

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK VE KARBON LİFLİ HARÇLARIN
SÜLFAT ETKİLERİNE DAYANIKLILIĞININ
İNCELENMESİ

Berna KIZILILGIN

Şubat, 2009

İZMİR

**ÇELİK VE KARBON LİFLİ HARÇLARIN
SÜLFAT ETKİLERİNE DAYANIKLILIĞININ
İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi
Anabilim Dalı**

Berna KIZILILGIN

**Şubat, 2009
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

BERNA KIZILILGIN, tarafından **DOÇ. DR. SELÇUK TÜRKEL** yönetiminde hazırlanan **“ÇELİK VE KARBON LİFLİ HARÇLARIN SÜLFAT ETKİLERİNE DAYANIKLILIĞININ İNCELENMESİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Doç. Dr. Selçuk TÜRKEL

Danışman

.....

Jüri Üyesi

.....

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sũresince beni destekleyen, bilgi ve birikimlerinden yararlandığım danışman hocam Sayın Doç. Dr. Selçuk Tũrkel'e, bana ayırdığı zaman ve verdiği tũm emekleri için sonsuz teőekkũr ederim. Ayrıca tecrũbeleri ile katkıda bulunan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Bũlent Baradan'a ve deneysel çalıőmalarına hoőgũrũsũyle yardım eden sayın hocam Yũk. İnő. Mũh. Burak Felekoğlu'na teőekkũrlerimi sunarım.

Sadece bu çalışmam boyunca değil, tũm yaőamım boyunca desteği ile yanımda olan, benden sevgi ve őefkatini hiçbir zaman esirgemeyen canım annem Őzgũr Kızılılđın'a, babam Ergũn Kızılılđın'a, ablam Hũlya Kızılılđın'a ve kardeőim Banu Kızılılđın'a; her zaman ve her konuda yanımda olan, moral kaynağım tũm dostlarıma sonsuz teőekkũrlerimi sunarım.

Berna KIZILILGIN

ÇELİK VE KARBON LİFLİ HARÇLARIN SÜLFAT ETKİLERİNE DAYANIKLILIĞININ İNCELENMESİ

ÖZ

Bu çalışmada, çelik ve karbon mikroliflerin farklı dozajlarında çimento harçlarında kullanımının sülfata dayanıklılığı incelenmiştir.

Çalışma kapsamında, farklı lif dozajlarında ve farklı uçucu kül ikame oranlarında kontrol karışımı dahil olmak üzere toplam 28 harç karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımlar üzerinde yayılma çapı, eğilme, eğilme sonrası basınç ve boy ölçüm deneyleri uygulanmıştır. Harç numuneleri 28 ve 150 gün suda ve 150 gün sülfatta bekletildikten sonra numunelerin eğilme dayanımı, eğilme sonrası basınç dayanımları belirlenmiştir. 150 gün suda ve 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin her orandaki uçucu kül ikamesi için, en az ve en fazla lif hacmi içeren karışımların da tokluk değerleri saptanmıştır. Ayrıca her farklı harç karışımı için haftalık boy ölçümleri alınmıştır. Sülfatın farklı lif ve uçucu kül oranları ile hazırlanmış harç örnekleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Çelik mikrolif, karbon mikrolif, uçucu kül, sülfat etkisi

INVESTIGATION ON DURABILITY OF STEEL AND CARBON FIBER MORTARS TO SULFATE EFFECT

ABSTRACT

In this study, durability of steel and carbon microfiber usage which are added to the cement composites as different dosages, to sulfate effects are researched.

In the scope of this study, in different microfiber dosages and different fly ash adding ratios, totally 28 mortar mixes are prepared including control mixture. Creep diameter, flexure, compression after flexure and length measure experiments are applied on these mixtures. After the mortar samples are held during 28 and 150 days in water, 150 days in sulfate, flexural strength and compressive strength after flexure are determined. Toughness values of the samples including minimum and maximum microfiber volume, which are held during 150 days in water and 150 days in sulfate, for every ratios of fly ash adding, are determined. Besides, weekly length measures are taken for every different mortar mixtures. Sulfate effects are investigated on mortar samples prepared with different ratios of microfiber and fly ash.

Keywords: Steel microfiber, carbon microfiber, fly ash, sulfate effect.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ SINAV SONUÇ FORMU.....	iii
TEŞEKKÜR	iv
ÖZ.....	v
ABSTRACT.....	vi
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 Lifli Kompozitler	3
2.1.1 Lif Donatılı Betonlar	3
2.1.2 Lifli Betonda Kullanılan Lif Tipleri.....	5
2.1.2.1 Çelik Lifler	6
2.1.2.1.1 Çelik Liflerin Sınıflandırılması	8
2.1.2.1.2 Çelik Liflerin Performansları	9
2.1.2.1.3 Çelik Lif Beton Karışım Esasları ve Kullanım Oranları.....	10
2.1.2.1.4 Çelik Lif Karışım Yöntemleri	11
2.1.2.1.5 Çelik Lif Kullanım Oranları.....	12
2.1.2.1.6 Çelik Lifli Betonlarda Taze Beton Özellikleri	13
2.1.2.1.7 Çelik Lifli Betonlarda Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	15
2.1.2.1.8 Çelik Liflerin Beton İçerisindeki Davranışı	32
2.1.2.1.9 Çelik Liflerin Kullanım Alanları	34
2.1.2.1.10 Çelik Liflerle İlgili Önceki Çalışmalar	35

2.1.2.2 Karbon Lifler.....	49
2.1.2.2.1 Karbon Lif Hammaddeler	54
2.1.2.2.2 Karbon Lif Yapısı ve Mekanik Özellikler	55
2.1.2.2.3 Karbon Liflerin Gelecekteki Yeri.....	58
2.2 Uçucu Kül.....	60
2.2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması	62
2.2.2 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	63
2.2.3 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Minerolojik Özellikleri.....	66
2.2.4 Uçucu Küllerin Puzolanik Dayanım Aktivite İndeksi	68
2.2.5 Uçucu Küllerin Standartları ve Sınırları	69
2.2.6 Uçucu Küllerin İkame Metotları	70
2.2.7 Uçucu Küllerin Beton Özellikleri Üzerine Etkileri.....	71
2.2.7.1 Su İhtiyacı ve İşlenebilirlik.....	71
2.2.7.2 Priz Süresi Hidratasyon Isısı ve Kanama.....	72
2.2.7.3 Dayanım.....	73
2.2.7.4 Dayanıklılık.....	73
2.2.7.5 Ekonomi.....	74
2.2.8 Uçucu Küllerin Kullanıldığı Yerler.....	75
2.2.8.1 Çimento Üretimi.....	75
2.2.8.2 Beton Üretimi.....	75
2.2.8.3 Tuğla ve Hafif Agrega Üretimi	76
2.2.8.4 Boşluklu Beton (Gaz Beton) Üretimi	76
2.2.8.5 Yol, Zemin ve Baraj Uygulamalarında.....	77
2.2.9 Uçucu Küller ile İlgili Önceki Çalışmalar	77
2.3 Sülfat Etkisi	88
2.3.1 Sülfatın Bulunduğu Ortamlar.....	88

2.3.1.1 Agregada Sülfat	88
2.3.1.2 Zeminde Sülfat	89
2.3.1.3 Beton Karma Suyunda Sülfat	89
2.3.1.4 Gazlarda Sülfat	89
2.3.1.5 Beton Temas Suyunda Sülfat	89
2.3.2 Sülfatın Betona Etki Mekanizması	90
2.3.3 Betonda Sülfat Tahribatı	92
2.3.4 Sülfata Dayanıklılık Açısından Alınması Gereken Önlemler	95
2.3.5 Sülfat Etkileri ile İlgili Önceki Çalışmalar	98
BÖLÜM ÜÇ – DENEYSEL ÇALIŞMA	106
3.1 Amaç	106
3.2 Deneysel Program	106
3.3 Kullanılan Malzemeler	109
3.3.1 Çimento	109
3.3.2 Uçucu Kül	110
3.3.3 Akışkanlaştırıcı Katkı	111
3.3.4 Su	111
3.3.5 Agregas	111
3.3.6 Mikrolifler	113
3.4 Deneyler	113
3.4.1 Harç Karışım Oranları	114
3.4.2 Örneklerin Hazırlanması	116
3.4.3 Sertleşmiş Harç Deneyleri	118
3.4.3.1 Eğilme Deneyi	118

3.4.3.2 Eğilme Sonrası Basınç Deneyi.....	120
3.4.3.3 Boy Değişimi Ölçümleri.....	120
3.5 Deney Sonuçları.....	121
3.5.1 Taze Harç Deney Sonuçları	121
3.5.2 Mekanik Deney Sonuçları	124
3.5.2.1 Eğilme Sonrası Basınç Dayanımları.....	124
3.5.2.2 Yük-Deplasman Eğrileri	140
3.5.2.3 Eğilme Dayanımları.....	144
3.5.2.4 Tokluk Değerleri	159
3.5.2.5 Boy Değişimleri	163
3.5.2.6 Karbon Mikrolifin Mikroskop Görüntüleri.....	168
BÖLÜM DÖRT – SONUÇ VE ÖNERİLER.....	170
KAYNAKLAR	176
EKLER.....	182

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Gevrek özellik gösteren malzemelerin güçlendirilmesinde eski çağlardan beri kullanılan saman, at kuyruğu, keçi kılı ve kuş tüyü gibi doğal liflerin mantığı prensip kabul edilerek geliştirilen teknik özellikleri yüksek yapay lifler günümüzde yoğun olarak kullanılmaktadır. Beton ve değişik kullanım amaçlı harçların içerisine katılan camsı, sentetik, karbon ve çelik lifler pek çok mekanik özelliği iyileştirerek performansı arttırmaktadır.

Geleneksel betona ve özellikle tamir amaçlı harçlara katılan camsı, sentetik, karbon ve çelik liflerin en önemli katkısı çatlak gelişimini engellemiş olmalarıdır. Betonun yapısında oluşan içsel gerilmelerin beton tarafından karşılanamaması ile oluşan mikro ölçekli çatlakların gelişip ilerlemesi liflerin gerilmeleri transfer etmesi sayesinde önlenmektedir. Lifler çimento hamuru fazında oluşan gerilmelerin bir kısmını geometrik yapıları ve kullanım miktarlarına bağlı olarak kendileri taşır, bir kısmını da matrisin sağlam bölgelerine aktarırlar. Bu şekilde betonu yıkılmaya götürecek olan çatlakların oluşumu ve büyümesi engellenir, kırılma daha büyük yüklerde meydana gelir. Kompozitlerin ani yüklemelere ya da tekrarlı yüklemelere karşı yeterli dayanıma sahip olması ve yük altında yutulabilen enerji miktarının fazlalığı açısından liflerin sağladığı artış, lifli betonu geleneksel betona kıyasla üstün kılar.

Günümüzde beton üretiminde, hem maliyeti azaltmak hem de yüksek performans elde etmek amacıyla birçok araştırma yapılmaktadır. Uçucu kül kullanımı, bir yandan maliyeti yüksek olan Portland çimentosundan tasarruf sağlanmasına yardım ederken, diğer yandan da taze ve sertleşmiş beton özelliklerine olumlu katkıda bulunabilmektedir. Fakat her uçucu kül, betonda iyileştirici etkiye sahip değildir. Bu etkinlik kullanılan uçucu külün fiziksel ve kimyasal yapısına, aktivitesine, kullanım oranına ve elde edildiği termik santralin teknolojisine bağlı olarak değişmektedir.

Bilindiği gibi, sülfat(SO_4^-) iyonu, portland imento undaki trikalsiyumalminat'ın (C_3A) hidratasyonundan oluşan kalsiyumalminathidrat bileşeni ile yaptığı kimyasal tepkime sonucu, genleşen jips ve yine genleşen candlot tuzu (etringit) oluşturarak, betonun, nispeten yavaş seyreden bu reaksiyon sonucu zamanla parçalanmasına neden olmaktadır. Jips ve etringit oluşumu sonucu zamanla ortaya çıkan genleşme, ASTM C1012-95a'da anlatıldığı gibi, incelenecek imento ile üretilmiş standart prizmalardaki boy uzamasının ölçülmesiyle tanımlanmaktadır. [ASTM C-1012-95a].

Bu tez kapsamında; farklı lif dozajlarında elik ve karbon mikroliflerin imento harcına katılmasının kompozitin sülfat etkisine dayanıklılığı incelenmiştir. Çalışmada, harç karışımları farklı lif dozajlarının yanısıra farklı oranlarda uçucu kül eklenmesi ile elde edilmiştir. Harç numunelerine 28 ve 150 günlük su kr uygulanmış, ayrıca sülfat etkisinde kalan numuneler 150 gün boyunca 100000 ppm sülfat konsantrasyonlu çözeltide bırakılmıştır. Deneysel olarak harçların taze halde yayılma çapı; sertleşmiş halde ise eğilme dayanımı, eğilme sonrası basınç dayanımı, boy değişimleri ve tokluk özellikleri belirlenmiştir.

BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Lifli Kompozitler

Lifli kompozitlerin tasarımının altında malzemenin mekanik direncini arttırmak, çatlama ve gevrek kırılmayı önlemek yatar. Liflerin, donatı ve örgülerin bu yararları sağlayabilmesi için fiziksel açıdan matris adı verilen ortam malzemesinden daha yüksek performansa sahip olmaları gerekmektedir. Böylece mekanik etkilerin büyük kısmını lifler karşılayabilmektedir. Ayrıca mekanik etkinin iletimi matristen life kayma kuvveti yoluyla gerçekleştiğinden, iki bileşen arasında bu kuvveti karşılayabilecek bir aderans ve matris kalitesi gereklidir.

Lif donatılı betonlarda matris malzemesi lifleri saran ortam malzemesi olan çimento hamurudur. Çimento hamurunun görevi, lifleri bir arada tutmak, onları korumak, liflerle veya liflerden gerilme transferi sağlamaktır. Kompozit malzemelerde genelde metal, plastik, selüloz, grafit, asbest veya cam lifler kullanılmaktadır.

Matris ve lif fazının davranışına göre lifli kompozitler:

- Kırılğan lif-sünek matrisli sistemler
- Kırılğan matris-sünek lifli sistemler,

olmak üzere iki farklı gruba ayrılırlar (DSI, 1994).

2.1.1 Lif Donatılı Betonlar

Agrega, çimento ve su gibi temel bileşenleri ile üretilmiş kompozit bir malzeme olan betonun içerisine değişik tekniklerle ve değişik oranlarda plastik, çelik, polipropilen vb. liflerin ilavesi ile elde edilen betona lifli beton adı verilir (Uğurlu, 1994).

Beton dünyasında her an yeni gelişmeler meydana gelmekte, çeşitli kimyasal katkıları ve/veya özel çimentolar kullanılmak suretiyle çok yüksek performanslı

betonlar üretilmektedir. Yüksek performanslı betonlarda basınç dayanımının da genelde yüksek olduğu görülmektedir. Basınç dayanımındaki bu artış betonun şekil değiştirmeye karşı hassasiyetini arttırırken gevrek bir yapı da kazandırmaktadır. Geleneksel olarak betonun statik yükler altında elde edilen özellikleri, büyük miktarlarda şekil değiştirmelerin söz konusu olduğu durumlarda betonun davranışı tahmin etmek için kullanılamaz. Bu nedenle betonun dinamik yükler altındaki davranışını belirleyebilmek için büyük şekil değiştirmeleri gösteren deney uygulamaları gerektirir. Depremler, sanayi yapılarında makinelerin meydana getirdiği titreşimler, baraj vb. yapılarda meydana gelen türbülanslı akımlar, kazıklı temel inşaatında kazıkların çakılması sırasında meydana gelen dinamik etkiler, çeşitli patlamalar, özellikle askeri yapılar için; roket çarpması vb, etmenler nedeniyle dinamik yüklemeler yaşamın bir parçasıdır. O halde betonarme elemanlar dinamik yüklemeler altında meydana gelebilecek gerilmeleri karşılayabilme yeteneğine sahip olmalıdır. Betonun çok düşük çekme dayanımına sahip olması nedeniyle beton elemanların dizaynında statik çekme gerilmelerinden kaçınılır. Buna karşılık yukarıda belirtilen dinamik yükleme durumlarında çekme gerilmelerinin oluşumu kaçınılmazdır. Çekme gerilmeleri ise bir çatlaktan başlayarak pek çok çatlağın yayılmasına sebep olarak betonarme elemanlarda göçmeye neden olur. Çatlak gelişimine karşı betonun direncini ve düktilitesini arttırmak için betonun liflerle güçlendirilmesi etkili bir yoldur.

Geleneksel betonun içerisine doğal veya yapay lif katkısı ile meydana getirilen lifli beton, görünüşte geleneksel beton karışımına benzese de, çeşitli yükler altında gösterdiği davranış ve performans bakımından geleneksel betondan oldukça farklıdır. Beton içerisinde meydana gelen farklı gerilmeler, malzeme içerisindeki mikro çatlaklar nedeniyle düzensizdirler. Beton içerisine katılan lifler matris fazını takviye ederek, beton içerisinde üzerilerinden gerilmelerin geçtiği küçük köprüler olarak rol oynarlar. Beton içerisinde üç boyutlu olarak dağılmış olan liflerin betondaki çatlak sonlarına bitişik olmasından dolayı lifler matristeki çatlağın yayılmasına yol açan gerilmeleri kendi üzerlerine alarak matrisin çatlamamış bölgelerine naklederler (Yerlikaya, 1998).

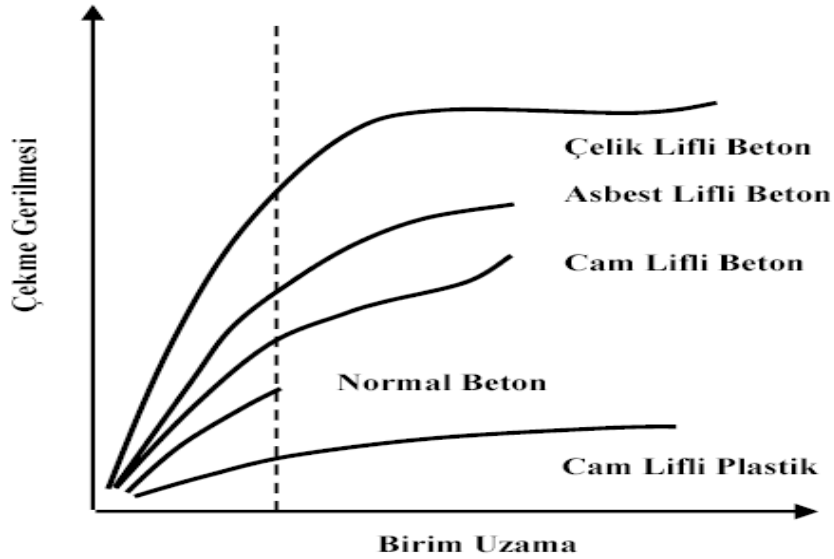
Betonun yük altında gösterdiği maksimum çatlama deformasyonu lifli betonlarda geleneksel betona kıyasla çok daha yüksektir. Lifli betonlarda maksimum yük sonrası, artan deformasyon sonucu yük azalma hızı çok daha yavaş olmaktadır. Liflerin matristen ayrılması ve uzaması esnasında emilen enerji lifli betonlarda oldukça fazladır (Tokyay ve diğerleri, 1991). Kompozitlerin ani yüklemelere yada tekrarlı yüklemelere karşı yeterli dayanıma sahip olması ve yük altında yutulabilen enerji miktarının fazlalığı açısından liflerin sağladığı artış, lifli betonların avantajları arasında sayılabilir.

Lif donatılı betonlarda lifin narinlik oranı ve kullanılan lif miktarı betonun özelliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörlerdir. Lifin narinlik oranı, beton üretimi esnasında karıştırma ve yerleştirme aşamalarını etkilemektedir. Narinlik oranı arttıkça, karışım içinde lif toplanması ve homojen dağılımın bozulması ihtimalleri artar. Lif miktarı ise betonun işlenebilme özelliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Beton karışımına katılan liflerin homojen dağılımı ve karışım sonrası bu özelliğini koruması lif performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

2.1.2 Lifli Betonda Kullanılan Lif Tipleri

Lifli betonlarda donatı malzemesi olarak kullanılan lifler cam, polipropilen, çelik, karbon gibi çeşitli malzemelerden farklı tip ve boyutlarda üretilmektedirler. Bir malzemenin lif olarak tanımlanabilmesi için boy/çap oranının en az 10 olması ($l/d > 10$), lifin en büyük genişliğinin 0.25 mm'den ve en büyük kesit alanının da 0.05 mm²'den daha küçük olması gibi sınırlandırmalar getirilmiştir. ACI Committee 544'e göre bir lifi tanımlayan en uygun sayısal parametre "lif narinlik oranı"dır. Lif boyunun lif kesit alanı kadar kesit alanı olan bir dairenin çapı olarak tanımlanan "eşdeğer lif çapı"na bölünmesiyle bulunan bir oranın, betonda, boyları 0.60 ile 7.62 cm arasında değişen lifler için tipik değeri 30 ile 150 arasında verilmektedir (Ersoy, 2001). Bununla birlikte bazı liflerin uzunluklarının ve çaplarının farklı değerler alması ve cam liflerdeki gibi liflerin demet şeklinde olması nedeniyle liflerde sadece boy/çap oranına göre sınıflandırma yapmak mümkün olamamaktadır.

Lifli betonlarda donatı malzemesi olarak kullanılan liflerin etkinliği, liflerin elastisite modülünün matrisin elastisite modülünden daha yüksek olmasına bağlıdır. Şekil 2.1’de çeşitli lif tipleri ile üretilen lifli betonların çekme etkisi altındaki davranışları gösterilmektedir. Şekilde de görüleceği gibi elastisite modülü en yüksek olan çelik lifler, çekme gerilmesi altında en iyi performansı göstermektedirler.



Şekil 2.1 Değişik tipteki lifli betonların çekme altındaki davranışları

Bu bölümde çimentolu kompozitlerde kullanılan çelik ve karbon lifler ve özellikleri hakkında bilgiler sunulmaktadır.

2.1.2.1 Çelik Lifler

Bağlayıcı malzemelerle yapılmış yapı elemanlarında lif kullanılması çok yeni bir fikir sayılmaz. Antik çağlardan beri lifler gevrek malzemelerin donatılabilmesi amacıyla kullanılmıştır. (ACI 544, 1997). Tarihi yapıların bazılarında, balçık karışımları içerisine hayvan kuyruk ve yele kıllarının katıldığı bilinmektedir. Benzer şekilde, büyük usta Mimar Sinan’ın (d. 1497–ö. 1588) yaptığı şaheserlerde kullanılan Horasan Harcı içerisinde saman ve keçi kılı kullanıldığı bilinmektedir. Liflerin bağlayıcı içerisinde en sık kullanımı güneşte kurutulmuş kerpiç bloklar içerisinde saman kullanılmasıdır. Günümüzden yaklaşık 3500 yıl öncesi, Bağdat yakınlarında

inşa edilmiş 57 metre yüksekliğindeki “Aqar Quf” kulesinin yapımında güneşte pişirilmiş tuğlalarda saman kullanıldığı tespit edilmiştir (Bentur ve Mindness, 1990). 1874 yılında ABD’de A. Berard tarafından lif donatılı betonun ilk patenti alınmıştır. Asbestli liflerin çimento hamuru matrisi içerisinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlaması 1898 yılında Hatschek yönteminin keşfi ile olmuştur (Hatschek yöntemi için bkz. Bentur & Mindess, 1990). Fakat asbestli liflerin sağlığa zararının anlaşılması üzerine 1960’ların başlarında alternatif lif tipleri ortaya çıkmaya başlamıştır (ACI 544). Günümüzdeki bilinen şekle sahip lif patentleri 1927’de ABD’de G. Martin tarafından, 1939’da İngiltere’de Zitkeviç ve yine İngiltere’de 1943’de G. Constantinesco tarafından alınmıştır (Naaman 1985, Beddar 2004). 1960’ların başlarında günümüzde bilinen anlamıyla çelik liflerin betonda kullanımına yönelik çalışmalar başlamıştır (ACI 544, Romualdi ve Batson 1963). Günümüzde geleneksel çelik teller endüstriyel zemin betonları ve tünel uygulamalarında kullanıldığı gibi yağmur suyu kolektörleri, atık su tankları, atık madde tankları, cephe ve bölme duvar elemanları, kanalizasyon boruları, tünel segmentleri gibi prefabrike elemanların üretiminde de kullanılmaktadır (Taşdemir ve ark. 2002).

Genel olarak beton; yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı, çatlama sonrası yük taşıma dayanımı ve enerji emme kapasitesi bakımından zayıf bir malzemedir. Betonun bu özelliklerini belirgin olarak artırmak amacı ile lifli betonların farklı alanlarda kullanılma ihtiyacının artması ile beton teknolojisinde yeni araştırmaların yapılmasına neden olmaktadır. Özellikle kompozit malzeme teorilerinin pratikte yaşanan teknolojik gelişmelerle ve yeni malzemelerin betonda kullanılması hedeflenmektedir. Bu malzemelerden biri de beton karışımlarına katılan farklı boyutlardaki çelik liflerdir.

Beton içerisindeki çelik lifi, betonun yapısını değiştiren ve ona plastik davranış özelliği kazandıran bir malzeme olarak nitelendirebiliriz. Çelik lifli betonun özelliği, onun arttırılmış plastik davranışı ve enerji yutma yeteneğidir (Şimşek, 2004).

Çelik lif donatılı betonlar, 60’lı yılların başında geliştirildi ve lif tipleri üzerinde yıllar boyu süregelen araştırmalar ve uygulamalar, bu malzemeyi dünya çapında

çeşitli uygulamalarda bilinen bir teknoloji haline getirdi. Günümüzde halen, dizayn ve hesap metotları geliştirilmektedir. Çelik lif donatılı betonlar için ilk uygulama alanlarından biri, elastik zemine oturan beton plaklar oldu. 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. Tutkallı çelik lifler kolayca betona katılmakta ve homojen dağılmaktadır (Yerlikaya, www.beksa.com.tr).

Basınç etkisi altında mekanik davranışları elverişli olan yapı malzemelerinin, çekme ve eğilme etkisi altındaki davranışları çoğu zaman yeterli olmamaktadır. Bu malzemelerin elverişli olmayan mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için beton içerisine karıştırılan çelik liflerin yapısı çekme özelliğine karşı bir düzeltme ve kullanım özelliği sağlamaktadır. Çelik lifli betonların üretilmesindeki ana amaç; malzeme tokluğu, darbe yüklerine karşı direnci, eğilme dayanımı gibi özelliklerin artırılmasına yöneliktir.

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 (Yerlikaya, 2003).

2.1.2.1.1 Çelik Liflerin Sınıflandırılması. 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

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 çapları 0,13-1,00 mm arasında olup, narinlikleri ise (uzunluk/çap oranı) 30 ile 150 arasında değişmektedir. Lif boyları 13 mm den 70 mm ye kadar, lif hacmi ise genellikle %0,5 ile %3 arasında değişmektedir.

Betonun zayıf özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılan çelik liflerin tanımı ACI 544'e göre lif boyunun, eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen boy/çap oranı olarak kabul edilmektedir. Bu oran aynı zamanda lifin narinliğini ifade etmektedir. Beton takviyesinde genellikle daire en kesitli ve dikdörtgen en kesitli çelik lifler kullanılmaktadır. Boyları 30-60 mm, çapları ise 0,5-1,0 mm arasında değişen çelik liflerin yük etkisiyle kopmadan, matrizen sıyrılmalarına rağmen çekme dayanımlarının en az 345 N/mm^2 olması istenmektedir. Uçları kancalı üretilen çelik liflerin sıyrılmaya davranışları düz olanlara oranla daha yüksek olmaktadır.

Düşük karbonlu çelikten üretilen çelik lifler genellikle;

- Soğukta çekilen liflerin kesilmesiyle,
- Çelik plakaların kesilmesiyle,
- Erimiş haldeki çelik potasından çıkarılması ile elde edilmektedir.

Sert çekilmiş düşük karbonlu çelik C1008'den üretilen çelik liflerde, yüksek ve üniform çekme gerilmesiyle, düşük uzama özelliği birleştirilmiştir. Beton içerisinde bulunan liflerin nihai yükleri kırılma ve kopma olmadan taşımaları gerekir. Çelik lifler 1100 N/mm^2 çekme mukavemeti ile bunu gerçekleştirir. Düşük elastik limitleri (%0,2), yüksek çekme gerilmesiyle birleştirilmiştir.

2.1.2.1.2 Çelik Liflerin Performansları. Çelik lif donatılı beton, ince çelik liflerin beton kütlesi içine homojen olarak dağıtıldığı üç boyutta donatılı betondur. Çelik lifler betonların çatlak direncini, geçirgenlik ve süneklik gibi özelliklerini artırır. Ulaşılması istenen performans seviyesi beton kalitesi, çelik liflerin narinlik oranı (uzunluk/çap) ve dozaja bağlı olarak değişir. Seçilen deney metoduna bağlı olarak çelik lif donatılı beton performansının seçilmesi gerekir. Bu seçimde en önemli

parametre yapı güvenliği ve sünekliktir. Çelik lifler, taze betonda oluşmaya başlayan mikro çatlaklar arasında köprü teşkil ederek, iç gerilmeleri bütün kitle içine yayar ve servis yükleri altında çatlak yayılma ve büyümesinin önüne geçerler. Servis yüklerinden başka ani etkileyen deprem gibi dinamik yüklemelere karşı enerji yutma yetenekleri nedeni ile betonun dağılmasını engellerler (Yerlikaya, 2003).

Çelik liflerin teknik üstünlüğü pek çok bileşenden oluşur. Bunlar;

- İdeal uzunluk/çap oranı,
- Ankrajlı uçlar sayesinde kontrollü sıyrılma,
- Yüksek çekme mukavemeti (min. 1100 N/mm²),
- Tutkallı demetler ile homojen şekilde yayılma.

Çelik liflerin betona sağladığı en önemli özellikleri ise şunlardır:

1. Eğilme mukavemeti ve tokluk: Çelik liflerin amaçlarından bir tanesi çatlak sonrası betonun enerji yutma kapasitesini artırmak ve eğilme mukavemetini belirli bir değere çekmektir.
2. Çatlak kontrolü: Çelik lifler çatlakları bir köprü halinde aktararak çatlağın ilerlemesini önler.
3. Şok darbe dayanımı: Çelik lifler homojen dağılmaları sayesinde darbe dayanımını arttırır.
4. Yüzey kabarmasının yok edilmesi: Çelik lifli betonda küçük lif çapı, kesintili donatı sistemi ve yüksek yüzey/hacim oranı ile klasik demir donatılarında paslanma sonucu oluşan kabarma olayı görülmez.

2.1.2.1.3 Çelik Lif Beton Karışım Esasları ve Kullanım Oranları. Çelik lifli betonların karışımları için beton yapısı ve kalitesi TS 10514'de (1992) verilmektedir.

Buna göre:

- Çimento miktarı en az 320 kg/m³ 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 Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Betonda bulunması gereken ince malzeme miktarı

Maks dane büyüklüğü (mm)	İnce malzeme miktarı (<0.25 mm)	
	kg/m ³	L/m ³
8	525	180-185
16	450	150-155
32	400	130-135

2.1.2.1.4 Çelik Lif Karışım Yöntemleri. Karışıma ilk malzeme olarak liflerle başlanmamalı, çelik lifler kum ve agregalarla beraber ya da hazırlanmış betona ilave edilmelidir. Karışım anında çelik liflerin bir araya gelip toplanarak karışımı güçleştirmeleri ve karışım sırasında liflerin eğilerek deforme olmaları önlenmelidir. Bunun içinde özellikle lif miktarı aşılmamalı, gerekiyorsa bağlayıcı ve ince agrega miktarı artırılarak karışımın kohezyonu artırılmalıdır. İşlenebilirliği arttırmak için de akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanılmalıdır. Demetler halindeki lifler karışımda ayrılıncaya kadar karışıma devam edilmelidir. Çelik lifli betonların hazırlanmasında belli başlı üç yöntem vardır. Bu yöntemler ve karıştırma kuralları TS 10514'de belirtilmiştir.

1. Beton Santralında Karışım Yöntemi

- Kum, çakıl ve çelik lifler bir konveyör band aracılığı ile karıştırma kazanına verilebildiği gibi, beton santralının tartı kovanına da konabilir. Her iki durumda da, çelik lifler kum ve çakılın üzerine dökülmelidir.
 - Karışıma çimento, su ve gerekli ise uçucu kül ilave edilmelidir.
 - Bütün lifler ayrılıp dağılıncaya kadar karıştırılmalıdır. Gerekli süre mikser tipine bağlı olup, bu süre 1-2 dakika olmalıdır.
 - Karıştırma kazanı içinde hazırlanan betona lifler en son olarak da ilave edilebilir. Bu durumda karıştırmaya lifler homojen dağılıncaya kadar devam etmelidir.

2. Transmikserde Karışım Yöntemi

- Agrega ve lifler transmiksere konarak karıştırılmalıdır.

- Çimento ve su ilave edilmelidir.
- 2-4 dakika sonra karışım kontrol edilmeli, homojen karışım gözle fark edilmelidir.

3. Transmikserde İlave Yöntemi

- Diğer karıştırma yöntemleri mümkün olmadığı zaman uygulanır.
- Transmikse konan beton, mikser kapasitesinin %80'ini aşmamalıdır.
- Yüksek su/çimento oranından kaçınmak için akışkanlık verici katkı maddeleri kullanılmalıdır.
 - Lifler, mikse 20-30 kg/dak hızı ile konmalı ve bu esnada mikser tamburu en yüksek hız ile çevrilmelidir.
 - Karıştırma zamanı mikser tipine bağlıdır. Bütün lifler betona karıştırıldıktan sonra mikser kısa müddet ile durdurulmalı ve lif dağılımı göz ile kontrol edilmelidir. Homojen dağılım elde edilemezse, transmikserin bu karışım yöntemi için uygun olmadığına karar verilmelidir.

2.1.2.1.5 *Çelik Lif Kullanım Oranları*. Homojen bir beton karışımı elde edebilmek için kritik çelik lif miktarı aşılmamalıdır. Çelik lif teçhizatlı betonun karışımını kolaylaştırmak ve gerekli olduğu lif miktarını artırmayı sağlamak amacıyla ince agrega kullanılmalıdır. Taze betonda; homojen lif dağılımı, gözle kontrol edilmeli birbirlerine yapışık lifler halinde betona karıştırılan lif demetler veya lifler beton içinde tamamen dağılıp, ayrılincaya kadar beton karışımı devam etmeli ve üniform dağılım göz ile fark edilmelidir. Lif takviyeli beton, döküm yerine kamyon ve transmikser ile nakledilebilir. Transmikserler kullanıldığında, mikser düşük hızda döndürülmelidir. Betona karıştırılacak en fazla lif miktarı, agreganın en büyük dane çapına ve uzunluk/çap oranına bağlı olarak Tablo 2.2'de gösterilmiştir (TS 10514, 1992).

Tablo 2.2 Betona ilave edilen maksimum lif miktarı, kg/m³

Tane çapı (mm)	Uzunluk/çap = 60		Uzunluk/çap = 75		Uzunluk/çap = 100	
	Dökme	Pompa	Dökme	Pompa	Dökme	Pompa
32	50	40	40	30	30	25
16	85	65	70	55	55	40
8	125	95	100	75	75	55
4	160	120	125	95	95	70

İyi bir karışım için çelik lif miktarı beton hacmine oranla %0,5 ile %1,5 arasında olup, %2 ve daha fazlasına çıkarmak mümkün olmakla birlikte, %0,5'in altına düşülmemelidir.

2.1.2.1.6 Çelik Lifli Betonlarda Taze Beton Özellikleri

i- Taşıma. Çelik lifli betonun taşıma işlemi geleneksel betonu taşımakta kullanılan beton ekipmanları ile gerçekleştirilebilir. Taşıma esnasında transmikser haznesi tam doldurulmamalıdır. Karışım transmikslerde hazırlanacaksa toplam kapasitenin % 85'i kullanılmalıdır. Tambur kanatları liflerin topaklaşmasını kolaylaştıracak şekilde kirli ve deforme olmuş durumda olmamalıdır.

Lifli betonun karıştırılması için gerekli enerji miktarı geleneksel betona oranla çok daha fazladır. Transmikser ve panmikserler bu ilave gücü kaldırabilecek niteliktedir. Transmikserin eğimli araziye park edilmesi, panmikser haznesinin dışına vibratör bağlanması gibi önlemlerle düşük slump'lu betonların mikserden kolayca akması sağlanabilir.

Lifli beton pompa yoluyla naklediliyorsa, kapasitesi yüksek bir pompa, geniş çaplı boru (yaklaşık 155 mm), bükülebilir ve kıvrılabilir bir hortum kullanılmalıdır. Aletin giriş ağzına lif demetlerinin hortuma girmesini önleyecek şekilde 50-75 mm açıklıklı bir elek konulmalıdır. Çok yüksek slump'lu betonlarda, betonun ince kısmının akması ile kalan iri tanelerin ve liflerin hortumu tıkaşından kaçınılmalıdır (Yiğiter, 2002).

ii- Yerleştirme. Lifli betonların S/Ç oranlarının düşük olması nedeniyle geleneksel betona kıyasla işlenebilirlikleri düşük ve kıvamları daha katıdır. Vibrasyon işlemi uygulanması veya su azaltıcı katkıların kullanımı bu durumu ortadan kaldırmaktadır. Yerleştirmenin vibrasyonsuz yapılması halinde, betonun yoğunluğu düşmekte hava oranı artmakta ve lifler arasındaki aderans azalmaktadır. S/Ç oranının 0,35 ve 0,50 arasında olması, liflerden optimum faydanın elde edilmesine yardım etmektedir. Yerleştirmenin kolaylaştırılması için eklenen fazladan su, beton kalitesini düşürerek kanama ve segregasyon riskini arttırmaktadır. Lifli betonların yerleştirilmesi geleneksel betonun yerleştirilmesinde kullanılan normal ekipmanlarla yapılabilir. Bununla birlikte lifli betonun yerleştirme işleminde işçilik daha zordur. Yerleştirme işleminde harici vibrasyon ile sıkıştırma tercih edilmelidir. Çubuk şeklinde daldırma tipi vibratörlerin kullanılması, sıkıştırma esnasında liflerin dönmesine ve belli yerlerde yığılmasına neden olur. Bu durum homojen olması gereken yapıyı bozar. Genellikle yüzey tesviyesinde liflerden kaynaklanan bir problemle karşılaşılmaz. Açık döşeme yüzeyleri düzeltilirken, vibrasyonlu masterlar kullanılmalı ve perdah makinesi ile tesviye edilmelidir. Kullanılacak perdah makineleri, tercihen metal ve kanat uçları yuvarlatılmış olmalıdır. Yüzey yırtıkları ve boşlukları tahta malalarla kapatılabilir. Yüzeyde açık lif bulunması yüzey pürüzlenmesine yol açabilir. Dar kesitli elemanlara beton dökülmesini kolaylaştırabilmek için agrega boyutları ve lif uzunlukları küçültülmelidir.

iii- Yüzey Bitirme. Lifli betonlar çimento harcı açısından geleneksel betondan fazla olduğu için aşırı masterlanma, yüzeyde çatlaklara neden olabilmektedir. Düzgün bir yüzey elde etmek ve lifleri daha iyi görebilmek için magnezyum kanatlı perdah makineleri kullanılabilir. Ahşap kanatlı perdah makineleri düzgün yüzey elde edilmesini güçleştirmekte ve yırtıklara neden olmaktadır. Terleme sonucu beton yüzeyinde su ve ince şerbet birikirse master veya vakum yolu ile yüzeyden uzaklaştırılmalıdır (ACI 544.3R-93, 1998).

iv- Kür ve Koruma Yöntemleri. Çelik lifli betonların hidratasyonu boyunca kuru, soğuk veya sıcak hava koşullarından korunması için yapılacak kür ve koruma işlemleri geleneksel betonda yapılanlardan farklı değildir. Çelik lifli betonda

çimento miktarının geleneksel betona oranla daha fazla olması nedeniyle özellikle saha betonlarında plastik büzülme çatlaklarının oluşmasına karşı daha hassastır. Bu nedenle bu tip betonlar kür süresi boyunca sıcak ve rüzgarlı havalarda çeşitli kür teknikleri kullanılarak iyi bir şekilde korunmalıdırlar (ACI 544. 3R-93, 1998).

Standart Kür Yöntemleri

Çelik liflerin betonun hidrasyon reaksiyonlarına bir etkide bulunmaması sayesinde çelik lifli betonlarda geleneksel betonlar gibi kür edilebilirler.

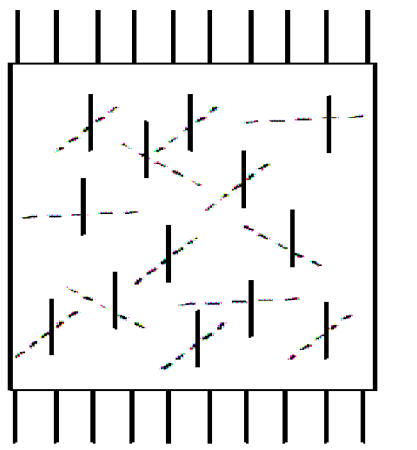
Hızlandırılmış Kür Yöntemleri

Priz hızlandırıcı ve akışkanlığı arttırıcılar kullanma, yüksek basınç altında sıcaklığı arttırma, kristal çekirdekleri kullanma, ısı işlem uygulama gibi yöntemlerle betonun erken dayanım kazanması ve daha kısa sürede hizmete sunulması sağlanabilmektedir. Bu yöntemler sayesinde yapılarda kalıp alma süresinin kısılması, soğuk havada beton dökülebilmesi, kalite kontrolünün daha kısa sürede yapılması ve üretim artışı gibi faydalar elde edilebilmektedir.

2.1.2.1.7 Çelik Lifli Betonlarda Sertleşmiş Beton Özellikleri.

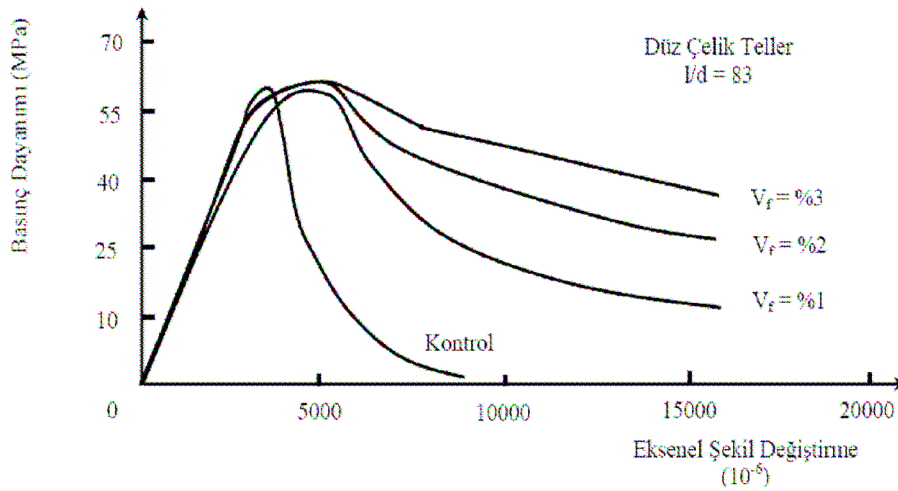
i- Basınç Dayanımı. Geleneksel betonun çelik liflerle güçlendirilmesi betonun basınç dayanımını, lif dağılımı-yükleme durumuna göre arttırabildiği gibi bazı durumlarda dayanım kaybına da neden olabilmektedir.

Yükleme düzlemine dik doğrultuda bulunan lifler betonun basınç gerilmesinde herhangi bir işlev üstlenmezler. Liflerin yükleme düzlemine paralel olması durumunda ise basınç gerilmesinde artış gözlenmektedir. Lifli betonlar tek eksenli yüklemeye koşulları altında, geleneksel betona göre daha sünek bir davranış göstermektedir. Yapılan çalışmalarda numune boylarında % 10'a yaklaşan kısalmalar olsa bile numune hala yük taşıyabilmekte ve parçalanmamaktadır.

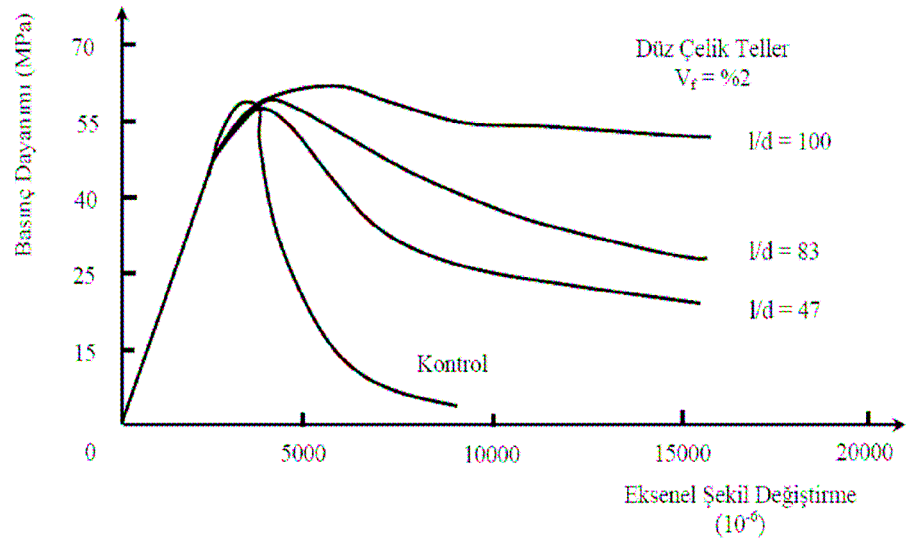


Şekil 2.2 Lif yöneliminin basınç dayanımına etkisi

Çelik lifli betonlarda lif hacmi ve lif görünüm oranının basınç dayanımını etkilediği gözlenmiştir. Fanella ve Naaman (1985) yaptıkları bir çalışmada lif hacmi ve lif görünüm oranı (uzunluk/çap) arttıkça, çelik lifli harçların basınç dayanımının da arttığını gözlemlemişlerdir. Çelik lifli betonlarda maksimum yük sonrası artan deformasyon sonucu yükün azalma hızı normal betonlara göre daha yavaştır. Bu durum Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 'de gösterilmektedir.

