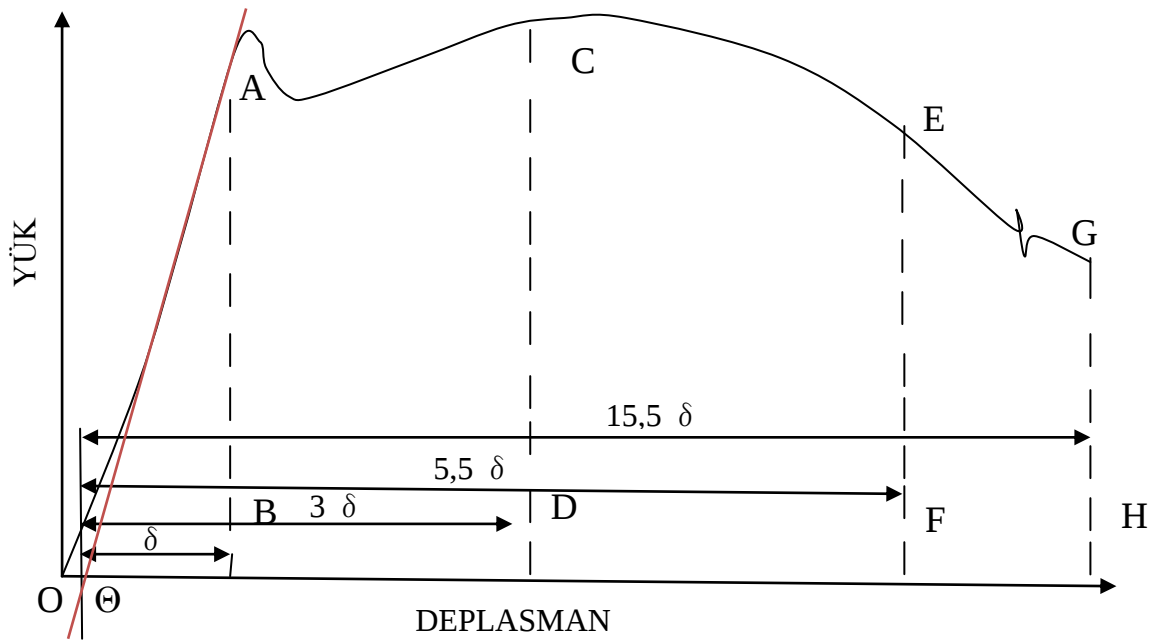


Resim 3.10. Deney presi

Numune basınç presinin raylar üstünde (Resim 3.11) iterek mesnedin altında tutulmuştur makinede elde edilen veriler dataloger yardımıyla bilgisayara aktırılarak enerji yutma (Tokluk) hesap ettirilmiştir. Elde edile eğimin maksimum olan noktasında düz çizgi çizilerek bu ortamın alanını bularak enerji yutma kapasitesi belirlenmiştir.



Resim 3.11. Numunenin sisteme yerleşmesi



Şekil 3.1. ASTM C1018 'e göre yük-deplasman eğrisi

ASTM C 1018'e göre tokluk indeksleri seçilen deplasman değerine kadar malzeme davranışını tanımlamak için kullanılır.

Çizelge 3.10. ASTM C1018 'de belirlenen değişim kapsamı

ASTM C1018 'de verilen kriterler		Çelik lifli betonlarda değişimin kapsamı
OACD	I ₅	1 İle 6 arası
OAEF	I ₁₀	1 İle 12 arası
OAGH	I ₂₀	1 İle 25 arası

3.2.10. Karbonatlaşma

Karbonatlaşma Deneyinde EN BS 13295:2004 standardı esas alınmıştır.

Agregaların maksimum boyutları 10 mm'den büyük olduğu için 10×40×40 cm prizma kullanılmıştır.

Sekiz farklı oranlarda dökülen betonlar Resim 3.12'de görüldüğü 28 ve 90 gün kirece doygun kürede bekletildikten sonra 14 gün laboratuvar ortamında tutuldu daha sonra deney tankının içinde önceden yapılmış raflar üstüne düzenle konuldu. 28 ve 90 günlük numuneler yaklaşık %60±5 sabit nemde ve 20±2 °C , %1 CO₂ ortamlı kapalı tankta 56 gün tutulmuştur, 56 günden sonra numune eğilme testine tabi tutulmuş ve kırılan parça üzerine fenolfetalin maddesi püskürtülmüştür. Püskürülmüş madde karbonatlaşma olmayan bölgelerde pembelik yapmıştır. Karbonatlaşma olan bölgeler de renk değişimi olmamıştır.

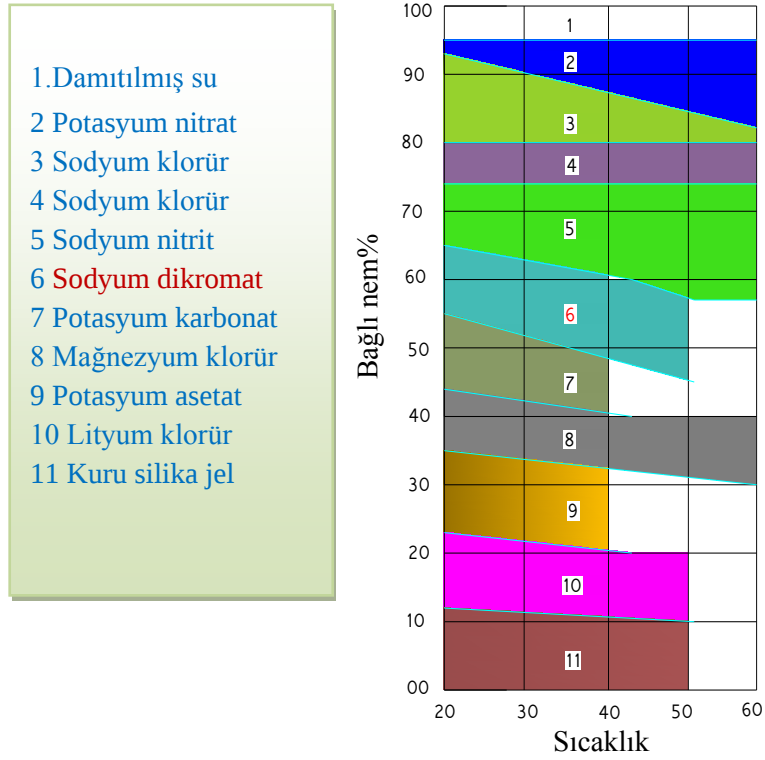


Resim 3.12. Karbonatlaşmaya bekletilen betonlar

Tankın içinde nem miktarını 60 ± 5 de tutması için Resim 3.13’de görünen sodyum dikromat tuzu kullanılmıştır [35]. Bu tuz 1 litre suda doygun hale gelene kadar karıştırılmıştır ve ortama konarak nemi 60 ± 5 arasında tutmuştur.



Resim 3.13. Dikromat tuzu

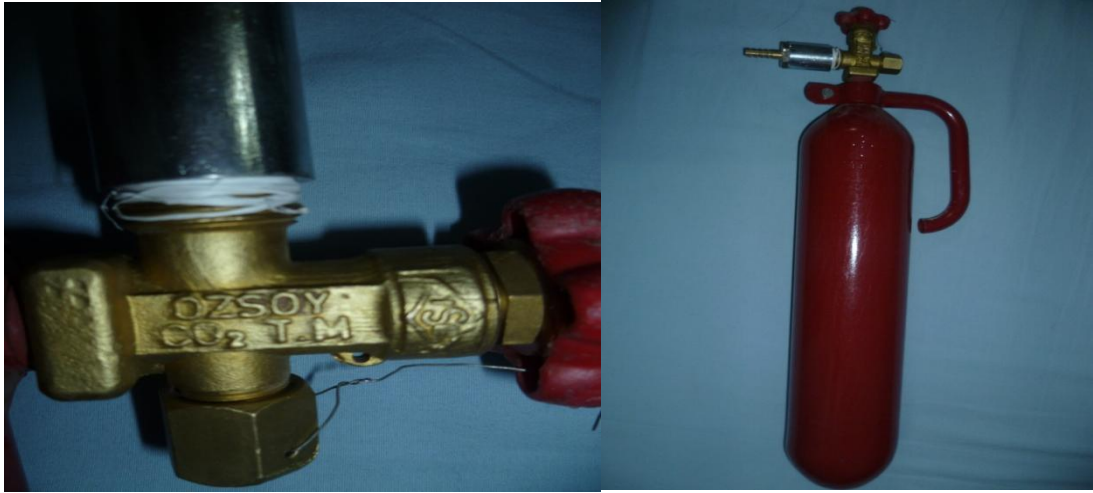


Şekil 3.2. Değişik tuzların nem sağlama miktarları [35]



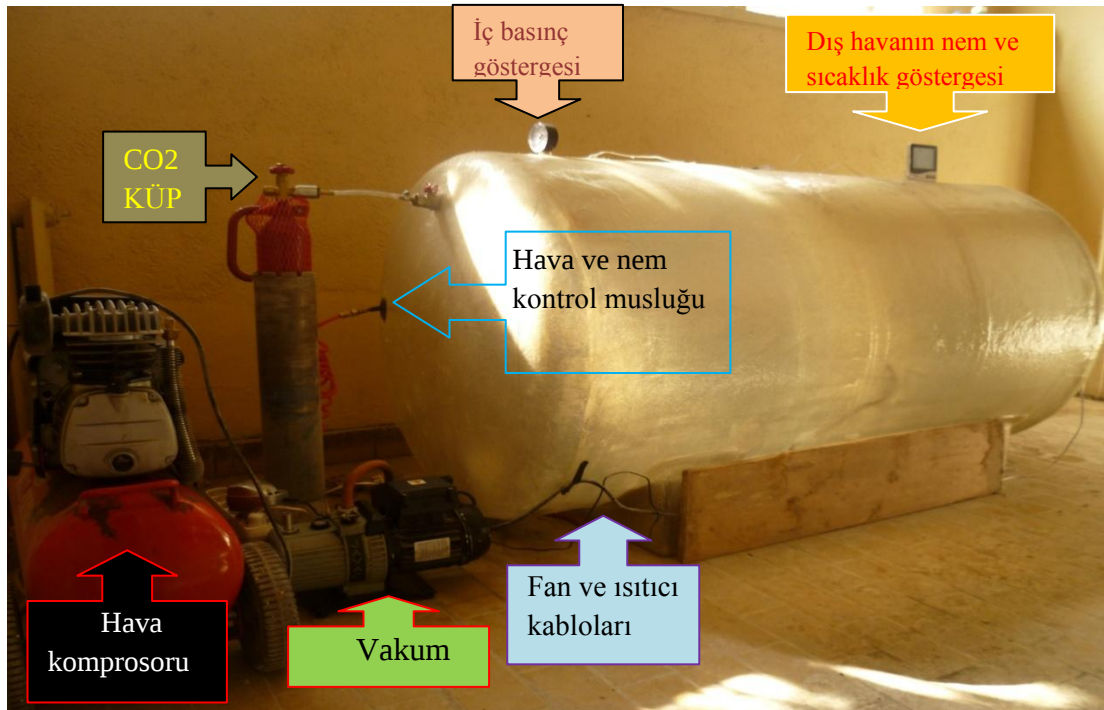
Resim 3.14. Tankın içinde nem miktarı görüntüsü