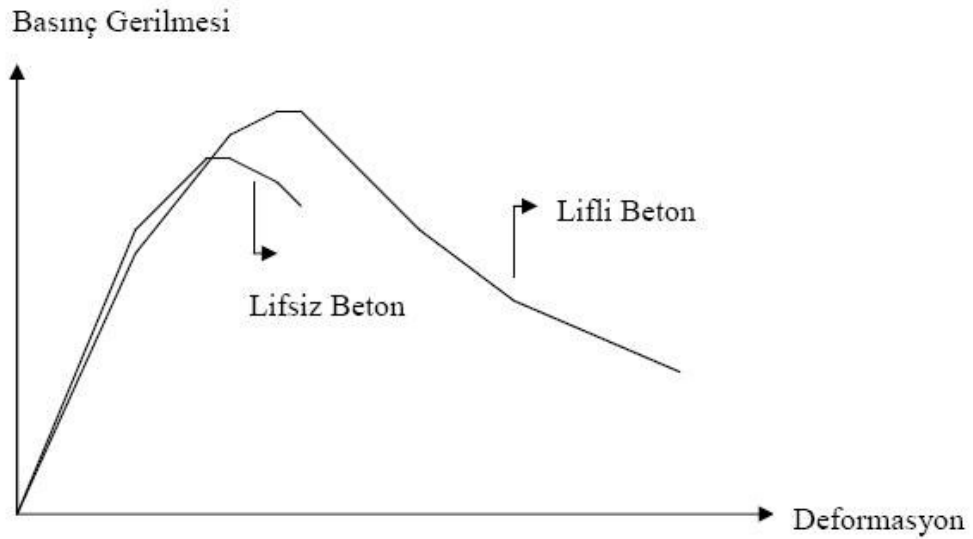


Şekil 2.3 Lif hacmi içeriği değişiminin gerilme-şekil değiştirme eğrisine etkisi



Şekil 2.4 Lif görünüm oranı değişiminin gerilme-şekil değiştirme eğrisine etkisi

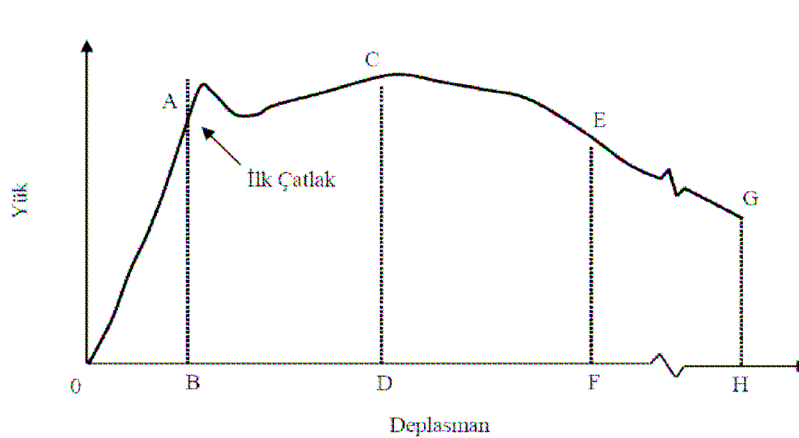
Şekil 2.5’de lifli ve normal betonların basınç gerilmesi altındaki davranışları görülmektedir.



Şekil 2.5 Basınç gerilmesi altında lifli ve lifsiz betonların karşılaştırılması

ii- Eğilme Dayanımı. Çelik lifli betonların nihai eğilme dayanımları, geleneksel betonlara oranla % 50-100 arasında daha fazladır. Eğilme dayanımındaki bu artış, çelik liflerin yüksek çekme dayanımı ile ilişkilidir. Çelik lifli betonlarda çimento hamuru matrisinin çatlamasının ardından, lifler aracılığıyla çatlak sonlarında gerilme transferi meydana gelir ve taşınan yük bir miktar daha artar. Böylece maksimum eğilme dayanımı geleneksel betona kıyasla daha fazla olmaktadır. Eğilme dayanımı, lif şekli, görünüm oranı, lif hacmi, numune boyutları ve lif dağılımından etkilenmektedir.

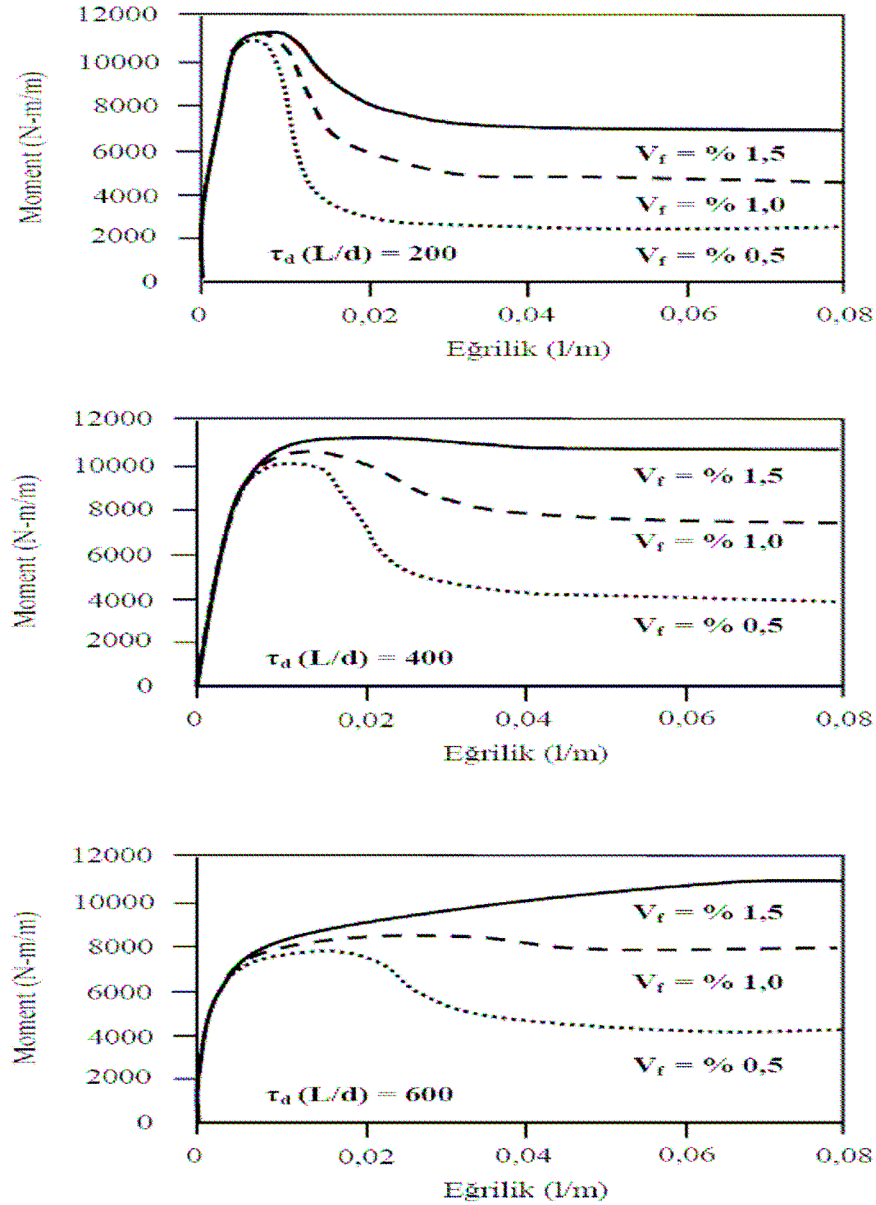
Tipik yük-sehim eğrisi incelendiğinde, ilk çatlak eğilme dayanımı ve nihai eğilme dayanımı olmak üzere iki tip eğilme dayanımı gözlenebilir. Yük-sehim eğrisinin doğrusallıktan çıktığı değer ilk çatlak eğilme dayanımı olarak kabul edilir. Eğilme dayanımının maksimum değere ulaştığı nokta ise nihai eğilme dayanımıdır. Şekil 2.6'de A noktası ilk çatlak eğilme dayanımı, C noktası ise nihai eğilme dayanımını göstermektedir. İlk çatlak eğilme dayanımı betonun çekme dayanımına, nihai eğilme dayanımı ise lif içeriği (lif hacim yüzdesi) ve lif görünüm oranına bağlıdır. Hacim yüzdesi % 0,5'den ve görünüm oranı 50 den az olması halinde betonun statik dayanım özellikleri üzerinde liflerin etkisi çok az olmaktadır. Ucu kancalı, çentikli veya kıvrımlı lifler iyi aderans sağladıkları için düz liflere kıyasla eğilme dayanımını daha fazla arttırmırlar.



Şekil 2.6 Çelik lifli betonda yük deplasman eğrisi

Look ve ark. (1999), beton karışımlarında yüksek lif içeriği ve görünüm oranı kullanımının moment-eğrilik bağıntısına etkisini incelemiştir. Çelik lifli

betonların eğilme dayanımlarındaki iyileştirmenin artırılması için; su/çimento oranı, lif yüzey özellikleri, lif geometrisi ve yükleme hızı gibi birçok etkene bağlı olan aderans gerilmesinin artırılmasının esas olduğunu vurgulamışlardır. Bu durum Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Moment-eğrilik bağıntısına d (l/d) (aderans dayanımı ile lif görünüm oranı) çarpımının ve tel hacminin (v_f) etkisi

Pierre ve ark. (1999), mikrolif kullanarak yaptığı bir çalışmada, mikrolif ilavesinin mekanik davranışı belli bir noktaya kadar etkilediği, lif içeriği arttıkça ise bu etkinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Mikrolif ilavesi basınç ve çekme dayanımından çok eğilme dayanımını etkilemektedir. Ayrıca hava içeriği de mikrolif ilavesinin artması ile artmaktadır.

iii- Çekme Dayanımı. Çelik lifli betonların çekme dayanımı geleneksel betona kıyasla % 25-100 daha fazladır. Çekme dayanımındaki artış; lif şekli, miktarı, görünüm oranı, dağılma şekli ve lif-matris aderansına bağlıdır.

Deprem, patlama, türbülanslı su akımı vb. dinamik çekme etkilerine maruz yapı elemanlarında, çekme gerilmelerinin daha homojen yayılabilmesi ve mikro ve makro çatlaklara karşı betonun dayanımını arttırabilmek için çelik lif kullanılabilmektedir.

Bartos (1981), yaptığı çalışmada çelik lifli betonlarda lifle beton arasındaki kenetlenmeyi açıklayan teorileri incelemiştir. Betonda çekme gerilmesi nedeniyle ilk çatlak oluşumunun gerilme-şekil değiştirme grafiğinde lineerliğin bittiği nokta olarak kabul ettiği teoriyi açıklamıştır.

iv- Elastisite Modülü, Sünme ve Kuruma Büzülmesi. Geleneksel beton içerisine çelik lif dahil edilmesinin betonun elastisite modülü, kuruma büzülmesi ve basınç sünmesine çok az bir etkisi vardır. Çekme sünmesi biraz azalır ama dayanımı yüksek karbon lifler kullanıldığında eğilme sünmesi azalır. Lifler küçük hacme sahip olduklarından kompozitin boyutsal stabilitesi üzerinde fazla etki yapmaz ve matriste rijit eklenti olarak görev alırlar (Mehta, Monterio, 1997).

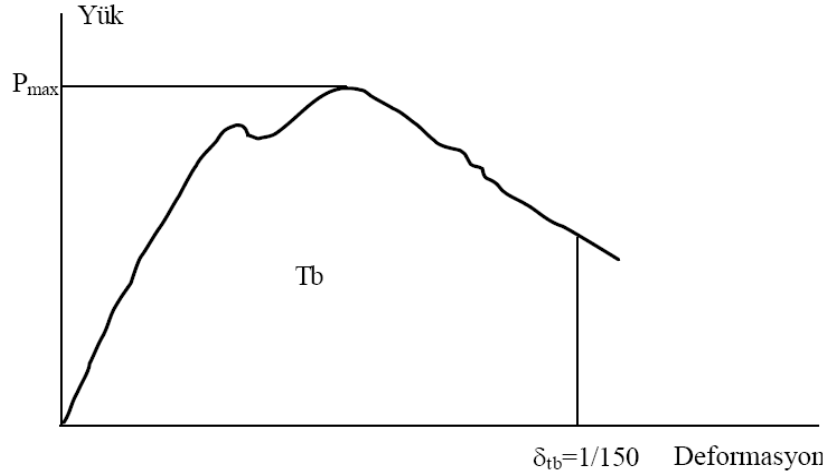
v- Enerji Sönümlene Kapasitesi (Tokluk). Enerji emme kapasitesi (tokluk), eğilme yükleri etkisi altında betonun enerji sönümlene kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Enerji emme kapasitesi yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanın ölçülmesi ile belirlenebilmektedir. Geleneksel beton içerisine çelik liflerin katılması ile statik veya dinamik yükleme altında eğilme kuvvetlerine maruz kalan beton, aynı gerilme değerleri altında daha yüksek deformasyon yapabilmektedir. Geleneksel

beton, gerilme altında sınırlı bir deformasyon yapar ve belli bir noktadan sonra yükün artışı ile sistem göçer. Çelik lifler ise oluşan çatlakları belirli sınırlarda tutarak gerilme transferi sayesinde deformasyon kabiliyetini artırır. Çelik lifli betonlarda enerji emme kapasitesi geleneksel betonlara göre % 100-1200 daha yüksek olabilmektedir.

Çelik lifli betonlarda enerji emme kapasitesi; lifin şekli, görünüm oranı, lif hacmi, deney numune boyutları ve lif dağılımlarından etkilenir. Betonda maksimum gerilmeye ulaşılmadan meydana gelen ilk çatlakların oluşumu sırasındaki deformasyonlar, normal ve çelik lifli betonlarda hemen hemen aynı olmaktadır. İlk çatlak oluşumundan sonra artan gerilmeler maksimum gerilmeye kadar, gelişen çatlakların birleşmesine, dolayısıyla betonun rijitliğinin ayrılmasına neden olmaktadır. Çelik lifli betonlarda yük eksenine dik olan lifler, yanal deformasyonları, yüksek çekme dayanımları ve matris ile aralarındaki aderans nedeniyle, azalttıklarından tokluk artmaktadır (Tokuy ve diğer, 1991).

Çelik lifler betonun plastik davranmasına ve elastikiyetin ve enerji yutma kapasitesinin artmasına neden olur. Lifli betonlarda maksimum yükten sonra artan deformasyon sonucunda, yükün azalma hızı normal betonlara göre çok daha yavaştır. Böylece çelik lifli betonlarda şekil değiştirme çok daha büyük olmaktadır.

Lifli kompozitlerde tokluk genelde eşdeğer çekme dayanımı (eğilmede tokluk, Fe) olarak değerlendirilmektedir. Eşdeğer çekme dayanımı, betonun çatlama sırasındaki gerilme olarak tanımlanmaktadır. Lifli betonlarda tokluğu açıklamada eşdeğer çekme dayanımı veya maksimum çekme dayanımı olarak adlandırılan kırılma anındaki çekme gerilmesini gösteren kavramdan daha anlamlıdır.



Şekil 2.8 Çelik lifli betonun yük-deformasyon eğrisi

Şekil 2.8'deki çelik lifli betonun tipik yük-deformasyon eğrisi incelendiğinde; maksimum çekme dayanımı (f_u) ve kırılma anındaki çekme dayanımı (R_u) nihai yük P_{max} 'tan, eşdeğer çekme dayanımı, yük-deformasyon eğrisi altında kalan (T_b) alanının hesabı ile bulunduğu görülebilir.

Bu alan, deney numunesi boyutlarından, yükleme düzeneğinden ve yükleme hızından etkilenmektedir. Dolayısıyla elastik şekil değiştirme indeksleri (I_5 , I_{10} ,...) ve çekme dayanımı kriterleri (F_u , R_u , F_e) standartlarla belirlenmiş prosedürler kullanıldığında geçerli olmaktadır (Yiğiter, 2002).

Yük-deformasyon eğrisinde eğilme kriterleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F_e = (T_b / t_b) \cdot (1 / b \cdot h^2)$$

$$F_u (R_u) = P_{max} \cdot 1 / (b \cdot h^2)$$

Burada:

F_e : eşdeğer çekme dayanımı (N/mm^2)

$F_u (R_u)$: maksimum çekme dayanımı (Rupture modülü) (N/mm^2)

P_{max} : maksimum yük (N)

T_b : 3 mm'lik eğilme deformasyonuna (sehim) kadar yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanın oluşması için harcanan enerji (N.mm)

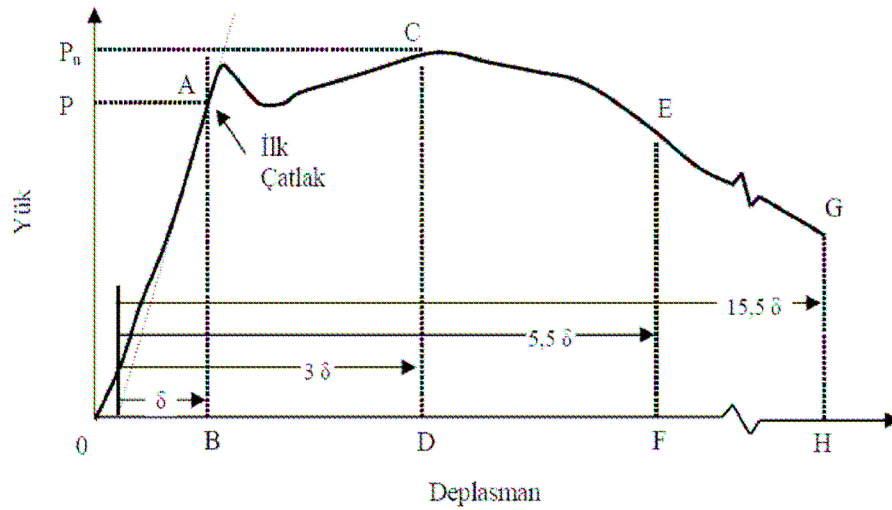
tb:sehim, 3mm [150x150x500 mm'lik numunede mesnetler arası açıklığı (450 mm) 1/150 ölçüsündeki deformasyonu]

l: mesnet açıklığı (mm)

b: kesit genişliği (mm)

h= kesit yüksekliği (mm)

Malzemenin tokluğunun açıklanmasında, yük-deplasman eğrisinin değişik parametrelere bağımlılık göstermesi nedeniyle, malzemenin doğrusal elastik ve plastik davranışını belirlemek açısından ASTM C 1018'de tanımlanan I5, I10 ve I30 Tokluk İndekslerinin kullanılması daha kullanışlı olmaktadır. Numune özelliklerinden bağımsız olmaları nedeniyle tokluk indeksleri daha anlamlı olmaktadır. Tokluk indekslerinin yüksek olması malzemenin süneklik düzeyinin de yüksek olduğunu göstermektedir.



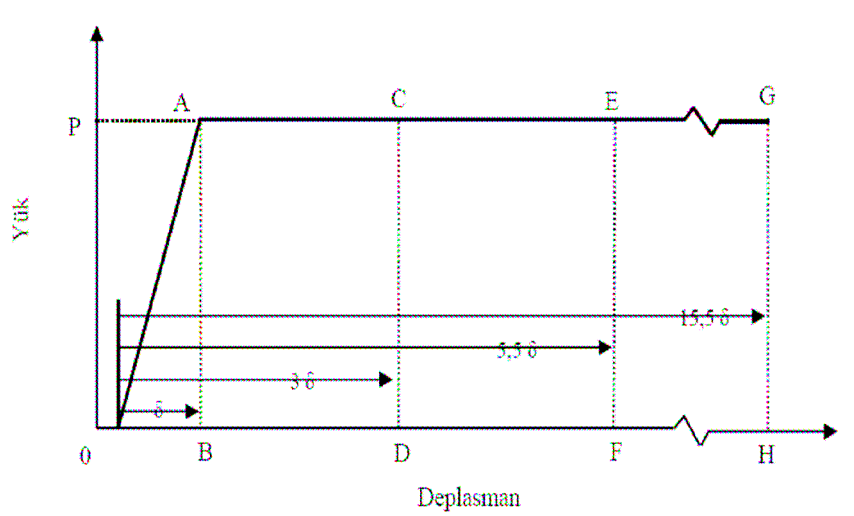
Şekil 2.9 Çelik lifli betonun yük-deplasman eğrisinde tokluk indekslerinin tanımlı alanları

İlk çatlak tokluğu değeri, Şekil 2.9'deki çelik lifli betonun yük-deplasman eğrisinin altındaki OAB üçgeninin alanının hesaplanması ile belirlenmektedir.

$$\text{İlk çatlak tokluğu} = P \cdot l / 2$$

Numune ilk çatlak gerilmesi alanının 3 katı eğilme değerine kadar yüklenerek OACD alanı elde edilmektedir. Bu alan ilk çatlak gerilmesi alanı olan OAB alanının 3 katına eşittir. OACD alanı ilk çatlak alanına bölüldüğünde I5 indeksi hesaplanır.

I10 ve I30 (TS10515'te I30 yerine kullanılan I20) indeksleri ise ilk çatlak gerilmesinin 5,5 ve 15,5 (TS10515'e göre 10,5) katı kadar yapılan deformasyonlar sonucu bulunan alanların ilk çatlak alanına bölünmesi ile bulunur.



Şekil 2.10 I5, I10 ve I30 indekslerinin hesaplanmasında baz alınan tanımlanmış yük-deplasman alanlarının şematik gösterimi

Deneyler sonunda yük-deplasman eğrisi altında kalan alan içerisinde hesaplanan I5, I10 ve I30 elastik dayanım indeksleri, fiili performansın kolayca anlaşılabilirliğini ve referanslar ile karşılaştırılmasını sağlar.

$I10 / I5 = 2$ için bu indekslere eşlik eden eğilmeler arasında mükemmel plastik hareketi (gerilme sabit, deformasyonlar artıyor), $I30 / I10 = 3$ için bu indekslere eşlik eden eğilmeler arasında mükemmel plastik hareketi, bu değerlerden küçük iseler düşük performansı ifade ederler.

Geleneksel betonun tokluk açısından çelik lifli betonlarla kıyaslanabilmesi için Tablo 2.3'deki kriterler kullanılabilir.

Tablo 2.3 Tokluk (elastik şekil değiştirme) indekslerinin değerlendirme kriterleri

Baz Alman Tokluk Alanı	İndeks	Eğilme Kriteri	Normal Beton	Elastik- Plastik Malzeme	Çelik Lifli Beton İçin Aralık
OACD	I ₅	3.0	1.0	5.0	1-6
OAEF	I ₁₀	5.5	1.0	10.0	1-12
OAGH	I ₃₀	15.5	1.0	30.0	1-40

Bu kriterler kullanılabildiği gibi, çelik lifli betonların tokluğunun değerlendirilmesinde tokluk faktörü adı verilen ampirik bağıntılar da kullanılabilmektedir:

$$\text{ASTM C1018'de } R_{30/10} = 5. (I_{30} - I_{10})$$

$$\text{TS 10515'de } R_{10/20} = 10. (I_{20} - I_{10})$$

Çeşitli çalışmalar incelendiğinde, tokluk özelliği açısından aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

- Çelik lifli betonlarda lif geometrisi, uzunluk/çap oranı, lif hacmi betonun tokluk özelliklerini doğrudan etkilemektedir.
- Lif tipleri açısından incelendiğinde, çengelli liflerin kullanıldığı betonlarda tokluk değeri daha yüksek çıkmaktadır.
- Lif görünüm oranı (l/d) büyüdükçe toklukta artış gözlenmektedir.
- Lif hacmi fraksiyonundaki artış da tokluk değerinin büyümesine neden olur. I20 gibi büyük indekslerde bu fraksiyonun büyümesi ile gözlenen artış daha belirgin olmaktadır.
- I20 gibi büyük indekslerde lif boyundaki artış toklukta da belirgin bir artışa neden olur.
- Lif içeriği 30 kg/m³ değerini aştığında tokluk değerinde de belirgin bir artış görülmektedir.
- I5 ve I10 değerlerinin yeterli olmadığı durumlarda I30 değeri incelenmelidir.

- Aynı lif içeriğine sahip yüksek dayanımlı betonların tokluğu normal dayanımlı betonlara kıyasla daha yüksektir.

Tokluk mekanizması açısından incelendiğinde, geleneksel beton ve lifli beton için yük-sehim eğrilerine göre farklı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Geleneksel beton en büyük eğilme dayanımına karşılık gelen sehim asıldığında aniden göçerken, lifli beton normal betonun kırılma sehiminin asıldığı büyük sehimlerde çok daha yüksek yüklerle devam eder. Kırılan numuneler incelendiğinde lifli beton örneklerinde kırılmanın ilk olarak liflerin sıyrılması veya kopması ile başladığı görülür. Bununla birlikte lifli beton numunesi ilk çatlak oluşmasının hemen ardından kırılmamaktadır. Yük-deplasman eğrisinin altındaki alan olarak tanımlı süneklikle ilgili olarak kırılma işinde artış bu sonucun oluşması ile yakından ilgilidir.

Lif donatılı kompozitlerin göçme mekanizması Shah (1971) tarafından şu şekilde açıklanmıştır: İlk çatlama anındaki yük, liflerin ilk çatlama anındaki sıyrılma direncinden düşükse, kompozit matrisin ilk çatlağından sonra bile artan yükleri taşımaktadır. Matris ilk çatlamış bölge içindeki hiçbir çekme kuvvetine karşı koymaz ve lifler kompozite gelen tüm yükü taşır. Kompozit üzerindeki yük miktarı arttıkça lifler aderans gerilmeleri nedeniyle matris içindeki ilave gerilmeleri transfer etmeye başlarlar. Aderans gerilmeleri aderans dayanımını aşmazsa matriste ek çatlamlar oluşabilmektedir. Çatlama süreci ya liflerin göçmesine veya çoğalan lokal aderans azalmalarıyla lifin sıyrılmasına kadar devam eder.

Çelik lifler betonun erken yaşlarında da çatlak yayılımını azaltmaktadır. Çelik liflerin elastisite modülü betondan yüksek olduğu için, çelik liflerin betonun kırılma enerjisi üzerinde olumlu etkileri olmaktadır. Beton kırılmaya başlayıp lineer elastik kısım sona erdiğinde çelik lifler daha etkin rol oynar ve kırılma enerjisi üzerinde iyileşmelere neden olur. Tekrarlı yüklemelerde çelik lifli betonlarda çatlak kapanma değeri geleneksel betona kıyasla daha yüksek iken, yük artışına göre çatlak kapanma oranları açısından bir fark görülmemektedir. Kırılma yüküne yakın yüklemelerde geleneksel betonda çatlak sayısı az iken lifli betonlarda çok fazla çatlak oluşmaktadır.

vi- Yorulma Dayanımı. Malzemeyi kırmaya yetmeyen elastik limitin altındaki gerilmelerin arka arkaya tekrarlı bir şekilde uygulanması sonucunda malzemede görülen ani ve gevrek kırılma olayına “yorulma” denilmektedir. Bu kırılma olayı dinamik yüklemelerdeki kırılmanın başka bir örneğidir. “Yorulma dayanımı” ise belirli sayıdaki yük tekrarı altında, malzemenin kırılmadan direnebileceği en büyük gerilme değeri olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan, 2003). Çelik lifli betonların yorulma dayanımı lifsiz betonlara oranla %50-100 daha fazladır.

Tekrarlı uygulanan gerilmelerin etkisiyle, malzemenin bünyesinde yer alan veya yeni oluşan mikro çatlaklar giderek daha büyük çatlaklara dönüşmekte ve kırılmalara yol açmaktadır. Çelik lifler, bu noktada performanslarını gösterirler ve çatlak gelişimini engelleyerek tekrarlı yüklerin oluşturacağı hasarların şiddetini azaltırlar.

Betonun yorulma sınırı 10 milyon yük tekrarına karşılık gelen gerilme değeri olarak kabul edilmektedir. ACI 544. 1R-88’e göre çelik lifli betonlarda lif tipi ve içeriğine bağlı olmakla birlikte 2 milyon yük tekrarı sonrasında yorulma dayanımı, statik eğilme dayanımının %65-90 arasına denk gelmektedir. Geleneksel beton için yorulma dayanımı sınırı statik eğilme gerilmesinin %50’sine tekabül etmektedir. Geleneksel betona 30-40 kg/m³ lif eklendiğinde bu sınır %80’lere ulaşmaktadır. Bu durum çelik liflerin çatlak yayılımını durdurması sayesinde tekrarlı yük altında kırılmanın engellenmesi veya kırılma sürecini geciktirmesi şeklinde açıklanabilir. Lif içeriğinin artması betonun yorulma dayanımında artışa neden olmaktadır. Endüstriyel döşeme ve plaklar gibi tekrarlı yüklere maruz yapı elemanlarında çelik lif katkısı yorulma dayanımı açısından önemli katkılar sağlamaktadır (ACI 544. 1R-88).

Evans (1974) çalışmasında, dinamik yükler altında yavaş çatlak gelişimi nedeni ile göçmeye maruz kalan malzemeleri, çatlak gelişim hızı ve gerilme şiddeti faktörüne bağlı olarak analiz etmiştir. Bu temeller üzerine oturmuş olan teorisini açıklayan Evans, bu tür bir analizin hem sabit şekil değiştirme dereceli sistemlerde, hem de sabit gerilme dereceli yükleme sistemlerinde göçmeyi tamamıyla tanımladığını göstermiştir.

Dayanım yönünden bakıldığında geleneksel olarak donatılanmış kirişlere lif katılması ile yorulma ömrünün arttığı, yorulma yüklemesi altında çatlak genişliğinin azaldığı görülür. Genelde gerçekten lifli olarak tasarlanmış betonun alternatif yükleme kullanılmadığında, $2 \cdot 10^6$ tekrarda statik dayanımın yaklaşık % 90'ı, tam alternatif yükleme halinde yaklaşık % 70'i kadar yorulma dayanımı vardır (Mehta, Monteiro, 1997).

vii- *Darbe Dayanımı.* Darbe dayanımı betonun ani olarak dinamik bir yükle yüklenmesine karşı gösterdiği dirence verilen isimdir. Geleneksel betona lif katılması halinde betonun darbe dayanımı % 100-200 arasında artış göstermektedir (Arslan, 1993).

Çelik lifler matris üzerine gelen dinamik yükleri kendi üzerlerine alarak matrisin, çarpma etkilerine karşı daha yüksek bir çarpma mukavemeti göstermesini sağlarlar. Bu nedenle darbe dayanımı, betonun tokluğu ve kırılma enerjisi ile doğrudan ilgilidir (Arslan,1993).

Geleneksel betona çelik lif katılması ile betonun yüksek kırılma enerjisine sahip olması sayesinde tam korumalı askeri yapılar, hastaneler, köprüler, okullar, telekomünikasyon yapıları, hareket merkezleri, hava yolları gibi savaş veya doğal afet gibi durumlarda ayakta kalması istenen yapılarda, yapıya süneklik ve darbe dayanımı kazandıran çelik liflerin kullanılması gündeme gelebilmektedir.

Betonun darbe yükleri altındaki davranışını tanımlayabilen en önemli parametreler betonun dayanımı ve kırılma enerjisidir. Lif görünüm oranının ve lif içeriğinin artışı ve liflerin kancalı veya kıvrımlı olması kırılma enerjisini artırır. Çelik lifli betonun kırılma enerjisi, çelik liflerin çekme dayanımına da bağlıdır. Geleneksel betonda kırılma enerjisi (G_f), $100-150 \text{ J/m}^2$ arasında iken, çelik lifli betonda 4000 J/m^2 değerleri elde edilebilmektedir (Özyurt ve diğer, 2002).

ACI 544.1R-96'e göre betonun darbe dayanımını belirlemede değişik yöntemler içinde ikisi önerilmektedir. Bunlardan birincisi Dropweight adı verilen çelik bir

bilyanın lifli beton üzerine defalarca düşürülmesi esasına dayanan ağırlık düşürme deneyi ya da darbe etkisi veren bir alet ile dinamik çekme, eğilme veya basınç yükü uygulanması yöntemidir. Bu yöntemde, ilk çatlak anındaki darbe sayısı ve malzemenin kırılma anındaki darbe sayısı geleneksel betona göre yorumlanır. Ortalama lif dozajına (yaklaşık 30 kg/m³) sahip çelik lifli betonda darbe dayanımı lifsiz betona kıyasla 10-20 kat daha fazladır.

viii- Kavitasyon Hasarları. Serbest yüzeyle fakat oldukça büyük akım hızlarının yer aldığı su yapılarında karşılaşılan sorunların en önemlilerinden biri kavitasyon ve bunun neden olduğu hasarlardır. Kavitasyon, akım hızının ve düşünün yüksek olduğu barajların dolusavak boşaltım kanallarında, akım içindeki basıncın buhar basıncına dönüşerek suyun buhar haline geçmesi ve akım içinde buhar kabarcıkları oluşturması olarak tanımlanır. Akımla birlikte sürüklenen buhar kabarcıkları daha büyük basınç bölgelerinde patlayarak yoğunlaşırlar. Bu yoğunlaşmada kabarcık çevresinde kinetik enerjiye sahip olan sıvı, kabarcık merkezine doğru hareket eder ve burada ani olarak durur. Bunun sonucu olarak sıvının sahip olduğu kinetik enerji çok kısa bir sürede basınç enerjisine dönüşür. Eğer bu durum akımı çevreleyen yapı yüzeyine yakın bölgelerde oluşursa yapıda hasar meydana gelir. Kavitasyonun ve bunun sonucu olarak patlamaların sürekli devam etmesi halinde, kavitasyonun yer aldığı bölgenin hemen mansabında ortaya çıkan hasar giderek büyür ve yapının tahrip olmasına neden olur. Projeler hazırlanırken bu konuya özen göstermek gerekmektedir.

Kavitasyon hasarlarının oluşabileceği su yapılarında alınacak önlemler:

- derzlerin düzenli bir şekilde teşkil edilmesi
- dayanım arttırıcı önlemlerin alınması (beton dayanımını arttırma, çelik kaplama, epoksi kaplama)
- işletme süreci içerisindeki düzensizliklerin (akım hızlarındaki ani değişim) giderilmesi
- akış sırasında meydana gelen basınç şoklarının sönmelenmesi

Hasarı önlemek için hasarın oluştuğu malzemenin kalitesinin yükseltilmesi çözüm için önemli bir adımdır. Çeşitli nedenlerle kaviteasyona maruz kalmış yapılarda eğer beton akım hızının yüksek olması nedeni ile ortaya çıkan çekme kuvvetlerine dayanamıyorsa, hasar bölgelerinin onarılmasında daha güçlü darbe dayanımı, çekme dayanımı ve tokluğu yüksek bir malzemeye ihtiyaç vardır. Bu nedenle oluşabilecek hasarlara karşı çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar su yapılarında hasarın önlenmesi için alınan tedbirlerden biri olarak kullanılmaktadır (DSI, 1994).

ix- Dayanıklılık (Durabilite). Geleneksel betonlar ve lifli betonlarda durabilite problemi yaratan unsurlar hemen hemen aynıdır. Çelik lifli betonlarda özel durumlar ise şu şekilde sıralanabilir;

- Çelik liflerin korozyonu: Paslanmaz veya galvaniz kaplanmış lif kullanılması ile bu sorun ortadan kaldırılabilir.

- Boşluklu geçirgen yapı: Liflerin beton karışımı sırasında ayrışmayıp betonun içerisinde kalması boşluklu bir yapının oluşmasına neden olur. Bu durum sıvı ve gaz halindeki maddelerin beton içerisine nüfuz etmesine neden olabilmektedir.

Durabilite sorunlarının çözülebilmesi için iyi bir karışım, iyi yerleştirme ve sıkıştırma sonucunda iyi bir kür gereklidir. Lifli betonlar genellikle, yüksek çimento dozajı ve düşük su/çimento oranı ile hazırlanırlar. Çelik lifli beton iyi sıkıştırıldığı ve kür edildiği zaman lifler çimento hamuru tarafından korunursa üstün durabiliteye sahip olur. Klorid içeren ortamlarda yüzey pası görülürken içerideki lifler genellikle korozyona uğramaz.

Çelik lifler, genel olarak betonların aşınma, erozyon ve kaviteasyon dirençlerini arttırlar. Çelik lifler darbe aşınmasının neden olduğu mikro çatlakları kontrol ederek betonların aşınma hasarlarını azaltırlar. Ayrıca çelik lifler, beton kaplamaların yüzeylerinin pullanmasını önleyici etki yapmaktadır (Eyyubov ve diğer, 2003).

Çelik lifli beton ACI 544'te yüzey erozyonu ve kavitasyona karşı durabilitesi açısından incelenmiştir. Akan suyun etkisine karşı erozyon direnci geliştirilememiştir. Erozyon derecesi agrega kalitesi ve yüzey sertliğine bağlı olmaktadır. Betona lif katılması erozyon direnci açısından bir gelişmeye neden olmadığı gibi, yüksek su/çimento oranı ve hamur içinde fazla lif kullanılması aşınmayı arttırmaktadır. Bununla birlikte büyük yıkıntılarda kavitasyon derecesine bağlı olarak malzeme kaybı gerçekleştiğinde lifli beton durabilite sağlamaktadır.

x- Rötire. Rötire, priz esnasında ve sonrasında çeşitli nedenlerden dolayı oluşan çekme gerilmelerinin karşılanamaması ve bu yüzden oluşan çatlakların büyüerek çoğalması sonucu meydana gelmektedir. Betonun büzülmesi anlamına gelen rötire, makro ve mikro boşluklarda bulunan suyun beton bünyesinden uzaklaşması ile meydana gelir. Suyun uzaklaşması ile betonda büzülme oluşmaktadır.

Betonda rötire dört ana grupta toplanır:

- termik rötire
- plastik (erken, bünyesel) rötire
- karbonatlaşma rötresi
- hidrolik (kuruma) rötresi

Rötire sonucu betonda çatlakların oluşması ve betonarme donatısında parazit gerilmelerin meydana gelmesi rötrenin zararlı etkileridir. Çatlakların etkisi ile betonun çekme dayanımı azalırken, geçirimsizliğin artması da betonun kimyasal etkilere ve don olayına karşı direncini azaltarak donatı korozyonunun oluşmasına neden olur. Bu olumsuzlukların engellenmesi için priz süresi boyunca ve sonrasında oluşan çekme gerilmelerini matristen alarak, çatlak olmayan bölgelere transfer edecek çelik lifler kullanılmaktadır.

Hidratasyon süresi boyunca beton içinde sayısız küçük boşluk ve çatlak meydana gelir. Çelik lifler, beton içinde yüzey ve kenarlar dahil olmak üzere homojen biçimde dağılır. Lifler betonda büzülme çatlak genişliklerini azaltarak büzülme hareketini

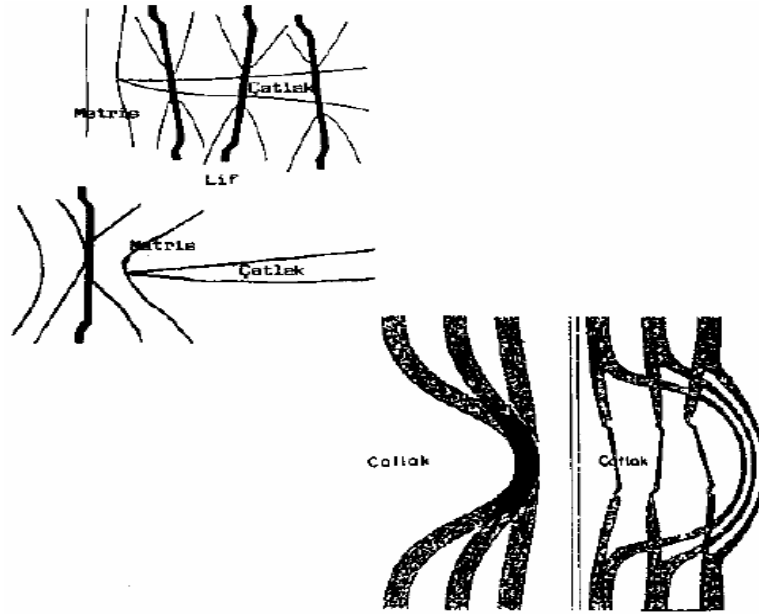
engellerler. Köprüleme etkisi ile kılcal boşluk oluşumu azalır ve çatlak ilerlemesi belli sınırlar içinde kalır. Yüksek çekme mukavemeti ve düşük elastisite modülüne sahip çelik liflerin kullanıldığı betonlarda rötre çatlakları geleneksel betona kıyasla daha az olmaktadır. Uzun lif kullanımı kuruma rötresinin sınırlanmasında daha etkili olmaktadır. Çelik lifli betonlarda aynı hacim değerinde numune yüzeyi büyüdükçe rötre olayı artmaktadır. Lif yüzdesinin artması ile kuruma rötresi azalmaktadır. Lif uzunluk/çap oranının büyümesi ile kuruma rötresinde birim deformasyon azalır, lif hacminin artması ile çatlak genişlikleri azalmaktadır (Taşdemir ve diğer, 2004).

2.1.2.1.8 Çelik Liflerin Beton/Harç İçerisindeki Davranışı

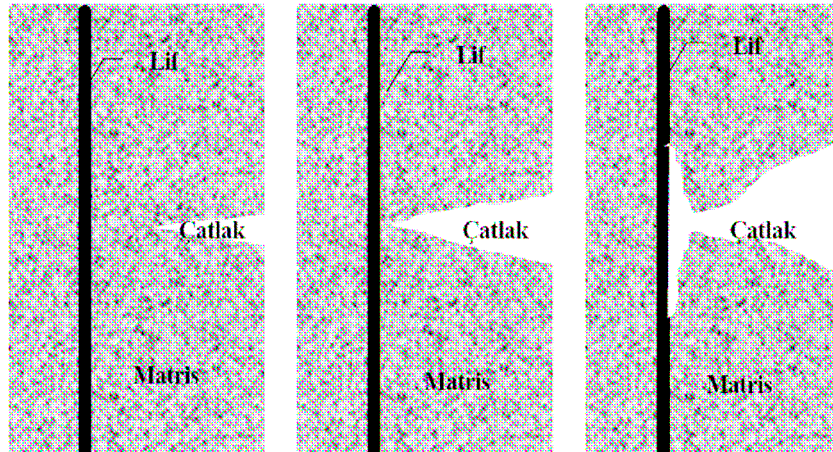
Çelik lifli betonda kullanılan lifler ile geleneksel betonda kullanılan donatı arasında işlevsellik açısından farklar bulunmaktadır. Lifler ve donatıların çatlak kontrolündeki fonksiyonları birbirinden farklıdır. Çelik lifler beton için yapılan statik hesaplarda eğilme momentini alan hasır ve çubuk donatıdan ayrı tutulmalıdır. Çelik lifler betonu plastik davranışa iten malzemelerdir. Çelik lifli betonun özelliği, bu betonun arttırılmış elastikiyet ve enerji yutma yeteneğidir (Arslan ve Aydın, 1999).

Lifli betonların gerilme altındaki davranışları geleneksel betondan farklılık arz eder. Gerilme sonucu ortaya çıkan mikro çatlaklar geleneksel betonda gerilmenin artışına bağlı olarak çeşitli yönlerde ilerleyerek belli bir noktadan sonra parçalanmaya neden olur. Lifli betonlarda ise ilk çatlak sonrası çimento fazından liflere doğru bir gerilme transferi olur. Lifler, beton içindeki miktarı ve geometrik şekillerine bağlı olarak, bu gerilmenin bir kısmını kendileri taşır, bir kısmını da matrisin sağlam bölgelerine transfer eder. Lifsiz betonlarda çatlak yayılımı, ilk çatlak için gerekli enerjinin yarısı kadar bir enerji ile devam ederken, lifli betonlarda çatlak yayılımı için gerekli enerji ilk çatlak için gerekli enerjiden daha fazladır. Bu enerjinin bulunması durumunda bile, bu enerjinin büyük bir bölümü lifler tarafından taşınır ve bu işlem liflerin çimento hamuru matrisinden sıyrılması için gerekli enerji seviyesine kadar devam eder. Nihai yük sonrası beton göçtükten sonra da lifler kırılan parçaları bir arada tutmaya devam eder. Hatta nihai yükten bir miktar daha fazlasını taşır.

Liflerin beton içerisindeki davranışı özellikle kritik yüklemelerde, beton iç gerilmeleri çökme sınırına geldiğinde daha iyi anlaşılır.



Şekil 2.11 Liflerin çatlak yayılımını durdurması



Şekil 2.12 Gerilmenin lifler vasıtasıyla dağıtılması

Lifsiz betonda kırılma sonrası yükün azalma hızı çok yüksek olup betonun yapabileceği maksimum deformasyon da çok azdır. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda ise, maksimum gerilmeden sonra yükün davranışı lifsiz betona göre oldukça değişiktir. Maksimum gerilmeden sonra yükte hafif bir düşüş meydana gelir. Daha sonra meydana gelen gerilmenin bir kısmının lifler üzerinden taşınması

nedeniyle betonun gerilme-deformasyon davranışında geleneksel betona göre farklılıklar yaşanır. Çelik lifli betonda yük tedrici olarak azalır. Dolayısıyla liflerin matristen ayrılması ve uzaması nedeniyle emilen enerji ya da başka bir deyişle meydana gelen deformasyon işi oldukça büyüktür (Yerlikaya, 1998).

2.1.2.1.9 Çelik Liflerin Kullanım Alanları

Çelik lif katkılı betonlar son yıllarda; dayanıma olan olumlu etkileri ve enerji yutma kapasitelerinin fazla olması nedeniyle yaygın olarak uygulama alanı bulduğu kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir (www.beksa.com.tr).

i- Endüstriyel Zeminlerde. Dayanıklılığın ve çarpma rijitliğinin yüksek olduğu fabrika zemini, derzsiz zemin, ağır yüklü stok sahası, süper düzgün zemin, soğuk hava deposu yapılarının inşasına imkân verir. Ayrıca yük taşıma kapasitelerinin yüksek olması, çatlak kontrolü sağlaması, dinamik ve ani yüklemelere karşı yüksek direnç göstermesinden dolayı endüstriyel yapıların zeminlerinde kullanılmaktadır.

ii- Yapılarda. Sünekliğinin yüksek olması depreme dayanıklı konut yapılarında, endüstriyel ve nükleer atık depolanan yapılarda, koruma ve savunma amaçlı depo ve silolarda, güç santralinin yapımında enerji yutma kapasitesinin yüksek olması nedeniyle kullanılmaktadırlar. Geleneksel betonlara göre çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar parçalanmama dayanıklılığına da sahiptirler. Çelik lifler, beton dağılmadan önce büyük miktarda enerji emme kapasitesine sahip olmaları nedeniyle de küçük çatlakları bir arada tutarlar.

iii- Tünellerde ve Madenlerde. Maden tavan destekleri, tünel iç kaplama, tünel segmanları, püskürtme beton, istinat duvarları, şev stabilitesinde kenar ve köşelerde oluşan hasarları en aza indirmek, onarım maliyetini azaltmak, üretimde verimlilik için çekme donatısı kullanılmadan yüksek dayanımlı beton elde edilir.

iv- Dış Saha Kaplamaları. Havaalanı, karayolu, benzin istasyonu ve liman zeminleri gibi yol kaplamalarında aşınma ve çekme dayanımının yüksek olmasından dolayı dayanımı ve dayanıklılığı yüksek beton elde edilir.

v- *Panel ve Borularda.* Kafes üretiminin ortadan kalkması ile üretimin hızlanması, sıyrılmaya karşı liflerin ankrajları sayesinde üstün direnç, üretimde, taşımada, stoklamada meydana gelebilecek ufalanma, kopma ve dökülmeleri azaltmak amaçlarıyla panellerde kullanılırlar.

Büyük çaplı beton borularda donatılı uygulamalardan daha ekonomik oluşu, ilk çatlama yükünü arttırması, ısıl çatlamları ortadan kaldırması, betonarme borunun sünekliğini arttırması, borunun her tarafına dağıldığından muf kısmında oluşabilecek çatlak ve kırılmaları ortadan kaldırabilmesinden dolayı beton ve betonarme borularda kullanılmaktadır.

vi- *Su Yapıları ve Arıtma Tesisleri.* Baraj, kanal, kanalet, dinlendirme havuzu ve arıtma tesisi sistemlerinde aşınma direnci yüksek olduğundan kavitasyon hasarlarına karşı kaplamalarda kullanılmaktadırlar.

2.1.2.1.10 *Çelik Liflerle İlgili Önceki Çalışmalar.* Yıldırım (1994), hafif ve yarı hafif betonlarda çelik lif kullanımının betonun özelliklerine etkisini araştırmıştır. Lifli beton malzemelerde matrisin fonksiyonu lifleri bir arada tutmak, onları korumak ve liflere veya liflerden gerilme transferini sağladığını ve lifin, betonun basınç mukavemetine etkisinin oldukça az olduğu gözlemlenmiş ve değişik tip liflerde de bunun değişmediğini belirtmiştir. Direk çekme yükü altında kontrol betonunun gevrek bir malzeme olduğunu ve elastik bir davranış gösterdiğini bildirmiştir. Plastik bir uzama söz konusu olmadığını oysa lifli betonun elasto-plastik bir davranış göstermekte ve gerilme artışının, şekil değiştirmeden daha hızlı olduğunu belirtmiştir. Hava boşluğunda lif yüzdesine göre olan artışın, lifin yerleşmeyi olumsuz hale getirmesiyle açıklanabileceğini ve lifli betonların iç sürtünmeyi güçleştirdiğini ve yerleşme sırasında hava boşlukları kalabileceğini belirtmiştir. Çelik lif kullanımının betonların işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilediğini, lif oranının artması ile elastiklik modüllerini değiştirmemekte veya bir miktar azaltmakta olduğunu belirtmiştir. Yarı hafif ve hafif betonlarda çelik tel oranının artmasının, betonların basınç, yarma ve eğilme dayanımlarını arttırdığını belirtmiştir. Ayrıca çelik lif kullanımının, bu betonların ultrases hızlarını değiştirmede de belirtmiştir.

Yarı hafif ve hafif betonlarda çelik lif kullanılarak normal betonların mukavemetine yaklaşılmakta olduğunu bildirmiştir.

Ünal (1994), betonun erken yaşlardaki mukavemet gelişimini hızlandırmada yararlanılan ısıtma işlemlerinin lifli betonlara uygulanması halinde, lifli betonun erken ve ileriki yaşlardaki elastik ve elastik olmayan özelliklerine etkisini araştırmıştır. ZP305 30/0.5 çelik lif 0, 2.5, 5, 8 ve 10 dm³/m³ miktarlarda beş farklı bileşimde 350 kg/m³ dozajda ve 0,63 su/çimento oranında betonlar üretmiştir. Üretilen numuneler 20°C saklama, 50°C yumuşak çevrim, 65°C ılımlı çevrim ve 80°C sert çevrim ısıtma işlemlerine maruz bırakmıştır. 70×70×280 mm'lik prizmatik numuneler üzerinde 1., 28. ve 90. günlerde ultrases hızı, eğilme ve basınç deneyleri yapmıştır. Betona katılan lifler, taze betonun işlenebilirlik özelliğini değiştirdiğini ve lif miktarı arttıkça karışımın hava boşluğu oranı artarken çökme değerinin de sifira yaklaştığını belirtmiştir. Şahit ve lifli betona uygulanan çevrimin sıcaklığı arttıkça, 1 günlük numunelerin basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti, ultrases hızı ve lif matris aderans dayanımının arttığını gözlemiştir. Betonun ilk üç özelliği üzerine sert çevrim uygulamasının 1. günde diğer çevrimlere göre daha fazla etkili olduğunu görmüştür. Diğer taraftan lif miktarının aynı özellikler üzerine olumlu yönde artırıcı etkisi sıcaklık 50°C'den sonra azalmasına rağmen, liflerin mukavemeti artırıcı etkisi ısıtma işlem sıcaklığı yükseldikçe ilk yaşlarda hem eğilme mukavemetinde hem de basınç mukavemetinde azalmasına karşılık, ileriki yaşlarda eğilme mukavemeti üzerine etkisi değişmezken, basınç mukavemetinde azalma devam ettiğini ve ısıtma işlem uygulamasının çelik lifli beton özelliklerine gösterdiği etkilerin normal betonlara göre farklı bulunduğunu belirtmiştir.

Uğurlu (1995), çalışmasında çelik liflerle güçlendirilmiş betonun su yapılarındaki kaviteasyon hasarlarının onarımında kullanılması üzerine çalışmıştır. Kaviteasyonu, akım hızının ve düşünün yüksek olduğu barajların dolusavak boşaltım kanallarında, akım içindeki basıncın buhar basıncına düşerek suyun buhar haline geçmesi ve akım içinde buhar kabarcıkları oluşturması olarak tanımlamıştır. Kaviteasyonun, oluşum mekanizması açısından dinamik bir etki olduğunu söylemiştir. Kırılgan bir yapı malzemesi olan betonun, içerisindeki çelik lifler yardımıyla yük kaybı olmaksızın ya

da çok az yük kaybı seviyelerinde yüksek oranda elastik plastik davranabilme yeteneği kazandığını bildirmiştir. Yük altında bu farklı davranış sonucu betonun teknik özelliklerinden tokluk, darbe, yorulma, kaviteasyon hasarlarının dayanımında müthiş bir artış meydana geleceğini belirtmiştir. Çelik lifli betonun kırılma anındaki yüksek enerji absorblama özelliği sonucu betonun kırılması için yapılması gereken işin büyümüş olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, çelik liflerle güçlendirilmiş betonun teknik özelliklerinden yararlanarak su yapılarındaki kaviteasyon ve negatif basınçtan ileri gelen hasarlara karşı kullanılmasından bahsetmiştir.

Kützing (1996), yüksek performanslı betonların sünekliliğinin geliştirilmesi üzerine liflerin etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada yüksek performanslı betonların basınç altındaki kırılma davranışını liflerle değiştirilmesi yani sünek davranması amacıyla çelik lifleri %0,5'in (40 kg/m^3) altında ve %1,5 (120 kg/m^3) oranında kullanmıştır. Numune boyutları $100 \times 300 \text{ mm}$ olan 72 kg/m^3 mikro silikalı karışımlar hazırlamıştır. Çelik lifin %0,5 oranının altında kullanımında, gerilme-şekil değiştirme eğrisinde değişiklik oluşturmadığı, %1,5 oranında çelik lif kullanımında ise maksimum noktası belirginleşmediği ve maksimumdan sonrada eğride daha az basamaklar oluşturduğunu görmüştür. Lifli betonlarda ani bir kırılma gözlenmediğini ve boyuna mikro çatlakları ise çelik liflerin adeta diktiğini belirtmiştir.

Furlan ve Hanai (1997), çalışmalarında faklı tiplerde çelik liflerle güçlendirilmiş etriyeli ve etriyesiz kirişlerin özellikleri incelenmişlerdir. Su/çimento oranı sabit 0,45 olan yedi farklı karışımda, 25,4 mm uzunluğundaki çelik lif hacimce %1 ve %2, 38,1 mm uzunluğundaki çelik lifi ise %0,5, %1 ve %2 oranlarında kullanmışlar. Etriyesiz tüm kirişlerin kesme kırılması gösterdiğini, ayrıca lifli diğer tüm kirişlerin ise kesme dayanımını %9 ila %37 arasında arttırdığını belirtmişlerdir. Liflerin çatlak sonrası rijitlik artışı sağladığı ve çatlak kontrolünde daha etkili olmasından dolayı sehimi azalttığı bildirilmiştir. Çelik lif katkısının betonun işlenebilirliğini azalttığını belirtmişlerdir. Çelik lif katılmasının en önemli avantajının mekanik özelliklerde çekme dayanımını uzun liflerin arttırdığı, kısa liflerin ise özellikle elastisite modülünü arttırdığını belirtmişlerdir. Lif takviyeli betonlarda çatlamanın yavaşladığı bunun da sehimi azalttığı belirtilmiştir. %2 çelik lif etriyesiz kirişlerde sünekliliği

arttırdığını bildirmişlerdir. Lif katkısının kesme dayanımını arttırdığı ve etriyeli kirişte kırılma modunu kesmeden eğilmeye çevirdiğini belirtmişlerdir.

Eren ve Çelik (1997), yaptıkları çalışmada silis dumanının ve çelik lif tiplerinin, çelik lif takviyeli yüksek dayanımlı betonların (ÇLTYDB) özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada iki farklı silis dumanı yüzdesi %5 ve %10 ve üç farklı kancalı lif (30/0,50; 60/0,80; 50/0,60; boy/çap, mm/mm) hacimce üç farklı oranda beton hacminin yüzde 0,5, 1 ve 2 oranlarında karıştırmışlardır. Basınç dayanımı üzerinde silis dumanı etkisi olmasına karşın, çelik liflerin miktarı ve narinliği, basınç dayanımını çok az etkilediğini belirtmişlerdir. Deneylelerden şu sonuçları çıkarmışlardır:

- Katılan liflerin çap ve miktarlarını artırmanın ÇLTYDB'ların Ve-be zamanını arttırdığını,
- Her ne tür olursa olsun çelik lif içeriğinin artırılmasıyla taze ÇLTYDB'ların içinde kalan hava azaldığını,
- Narinliği 60 olan %2 lif içerikli betona, %10 silis dumanı eklenmesiyle yarmada çekme dayanımı %129,91 arttığını,
- A serisi koduyla üretilen betonun yarmada çekme dayanımı (ft) ile, kullanılan lif yüzdesi (Vf) arasında ve yarmada çekme dayanımı (ft) ile basınç dayanımı (fc) arasında lineer bir fonksiyonla; hiç silis dumanı içermeyen ve çimento ağırlığının %5 ve %10 oranında silis dumanı içeren ÇLTYDB'nun yarmada çekme dayanımındaki gelişme açıklanabileceğini,
- %10 silis dumanı ve %1 oranında narinliği 60 olan lif eklenmiş A serisi beton %28,27 ile maksimum basınç dayanım artışı sağladığını,
- %2 oranında ve narinliği 75 olan lif içeren A serisi betonun basınç dayanımını %40,69 düşürdüğünü bulmuşlardır.

Kurugöl (1997), çelik lif donatılı ve polimer katkının normal ve hafif betonların mukavemet özelliklerine etkileri üzerinde deneysel çalışmalar yürütmüştür. Deneylelerde ZC 50/50 tipindeki çelik lif kullanmıştır. Çelik lif hacim oranı arttıkça, betonun işlenebilirliğinin azalmakta ve boşluk miktarının artmakta olduğunu

belirtmiştir. Çelik liflerin normal ve hafif betonlara kazandırmış olduğu en önemli özelliğin, eğilme ve yarma gerilmelerindeki iyileşmeler şeklinde kendini gösterdiğini, basınç mukavemeti değerlerinde ise bu anlamda bir etki yapmadığını saptamıştır. Normal ve hafif betonlarda değişken hacim oranlarında katılan çelik lifin elastisite modülü değerleri üzerinde etkili olduğunu ve çelik lifin hafif betonlarda normal betonlara göre daha çok arttığını belirtmiştir. Çelik lif oranının sabit olduğu normal ve hafif beton serilerinde yapılan tahribatsız schmidt sertlik ve ultrases hız ölçüm değerleriyle, basınç mukavemetleri arasında iyi bir uyum olduğunu görmüştür.

Acun (2000), çelik lifli betonlar üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. RC 80/60 olarak kodlanmış boyu 60 mm ve kalınlığı 0,75 mm olan iki ucu kancalı çelik lifler beton karışımlara sırasıyla %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında katmıştır. Çelik lif takviyeli beton numunelerinde aşağıda belirtilen sonuçları bildirmiştir:

- Betona katılan çelik liflerin karışım oranlarına bağlı olarak bu betonların işlenebilirlik özelliklerini etkilediği ve hatta çelik lif hacim oranı arttıkça betonların işlenebilirliğinin azaldığını ve boşluk miktarının arttığını,
- Çelik lif donatı malzemesinin bu betonların elastisite modülü değerlerini 4 kat arttırdığını ve en çok artışın %1 çelik lifli betonlarda olduğunu,
- Çelik liflerin en belirgin faydasının eğilmede çekme gerilmesinde görüldüğünü, eğilmede çekme mukavemetini yaklaşık 2 kat arttırdığını,
- Çelik lif oranı arttıkça betonun eğilmede çekme mukavemetinin de doğru orantılı olarak arttığını, eğilme çekme deneyi sırasında normal beton kiriş numunesi ilk çatlamada kırılırken, çelik lif takviyeli kiriş numunelerinin ilk çatlaktan sonra da bir süre daha taşıma gücünü koruduğunu,
- Basınç mukavemeti deney sonuçlarından da anlaşılacağı üzere çelik liflerin bu mekanik özelliğe pek de etkili olmadığı, hatta çelik lif oranı arttıkça basınç dayanımlarında daha da azalma olduğunu belirtmiştir.

Ayrıca, eğilmede çekme deneyinden kırılan parçalar üzerinde yapılan basınç dayanım testinde çelik lifli betonda normal betona göre daha yüksek değerler elde edildiğini belirtmiştir.

Aydoğan (2001), yüksek kalitede, kavitasyon, tokluk, kimyasal ve fiziksel etkilere karşı dayanıklılık, yorulma, aşınma, basınç, eğilme dayanımları v.b. uzun süre karşı koyabilen ve taşıma gücüne sahip beton kütlelerinin üretimine yeni bir alternatif sunmak için, elik lifli betonlar içerisine %0, 2,5, 5, 10 oranlarında silis dumanı, imento ile yer değiştirerek katmıştır. BS 25 beton sınıfına göre su/imento oranı 0,50 olarak sabit tutarak, hazır döküm kalıplarda titreşimli masa vibratörle, 10×10×50 cm ebatlarında üretilen beton numuneleri, basınca ve tek eksenli yüklemeyle eğilmeye tabi tutmuştur. Yaptığı çalışmaların en önemli sonucu; silis dumanı+elik lifli betonların %10 silis dumanı katkı durumunda, elik lifli betonlara göre, ortalama 0,27 basınç, 0,10 eğilme dayanımında artış; sadece silis dumanlı betonlara göre, ortalama 0,33 basınç, 0,17 eğilme dayanımında artış; normal betonlara göre ise, ortalama 0,55 basınç, 0,07 eğilme dayanımında artış gösterdiğini belirtmiştir. Bu olumlu etkilerin sebebini, silis dumanının kılcal boşlukları doldurarak betonun basınç dayanımını artırmasına ve elik liflerde betona süneklik kazandırarak eğilme dayanımını arttırmasına bağlamıştır. Silis dumanı ve elik lifin bir arada kullanılması durumunda birbirlerinin zayıf yönlerini tamamlayarak çok iyi bir kompozit malzeme oluşturmakta olduğunu bildirmiştir.

Miao ve ark. (2002), elik lifsiz ve elik liflerle güçlendirilmiş betonların donma dirençleri üzerindeki sülfat çözeltisinin etkisini araştırmışlardır. Deneylerde narinlik oranı 40 olan elik lifi hacimce 117 kg/m³ kullanmışlardır. Su/imento oranı ise 0,26, 0,32 ile 0,44 ve maksimum agrega tane çapı 10 mm olan beton 40×40×160 mm prizmalarda hazırlamışlardır. Sülfat zeltisi ise derişikliği %5 olan sodyum sülfat çözeltisinden oluşturmuşlardır. Sülfat atağı donma çözülme ile ilgilendirilerek beton üzerinde hem pozitif hem de negatif etki görmüşlerdir. 0,44 ve 0,32 su-imento oranlarında donma çözülme çevrimi sudakine göre sodyum sülfatta daha az etkidiğini, 0,26'da ise tam tersi sodyum sülfatta daha şiddetli bir etki görmüşlerdir. elik lifli betonların lifsiz betonlara göre daha yüksek kalitede ve daha fazla donma çözülme çevrimine dayandığını belirtmişlerdir. Donma zlmenin ve sülfat atağının kendi içerinde etkimekte olduğunu belirtmişlerdir. elik lif donatılı betonların analizinde en önemli parametrelerin çekme ve eğilme dayanımları olduğunu, çünkü bu parametrelerin malzeme davranışını temsil ettiğini belirtmişlerdir.

Yiğiter (2002), çalışmasında lifli yüksek performanslı betonların enerji yutma kapasiteleri ve deformasyon özelliklerini araştırmıştır. Betonda farklı en büyük agrega dane çapları, farklı lif geometrileri ve farklı lif dozajları kullanımının gerilmede formasyon davranışlarına etkilerini incelemiştir. Deneysel çalışmasında üretilen betonlarda değişken olarak iki farklı Dmax (15 mm ve 25 mm), iki farklı çelik lif (l=30 mm, d=0,55 mm ve l=60 mm, d=0,75 mm) ve dört farklı lif dozajı (0, 40, 80, 120 kg/m³) seçmiştir. Beklenildiği üzere betona katılan lif miktarının artmasıyla taze betonun çökme (slump) değerlerinde ciddi azalmalar meydana geldiğini ve maksimum lif dozajına sahip karışımlarda lifsiz karışımlara göre %77 slump kaybı görmüştür. Gerek 0-32 dizaynda, gerekse 0-16 dizaynda lif tipi ve lif içeriği ile beton basınç dayanımları arasında kayda değer bir ilişki bulmak güçtür denilmiştir. Her iki dizayn türünde de (0-32, 0-16) lifli karışımların 7 günlük basınç dayanımlarında lifsiz numunelere göre pek bir değişkenlik görülmezken, 28. günde lif dozajı arttıkça lifsiz örneklere göre basınç dayanımlarında küçük bir azalma eğilimi görmüştür. Bunun sebebini şöyle açıklamıştır:

Betonda, düşük basınç dayanımının sebeplerinden biri hidrasyonun henüz tamamlanmamış olması, bir diğeri sıkıştırma yetersizliğinden kaynaklanan boşluklu yapı olarak sayılabilir. 7 günlük dayanımlarda lif dozajı artışına göre dayanımların pek değişmemesinin gerekçesi hidrasyon derecesinin birincil etken olduğudur. Ancak hidrasyon yüksek mertebelere ulaştıktan sonra düşük dayanıma sebep olarak boşluklu yapı ön plana çıkmaktadır. 28 günlük numunelerdeki lif miktarının artışı ile görülen dayanımlardaki azalma eğilimine sebep, yine lif miktarı artışı ile azalan betonun kompasitesidir. Lifler, eğilme dayanımlarında kontrol numunelerine göre 7. günde etkin artışlar sağlarken, 28. gündeki dayanımlarda etkileri daha azdır. Tahmin edildiği gibi, eğilme dayanımındaki en büyük gelişmeyi maksimum lif dozajı olan 120 kg/m³ sağladığı ve yarma deneyinde de lifler beklenen sonucu yaratmış ve lif dozajı arttıkça yarma dayanımlarının arttırdığı belirtilmiştir. Betonların 28. gündeki serbest basınç deneyi sırasında, gerilme-deformasyon ilişkisi kullanılarak bulunan elastisite modülü değerleri, basınç dayanımı ile ilgili olan sonuçlarla benzer eğilim gösterdiği bildirilmiştir. Başka deyişle, lif tipi ve lif dozajı ile elastisite modülü değerleri arasında tanımlanabilecek bir fonksiyon ya da ilişki belirlenmemiştir.

Maksimum agrega dane çapının etkisi açısından, büyük D_{max} 'li betonların hem enerji yutabilme kapasitelerinin daha fazla, hem de lif katkısıyla birlikte lifsiz betonlara göre sağlanan kapasite artışı oranının daha yüksek olduğunu görmüştür.

Taşdemir ve Bayramov (2002), çalışmalarında yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında yüksek dayanımlı betonlar (YDB) ile homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemleri (DSP), büyük kusurlarında arındırılmış (MDF) çimentoyu, geleneksel çelik lif donatılı betonları (ÇTDB), karma lif donatılı betonları, reaktif pudra betonları (RPC) gibi ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitleri, yüksek oranda çelik lif içeren çimento bulamacı (SIFCON), kendiliğinden yerleşen betonu, sentetik lif donatılı betonları, erken yaşlardaki rötresi düşük yüksek dayanımlı yarı hafif betonu ve yangına dayanıklı polipropilen lif donatılı yüksek dayanımlı betonu gözden geçirmişlerdir. Lif donatılı betonlarla ilgili olarak aşağıdaki sonuçlara varılabileceğini belirtmişlerdir:

- Yüksek performanslı lif donatılı betonların hem fiziksel hem de kimyasal etkilere karşı normal betonlara kıyasla daha iyi bir dayanıklılığa sahip olduklarını,
- Çelik liflerin, beton gibi yarı gevrek bir malzemede sünekliliği arttırmak için giderek daha fazla kabul görmekte olduğunu,
- Yüksek performanslı lif donatılı betonlar üzerine yapılmış birçok araştırmaya karşın uygulamaların sınırlı olduğunu belirtmişlerdir.

Ünal (2003), çalışmasında çelik lif içerikli beton yolların mekaniksel özelliklerini araştırmıştır. Su/çimento oranı 0,47 sabit tutularak, betonlara 20 kg/m^3 ve 40 kg/m^3 oranlarında RC65/60 BN tipi iki ucu kancalı çelik lif kullanmıştır. Çelik lif içeren betonların basınç dayanımlarında kontrol grubuna göre %7'lik bir artış görmüştür. Büzülme değerleri kontrol grubuna kıyasla %43 daha az, aşınma dirençleri ise kontrol grubundan %6, donma çözülme direnci ise kontrol grubuna göre %42 arttığını bulmuştur.

Altun ve ark. (2004), çalışmalarında su/çimento oranı 0,5 olan ve çökmesi süper akışkanlaştırıcı ile 150 ± 20 mm aralığında sabit tutulan çelik lif katkılı silindir beton numuneler C20 betonu kullanılarak Dramix RC-80/60-BN tipi çelik lif katkılı 30 kg/m^3 , 40 kg/m^3 , 50 kg/m^3 , 60 kg/m^3 dozajlarında 4x6 adet üretilmiştir. Değişik dozajlardaki çelik lif katkısının beton basınç dayanımına etkisi yanında, elastisite modülüne ve tokluk değerlerine olan etkileri de belirlenmiştir. Silindir numune basınç dayanımlarının, lif narinliği 80 ve su/çimento oranı 0,50 olan betonda 30 kg/m^3 , 40 kg/m^3 ve 50 kg/m^3 lif içeriklerinde azaldığı 60 kg/m^3 lif içerikli beton basınç dayanımının artış göstermesine nazaran katkısız beton basınç dayanımına göre azalmış olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde çelik lif katkısının C20 beton sınıfını değiştirmedeği sonucuna ulaşılmıştır. Çelik lif katkısı katkısız numuneye göre en az iki katı kadar sünek davranış göstermiştir. Ayrıca artan çelik lif oranı verilen beton sınıfı ve su/çimento oranı için süneklik değerini istenilen düzeylerde değiştirmemiştir. Silindir numune gerilme-şekil değiştirme eğrilerine göre, çelik lif katkısı ile elastisite modüllerinin incelenen numuneler için azalmış olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Beddar ve ark. (2004), çimento matrisinin düşük eğilme dayanımından dolayı kırılğan bir malzeme olduğunu, matris içerisinde rastgele dağılan lif ilavesinin kırılma dayanımını geliştirdiğini, bununla birlikte karışımın işlenebilirlik kaybı problemine yol açtığını, bu amaçla çelik lif takviyeli beton karışımın dizaynının optimize edilmesi üzerinde çalışmışlardır. Bu optimize katkı maddesinin, lifin su ve çimentonun hacmi gibi parametreler ile işlenebilirlik fonksiyonu ile araştırmışlardır. 1,2 mm çapında 30~50 mm uzunluğundaki çelik lifler %0, %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarında kullanılırken, katkı maddesi olarak yoğunluğu 1,2 olan süper akışkanlaştırıcı %0, %0,5, %1, %1,25, %1,5, %1,75 ve %2 oranlarında kullanılmıştır. Çimento dozajı 350 kg/m^3 ve su miktarı 215 lt/m^3 olan 35 farklı test karışım hazırlamışlardır. Ayrıca $100\times 100\times 100$ mm'lik küplerle basınç dayanımları, $70\times 70\times 280$ mm'lik prizmalar ile de eğilme dayanımları incelenmiştir. Çalışma sonucunda lif takviyeli betonların karışım dizaynının optimize edilmesi metodunu değişen akışkan katkı, sabit su/çimento oranında su ve çimento miktarına

dayandırmışlardır. Ayrıca akışkanlaştırıcı katkının %1 'den az kullanılmasında liflerle güçlendirilmiş betonlarda işlenebilirliğin azaldığını belirtmişlerdir.

Arı ve ark. (2004), beton borulara çelik lif katkısının mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Çalışmada basınçsız su ve yağmur suyu iletmede kullanılmak üzere yapılmış, uzunluğu boyunca ek yerleri dışında, en kesiti değişmeyen 500 mm anma çaplı betonarme borular ele alınmıştır. Borulara farklı cins ve oranlarda çelik lif ilave edilerek hasır donatılı borular ile çelik lifli boruların mekanik özelliklerinin kıyaslaması yapılmıştır. Bu kıyaslama yapılırken C35 betonu S420 donatısı ve kancalı lifler sınıfına giren ve çekme dayanımı minimum 1050 N/mm^2 olarak belirtilen ZP308 ve RC80/60 BN kodlu çelik lifler 25 kg/m^3 ve 40 kg/m^3 dozajlarında kullanılmıştır. Deneyle sonuçunda, ZP308 ve RC80/60 BN çelik lif çeşitleri ile üretilen silindirik beton numunelerde 25 kg/m^3 dozajla sırasıyla %7 ve %8'lik artışlar görülürken, 40 kg/m^3 dozajla sırasıyla %6 ve %7'lik düşüşler görülmüştür. Deneylede çelik lif takviyeli beton borularda ilk çatlakların çok yüksek yüklerde ortaya çıktığı ve tipik olarak 0,3 mm'den az bir genişliğe sahip olduğu görülmüştür. Çelik lif donatı içermeyen numuneler çok gevrek bir şekilde kırılırken, çelik lif donatı içeren numuneler yüksek miktarda enerji yutarak, kontrollü ve uzun sürede kırılmışlardır. Özellikle RC 80/60 BN tipi çelik lif katkısının beton boruların taşıma gücünde ve sünekliğinde artışlar sağlandığı görülmüştür.

Song ve Hwang (2004), yüksek dayanımlı çelik liflerle güçlendirilmiş betonların mekanik özellikleri üzerinde çalışmışlardır. Yüksek dayanımlı beton yapımında çimento, silis dumanı, su, süper akışkanlaştırıcı, nehir kumu ve kırılmış bazalt sırasıyla 430, 43, 133, 9, 739 ve 1052 kg/m^3 miktarlarında kullanmışlar. 35 mm uzunluğunda, 0,55 mm çapındaki performans sınıfı 64 olan çelik lifi %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarında hacimce kullanmışlardır. Çalışma basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kırılma modülü ve tokluk indeksi özelliklerini içermiştir. Deneyle sonuçunda basınç dayanımının çelik lif miktarının artması ile arttığını ve maksimum dayanıma %1,5 çelik lif oranında görüldüğünü ve dayanımda %15,3'lük bir artış meydana geldiğini ancak %2 lif oranında hafif azalma görüldüğünü bildirmişlerdir. Yarmada çekme dayanımlarında ise %0,5- %2 lif oranları arasında artan lif miktarı

ile yarma dayanımlarının %19 ile %98,3 arasında yükseldiğini, kırılma modülünün ise %28,1 ile %126,6 arasında yükseldiğini belirtmişlerdir. Tokluk indekslerinin de artan liflerle geliştiğini ve %2 çelik lif oranında I5, I10 ve I30 değerlerinin sırasıyla 6,5, 11,8 ve 20,6 değerlerini aldığını belirtilmiştir. Ayrıca liflerle güçlendirilmiş betonların basınç, yarmada çekme dayanımları ile kırılma modülünü veren bir dayanım modeli kurmuşlardır.

Tabak (2004), yaptığı çalışmada, çelik lif görünüm oranının (l/d) ve lif hacminin (V_f), betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmeye çalışmıştır. Bu amaç çerçevesinde görünüm oranı 45, 65 ve 80 olan üç farklı çelik lifi, %0, %1 ve %1,5 oranlarında kullanılarak 10 farklı kompozisyonda betonlar üretmiştir. Üretilen betonlardan hazırlanan muhtelif boyuttaki örnekler üzerinde tek eksenli basınç, yarmada çekme, dört noktadan yüklemeli eğilme deneyleri, ultrases hızı ölçümleri ve darbe deneyleri yapmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde;

- Çelik lifler, her hacim ve görünüm oranında taze betonun işlenebilme yeteneğini düşürdüğü ve özellikle işlenebilme; görünüm oranı yüksek olan ($l/d=80$) ve lif hacmi %1 ve %1,5 olan betonlarda kayda değer oranda düşürdüğünü,
- Çelik lif kullanımı, betonun birim hacim ağırlığını arttırdığını ve bu artışın, kullanım hacmine ve görünüm oranına bağlı olarak değişmekte olduğunu,
- Betonda çelik lif kullanımı betonun basınç dayanımını; yaklaşık olarak %4 ile %18 arasında değişen değerlerde arttırdığını,
- Betonda çelik lif kullanımı, betonun yarmada çekme dayanımını; kayda değer oranda (%11 ile %55 arasında) arttırdığını görmüştür. Bu etki lif görünüm oranı ve lif hacmi arttıkça arttı,
- Betonda çelik lif kullanımı, betonun eğilme dayanımını; %3 ile %81 arasında değişen değerlerde arttırmış ve özellikle lif görünüm oranı ve lif hacmi arttıkça liflerin eğilme dayanımına etkisi kayda değer oranda artmış,
- Çelik lifli betonların ultrases hızları beklenenin aksine kontrol betonuna kıyasla daha düşük değerlerde elde etmiştir. Bu düşüş lif hacmi ve görünüm oranı arttıkça az miktarda artmıştır. Bunun sebebi olarak; liflerin betonla temas eden geçiş bölgelerinde yerleştirmeden kaynaklanan oldukça küçük boyutlu boşlukların bulunuyor olması ve liflerin gelişigüzel dağılımı gösterilmiştir.

Ünal'ın (1994) bildirdiğine göre, Swamy (1971), çelik lifli betonların özelliklerini araştırmak amacıyla yaptığı çalışmada lifli beton kompozitlerinin durabilitesini ve çimento matrisi arasındaki ilişkinin önemini belirtmektedir. Yapılan çalışmada hacim artışından dolayı dışarıda kalan lifler dikkate alınmazsa, liflerin karışım içerisinde gelişi güzel dağıldığını belirtmektedir. Yapı elemanlarının üretimde; lifli betonun kullanılması halinde işlenebilmeyi kolaylaştırmak amacıyla karışıma uçucu kül katılması lifli betonun aderans dayanımını arttırdığı belirtilmektedir.

Kayali ve ark. (1999), çalışmalarında uçucu kül içeren hafif agregalı liflerle güçlendirilmiş betonların kuruma rötrelerini incelemiştir. Basınç dayanımı 61 ile 67 MPa olan uçucu kül içeren hafif agregalı betonlar üretmişlerdir. Betonları ya polipropilen ya da çelik liflerle güçlendirmişlerdir. Liflerin basınç dayanımını etkilemediklerini fakat çekme dayanımlarını arttırdıklarını belirtmişlerdir. Elastisite modülleri kıyaslandığında hafif agregalı betonların elastisite modüllerinin yaklaşık 21 GPa olduğunu normal betonlarınkinin ise 35 GPa olduğunu belirtmişlerdir. Betonların liflerle güçlendirilmesinin elastisite modülünü etkilemediğini, bu tip hafif agregalı betonların toplam bağlayıcı oranının %23 kadar uçucu kül içerdiğini ve benzer dayanımdaki betonların uzun dönem rötresinde normal betondan yaklaşık iki katı kadar genişlediğini belirtmişlerdir. Çelik lifin kuruma rötresini azaltmasına karşın, polipropilen lifin rötreyi azaltmadığını belirtmişlerdir.

Uçucu kül-beton karışımında genellikle %10-30 arasında belirli bir yüzdeye sahip uçucu külün çimentonun bir kısmı yerine kullanımı; karayollarında, su yapılarında ve kanalizasyon tesislerinde en sık rastlanan problemlerden sülfat etkisine karşı, sadece çimento kullanılarak üretilen betonlardan daha fazla direnç gösterir. Karışımda lif malzemenin kullanımıyla mekanik davranışta gelişmeler kaydedilir. Bahsedilen bu teknolojilerin birleşimi süper sonuçlar doğurur (Ural, 1999; Yiğiter, 2002).

Lee (2002), uçucu küllü betonu değişik çelik lif miktarları ile test etmiştir. Karışımlarda %20 oranında uçucu kül ağırlıkça yer değiştirmiştir. 30 mm uzunluğunda 0,5 mm çapında narinlik oranı 60 olan çelik lifi hacimce %0, %0,5, %1 ve %2 oranlarında katmıştır. Çelik lif oranı arttıkça basınç dayanımları artmış ve %2 çelik lif katkısının uçucu kül katkılı betonların basınç dayanımını normal betona göre

%16 daha fazla arttırmıştır. Gerilmenin pik yaptığı andaki deformasyonlarda artan lif miktarı ile artmıştır. %0, %0,5, %1 ve %2 çelik lif katkısındaki pik değere karşılık gelen birim şekil değiştirmeler sırasıyla 0.001676, 0.001924, 0.002108 ve 0.002612 olarak bulunmuştur. Karışıma ilave edilen çelik lifler tokluk oranlarını yeteri kadar çok arttırmış ve %2 çelik lifli karışım %0,5 çelik lifli betona göre %120'lik bir artış göstermiş olduğunu görmüştür. Çelik lifler ilavesi gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin artan kısımlarını değiştirmemiş fakat eğrinin azalan kısımları önemli bir şekilde değiştiği bu çelik lif ilavesinin sünekliliği iyi bir şekilde gelişimini sağlamıştır denilmektedir. Deneysel elastisite modülleri %0, %0,5, %1 ve %2 çelik lifli uçucu küllü betonlarda sırasıyla 4648, 4290, 4648 ve 4397 ksi olarak ölçmüştür.

Kayali ve ark. (2003), çalışmalarında yüksek dayanımlı liflerle güçlendirilmiş hafif agregalı betonların bazı karakteristiklerini araştırmışlardır. Ögütülmüş uçucu kül agregası ince malzeme ile kısmen değiştirilerek hafif betonda kullanmışlardır. Basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, kırılma modülü, elastisite modülü, gerilme-birim deformasyon ilişkisi ve basınç altındaki tokluk üzerindeki etkilerini rapor etmişlerdir. Ögütülmüş uçucu küllü düz betonlar ile beton hacminde %0,56 polipropilen lif içeren betonları kıyaslandığında polipropilen lifin dolaylı çekme dayanımını %90 ve kırılma modülünü ise %20 arttırdığını belirtmişlerdir. Polipropilen lif katkısının araştırılan diğer mekanik özelliklerini önemli bir etkisinin olmadığını bildirmişlerdir. Çelik lif ise %1,7 oranında kullanılmış ve dolaylı çekme dayanımını yaklaşık %118 ve kırılma modülünü %80 oranında arttırdığını bulmuşlardır. Çelik liflerle güçlendirmede elastisite modülünde biraz düşüş olduğunu ve gerilme birim deformasyon ilişkisini değiştirdiğini ve daha çok eğik lineer hale geldiğini görmüşlerdir. Çelik lif kullanımını ile basınç altındaki toklukta artış kaydetmişler ve bunun da süneklilikte önemli bir artış sağladığını belirtmişlerdir.

Diñçer (2004), karışımda uçucu külü ağırlıkça %20 oranında, çelik lif narınlığı 65 ve lif oranı %0,5 kullanılmıştır. Normal betona çelik lif ve uçucu külün birlikte katıldığı durumda çelik lifin, betonun tüm mekanik özelliklerinde artış eğilimi yaratırken, uçucu kül azalmaya neden olduğunu belirtmiştir. Uçucu külün, çelik lif ile birlikte katıldığı harcın dayanımda yarattığı olumsuz etkinin, çelik lifin harc içerisinde oluşturduğu bağ kuvvetinin azalmasına neden olmakta ve betonun çekme

dayanımını olumsuz yönde etkilemekte olduğunu bildirmiştir. Çelik lif katkılı betona uçucu kül katkısının, basınç dayanımında %11 azalmaya neden olurken, çekme dayanımında %22 azalma meydana getirdiğini gözlemiştir. Ancak, uçucu külün zamana bağlı puzolanik etkisi, betonun harç dayanımında sağlayacağı artışın, çelik lifin harç içerisinde kurduğu köprünün bağ kuvvetlerinin de artışına neden olacağı ve betonun çekme dayanımını artıracaklarını düşünmektedir. Betona uçucu kül katkısının, eksenel basınç etkisindeki betonun sünekliğini arttırmakta, eğilmede çekme kuvvetlerine karşı ise betonun sünekliğini azaltmak olduğunu belirtmiştir.

Kayali (2004), çalışmasında yüksek hacimli uçucu küllerin liflerle güçlendirilmiş betonların mekanik özelliklere etkilerini araştırmıştır. Uçucu külü ince agreganın yaklaşık üçte biri oranında kısmi olarak ince agrega ile yer değiştirmiştir. Çelik lifi ise beton hacminin en fazla %1'i oranında katmıştır. Deneysel sonuçta yüksek hacimli uçucu kül içeren lifli betonların basınç ve çekme dayanımlarını uçucu külsüz betona göre iki katından fazla geliştirdiğini ve diğer mekanik özelliklerinin de uçucu külden dolayı önemli derecede arttığını belirtmiştir. Büyük oranda uçucu kül kullanımının lifli betonların çalışmasını gelişimi için gerekli olduğunun önerildiğini bildirmiştir. Çelik liflerin ise %100'lerin üzerinde artışlar sağladığını belirtmiştir. Bu gelişimi de matris ile lifler arasındaki mikro yapıdaki modifikasyon ve yoğunlaşmadan olduğuna inanıldığını bildirmiştir.

Gutierrez ve ark. (2005), liflerle güçlendirilmiş harçların performansları üzerine silis dumanı, uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanların etkilerini araştırmışlardır. Cüruf hariç tüm puzolanlar %15, cüruf ise %70 oranında ilave edilmiştir. Doğal lif olarak fique, sisal ve coir; yapay lif olarak ise cam, polipropilen ve çelik lif olmak üzere toplam altı farklı lif kullanmışlardır. Maksimum dane çapı 6 mm, su/bağlayıcı oranları 0,52-0,64, süper akışkanlaştırıcının çimentoya oranı ise 0,015-0,030 olarak kullanmışlardır. Deneysel olarak basınç dayanımı, su emme ve kapiler su emme katsayısı, klor geçirimsizliğini incelemişlerdir. Deneysel sonuçta, genel olarak çelik lif katkısında daha az olmasına rağmen, kontrol harçlarında lif ilavesinin basınç dayanımında azalmalara yol açtığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte yüksek aktiviteli puzolan ilavesi ve cüruf, bu performans kaybını telafi etmesine yardımcı olabilir demişlerdir. Cam ve çelik lifle güçlendirilmiş harçlarda

silis dumanının katkısının performansı arttırdığını söylemişlerdir. Cam, sisal ve çelik liflerle güçlendirilmiş çimento tabanlı malzemelere silis dumanının dahil edilmesiyle kılcallıkta büyük azalmalar meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Harçlarda lif ilavesinin kılcal porozitelerinin arttırmasından dolayı klor geçirimsizliğini arttırdığını ancak sırasıyla silis dumanı, metakaolin, cüruf ve uçucu kül ilavesinin klor geçirimsizliğini azaltmada etkili olduklarını gözlemlemişlerdir. Genel olarak %15 oranında, özellikle silis dumanı ve metakaolinin harçlara ilavesinin sırasıyla %20 ile %68 arasında lifsiz harçlara göre performanslarını geliştirdiğini belirtmişlerdir. Yine silis dumanı ve metakaolinin özellikle çelik, cam ve sisalle lifle güçlendirilmiş malzemelerin mekanik ve dayanıklılık performanslarını geliştirdiğini özetlemişlerdir. Düşük derecede puzolanik aktivite niteliğinde olmasından uçucu kül ilavesi değişik bir performansa sahip olmuştur denilmektedir.

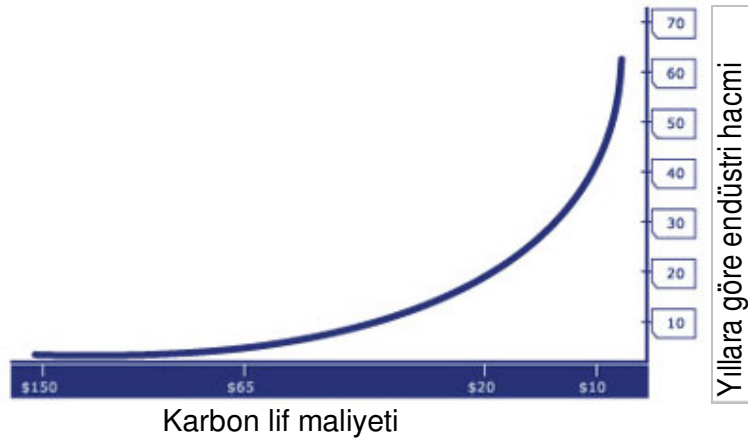
2.1.2.2 Karbon Lifler

Karbon lifler pamuk ve keten gibi selülozik liflerin kullanımı sırasında rastlantı sonucu ortaya çıkmıştır. Thomas Edison, pamuk ve keten lifleri alıp karbon liflere dönüştürmüş ve bunları akkor lamba filamentleri olarak kullanmıştır (Edison T.,US Patent No.). 1950'li yılların sonlarında yüksek sıcaklığa maruz kalacak kıyafetlerin üretimi için yapay ipeğin karbonize edilmesi ile karbon liflere ilgi yeniden artmıştır (Bacon & Tang, Carbon, 1964). PAN (Poliakrilonitril) prosesinin ortaya çıkması ile 1960'ların sonlarında yüksek performanslı karbon liflerin teknik ve ticari anlamda bilinirliği artmıştır. Suni ipek bazlı liflerle kıyaslandığında, PAN bazlı karbon lifler fiziksel özellikler açısından çok daha yüksek performanslar sunmuştur (Fitzer, ibid, 1989). Yüksek dayanımlı karbon liflerin üretiminde günümüzde PAN lifler en önemli hammaddedir. Daha sonraları karbon lifler çok daha ucuz olan ziftten üretilmişlerdir. Genel anlamda en çok kullanılan ziftler petrol, asfalt, kömür tortuları ve PVC'den elde edilmektedirler. Zift bazlı karbon lifler sıcak sonucu erime esnasında izotropik kalmalarından dolayı, PAN bazlı liflerden daha düşük kalitedirler. Bununla birlikte PAN işleme liflere yüksek dayanım özellikleri kazandırmasıyla birlikte oldukça pahalıdır (Bansel & Donnet, 1990).

Pahalı bir gerilme iyileştirmesi olan PAN, doğada likit kristal olarak bulunan mezofaz zift kullanımı ile optimal düzeylere çekilmiştir. Günümüzde ultra yüksek modüllü karbon lifler mezofaz ziftlerden üretilmektedir.

Karbon lifler %85 oranında karbon içerirler ve mükemmel bir çekme dayanımına sahiptirler, ancak maalesef limitli basınç dayanımına sahip olduklarından kullanıldıkları alan geniş değildir. (www.zoltek.com.tr.)

Bugünlerde, karbon lifler birçok ürünün üretiminde önemli bir parça olmuştur ve her geçen yıl yeni uygulamalar gelişmiştir. Karbon lifin önde gelen üreticileri Birleşik Devletler, Japonya ve Batı Avrupa'dır. Aşağıda karbon lifin gelişimi Şekil 2.13'de verilmiştir. (www.zoltek.com.tr)

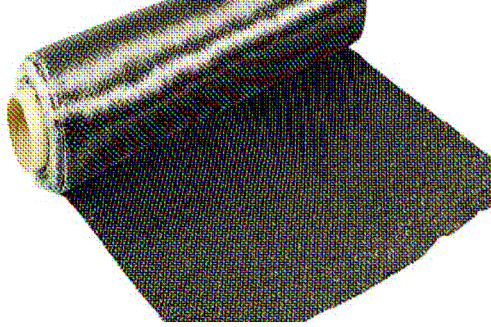


Şekil 2.13 Karbon lifin gelişimi

Karbon lifler, yüksek dayanıklılık ve rijitliklerinden ötürü önceleri uzay çalışmalarını ile ilgili endüstrilerde kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Diğer sentetik

lifler ile karşılaştırıldığında, karbon liflerin pahalı kalması nedeniyle ticari gelişimleri de sınırlı kalmıştır. Bununla birlikte karbon lif donatılı betonların fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan laboratuvar çalışmaları tüm hızıyla sürmektedir.