Tankın içindeki CO_2 miktarını %1 yapmamız için hacim-ağırlık metodu kullanıldı. Yani tankın hacmi alındı hacim hesaplandıktan sonra normal hava ağırlık birimine çarparak içindeki hava miktarı hesaplanır. Sonra vakumla içindeki hava emilerek istediğimiz ağırlık alınır ve onun yerine resim 3.12’de verilen tüpten CO_2 eklenmiştir



Resim 3.15. CO₂ tüpü

Bu tankta içindeki nem ve CO₂ miktarını kontrol etmemiz için Resim 3.14’de görünen nem ve sıcaklık cihazı tankın içine yerleştirilmiştir. Tanka eklenen basınçölçerle içindeki gaz miktarı kontrol edilmiştir. Numuneler bu şartlarla içeriye konulduktan 56 gün sonra tanktan alınarak ve karbonatlaşma deneyine tabi tutulmuşlardır. Resim 3.16 ‘de tankın resmi gösterilmektedir



Resim 3.16. Karbonatlaşma tankının görüntüsü

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR

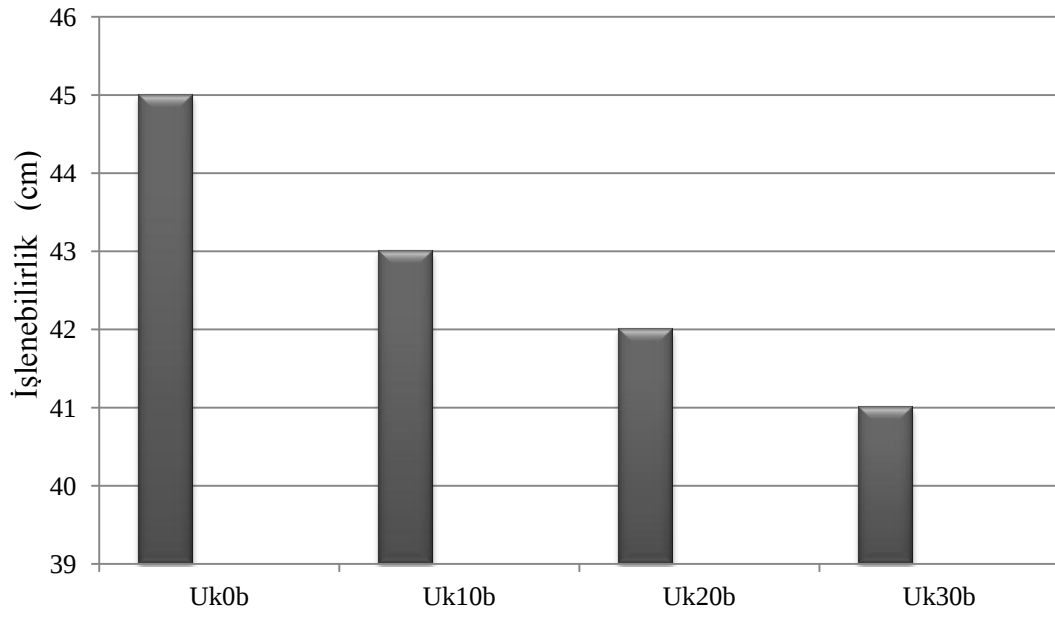
4.1. Betonun Çökme Deneyi Bulguları

Yapılan çalışmada farklı karışımlarda olan betonlar üzerinde çökme deneyi yapılmıştır. Normal betonlar için çökme huni metodu ve çelik lifli betonlar için yapılan ters koni metodun değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

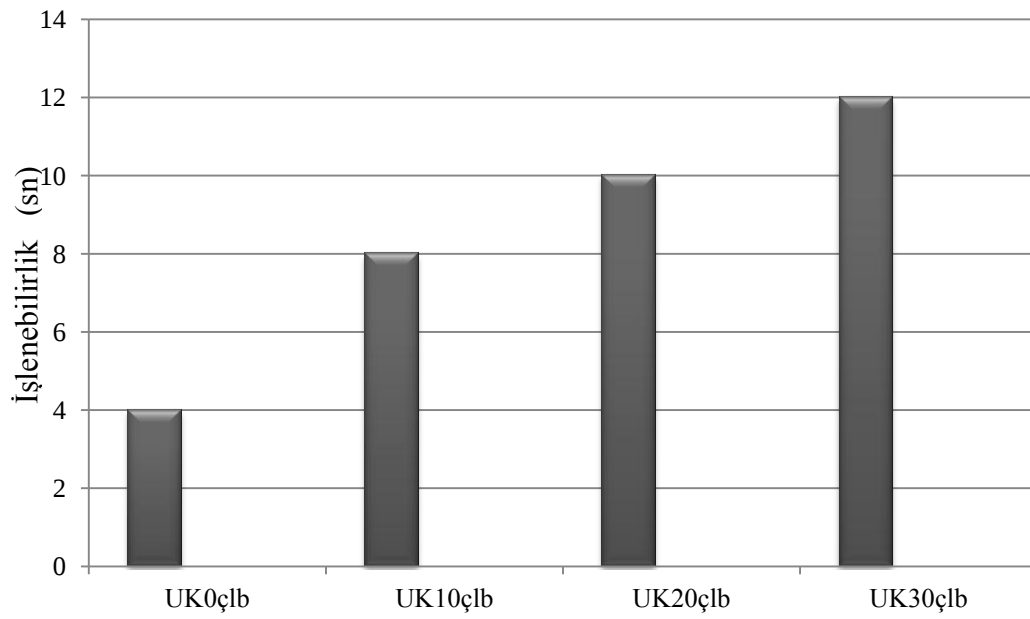
Çizelge 4.1, Şekil 4.1 ve Şekil 4.4’de görüldüğü gibi lifsiz betonlarda uçucu kül oranı arttıkça çökme miktarı azalmaktadır. Bunun nedeni uçucu külün küresel yapısı yanında hacim olarak çimentoya göre daha fazla olması ve özgül yüzeyinin çimentoya göre daha fazla olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Lifli beton karışımlarda ise lif ve uçucu kül arttıkça ters koniden çıkış süresi artmaktadır. Bunun nedeni taze betonun kohezyonu artmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Çizelge 4.1. Taze beton işlenebilirlik çökme ve ters koni sonuçları

Numunenin kodu	Çökme miktarı (mm)	Ters koni metodu(sn)
Uk ₀ b	45	-
Uk ₁₀ b	43	-
Uk ₂₀ b	42	-
Uk ₃₀ b	41	-
Uk ₀ çlb	-	4
Uk ₁₀ çlb	-	8
Uk ₂₀ çlb	-	10
Uk ₃₀ çlb	-	12



Şekil 4.1. Taze betonda katkı maddesi oranı-işlenebilirlik ilişkisi



Şekil 4.2. Taze betonda uçucu küllü lifli betonun işlenebilirlik ilişkisi

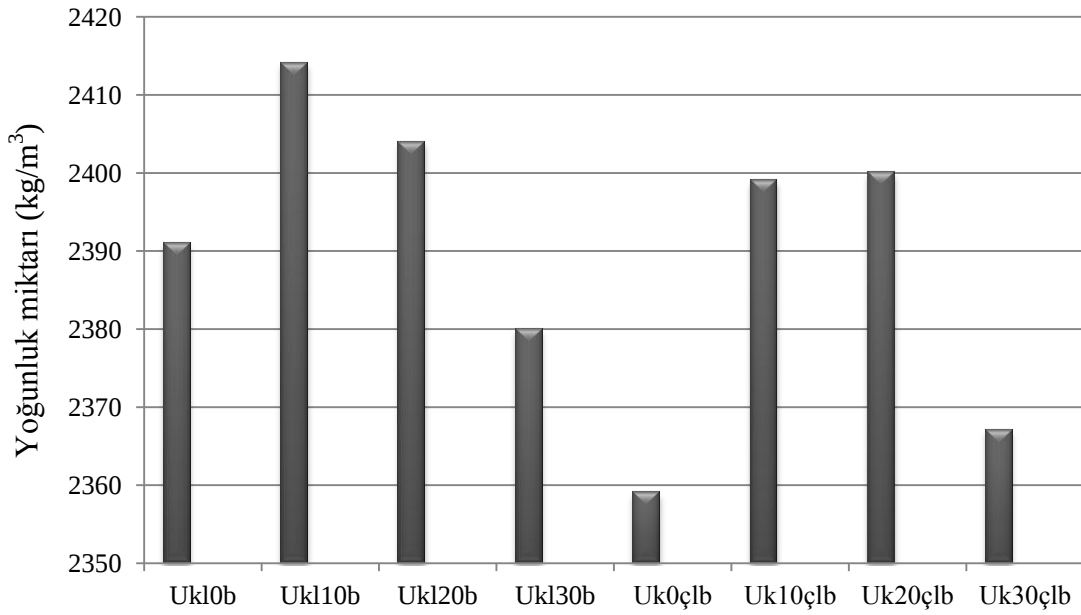
4.2. Sertleşmiş Betonun Yoğunluk Bulguları

Çalışmada üretilen beton örneklerinin yoğunlukları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.3’de görüldüğü gibi uçucu kül oranına bağlı olarak yoğunlukta önemli bir farklılık olmasa bile düzenli bir artış ve azalma söz konusu değildir. Ancak %10 uçucu kül oranı ile üretilen beton yoğunluğu en yüksek yoğunluğa sahip olduğu söylenebilir. Şahit betona göre %0.96’lık bir artış görünürken Uk_{30b}’de %1.05’lik bir artış görülmektedir.