Karbon liflerin çeşitli tipleri bulunmaktadır: (Şekil 2.14-Şekil 2.15-Şekil 2.16)



Şekil 2.14 Kumaş şeklinde



Şekil 2.15 Yedekli çekilen şeklinde



Şekil 2.16 Doğranmış, öğütülmüş şeklinde

Karbon lifler pek çok kimyasala karşı inert davranış sergilerler. Poliakrilonitril (PAN) temelli karbon lifler “sıcak germe” adı verilen bir işlemle, yüksek sıcaklıkta poliakrilonitril tekstil ipliğinin karbonize edilmesi sırasında grafit kristallerinin sıralanması ile üretilirler. Bu lifler yüksek modüllü (HM) ve yüksek gerilme dayanımlı (HT) lifler gibi üretilirler ve sıcak germe işleminin kapsamı ve malzemenin kaynağı fiziksel özelliklerini etkiler. (www.zoltek.com).

Karbon liflerin petrol ve kömür ziftinden üretilen tipleri, PAN temelli karbon liflerden çok daha ucuza üretilmektedir. Zift bazlı karbon lifler iki tipte üretilirler. Genel amaçlı karbon lifler izotropik özellikte ziftten üretilir ve düşük gerilme dayanımı ve elastisite modülüne sahiptir. Yüksek performanslı karbon lifler ise mezofaz özellikte ziftten üretilirler ve yüksek gerilme dayanımı ve elastisite modülüne sahiptirler. (www.zoltek.com).

Karbon lifler; karbon lif donatılı plastikler, karbon-karbon kompozitler, karbon lif donatılı çimentolu kompozitler gibi kompozit malzemelerde kullanılan yüksek dayanımlı malzemelerdir. Donatı olarak kullanılan tüm lifler içinde karbon lifler en yüksek elastisite modülü ve özgül dayanıma sahip malzemelerdir. Tablo 2.4’de değişik karbon lif tipleri için mekanik özellikleri verilmektedir. Karbon lifler cam ve organik polimer liflerin aksine, oda sıcaklığında kopma ve korozyona uğrama gibi davranışlar göstermemektedirler. Özellikle yüksek sıcaklıklarda diğer malzemelerle kıyaslandığında karbon lifler yüksek dayanım ve elastisite modülü ile öne çıkmaktadırlar (Smith W., 1987). Karbon lifli kompozitler dayanım, sertlik, düşük ağırlık ve üstün yorulma dayanımı gibi kritik ihtiyaçların karşılanması gereken uygulamalarda yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Yüksek sıcaklık, kimyasal etkilere karşı dayanım ve yüksek sönümlenme kapasitesi gibi özelliklere ihtiyaç duyulan sahalarda da karbon lifli kompozitler tercih edilmektedir. Karbon lifler yüksek elektrik ve ısı iletkenliği ve düşük ısıl genişleme katsayısına sahiptirler (Bansel & Donnet, 1990).

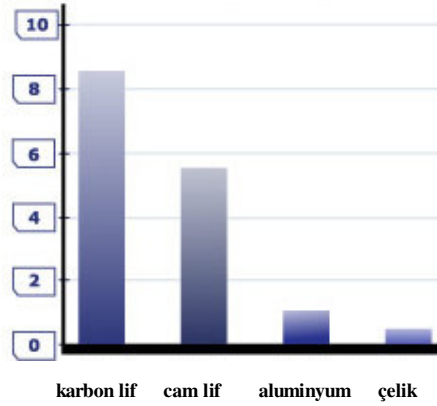
Tablo 2.4 Karbon liflerin aksel çekme özellikleri

Hammadde	Çekme Gerilmesi (GPa)	Çekme Modülü (GPa)	Kopmada Uzama (%)
PAN	2,5-7	250-400	0,6-2,5
Mezofaz zift	1,5-3,5	200-800	0,3-0,9
Suni ipek	=1,00	=50	=2,5

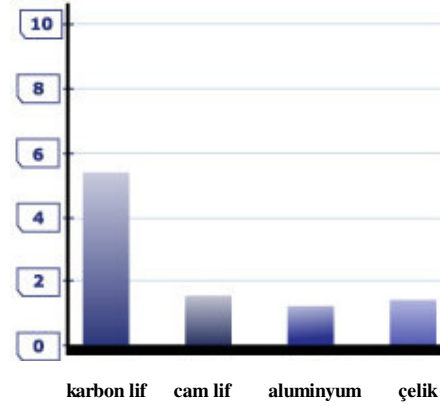
Karbon lif kullanımı iki ana sektör etrafında toplanmıştır; birincisi uzay ve nükleer çalışmaların da içinde yer aldığı ileri teknoloji sektörü, ikincisi ise vites, kamera, otomobil kaportaları v.b. gibi ürünlerin yer aldığı genel amaçlı mühendislik sektörü. Bununla birlikte bu sektörlerin gereksinimleri birbirinden çok farklıdır. Uzay ve uçak mühendisliği ile ilgili çalışmalarda kullanılan karbon liflerden beklenen performans maliyet faktöründen çok, yakıt verimliliğini artırması ve maksimum performans göstermesi ile ilgilidir. Genel mühendislik ile ilgili sektörlerde kullanılan karbon liflerden beklenen ise, maliyetlerin düşürülmesi olup yüksek performans ikinci planda kalmaktadır.

Bu gereksinimlerden dolayı karbon liflerle ilgili iki ana araştırma dalı ortaya çıkmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar karbon liflerin kalitesinde artış sağlanırken, üretim maliyetlerinin de düşürülmesi ile ilgilidir. Genel bir kural olarak liflerin dayanımı tek bir kristalin modülünün %10'u civarında olmalıdır. Karbon liflerin ulaşabileceği muhtemel dayanım 100 GPa olarak tahmin edilmektedir. Tek bir grafit kristalinin teorik gerilme dayanımı 150 GPa olup, bilinen tüm malzemeler içinde en yüksek değerdir (Smith W., 1987). Ticari yüksek dayanımlı karbon liflerde maksimum dayanımlar 7 GPa civarındadır. Karbon liflerin aksel basınç dayanımları çekme dayanımlarının %10-60 arasında olup, enine basınç dayanımı aksel basınç dayanımının %12-20'si arasındadır (Shinohara H., Sato T., J.,1993). Karbon liflerin basınç dayanımları inorganik liflerin dayanımlarından düşük iken polimerik liflerden yüksektir (Kumar S., Anderson P. Crasto S., 1993).

Karbon liflerin; cam lifler, alüminyum ve çelik ile karakteristik özelliklerinin karşılaştırmalı grafikleri aşağıda Şekil 2.17 ve 2.18’de verilmiştir. (www.zoltek.com.tr)



Şekil 2.17 Spesifik gerilme(gerilme+yoğunluk)

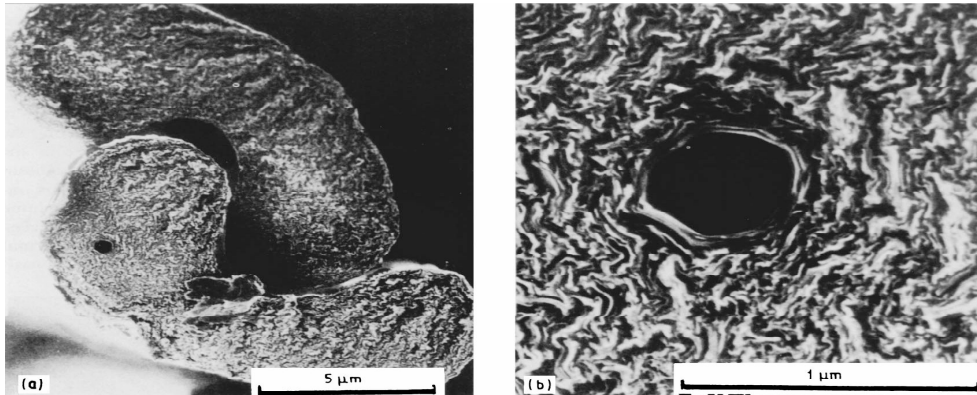


Şekil 2.18 Spesifik sertlik(sertlik+yoğunluk)

2.1.2.2.1 Karbon Lif Hammaddeler. Karbon liflerin üretiminde pek çok hammadde kullanılmıştır. Selülozik hammaddeler (pamuk, keten, kenevir, lepiska v.b.) uzun zamandır karbon lifler üretimi için kaynak olarak kullanılmamaktadırlar. Polinozik lifler ise düzenli suni ipek liflerin üzerinde bir avantaj sağlayamadıkları için pek tercih edilmemektedirler (Bansel & Donnet, 1990). Günümüzdeki selülozik liflerden karbon lif üretimi ile ilgili araştırmaların çoğu, yıkım mekanizması üzerine yoğunlaşarak karbon verimini arttırmaya yöneliktir. Fenol formaldehit reçine, polifenilen, poliasitilen, poliakrilik gibi fenolik polimerlerin karbon liflere dönüşümü ile ilgili araştırmalar da sürdürülmektedir. Bu maddeler grafitik yapıya kolay dönüşüm, karbon olmayan atomların eliminasyonu, yüksek karbon verimi gibi avantajlar sunmakla birlikte, liflerin özelliklerinde çok büyük değişiklikler getirmemektedir (Economy J, Lin R.Y.,1976). Bununla birlikte poliamit, polibenzimidazol, polibenzimidazol tuzları, politriazol gibi heterodöngüsel yüksek sıcaklık dirençli organik polimerler, yüksek modüllü karbon liflere kolayca dönüşürken, kimi durumlarda %90'lara varan verimlerde liflere benzersiz mekanik özellikler de sunmaktadırlar (Augl J.M.,1974). Bu polimerlerin kullanımında

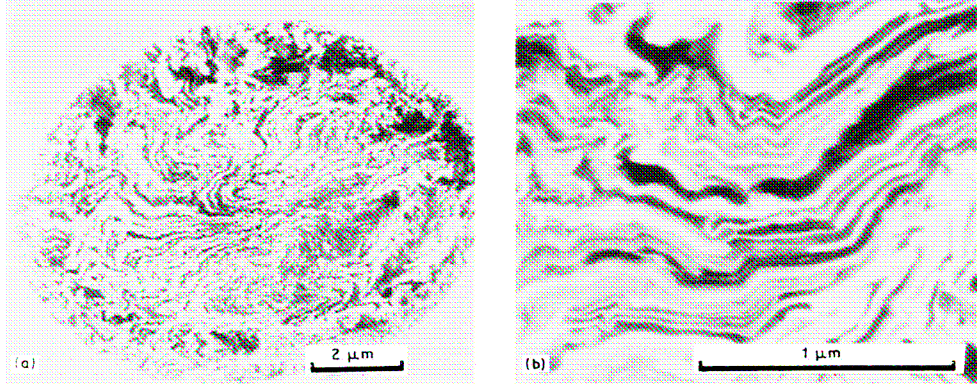
karşılaşılan en büyük dezavantaj ise yüksek maliyetleridir. Polietilen, polivinil alkol, polipropilen, polivinil klorid gibi termoplastik polimerlerin de karbon liflere dönüşümü araştırılmış ve bu malzemelerden çok düşük mekanik özelliklerde ve verimde lifler elde edilmiştir. Sonuç olarak karbon lifler için en çok kullanılan hammaddeler PAN, zift ve suni ipek olmuştur (Bansel & Donnet, 1990).

2.1.2.2.2 Karbon Lif Yapısı ve Mekanik Özellikleri. Mükemmel grafit üç boyutlu periyodisiteye sahip olup hekzagonal kristal sistemini içerir. Karbon liflerde her aromatik çemberin düzleminde karbon atomları hekzagonal örgü şeklinde yerleşmişlerdir. Ancak komşu düzlem üzerinde bulunan karşıt atomlar gelişigüzel bir mesafede çevrilmişlerdir. Karbon lifler genel olarak turbostatik adı verilen iki boyutlu düzene sahiptirler. Karbon lifler içinde aralıklı içsel yüzeyler mükemmel grafitten belirgin şekilde yüksek olacak sıcaklıklarda işleme tabi olurlar (Damodaran S., Desai P., Abhiraman S., 1990). Bununla birlikte pek çok araştırmacı da karbon lifler içinde üç boyutlu bir düzenin olduğuna dair kanıtlar öne sürmektedirler. Kumar, pek çok PAN bazlı karbon lifin tanecikli morfolojiye sahipken, zift bazlı karbon liflerin ise tabakalı şeklinde morfolojiye sahip olduğunu belirtmiştir. Ayrıca tabakalı şeklinde morfolojinin üç boyutlu düzene uygun olmadığını, bununla birlikte tanecikli morfolojinin üç boyutlu düzen gösterebileceğini rapor etmiştir. Suni ipek bazlı lifler tanecikli morfoloji gösterirler ve üç boyutlu düzene sahip olabilirler. PAN, zift ve suni ipek bazlı liflerin elektron mikroskobu ile çekilmiş görüntüleri Şekil 2.19, Şekil 2.20 ve Şekil 2.21’da verilmektedir.



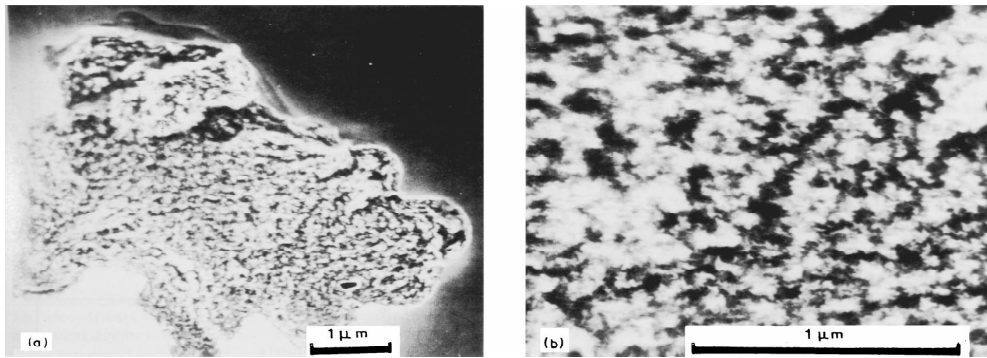
Şekil 2.19 Pan bazlı karbon liflerin elektron mikroskobu görüntüleri

a) düşük büyütme b) yüksek büyütme



Şekil 2.20 Zift bazlı karbon liflerin elektron mikroskobu görüntüleri

a) düşük büyütme b) yüksek büyütme



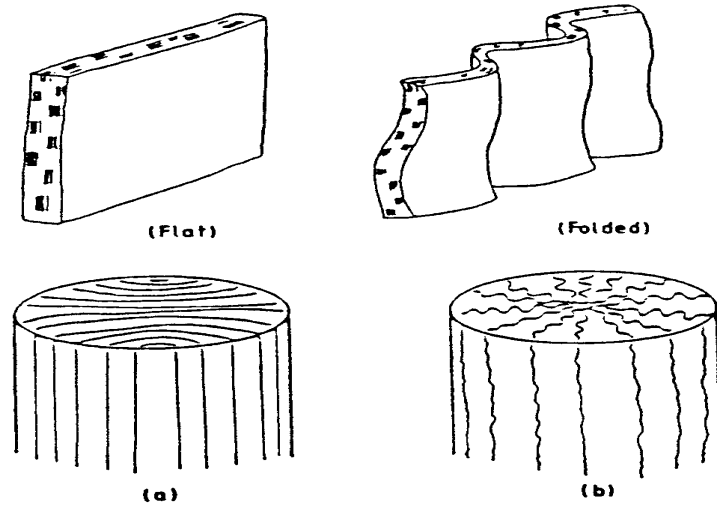
Şekil 2.21 Suni ipek bazlı karbon liflerin elektron mikroskobu görüntüleri

a) düşük büyütme b) yüksek büyütme

1100 °C ötesinde sıcaklıklara maruz kalmamalarına rağmen, bu liflerde uzatılmış küçük grafitize alanların olduğu gözlenmiştir (Bansel&Donnet, 1990). Isıl iyileştirme sıcaklığıyla birlikte lif aksel doğrultusunda öncelikli olarak grafit tabakalarının yönelimi artmaktadır. Bu tabakaların yönelimi ve boyutları karbon liflerin yüzeylerinde içlerine oranla çok daha büyüktür (Kumar S, Anderson P., Crasto S., 1993). Yönelimdeki artışa bağımlı olarak liflerin modülünde de yükselme görülür (Bansel&Donnet, 1990). Karbon liflerin lif ekseni boyunca %20 ve üzerinde boşluğa sahip olduğu düşünülmektedir (Damodaran S., Desai P., Abhiraman S., 1990). Isıl iyileştirme sıcaklığı yükseltildikçe pek çok küçük boşluktan daha az sayıda büyük boşluklara geçiş olduğu gözlenmiştir.

PAN bazlı karbon lifler, zift bazlı karbon liflere nazaran daha yüksek çekme ve basınç dayanımına sahiptir. Bunun temelinde, PAN bazlı karbon liflerin tanecikli

yapıya ve küçük kristallere sahipken, zift bazlı karbon liflerin tabakalı bir yapıya ve büyük kristallere sahip olması yatmaktadır (Mehta V.R., Kumar S., J. Mater. Sci., 1994). Ayrıca karbon liflerin kesitsel yapısı da basınç dayanımı özelliklerinin üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Endo ve Hayes bir çalışmada iki farklı zift bazlı karbon lif üzerinde basınç dayanımlarını incelemişler ve kıvrık-radyal dokulu liflerin düz yüzeye sahip liflerden daha yüksek dayanım verdiğini tespit etmişlerdir. Şekil 2.22’de her iki yapı da sunulmaktadır:



Şekil 2.22 Kıvrık ve düz yapıdaki karbon lifler

Kristal boyutu, yönelimi, yoğunluğu azaldıkça ve içsel yüzeyde boşluk oranı arttıkça karbon liflerin basınç dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir (Kumar S., Adams W., Helminiak T.E., 1988). $L_c L_b / L_a$ ile ölçülen (L_a , L_b ve L_c sırasıyla grafitik alanda lif eksenine paralel, L_f eksenine dik ve grafitik yüzeye dik kristal boyutlarıdır) kristal anizotropisi, karbon liflerde basınç dayanımı için en iyi korelasyonu sağlamaktadır (Kumar S, Anderson P., Crasto S., ibid., 1993). Hem PAN hem de zift bazlı liflerde modüldeki artış, basınç dayanımında düşüşe neden olmaktadır. Bununla birlikte 1500°C üstü karbonizasyon sıcaklığında basınç dayanımı, çekme dayanımı ve çekme modülü benzer eğilim göstermektedir (Kumar S, Anderson P., Crasto S., 1993). PAN ve zift bazlı karbon liflerin her ikisi içinde aynı modüle sahip lifler farklı basınç dayanımları göstermektedir. Belirli bir modül değerinde basınç dayanımı arzulanan yönelime küçük kristal boyutları vasıtasıyla ulaşılarak geliştirilebilir. Yüksek modüllü lifler kayma, düşük modüllü lifler ise burkulma modunda

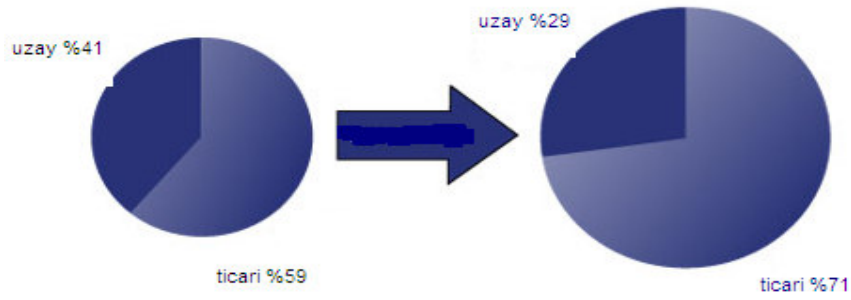
göçebilmektedir. Bor eklenmesi ile karbon liflerin basınç dayanımı %25 artarken kristal boyutları da düşmektedir. Taban yüzeylerindeki kayma modülü ile basınç dayanımı arasında da bir ilişki bulunmuştur. Yüzey ve boyutsal iyileştirmeler karbon liflerde daha yüksek basınç dayanımları elde edilmesi için kullanılan yöntemlerdir. Ayrıca bunların basınçtan çok çekmeye etkisi olduğu da gözlenmiştir. Yapılan başka bir araştırmada karbon liflerde lif çapının düştükçe basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiş, bununla birlikte 10 µm'den düşük değerlerde değişimin durduğu tespit edilmiştir (Bansel, C.,Donnet, J.B., 1990).

2.1.2.2.3 Karbon Liflerin Gelecekteki Yeri. Karbon liflerin gelecekteki yeri, farklı endüstri çeşitlerinde olmak üzere parlaktır. Bunların arasında;

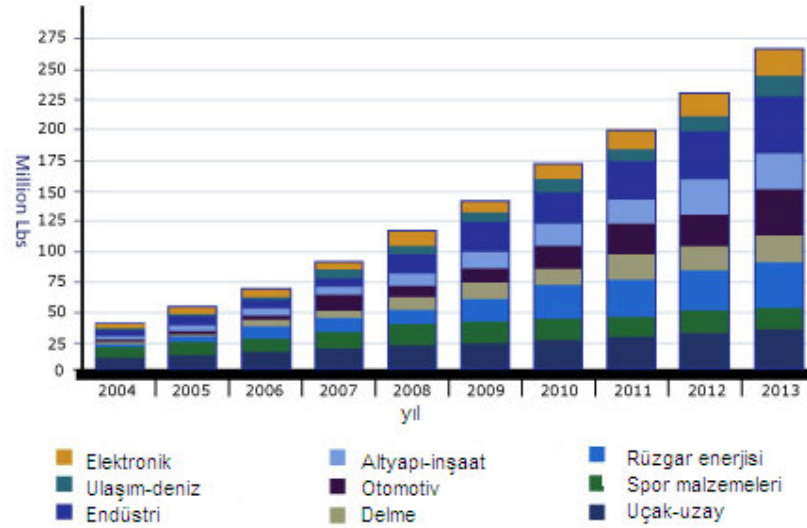
- Yardımcı enerji: rüzgâr türbinleri, sıkıştırılmış doğalgaz depolama ve ulaştırılması, yakıt hücreleri
- Otomotiv yakıt: halen küçük üretimlerde kullanılıyor, ancak yüksek performansından dolayı üretimi genişlemeye doğru ilerliyor.
- İnşaat-yapı ve altyapı: depremden korunma
- Yağ araştırma: derin denizlerde delme platformlar, delme borular

Karbon liflerin bu ve diğer endüstrilerde gelişmesinin yanında, karbon lif üreticileri de kapasitelerini arttırmalı ve ticarileşme konseptlerini geliştirmelidirler. Eğer üreticiler, karbon lif endüstrisinde şunlara izin verirse potansiyelini genişletirler:

- Yeni uygulamalara hedeflenmeli
- Yeni ve daha düşük maliyetli teknoloji geliştirmeli
- Gelecekteki stratejisini belirlemeli
- Pazar sahiplerini tanımlamalı ve onlara odaklanmalı
- Maliyeti düşürmeye ısrarla çalışmalı
- Güçsüz sahipleri birleştirerek güçlüyü güçlendirmeli
- Karbon liflerin ilk rakibinin, karbon liflerin çeşitlerinin değil diğer materyaller olduğunu iyice anlamalı.



Eğer karbon lif üreticileri bu işe gerçekten odaklanırlarsa, çalışırlarsa ödül büyük olacaktır. Karbon lif endüstrisinin gelecekteki büyümesi Şekil 2.23 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.23 Karbon lif endüstrisinin gelecekteki büyümesi

2.2 Uçucu Kül

Gelişmekte olan ülkelerin ekonomik büyümeleri, enerji tüketimlerinin artmasına neden olmaktadır. Ülkemizde de nüfus artışı, yaşama standardının yükselmesi, sanayileşme ve kentleşme enerji gereksinimini hızlı bir şekilde arttırmıştır. Bu gereksinim karşısında mevcut potansiyeller mümkün olduğu kadar çabuk bir biçimde harekete geçmiş ve hidroelektrik ve termik santraller kurulması bir çözüm olarak gerçekleşmiştir. Özellikle endüstriyel yakıt olarak kullanılma imkânı olmayan düşük kalorili kömür yatakları yakınına, büyük kapasiteli termik santraller kurulması enerji üretimini artırma maksadıyla yürütülen çalışmalar arasında başta gelenlerden birisidir. Ancak, enerji üretiminin artırılmasında tutarlı bir çözüm olarak gözüken kömüre dayalı termik santrallerin sayısının artması önemli ekolojik, ekonomik ve teknik sorunları da beraberinde getirebilecek olan kül üretiminin de artmasına neden olmaktadır. Bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması muhtemel çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji üretimi kaybı v.b. konularda da parasal ve teknik problemler yaratabilmektedir. (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Uçucu kül terimi 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi endüstrisinin yayılmasıyla ortaya çıkmış ve uçucu külün Portland çimentosu içinde kullanımı yine bu tarihlerde başlamıştır. 1937 yılında R.E. Davis California Üniversitesi'nde uçucu küllü betonla ilgili araştırma sonuçlarını yayımlamış ve bu çalışma ilk şartnamelerin, test metodlarının ve uçucu kül kullanımının temeli oluşturmuştur. 1970'li yıllarda yaşanan enerji maliyetindeki hızlı artış sonucunda, elektrik santrallerinde daha fazla kömür kullanılmaya başlanmıştır. Bunun sonucunda uçucu kül üretiminde bir artış meydana gelmiş, uçucu kül kullanımı tüm dünya genelinde kabul görmeye başlamıştır. (Özcan, 1997).

Dünyadaki uçucu kül üretimi yıllık yaklaşık 600 milyon ton, Türkiye'de ise uçucu kül üretimi yıllık yaklaşık 15 milyon tondur. Ancak uçucu kül özellikleri hakkındaki yetersiz bilgi ve uçucu kül özelliklerinin her zaman üniform olmamasından ötürü beton endüstrisinde kullanımı oldukça düşüktür. Yine de, kimyasal kompozisyonu itibarıyla betonun ana bağlayıcısı olan Portland çimentosuna oldukça benzeyen ve puzolanik özelliğe sahip olan uçucu küllerin, inşaat sektöründe çimento ve hazır

betonda daha fazla kullanılması yönünde artan bir eğilim bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında uçucu küllerin, çimento ve betonda kullanımı; klinkerizasyon, öğütme, kurutma enerjilerinde tasarruf, ürün çeşitliliği gibi birçok yarar sağlayacaktır.

Uçucu küllerin kullanım alanları arasında; çimento üretiminde puzolanik mineral katkı maddesi ve beton içinde ikincil bağlayıcı madde olarak çimentoyla birlikte, tuğla ve yapı bloğu üretimi, suni agrega üretimi, enjeksiyon uygulamaları, dolgu malzemesi, yol inşaatlarında temel ve temel altı tabakası, zemin iyileştirmesi, atıkların stabilizasyonunda ve zirai amaçlarla kullanımları sayılabilir. Yüksek oranda uçucu kül içeren betonlar ise kütle betonlarında, silindirle sıkıştırılabilen betonlarda ve hafif beton üretiminde kullanılabilir. (Türker ve ark. 2003).

Uçucu küllerin önemli miktarda kullanılmaya başlanması ise baraj inşaatları sırasında ve betonda hidrasyon ısısını düşürmek amacı ile olmuştur. 1940'lı yıllarda ABD'de ilk kullanım Hoover ve Hungry Horse barajlarında olmuştur. Ülkemizde ise 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk barajlarında kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda uçucu küllü betonların daha kolay işlenebilir, geçirimsiz ve ekonomik oluşları sebebiyle diğer ülkelerde de kullanımları hızla yaygınlaşmıştır.

Termik santrallerde çok ince öğütülerek yakılan kömürden üç farklı kül elde edilmesi mümkündür.

- Göreceli olarak iri taneli olup baca gazları ile taşınamayan ve kazan tabanına düşen "taban külü"
- Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutularak uzaklaştırılması ile elde edilen "ham kül" ve
- Çok ince taneli olup baca gazları ile taşınan "uçucu kül" .

Çevreyi olumsuz olarak etkileyecekleri için, uçucu küllerin santral bacasından çıkarak havaya karışmaları önlenir. Bu amaçla, küller mekanik ve elektrostatik yöntemlerle toplanarak santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanır. (Türker ve ark. 2003).

Türkiye’de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan, Yeniköy ve Sugözü termik santralleri faaliyette olup, bu santrallerde yılda yaklaşık 15 milyon ton, dünyada ise 600 milyon ton civarında uçucu kül elde edilmektedir.

2.2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

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

ASTM C 618 (1998) göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

1. 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.

2. C sınıfına, 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. 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.

TS EN 197-1(2002) göre uçucu küller silissi V ve kalkersi W gruplarına ayrılırlar:

1. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan, geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10’dan az, reaktif silis miktarının %25’den fazla olması gerekmektedir.

2. W sınıfı küller, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 ’den oluşan, geri kalanı demir

oksit (Fe_2O_3) ve diğ er bileş enleri iç eren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir.

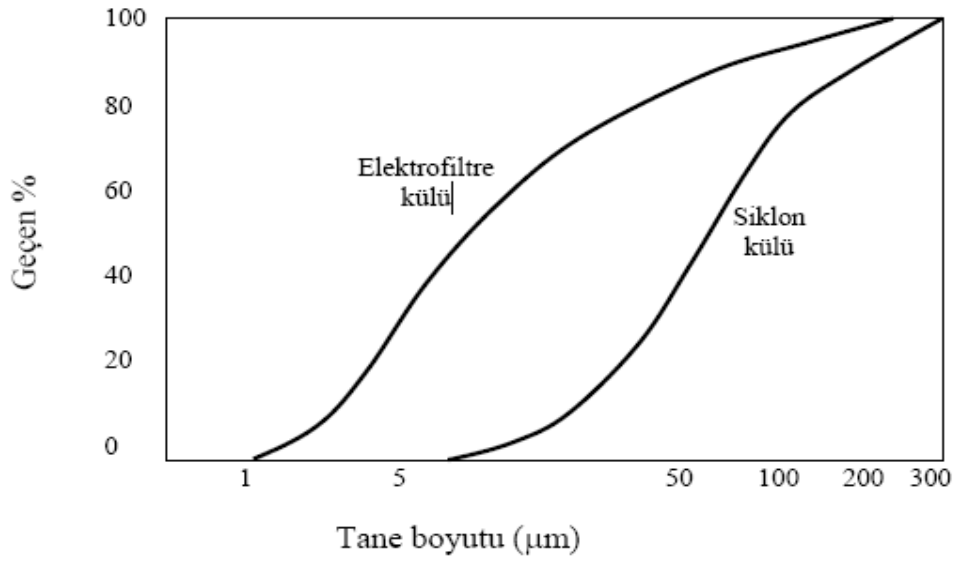
2.2.2 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Tane şekli ve boyutu:

Uçucu kül partikülleri, camsı küresel şekilli tanecikler, iç i boşluksuz veya boşluklu (senosfer), büyük bir küre iç inde küçük küreler kümesi iç eren yapılar (plerosfer), yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar iç eren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar, deforme yapılar ve yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi değı ş ik şekillerde bulunabilir. (Bosbach & Enders,1998).

Bazı uçucu kül partikülleri iç i boş olan küresel tanelerden oluşmuşlardır. İ ç i boş kül tanelerinin miktarı toplam kül miktarının ağırlıkça yaklaşık %5'i, hacim olarak da yaklaşık %20'si kadardır. Bu boşluklar nitrojen ve karbondioksit ile doludur. Bu parçacıkların yüksek oranda bulunması hafif olmaları nedeni ile beton iç erisinde yüzeye çıkmalarına sebep olur. (Tokyay & Erdoğan, 1998).

Kül tanelerinin boyutları kül toplama sistemine bağı lı olup, boyutları 1-200 μm arasında değı ş ir (Ş ekil 2.24). Uçucu kül tanelerinin yaklaşık %75'i 45 μm 'lik elekten geçer. (Aitcin vd., 1986; Eİ E, 1979).



Şekil 2.24 Uçucu küllerin tipik tane boyutu dağılımları

İncelik:

Uçucu küllerin incelikleri kül tutma mekanizmasına bağlıdır. Elektrofiltrelerde tutulan uçucu küller siklonlara göre çimento ve beton endüstrisinde kullanılmaya daha uygundur.

Yapılan araştırmalar uçucu küllerin özgül yüzeylerinin 1800-5000 cm²/g arasında değiştiğini göstermektedir. İnceliğin özgül yüzey cinsinden ölçülmesi kimi araştırmacılara göre güvenilir sonuçlar vermemektedir. Diğer incelik ölçme yöntemleri ise lazerli tane dağılım analizi, hidrometre analizi, azot absorpsiyonu, X ışınları sedimantasyonu olarak sıralanabilir.

Küllerin inceliği puzolanik aktiviteleri ile doğrudan ilişkilidir. İnceliği fazla olan uçucu küllerin daha fazla puzolanik reaksiyon yaptıkları ve mukavemetlerinin daha fazla olduğu bilinmektedir.

Genellikle uçucu küller betonun su ihtiyacını azaltır ve işlenebilirliğini geliştirir. Ancak çok ince (%95'i 45 µm'lik elekten geçen) küller kontrol karışımlarına göre daha fazla su gerektirebilirler.

Yoğunluk:

Özgül ağırlıkları 1,9-2,4 arasında değişen uçucu küllerin gevşek birim hacim ağırlıkları 800 kg/m^3 dolaylarındadır. İri tanelerin boşluklu yapılarından dolayı ince tanelerden oluşmuş küllerin yoğunluğu daha fazla olmaktadır. Yoğunluk değerlerinde büyük farklar varsa, karışım hesaplarında bu yoğunluk farkının göz önünde bulundurulması gerekir. (INTRON, 1992).

Yüksek demir içerikli uçucu küllerin yoğunluğu fazla, yüksek alümin, silika ve karbon içerikli küllerin yoğunluğu ise daha düşüktür. (Tokyay & Erdoğan, 1998).

Renk:

Yakılan kömür ve termik santrallere göre farklı renklere olabilen uçucu küller gri tonlarındadır. Yanmamış kömür parçalarının fazla olması rengi koyulaştırırken, yüksek demir içerikleri esmer renk sağlarlar.

Dayanım Aktivite İndeksi:

Uçucu külün puzolanik reaksiyon yapma performansı ve dayanım gelişim hızını gösteren bu indeks, incelik ve kompozisyondan etkilenir. Deneysel ASTM C311'e göre, değerlendirilmesi ise ASTM C 618'e göre yapılır. Uçucu külün beton ve harçlarda kullanılabilmesi için kontrol karışımlarına göre en az %75 basınç dayanımı sağlaması istenmektedir.

Hacim Değişimi:

Uçucu küllü karışımlar uygulama sırasında zararlı olabilecek genleşme veya büzülme göstermemelidirler. Hacim sabitliği deneyleri TS EN 450 ve ASTM C311'e göre yapılabilmektedir. CaO ve MgO hacim değişikliklerinde en önemli iki bileşen olup genleşme veya büzülmenin izin verilebilir sınırı ASTM C618'de $\pm 0,8\%$ 'dir. Düşük kireçli uçucu kül ile kıyaslandığında, yüksek kireçli uçucu külün daha erken dayanım kazanımı sağladığı görülmektedir. Uçucu küldeki CaO miktarı için standartlarda bir limit bulunmamaktadır. Ancak serbest kireç, hidrasyon sırasında kalsiyum hidroksit (portlandit) haline dönüşerek, betonda genleşme ve çatlak oluşumuna sebep olabilir. Bu nedenle serbest kireç miktarı TS EN 450'de %1 ile

sınırlandırılmıştır. MgO hidratasyonu yavaş gelişen bir maddedir. Ancak, hidrate olduğunda meydana gelen hidratasyon ürününün miktarı büyük bir hacim kaplar ve sertleşmiş betonun genişleyip çatlamasına yol açar. Uçucu kül şartnamelerinin büyük bir bölümünde, en yüksek MgO miktarı %5 ile sınırlandırılmıştır. ASTM C618 ise MgO için bir limit vermemiştir.

Uçucu küldeki SO₃ miktarı ile ilgili yapılan çalışmalar, %5'e kadar SO₃ ün beton üzerinde olumsuz etkisi olmadığını göstermiştir. Uçucu kül ile ilgili ASTM şartnamesinde SO₃ miktarı en yüksek %5 olarak belirlenmiştir. (Erdoğan, 1997).

Karbon İçeriği ve Kızdırma Kaybı:

Kızdırma kaybı ve karbon içeriği veya uçucu kül ile toplanmış yanmamış karbon parçacıkları birbirleri yerine kullanılabilen terimlerdir. Ağırlık kaybı çok küçük miktarlardaki kimyasal bağ neminin ve sülfürün kızdırma esnasındaki kaybından ortaya çıkar. Karbon, bağlayıcılık reaksiyonunda aktif olmayan madde olarak dikkate alınabilir. Fakat bazı parçacıklar, hava sürükleyici katkılar gibi kimyasal katkılar ile güçlü bir birleşme eğilimi gösterirler. Yüksek kızdırma kaybı veya karbon içeriği olan uçucu küller genellikle daha fazla hava sürükleyici katkı dozajı gerektirirler. ASTM C618'e göre uçucu küllerde kızdırma kaybı limiti %6'dır. %6'dan daha fazla karbon içeren uçucu küllerle üretilen betonların yüzeyinde siyah yağlı bir film tabakası oluşur. (Erdoğan, 1997).

2.2.3 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orijini ve kömür hazırlama, yanma, toz toplama gibi koşullara bağlıdır. Uçucu küllerin kimyasal yapılarında ana elementler olarak Si, Al, Ca, Fe ve S bulunur. Bu elementler yanma biçimine bağlı olarak oluşan başlıca bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO ve SO₃ olup, diğerleri MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂ ve benzeri oksitler bulunabilir. Uçucu küllerin karbon içeriği termik santrallerin verimine bağlı olmakla birlikte yaklaşık %3 civarındadır. Diğer oksitlerden MgO en fazla %5, alkali oksitler (Na₂O+K₂O) %5'in altında bulunmaktadır. SO₃ genellikle %0,2-%2,5 arasında

değişmekle birlikte %10'a kadar yükselmektedir. TS EN 450 (1998) SO₃ değerini en fazla %3 olarak sınırlamaktadır. Kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozunması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO₂ kaybını da içine almaktadır. Kızdırma kaybı %1-%10 arasındadır. Tablo 2.5'de F sınıfı ve C sınıfı uçucu küllerin kimyasal bileşenlerinin yüzdelerinin hangi sınırlar civarında olabileceği gösterilmiştir. (Türker ve ark., 2003; TS EN 450, 1998).

Uçucu küllerin çimento ve beton endüstrisinde kullanılma nedenleri içinde en önemlilerinden birisi olan puzolanik özellikleri kimyasal kompozisyonlarından ziyade mineralojik yapılarına bağlıdır. Düşük kireçli uçucu küllerdeki ana aktif bileşen silika ve alüminadan oluşan amorf veya camsı fazdır. Bu tür uçucu küller rutubetli ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliklere sahip bileşenler meydana getirirler. Başka bir deyişle, düşük kireçli uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli küller ise bir yandan puzolanik özellik gösterirken, içerdikleri serbest kireç, anhidrit, trikalsiyum alüminat, amorf silika ve amorf alumina v.b. nedeniyle de kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler. Düşük kireçli uçucu küllerin camsı faz miktarı yüksek kireçlilere oranla daha yüksektir.

Tablo 2.5 Uçucu küllerin tipik kimyasal kompozisyonları

Oksit	F Sınıfı	C Sınıfı
SiO ₂	43,6 - 64,4	23,1 - 50,5
Al ₂ O ₃	19,6 - 30,1	13,3 - 21,8
Fe ₂ O ₃	3,8 - 23,9	3,7 - 22,5
CaO	0,7 - 6,7	11,5 - 29,0
MgO	0,9 - 1,7	1,5 - 7,5
Na ₂ O	0,0 - 2,8	0,4 - 1,9
KK	0,4 - 7,2	0,3 - 1,9

Düşük kalsiyumlu uçucu küllerde görülen mineral fazlar camsı faz, mullit (Al₆Si₂O₁₃), hematit (Fe₂O₃), manyetit (Fe₃O₄), kuvarz (SiO₂), v.b. iken yüksek kalsiyumlu küllerde bunlara ek olarak, zaman zaman daha fazla miktarlarda, serbest kireç (CaO), anhidrit (CaSO₄), trikalsiyum alüminat (Ca₃Al₂O₆) ve felspat, gehlenit

gibi çeşitli kalsiyum silikatlar bulunur. (Şimşek, 2004). Uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.6 Uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları (Şimşek, 2004)

Mineral (%)	Silikoaluminöz	Sülfoklasik	Silikoklasik
Camsı ve amorf faz	60	35	50
Mullit	20	1	5
Hematit	7	4	3
Manyetit	6	1	1
Kuvartz	5	5	5
Anhidrit		15	5
Serbest kireç		20	10
Feldspat ve gehlenit		?20	?15

2.2.4. Uçucu Küllerin Puzolanik Dayanım Aktivite İndeksi

Bir beton karışımındaki puzolanın hidrate olmuş kireçle arasındaki reaksiyonun ne kadar iyi olduğu, puzolanik aktivite ile tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle puzolanik aktiflik, kalsiyum hidroksitle, alümina silikatlar arasında oluşan ve sonucunda bağlayıcı özelliği olan hidrasyon ürünü meydana getiren reaksiyona işaret etmektedir. Bir puzolanın portland çimentosu betonu içinde kullanılabilmesi için değeri test ile ölçülebilen ve yeteri derecede puzolanik aktifliğe sahip olması gerekir. Puzolanik aktivitenin ölçülmesi için birçok metodun tavsiye edilmesine rağmen bunlardan hiç biri tamamen doyurucu olarak göz önüne alınmamaktadır. Çimento bağlayıcı bir karışımın dayanımının, sadece bağlayıcının özelliklerine bağlı olmayıp normal test metotları ile anlaşılabilen birçok değişik faktöre bağlı olması, yukarıda bahsedilen testlerin yetersizliğinin esas nedenleridir. Doğal puzolanlar ve uçucu küllerin puzolanik aktiflikleri, dayanım aktivite indislerini bulmak için yapılan deneyler ile tespit edilir. Bir mineral katkı, hidrolik çimento betonu ile kullanıldığında kabul edilebilir bir dayanım gelişmesi sağlayıp sağlamadığının tespitinde dayanım aktivite indisi deneyi kullanılır. (Erdoğan, 1997).

TS EN 450 (1998) göre aynı yaşta denendiğinde, kütlece %75 referans çimento + %25 uçucu kül ile hazırlanan standart harç çubuklarının basınç dayanımının, sadece referans çimento ile hazırlanan standart harç çubuklarının dayanımına (%) oranı olarak belirtilmektedir. ASTM C 311 (1994) standardına göre ise önce 500 gr. Portland çimentosu + 1375 gr. uygun dane dağılımlı standart kum + 242 ml. su kullanılarak kontrol karışım harcı hazırlanır. Daha sonra da, 400 gr. Portland çimentosu + 100 gr. denenecek puzolan + 1375 gr. uygun dane dağılımlı standart kum + kontrol karışımının akıcılığını \pm %5 kadar sağlayacak miktarda su kullanılarak puzolanlı harçlar elde edilmektedir. Puzolanlı harçların dayanımının kontrol karışımın dayanımına oranı (%) olarak belirlenir.

Uçucu külün puzolanik dayanım aktivite indeksi TS EN 450 (1998) ve ASTM C 311 (1994) standartlarına uygun olarak yapılır. TS EN 450 (1998) göre 28 gün ve 90 gündeki endeksi sırasıyla en az %75 ve %85 olmalıdır. TS 639 (1998) ve TS 25 (1975) standartlarına uçucu kül ve doğal puzolanlar için 28 günlük minimum dayanım aktivite indisi %70 olmalıdır. ASTM C 618 (1998) standardında hem F sınıfı hem de C sınıfı uçucu küller için dayanım aktivite indeksinin 7 ve 28 gün için en az %75 olması gerektiği belirtilmektedir.

2.2.5 Uçucu Küllerin Standartları ve Sınırları

Uçucu küllerin beton katkı maddesi olarak kullanabilmeleri için sahip olmaları gereken fiziksel ve kimyasal özelliklere dair sınır değerler, TS 639 (1998), TS EN 450 (1998), ASTM C 618 (1998) ve BS 3892 (1993) standartlarda belirtilmektedir. Bu standartlarda yer alan bazı fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2.7'da gösterilmektedir.

Tablo 2.7. Uçucu küller için fiziksel ve kimyasal standart sınırlar

Özellik	BSI	ASTM-F	ASTM-C	TS EN	TS
Nemlilik, maks. (%)	0,5	3,0	3,0		
K.K, maks. (%)	7,0	12,0	6,0	5,0	5,0
SO ₃ , maks. (%)	2,5	5,0	5,0	3,0	3,0
MgO, maks. (%)	4,0	5,0	5,0		
Alkaliler, maks. (%)		1,5	1,5		
SiO ₂ , min. (%)			4,0		
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , min(%)		70,0	50,0		70,0
Serbest kireç, maks. (%)				1,0-2,5	1,0-2,5
Cl-, maks. (%)				0,1	0,1
PAI, min. (%)		75,0	75,0	75 (85)	70,0
İncelik, ≥45 µm, maks. (%)	12,5	34,0	34,0	40,0	

2.2.6 Uçucu Küllerin İkame Metotları

Birçok araştırmacı, karışım oranları ve uçucu külün ikamesi ya da beton karışımına katılması konusunda çalışmalar yapmışlardır. Uçucu kül ikame metotları aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır. Önerilen bu metotlar esas olarak Abraham'ın su/çimento oranı ile dayanım ilişkisine dayanır, aralarında ise küçük farklar vardır:

1. *Basit ikame metodu:* Bu metotta, kontrol karışımının çimentosunun bir kısmı yerine hacimce veya ağırlıkça eşit miktarda uçucu kül konularak uçucu küllü beton üretilmektedir. Bu metot kolaylığından dolayı birçok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır.

2. *Değiştirilmiş ikame metodu:* Basit ikame metodu ile tasarılan beton karışımlarının erken dayanım düşüklüğü, araştırmacıları yeterli erken yaş dayanımı veren bir başka ikame metodu bulmaya itmiştir. Düşük erken yaş dayanımının üstesinden gelen ve basit ikame metodunu modifiye eden çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bütün metotlarda ortak göze çarpan özellik karışıma konan uçucu kül miktarının çıkarılan çimento miktarından fazla olmasıdır, uçucu külün fazla konulan miktarı ince agrega yerine kullanılır. Ayrıca su/çimento oranını azaltarak betonda mukavemet kaybı olmadan mümkün olduğunca çok uçucu kül kullanımını sağlayan değiştirilmiş bir ikame metodu önerilmiştir.

3. *Rasyonel metodu:* Rasyonel metot, uçucu küllü betonun şartnamelerdeki işlenebilirlik ve mukavemet şartlarıyla uyuşması gerektiği gerçeği, betonun bu özelliklerini etkileyen uçucu kül karakteristiklerini göz önüne almak gerektiğini ortaya koymuştur.

2.2.7. Uçucu Küllerin Beton Özellikleri Üzerine Etkileri

Uçucu külün beton karışımında kullanımı taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini oldukça etkiler. Taze betonun su ihtiyacı, işlenebilirliği, priz zamanı, bitirilebilme özelliği, hidrasyon ısı ve kanama uçucu külün kullanımı sonucu etkilenir. Katılmış betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri de uçucu külün beton karışımında kullanılmasıyla etkilenen önemli özellikleridir. Uçucu küllerin beton özellikleri üzerine olan etkileri aşağıda başlıklar halinde özetlenmiştir. (Erdoğan, 1997; Bilim 2001; Atiş, Beton katkı malzemeleri ders notu)

2.2.7.1. Su İhtiyacı ve İşlenebilirlik

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 artırır. Uçucu kül çimentonun kısmi 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 perdelanmayı kolaylaştırır. Aynı zamanda uçucu külün tanelerinin küresel şekli, agregalar arasındaki sürtünmeyi azaltır, dolayısıyla beton ve pompa hattındaki sürtünmeyi azalttığından betonun pompalanabilirliğini arttırmaktadır.

2.2.7.2 *Priz Süresi, Hidratasyon Isısı ve Kanama*

Betonun priz zamanı karakteristiği; çimento tipi, çimento miktarı, çimento inceliği, çimento hamurunun su muhtevası, eriyebilir alkaliler, diğer katkıların kullanımı, uçucu külün miktarı, inceliği ve bileşenleri gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir. 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. Erken bitirme, kanama suyunu yüzeyin altında bırakabilir ve yüzeyde zayıflık oluşturabilir.

Uçucu kül ve portland çimentosunun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasındaki kimyasal reaksiyon, çimentonun hidratasyonu 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.

Uçucu küllü beton karışımı genelde normal betona göre daha az kanama gösterir. Bunun nedeni ise; betondaki katı madde yüzey alanının, su hacmine oranının artmasıdır. Uçucu kütle yapılan hamur daha az sulu ve ayrılmaya daha az meyillidir.

2.2.7.3 Dayanım

Beton karışımı içinde uçucu kül kullanımı genelde su ihtiyacını azaltmakta, bağlayıcı madde içeriğini artırmakta ve uzun dönemde puzolanik aktivite yoluyla dayanıma katkıda bulunmaktadır. Uçucu külün katılma oranının yavaş, erken yaşlarda basınç dayanımı kazanımını azalttığı bilinmektedir. Bu durum uçucu külün çimento ile kısmen yer değişimi yaptığı zaman geçerlidir ve bağlayıcı olarak görev görür. Eğer, bir beton karışımında bağlayıcı malzeme miktarı sabit ise ve bu bağlayıcı miktarının bir kısmı uçucu kül ile yer değiştirilmiş ise; basınç dayanımı uçucu kül miktarının artmasıyla daha da düşer. Diğer taraftan, uçucu küllü betonun dayanımı ve dayanım kazanma oranı kullanılan uçucu külün miktarına, karakteristiklerine ve kullanılan çimentoya kuvvetlice bağlıdır. Yüksek kireçli uçucu kül daha yüksek reaksiyon oranı ve yüksek dayanımı, düşük kireçli uçucu küle nazaran erken yaşlarda gösterir. Genelde, bütün betonların dayanım ve dayanım kazanma oranı kür edilme zamanından etkilenmektedir. Uçucu küllü beton normal betona göre daha uzun kür edilme zamanı isteyebilir.

2.2.7.4 Dayanıklılık

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 puzolanik reaksiyon sonucu ortaya çıkan ilave C-S-H jelleridir. Bu jeller kapiler boşlukları azaltmaktadır.

Uçucu kül kullanımının betonda geçirgenliği azaltması, ayrıca sülfat atağının beton üzerindeki bozucu etkilerini de azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, uçucu kül çimentonun bir kısmı ile yer değiştirildiğinde toplam C_3A miktarı azalacağından, oluşacak sülfat alüminatın meydana getireceği zararlı hacim genleşmelerini de azaltmaktadır.

Betonun donma çözünmeye karşı dayanıklılığı hava-boşluk sisteminin yeterliliğine, iri agreganın sağlamlığına, beton dayanımına ve donma anındaki nem

durumuna bağılıdır. Hava boşluk sistemi yeterli olduğu sürece, yani yeterli hava kabarcıkları sürüklenmişse ve agrega dayanıklı ise; hava katkılı uçucu kül betonunun donma çözünme dayanımı, uçucu külsüz aynı dayanıma sahip kontrol betonundan daha az değildir.

Çimentonun alkalileri ile agreganın reaktif silis bileşenleri arasında yer alan alkali agrega reaksiyonu sonucundaki genişleme ve çatlamlar, uçucu kül kullanılması ile azaltılabilmektedir.

Uçucu külün bağlayıcı hamurunun hacmini artırdığı durumlarda su miktarı sabit tutulduğu zaman rötrede artış görülebilir. Bunun yanı sıra, uçucu kül ilavesi işlenebilirliği artırdığından sabit işlenebilirlik için su miktarı azaltılabilir, bu da rötreyi azaltır. Uçucu külün yüksek oranda kullanılması rötreyi azaltmaktadır.

2.2.7.5 Ekonomi

Maliyet açısından bakıldığında, kullanılacak olan uçucu kül miktarı ve tipine göre değişmekle birlikte, sabit bir mamul madde (çimento) miktarı için daha az klinker üretimi, tras ve cüruf gibi mineral katkılara kıyasla, zaten ince olan tane boyutları nedeniyle, daha az öğütme enerjisi gereksinimi ve yine tras ve cüruf gibi katkılarda gerekebilecek ön kurutmaya ihtiyaç göstermemesi, uçucu küllü çimento üretimiyle sağlanacak olan tasarrufun gerekçeleridir. Ancak uçucu küllerin taşıma mesafeleri bakımından ele alınması gerektiği unutulmamalıdır. (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Bunun yanı sıra, uçucu kül kullanımı ile işlenebilirlikteki iyileşme; karıştırmada ve yerleştirmedeki kolaylık da tasarruf sağlamaktadır. Uçucu külün beton özellikleri üzerine faydalı ve potansiyel bozucu etkileri Tablo 2.8’te özetlenmiştir.

Tablo 2.8 Uçucu küllerin beton üzerindeki etkileri

Faydalı Etkileri	Zararlı Etkileri
Sabit su miktarında işlenebilirliği artırır.	Özellikle soğuk havalarda rötreyi artırır.
Kanamayı ve ayrışmayı önler	Yavaş dayanım kazanma sağlar.
Uzun dönemde dayanımı artırır.	Uzun süre küre ihtiyaç duyar.
Rötreyi azaltır.	Hava sürükleyici katkısının artırır.
Alkali-silika reaksiyonunu azaltır.	
Sülfata karşı dayanımı artırır.	
Ekonomi sağlar.	

2.2.8 Uçucu Küllerin Kullanıldığı Yerler

Uçucu küller kimyasal, mineralojik, fiziksel ve puzolanik özellikleri sebebiyle inşaat sektörü tarafından pek çok alanda kullanılmaktadır, bu alanlar aşağıda özetlenmiştir (Erdoğan, 1995; Sevim, 2003).

2.2.8.1. Çimento Üretimi

Uçucu küller çimentoya ham madde olarak, klinker ve alçı taşı ile birlikte öğütülerek veya mamul çimentoya doğrudan olmak üzere üç şekilde katılabilir. Bu tip çimento üretiminde, klinkere öğütülmüş uçucu kül katıldığından klinkerin öğütülmesi kolaylaşmakta, üretim kapasitesi ve rantabilite artmaktadır. Uçucu küller öğütülmüş kömürün yakılmasıyla elde edildiklerinden kendileri de öğütülmüş durumdadır. Bundan dolayı çimento üretiminde bir ön öğütme işlemine gerek kalmadan doğrudan fırına verilebilir ve öğütme işleminden tasarruf sağlanır. Uçucu kül doğrudan çimentoya katılarak da uçucu küllü çimentolar elde edilebilir. Bu durumda uçucu külün klinkere katılmasıyla aynı sonuçlar elde edilmektedir. Portland uçucu küllü çimentolar (CEM II/A-V, CEM II/B-V, CEM II/AW ve CEM II/B-W) 28 günlük basınç dayanımlarına göre; 32.5 N, 32.5R, 42.5 N, 42.5R, 52.5 N, 52.5R olmak üzere 6 çeşide ayrılırlar. A tipi çimentolarda kütlece %6-20 oranında uçucu kül var iken, B tipi çimentolarda kütlece %21-35 oranında uçucu kül mevcuttur.

2.2.8.2. Beton Üretimi

Beton üretiminde bağlayıcı madde olarak kullanılan Portland çimentosunun bir kısmı yerine mineral katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılabilmekte, böylece

uçucu kül katkılı beton elde edilebilmektedir. Zaman zaman beton üretiminde kullanılan ince agreganın bir kısmı yerine de uçucu kül kullanılabilir.

2.2.8.3 Tuğla ve Hafif Agreganın Üretimi

Uçucu külün tuğla imalinde kullanımı ise iki şekilde olmaktadır. Birincisi, uçucu küllerin çok rutubetli killerin fazla suyunu emmesi, plastik killerin çatlamasını, şişmesini ve çirkinleşme olayını önlemesinden dolayı yardımcı ve düzeltme malzemesi olarak kullanılırlar. Uçucu küllerin ikinci kullanım şekli ise esas malzeme olarak killere karıştırılıp basınç altında kalıplara yerleştirilen karışımın ısı işleme tabi tutulmasıdır. Uçucu kül puzolanik özelliği ve inceliği sebebiyle pişmiş malzemede mukavemetin önemli miktarda artmasını sağlamaktadır.

Hafif betonun inşaat mühendisliğinde kullanılmasıyla birlikte, hafif agrega ile hafif beton üretme çalışmaları da başlamıştır. Bu amaçla uçucu kül belirli oranlarda su ile karıştırılarak sinterleştirilmekte ve istenilen irilikte doğal agregaya göre hafif bir malzeme elde edilmektedir. Bu şekilde elde edilen agregalarla üretilen betonlar, doğal agregalarla üretilen betonlar kadar dayanıklı olmakta, ayrıca hafif olması sebebiyle çok katlı binalarda işçilik ve temel masraflarının azaltılmasında, ısı ve ses yalıtımı sağlanmasında ve ateşe karşı dayanımda bazı üstünlükler sağlamaktadır.

2.2.8.4. Boşluklu Beton (Gaz Beton) Üretimi

Boşluklu beton, çimento veya kireç ile uçucu kül karışımından hava ya da başka bir gaz geçirilmesi ile elde edilen hafif betondur. Boşluklu beton hafif olmasından dolayı taşımada kolaylık sağlar. Ayrıca ucuz olması, binanın hafifliği ve inşaat sırasında işçi giderlerinde avantaj sağlamasından dolayı tercih edilmektedir. Uçucu küllü boşluklu betonlarda ısı iletkenliği kum-kireç-çimento karışımından daha düşük olmakta, mukavemet ise daha yüksek olmaktadır. Gaz beton, ince öğütülmüş silisli bir malzemenin kireç veya çimento ile birleştirilmesi, gözenekleştirici bir madde ile hafifletilmesi ve sertleşmesi ile elde edilen, birbirinden bağımsız hava hücreleri içeren hafif bir betondur. Elde edilen uçucu küllü gaz beton, hafif ve ısı iletkenliği

düşük olacağından yapılarda kullanılması duvar kalınlıklarını azaltacak, böylece binaların yükü azalacaktır. Uçucu kül kullanılarak elde edilen gaz beton kuvars kullanılarak elde edilen gaz betondan daha dayanıklıdır. Bunun nedeni uçucu kül ile kireç arasındaki reaksiyondur.

2.2.8.5 Yol, Zemin ve Baraj Uygulamalarında

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 ve baraj yapımında, 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.

2.2.9 Uçucu Küller ile İlgili Önceki Çalışmalar

Uçucu kül gibi atık malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi, hem çok kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltarak doğanın tahrip edilmesini önlemekte, hem de malzemelerin atılmak üzere depolanması durumunda çevrede meydana gelecek problemleri en aza indirmektedir. Ayrıca silisli ve alüminli amorf yapıya sahip olmaları ve çok ince taneli olarak elde edilebilmeleri, uçucu küllerin de, aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermektedirler. Bu nedenle, hem çimento üretiminde hem de beton katkı maddesi olarak büyük miktarlarda doğrudan kullanılabilirler.

Uçucu külün betonda çimentoyla yer değiştirerek kullanımı çimentodan büyük ölçüde ekonomi sağlar. Bunun yanında uçucu kül betonun işlenebilmesini, su gereksinimini, terlemesini, ayrışmasını ve hidrasyon ısısını düşürür. Betonların ileri yaştaki dayanımlarını, geçirimsizliğini, zararlı kimyasallara dayanıklılığını artırır ve

alkali-agrega reaksiyonunu bir oranda önler. Kısacası uçucu külün bilinçli olarak çeşitli alanlarda kullanımı ile hem kullanıcı, hem de külü üreten için ekonomik avantajlar sağlar, atık madde ortadan kalktığı için çevre korunmuş olur.

Yukarıda ifade edilen sebepler nedeniyle günümüzde uçucu külün çimento ve betonda kullanımı vazgeçilmez unsurlardan olmuştur. Bundan dolayı bu çalışmada liflerle güçlendirilmiş betonlarda uçucu kül kullanılmıştır. Literatürde, lifli betonun kullanılması halinde işlenebilmeyi kolaylaştırmak amacıyla karışıma uçucu kül katılması lifli betonun aderans dayanımını arttırdığı, puzolan katkısının lifli betonlarda olumlu etkiler sağladığı, liflerin homojen dağılması için uçucu kül gibi ince partiküllerin gerekli olduğu belirtilmektedir. Ayrıca uçucu küllü betonlar ve lifli betonlar ile ilgili birçok çalışma yapılmasına rağmen liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonlar üzerinde çok fazla çalışma yapılmamıştır. Bu amaçla uçucu külün ve liflerin beton özelliklerine etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Uçucu küllü betonlar, liflerle güçlendirilmiş betonlar ve liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonlarla ilgili yapılmış önceki çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Ramyar (1993), araştırmasında Türkiye’de üretilmekte olan ve linyitin yakılmasından elde edilen dört çeşit uçucu külün, portland çimentosu-uçucu kül sistemlerinin özelliklerine etkisini incelemiştir. Uçucu küllerden birisi düşük kireçli Tunçbilek ve diğer üçü yüksek kireçli Afşin-Elbistan, Seyitömer ve Soma-B dir. Karışımlarda çimento ağırlığının %10, %20 ve %40’ı kadar uçucu kül kullanmıştır. Uçucu külün karışımlara eklenmesi, karışımdan alınan çimentonun ağırlığına eşit ve ondan fazla olmak suretiyle iki değişik yöntemle yapmıştır. Taze karışımların normal kıvam, priz süresi, su ihtiyacı, akma, çökme, hava içeriği ve sertleştikten sonra dayanım, puzolanik aktivite indeksi, elastisite modülü, sülfat direnci büzülme ve karbonatlaşma özellikleri incelenmiştir. Deneyler sonucu, Tunçbilek ve Soma-B küllerinin, çimentonun %40 oranında kullanıldıklarında bile, portland çimentosu - uçucu kül sistemlerinin birçok özelliğini iyi yönde etkiledikleri saptanmıştır. Bununla birlikte, Afşin-Elbistan ve Seyitömer külleri yüksek dozda kullanıldığı takdirde portland çimentosu-uçucu kül sistemlerinin birçok özelliğini olumsuz yönde etkilediği ortaya çıkmıştır.

Başığit (1993), çalışmasında yüksek oranda, yüksek kalsiyumlu uçucu kül katılmasının beton özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Çimento dozajı 300 kg/m^3 olan ve çimentonun yerine kullanılan uçucu külü %10, %30, %50 ve %70 oranlarında kullanmıştır. Taze beton deneylerinde uçucu kül miktarının artması ile betonun işlenebilme özelliğinde bir artma meydana geldiğini ve böylece uçucu kül katkısının su ihtiyacını azalttığından, dayanım artışına etkisinin olumlu olacağını belirtmiştir. Basınç dayanımları açısından optimum uçucu kül katılış oranının %10-%30 arasında değiştiğini ve uçucu külün çimentoya katıldığı katkı nispetinde orantılı olarak hidrasyon ısısını düşürdüğünü belirtmiştir.

Yazıcı ve Baradan (1995), uçucu kül katkılı yüksek dayanımlı beton üretilmesi çerçevesinde 75 MPa basınç dayanımına sahip bağlayıcı malzeme içeriği %100 PÇ-42.5 çimentosu olan yüksek dayanımlı beton (YDB) ve yine aynı malzemelerle çimento yerine %25 oranında uçucu kül ikame edilen uçucu küllü yüksek dayanımlı betonlar (UKYDB) üretmişlerdir. Yüksek dayanımlı betonlar üzerinde fiziksel, mekanik ve durabilite deneyleri yürütmüşlerdir. %25 oranında uçucu kül kullanılarak 28. günde 68.4 MPa'lık basınç dayanımına ulaşarak, YDB'dan %9,4 oranında düşük olduğunu belirtmişlerdir. Basınç dayanımı ve elastisite modülünü düşürürken çekme ve eğilme dayanımlarını çok az bir miktar arttırdığını belirtmişlerdir. YDB'da %25 oranında uçucu kül katkısının geçirimsizliği önemli oranda azalttığını ve kimyasal etkilere karşı iki aylık dönem içerisinde sülfürik asit dışında betonun performansının arttığını belirlemişlerdir. Yüzeysel aşınmayı, katkısız yüksek dayanımlı betona kıyasla arttırdığını ve 25 ve 50 tekrarlı donma çözülme deneyleri sonucu uçucu kül katkısının dayanıklılığı anlamlı bir şekilde değiştirmedeğini tespit etmişlerdir.

Erdinç (1995), çalışmasında Orhaneli uçucu külünün betonlarda dayanım ve klor geçirimsizliğini araştırmıştır. Araştırma sonucunda, harçlarda ve betonlarda uçucu kül kullanımı erken yaşlarda dayanımını bir miktar azaltabilmekte ancak devam eden puzolanik etki ile ileriki yaşlarda bu etkinin azaldığını hatta ortadan kalktığını ifade etmiştir. Uçucu kül kullanımıyla kılcallığın şahit betona oranla arttığını ve salt çimentolu betonların uçucu küllü betonlardan daha düşük poroziteye sahip olduklarını belirtmiştir. Bütün yaşlarda uçucu kül kullanımıyla salt çimentolu

betonlara oranla düşük klor geçirimsizliği elde etmişlerdir. Salt çimentolu betonlarda yaşa ve karışıma bakılmaksızın basınç dayanımı artışı ile klor geçirimsizliği azalmıştır. Uçucu küllü betonlarda ise basınç dayanımlarından nispeten bağımsız olarak düşük klor geçirimsizliği elde edilmiş ve uçucu küllü betonlarda klor geçirimsizliği uçucu külün ilave oranı ve çimento dozajına karşı daha hassas olduğu belirtilmiştir. Yüksek hacimli uçucu kül içeren betonlarda güvenle kullanılabilmesini, minimum çimento dozajına uyma ve kül özelliklerini ve kullanılacak karışım oranını tespit etme zorunluluğu ve uçucu külün ekonomik ve teknolojik sebeplerle hazır beton sektöründe değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Gökçe ve Özturan (1996), uçucu kül puzolanik aktivitesinin tayini ile ilgili mevcut bazı standartları ele almış, bu standartlardan elde edilen test sonuçlarını birbirleri ile karşılaştırmış ve her standardın uygunluğunu tartışmışlardır. Söz konusu standartlar TS 639, Amerikan ASTM C311 ve İngiliz BS 3892 olmakla birlikte, TS 639 ayrıca modifiye edilmiş, böylece dört farklı test metodunu kapsayan bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada Seyitömer ve Soma termik santrallerinden temin ettikleri uçucu külleri kullanmışlardır. Sonuçta, TS 639'un öngördüğü test metodunun özellikle Seyitömer uçucu küllü gibi harcın su ihtiyacını önemli derecede arttıran küller için uygun ve geçerli bir yöntem olmadığını bildirmişlerdir. TS 639, eşit S/(Ç+UK) oranı yerine ASTM ve BS standartlarında olduğu gibi eşit işlenebilme dikkate alınarak modifiye edildiğinde, daha yüksek puzolanik aktivite sonuçları elde etmişler, ancak yine de ASTM ve BS standartlarından elde edilen düzeye ulaşamamışlardır. Standartlarda öngörülen farklı bağlayıcı malzeme miktarlarının puzolanik aktivite değerlerinin değişik düzeylerde olmasının esas sebeplerinden biri olduğunu belirtmişlerdir.

Turanlı ve ark. (1997) çalışmalarında Çayırhan uçucu külünün portland çimentosu-uçucu kül hamur ve harçlarının özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Karışımlarda çimento ağırlığının %10, %20, %30 ve %40'ı kadar uçucu kül kullanmışlardır. Aynı zamanda, uçucu küllü karışımlar, yalnız portland çimentosu içeren karışımlarla da kıyaslanmıştır. Portland çimentosu-uçucu kül sistemlerinin

normal kıvam, priz süresi, hidrasyon ısı, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve büzülme özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak;

- %10, %20 ve %30 uçucu kül karışımlarında normal kıvamın portland çimentosundan farklı olmadığını %40 uçucu külden ise normal kıvamın arttığını,
- Uçucu küldenki yüksek CaO'dan dolayı %30 ve %40 uçucu kül karışımlarında ilk ve son priz sürelerinde biraz gecikme olduğunu,
- Hidrasyon ısı değeri uçucu kül yüzdesi arttıkça azalmakta olduğunu,
- PC-UK karışımlarının hepsinde kontrol numunelere göre daha düşük basınç ve eğilmede çekme dayanımları görüldüğü,
- Uçucu küllü karışımların büzülme oranını arttırdığı, özetlemişlerdir.

Ayrıca Çayırhan uçucu külünün inceliğinin $2182 \text{ cm}^2/\text{g}$ olması, gerek puzolanik aktivitesinin %66 olmasına ve erken dayanımlarının düşük olmasına neden olduğu belirtilmiştir. Çalışmalarında Çayırhan uçucu külünün çimento sistemlerinde %10 ile %20 arasında kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Özcan (1997), çalışmasında Seyitömer ve Tunçbilek santrallerinden sağladığı uçucu külleri %10, %20 ve %30 oranlarında çimento ile yer değiştirerek betonların mekanik ve durabilite özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Maksimum dane çapı 16 mm ve çimento dozajı 320 kg/m^3 olan 19 seri beton üretmiştir. Deneyler sonucunda, uçucu küllerin betonda işlenebilirliği iyileştirdiğini ve betonda su ihtiyacını azalttığını gözlemiştir. Uçucu külün puzolanik aktivite deneyinin ASTM C-311'e göre yapılmasının ihtiyaç duyulan su miktarının belirlenmesi açısından daha kontrollü olduğu ve daha iyi sonuç verdiğinin görüldüğünü belirtmiştir. Eğilme ve basınç dayanımlarında erken yaşlarda uçucu küllü betonlar şahidin altında kalmışken, ileriki yaşlarda şahidin üstünde dayanım verdiğini belirtmiştir. Çimento miktarının %10 ve %20 azaltıldığı uçucu küllü betonlarda gerek mekanik gerekse durabilite açısından iyi sonuçlar elde edildiğini, ancak çimentonun %30 azaltıldığında ise üretilen uçucu küllü betonların her açıdan çok kötü sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Seyitömer'in etkinlik katsayısının Tunçbilek'e göre daha yüksek çıktığını, bununla puzolanik aktivitesinin daha iyi olmasının sonucu olduğunu belirtmiştir.

Tunçbilek (1998) araştırmasında, bazı Türkiye uçucu küllerinin (Afşin- Elbistan, Çatalağzı, Kangal, Orhaneli, Yatağan) portland çimentosu-uçucu kül sistemleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Her termik santralden, elektrostatik filtrenin birinci ve ikinci kademelerinden olmak üzere iki farklı numune almış ve aradaki farkları incelemiştir. Karışımlarda, çimentonun ağırlığının %10, %20 ve %30'u kadar uçucu kül kullanmıştır. Portland çimentosu-uçucu kül hamurları üzerinde normal kıvam, priz süresi ve hacim genişlemesi; portland çimentosu-uçucu kül harçları üzerinde su ihtiyacı, dayanım aktivite endeksi, basınç dayanımı, büzülme ve sülfat direnci deneyleri yapmıştır. Test edilen uçucu küllerin standartlara bütünüyle uymasa da bazılarının beton bileşiği olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Yüksek oranda katılmadığı takdirde tatmin edici geç dayanımlar elde edilmesi mümkün olmakla birlikte nispeten düşük erken dayanımlar beklenilmesi gerektiğini belirtmiştir. Yüksek oranda kireç ve sülfat içeren C sınıfı uçucu küllerin dışında kalan küllerin kullanımıyla dayanıklılığın geliştirilebilmesinin mümkün olduğunu belirtmiştir.

Atış (2000), yüksek oranda uçucu kül kullanımı ile üretilen betonun aşınma direncini araştırmıştır. Betonun basınç dayanımı arttıkça aşınma direncinin de arttığını görmüştür. Çok yüksek beton basınç dayanımlarında, çimento ağırlığının %70'i ile yer değişimle üretilen yüksek oranda uçucu kül kullanımının betonun aşınma direncinin, aynı basınç dayanımına sahip uçucu kül konulmadan üretilen betonun aşınma direncinden daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Akışkanlaştırıcı kullanımının betonların aşınma direnci üzerinde önemli bir etkisi olmadığını ayrıca kür şartlarının betonun aşınmasının genel eğilimi üzerinde bir değişiklik göstermediğini belirtmiştir.

Bilim (2001), yüksek oranda kalsiyum içeren standart dışı bir uçucu külün beton içinde kullanılabilirliğini ve hızlandırılmış kür karşısındaki davranışını araştırmak üzere bir laboratuvar çalışması yürütmüştür. Üç farklı bağlayıcı dozajında, su/çimento oranları 0,40 ve 0,87 arasında değişen, toplam 48 beton karışımı hazırlamıştır. Uçucu külün normal portland çimentosunu %0, %15, %30 ve %45 yer değiştirme oranlarında ikamesiyle üretilen ve nemli ortamda kür edilen betonların 28 günlük ve

3 aylık basınç dayanımlarını ölçmüştür. ASTM ve Türk standartlarında göre uygulanan ılık su metodu ve kaynar su metodu ile hızlandırılan beton basınç dayanımlarını da ölçmüştür. Uçucu külün standart dışı olması gerçeğine rağmen, uçucu kül içeren betonların sadece portland çimentosu ile üretilen betonlara yakın ya da daha yüksek dayanım geliştirmesinden dolayı uçucu külün %15 ve %30 yer değiştirme oranları arasında ağırlıkça çimentoyu ikame ederek beton içinde kullanılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca ılık su ve kaynar su hızlandırılmış kür metotlarının uçucu kül içeren betonların basınç dayanımlarının %85 korelasyon katsayısıyla tahmin edilebilmesinde kullanılabileceğini belirtmiştir. Dayanım tahmininde, kullanılan uçucu kül miktarının önemsiz olduğu bulmuştur. Ilık su metoduyla kaynar su metodu arasındaki ilişkinin korelasyon katsayısı ile doğrusal formda olduğunu belirtmiştir.

Lee (2002), çalışmasında yüksek performanslı betonların gerilme deformasyon karakteristiklerini incelemiştir. Araştırmasında uçucu külü %10, %20 ve %30 oranlarında ağırlıkça yer değiştirmiştir. 28 günlük basınç dayanımları için %10 ve %20 uçucu kül yer değişiminin dayanımı değiştirmedeğini ancak %30 uçucu külün kontrol karışıma göre biraz düşürdüğünü bildirmiştir. Uçucu küllü betonların deneysel elastisite modüllerinin ASTM C469-94 teki formülle bulunan elastisite modülü değerlerinden yüksek çıktığını ve bununda karışımdaki agregaların karakteristiğinden kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Deneysel elastisite modülleri uçucu küllü betonların kontrol betonlarından biraz fazla çıktığını görmüştür. Uçucu küllü betonların yarmada çekme dayanımları ise uçucu kül oranı arttıkça azaldığını ve uçucu küllü betonların yarmada çekme dayanımlarının basınç dayanımlarının yaklaşık %12'si olarak bulmuştur. Normal dayanımlı portland betonlarında bu oran %8-10 arasında olduğundan, uçucu küllü betonların çekme dayanımlarına önemli bir değişiklik yapmadığını belirtmiştir. Çimento ile yer değiştiren uçucu külün gerilme şekil değiştirme eğrisinin yükselen kısmında bir değişiklik olmadığını ancak azalarak aşağıya inen tarafta ise az bir değişiklik olduğunu belirtmiştir. Böylece betonda uçucu kül kullanımının betonun düktilitesini biraz arttırdığını bildirmiştir. Bu çalışmada %30 uçucu kül yer değiştiren betonun sünekliğinin normal betona göre

%9,8 oranında arttığını belirtmiştir. Bununda uygun oranda kullanılan uçucu külün beton yapısının sünekliliğini az da olsa arttırabileceğini belirtmiştir.

Atiş ve ark. (2002), çalışmalarında standartlara uygun olmayan Afşin- Elbistan termik santrali uçucu külünü beton içerisinde mineral katkı olarak kullanılabilirliğini basınç ve çekme dayanımı ve hidrasyon sonucu oluşan sıcaklık yükselmesi açısından değerlendirmişlerdir. Çimento dozajı 300 kg/m^3 , 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 ile su-çimento oranında 0,35 – 0,45 – 0,55 ve uçucu kül yer değiştirme oranları da ağırlıkça %0, %10, %20, %30 olan otuz altı beton karışımı hazırlamışlardır. Su içinde kür edilen beton numunelerin 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ile 7 günlük yarıma çekme dayanımları tespit etmişlerdir. Beton içinde oluşan sıcaklık yükselmesini termometre ile birer saat ara ile 24 saat ölçmüşlerdir. Deneyler sonucunda, Afşin-Elbistan uçucu külün ağırlıkça %10- %20 oranında beton içine mineral katkı olarak kullanılabilmesi ancak, beton sıcaklığını düşme yönünde etkilemediğinden, hidrasyon ısısını azaltmada kullanılamayacağını belirtmişlerdir.

Atiş (2003a), yüksek dayanımlı ve düşük kuruma rötreli yüksek hacimli uçucu kül katkılı betonlar üzerinde çalışmıştır. F sınıfı uçucu kül ile yaptığı çalışmalarda %50 ve %70 uçucu kül ikame oranlarına sahip betonların optimum su/çimento oranında, portland çimentosu betonu ile kıyaslandığında önemli derecede düşük rötre değerlerine sahip oldukları sonucunu elde etmiştir. Kullanılan akışkanlaştırıcının rötreyi arttırdığını ancak uçucu kül kullanımı sonucunda portland çimentosu betonuna kıyasla rötrede %40'a varan düşme gözlemiştir.

Sevim (2003), çalışmasında Afşin-Elbistan termik santralinden elde edilen uçucu külün çimento ve beton katkısı olarak kullanılabilirliği harç ve çimento hamuru numuneleri üzerinde yürütülen deneylerle araştırmıştır. Afşin Elbistan uçucu küllerini %10 ve %20 oranında içeren harç numunelerin büyük bir kısmı şahit harç numunelerine eşdeğer ya da karşılaştırılabilir mertebede basınç, çekme, aşınma dayanımı karbonatlaşma, boşluk oranı ve kapiler su emme katsayısı gerçekleştirdiğini belirtmiştir. Afşin-Elbistan küllerinin %10-%20 oranında çimento ve beton katkısı olarak kullanılabilmesi kanaatine varmıştır. Mevcut küllerin %10 oranında daha iyi sonuçlar verdiği gözlemiştir. Bu küllerin içinde bulunan ve şişme

etkisi gösteren bileşenlerin bir sonucu olarak, Afşin-Elbistan küllerinin rötire azaltıcı ya da rötire dengeleyici bir özelliğinin olduğu ortaya çıktığını belirtmiştir. Afşin-Elbistan küllerinin rötire dengeleyici katkı ya da rötire dengeleyici çimento üretiminde kullanılacak bir hammadde olduğu kanaatine varmıştır. Külün inceltirilerek kullanılması sonucunda harç numunelerin özelliklerinde gelişme gözlemlenmiş olup, dayanımlarda artış, boşluk oranı, karbonatlaşma ve kapiler su emme katsayılarında düşüş belirlemiştir.

Siddique (2004a), çalışmasında F sınıfı uçucu külü %35, %45 ve %55 oranlarında botanik adı *Crotalaria juncea*, uzunluğu 25 mm bir bitki olan san liflerle birlikte %0,25 - %0,50 ve %0,75 oranlarında kullanarak betonlar üretmiştir. Su/bağlayıcı oranını 0,47; akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranını ise %1,5 seçmiştir. Deneylerde işlenebilirlik, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dirençlerini araştırmıştır. Deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır;

- Çimentonun yerine üç farklı oranda uçucu kül ile yer değiştirmesi ile şahide göre işlenebilirliğin arttığı, san liflerin artması ile ise slump'ın düştüğünü görmüştür.
- Basınç dayanımlarının 28. gün sonunda %32, %43 ve %48 oranında düştüğünü ve bu etkinin külden kaynaklandığını, san liflerin dayanıma bir etkisinin olmadığını belirtmiştir.
- Yarmada çekme dayanımlarının uçucu kül ile birlikte azaldığını, ancak san liflerin yarmada çekme dayanımını arttırdığını belirtmiştir.
- Eğilme dayanımlarının da uçucu kül oranı artarken azalmakta olduğunu, ancak san liflerin eğilme dayanımlarını da arttırmakta olduğunu belirtmiştir.
- Her üç kül oranında da san lif katkısının betonların darbe direncini %35 kül oranında 2-3 misli, %45 ve %55'de ise 1-1.5 misli arttırdığını belirtmiştir.

Wang ve ark. (2004), çalışmalarında çimento ve uçucu kül sisteminde, çimento klinkerinin hidrasyon derecesini ve uçucu külün puzolanik reaksiyon derecesini belirlemek için geliştirilen metottan bahsetmişlerdir. Sonuçta uçucu külün iki aktif etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Birinci aktif etkisinin, uçucu külün çok kuvvetli puzolanik etkiye sahip olduğunu ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girebileceğini belirtmişlerdir. İkinci aktif etkisinin ise, çimentonun hidrasyonunu

hızlandırabileceğini belirtmişlerdir. Uçucu kül miktarı az olduğunda, puzolanik aktivitesi yeterli geldiğini ama çimentonun hidratasyonunu hızlandırma etkisi zayıf olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu kül miktarı fazla olduğunda ise, puzolanik aktivite etkisi daha az, ancak çimento hidratasyonunu hızlandırma etkisinin daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Siddique (2004b), Hindistan'da yılda, çoğunluğu F sınıfı olan 88 milyon tondan fazla meydana gelen uçucu küller üzerinde çalışmıştır. Kullanma yüzdesi %10 ile %15 civarında iken, betonda F sınıfı uçucu külü çimento ile üç farklı (%40, %45 ve %50) yüzdelik oranlarda yer değiştirerek yüksek hacimli uçucu küllü betonlar üzerinde kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Taze beton özelliklerinden slump, hava miktarı, birim ağırlık ve sıcaklıkları test etmiştir. Sertleşmiş beton deneylerinden ise basınç dayanımı, yarma ve eğilme dayanımları ile beton elastisite modülü ve aşınma direnci tayini deneylerini 365 güne kadar test etmiştir. Basınç için 150 mm'lik küp, yarma için 150×300 mm'lik silindir, eğilme için 101,4×101,4×508 mm'lik kiriş, beton elastisite modülü için 150×300 mm'lik silindir ve aşınma içinde 65×65×60 mm'lik numuneleri, su/bağlayıcı oranı yaklaşık 0,40 olan betonlar üretmiştir. Deneylerin sonunda; üç farklı uçucu kül oranının çimento ile yer değiştirmesi ile basınç dayanımı, yarma dayanımı, eğilme dayanımı ve beton elastisite modülü 28 günde azaldığını ancak devamlı ve önemli bir gelişme ve artış 28 günden sonra meydana geldiğini belirtmiştir. %40, %45 ve %50 uçucu kül oranı 28. gün için bile beton dayanımı prekast (önyapımlı) ve güçlendirilmiş çimentolu beton yapılarda kullanımı için yeterli olduğunu bildirmiştir. Betonun aşınma direncinin tüm beton karışımları için uçucu kül miktarına bakılmaksızın zamanla yaşları arttıkça aşınma dirençlerinin arttığını rapor etmiştir.

Atiş ve ark. (2004a), uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılmış beton konusundaki çalışmada üç farklı normal portland çimento miktarı 200, 300, 400 kg/m³ olan silindirle sıkıştırılmış betonlar üretilmiştir. Yerel bir uçucu kül de ağırlıkça %0, %15, %30 ve %45 oranlarında normal portland çimentosuna ikame etmek suretiyle beton üretiminde kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül standart dışı olup, yüksek oranda kireç içermektedir. Tam sıkıştırma elde edilinceye kadar bağlayıcı malzeme oranları titreşimli çökme testi ile belirlenmiştir. Tam sıkıştırma elde edilince beton numuneler

üzerinde basınç, eğilme ve yarma deneyleri yürütülmüştür. Kullanılan külün standart dışı olmasına rağmen, deney sonuçları uçucu küllü beton dayanımlarının normal portland çimentosu betonlarına göre kıyaslanabilir ya da daha yüksek dayanım özelliklerinden dolayı, bu külün çimentoya ağırlıkça %15-%30 arasında ikame edilebileceği göstermiştir. Dayanım açısından bakıldığında, üretilen ve testleri yapılan silindire sıkıştırılmış betonun yol kaplaması ve büyük yer döşemeleri için alternatif bir malzeme olacağı sonuç olarak çıkarılmıştır.

Dinçer (2004), çimentonun yerine ağırlıkça Çatalağzı termik santralinden elde edilen uçucu külü %0, %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında kullanmıştır. Çimentonun yerine uçucu kül kullanıldığında, betonun mekanik özelliklerine etkisinin %20 uçucu kül ikamesine kadar çok iyi olduğunu, hatta şahit betondan bile iyi davranış gösterdiğini gördüğünü, ancak uçucu külün basınç dayanımına etkisi %20 oranından sonra düşüş eğilimi gösterdiğini belirtmiştir. Uçucu kül oranı %20'ye kadar olan betonların basınç dayanımları 90 güne kadar şahit beton dayanımları kadar, 180 günden sonra şahit beton dayanımının da üzerine çıktığını görmüş ve %30 oranında ise şahit betona göre %10-15 düşüş gösterdiğini, yine de kabul edilebilir olarak belirtmiştir. Çekme dayanımlarının da basınç dayanımına paralel bir seyir izlediğini, diğer taraftan bu karışımların elastisite modülü değerleri, basınç dayanımında olduğu gibi gözle görünür bir azalma göstermediğini belirtmiştir. Uçucu kül ile birlikte hacimce ince malzeme miktarı arttığı için, kül katkısı ile birlikte beton kompasitesinin de artmakta olduğunu, bundan dolayı basınç dayanımında gözle görülür bir azalma olmasına rağmen, elastisite modülünde bu azalmanın görülmediğini belirtmiştir.

Günindi (2005), çalışmasında yüksek oranda yumurtalık Sugözü uçucu külü içeren betonun basınç, eğilme ve aşınmaya karşı direncini deneysel olarak incelemiştir. Su/çimento oranını 0,45; toplam bağlayıcı miktarını ise yaklaşık 350 kg/m³ almıştır. Çimentonun ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40'ı uçucu kül ile yer değiştirerek uçucu kül içeren betonlar hazırlamıştır. Uçucu kül kullanımı ile ağırlıkça %10 yer değiştirme oranında normal betonun dayanımına eşdeğer dayanım elde etmiştir. Sonuç olarak, mevcut uçucu külün çimentoya %10-%40 oranında ikame edilebileceği, beton yol kaplaması olarak kullanılabilirliğini belirtmiştir.

Atiş (2005), yüksek hacimli uçucu küllü silindir ile sıkıştırılmış ve süper plastik işlenebilir betonu ıslak ve kuru kür şartlarında dayanım özelliklerini araştırmıştır. Beton karışımları su/bağlayıcı oranı 0,28 ile 0,43 olan ve %0, %50 ve %70 Portland çimentosu ile yer değişim oranlarında iki farklı düşük kireçli F sınıfı iyi ve düşük kaliteli küller ile hazırlamıştır. Basınç, eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımlarını ölçmüştür. Eğilme ile basınç arasındaki ilişkisini, kür koşullarının etkisini ve kızdırma kaybının uçucu küllerin su ihtiyacı ve dayanımı üzerindeki etkilerini tartışmıştır. Çalışması sonucunda yüksek dayanımlı betonun yüksek hacimli betonlar ile mümkün olabileceğini ve kızdırma kaybının artışının taze betonun su ihtiyacını arttırdığını belirtmiştir. Yüksek hacimli uçucu küllü betonların normal portland çimentolu betonlardan kuru kür şartlarına karşı daha hassas ve zayıf olduğunu ancak yüksek hacimli uçucu küllü betonların hem yapılarda hem de yol ve kaldırım uygulamaları için yeterli bir malzeme olduğunu sonucunu çıkarmıştır.

2.3 Sülfat Etkisi

Sülfat korozyonu, betonlarda en sık rastlanılan hasar tipidir. Bunda en büyük etken sülfat bileşiklerinin betonla çok değişik ortamlarda temas edecek şekilde doğada bulunmasıdır.

Sülfatlar genellikle sodyum, poyasyum, kalsiyum veya magnezyum tuzu (Na_2SO_4 , K_2SO_4 , CaSO_4 , MgSO_4) olarak toprakta, yer altı suyunda, atık sularda, deniz suyunda, yağmur suyunda, kirli havada ve beton agregalarında bulunurlar.

2.3.1 Sülfatın Bulunduğu Ortamlar

2.3.1.1 Agregada Sülfat

Alçıtaşı, anhidrit, barit, markasit gibi minerolojik kökene sahip taneler agrega içerisinde sülfat olarak bulunabilir.

2.3.1.2 Zeminde Sülfat

Doğal zeminlerde, bataklık ve endüstri atığı dolgu zeminlerde genel olarak trias, jura ve tersiyer oluşumlarında jipsli, anhidritli katmanlara rastlanır. Magnezyum sülfat ve sodyum sülfat gibi kolay çözünebilen tuz yataklarının civarında bulunabilir. Jips içeren katmanlardaki zemin suları fazla miktarda CaSO_4 içerir. Böyle zeminlerde oturmuş betonların, bu su ile teması sonucu betonda tahribatlar ortaya çıkar. Beton üzerindeki sülfat etkisi reaksiyon ortamında ancak su bulunduğu zaman mümkün olabilir. Bu nedenle böyle zeminler üzerine oturmuş beton yapılar suya karşı korunduğu müddetçe sülfat korozyonu söz konusu olamaz.

2.3.1.3 Beton Karma Suyunda Sülfat

Beton karma suyu için kirlilik derecesini gösteren geliştirilmiş sınır değerler olmamasına karşın karma suyunda aşındırıcı karbonik asit, mangan bileşikleri, amonyum tuzları, serbest klor, silt, yağ, organik maddeler, evsel ve endüstriyel atıklar bulunmamalıdır. Suyun pH' ı ise 7'den küçük olmamalıdır.

2.3.1.4 Gazlarda Sülfat

Özellikle SO_3 gazı ile kirlenmiş endüstriyel bölge havası betonda sülfat etkisi yapabileceği gibi, betonun bünyesindeki serbest Ca(OH)_2 ile birleşerek alçı taşına dönüşebilir. Alçı taşı da hacim artmasına yol açtığından hasar oluşturur. Ayrıca SO_3 gazı hava nemiyle birleşerek sülfirik aside dönüşüp, betonda zararlı etki yapabilir. Endüstriyel bölgelerde betona etkili gazların yüksek yoğunlukta olması halinde, gaz analizi yapılmalı ve analiz sonuçlarına göre beton uygun bir madde ile yalıtılmalıdır.

2.3.1.5 Beton Temas Suyunda Sülfat

Betonun yapısı gereği belli ölçüde geçirgen olması nedeniyle beton temas suyunda betonu tahrip edecek nitelikte kirliliğin olmaması gerekir. Doğadaki suların zararlı etkinlik dereceleri incelenen özellik ve madde bakımından TS-3440'da verilen

sınır değerler göz önüne alınarak tayin edilir (Tablo 2.9). Bu değerler durgun veya yavaş akan, büyük miktarlarda bulunan ve beton ile doğrudan doğruya temas halinde olan sular için geçerlidir.

Tablo 2.9 Doğadaki suların zararlı etkinlik dereceleri için sınır değerler

İncelenen Özellik	Zararlı Etkinlik Derecesi		
	Zayıf	Kuwetli	Çok Kuwetli
pH değeri	6,5-5,5	5,5-4,5	<4,5
Kireç çözücü (CO ₂) mg/l	15-30	30-60	>60
Amonyum (NH ₄ ⁺) mg/l	15-30	30-60	>60
Magnezyum (Mg ²⁺) mg/l	100-300	300-1500	>1500
Sülfat (SO ₄ ²⁻) mg/l	200-600	600-3000	>3000

Sülfatın betona etkisi, hidrate portland çimentosu ile sülfat iyonları arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar yoluyla olur. Bu etki genelde iki ayrı şekilde meydana gelir.