Lifli betonların yoğunlukları bir biri ile karşılaştırılsa Uk_{20çlb} beton en yüksek yoğunluğu vermiştir. En düşükle en yüksek yoğunluk arasında fark 42 kg/m³’dür. Bu farklılığın nedeni sıkıştırmadan veya yerleştirmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.2. lifsiz ve lifli betonların yoğunluk değerleri

Numune kodu	Numune adedi	Max yoğunluk (kg/m ³)	Min yoğunluk (kg/m ³)	Ortalama (kg/m ³)
Uk _{0b}	3	2405	2387	2391
Uk _{10b}	3	2416	2411	2414
Uk _{20b}	3	2409	2396	2404
Uk _{30b}	3	2396	2368	2380
Uk _{0çlb}	3	2366	2348	2359
Uk _{10çlb}	3	2405	2392	2399
Uk _{20çlb}	3	2409	2393	2400
Uk _{30çlb}	3	2377	2352	2367



Şekil 4.3. Betonun yoğunluk katkı ilişkisi

4.3. Basınç Dayanımı Bulguları

Lifli ve lifsiz uçucu küllü betonun 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları Çizelge 4.3’de görülmektedir.

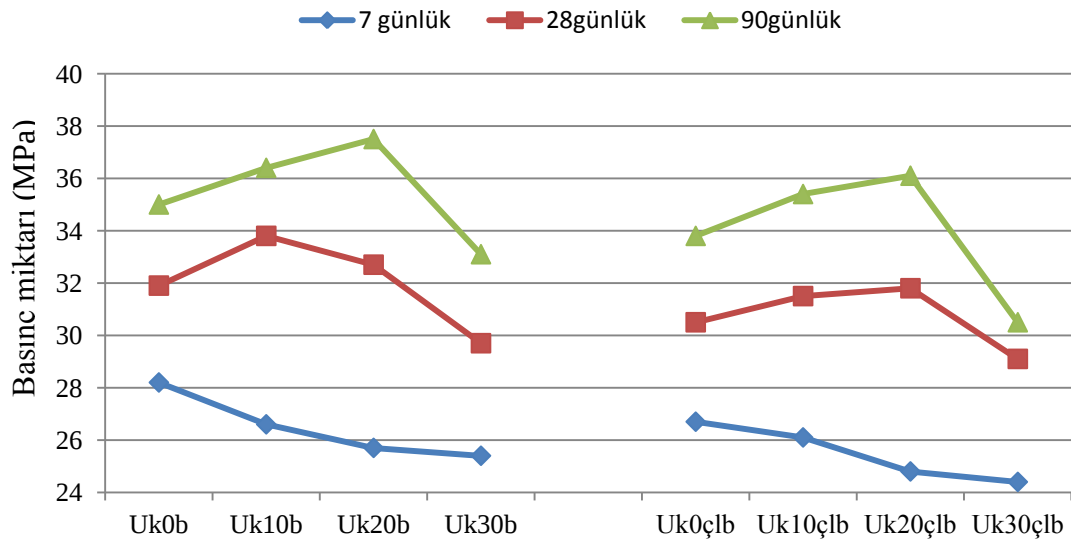
Çizelge 4.3. 7, 28 ve 90 günlük betonların basınç dayanımları

Numune kodu	7 günlük basınç MPa	28 günlük basınç MPa	90 günlük basınç MPa
Uk ₀ b	28,2	31,9	35
Uk ₁₀ b	26,6	33,8	36,4
Uk ₂₀ b	25,7	32,7	37,5
Uk ₃₀ b	25,4	29,7	33,1
Uk ₀ çlb	26,7	30,5	33,8
Uk ₁₀ çlb	26,1	31,5	35,4
Uk ₂₀ çlb	24,8	31,8	36,1
Uk ₃₀ çlb	24,4	29,1	30,5

Beton örneklerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları incelendiğinde beton yaşına bağlı olarak bütün örneklerde Şekil 4.4’de artış olduğu görülmektedir. Bu artış literatör ile uyumlu olduğu görülmektedir. Lifsiz beton (Ukb) örnekleri incelendiğinde 7 günlüklerde Uk oranı artıkça basınç dayanımı azalmaktadır. 28 günlük betonlarda ise %10 Uk oranlı örneklerde azda olsa diğer örneklerle göre artış göstermektedir. 90 günlük betonlardan en yüksek dayanımı %20 Uk oranıyla üretilen uk_{20b} beton vermiştir. Bu artış Uk_{0b} beton örneğine göre yaklaşık %7 dir. Uk_{30b} beton örneğine göre yaklaşık %13 dür. Bu sonuca göre %20 Uk 90 günlük betonlarda olumlu etki yapmaktadır. Lifli beton örneklerin 7 günlükleri incelendiğinde lifsiz beton örneklerine benzerlik göstermektedir. Uçucu kül oranı artıkça basınç dayanımında bir azalma görülmektedir. Bu da beklenen bir durumdur.

28 günlük lifli beton örneklerinde ise Uk_{0çlb} ve Uk_{30çlb} bir birine yakın çıkarken uk_{10çlb} ve uk_{20çlb} beton örneklerinde bir birine oldukça yakın değerlerine göre yaklaşık 1 MPa artış söz konusudur.

90 günlük betonların basınç dayanımında en yüksek dayanımını uk_{20çlb} beton örnekleri vermiştir.



Şekil 4.4. Basınç dayanımı Uk ve çelik ilişkisi

Lif katkılı örneklerde lif, uçucu kül oranı sıfır olan yani Uk_{0çlb}’a karşı %10 ve %20 uçucu küllü betonlarda uçucu kül artarak, paralel olarak belirli bir artış görünürken,

uçucu kül oranı %30 olanlarda bir düşüş görülmektedir. Bu düşüş yerleştirme veya işlenebilirlikten kaynaklandığı söylenebilir, çünkü ters koni akma süresi en fazla yoğunluğunda en düşük olan karışım olduğu, ilgili tablolar incelendiğinde görüle bilmektedir. Uçucu küllü ve uçucu küllü çelik lifli, 90 günlük betonların basınç dayanımlarının bir biriyle karşılaştırıldığında çelik liflerin beton basınç dayanımında olumlu etki yaptığını söylemek doğru olmaz. Bunun nedeni çelik liflerin beton içinde dağılımından kaynaklandığı ve işlenebilirlikten kaynaklandığı söylene bilir. Çünkü karışım suyu sabit tutulduğunda, uçucu kül ve çelik lif betonun işlenebilirliğini olumsuz etkilediği, ilgili tablolar incelendiğinde görülmektedir.

Şekil 4.4’de 7, 28 ve 90 günlük betonlarda basınç sonuçları verilmiştir bu şekil incelendiğinde, zaman geçtikçe uçucu külün etkisini görebiliriz. Uçucu külün olumlu etkisi betonda %20’ ye kadar 28 ve 90 günlükte mükemmel ama arttıkça olumsuz etkiler görünmüştür.

4.4. Eğilmede Çekme Dayanımı Bulguları

Araştırma kapsamında yer alan uçucu küllü ve çelik lifli betonların eğilme dayanımları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Eğilme çekme dayanımı sonuçları

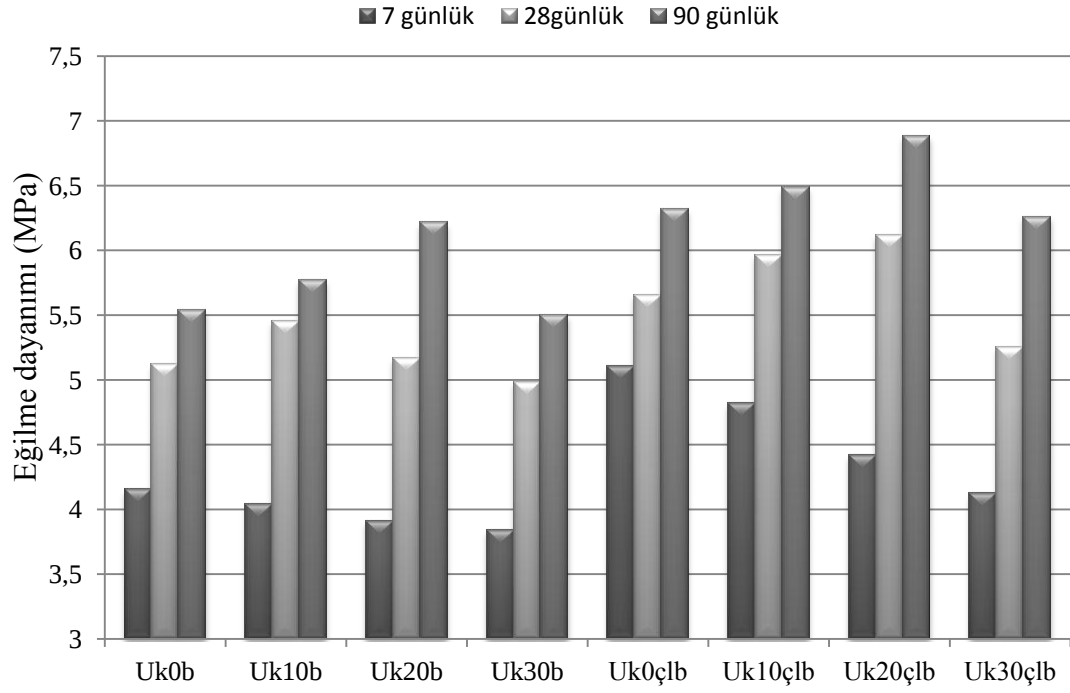
Numune kodu	7 günlük eğilme MPa	28 günlük eğilme MPa	90 günlük eğilme MPa
Uk ₀ b	4,15	5,12	5,54
Uk ₁₀ b	4,04	5,45	5,77
Uk ₂₀ b	3,91	5,17	6,21
Uk ₃₀ b	3,84	4,98	5,5
Uk ₀ çlb	5,1	5,65	6,32
Uk ₁₀ çlb	4,82	5,96	6,49
Uk ₂₀ çlb	4,42	6,12	6,88
Uk ₃₀ çlb	4,12	5,25	6.26

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.5 incelendiğinde uçucu kül artıkça 7 günlük numunelerde düzenli olarak bir azalma görülmektedir. U_k oranı ile eğilmede çekme dayanımı arasında ters ilişki vardır. 7 günlük lifsiz numuneler arasında en iyi sonuç U_{k0b} 'de ve en düşük değer U_{k30b} 'de görülmektedir. 7 günlük lifli numunelerde ise en düşük eğilme değerleri olan numune $U_{k30çlb}$ ve en iyi değer $U_{k0çlb}$ 'da görülmektedir.