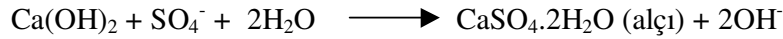
-Genişleme

-Mukavemetin zaman içinde giderek düşmesi ve bu olayla birlikte kütle azalması

2.3.2 Sülfatın Betona Etki Mekanizması

Betona sülfat etkisi iki ayrı reaksiyon sonucunda meydana gelir;

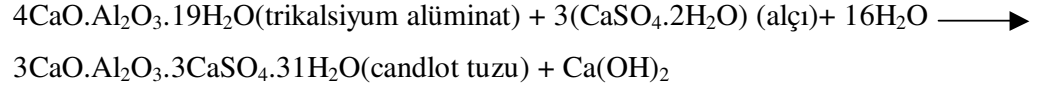
1-Çimento hidratasyonu sırasında ortaya çıkan Ca(OH)₂ (serbest kireç) ile sülfat anyonlarının birleşmesi sonucunda kalsiyum sülfat (alçı) meydana gelir.



Alçı, Ca(OH)₂ kristalleri üzerinde iyon değişimi yoluyla oluşursa % 124'lük bir hacim artışı olur.

2-Yukarıdaki reaksiyonda meydana gelen alçı, çimentonun en önemli bileşenlerinden biri olan trikalsiyum alüminat ile reaksiyona girerek trikalsiyum

sülfoalüminat'ı meydana getirir. Beyaz renkte ve iğne kristalli olan bu tuza candlot tuzu (etringit) veya çimento basili adı verilir.



Denklemden de görüleceği üzere Candlot tuzu yapısında 31 molekül su tutar. Bu nedenle bu tuzun oluşumu sırasında yaklaşık % 227'lik bir hacim artışı meydana gelir. Hacim genişmesi sırasında beton dokularında meydana gelen içsel gerilmeler betonu zayıflatarak çatlatır, bazen de tamamen parçalanmasına yol açar.

Beton karışım suyu içerisinde bulunan sülfat; genellikle çimento bileşiklerinin yaklaşık %20'sini meydana getiren trikalsiyum alüminata zararlı tepkimeleri yapacak boyutta yeterli değildir. Ama betonla temas eden suda az miktarda sülfat iyonu olsa bile, eğer su hareketli ise betonla sürekli temasta olduğu için etkisi şiddetli olabilir.

Keza zemin içerisinde bulunan sülfat konsantrasyonu da düşük olsa bile dikkate alınmalıdır. Çünkü kılcal yolla yer altı su düzeyinin üstteki yapı bölümlerine taşınan sülfat, buharlaşma sonucu beton boşluklarında birikerek konsantrasyonu artırır. Bu durumda zemin ve zemin suyundaki sülfat içeriğinin zararlı etkinlik derecesi tahmin edilenin çok üstüne çıkar.

Betonun geçirgenliği, sülfatlı suların beton içerisine difüzyonu, kapilarite ve özellikle kütle transferi reaksiyon hızını etkilediğinden sülfat konsantrasyonunu tespit etmek güçleşir. Sülfatlı sularla sürekli ıslanıp kuruyan ve zaman içerisinde bu olayla devamlı olarak karşı karşıya bulunan beton boşlukları önce sülfatlı su ile dolar, sonra bu su çekildiğinde ise boşluk içerisindeki suyun buharlaşması sonucu boşluklarda sülfat konsantrasyonu yükselir ve sülfat tahribatının şiddeti artar.

Sülfattan etkilenmiş beton, karakteristik beyaz türü bir görünüm kazanır. Bu görünümün oluşma nedeni, trikalsiyum sülfoalüminatın formasyonu olan sülfat tesirinin var olmasıdır. Hasarlar genellikle köşe ve kenarlarda başlar, betonun

çatlama ve pullanmasıyla devam eder. Reaksiyonun ilerlemesi ile kabarma, şişme, çatlama ve parçalanma şeklinde görülen hasarlar her tarafa yayılır.

2.3.3 Betonda Sülfat Tahribatı

Doğal ve endüstriyel bir puzolan içindeki SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 oksitlerinden miktarca en çok bulunanı olan SiO_2 , C_3S ve C_2S ' nin hidrasyonu sonucu bir yan ürün olarak açığa çıkan serbest sönmüş kireç, Ca(OH)_2 ile ve su ile birlikte yavaş seyreden reaksiyon sonucu birleşerek, kalsiyumsilikat hidrat'a dönüşür. Bu tepkimenin önemli avantajları vardır. Öncelikle suda kolayca eriyerek beton içinde boşluk ve gözeneklerin artmasına sebep olan Ca(OH)_2 , hidrate olmuş çimento pastasında mukavemetin önemli bir kısmını sağlayan kalsiyum silikathidrata dönüşmüştür. Böylece beton, daha az gözenekli, daha az boşluklu bir yapıya sahip olacak, betonun geçirimsizliği iyileşecek ve betona zarar veren iyonların beton içine işlemesi azalacaktır. Ayrıca puzolanın Ca(OH)_2 ve su ile birleşerek kalsiyumsilikat hidrat oluşturması sonucu, hidrate olmuş çimento pastasındaki, sülfat iyonuna karşı zayıf olan alüminyumsilikat hidrat oranı da azalmış olur. Bu özelliklerinden dolayı, puzolan-katkılı portland çimentoları ile üretilen betonların özellikle su yapılarında kullanımı, yapının dayanıklılığını ve servis ömrünü arttıracaktır. Betonla temas eden su, eritecek veya alıp götüreceği Ca(OH)_2 bulamayacak, beton az gözenekli ve az geçirimli olduğundan, betonun içine kolayca nüfuz edemeyecektir.

Bir tür puzolanın Ca(OH)_2 ile reaksiyona girme hızı, puzolanik aktivitesi, başka bir türünden daha iyi olabilir. Bu özellik deneylerle belirlenerek, aktivitesi daha iyi puzolanların kullanımı tercih edilebilir. Örneğin TS-25 madde 2.2.2'de tanımlanan "Puzolanik aktivite deneyi" bu amaçla kullanılabilir. ASTM C-618' de benzeri bir puzolanik aktivite deneyi tanımlanmaktadır.

Sülfat iyonu tahribatından ayrı olarak, herhangi bir asitin suda erimesiyle ortaya çıkan H^+ iyonunun da genişlemeye yol açıcı ve parçalayıcı etkisi bulunmaktadır. Asidik tahribatın sülfat iyonu etkisinden daha az şiddetli olduğu söylenebilir. Bu

durumda, sülfirik asitli bir su, betonda Na_2SO_4 veya CaSO_4 veya MgSO_4 gibi bir tuzun suda erimesinden daha şiddetli bir kimyasal tahribat yapacaktır. Daha önce Na_2SO_4 ve H_2SO_4 eriyiklerinden elde edilmiş 5.000 ppm ve 10.000 ppm' lik SO_4^- konsantrasyonlu ortamlarda bir sene tutulan betonlar üzerinde benzeri bir çalışma yapılarak, daha yüksek SO_4^- konsantrasyonlu (20.000 ppm ve 30.000 ppm) H_2SO_4 eriyiğinden elde edilen kür ortamlarında betonun dayanıklılığının takip edilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın deneysel aşamalarını ve bulgularını özetlemeden önce, beton konusundaki teknoloji birikiminden ülkemizde de yararlanılan Amerikan Concrete Institute (ACI)' nin portland çimentosu betonun dayanıklılığı konusu ile ilgili 4 adet raporuna atıflar yapılacaktır.

"Betonda Doğal Puzolanların Kullanımı" adlı, ACI 232.1R-94 kodlu uzmanlık raporunun önsözünde: "Beton ve harcın mukavemetine yaptıkları katkıdan dolayı Portland çimentosu icadından çok evvelinden puzolanlar sönmüş kireç ile karıştırılarak beton imalinde kullanılmıştır. Sadece mukavemete katkı yapmak amacı ile değil, ekonomik oldukları ve taze ve sertleşmiş betonun belirli bazı özelliklerine faydalı değişiklikler sağladıkları için de, günümüzde puzolanlar portland çimentosu ile birlikte kullanılmaktadır." denmektedir. ACI 232.1R-94'te ilk doğal puzolanın, Yunanistan'da Santorin Adasındaki M.Ö. 1500'ler civarında yanardağ patlamasında ortaya çıkan volkanik kül olduğu ve eski yunanlıların bu külü M.Ö. 600'ler civarında sönmüş kireç ile karıştırarak inşaat harcında kullanmaya başladıkları belirtilmektedir. Sonraları Romalılar da Vezuv Yanardağının volkanik külleri ile sönmüş kireci birlikte bağlayıcı olarak kullanmışlardır. ACI 232.1R-94'te: " Sönmüş kireç+puzolan harçlarının başarılı perfonmasının bir göstergesi olarak, Avrupa'nın birçok yerinde Roma devrinden kalan anıtlar bugün de hala kullanımdadır." denmektedir.

ACI 232.1R-94'e göre Yunanistan, İtalya, Fransa, Almanya, Türkiye, İspanya, A.B.D., Rusya, Çin, Meksika, Japonya ve Hindistan doğal puzolan kaynaklarının bulunduğu ülkelerdir. Rusya ve Japonya'da 1930'lardan beri doğal puzolanlar portland çimentosu ile karıştırılarak kullanılmaktadır. A.B.D.'de ilk puzolanlı

portland çimentosu 1912'de Los Angeles Akedükü inşaatında kullanılmıştır. O yıllardan günümüze kadar, özellikle su ile irtibatlı yapılarda ve kütleli yapılarda puzolan-katkılı portland çimentosu A.B.D.'de yaygınlıkla kullanıla gelmiştir.

ACI 232.1R-94'ün başka bir yerinde: "Betonda doğal puzolanların Portland çimentosu ile birlikte kullanımı genelde, deniz suyundan, sülfat taşıyan zeminlerdeki eriyiklerden ve doğal asitli sulardan gelen tahribata karşı direnci arttırır. Betonun sızdırmazlığını azaltmada, erken yaşlarda bazı puzolanlar diğerlerinden daha etkilidir. Fakat betonun çalışma durumu ne olursa olsun, herhangi bir tür puzolan içeren betonun ileriki yaşlardaki sızdırmazlığı belirgin bir biçimde azalmaktadır. Beton boru imalinde puzolanlar önemli yararlar sağlayabilirler. Uygun oranlarda ayarlanmış puzolan içeren karışımlar betonu daha az sızdırır yapar ve boru zayıf asitlere ve sülfatlara karşı daha dayanıklı olabilir." denmektedir. "Normal Beton, Ağır Beton ve Kütle Beton için Karışım Oranları Belirlenmesi Standardı" adlı ACI 211.1-91 kodlu raporun giriş kısmında: "Ekonomik kazanç sağlamak veya erken hidrasyon ısını azaltmak, ileriki yaşlardaki mukavemeti arttırmak, alkali-agrega reaksiyonu tahribatı veya sülfat tahribatı direncini arttırmak, su sızdırmasını azaltmak ve parçalayıcı sıvı çözeltilerin beton içine sızmasına direnci arttırmak amaçları için portland çimentosuna veya katkılı portland çimentosuna, uçucu kül (ACI 226.3R), doğal puzolanlar, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ACI 226.1R) ve silis dumamı gibi maddeler belirli oranlarda karıştırılabilir." denmektedir.

"Dayanıklı Betonlar Kılavuzu" adlı, ACI 201.2R-77 kodlu raporda: "Çalışmalar, bazı puzolanlar ve öğütülmüş taneli demir yüksek fırın cürufunun, çimentoya baştan karıştırılarak veya sonradan beton karışımı esnasında ilave edilerek kullanıldığında, sülfata maruz betonun yaşam beklentisini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir."denmektedir.

"Hidrolik Çimentoların Seçimi ve Kullanımı için Kılavuz" adlı, ACI 225R-85 kodlu raporda betonda sülfat tahribatı hakkında: "Sülfatın zeminlerde, deniz suyunda, yer altı suyunda ve kimyasal işlem atık sularında yaygın olarak bulunmasından dolayı, sülfat tahribatının özel bir önemi vardır. Yüksek C₃A içerikli

portland çimentoları sülfat tahribatına hassas oldukları için, sülfatlı ortamlarda kullanılacak beton için genellikle düşük C_3A içerikli çimentolar (Tip II ve V gerekmektedir)." denmektedir. ACI 225R-85'te; suda sülfat iyonu (SO_4^-) konsantrasyonu 150 ppm'e kadar "zayıf sülfatlı ortam", 150-1.500 ppm arası "orta şiddetli sülfatlı ortam", 1.500-10.000 ppm arası "şiddetli sülfatlı ortam" ve 10.000 ppm'in üstü de "çok şiddetli sülfatlı ortam" olarak tanımlanmaktadır. Zayıf ortam için hiçbir tedbir gerekmezken, orta şiddetli ortam için, puzolan-katkılı portland çimentoları veya C_3A içeriği % 8 ile sınırlandırılmış olan Tip II portland çimentosu, şiddetli ortam için ise puzolan ilave edilmiş Tip II veya C_3A içeriği % 5 ile sınırlandırılmış olan Tip V (TS-10157'de tanımlanan SDC-42.5'a benzer), çok şiddetli ortam için de puzolan ilave edilmiş Tip V tavsiye edilmektedir.

Bilindiği gibi, sülfatlı ortam tanımı, servis hayatının büyük bir kısmını, deniz suyu, yer altı suyu veya kanalizasyon suyu gibi sulu ortamlar ile irtibatlı olarak geçiren betonlar için yapılmakta ve sülfatlı ortamın şiddeti, sulu ortamdaki sülfat iyonu konsantrasyonunun, suyun ağırlığına yüzdesi veya toplam su miktarındaki "milyonda miktar (ppm)" cinsinden ifade edilmesiyle verilmektedir. TS-802'de 2000 ppm, TS-3440'da 3000 ppm olarak belirtilen sülfatlı ortam sınırları, ACI 201.2R-77 ve ACI 225R-85'de 150 ppm-1.500 ppm arası "orta", 1.500 ppm-10.000 ppm arası "şiddetli", 10.000 ppm üstü "çok şiddetli" olarak tanımlanmaktadır. Fakat dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, sülfat iyonu miktarının bu nicel değerinin yanı sıra, sülfat iyonunun sülfirik asitten veya kalsiyum, sodyum, magnezyum gibi tuzların erimesinden kaynaklanmasının da betonda sülfat tahribatını etkilediği gerçeğidir. İlgili birçok kaynakta, sülfat tahribatının asidik ortamda daha şiddetli olacağı belirtilmektedir.

2.3.4 Sülfata Dayanıklılık Açısından Alınması Gereken Önlemler

Betonun kimyasal direnci için esas gereklilik betonun, özel bir çimentoyla veya çimento-puzolan bileşimiyle ya da çimento-cüruf bileşimiyle yapılmasıdır. İlaveten düşük su/çimento oranıyla tam sıkıştırma ve yeterli kür ile geçirimsiz beton üretimi

kimyasal atak direncinin artmasına yardımcı olacaktır. Portland çimentoları betonları genellikle pH'ı 6 ve daha yüksek kimyasal atağa karşı dirençlidir.

ACI 225R-85 yüksek C₃A içeren portland çimentolarının sülfat atağından çabuk etkilenebilme eğiliminden dolayı, sülfatlı ortamlardaki betonların düşük C₃A içeren Tip II ve Tip V portland çimentolarını gerektirdiğini belirtmiştir.

Trikalsiyum alüminat sülfatlardan etkilendiği için sülfatların betona tesiri, trikalsiyum alüminatı düşük çimento kullanmak suretiyle azaltılabilir. Bundan dolayı ASTM C 150 standardı Tip V (Sülfata dayanıklı) çimentosunun C₃A miktarını maksimum %5 oranında, Tip II (Orta sülfata dayanıklı) çimentosunda ise maksimum %8, İngiliz standardında sülfata dayanıklı portland çimentosundaki C₃A miktarını maksimum %3,5 ve TS-3440 ise sülfata dayanıklı çimentomuzdaki (SDÇ) C₃A miktarını maksimum %5 ile sınırlandırmıştır.

ACI 201.2R-77, bazı puzolanların ve yüksek fırın cüruflarının katkı çimentolarda kullanılmasının veya ayrı olarak karışımda betona ilave edilmesinin önemli sülfat tesirlerinde betonun ömrünü arttırdığını göstermiştir. İlâveten çimentonun hidratasyonu sırasında, birçok cüruf ve puzolanların alkaliler ve kalsiyum hidroksit ile birleşerek betonun permeabilitesine yaralı etki yaptığını belirtmektedirler.

Hidratasyon sırasında puzolanunun çözülebilir olarak nitelendirilebilecek olan SiO₂ içeriği klinkerden ayrılan Ca⁺² iyonunu bağlar ve ortaya çıkan yeni bileşikler jel şeklinde betondaki boşlukları kapatırlar. Bu çözülebilir SiO₂ içeriği, klinkerin Ca⁺² iyonunu bağlamak suretiyle kalsiyumhidrosilikata dönüşür ve kalsiyumsilikatın da düşük bir çözünebilirliği vardır. Deney sonuçlarına göre difüzyon sonucunda puzolanlı çimento betonlarında normal portland çimentosu betonuna göre sadece 1/3 daha fazla kalsiyumhidroksit çözülmektedir. Bu olay da puzolanlı çimentonun agresif ortamlardaki dayanıklılığının kanıtıdır.

Özkan, S.B.'a göre, puzolanlı çimenonun agresif ve özellikle sülfatlı ve asitli suya karşı dayanımı, betondaki gözeneklerin SiO₂, aliminyumhidroksit ve bazı durumlarda demiroksit jelleri ile tıkanmasından ileri gelmektedir. Bu jel, gözenekleri tıkayarak yalıtım görevi görür. Bu yalıtımda betonun dış etkilere karşı dayanımını artırır. Oluşan jeller arasında SiO₂ jeli en çok paya sahip olup, bu jel diğerlerine göre agresif iyonlara karşı en az geçirgenliğe sahiptir.

Hiçbir hidrolik çimentolu betonun, birleşimi ne olursa olsun pH'ı 3 ve daha az olan yüksek asidik konsantrasyona uzun zaman dayanamayacağı belirtilmektedir. Tamamen deniz suyuna maruz kalan betonlar için 28 günlük basınç mukavemetinin en az 35 MPa 'den az olmaması gerekmektedir.

Zemin içerisinde çözülmüş haldeki sülfat ile sudaki sülfat konsantrasyonu oran ve miktarlarına göre ASTM standardında tavsiye edilen çimento tipleri ve en fazla su/çimento oranları Tablo 2.10'de verilmektedir.

Tablo 2.10 Sülfata maruz beton için tavsiye edilen çimento tipi ve su/çimento oranları

Tesir Derecesi	Zemin İçinde Çözülmüş Haldeki SO ₄ (%)	Sudaki Sülfat Konsantrasyonu Mgr/litre (ppm)	ASTM Çimento Tipleri ve Katkı	Maksimum Su/Çimento Oranı
Hafif Zararsız	0,00-0,10	0-150	-	-
Orta Az Tesirli	0,10-0,20	150-1500	Tip II Tip I + Puzolan	0,5
Şiddetli Çok Tesirli	0,20-2,00	1500-10000	Tip V Tip II + Cüruf (>%60) Tip II + Puzolan	0,45
Çok Şiddetli Parçalayıcı	>2,00	>10000	Tip V + Puzolan Tip V + Cüruf (>%60)	0,45

Konuyla ilgili literatürden çıkarılabilecek önlemler aşağıda özetlenmektedir:

1. Su/ Çimento oranı düşük beton karışımları kullanılmalıdır.
2. Sıradan Portland çimentoları sülfat atağına karşı savunmasız olduklarından dolayı C₃A (trikalsiyum alüminat) yüzdesi düşük sülfata dayanıklı çimentolar veya uygun puzolan katkılı kompoze çimentolar kullanılmalıdır. %5' ten daha az C₃A oranına sahip portland çimentoları ortalama şartlarda sülfat ataklarına karşı yeterli koruma sağlarlar.

3. Agrega içerisinde sülfat konsantrasyonuna neden olabilecek kütlelerin bulunması durumunda o agreganın kullanılmamasıdır.
4. Agrega dane dağılımı maksimum kompoziteyi sağlayacak şekilde düzgün olmalıdır.
5. Beton geçirgenliğinin azaltılabilmesi açısından maksimum dane çapı küçük seçilmelidir.

2.3.5 Sülfat Etkileri ile İlgili Önceki Çalışmalar

Khatri, Sirivivatnanon ve Yang, 1997 "Role of Permeability in Sulfate Attack", Cement and Concrete Research, Vol.27, pp.1179-1189, çalışmasında; sülfat atağında permeabilitenin rolü değerlendirilmektedir. %5 Na₂SO₄ (~33000 ppm) çözeltisinde, beş tip bağlayıcı ile hazırlanmış beton numunelerinin sülfat atağına karşı direnci şişme ve kabarmanın tespit edilmesiyle ölçülmektedir. Bunlar sırasıyla portland çimentosu (OPC), yüksek curuf çimentosu (HSC), sülfata dayanıklı çimento (SRC), (OPC) ile birlikte %7 silikafüme (SF) ve (HSC) ile birlikte %7 (SF).

Sülfat atağından dolayı genişleyen beton örneklerinin permeabilitesi karşılaştırılarak, permeabilitenin rolü araştırılmıştır. Betonların göreceli performanslarının sadece permeabilite veya yalnızca bağlayıcının kimyasal direnci ile açıklanamayacağı, ancak tahmin edilebileceği sonucuna varmışlardır. Böylece hem permeabilite hem de bağlayıcının tipi sülfat atağında önemli bir rol oynamaktadır. Çeşitli bağlayıcıların, kontrollü pH ve kontrolsüz pH'lı sülfat ortamlarında, genişleme değerlerinin farklı eğilimlerde olduğunu ve pH ların etkisi şöyle belirtilmektedir:

- pH=12-12,5 arasında sadece etringit meydana gelir ve genişlemeye sebep olur.
- pH=8-11,5 arasında jips ve C-S-H ayrışması meydana gelir, bunlar da genişlemeye sebep olan yumuşamadan sorumludur.
- pH<8 ise yıkanmış kalsiyum ve kireçlenme C-S-H asıl bozulma mekanizmasıdır.

Sülfat çözeltisinin pH değerinin betondaki bozulma mekanizmasının etkilediği ve sülfat atağının betondaki genişlemesiyle ilgili bu beş tür bağlayıcının kontrollü pH=7 ve kontrolsüz pH=12'deki çözeltilere konan beton numunelerinin permeabiliteleri (geçirgenlikleri) şöyledir:

$$\text{HSC} + \text{SF} < \text{HSC} = \text{OPC} + \text{SF} < \text{SRC} < \text{OPC}$$

En az geçirgenliğe, HSC + SF çimentolu beton, HSC ve OPC + SF çimentolu betonların birbirine yakın bir geçirgenliğe sahip olduğu, daha sonra ise SRC ve en çok geçirgenliğin ise OPC çimentolu betonlarda olduğu sonucuna varmışlardır.

%5'lik Na₂SO₄ çözeltisine konan harç numuneleri, Ca(OH)₂'nin erimesi sonucunda birkaç saat içinde pH derecesi 7'den 12-12,5 'a kadar artar. Düşük C₃A ve düşük C₃S en az genişleme, yüksek C₃A ve yüksek C₃S içeriği olan çimentolar maksimum genişleme görmüşlerdir.

Tumidajki, Chan ve Philipose, 1995 "An Effective Diffusivity for Sulfate Transport into Concrete", Cement and Concrete Research, Vol:25, pp.1159-1163, çalışmasında; sülfat-klorid karışımı çözeltisinde sülfat girişinin 50 tip çimentolu betonların konsantrasyonda değişik zamanlardan beş yıla kadar sürede, düzensiz haldeki difüzyonun etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak çözeltilerde bulunan CO₂'nin sülfat difüzyon etkisini artırdığını bulmuşlardır.

Biricik ve Aköz, 2000 "Sodyum Sülfat Çözeltisinin Buğday Sapı Külü Katkılı ve Katkısız Harçlara Etkileri", Çimento ve Beton Dünyası (Cement and Concrete World), Vol.:5, No:26, çalışmasında; puzolanik özelliği deneysel olarak belirlenen buğday sapı küllü harçların sülfata karşı dayanıklılığını araştırmak için, SO₄ konsantrasyonu 10000 mg/l ve 40000 mg/l olan sodyum sülfat çözeltileri kullanmışlardır. Deneysel standart harçlarda ve çimento ağırlığının, %8, %16 ve %24 oranlarında ikameli olarak buğday sapı külü katılmış harçlarda yapılmış ve 28., 56.,90. ve 180. günlerde numuneler eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve birim ağırlık belirlenmiştir. Çözeltiler 14 gün ara ile yenilenmiş ve o günlerde ağırlıklar

ölçülmüştür. Sodyum sülfat çözeltilerinin harç özelliklerine etkileri kül oranına göre değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, her üç kül oranı için deney süresi içinde 40000 mg/l gibi yüksek konsantrasyonlarda bile Na_2SO_4 'ın yapıyı bozucu etkisi gözlenmediği, mekanik ve fiziksel özellikler bakımından etkin kül oranının %24 olduğunu belirtmişlerdir.

Al-Amoudı (1997) "Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Plain and Blended Cements Exposed to Sulfate Environments", Building and Environment, Vol.33, pp.53-61, çalışmasında; Tip I, Tip V, uçucu kül (%20), silika füme (%10) ve yüksek fırın curufu (%60 ve %70) çimentoları ile su/çimento oranı 0,50 olan beton numuneler hazırlanmış, numuneler önce 14 gün boyunca içilebilir suda kür edilmiş, sonra çıkarılıp bir gün laboratuarda hava kurusu haline geldikten sonra ağırlıkları tartılmış ve daha sonra konsantrasyonu yılda dört, beş kez ayarlanmış %2,1 SO_4 , sıcaklığı 21 ± 2 °C'deki buharlaşması minimize edecek şekilde üzeri kapatılmış plastik tanklardaki sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerinde 44 ay boyunca saklanmıştır.

Deney sonucunda, zengin magnezyum sülfatlı ortamlarda katkı çimentolu beton karışımları düz çimentolarla kıyaslandığında ileri aşamada bozulma ortaya koymuştur. Silika fümeli beton karışımlarının performansının uçucu kül ve yüksek fırın curufu betonlarından daha iyi olduğu, en kötü performansın ise yüksek fırın curufu betonlarının olduğu; tüm sülfatlı ortamlarda, sülfat atağı ve donatı korozyonu açısından, içerdiği C_3A yüzdesi %3,5-%8,5 arasında değişen normal portland çimentoların arasında önemli bir fark olmadığı; sodyum sülfatlı ortamlarda, silika füme ve yüksek fırın curufu ile yapılan katkı çimentolu betonların dayanımlarının azalması ve genişleme açısından düz çimentolardan daha iyi performans gösterdiği; 44 ay sonunda düz portland çimentolarının ağırlık kaybı yaklaşık %1 iken, katkı çimentolu betonların ağırlık kayıpların çok hızlı bir şekilde arttığı sonuçları bulunmuştur.

Brown (1981) "An Evaluation of The Sulfate Resistance of Cements in a Controlled Environment"., Cement and Concrete Research, Vol.11, pp.719-727, çalışmasında; %10 oranında C₃A içeren Tip I Portland çimentosu ile yapılan beton numuneler pH'ları 6, 10, 11, 5 olan kontrollü ve pH'ı kontrolsüz Na₂SO₄ çözeltisine ve ayrıca saf suya konulmuş, özellikle pH'ın betondaki genişleme ve dayanımları üzerindeki etkisi incelenmiş; sonuçta sülfat atağının etki hızının ve betonun maksimum dayanıma ulaşmasının pH'a güçlü bir şekilde bağlı olduğu, ancak betonun dayanım kaybı oranının ise nispeten pH'tan bağımsız olduğu belirtilmektedir. Kontrollü pH'ların sülfat atağı hızını arttırdığı ve daha kısa sürede etki ettiğini, pH'ların arttıkça ise etki şiddetinin azaldığı ve aynı etki için daha uzun süre gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Park, Suh, Lee ve Shin,1999 "Strength Deterioration of High Strength Concrete in Sülfate Environment", Cement and Concrete Research., Vol.29, pp.1397-1402., çalışmasında; normal dayanımlı portland çimentosu, yüksek dayanımlı portland çimentosu, yüksek dayanımlı silika fümeli ve %0,5, 10, 15 oranlarında silika fümeli katkı yüksek dayanımlı çimentolar ile yedi farklı çimento karışımı ile hazırlanan Φ 100*200 mm'lik 720 adet silindir beton numune 270 gün boyunca saf suda ve %10'luk sodyum ve magnezyum sülfatlı ortamlarda (pH=7) sülfat atağına maruz bırakılmış ve bunların basınç dayanımları araştırılmıştır.

Sonuçta; sodyum sülfat ve magnezyum sülfatın betonda bozulmaya yol açtığı, bununla birlikte magnezyum sülfatın etkisinin betonun basınç dayanımının azalmasında, sodyum sülfatlı ortama göre daha fazla etki yaptığını; sodyum sülfat atağında normal dayanımlı sıradan portland çimentosu basınç dayanımının daha büyük azalma eğiliminden dolayı en zayıf performans göstermiş olduğu, bu da su/çimento oranının diğerlerinden yüksek olmasıyla permeabilitesinin yüksek olmasından dolayı olabileceği belirtilmiştir.

Magnezyum sülfat atağında ise, yüksek dayanımlı silika fümeli çimentolu beton numuneleri basınç dayanımındaki azalma eğiliminden dolayı en zayıf performans göstermiştir. Yüksek dayanımlı silika fümeli beton numuneleri, sodyum sülfat

atağında en iyi performans gösterirken magnezyum sülfatta ise sülfata karşı direnci azalmış ve silika fümenin miktarının artmasıyla %10 ve %15 silika füme içeren numuneler %0 ve %5 silika füme içeren numunelerden daha az dayanıma sahip olmuştur.

Sodyum sülfat çözeltisinde, yüksek silika füme karışımı betonlarda daha az genişleme meydana gelmiş, fakat magnezyum sülfatta daha fazla genişleme meydana gelmiştir.

Brown ve Hooton, 2002 "Ettringite and Thaumasite Formation in Laboratory Concretes Prepared Using Sulfate-Resisting Cements"., Cement and Concrete Composites., çalışmasında; Tip II ve Tip V portland çimentoları ile hazırlanan su/çimento oranı 0,45 ve 0,50 olan betonlar 21 yıl gibi uzun bir süre boyunca sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerinde mikro yapıları üzerine değerlendirme analizi yapılmıştır. 21 yıl sonunda sülfatın betona nüfuz edebildiği derinlikler Tablo 2.11 'de verilmiştir.

Tablo 2.11 Sülfat atağının nüfuz ettiği derinlikler

Çimento Tipi	Su/Çimento Oranı	Sülfat Atak Ortamı	Atağın Derinliği
V	0,450	MgSO ₄	7 mm
V	0,450	Na ₂ SO ₄	22 mm
II	0,500	MgSO ₄	32 mm
II	0,500	Na ₂ SO ₄	≥37,5 mm

Buradan yaklaşık sülfat atağına maruz kalan derinliğin çimentonun tipine ve su/çimento oranına bağlı olduğu belirtilmiştir. Mg agresif reaksiyona katılmasına rağmen, her iki çimento tipi ile üretilen betonlarda sodyum sülfat çözeltisine daldırılanlar magnezyum sülfat çözeltisindeki betonlardan daha çok miktarlarda sülfat atağına maruz kaldığı belirtilmiştir.

Santhanam, Cohen ve Olek,2001 "Sulfate Attack Research-wither now?" Cement and Concrete Research, 845-851 çalışmasında; laboratuarda oluşturulan deney ortamları, kendi aralarında da fark göstermektedir. Baştan belli bir konsantrasyonda

oluşturulan sülfatlı su eriğinde SO_4 konsantrasyonu, beton numuneler ile çözelti arasında devam eden kimyasal reaksiyonlar sonucu zamanla değişir, baştaki değerler kalmaz. Buna bir çözüm olarak, numunelerin içine konulan çözeltilere, aylık periodlar gibi sürelerde müdahale edilerek, çözeltilerdeki SO_4 konsantrasyonunun devamlı baştaki değerinde sabit kalması için, çözeltilere ilaveler yapılır.

Na_2SO_4 ve H_2SO_4 'lü çözeltiler beton numunelere farklı tahribatlar yaparlar. H_2SO_4 'lü çözeltilerde SO_4 'ün yanı sıra H^+ iyonunun mevcudiyetinden dolayı asitlik tahribatıda sözkonusudur. Sodyum sülfat gibi tuz eriyiğinden ayrılmış sülfat iyonu ile sülfirik asitli bir ortamdaki sülfat tahribatının farkını gözleyebilmek amacıyla çalışmada, aynı sülfat iyonu konsantrasyonlu H_2SO_4 çözeltili sülfatlı su ortamları oluşturulmuştur.

SO_4 konsantrasyonu 8000 ppm'den büyük olan çözeltiler "yüksek SO_4 konsantrasyonlu" çözeltiler, 8000 ppm'den küçük olanlar ise "düşük SO_4 konsantrasyonlu" çözeltiler olarak sınıflandırılmaktadırlar. ACI 201.2R-77 (ACI, 1977) ve ACI 225R-85'de ise 1500 ppm - 10000 ppm arası "severe (şiddetli)" , 10000 ppm'in üstü "verysevere (çok şiddetli)" olarak tanımlanmaktadır. 8000 ppm'in, 10000 ppm'e yakın olduğunu kabul edersek, Santhanam et al.'in yaptığı "yüksek SO_4 konsantrasyonlu" tanımının ACI'ların yaptığı "çok şiddetli" tanımına yakın olduğunu söyleyebiliriz.

80000 ppm'den fazla SO_4 iyonlu "yüksek SO_4 konsantrasyonlu" çözeltilerde uzun zaman kalan betonda daha ziyade jips (alçı taşı) oluşur.

Betonda sülfat tahribatı için, çeşitli standartlarda ve çalışmalarda farklı belirleme yöntemleri mevcuttur. Bunlar,

- 1) Belirli boylardaki beton prizmaların bir veya beş sene sülfatlı ortamlarda kaldıktan sonra genişleme miktarını tespit eden boylarındaki uzamanın ölçülmesi,
- 2) Numunelerin preste kırılarak basınç mukavemetlerini ölçerek baştaki ile birkaç yıl sonundaki basınç mukavemeti kaybının belirlenmesi,

3) Numunelerde uzun zaman sonunda oluşan yüzeysel dökülmenin ve çatlak oluşumunun ölçülmesi olarak sınıflandırılabilir.

Irassar, Maio ve Batic, 1996 "Sulfate Attack on Concrete With Mineral Admixtures", Cement and Concrete Research, çalışmasında; Irassar ve Ark., Arjantin'de, ~%1 Na₂SO₄ içeren bir toprağa, Tip I ve Tip V çimento, %20, %40 ve %80 dozlarda puzolan kombinezonları ile toplam 8 farklı betondan ürettikleri bir çok 15x30 cm'lik silindirik numuneleri, yarısına kadar bu sülfatlı toprağa sokmuşlar, bu numuneleri 5 yıl burada tutmuşlar, zamanla oluşan görünüm, mukavemet, elstisite modülü özelliklerini ölçmüşlerdir. Toplam bağlayıcı dozajı ~300 kg/m³, karışım suyu, ~7 cm slump verecek miktarda 8 farklı beton üretilmiştir. Deney yapılan bölgede donma-çözülme olayı vuku bulmamakta, yılda 15-20 adet ıslanma-kuruma döngüsü oluşmaktadır. Irassar ve ark. çalışmasında, sülfat iyonunun kimyasal tahribatının yanı sıra, kapillarite ile çekilen sülfatlı sudaki moleküllerin kuruma esnasında fiziksel genişlemenin tahribatı da söz konusudur. Bu makalede bahsedilen ~%1 Na₂SO₄ içeren toprak ortamının gerçek sülfat iyonu konsantrasyonu açık olarak belirtilmemiştir. Dolayısıyla, bu ortamın tam sulu ortam ile karıştırıldığında 10000 ppm'lik sülfatlı su eriyiğinden çok daha az şiddette bir ortam olduğu anlaşılmaktadır.

Çalışmanın sonuçlarında, 8 farklı beton kombinezonunda üretilen 15x30 cm'lik beton numunelerinin tamamının hem 1 yıl, hem de 5 yıl sonunda 28 günlük mukavemetlerine göre artış olması da, bu çalışmadaki sülfatlı toprak ortamının şiddetli bir sülfat ortamı olmadığı bulgusunu belirtmektedir.

Irassar ve Ark., çalışmasında, kimyasal sülfat tahribatının yanı sıra, muhtemel fiziksel kristalleşme genişmesi tahribatı da mevcut olmasına rağmen, PÇ-32.5'a benzer olan katkısız Tip I çimento dahil, 8 farklı betondan alınan bütün numuneler, bu sülfatlı toprak ortamında 5 yıl sonunda mukavemet kazanmıştır. Bu çalışmanın önemli noktaları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Tip I çimentonun 314 kg/m³ dozlu, 7 cm slump'lı betonu, anılan sülfatlı toprakta yıl sonunda %87 mukavemet kazanmıştır. Tip I çimentolu betonun ve %20 doğal

puzolanlı Tip I çimentolu betonun 28 günlük ve 5 yıllık mukavemetleri: 24, 23; ve 45, 49 MPa olmuştur. Görüldüğü gibi, ağırlıkça %20 puzolanlı çimentolu betonun 28 günlük mukavemeti, puzolansız betonunkinden 1 MPa daha küçük iken, 5 yıl sonunda, orta şiddetli sülfatlı ortamda, puzolanlı betonun mukavemeti, sade çimentolu betonunkini %9 geçmiştir.

Irassar ve Ark., sülfatlı toprakta 5 yıl kalan beton numuneler üzerinde yaptıkları çeşitli fiziksel ve mekanik özellik deneyleri sonucu, puzolan katkıli portland çimentosu ile üretilen betonun katkısız portland çimentosu ile üretilenden daha dayanıklı olduğunu belirtmişler, çalışmalarının "sonuçlar" kısmında bunu: "Normal portland çimentosunda bağlayıcının bir kısmı yerine mineral katkı konularak üretilen betonlar, gözle inceleme, mekanik ve minerolojik özellikleri açısından, sülfatlı toprağa gömülmüş durumda, katkısız çimento ile üretilene göre daha yüksek sülfat direnci göstermiştir." diyerek belirtmişlerdir.

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Amaç

Bu çalışmanın amacı, yüksek performanslı çelik ve karbon mikrolifler ile uçucu kül katkısı kullanımıyla oluşturulan çimentolu kompozitlerin sülfata karşı dayanıklılığının incelenmesidir.

3.2 Deneysel Program

Laboratuar çalışması kapsamında hazırlanan ve Tablo 3.1, Tablo 3.1a ile Tablo 3.2'de sunulan deney programında; karışım kodları, hacimce lif oranları, uçucu kül oranları ve yapılan deneyler görülmektedir. Tablolarda **çl** kodu çelik mikrolifleri, **kl** kodu karbon mikrolifleri, **uk** kodu ise uçucu külü temsil etmektedir. Kodun önünde yer alan ilk rakamlar ise hacimce lif oranını ve uçucu kül oranlarını simgelemektedir.

Tablo 3.1 Deney Programı(lifsiz seriler)

Karışım kodu	Lif tipi	Hacimce lif oranı	Uçucu kül oranı	Deney adı	Örnek sayısı
(Olif-0uk)-kontrol	-	%0	%0	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(Olif-10uk)	-	%0	%10	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(Olif-20uk)	-	%0	%20	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(Olif-40uk)	-	%0	%40	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2

Tablo 3.1a Deney Programı(çelik lifli seriler)

Karışım kodu	Lif tipi	Hacimce lif oranı	Uçucu kül oranı	Deney adı	Örnek sayısı
(0,5çl-0uk)	çelik	%0,5	%0	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(1,0çl-0uk)	çelik	%1	%0	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(1,5çl-0uk)	çelik	%1,5	%0	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,5çl-10uk)	çelik	%0,5	%10	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(1,0çl-10uk)	çelik	%1	%10	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(1,5çl-10uk)	çelik	%1,5	%10	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,5çl-20uk)	çelik	%0,5	%20	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(1,0çl-20uk)	çelik	%1	%20	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(1,5çl-20uk)	çelik	%1,5	%20	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,5çl-40uk)	çelik	%0,5	%40	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(1,0çl-40uk)	çelik	%1	%40	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(1,5çl-40uk)	çelik	%1,5	%40	Üç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2

Tablo 3.2 Deneş Programı(karbon lifli seriler)

Karışım kodu	Lif tipi	Hacimce Lif Oranı	Uçucu kül oranı	Deneş adı	Örnek sayısı
(0,1kl-0uk)	karbon	%0,1	%0	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,3kl-0uk)	karbon	%0,3	%0	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,5kl-0uk)	karbon	%0,5	%0	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,1kl-10uk)	karbon	%0,1	%10	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,3kl-10uk)	karbon	%0,3	%10	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,5kl-10uk)	karbon	%0,5	%10	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,1kl-20uk)	karbon	%0,1	%20	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,3kl-20uk)	karbon	%0,3	%20	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,5kl-20uk)	karbon	%0,5	%20	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,1kl-40uk)	karbon	%0,1	%40	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,3kl-40uk)	karbon	%0,3	%40	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2
(0,5kl-40uk)	karbon	%0,5	%40	Uç noktalı eğilme	3
				Eğilme sonrası basınç	6
				Boy ölçüm	2

3.3 Kullanılan Malzemeler

3.3.1 Çimento

Bu çalışmada TS EN 197-1 (2002) ile uyumlu normal Portland çimentosu olarak bilinen CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. CEM I 42,5 R çimentosuna ait kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.3 'de gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

KİMYASAL KOMPOZİSYON(%)			
Bileşen Adı	Çimento	Çimentonun Fiziksel Özellikleri	Çimentonun Basınç Dayanımı (MPa)
SiO ₂	19.3		
Al ₂ O ₃	5.57		
Fe ₂ O ₃	3.46		
CaO	63.56		
MgO	0.86	Özgül ağırlık: 3.15	2 gün: 27.2
Na ₂ O	0.13	Priz başlangıcı (dak): 119	7 gün: 42.4
K ₂ O	0.80	Priz sonu (dak): 210	28 gün: 52.7
SO ₃	2.91	Hacim genleşmesi (mm): 1.00	
Cl	0.013		
C ₃ S	61.4	Çimento Özgül Yüzeyi (Blaine)	352 (m²/kg)
C ₂ S	5.54		
C ₃ A	8.91		
C ₄ AF	10.53		
Kızdırma Kaybı	2.78		
Çözünmez Kalıntı	0.42		
Serbest CaO (%)	1.22		

3.3.2 Uçucu Kül

Deneyisel çalışmada kullanılan Soma Termik Santraline ait C sınıfı uçucu külün kimyasal özellikleri Tablo 3.4 'de verilmiştir. Uçucu külün özgül ağırlığı 2,31 , Blaine özgül yüzeyi ise 2900 cm²/gr 'dır.

Tablo 3.4 C sınıfı uçucu külün kimyasal özellikleri

Oksit	Uçucu Kül(%)	TS EN 450 Sınırları	ASTM C 618 Sınırları	
			F	C
SiO ₂	42,10			
Al ₂ O ₃	19,40			
Fe ₂ O ₃	4.6			
S+A+F	80,66		>70,00	>50,00
CaO	27,0			
MgO	1,80			
SO ₃	2,40	<3,00	<5,00	<5,00
K ₂ O	1,10			
Na ₂ O	-			
K.K	3,35	<5,00	<12,00	<6,00
Cl-	0,003	<0,10		
S.CaO	0,10	<1,00		
Nem	0,07		<3,00	<3,00

3.3.3 Akışkanlaştırıcı Katkı

Bu çalışmada YKS marka Glenium ACE 30 süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkının üretici firmadan temin edilen teknik özellikleri Tablo 3.5 'de verilmiştir.

Tablo 3.5 Kimyasal katkının teknik özellikleri

Yoğunluk (gr/cm³)	1,06-1,07
Klor (%)	< 0,1
Renk	Kahverengi
Homojenlik	Homojen
Kimyasal İçeriği	Sentetik polimer esaslı
Katı Madde (%)	30

3.3.4 Su

Karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

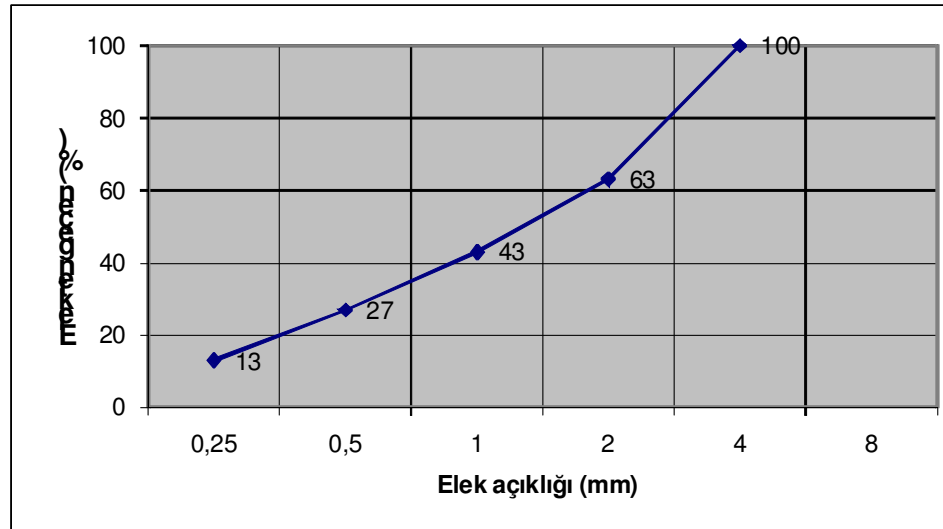
3.3.5 Agreg

0-5 mm tane aralığındaki kalker kökenli kırma kum 4 mm'lik elekten elenerek 4mm'nin altında kalan kısmı kullanılmıştır.

Kırma kumun, elek analizi ve fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 3.6 ve 3.7 'de, granülometri eğrisi ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.6 0-4 kırma kumun elek analizi

Elek Açıklığı (mm)	Kümülatif Elekten Geçen (%)
4	100
2	63
1	43
0,5	27
0,25	13
Elek Altı	-



Şekil 3.1 Granülometri Eğrisi

Tablo 3.7 Kullanılan kırma kumun fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Kuru Özgül Ağırlık	2,62
KYD Özgül Ağırlık	2,65
Su Emme Kapasitesi (%)	1,22
Gevşek B.H.A (kg/m ³)	1693
Sıkışık B.H.A (kg/m ³)	1746

3.3.6 Mikrolifler

Deneylerde kullanılan çelik ve karbon mikroliflerin üretici firmalarından temin edilen teknik özellikleri Tablo 3.8 'de verilmiştir.