28 günlük lifli betonlarda 7 günlük numunelere göre önemli değişiklikler kayıtlı edilmiştir ve lifsiz betonlarda en yüksek değer U_{k10b} de görünürken en düşük değer aynı 7 günlükler gibi U_{k30b} de görülmektedir. Bu eğilmede çekme dayanımı basınç dayanımı arasında oldukça benzer ilişki vardır. 28 günlük çelik lifli betonlarda ise en yüksek değer U_{k20b} 'da görülürken en düşük değer aynı lifli betonlar gibi $U_{k30çlb}$ 'da görülür. Buradaki lifli ve lifsiz olarak 2 gruba ayırdığımızda ve yüksek değerlerinin (U_{k20b} ve $U_{k20çlb}$) bir biriyle karşılaştırdığımızda lifli betonda %18 artış görülmektedir.

90 günlük numunelerde lifli ve lifsiz betonlarda %20 çimento yerine uçucu kül ikame edilene kadar değerlerde artış görülmektedir fakat %30 uçucu kül ikamesinde betonda eğilme çekme değerlerini düşürmüştür. Lifsiz betonlarda en iyi değer U_{k20b} ve lifli betonlarda ise $U_{k20çlb}$ 'da görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre çelik lifli betonlar çelik lifsiz betonlara göre yaklaşık %11 lik bir artış sağlamıştır.

7, 28 ve 90 günlük numunelerin maximum değerleri çelik lifli olanlara aittir ve çelik lifleri bir biriyle karşılaştırdığımızda 28 günlük numuneler 7 günlük numunelere göre %20 ve 90 günlük numunenin en büyük değeri 7 günlük numunenin en büyük dayanıma göre %34 lük bir artış görülürken 90 günlük numunenin 28 günlük numunesinin en büyük dayanımlı numunesine göre, %12 artış göstermektedir. Şekil 4.5 incelendiğinde, eğilme çekme dayanımı üzerinde çelik liflerin bütün yaşlarda olumlu etkisi vardır.



Şekil 4.5. Örneklerin eğilme dayanımlarının gösterilişi

Şekil 4.5'e göre numunelerin yaşları büyüdükçe ve uçucu kül etkisini göstermiş ve dayanımlarda artışlar görülmüştür. Bu deneyde çelik liflerin etkisi olumlu olarak eğilmede net olarak gösterilmiştir. Çelik lifli betonlar Resim 4.1 gibi gevşek ve çelik lifsiz betonlar Resim 4.2 gibi aniden kırıldığı görülmüştür.



Resim 4.1. Çelik lifli betonun kırılması



Resim 4.2. Çelik lifsiz betonun kırılması

4.5. Ultrases Hızı İle Beton Kalite Ölçüm Bulguları

Ultrasonik hız metodu beton içerisinden geçen ultrasonik dalganın, geçme hızını ölçmekten ibarettir. Ölçülen bu hız betonun birçok özelliğini belirlenmesinde kullanılır. Bu teknik, yerinde ve laboratuvar numunelerinde rahatlıkla kullanılabilir. Elde edilen sonuçlar betonun şekline ve büyüklüğünden etkilenmektedir.

Bu çalışmada sekiz farklı oranda beton 100x200 mm boyutunda dökülerek deney uygulanmıştır. Ultrasonik değerleri 28 gün olarak Çizelge 4.5 'de verilmiştir.

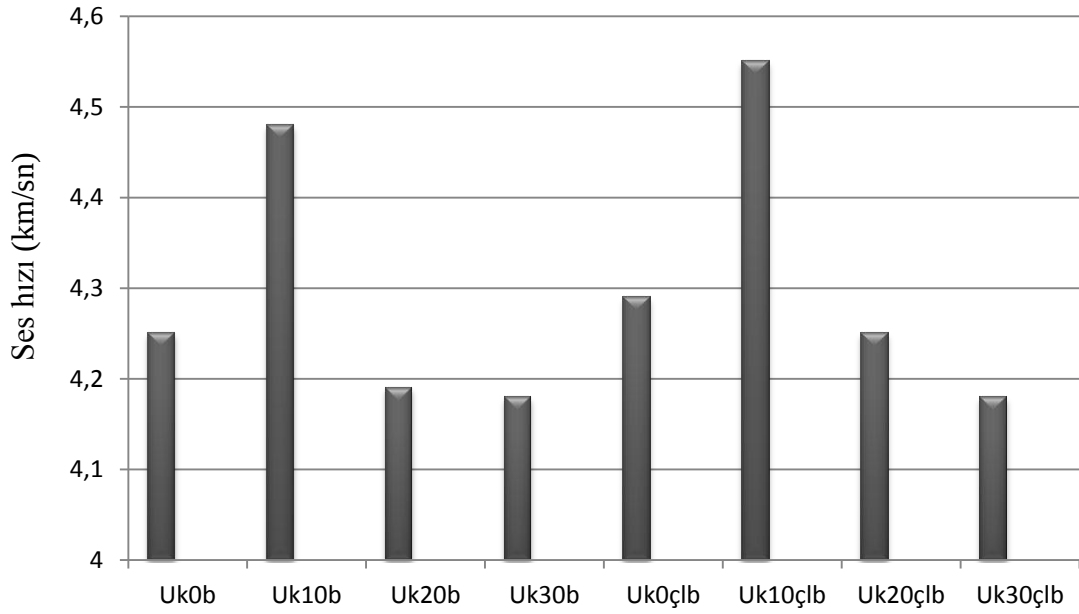
Çizelge 4.5. 28 günlük ultrases hızının deney sonuçları

Numune kodu	Birim ağırlığı	t(saniye)	L(cm)	L(km)	V(km/s)	Beton kalitesi
Uk ₀ b	2390,3	0,000047	20	0,0002	4,25	iyi
Uk ₁₀ b	2413,5	0,000045	20	0,0002	4,48	iyi
Uk ₂₀ b	2403,7	0,000048	20	0,0002	4,19	iyi
Uk ₃₀ b	2388,7	0,000048	20	0,0002	4,179	iyi
Uk ₀ çlb	2358,33	0,000047	20	0,0002	4,29	iyi
Uk ₁₀ çlb	2399	0,000044	20	0,0002	4,55	Mükemmel
Uk ₂₀ çlb	2384	0,000047	20	0,0002	4,255	iyi
Uk ₃₀ çlb	2366,1	0,000048	20	0,0002	4,183	iyi

Çizelge 4.5 ve Şekil4.6 incelendiğinde uçucu küllü çelik lifsiz betonlarda yani birinci grupta en yüksek değer Uk₁₀b 'a ait olurken en düşük değer Uk₃₀b'da görülmektedir. Burada 28 günlük numunelerde uçucu kül %10 ikame edilen betonda en iyi sonuç görülmektedir. Lifli gruplarda ise en iyi değer Uk₁₀çlb de görünürken en düşük değeri Uk₃₀çlb'da olduğu belirlenmiştir.

Lifli ve lifsiz grupların en yüksek değerlerini karşılaştırdığımızda çelik liflerin %2 daha iyi sonuç verdiğini görebiliriz bu sonuç betonun daha iyi ses iletimi ile beton

kalitesini göstermektedir. Bunun nedeni ise uçucu külün boşlukları doldurması ve çelik liflerin taneleri sıkıştırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.6. Beton çeşitleri ve ultra ses hızı ilişkisi

Şekil 4.6’da Çelik lifli betonların daha iyi sonuç verdiği gösterilmektedir.

Çizelge 4.6. Ses hızı ile beton kalitesinin tahmin edilmesi [3]

Ses Hızı (V)km/s	Beton Kalitesi
> 4,5	Mükemmel
3,3-4,5	İyi
3,0-3,5	Şüpheli
2,0-3,0	Zayıf
< 2,0	Çok zayıf

4.6. Aşınma Deneyi Bulguları

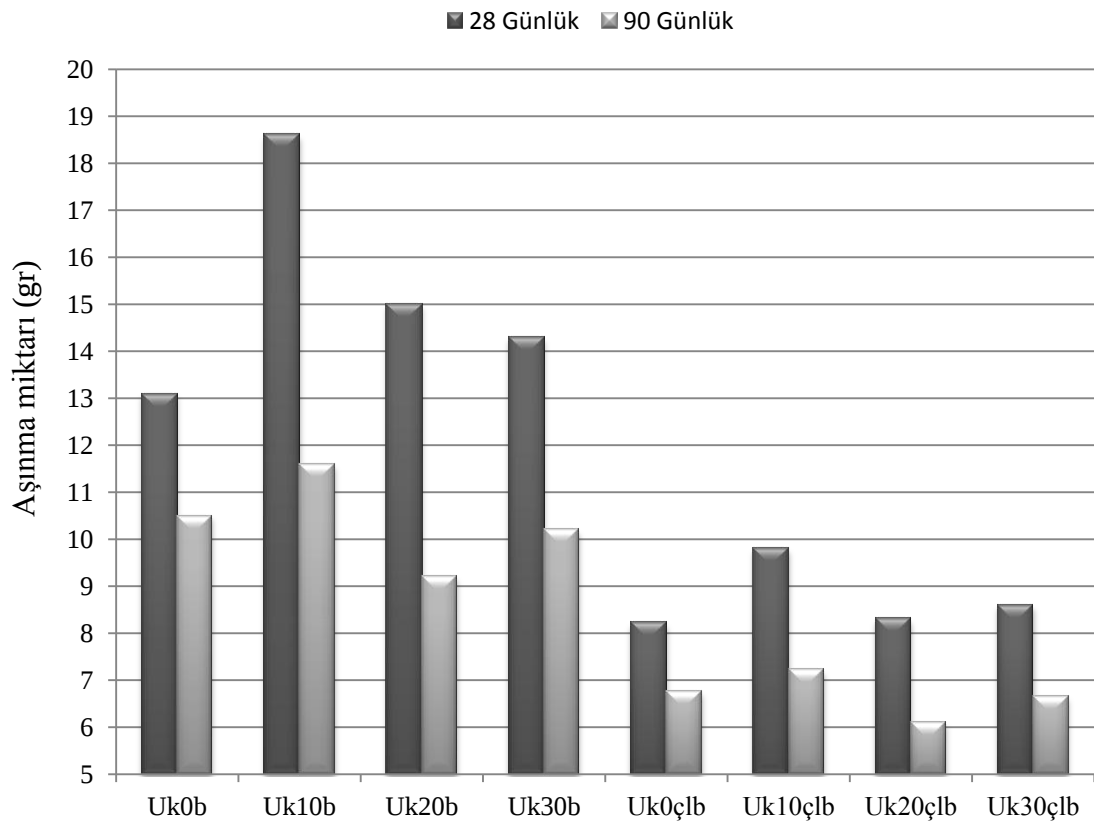
Betonların aşınma özellikleri 28 ve 90 günlerin sonunda belirlenmiştir. Bunun sebebi ise U_k oranlarının beton yüzey sertliği ilişkisini göre bilmektir. Elde edilen sonuçlar çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. 90 ve 28 günlük aşınma miktarları