Tablo 3.8 Deneyde kullanılan liflerin teknik özellikleri

Özellik/Lif Tipi	Karbon	Çelik
Çekme Dayanımı(MPa)	3800	2200
Özgül ağırlık	1,81	7,85
Lif Çapı (µm)	7,2	80
Karbon içeriği (%)	95	-
Lif uzunluğu (mm)	6	6

3.4 Deneyler

Deneyisel çalışma için farklı karışım oranlarında toplam 28 grup harç numunesi hazırlanmıştır. Tablo 3.1, Tablo 3.1a ve Tablo 3.2 'de verildiği gibi bir seri lifsiz ve uçucu külsüz kontrol karışımı, üç seri lifsiz ancak %10, %20 ve %40 uçucu kül içeren karışımlardır. Ayrıca üç farklı çelik lif oranında (%0,5, %1,0, %1,5) ve dört farklı uçucu kül oranında (%0, %10, %20, %40) 12 seri; benzer şekilde üç farklı karbon lif oranında (%0,1, %0,3, %0,5) ve dört farklı uçucu kül oranında (%0, %10, %20, %40) 12 seri karışım bulunmaktadır.

3.4.1 Harç Karışım Oranları

Deneyisel çalışmada hazırlanan tüm harç karışımları için bağlayıcı (çimento + kül) miktarı birim metreküp için 560 kg 'dır. Su/bağlayıcı oranı sabit olup, 0,5'dir. Örneklerin üretilmesi için kullanılacak kırma kum 0-4 mm olarak ayarlanmış, ayrıca taze harcın işlenebilirliğini düzenlemek amacıyla, akışkanlaştırıcı katkı %1,5 çelik lif katkılı harcın kolay yerleşmemesi nedeniyle bağlayıcı miktarının %1'i oranında kullanılmıştır.

Bir metreküp harç içinde bulunan ağırlıkça malzeme miktarları Tablo 3.9 ve 3.10 'da verilmiştir.

Tablo 3.9 Çelik lif katkı harç karışım miktarları (1m³)

Seriler	UK(kg)	ÇL(kg)	Çimento(kg)	Kum(kg) (kuru)	Su(kg)	K.Katkı (kg)
(0çl-0uk)-kontrol	0	0	590	1330	295	-
(0,5çl-0uk)	0	39	590	1317	295	-
(1,0çl-0uk)	0	77	590	1304	295	-
(1,5çl-0uk)	0	116	590	1292	295	5,9
(0çl-10uk)	59	0	531	1330	295	-
(0,5çl-10uk)	59	39	531	1317	295	-
(1,0çl-10uk)	59	77	531	1304	295	-
(1,5çl-10uk)	59	116	531	1292	295	5,9
(0çl-20uk)	118	0	472	1330	295	-
(0,5çl-20uk)	118	39	472	1317	295	-
(1,0çl-20uk)	118	77	472	1304	295	-
(1,5çl-20uk)	118	116	472	1292	295	5,9
(0çl-40uk)	236	0	354	1330	295	-
(0,5çl-40uk)	236	39	354	1317	295	-
(1,0çl-40uk)	236	77	354	1304	295	-
(1,5çl-40uk)	236	116	354	1292	295	5,9

Tablo 3.10 Karbon lif katkı harç karışım miktarları(1m³)

Sıra No	UK(kg)	KL(kg)	Çimento(kg)	Kum(kg) (kum)	Su(kg)
(0kl-0uk)-kontrol	0	0	590	1330	295
(0,1kl-0uk)	0	1,79	590	1328	295
(0,3kl-0uk)	0	5,37	590	1322	295
(0,5kl-0uk)	0	8,96	590	1317	295
(0kl-10uk)	59	0	531	1330	295
(0,1kl-10uk)	59	1,79	531	1328	295
(0,3kl-10uk)	59	5,37	531	1322	295
(0,5kl-10uk)	59	8,96	531	1317	295
(0kl-20uk)	118	0	472	1330	295
(0,1kl-20uk)	118	1,79	472	1328	295
(0,3kl-20uk)	118	5,37	472	1322	295
(0,5kl-20uk)	118	8,96	472	1317	295
(0kl-40uk)	236	0	354	1330	295
(0,1kl-40uk)	236	1,79	354	1328	295
(0,3kl-40uk)	236	5,37	354	1322	295
(0,5kl-40uk)	236	8,96	354	1317	295

3.4.2 Örneklerin Hazırlanması

Taze harç örneklerinin üretilmesi sırasında aşağıda belirtilen esaslara uyulmuş ve her karışım serisi için aynı hassasiyet gösterilmiştir.

Çimento, uçucu kül, kırma kum ve su deney öncesinde 1 g hassasiyetli terazide tartılarak hazırlanmıştır. Kimyasal katkı ve mikroliflerin tartılabilmesi için 0,001 g hassasiyetli terazi kullanılmıştır.

Çimento ve kırma kum öncelikle plastik torbada, daha sonra da Hobart marka mikserde karıştırılmıştır. Mikser çalışır konumdayken su ve kimyasal katkı eklenmiştir. Bu karışım 30 saniye boyunca mikser içinde döndükten sonra mikrolifler ilave edilmiştir. Homojen bir dağılım elde edilebilmesi için liflerin yavaşça eklenmesine özen gösterilmiştir. Özellikle yapışık halde bulunan karbon lifler küçük küçük parçalara bölünerek konulmuştur. Topaklaşmanın engellenmesi için karışım gözle kontrol edilmiş ve homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir.

Üretilen harç önceden yağ sürülmüş, üst çapı 70 mm ve alt çapı 100 mm olan kesik koni içine iki kademe ve 25'er kez tokmaktama vasıtasıyla sıkıştırma işlemi uygulanarak yerleştirilmiş ve kalıbın üst yüzeyi mala ile temizlenip düzeltilmiştir. Kalıp çekilip alındıktan sonra deney aletinin kolu 3 saniyede 5 kez çevrilmiştir. Ardından harç tabla üzerine yayıldıktan sonra birbirine dik olan iki çap değeri ölçülerek ortalaması alınmıştır. Taze harç numunelerinin yayılma çapları ile ilgili elde edilen deney sonuçları taze harç deney sonuçları bölümünde verilmiştir.

Yayılma çapının kaydedilmesinden sonra, karışım önceden yağlanarak hazırlanan 40x40x160 mm boyutlu prizma kalıpların yarısını doldurulacak şekilde kalıplara yerleştirilmiş ve bir tokmak vasıtasıyla sıkıştırılmıştır. Bu işlemin ardından kalıplar sarsma tablasına yerleştirilerek, harçlara 30 saniye boyunca sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır. Tablalı vibratörden alınan kalıpların diğer yarısı da harçla doldurulmuş ve tekrar tokmaklanarak sarsma tablasına yerleştirilmiştir. Harçların her

kademede 20 tokmak darbesiyle sıkıştırılmasına özen gösterilmiştir. Her bir karışım için 9'ar adet prizmatik örnek alınmıştır.

24 saat sonra kalıplarından çıkarılan örneklerden aynı tiptekilerin 3 adet prizmatik örneğine, 28 gün boyunca standart su kürü uygulanmıştır; 3 adedi ayrı bir yerde 150 gün boyunca standart su kürüne, geriye kalan 3 adedi de 150 gün boyunca 100000 ppm'lik sülfatlı(Na_2SO_4) su kürüne bırakılmıştır. ASTM C1012 'de 50000 ppm olarak belirlenen standart sülfat konsantrasyonu, deney çalışmam da etkiyi hızlandırma amaçlı 100000 ppm kullanılmıştır. Çözelti hazırlanırken saf su kullanılmıştır. Sülfatlı suya konulan numunelerin arasına çubuklar yerleştirilerek, sülfatın numunenin heryerine aynı şekilde nüfuz etmesi sağlanmıştır. Ayrıca sülfatlı suyun başlangıç pH'ı 8,5 olup, her 15 günde bir pH ölçümü yapılarak 1-2 kapak sülfirik asit eklenmesi yolu ile bu değerinde sabitlenmesi sağlanmıştır. 28 ve 150 gün sonunda örnekler üç noktalı eğilme deneyine ve eğilme sonrası basınç deneyine tabi tutulmuşlardır.

Ayrıca her set için hazırlanan karışımlar boy ölçümlerinin yapılması için, 25x25x285 mm boyutlu önceden pimleri yerleştirilmiş ve yağlanmış kalıplara, pimlerin altını iyice doldurmak suretiyle kalıbın yarısını dolduracak şekilde yerleştirilmiş ve sarsma tablasına yerleştirilerek, sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır. Tablalı vibratörden alınan kalıpların diğer yarısı da harçla doldurulmuş ve tekrar sarsma tablasına yerleştirilmiştir. Her bir set için 2'şer adet prizmatik örnek alınmıştır. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan örnekler bir hafta suda bekletildikten sonra, 100000 ppm'lik sülfatlı(Na_2SO_4) suya konulmuştur. Sülfatın numunelerin her yerine aynı şekilde nüfuz edebilmesi için, numunelerin arasına çubuklar yerleştirilmiştir. Ayrıca sülfatlı suyun başlangıç pH'ı 8,5 olup, her 15 günde bir pH ölçümü yapılarak 1-2 kapak sülfirik asit eklenmesi yolu ile bu değerinde sabitlenmesi sağlanmıştır.

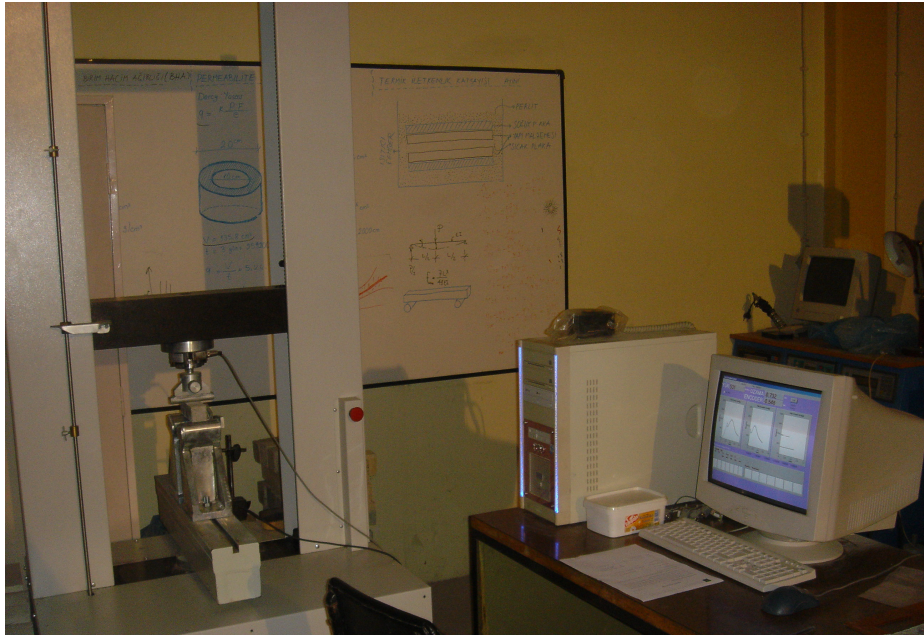
3.4.3 Sertleşmiş Harç Deneyleri

Sertleşmiş prizmatik harç örneklerine (40x40x160mm) üç noktalı eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri uygulanmıştır. Harç çubuklarında ise (25x25x285 mm) boy değişimleri ölçülmüştür. Bu deneyler ile ilgili detaylar aşağıda verilmiştir.

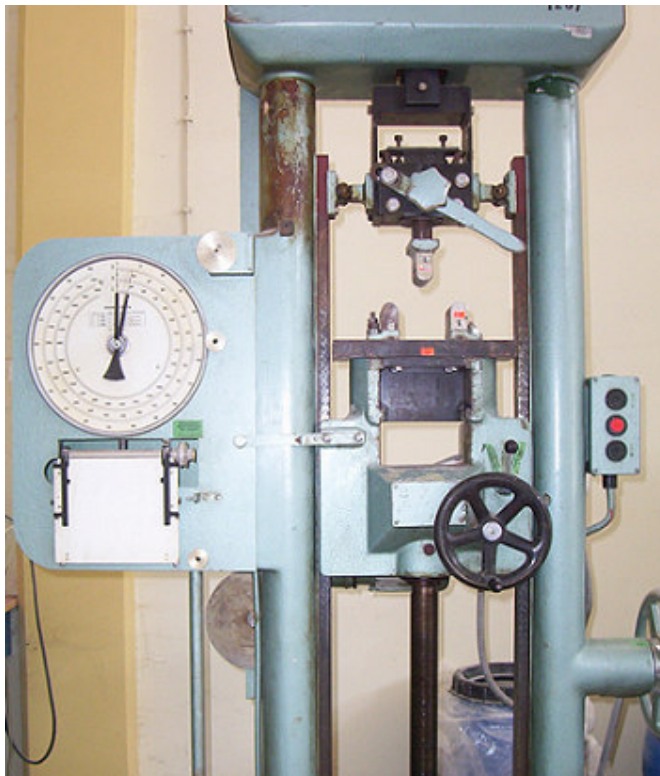
3.4.3.1 Eğilme Deneyi

Örneklerin eğilme dayanımları 130 mm mesnet açıklığında 3 noktalı eğilme deneyi ile belirlenmiştir. Eğilme deneyinde 2 farklı cihaz kullanılmıştır. Bu cihazlar deplasman kontrollü ve yük kontrollüdür. Deplasman kontrollü cihazla her farklı uçucu kül oranında lifsiz ve en fazla hacimdeki lifli örnekler için (çelik lif için %1,5, karbon lif için %0,5 lif hacimlerinde) üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Sistemde yük değerleri 5 ton kapasiteli yük hücresi ile, deplasman değerleri ise 1µm ölçüm hassasiyetine sahip Heidenhain marka optik encoder kullanılarak bilgisayar sistemine eş zamanlı olarak kaydedilerek, üç noktalı eğilme deneyinde yük-orta nokta deplasmanı grafikleri elde edilmiştir. Yük ve deplasman verileri için veri toplama frekansı 5 Hz'dir. Her bir numune için yük-orta nokta deplasman grafikleri 1,5 mm orta nokta deplasmanına kadar eş zamanlı olacak şekilde elde edilmiştir. Tokluk değerleri elde edilirken lifsiz örneklerde, yük tamamen sıfıra inene kadar ve lifli örneklerde yük-deplasman eğrisi grafiğinin 1,5 mm orta nokta deplasmanına kadar olan alan hesaplanmıştır. Tüm örneklerin yük-sehim grafikleri zaman kısıtı nedeniyle çıkartılamamıştır. Diğer örneklerde ise (lif hacmi çelik lifli numunelerde %0,5 ve %1 ; karbon lifli numunelerde %0,1 ve %0,3) eğilme dayanımları 1 ton kapasiteli, yük kontrollü 1946 model Rauensteinin markalı hidrolik basınç presisi ile mesnet açıklığı 130 mm'ye sabitlenerek belirlenmiştir.

Şekil 3.2 'de deplasman kontrollü , Şekil 3.3 'de ise yük kontrollü eğilme deneyinin yapıları yer almaktadır.



Şekil 3.2 Eğilme deneyinin yapılışı-1 (deplasman kontrollü)



Şekil 3.3 Eğilme deneyinin yapılışı-2 (yük kontrollü)

3.4.3.2 Eğilme Sonrası Basınç Deneyi

40x40x160 mm boyutlarındaki örnekler üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulduktan sonra, elde edilen parçalara döküm yönüne dik olacak şekilde basınç deneyi uygulanmıştır. Basınç dayanımlarının tespiti için ELE Autotest 3000 modelinde 3000kN kapasiteli dijital göstergeli hidrolik pres kullanılmıştır. Deneye tabi olan tüm kesit alanı için yükleme hızı 240 kg/sn'dir. Şekil 3.4'de eğilme sonrası basınç deneyinin yapılışı görülmektedir.



Şekil 3.4 Eğilme sonrası basınç deneyinin yapılıması

3.4.3.3 Boy Değişimi Ölçümleri

Deneyisel çalışma kapsamında, 25x25x285 mm ayrıtlarındaki harç çubuğu örneklerinin boy değişimleri 14 hafta (98 gün) boyunca haftada bir ELE marka 0,002 mm hassasiyetli komparatör ile ölçülmüştür. Sülfatın etkisinin boyutunun anlaşılabilmesi için dökümden bir gün sonra kalıptan çıkarılan numuneler 1 hafta

suda bırakıldıktan sonra, sülfatlı (100000 ppm) suya konulmuştur. Şekil 3.5’de boy değişimi deneyinin yapıldığı düzenek görülmektedir.



Şekil 3.5 Boy değişimi ölçümünde kullanılan düzenek

3.5 Deney Sonuçları

Taze ve sertleşmiş harç deneylerinden elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

3.5.1 Taze Harç Deney Sonuçları

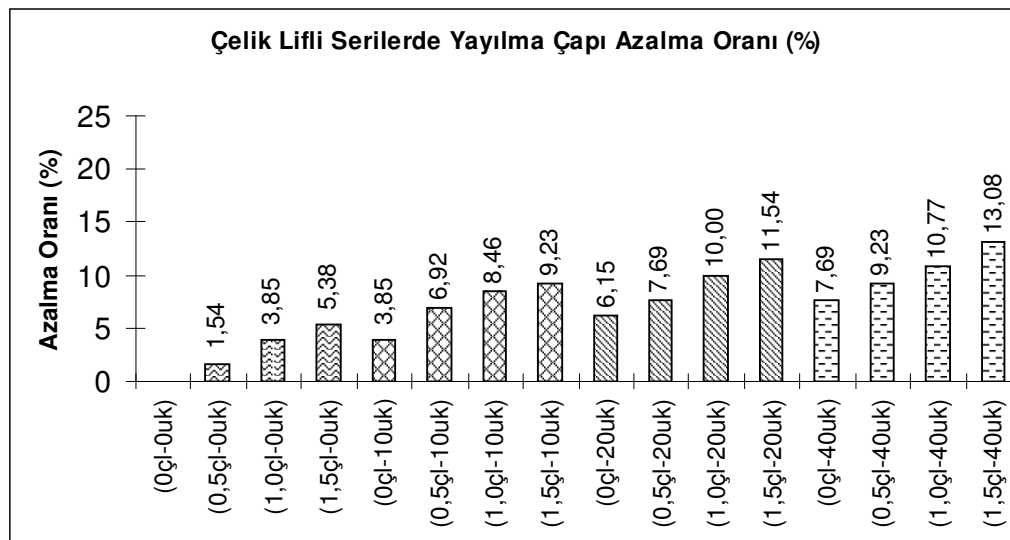
Taze harç numuneleri üzerinde uygulanan yayılma çapı deneyi sonuçları Tablo 3.11’de görülmektedir.

Tablo 3.11 Yayılma çapı(mm)

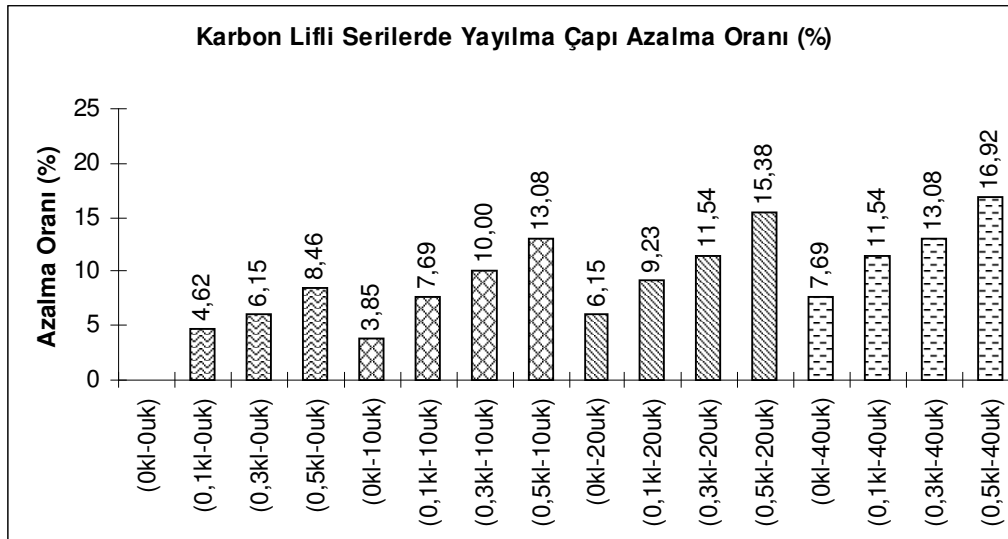
Seriler	Karışım kodu	Yayılma çapı(mm)
Lifsiz	(0lif-0uk)-kontrol	130
	(0lif-10uk)	125
	(0lif-20uk)	122
	(0lif-40uk)	120
Çelik Lifli	(0,5çl-0uk)	128
	(1,0çl-0uk)	125
	(1,5çl-0uk)	123
	(0,5çl-10uk)	121
	(1,0çl-10uk)	119
	(1,5çl-10uk)	118
	(0,5çl-20uk)	120
	(1,0çl-20uk)	117
	(1,5çl-20uk)	115
	(0,5çl-40uk)	118
	(1,0çl-40uk)	116
	(1,5çl-40uk)	113
Karbon Lifli	(0,1kl-0uk)	124
	(0,3kl-0uk)	122
	(0,5kl-0uk)	119
	(0,1kl-10uk)	120
	(0,3kl-10uk)	117
	(0,5kl-10uk)	113
	(0,1kl-20uk)	118
	(0,3kl-20uk)	115
	(0,5kl-20uk)	110
	(0,1kl-40uk)	115
	(0,3kl-40uk)	113
	(0,5kl-40uk)	108

Mikrolif kullanılmayan kontrol serisi harçlarda elde edilen yayılma çapı 130 mm'dir. Tablo 3.11'den de görüldüğü gibi hacimce mikrolif oranının artırılması sonucu beklendiği üzere harçların yayılma çaplarında düşüşler olmaktadır. Aynı zamanda uçucu kül oranının artması ile de harçların yayılma çaplarında düşüşler görülmektedir. İçerisinde uçucu kül olmayan, %0,5 çelik lif hacimli harç numunesi için yayılma çapı 128 mm iken, %1,5 çelik lif hacmi için 123 mm'ye düşmektedir. İçerisinde çelik lif olmayan, %10 uçucu kül oranı için yayılma çapı 125 mm iken, %40 uçucu kül oranı için 120 mm'ye düşmektedir. Karbon lifli seriler yayılma çapı açısından daha kötü performans göstermiştir. Uçucu külsüz %0,1 karbon lif hacmi için yayılma çapı 124 mm iken, %0,5 lif hacmi için 119 mm'ye düşmektedir.

Çelik lifli ve karbon lifli serilerde meydana gelen yayılma çapındaki azalma oranları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de sunulmaktadır. Yayılma çapı açısından karbon mikroliflerin gösterdiği düşük performans, kayıp oranları incelendiğinde daha belirgin olarak görülmektedir. Karbon lifli serilerde %0,5 lif hacminde, %40 uçucukül oranındaki harç numunesinde, %17’lere varan yayılma çapı kaybı görülmektedir. Çelik mikrolifli serilerde ise kayıp oranı, daha düşüktür. Çelik mikrolifli serilerde en yüksek kayıp %1,5 lif hacmi, %40 uçucukül oranında %13 olarak gözlenmiştir.



Şekil 3.6 Çelik lifli serilerde yayılma çapının kontrol karışımına göre azalma oranı



Şekil 3.7 Karbon lifli serilerde yayılma çapının kontrol karışımına göre azalma oranı

3.5.2 Mekanik Deney Sonuçları

Sertleşmiş harç numuneleri üzerine uygulanan serbest basınç ve eğilme deneyleri sonucu elde edilen basınç ve eğilme dayanımı, boy ölçüm değerleri ve tokluk değeri bu bölümde sunulmaktadır.

3.5.2.1 Eğilme Sonrası Basınç Dayanımları

28 gün suda, 150 gün suda ve 150 gün sülfatlı suda bekleyen çelik lifli sertleşmiş harç numunelerinin eğilme sonrası basınç deneyi sonucu elde edilen basınç dayanımları Tablo 3.12’de sunulmaktadır. Eğilme sonrası basınç dayanımları her bir seri için 6 adet parça üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu örneklerin herbirinden elde edilen çelik lifli numunelerin deney sonuçları ekler bölümünde Tablo Ek A-1, Tablo Ek A-2, Tablo Ek A-3’de; karbon lifli numunelerin deney sonuçları Tablo Ek A-4, Tablo Ek A-5, Tablo Ek A-6 ‘da verilmiştir.

Tablo 3.12 Çelik lifli serilerin eğilme sonrası basınç dayanımı sonuçları

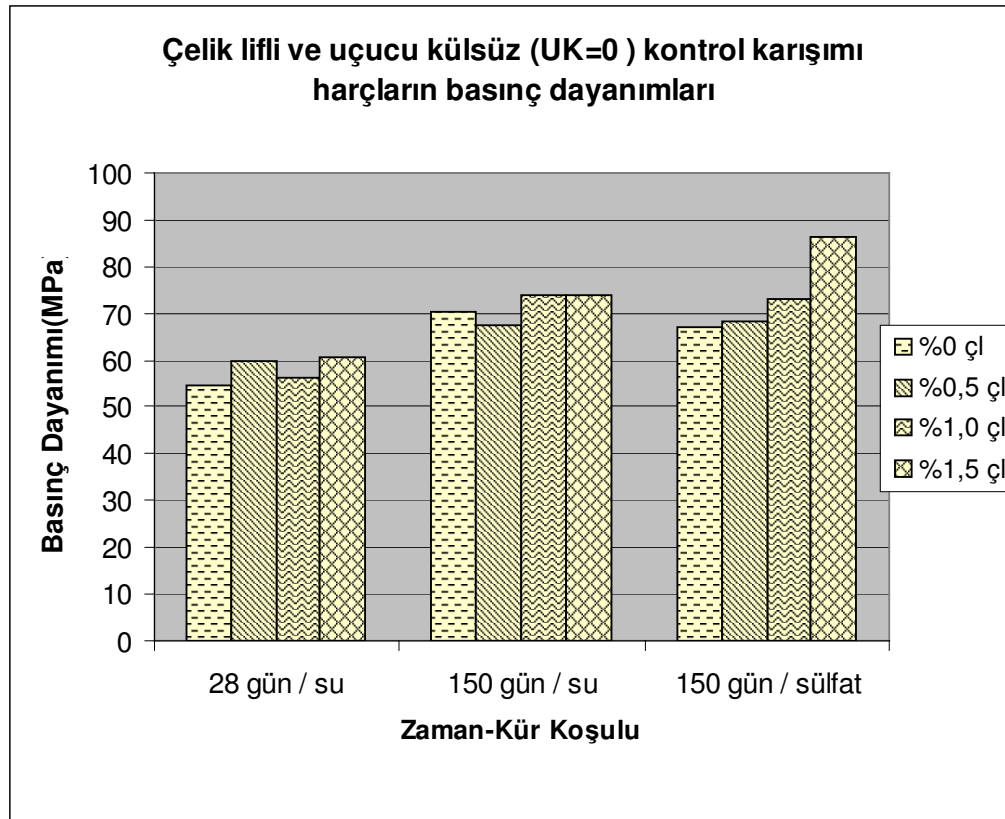
Uçucu kül(%)	Çelik lif(%)	Basınç Dayanımı(MPa)		
		28 gün / suda	150 gün / suda	150 gün / sülfatta
0	0	54,7	70,4	67,1
	0,5	60,0	67,7	68,3
	1	56,1	73,9	73,0
	1,5	60,7	74,1	86,4
10	0	53,1	65,7	64,5
	0,5	54,0	69,4	69,2
	1	54,9	75,8	68,7
	1,5	57,1	76,1	86,2
20	0	38,8	49,8	58,7
	0,5	43,3	60,7	57,8
	1	49,1	74,6	69,7
	1,5	50,1	74,8	82,7
40	0	28,0	54,0	54,7
	0,5	32,6	54,7	54,9
	1	38,7	55,3	61,8
	1,5	38,9	56,0	69,7

Tablo 3.12'den görüleceği üzere 28 gün suda bekleyen, uçucu külsüz ve uçucu küllü harç örneklerinde çelik lif katkısı ile basınç dayanımında artış sağlandığı saptanmıştır. 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları beklenildiği gibi, 28 gün suda bekleyen numunelere göre artmıştır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 150 gün suda bekleyen numunelere göre %40 uçucu kül ilavesi ile artış göstermiş, diğer uçucu kül oranlarında dalgalanmalara (artış ve azalmalar) uğramıştır.

Basınç dayanımı açısından en başarılı sonuç; 150 gün sülfatlı suda bekleyen külsüz %1,5 çelik lif hacimli numunedir. Her uçucu kül oranı için de yine %1,5 çelik lif hacimli 150 gün sülfatlı suda bekletilmiş numune en yüksek basınç dayanımına sahiptir.

Tüm zaman ve kür koşullarında çelik lifli serilerde lif içermeyen harca göre daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir.

Aynı ilişkiler %0, %10, %20, %40 uçucu kül katkılı harçlar için ayrı olarak Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de verilmişlerdir.

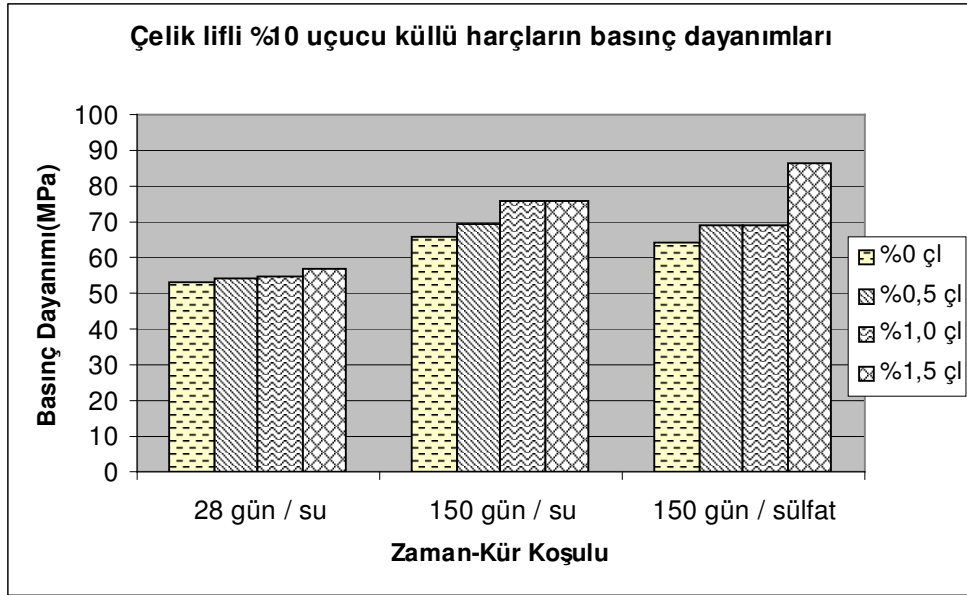


Şekil 3.8 Çelik lifli ve uçucu külsüz (UK=0) kontrol karışımı harçların basınç dayanımları

Uçucu külsüz (uk=0) karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde çelik lif katılmasıyla basınç dayanımı lif içermeyen numuneye göre artış göstermiştir. Lif ve uçucu kül içermeyen numunenin basınç dayanımı 54,7 MPa olup, %0,5 ve %1,5 lif hacmi içeren numunelerin basınç dayanımları birbirine yakın ve 60,0 MPa civarındadır. 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 28 gün suda bekleyen numunelere göre artış göstermiştir. Lif ve uçucu kül içermeyen numunenin basınç dayanımı 70,4 MPa olup, %1 ve %1,5 lif hacmi içeren numunenin basınç dayanımları birbirine yakın ve 74,0 MPa civarındadır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 150 gün suda bekleyen numunelere göre %1,5 lif hacmi içeren numunede artış, lifsiz ve %1 lif hacmi içeren numunede azalma

göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 67,1 MPa olup, %1,5 lif hacmi içeren numunenin basınç dayanımı 86,4 MPa 'dır.

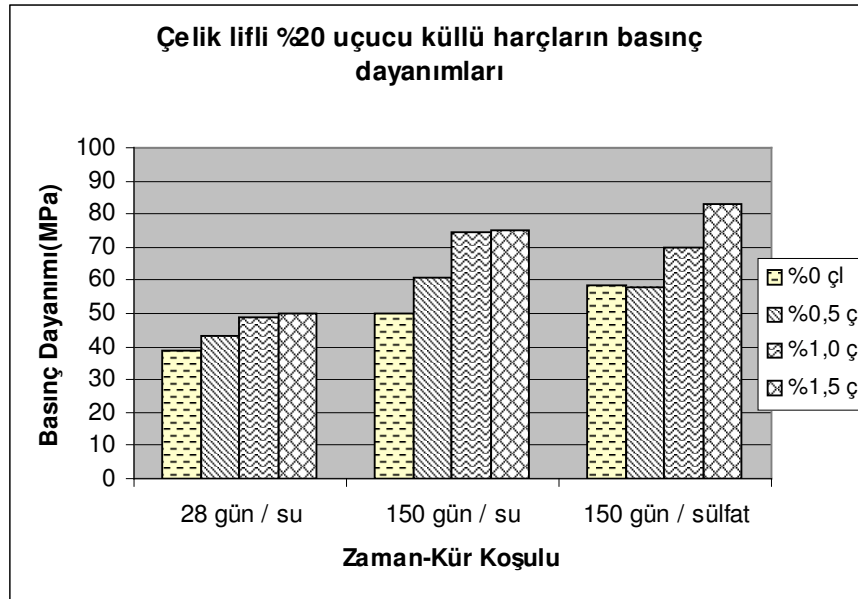
Bu bulgulara dayanarak, uçucu külsüz ($uk=0$) karışımlarda en yüksek basınç dayanımı %1,5 lif hacmi içeren,150 gün sülfatlı suda bekleyen numunenin olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.9 Çelik lifli %10 uçucu küllü harçların basınç dayanımları

%10 uçucu küllü karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde çelik lif katılmasıyla basınç dayanımı lif içermeyen numuneye göre çok fazla etki yapmamıştır. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 53,1 MPa'dır. 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 28 gün suda bekleyen numunelere göre artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 65,7 MPa olup, en fazla dayanım gösteren %1 ve %1,5 lif hacimli numunelerin dayanımları 76,0 MPa civarındadır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 150 gün suda bekleyen numunelere göre %0,5 lif hacimli de etkisi olmayıp, %1 lif hacminde azalma, %1,5 lif hacminde ise artış göstermektedir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 64,5 MPa olup, %1,5 lif hacimli numunede 86,2 MPa'dır.

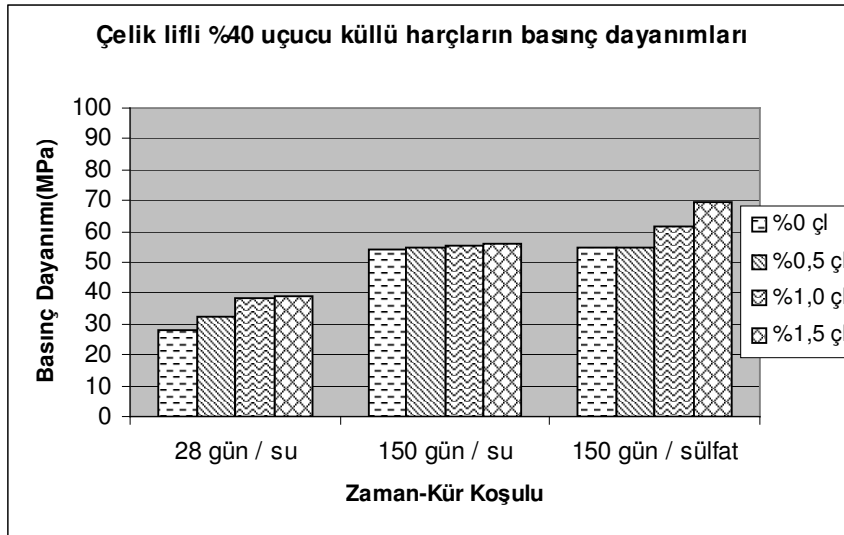
Bu bulgulara dayanarak, %10 uçucu kül olan karışımlarda en yüksek basınç dayanımı %1,5 lif hacmi içeren,150 gün sülfatlı suda bekleyen numunenin olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.10 Çelik lifli %20 uçucu küllü harçların basınç dayanımları

%20 uçucu küllü karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde çelik lif katılmasıyla basınç dayanımı lif içermeyen numuneye göre artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 38,8 MPa olup, %1 ve %1,5 lif hacmi içeren numunelerde basınç dayanımları birbirine yakın ve 49,0 MPa civarındadır. 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 28 gün suda bekleyen numunelere göre artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 49,8 MPa olup, %1 ve %1,5 lif hacmi içeren numunelerin basınç dayanımları birbirine yakın ve 74,5 MPa 'dır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 150 gün suda bekleyen numunelere göre lifsiz ve %1,5 lif hacmi içeren numunelerde artış, %0,5 ve %1 lif hacmi içeren numunelerde azalma göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 58,7 MPa olup, %1,5 lif hacimli numunede 82,7 MPa'dır.

Bu bulgulara dayanarak, %20 uçucu kül olan karışımlarda en yüksek basınç dayanımı %1,5 lif hacmi içeren,150 gün sülfatlı suda bekleyen numunenin olduğu saptanmıştır.

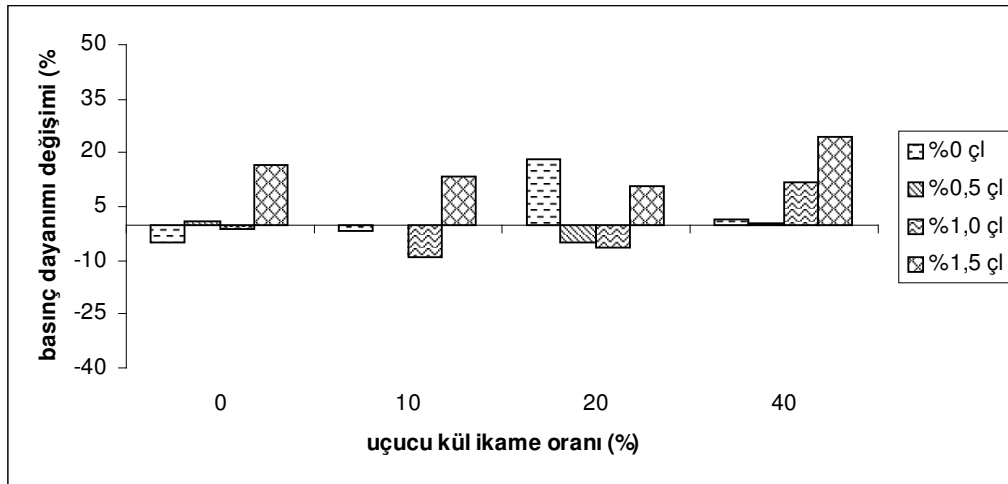


Şekil 3.11 Çelik lifli %40 uçucu küllü harçların basınç dayanımları

%40 uçucu küllü karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde çelik lif katılmasıyla basınç dayanımı lif içermeyen numuneye göre artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 28,0 MPa olup, %1 ve %1,5 lif hacmi içeren numunelerin basınç dayanımları birbirine yakın ve 39,0 MPa civarındadır. 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 28 gün suda bekleyen numunelere göre artış vardır. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 54,0 MPa olup, %0,5 %1,0 ve %1,5 lif hacmi içeren numunelerde basınç dayanımları birbirine yakın ve 56,0 MPa civarındadır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 150 gün suda bekleyen numunelere göre artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 54,7 MPa olup, %1,5 lif hacmi içeren numunede 70 MPa civarındadır.

Bu bulgulara dayanarak, %40 uçucu kül olan karışımlarda en yüksek basınç dayanımı %1,5 lif hacmi içeren, 150 gün sülfatlı suda bekleyen numunenin olduğu saptanmıştır.

Şekil 3.12'den görüleceği üzere sülfatta 150 gün bekleyen numunelerin 150 gün suda bekleyen numunelere kıyasla uçucu külsüz-lif hacmi %0,5 ve %1,5 olan numunelerde, %10 uçucu küllü-lif hacmi %1,5 olan numunede, %20 uçucu küllü-lifsiz ve %1,5 lif hacimli numunede, %40 uçucu küllü-lifsiz ve %1 ve %1,5 lif hacimli numunede artış olduğu; %10 uçucu küllü-%0,5 lif hacminde ve %40 uçucu küllü-%0,5 lif hacminde değişiklik olmadığı; diğer numunelerde azalma olduğu saptanmıştır. En fazla basınç dayanımı artışı %24 ile gösteren %40 uçucu küllü, %1,5 çelik lif hacimli numune; en fazla azalış ise %10 uçucu küllü, %1 çelik lif hacimli numune olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.12 Sülfatta 150 gün bekletilen çelik lifli örneklerin, suda 150 gün bekletilen çelik lifli örneklere kıyasla basınç dayanımı değişimi (%)

Genel olarak sodyum sülfatın, uçucu külün puzolanik aktivitesine olumlu etki yaparak su içinde bekletilen örneklerin basınç dayanımlarından daha yüksek değerler vermesine katkı sağladığı söylenebilir. "Lorenzo ve diğer (2003) ve Yazıcı ve diğer (2003) tarafından ifade edildiği gibi, özellikle yüksek oranda uçucu kül içeren örneklerin eğilme dayanımlarının yapay deniz suyu ile arttığı görülmektedir. Bu durum klorür, sülfat ve sodyum iyonlarının uçucu külün puzolanik reaksiyonunu aktive etmesiyle açıklanmaktadır."

Karbon lifli serilerin eğilme sonrası basınç dayanımları Tablo 3.13 'de verilmiştir.

Tablo 3.13 Karbon lifli serilerin eğilme sonrası basınç dayanımı sonuçları

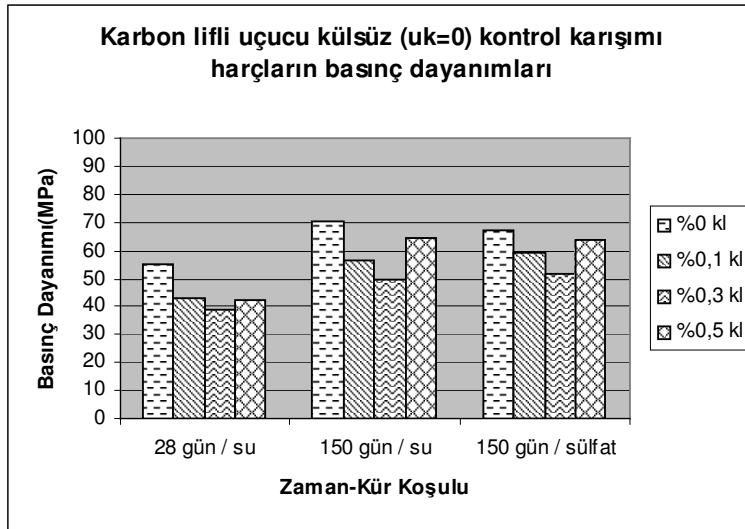
Uçucu kül(%)	Karbon lif(%)	Basınç Dayanımı(Mpa)		
		28 gün / suda	150 gün / suda	150 gün / sülfatta
0	0	54,7	70,4	67,1
	0,1	42,7	56,2	59,0
	0,3	38,9	49,5	51,5
	0,5	42,2	64,7	63,5
10	0	53,1	65,7	64,5
	0,1	39,5	51,2	56,2
	0,3	38,9	52,6	58,7
	0,5	41,8	57,3	53,8
20	0	38,8	49,8	58,7
	0,1	35,6	52,6	55,3
	0,3	50,3	56,4	61,4
	0,5	52,1	64,5	69,0
40	0	28,0	54,0	54,7
	0,1	40,5	51,4	45,7
	0,3	42,9	55,1	46,4
	0,5	42,3	57,2	56,5

Tablo 3.13'den görüleceği üzere karbon lif eklenmesi ile 28 gün suda bekleyen numunelerde basınç dayanımı lifsizlere göre %0 ve %10 uçucu küllüde azalmıştır. %20 uçucu kül eklenmesi ile lifsiz ve %0,1 lif hacimli numunelerde kontrol numunelere göre azalma, %0,3 ve %0,5 lif hacimli numunelerde artış gözlenmiştir. %40 uçucu kül ilavesi ile ise lifsiz numunede azalma, lifli numunelerde ise artış görülmektedir. Uçucu kül ve lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 28 gün suda bekleyen numunede 54,7 MPa olup, lif ve uçucu kül ilavesi ile yine de bu değeri aşmamıştır. 150 gün suda bekleyen numunelerde, basınç dayanımı beklendiği gibi 28 gün suda bekleyen numuneye kıyasla artmaktadır. 150 gün suda bekleyen uçucu

kül ve lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 70,4 MPa olup, kül ve lif ilavesi ile bu değer aşılamamıştır. 150 gün sülfatta bekleyen uçucu kül ve lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 67,1 MPa olup, %20 küllü %0,5 lif hacimli numune ile en iyi sonuç elde edilen basınç dayanımı 69.0 MPa'dır.

Lifli örneklerin basınç dayanımlarında kontrol karışımına göre oluşan azalmaların, karbon lif katkısı ile harcın işlenebilirliğinin azalmasından kaynaklandığı sonucuna varmak mümkündür. Ayrıca %40 uçucu kül içeren harç örneklerinin daha düşük basınç dayanımına sahip olma nedeni ise işlenebilirlikteki azalmanın yanısıra çimentonun hidratasyon ürünü olan Ca(OH)_2 'nin uçucu külün bir miktarı ile bağlanması, geri kalan uçucu külün ise dayanıma katkı sağlamaması olarak açıklanabilir. 150 gün sülfatta bekleyen uçucu kül katkılı karışımlarda gözlenen basınç dayanımlarındaki artışın ise sodyum sülfatın uçucu külün puzolanik aktivitesini arttırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. "Lorenzo ve diğer (2003) ve Yazıcı ve diğer (2003) tarafından ifade edildiği gibi, özellikle yüksek oranda uçucu kül içeren örneklerin eğilme dayanımlarının yapay deniz suyu ile arttığı görülmektedir. Bu durum klorür, sülfat ve sodyum iyonlarının uçucu külün puzolanik reaksiyonunu aktive etmesiyle açıklanmaktadır."