Numunenin kodu	28 günlük beton				90 günlük beton			
	W_0	W_1	W_2	Aşınma miktarı(g)	W_0	W_1	W_2	Aşınma miktarı(g)
U_{k0b}	1374,9	2291,9	2278,8	13,1	1377,8	2296,2	2285,7	10,5
U_{k10b}	1348,2	2260	2241,4	18,6	1353,2	2265,1	2253,5	11,6
U_{k20b}	1339	2249,4	2234,4	15	1343,6	2254,8	2245,6	9,2
U_{k30b}	1312,4	2163,2	2148,9	14,3	1324,1	2173,5	2163,3	10,2
$U_{k0çlb}$	1429,3	2378,6	2370,38	8,22	1435,2	2384,2	2377,44	6,76
$U_{k10çlb}$	1416,8	2364,8	2355	9,8	1412,4	2355	2347,78	7,22
$U_{k20çlb}$	1439,1	2433,8	2425,5	8,3	1441,8	2429,9	2423,79	6,11
$U_{k30çlb}$	1437,2	2405,6	2397	8,6	1434,5	2399,6	2392,95	6,65

Çizelge 4.7 incelendiğinde 28 günlük lifsiz numuneler arasında en az aşınmayı U_{k0b} verirken en fazla aşınma U_{k10b} ‘a aittir. Lifli betonlarda ise en az aşınma kaybı $U_{k0çlb}$ ‘deyken en yüksek aşınma kaybı $U_{k10çlb}$ ‘da görülmektedir. 90 günlük numunelerde ise lifsiz grupta en az kaybı U_{k20b} ve en yüksek kaybı U_{k10b} ‘da görülmektedir. 90 günlük lifli betonlarda ise en az aşınma kaybı gösteren numunesi $U_{k20çlb}$ ve en fazla aşınma kaybı ise $U_{k10çlb}$ numunelerinde görülmektedir. 90 günlük lifli ve lifsiz betonlarda $U_{k20çlb}$ ve U_{k20b} bir biriyle karşılaştırdığımızda, Çelik lifli numunede %34 artış görülmektedir. 90 günlük ve 28 günlük numunelerin az aşınma miktarı çelik lifli betonlara aittir ve bu çelik liflerin aşınmada olumlu etkisini göstermektedir. 90 günlük numunelerin en büyük değerlerine sahip olan numuneni aynı 28 günlük numuneyle kıyasladığımızda %35 artış göstermektedir.

Şekil 4.7’de sunulduğu sonuçlardan dolayı uçucu kül arttıkça ilk günlerde aşınmanın fazla olması ama zaman geçerek ve beton daha büyük yaşlara geldiğinde aşınmanın azalmasını göre biliriz, özellikle çelik lif katılan betonlar çelik lifli betonlara göre aşınmaya karşı daha güçlülerdir. Çizelge 4.8’de 28 ve 90 günlük numunelerin aşınma katsayıları verilmiştir.



Şekil 4.7. Beton çeşitleri aşınma miktarı ilişkisi

Çizelge 4.8. 28 ve 90 günlük aşınma dayanıklılığı katsayısı

Numune kodu / Numune yaşı	Uk ₀ b	Uk ₁₀ b	Uk ₂₀ b	Uk ₃₀ b	Uk ₀ çlb	Uk ₁₀ çlb	Uk ₂₀ çlb	Uk ₃₀ çlb
28 gün	0,052	0,068	0,054	0,056	0,033	0,04	0,034	0,035
90 gün	0,042	0,046	0,037	0,04	0,027	0,029	0,025	0,027

4.7. Kapilar Su Emme Katsayı Bulguları

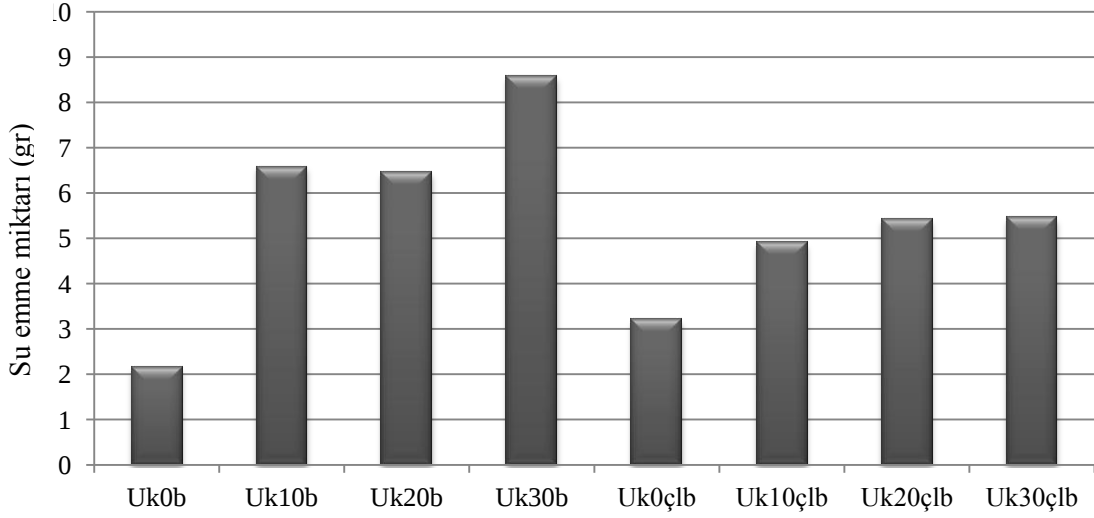
Deney numuneleri 1, 2, 4, 8, 12, 24 saat sonrası su emme miktarları ölçülmüştür.

Bu deney sonucunda elde edilen su emme katsayıları Çizelge 4.9 ile Şekil 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.9. Kapiler su emme miktarları

Numune kodu	Kuru Ağırlık	1saat Sonra	2 saat Sonra	4 saat Sonra	8 saat Sonra	12saat Sonra	Kapiler Kat Sayısı cm^2/sn
Uk ₀ b	2405,86	2407,12	2407,61	2407,78	2407,89	2408,03	$1,044 \times 10^{-4}$
Uk ₁₀ b	2327,42	2330,47	2331,63	2333,80	2333,90	2334,04	$3,185 \times 10^{-4}$
Uk ₂₀ b	2361,86	2355,55	2367,03	2367,34	2367,73	2368,32	$3,108 \times 10^{-4}$
Uk ₃₀ b	2198,90	2205,56	2206,42	2206,96	2207,48	2207,48	$4,128 \times 10^{-4}$
Uk ₀ çlb	2359,96	2361,83	2362,05	2361,22	2361,53	2363,16	$1,54 \times 10^{-4}$
Uk ₁₀ çlb	2273,44	2274,95	2276,03	2277,16	2278,29	2278,38	$2,377 \times 10^{-4}$
Uk ₂₀ çlb	2296,34	2300,38	2300,87	2301,17	2301,47	2301,77	$2,612 \times 10^{-4}$
Uk ₃₀ çlb	2360,14	2362,42	2363,47	2365,51	2365,59	2365,59	$2,622 \times 10^{-4}$

Çizelge 4.9 incelendiğinde uçucu kül oranı artarak su emmede büyük artışlar görülmektedir. Çelik lifsiz betonlarda en iyi sonuç Uk₀b ‘da ve en düşük değer Uk₃₀b’da görülmektedir. Çelik liflilerde uk₀çlb en az su emmiş olurken Uk₃₀çlb en fazla kapiler su emme katsayısına sahiptir.



Şekil 4.8. Beton çeşitleri ve su emme ilişkisi

kat arttırmıştır. Çelik lif ikame edildiği zaman su emme miktarı 50'ye kadar düşüş göstermiştir. Fakat dikkat etmemiz gereken konu ise, uçucu kül ikamesi olmadığı durumunda çelik lifin su emmede olumsuz etkisi olmuştur. Örneğin Uk₀b'a çelik lif ilave edildiğinde (Uk₀çlb) kapiler kat sayısında %47 artış görülmektedir. Ama Uk₃₀b'a çelik lif ekleyip ve Uk₃₀çlb betonu elde ettiğimizde kat sayısının %57 azalması söz konusudur. Bu sonuçlara dayalı çelik lifler ikame edildiğinde, uçucu küllü betonlarda su emme miktarında düşüşler olmuştur. Bu nedenle uçucu kül kullandığımız betonlarda çelik lifin daha yararlı olması kaçınılmazdır.

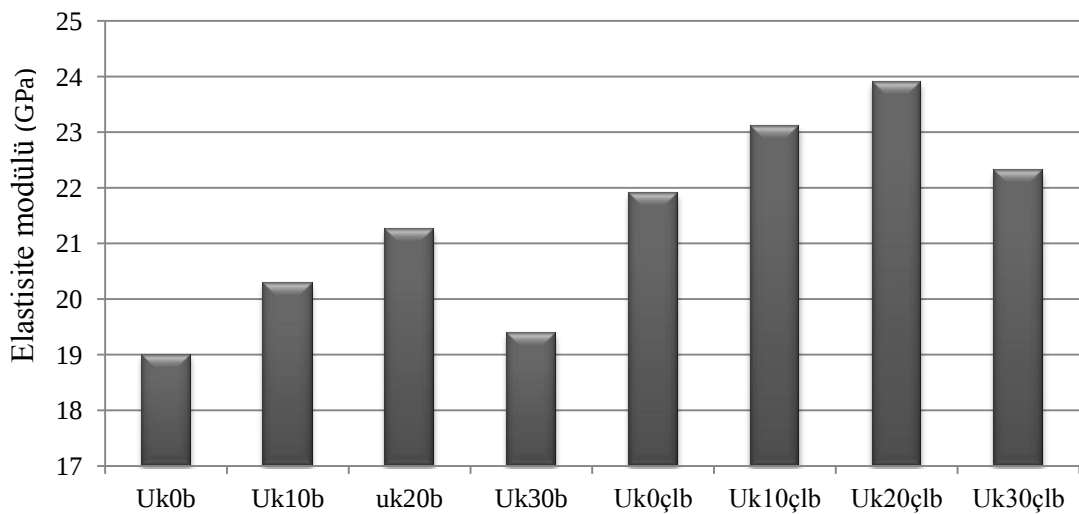
4.8. Statik Elastisite Modülü Bulguları

Çelik lifle güçlendirilmiş uçucu küllü ve külsüz beton gruplarının elastisite modülü tayini deneyleri 28 günlük 100×200 mm'lik silindir numuneler üzerinde ölçülmüştür. σ - ϵ eğrisinin üzerinde maksimum gerilme değerinin %40'ına karşılık gelen gerilme değeri belirlenmiş ve hem σ - ϵ eğrisinin başlangıç noktasından hem de belirlenen bu noktadan geçen bir doğru çizilmiştir. Çizilen bu doğru çizgi, betonun σ - ϵ eğrisi gibi kabul edilmiş ve bu doğrunun eğimi hesaplanmıştır. Çelik lifle güçlendirilmiş normal ve uçucu kül katkılı betonların 28 günlük silindir basınç dayanımları ile 28 günlük elastisite modülleri Çizelge 4.10 ile Şekil 4.9'da sunulmuştur.

Çizelge 4.10. Günlük basınç ve modül elastisite değerleri

Numune kodu	28 günlük basınç (MPa)	Kontrol betona göre değişimler%	28 günlük elastisite modülü (GPa)	Kontrol betona göre değişimler%
Uk ₀ b	31,9	-	19	-
Uk ₁₀ b	33,8	+5	20,28	+6
Uk ₂₀ b	32,7	+2	21,25	+11
Uk ₃₀ b	29,7	-6	19,39	+2
Uk ₀ çlb	30,5	-4	21,9	+15
Uk ₁₀ çlb	31,5	-1	23,1	+21
Uk ₂₀ çlb	31,8	-0,3	23,9	+25
Uk ₃₀ çlb	29,1	-8	22,3	+17

Çizelge 4.10 incelendiğinde uçucu kil belli bir oranda olarak elatisite modülünde artışlar görülmektedir fakat çimento ile yer değişen uçucu kül %20 den fazla olduğu zaman elastisite modülünde daha kırılgan olduğu için olumsuz etkiler yapmıştır. Lifsiz beton grubunda Uk₂₀b numunesi en iyi değeri göstermiş ve lifli betonlarda ise aynı karışım yani Uk₂₀çlb'da en iyi sonuç görülmektedir. Bu iki grubun en yüksek elastisite modülü sonuçlarını karşılaştırdığımızda çelik lif katkılı betonlarda elastisite modülü %13 artış göstermektedir. Bu artışın nedeni çeliğin elastisite modülünün fazla olması ve onu betona aktarmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.9. Elastisit modülü grafiği

4.9. Enerji Yutma Kapasitesi

Enerji yutma deneyi 90 günlük numune betonlar üzerinde yapılmıştır. Toplam olarak 24 adet 80×500×500 mm ölçüde plak beton dökülmüştür. Bu 24 plak sekiz farklı beton olarak ve her karışımdan 3 numune yapıp ve değerlerden ortalama alınmıştır. Bu plaklar ASTM C1018 'de verilen kurallara göre basınç pres cihazında deneyler yapılmıştır. Çizelge 4.11 ile Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

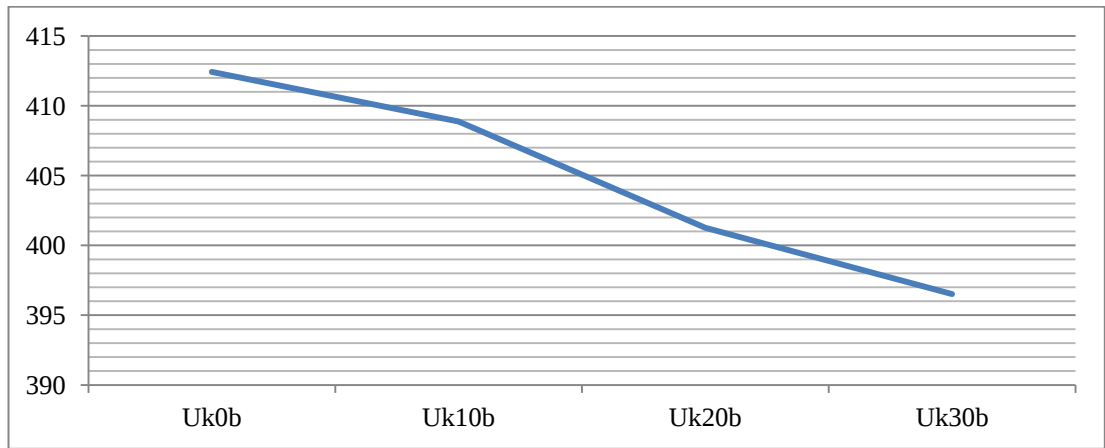
Çizelge 4.11. Enerji yutma değerleri

	Beton kodu	I _{ilk}	I ₅	I ₁₀	I ₂₀
LİFSİZ BETON	Uk ₀ b	412,43	1	1	1
	Uk ₁₀ b	408,87	1	1	1
	Uk ₂₀ b	401,26	1	1	1
	Uk ₃₀ b	396,51	1	1	1
LİFLİ BETON	Uk ₀ çlb	462,33	4,92	8,74	17,23
	Uk ₁₀ çlb	506,79	5,67	10,96	21,16
	Uk ₂₀ çlb	497,31	5,43	9,54	18,32
	Uk ₃₀ çlb	440,46	4,79	8,44	17,11

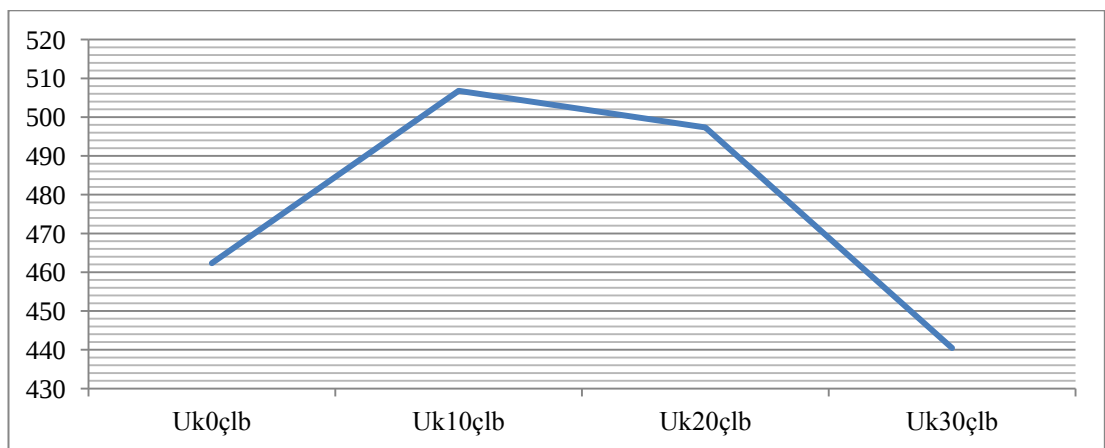
Betona lif ilave edilmesi ile tokluğun önemli derecede geliştiği, bununla birlikte enerji yutma kapasitesindeki artış dikkat çekicidir. Bu bağlamda çelik lif donatılı elemanlarda çelik lif içeriği optimum düzeyde değiştirilerek istenen çözümler elde edilebilir. Böylece üretilecek sünek davranış ile şok yüklemelere ve deprem sırasında oluşabilecek yüklere karşı kararlı bir davranış elde edilebilir. Bu deneyde plakların kırılmaları farklıydı. Çelik lifli betonlar çatlama noktasına vardıklarından sonra lif dolayısı ile kendilerinden direnç göstererek daha fazla dayanarak enerjini daha fazla yuttukları kesin edilmiştir Resim 4.3'de çelik lifli betonların kırılma modelleri görüntülenmiştir.



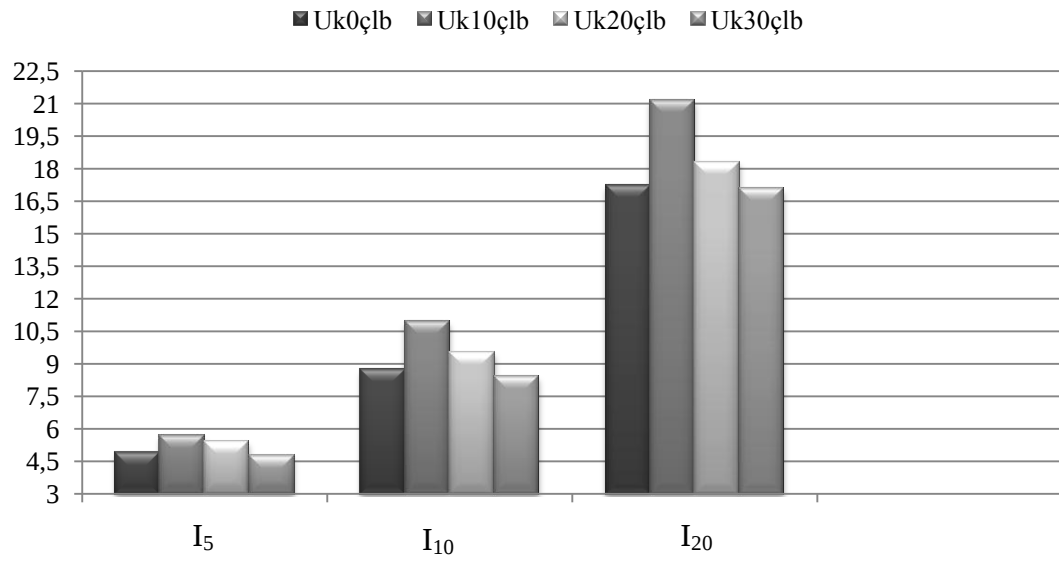
Resim 4.3. Lifli betonların kırılma modelleri



Şekil 4.10. I_{ilk} miktarının lifsiz numunelerde eğrisi



Şekil 4.11. I_{ilk} miktarının lifli numunelerde eğrisi



Şekil 4.12. Enerji yutma değerlerinin grafiği

4.10. Örneklerde Karbonatlaşma

Karbonatlaşma sonuçları uçucu kül ikameli çelik lifli ve çelik lifsiz betonlarda 28 ve 90 günlük örnekler üzerinde yapılmıştır. Beton örnekler üzerinde elde edilen değerlerin aritmetik ortalamaları Çizelge 4.12’de verilmiştir.

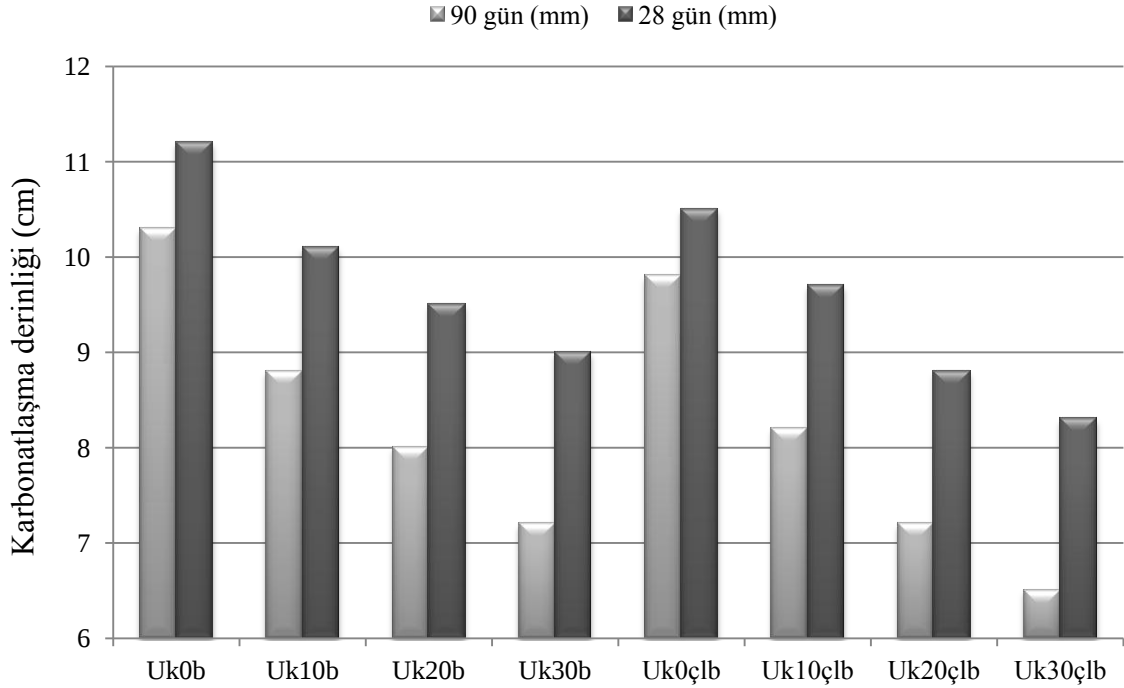
Çizelge 4.12. Karbonatlaşma derinlikleri

Numune kodu	28 gün (mm)	Kontrol betona göre karbonatlaşma azalması, %	90 gün (mm)	Kontrol betona göre karbonatlaşma azalması %
Uk ₀ b	11,2	---	10,3	Kontrol beton
Uk ₁₀ b	10,1	10	8,8	14
Uk ₂₀ b	9,5	18	8	22
Uk ₃₀ b	9	20	7,2	30
Uk ₀ çlb	10,5	6	9,8	5
Uk ₁₀ çlb	9,7	15	8,2	20
Uk ₂₀ çlb	8,8	21	7.2	30
Uk ₃₀ çlb	8,3	25	6,5	37

Çizelge 4.12’de baktığımız değerler uçucu külün etkisini bize zaman geçerek daha fazla olduğunu yansıtmaktadır. Karbonatlaşma betonun daha fazla kürede kalmasıyla ters bir değerleri vardır. Yani normal betonda baktığımızda 28 ve 90 günlük beton arasında 3 mm’lik farkı göre biliriz.

Çizelge 4.12 ile Şekil 4.13 incelendiğinde 28 günlük çelik lifsiz numunelerde en fazla karbonatlaşma olan numuneler Uk_0b ve en az karbonatlaşma gösteren karışım $Uk_{30}b$ ’da görülmektedir. 28 günlük çelik lifli betonlarda ise Uk_0b ve $Uk_{30}çlb$ sıra ile en fazla ve az karbonatlaşma gösteren numunelerdir.

90 günlük numunelerde lifsiz betonlarda en az karbonatlaşma olan numune %30 uçucu kül kullanılan numune ve en fazla karbonatlaşan uçucu külü olmayan şahit betondur ve 90 günlük çelik liflerde bile bu sonuçlar tekrar olarak yani sıra ile en az ve en fazla karbonatlaşan numuneler Uk_0b ve $Uk_{30}çlb$ lardılar. Bu deneyde karışmış olan fenol fetalin ve alkolla yapılmış karışımın etkisi Resim 4.4’de verilmektedir. Mor olan yerlerde betonun sağlam ve rengi değişmeyen kısımların derinlik miktarı karbonatlaşmanın miktarını göstermektedir.



Şekil 4.13. Karbonatlaşma ve değerlerinin grafiği

Karbonatlaşma miktarı daha fazla yapıldığında ve U_{k0b} 28 ve 90 günlük numunelerini bu kıyasladığımızda karbonatlaşma daha düşük bir miktar göstermektedir. Yani bizim karbonatlaşmayı etkileyen faktörlerden biri yapılmış olan kürün kalitesidir. Deneylerden elde edilen değerlere baktığımızda çimento ağırlığı uçucu kül ikame ettiğimiz betonlarda karbonatlaşma miktarında azalmalar görülmektedir. Bunun asıl nedeni CaO miktarının betonda düşmesidir, çünkü kullandığımız uçucu külün CaO yüzdesi yaklaşık kullandığımız çimento CaO miktarının dörtte biridir ve buda CaO karbonatlaşmanın temel unsuru olmaktan dolayı karbonatlaşmada azalma göstermiştir. Uçucu kül miktarı yükseldikçe karbonatlaşma azalmıştır. 28 ve 90 günlük U_{k10b} numunenin sonuçlarına baktığımızda normal betonumuz olan U_{k0b} 'a göre sıra ile %10 ve %14 karbonatlaşmada düşüşler görülmektedir. 28 ve 90 günlük $U_{k10çlb}$ betonlarda normal betona karşı karbonatlaşma miktarında sıra ile %13 ve %18 düşüş göstermektedir bu değerlere dayanarak çelik lifin %1 kullandığımız karışımlarda karbonatlaşmanı lifsiz betonlara göre azalması dikkat çekicidir, bunun neden ise çelik lif kullanarak betonların daha az su emmesine sebep olmasını düşünülür. resim 4.4'de karbonatlaşmış bir beton görünmektedir.



Resim 4.4. Betonda karbonatlaşma etkisi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada sonuç olarak:

- Uçucu kül oranı arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır.
- Uçucu kül ve çelik lif oranı arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır.
- Uçucu kül ikamesi ve çelik lif katılığı betonların yoğunluklarına önemli bir etki etmediği saptanmıştır.
- Uçucu kül ikamesi oranları 7 günlük basınç dayanımını olumsuz etkilemektedir. 28 günlük basınç dayanımı üzerinde %10 Uçucu kül oranı azda olsa olumlu etki göstermiştir. Fakat 90 günlük betonlara değişik deneylerde Uçucu kül %10 ve %20 katıldığı belirgin bir artış sağlayarak olumlu etki ettiği görülmüştür.
- 90 ve 28 gün yaşlarda ve Uçucu kül oranların çelik lifin belirgin bir artış görülmektedir.
- Eğilme dayanımlarında Uçucu kül'ün etkisi basınç dayanımına paralel etki göstermiştir. Çelik lifin ise etkisi 28 ve 90 günlük eğilme dayanımına olumlu etki ettiği saptanmıştır. En yüksek eğilme dayanımı %20 Uçucu kül oranı ile hazırlanan betonda görülmüştür.
- Ultra ses hız geçiş özelliği Uçucu kül oranına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. En yüksek geçiş hızı $U_{k10\phi lb}$ örneklerde bulunmuştur.
- 28 ve 90 günlük betonlarda aşınma kaybı Uçucu kül oranlarına bağlı olarak değişim göstermektedir. En yüksek kayıp %10 Uçucu kül oranı ile elde edilen betonlarda görülmüştür. Çelik lifli betonlarda lifler aşınma kaybını azaltılmıştır. En düşük aşınma kaybı %20 Uçucu kül çelik lifli betonlarda saptanmıştır.
- Kapiler su emmesi %30 Uçucu kül oranı ile üretilen betonlarda en yüksek veri saptanmıştır. Çelik lifin kapiler su emmeyi azalttığı görülmüştür.
- Betonun elastisite modülü basınç dayanımı ile paralellik göstermiştir.
- Uçucu kül ikamesi betonun enerji yutmasına etkisi çok az olmuştur. Çelik lifli betonlarda enerji yutma daha yüksektir. En yüksek enerji yutma kapasitesi $U_{k10\phi lb}$ betonlarda saptanmıştır.

- Uçucu kül oranları karbonatlaşma derinliği ile ters ilişkiye sahip olduğu saptanmıştır. Uçucu kül oranı arttıkça CaO'in azalması karbonatlaşmada düşüşler görülmektedir.

Öneriler:

Bundan sonraki çalışmalarda uçucu kül miktarının %5 olarak artması ve çelik lif miktarı farklı oranlarda denenmeli ve karbonatlaşma belirlenmelidir. Ayrıca Uçucu kül oranlarıyla üretilen lifli betonlar agresif ortamlarda özellikleri belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

1. Arslan, A. ve Aydın, A. C., “Lifli betonların darbe etkisi altındaki genel özellikleri”. Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, **Sabancı Center, İsta**, 1-30 (1999).
2. Halilov, S., “Silis Dumanı ve Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Lifli Betonların Özellikleri”. Doktora Tezi. **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Temmuz, Ankara,38-42, 64-73 (2003).
3. Şimşek, O., “Beton ve Beton Teknolojisi” 3, **Seçkin Yay. San. ve Tic. A.Ş**, Ankara, Pp23,46,153-172,97-109, (2004).
4. Parvin, A., And Granata, P., “Investigation on The Effects of Fiber Composites at Concrete Joints, Composites”, **international journalofelectrochemical science**, 31,2000, 499-509 (1987)
5. Karahan, O ., "Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri ", Doktora Tezi, **Çukurova Üniversitesi;Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, İnşaat Mühendisliği, 28-65 (2006).
6. Eren, A.Ü., "Betonlarda Karbonatlaşmanın geçirimsizlik ve kılca üzerinde etkileri", Doktora Tezi, **İstanbul teknik üniversitesi, inş Fak**, İstanbul, 36-45, 53-59 (1989).
7. Sway, R.N., “Fiber Reinforcement of Cement and Concrete Eveluation of Fiber Reinforcement Cement and Composites,” **Commitee,Materials and Structures**, Vol.8,No.45;pp233-245 (1971).
8. Arslan, A., Lucan, Z.Ç., “Çelik Liflerin Erken Yaştaki Betonarme Kirişlerin Göçmesine Etkisi”, **IMO Teknik Dergi** , pp 1507-15159 (1998).

9. Ouchi M, "History of Development and Applications of Self-Compacting Concrete in Japan", *Proceedings of the First International Workshop on Self-Compacting Concrete*, (1998).
10. Şimşek, O., Sancak, E., ve ErdaL, M., "Silis dumanının çelik lif ile birlikte kullanımının betonun özelliklerine etkisi" *Gazi Üniversitesi Mimarlık –Mühendislik Fakültesi Dergisi (yayımda)*, Ankara (2004).
11. Ersoy, U., "Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı", *O.D.T.İnşaat Mühendisliği Bölümü* .,4.Baskı Evrim Yayın Ei: Ankara, 17-18 (1985).
12. Erdoğan, Y.H., "Beton1" *Baskı Orta Doğu Teknik Üniversitesi.İnş Fak.,Metu Press.*, Ankara, 550-580 (2003)
13. Luther, M.D.And Bauer.,KC ., "Using High Strength Concrete Simplifies Column Design, Concrete Construction", *V.32,no.6*, pp 546-547 (1987).
14. Yılmaz, Ş., "Seyitömer Termik Santrali Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi" , *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul,45-66 (1992).
15. Tokyay, M., Erdoğan, K., "Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu", *TÇMBARGE*, Ankara, 95-98 (1998).
16. Verma, C.L., Handa, S.K., Jain, S.K., "Techno-commercial Perspective Study for Sintered Fly Ash Lightweight Aggregates in India", *Construction and Building Materials, Cilt 12*, No 6-7, 341-346 (1998).
17. Aruntaş, H.Y., "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli " *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 21*, No 1,,06500 Ankara, 193-203 (2006).
18. ELE., "Türkiye uçucu küllerinin özellikleri", *EİE Yayını*. Ankara, 82. 21-28 (1982).

19. Görhan, G., Kahraman, E., Baspınar, S., Demir, İ., “Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt:* 5, No: 2, 33-42 (2009).
20. Türker, P., Erdoğan, K., “Effects of Different Particle Size Fractions of Fly Ash on Strength of Fly Ash Incorporated Mortars”, **1st International Symposium on Mineral Admixtures in Cement**, İstanbul, 117-124, 6-9 November (1997).
21. Ecoba. (2001). *Information Bulletin*, Rom, Italy, (2001).
22. Erdinç, M.. “Uçucu Küllü Betonlarda Dayanım ve Klor Geçirirliiliği”,*İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 143-145 (1995).
23. Tokyay, M. ve Ark., “Termik Santral Küllerinin Çimento ve Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılma İmkanlarının Etüt ve Envanteri Projesi Raporu”. *TC Başbakanlık Çevre Müsteşarlığı, Teknoloji ve Ekonomi Dairesi Başkanlığı*, Ankara, (1990).
24. Malhotra, V. M., Ramezaniyanpour, A. A.,. “Fly ash in Concrete”, **2 nd Edition, Canmet**, MSL94-45CIR, (1994).
25. Hearn, N., Hooton, R. D., and Mills, R. H., “Pore Structure and Permeability”, *Concrete and Concrete-Making Materials*, Edited by: Klieger, P. and Lamond, J., ASTM STP 169C, 240-262 (1994).
26. Nawy, E. G.,. “Fundamentals of High-Performance Concrete”, *JohnWiley and Sons*, Canada, 441p (2001).
27. Newman, J., Choo, B. S., “Advanced Concrete Technology”,*Butterworth-Heinemann*, An Imprint of Elsevier, (2003).
28. Toutanji, H., Delatte, N., Aggoun, S., Duval, R., Danson, A.,. “Effect of Supplementary Cementitious Materials on The Compressive Strength and Durability

- of Short-Term Cured Concrete”, ***Cement and Concrete Research***, Vol. 34, pp. 311-319 (2004).
29. Morrison. R.E. “A Review of Ash Specifications.”***Symposium on Fly Ash Utilization***, Pittsburgh, pp. 24-31 (1970).
30. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T.,. “Effectof Fly Ash Fineness on Compressive strength and Pore Size of BlendedCement Paste” ***Cement and Concrete Composites***, Vol. 27, 425-428 (2005).
31. Shah, S.P., Balaguru, P.N.,. “Fiber-Reinforced Cement Composites. McGraw-Hill Inc”, ***ACI JOURNAL***, Singapore, 399-408 (1992).
32. Selçuk Güner , M, “Beton Teknolojisi”1. Baskı , ***Sirkeci*** , İstanbul , (1999).
33. Yalçın, H. and Koç, T.,“Brtonarme Demirlerinin Korozyonu ve Önlenmesi”, 1.Baskı, ***Gazi Üniversitesi***, Ankara, pp254 -262 (2004).
34. Khan, M. I., Lynsdale, C. J.,“Strength, permeability, and Carbonation of High Performance Concrete”, ***Cement and Concrete Research***, Vol. 32, pp. 123-131, (2002).
35. Gönen, T., and Yazıcıoğlu, S.,“Betonda Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi ve Aparatı”, Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü;Elazığ., ***Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic*** Cilt: 8 Sayı: 2 s.Elazığ, 233-237 (2005).
36. Erdoğan, T.Y.,“Admixtures for Concrete” ,***Middle East Technical University Press***,Ankara ,66-67 (1977).
37. TS EN 450–1, “Uçucu Kül - Betonda Kullanılan -Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2008).

38. TS EN 197-1, “Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Şubat(2005).
39. TS EN 197-1,. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.(2002).
40. ASTM C618, 2005 “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, Annual Book of ASTM Standards, (2005).
41. TS EN 12390-5,2002 “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri- ”Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. (2002).
42. TS EN 12390-3,. 2003, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: “Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini”. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. (2003).
43. TS 10515, 1992, Beton-Çelik Tel Takviyeli–“Eğilme Mukavemeti Deney Metodu”. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. (1992).
44. TS 10514, 1992. Beton-Çelik Tel Takviyeli-Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.(1992).
45. TS 802, 1985. Beton Karışım Hesapları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (1985).
46. TS 3530 EN 933-1, 1999. Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1:“Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Elleme Metodu. Türk Standartları Enstitüsü”, Ankara, (1999).

47. ASTM C 618, 1998. "Standart Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete", Annual Book of ASTM Standards, No.4, SAU, (1998).
48. ASTM C 1018-97, 1997. "Standart Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete". American Society of Testing and Materials, USA, (1997).
49. TS 3502, 1981. "Betonda Statik Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Tayini". Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, (1981).
50. TS EN 12390-7, Nisan 2002. BETON - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: "Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini". Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened Concrete, Ankara, (2002).
51. ASTM C995-01, 2008. "Standard Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone", Withdrawn, (2008).
52. ASTM C597-09, 1994. "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete", USA, (1994).
53. ASTM C143 / C143M - 10a "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete", USA, (1998).
54. EN 933-1, Nisan 1999. Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: "Determination of particle size distribution - Sieving method," UK, (1999).
55. ASTM C 125 , 1994. "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates" , Annual Book of ASTM Standards, USA, (1994).
56. İnternet: Looking For Carbon Dioxide , wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide (2007) .

57. İnternet: Carbon Dioxid İnformation Analysis,
[http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/\(2009\).](http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/(2009).)
58. İnternet:Ankara su analizi,(2011)
[http://www.google.com/search?sourceid=navclient&aq=0&oq=http%3a%2f%2fwww.aski.gov.tr&hl=tr&ie=UTF8&rlz=1T4ADFA_trTR422TR423&q=http%3a%2f%2fwww.aski.gov.tr%2f&gs_upl=0l0l0l4063llllllllll0&aqi=s1\(2011\)](http://www.google.com/search?sourceid=navclient&aq=0&oq=http%3a%2f%2fwww.aski.gov.tr&hl=tr&ie=UTF8&rlz=1T4ADFA_trTR422TR423&q=http%3a%2f%2fwww.aski.gov.tr%2f&gs_upl=0l0l0l4063llllllllll0&aqi=s1(2011))
59. Uçucu külün özellikleri:
http://www.google.com/search?q=u%C3%A7ucu+k%C3%BCl&hl=tr&rlz=1T4ADF_A_trTR422TR423&prmd=imvns&source=lnms&tbm=isch&ei=ljnTT-eKK8fAtAbYksHrDw&sa=X&oi=mode_link&ct=mode&cd=2&ved=0CEwQ_AUoAQ&biw=1280&bih=563

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Soyadı,adı	:BAHARAVAR, Seyed Rahim
Uyruğu	:Y.U
Doğum tarihi ve yeri	:13.09.1980 İran
Medeni hali	:Bekar
Telefon	:0537 913 5332
e-mail	:seyedbah80@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
lisans	Azad Üniversitesi/İnşaat Bölümü	2008
lise	Rezayi Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2002-2008	Bahar İnşaat Firması	Beton Kontroler

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Satranç, Eski müzikler,