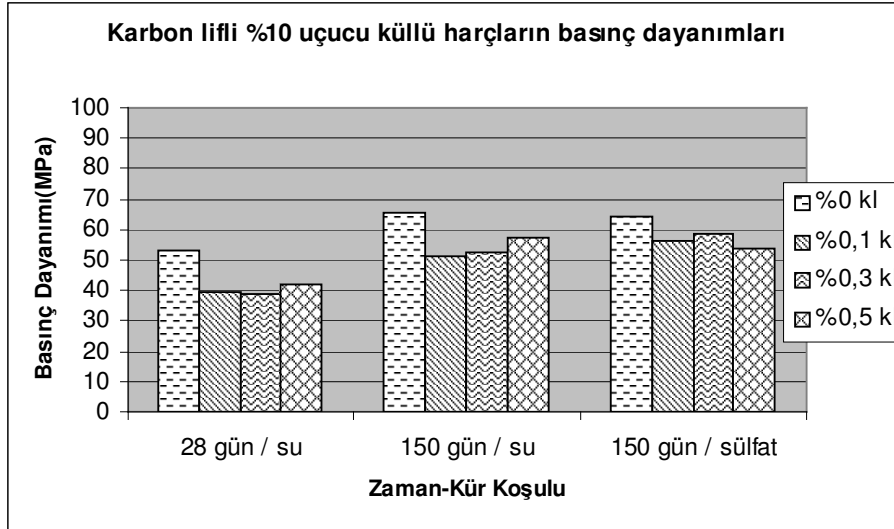
Aynı ilişkiler %0, %10, %20, %40 uçucu kül katkılı harçlar için ayrı olarak Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'de verilmişlerdir.



Şekil 3.13 Karbon lifli uçucu külsüz (UK=0) kontrol karışımı harçların basınç dayanımları

Uçucu külsüz karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde karbon lif katılmasıyla basınç dayanımı lif içermeyen numuneye göre azalma göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 54,70 MPa olup, %0,1 %0,3 ve %0,5 lif hacmi içeren numunelerin basınç dayanımları birbirine yakın ve 40,0 MPa civarındadır. 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 28 gün suda bekleyen numunelere göre artış göstermiştir, ancak lif içeren numunelerin basınç dayanımları, lifsiz numunenin dayanım değerini aşamamıştır. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 70,4 MPa olup, en fazla bu değere yaklaşan %0,5 lif hacimli numunenin basınç dayanımı 64,7 MPa'dır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin basınç dayanımı, 150 gün suda bekleyen numunelere kıyasla lif içermeyen ve %0,5 lif hacimli numunenin basınç dayanımı azalmış, % 0,1 ve %0,3 lif hacimli numunelerin basınç dayanımları artmıştır. Ayrıca lif içeren örnekler yine lif içermeyen numunenin basınç dayanımı değerini aşamamıştır. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 67,1 MPa olup, en fazla bu değere yaklaşan %0,5 lif hacimli numunenin basınç dayanımı 63,5 MPa'dır. Yayılma çapına bağlı olarak uçucu külsüz karışımların işlenebilirliği daha iyi olduğundan kalıba daha rahat yerleşebilmiş ve boşluk miktarı en az olmuştur.

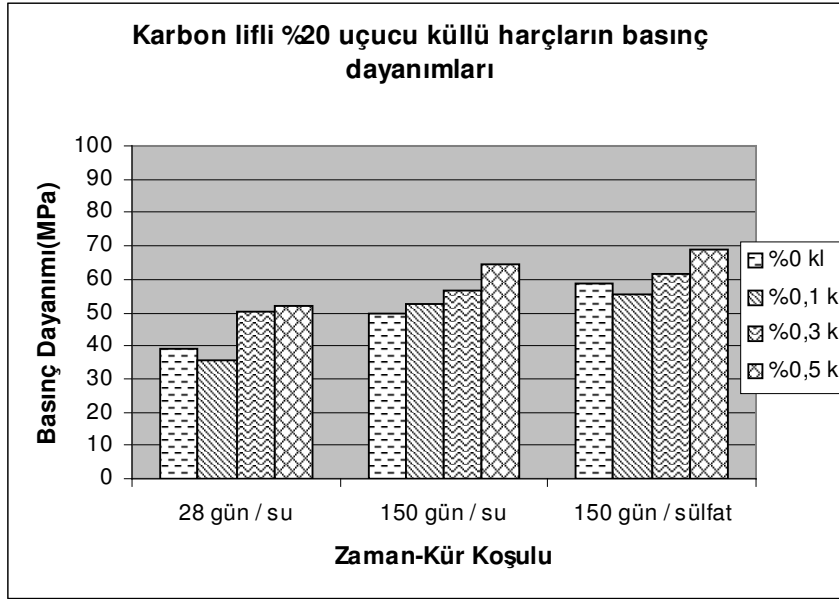
Bu bulgulara dayanarak, uçucu külsüz ($uk=0$) karışımlarda en yüksek basınç dayanımı 150 gün suda bekleyen lifsiz numunenin olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.14 Karbon lifli %10 uçucu küllü harçların basınç dayanımları

%10 uçucu kül olan karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde karbon lif katılmasıyla basınç dayanımı lif içermeyen numuneye göre azalmıştır. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 53,1 MPa olup, %0,1 %0,3 ve %0,5 lif hacmi içeren numunelerin basınç dayanımları birbirine yakın ve 39,0 MPa civarındadır. 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 28 gün suda bekleyen numunelere göre artış göstermiştir, ancak lif içeren numunelerin basınç dayanımları, lifsiz numunenin dayanım değerini aşamamıştır. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 65,7 MPa olup, bu değere en fazla yaklaşan %0,5 lif hacimli numunenin basınç dayanımı 57,0 MPa'dır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin basınç dayanımı, 150 gün suda bekleyen numunelere kıyasla lif içermeyen ve %0,5 lif hacmi içeren numunelerde basınç dayanımında azalma, %0,1 ve %0,3 lif hacmi içeren numunelerde basınç dayanımında artış saptanmıştır. Ancak lif içeren örnekler yine lif içermeyen numunenin basınç dayanımı değerini aşamamıştır. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 64,5 MPa olup, bu değere en yakın %0,3 lif hacimli numunenin basınç dayanımı 58,0 MPa civarındadır.

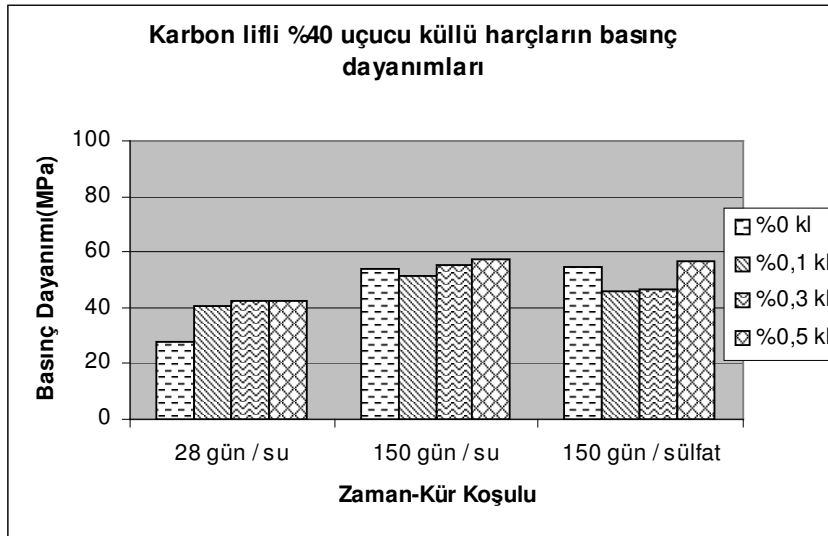
Bu bulgulara dayanarak, %10 uçucu kül olan karışımlarda en yüksek basınç dayanımı 150 gün suda bekleyen lifsiz numunenin olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.15 Karbon lifli %20 uçucu küllü harçların basınç dayanımları

%20 uçucu kül olan karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde karbon lif katılmasıyla basınç dayanımı %0,3 ve %0,5 lif hacmi içeren numunelerde artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 38,8 MPa olup, %0,3 ve %0,5 lif hacmi içeren numunelerin basınç dayanımları birbirine yakın ve 50,0 MPa civarındadır. 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 28 gün suda bekleyen numunelere göre artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 49,8 MPa olup, lif artışı ile basınç dayanımı artmış, %0,5 lif hacmi içeren numunenin basınç dayanımı 64,5 MPa değerine ulaşmıştır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin basınç dayanımı, 150 gün suda bekleyen numunelere kıyasla artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 58,7 MPa olup, %0,5 lif hacmi içeren numunenin basınç dayanımı 69,0 MPa'dır.

Bu bulgulara dayanarak, %20 uçucu kül olan karışımlarda en yüksek basınç dayanımı 150 gün sülfatta bekleyen %0,5 karbon lif hacimli numunenin olduğu saptanmıştır. %20 uçucu kül içeren karışımlarda sodyum sülfatın uçucu külün pozolanik aktivitesine katkı sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 3.16 Karbon lifli %40 uçucu küllü harçların basınç dayanımları

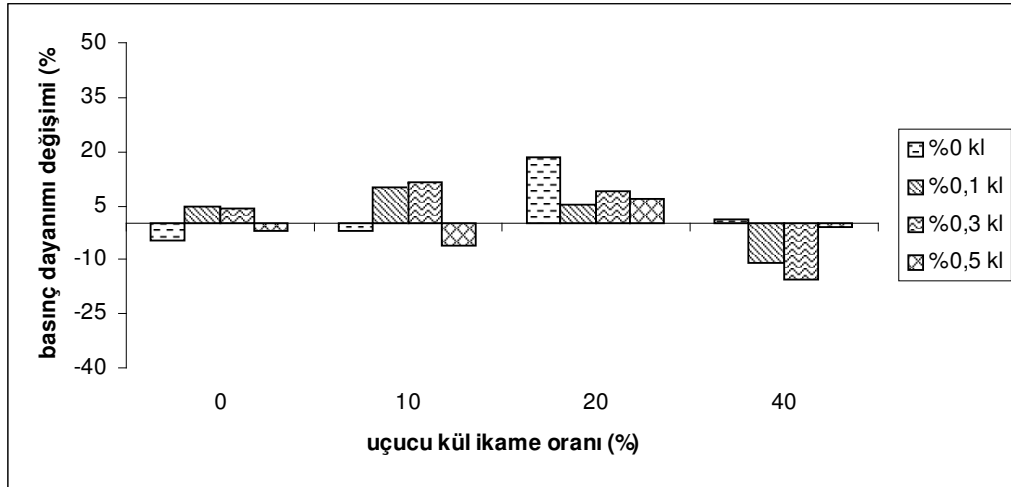
%40 uçucu kül olan karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde karbon lif katılmasıyla basınç dayanımı lif içermeyen numuneye göre artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 28,0 MPa olup, %0,1 %0,3 ve %0,5 lif hacmi içeren numunelerin basınç dayanımları birbirine yakın ve 42,0 MPa civarındadır. 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 28 gün suda bekleyen numunelere göre artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 54,0 MPa olup, %0,1 lif hacmi içeren numune bu değeri aşamamış, %0,3 ve %0,5 lif hacmi içeren numunelerin basınç dayanımları birbirine ve lifsiz numuneye yakın ve 55,0 MPa civarındadır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin basınç dayanımı, 150 gün suda bekleyen numunelere kıyasla %0,1, %0,3 ve %0,5 lif hacmi içeren numunelerde azalma göstermiştir. Lif içermeyen numunenin basınç dayanımı 54,7 MPa olup, %0,1 ve %0,3 lif hacmi içeren numuneler bu değeri aşamamış, %0,5 lif hacmi içeren numune lifsiz numuneye yakın ve 56,5 MPa'dır.

Bu bulgulara dayanarak, %40 uçucu kül olan karışımlarda en yüksek basınç dayanımı 150 gün suda bekleyen %0,5 karbon lif hacimli numunenin olduğu saptanmıştır.

Çelik lif kullanımı ile uçucu külsüz ve lifsiz kontrol karışımına göre basınç dayanımının arttığı, karbon lif ile azaldığı görülmektedir. Çelik liflerin yarattığı artışın nedeni, yükleme düzlemine paralel kalan liflerin basınç dayanımını arttırması olarak düşünülebilir. Karbon liflerin çapının çok düşük olması sonucu özgül yüzey alanları çelik life göre daha yüksektir. Bu durum matris içinde karbon liflerin topaklanmasına ve zayıf bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır. Karbon lif katkılı örneklerde basınç dayanımı artışının kısıtlı düzeyde kalması bu duruma bağlanabilir.

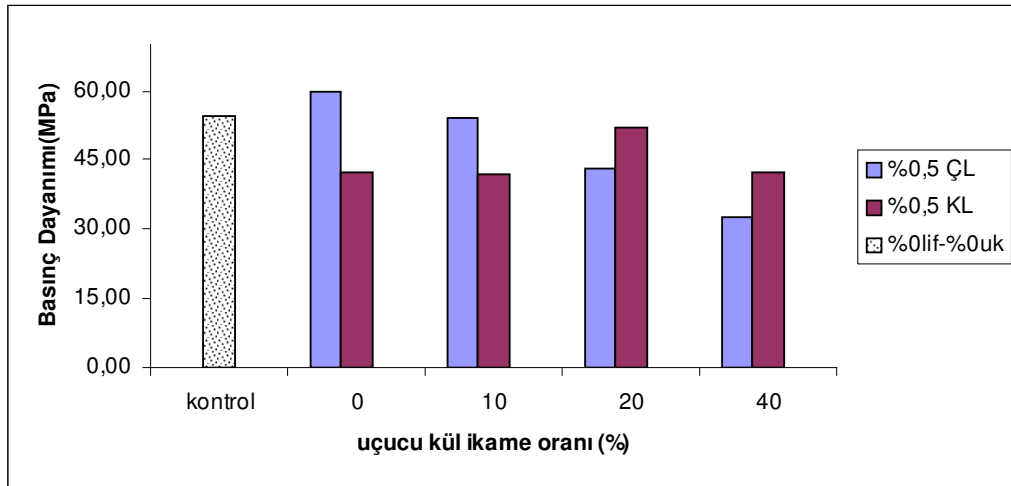
Ayrıca mikroskop kullanarak yapılan incelemelerde, karbon liflerde kopmalar olduğu, lifin görevini yitirdiği görülmüştür.

Şekil 3.17'den görüleceği üzere sülfatta 150 gün bekletilen numunelerde, suda 150 gün bekletilen numunelere kıyasla uçucu külsüz-%0,1 ve %0,3 lif hacimli numunede, %10 uçucu küllü-%0,1 ve %0,3 lif hacimli numunede, %20 uçucu küllü-%0, %0,1 , %0,3 , %0,5 lif hacimli numunede basınç dayanımında artış olduğu; diğer numunelerde azalma olduğu görülmektedir. En fazla basınç dayanımı artışını %18 ile gösteren %20 uçucu küllü, lifsiz numunenin olduğu, en fazla azalışı ise %16 ile %40 uçucu küllü, %0,3 lif hacmi içeren numunenin olduğu gözlenmektedir.



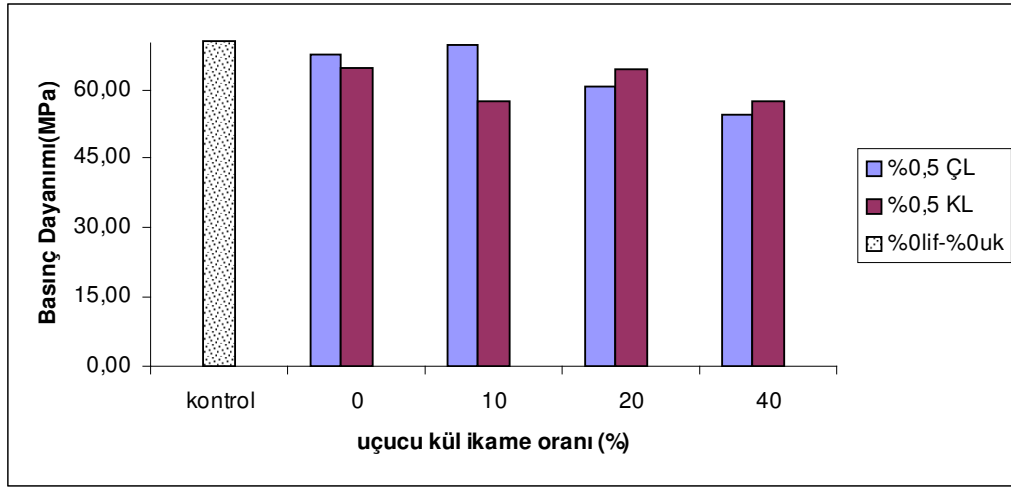
Şekil 3.17 Sulfatta 150 gün bekletilen karbon lifli örneklerin, 150 gün suda bekletilen karbon lifli örneklere kıyasla basınç dayanımı değişimi(%)

Suda 28 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik lif hacimli numunelerin , %0,5 karbon lif hacimli numunelere kıyasla basınç dayanımları Şekil 3.18'de verilmiştir



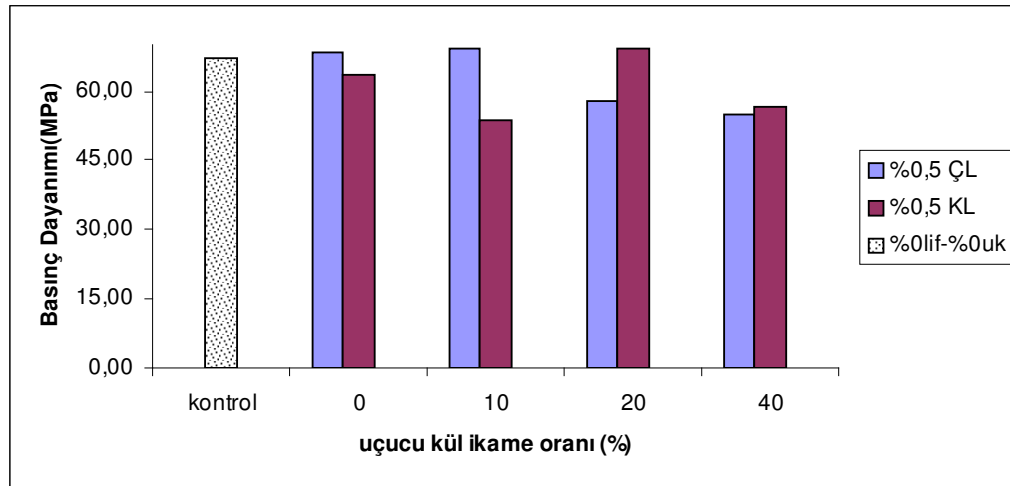
Şekil 3.18 Suda 28 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik ve karbon lifli numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Suda 150 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik lif hacimli numunelerin , %0,5 karbon lif hacimli numunelere kıyasla basınç dayanımları Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19 Suda 150 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik ve karbon lifli numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Sülfatta 150 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik lif hacimli numunelerin , %0,5 karbon lif hacimli numunelere kıyasla basınç dayanımları Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.20 Sülfatta 150 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik ve karbon lifli numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması

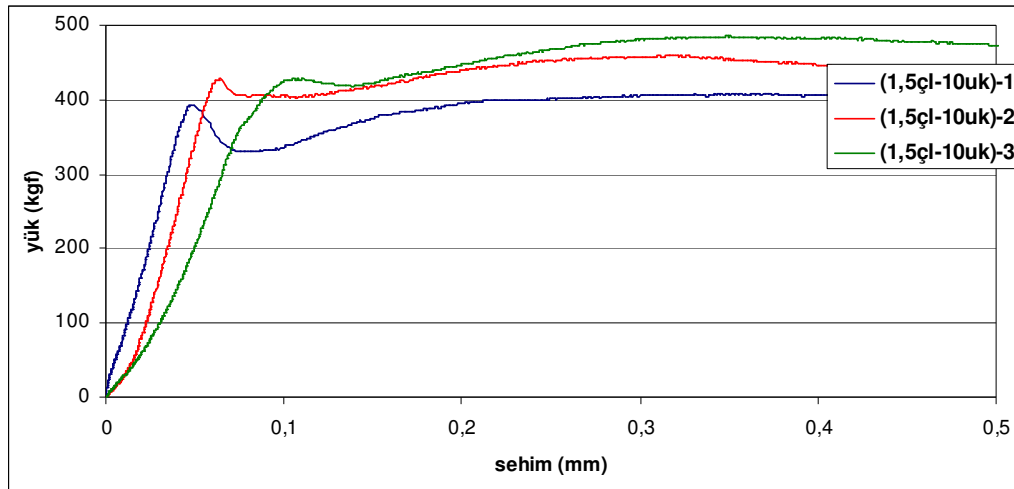
Çelik ve karbon lifin %0,5 lif hacminde %10, %20, %40 uk oranında 28 gün suda ve 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları kontrol (%0lif-%0uk) numunesine göre daha düşüktür. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerde ise %10uk-%0,5çl ve %20uk-%0,5kl içeren numunenin basınç dayanımı kontrol numunesine göre yüksek, diğerleri daha düşüktür.

Çelik ve karbon lifin %0,5 lif hacminde %10 uk oranında 28 gün suda ve hem suda hem de sülfatta 150 gün bekleyen numuneler için çelik lifli örneklerin basınç dayanımı daha yüksek çıkmıştır. Aynı lif oranında %20 ve %40 uk oranlarında ise karbon lifin basınç dayanımı daha yüksektir. Yüksek uçucu kül oranlarında karbon lifin uçucu kül ile daha iyi performans gösterdiği anlaşılmaktadır.

3.5.2.2 Yük-deplasman Eğrileri

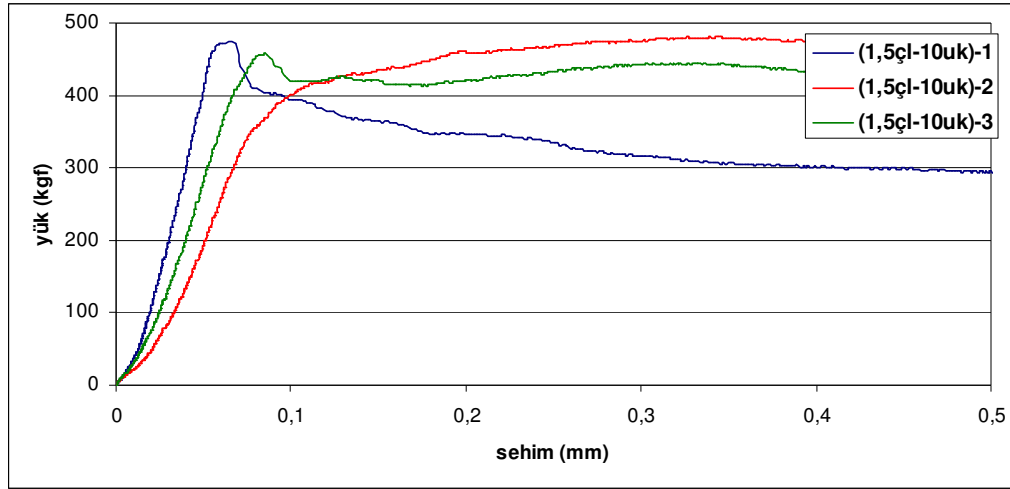
Her uçucu kül oranı için lifsiz ve en fazla lif hacmi içeren (%1,5çl ve %0,5kl) numunelerin üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen verilere göre çizilen yük-deplasman eğrileri bu bölümde sunulmaktadır.

Çelik mikroliflerin kullanıldığı, suda 150 gün bekleyen karışımlardan tokluk değeri yüksek olan serinin (tokluk değerleri uçucu küllün her oranı için lifsiz ve en fazla lif hacmi içeren numunelerde hesaplanmıştır,çelik lifli numunelerde %1,5; karbon lifli numunelerde %0,5 lif hacimli numuneler)yük-deplasman eğrisi Şekil 3.21’de sunulmaktadır.



Şekil 3.21 150 gün suda bekleyen %1,5 çelik lifli-%10 uçucu küllü karışımın yük-deplasman ilişkisi

Çelik mikroliflerin kullanıldığı, sülfatta 150 gün bekleyen karışımlardan tokluk değeri yüksek olan serinin yük-deplasman eğrisi Şekil 3.22’de sunulmaktadır.

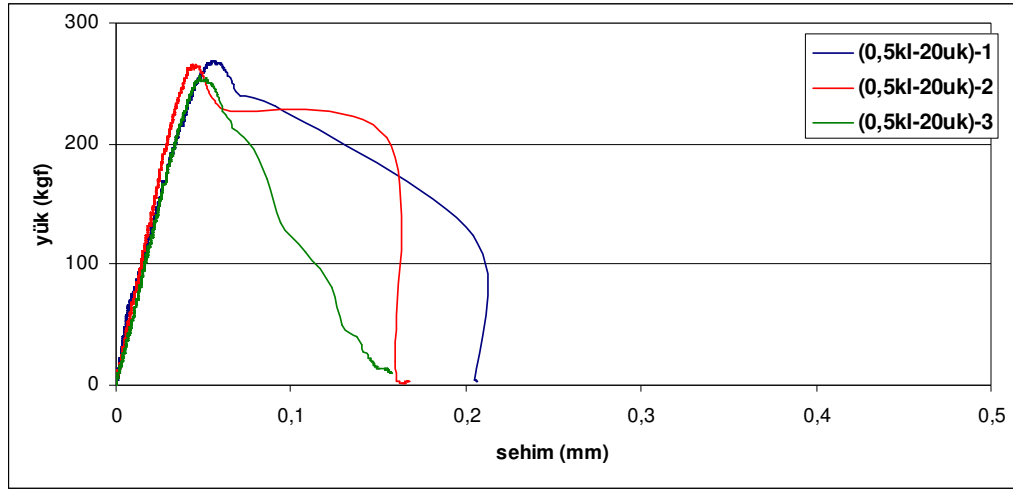


Şekil 3.22 150 gün sülfatta bekleyen %1,5 çelik lifli-%10 uçucu küllü karışımın yük-deplasman ilişkisi

Çelik mikrolifler maksimum yüke ulaştıktan sonra sıyrılma mekanizması yoluyla harçlara süneklik kazandırmaktadır. Çelik liflerin çatlamış kesit düzlemleri arasında gerilme transferi de yaparak sünekliğe katkıda bulunduğu söylenebilir. Yük-deplasman eğrisinin iniş eğiminin yumuşak olması ve ani yük düşmelerinin gözlenmemesi, çelik liflerin artan yük karşısında kopmaktan çok aşamalı olarak matristen sıyrıldığını düşündürmektedir.

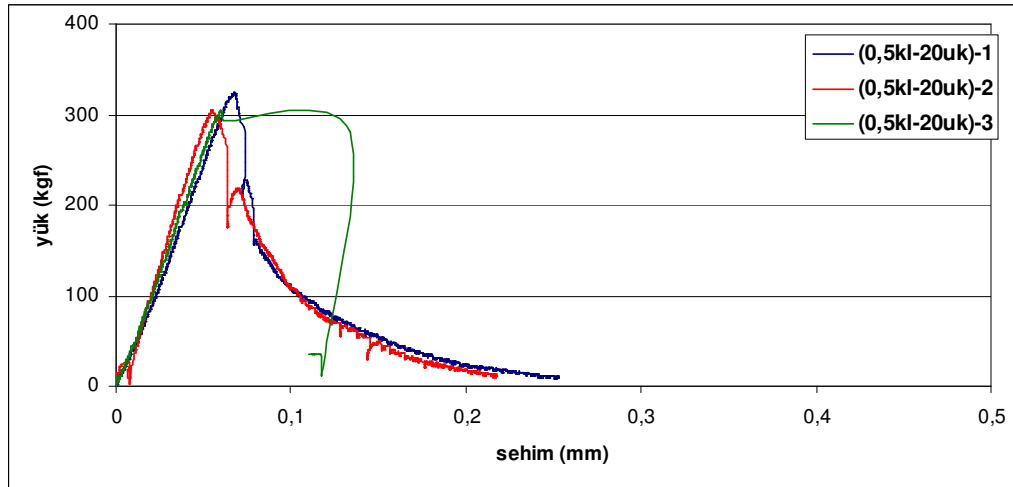
Ayrıca çelik lifin aynı seri için su ve sülfattaki grafiklerine baktığımızda çok büyük bir değişiklik olmadığı görülmektedir.

Karbon mikroliflerin kullanıldığı, suda 150 gün bekleyen karışımlardan tokluk değeri yüksek olan serinin yük-deplasman eğrisi Şekil 3.23'de sunulmaktadır.



Şekil 3.23 150 gün suda bekleyen %0,5 karbon lifli-%20 uçucu küllü karışımın yük-deplasman ilişkisi

Karbon mikroliflerin kullanıldığı, sülfatta 150 gün bekleyen karışımlardan tokluk değeri yüksek olan serinin yük-deplasman eğrisi Şekil 3.24'de sunulmaktadır.



Şekil 3.24 150 gün sülfatta bekleyen %0,5 karbon lifli-%20 uçucu küllü karışımın yük-deplasman ilişkisi

Karbon mikroliflerin kullanıldığı serilerden elde edilen yük-deplasman eğrileri, çelik mikrolifli serilerden elde edilenden oldukça farklıdır. Karbon mikrolifli serilerden elde edilen yük-deplasman eğrisi karakteri, maksimum yüke ulaştıktan

sonra artan orta nokta deplasmanına karşılık yükün sürekli düşüş göstermesi şeklindedir. Maksimum yükten önce mikro çatlakları önleyerek eğilme dayanımını arttıran karbon lifler, çelik life nazaran çok daha düşük lif çapına sahip oldukları için çatlak genişliği belli bir seviyeye geldiğinde etkinliklerini kaybetmekte, yük-deplasman eğrisinin iniş eğiminin yumuşak olmaması ve kırılma anından hemen sonra düşmelerin gözlenmesi ile karbon liflerin koptuğu düşünülebilir.

Bunun yanında, eğilme deneyi sırasında karbon lifli numune ile çalışırken, kırılma anına ulaşana kadar ‘tık tık tık’ seslerinin gelmesi liflerin koptuğunu da desteklemektedir.

3.5.2.3 Eğilme Dayanımları

28 gün suda, 150 gün suda ve 150 gün sülfatlı suda bekleyen çelik ve karbon lifli sertleşmiş harç numunelerinin eğilme dayanımları yük kontrollü makine ile elde edilmiş olup eğilme deneyi sonucu elde edilen eğilme dayanımları Tablo 3.14 ve Tablo 3.15’de sunulmaktadır. Eğilme dayanımları her bir seri için 3 adet örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu örneklerin herbirinden elde edilen çelik lifli numunelerin deney sonuçları ekler bölümünde Tablo Ek A-7 Tablo Ek A-8, Tablo Ek A-9’de; karbon lifli numunelerin deney sonuçları Tablo Ek A-10, Tablo Ek A-11, Tablo Ek A-12 ‘de görülmektedir.

Tablo 3.14 Çelik lifli serilerin eğilme dayanımı sonuçları

Uçucu kül(%)	Çelik lif(%)	Eğilme Dayanımı(MPa)		
		28 gün / su	150 gün / su	150 gün / sülfat
0	0	12,26	8,45	11,64
	0,5	12,11	11,68	15,03
	1	12,96	13,00	15,95
	1,5	11,80	11,90	14,89
10	0	9,99	9,75	10,55
	0,5	10,87	12,70	15,95
	1	11,88	15,13	15,64
	1,5	10,66	12,62	13,24
20	0	9,55	9,10	10,38
	0,5	10,12	10,36	13,91
	1	11,21	12,49	15,84
	1,5	11,31	11,35	11,60
40	0	7,29	9,64	6,22
	0,5	8,84	13,51	14,32
	1	8,13	13,61	13,00
	1,5	9,26	10,43	11,00

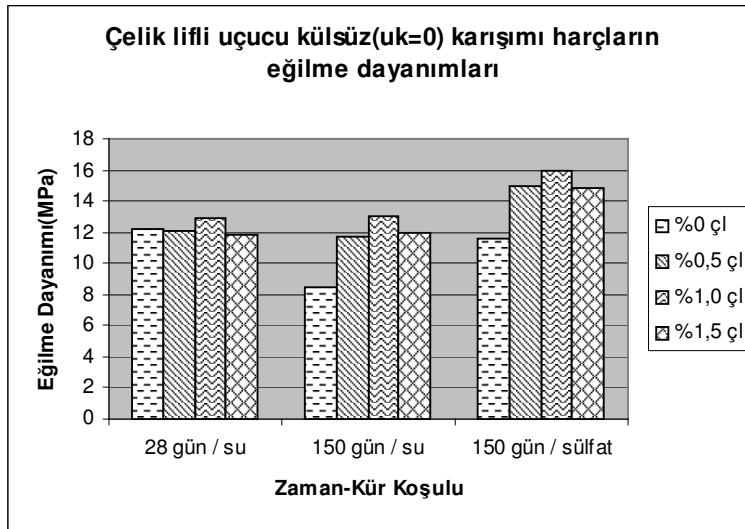
Tablo 3.14'den görüleceği üzere; uçucu kül ve lif katkısı ile 28 gün suda bekleyen numunelerde eğilme dayanımları azalmıştır. 150 gün suda ve 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımı değerlerinde dalgalanmalar (artış ve azalmalar) olmuştur. 150 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımları, 28 gün suda bekleyen numunelere göre uçucu külsüz-lif hacmi %0 ve %0,5 ve %10 uçucu küllü-lif hacmi %0 ve %20 uçucu küllü-lif hacmi %0 olan numunelerde azalma; diğerlerinde artış gözlenmiştir. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımları, 150 gün suda bekleyen numunelere göre %40 uçucu küllü ve lif hacmi %0 ve %1 olan numunelerde azalma; diğerlerinde artış göstermiştir.

Sülfatlı suda 150 gün bekleyen numunelerde, %0,5 ve %1 lif hacimli numunelerin eğilme dayanımları artarken, %1,5 lif hacimli numunenin eğilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bu durumu lifin yayılma çapındaki düşüşün işlenebilirliği azaltması sonucu numunenin iyi sıkıştırılmamasına bağlayabiliriz.

Eğilme dayanımı açısından en başarılı sonuç; 150 gün sülfatta bekleyen %10 küllü, %0,5 çelik lif hacmi içeren numune ve uçucu külsüz %1 çelik lif hacmi içeren numunedir.

Tüm zaman ve kür koşullarında lifli serilerde, lif içermeyen harca göre daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir.

Aynı ilişkiler %0, %10, %20, %40 uçucu kül katkılı harçlar için ayrı olarak Şekil 3.25, Şekil 3.26, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’de verilmişlerdir.

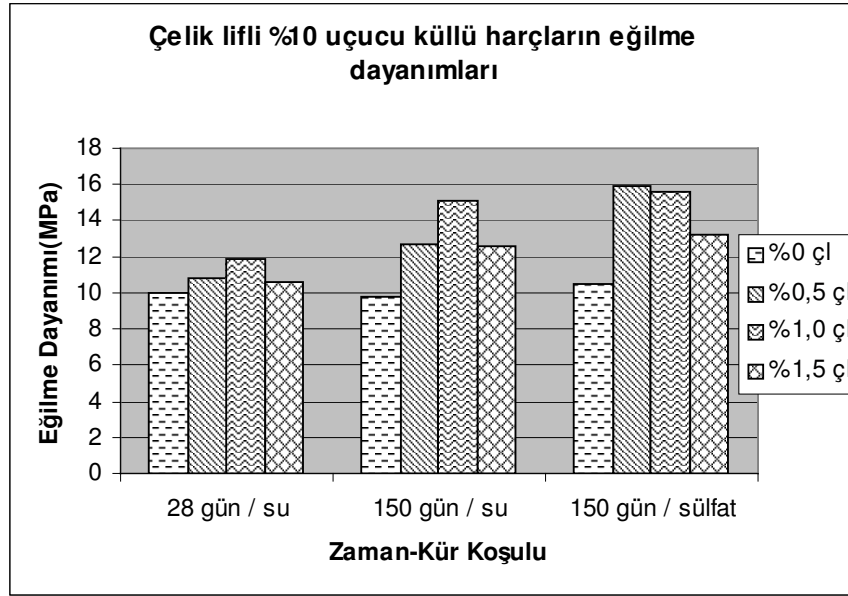


Şekil 3.25 Çelik lifli uçucu külsüz (uk=0) kontrol karışımı harçların eğilme dayanımları

Uçucu külsüz (uk=0) karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde çelik lif katılmasıyla eğilme dayanımı lif içermeyen numuneye göre %1,0 lif hacmi içeren numunede artış, %0,5 ve %1,5 lif hacmi içeren numunelerde azalma göstermiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 12,26 MPa olup, %0,5 ve %1,5 lif hacmi içeren numunelerin eğilme dayanımları birbirine ve lifsiz numuneye yakın ve 12,0 MPa civarındadır. 150 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımları, 28 gün suda bekleyen numunelere göre lifsiz ve %0,5 lif hacimli numunede azalma, %1 ve %1,5 lif hacimli numunede artış olduğu gözlenmiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 8,45 MPa olup, %1 lif hacmi içeren numunenin eğilme dayanımı 13,0 MPa’dır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 150 gün suda bekleyen numunelere göre artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme

dayanımı 11,64 MPa olup, en fazla eğilme dayanımı gösteren %1 lif hacmi içeren numunenin eğilme dayanımı 15,95 MPa'dır.

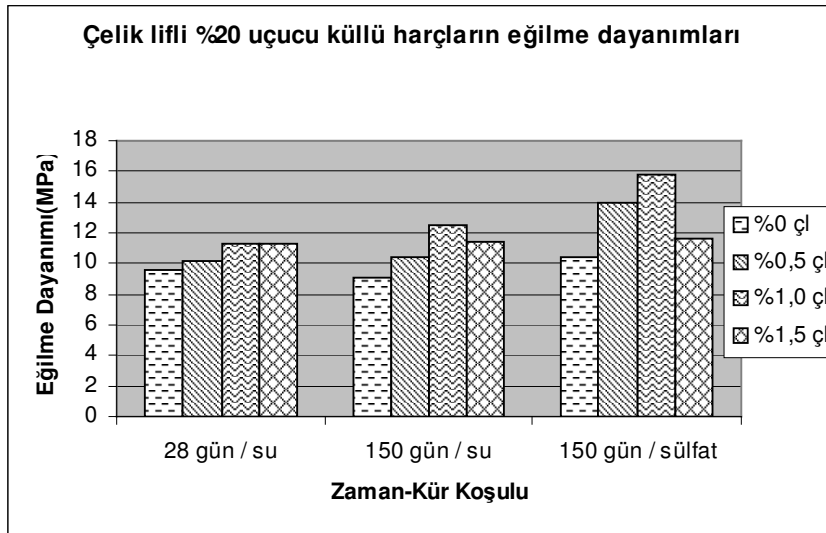
Bu bulgulara dayanarak, uçucu külsüz karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 150 gün sülfatta bekleyen %1,0 çelik lif hacimli numunenin olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.26 Çelik lifli %10 uçucu küllü harçların eğilme dayanımları

%10 uçucu küllü karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde çelik lif katılmasıyla eğilme dayanımı lif içermeyen numuneye göre artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 9,99 MPa olup, en iyi dayanımı veren %1,0 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı 11,88 MPa'dır. 150 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 28 gün suda bekleyen numunelere göre lifsiz numunede azalma, lifli numunelerde artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 9,75 MPa olup, %0,5 ve %1,5 lif hacmi içeren numunelerin eğilme dayanımları birbirine yakın ve 12,5 MPa civarındadır. En iyi dayanımı veren %1,0 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı 15,13 MPa'dır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 150 gün suda bekleyen numunelere göre artış göstermiştir. %0,5 lif hacmi içeren numunenin eğilme dayanımı 15,95 MPa'dır.

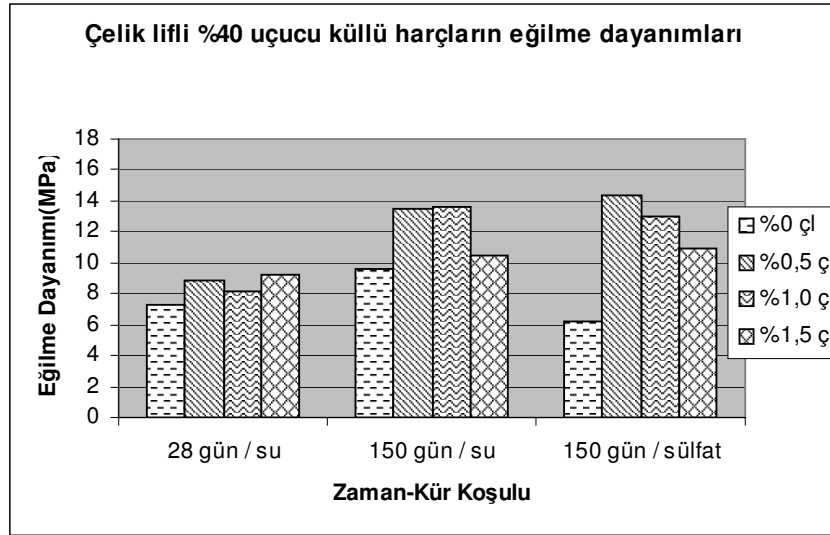
Bu bulgulara dayanarak, %10 uçucu kül olan karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 150 gün sülfatta bekleyen %0,5 çelik lif hacimli numunenin olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.27 Çelik lifli %20 uçucu küllü harçların eğilme dayanımları

%20 uçucu kül olan karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde çelik lif katılmasıyla eğilme dayanımı lif içermeyen numuneye göre artış göstermektedir. Lif içermeyen numunede eğilme dayanımı 9,55 MPa olup, %1,0 ve %1,5 lif hacmi içeren numunede eğilme dayanımı birbirine yakın ve 11,5 MPa civarındadır. 150 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 28 gün suda bekleyen numunelere göre lifsiz numunede azalma, lifli numunelerde artış göstermiştir. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 150 gün suda bekleyen numunelere göre %0,5 ve %1,0 ve %1,5 lif hacimleri için artış göstermiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 10,38 MPa olup, en iyi dayanım %1 lif hacimli numunede 15,84 MPa'dır.

Bu bulgulara dayanarak, %20 uçucu kül olan karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 150 gün sülfatta bekleyen %1,0 çelik lif hacimli numunenin olduğu saptanmıştır.

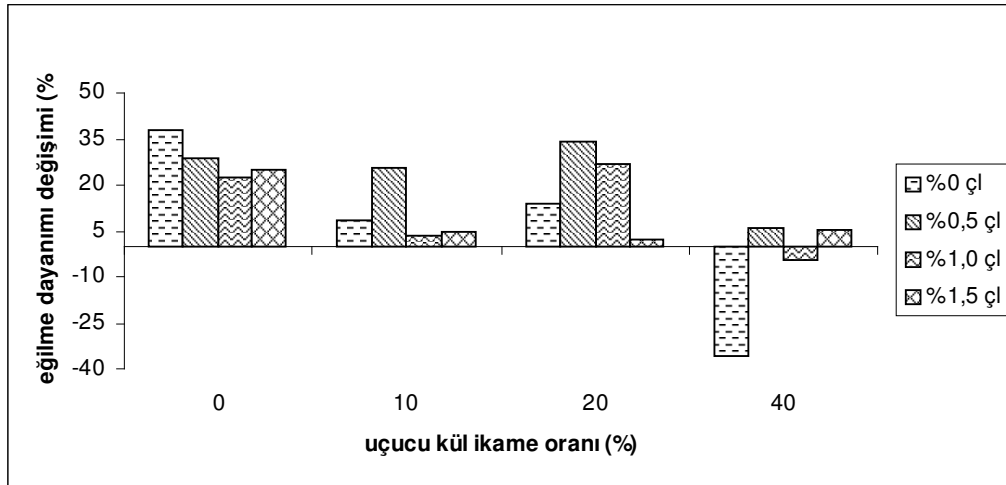


Şekil 3.28 Çelik lifli %40 uçucu küllü harçların eğilme dayanımları

%40 uçucu küllü karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde çelik lif katılmasıyla eğilme dayanımı lif içermeyen numuneye göre artış göstermektedir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 7,29 MPa olup, %0,5 ve %1,5 lif hacmi içeren numunelerin eğilme dayanımları birbirine yakın ve 9,0 MPa civarındadır. 150 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 28 gün suda bekleyen numunelere göre %0,5 ve %1,0 ve %1,5 lif hacimleri için artış gözlenmiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 9,64 MPa olup, %0,5 ve %1,0 lif hacmi içeren numunelerin eğilme dayanımları birbirine yakın ve 13,5 MPa'dır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 150 gün suda bekleyen numunelere göre lifsiz ve %1,0 lif hacmi içeren numunelerde azalma olduğu gözlenmiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 6,22 MPa olup, en iyi dayanımı veren %0,5 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı 14,32 MPa'dır.

Bu bulgulara dayanarak, %40 uçucu kül olan karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 150 gün sülfatta bekleyen %0,5 çelik lif hacimli numunenin olduğu saptanmıştır.

Şekil 3.29'dan görüleceği üzere sülfatta 150 gün bekleyen numunelerde,150 gün suda bekleyen numunelere kıyasla eğilme dayanımlarında %40 uk- lifsiz ve %1 lif hacimli numunede azalma, diğerlerinde artış olduğu gözlenmektedir. En fazla eğilme dayanımı artışını %38 artışla , %0 uçucu küllü-lifsiz numune; en fazla azalışın ise %36 azalma ile %40 uk-lifsiz numune olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.29 Sülfatta 150 gün bekletilen çelik lifli örneklerin, 150 gün suda bekletilen çelik lifli örneklere kıyasla eğilme dayanımı değişimi(%)

Tablo 3.15'den görüleceği üzere; uçucu kül ve karbon lif artışı ile eğilme dayanımı değerlerinde dalgalanmalar olmuş, kesin bir yargıya varılamamıştır. 150 gün suda bekleyen numuneler, 28 gün suda bekleyen numunelere göre %0,1 lif hacmi için artış,diğer lif hacimleri için azalma göstermiştir. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımları, 150 gün suda bekleyen numunelere göre genelde artmıştır.

Sülfatlı suda 150 gün bekleyen numunelerde, %0,1 ve %0,3 lif hacimli numunelerin eğilme dayanımları artarken, %0,5 lif hacimli numunenin eğilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bu durumu lifin yayılma çapındaki düşüşün işlenebilirliği azaltması sonucu numunenin iyi sıkıştırılmamasına bağlayabiliriz.

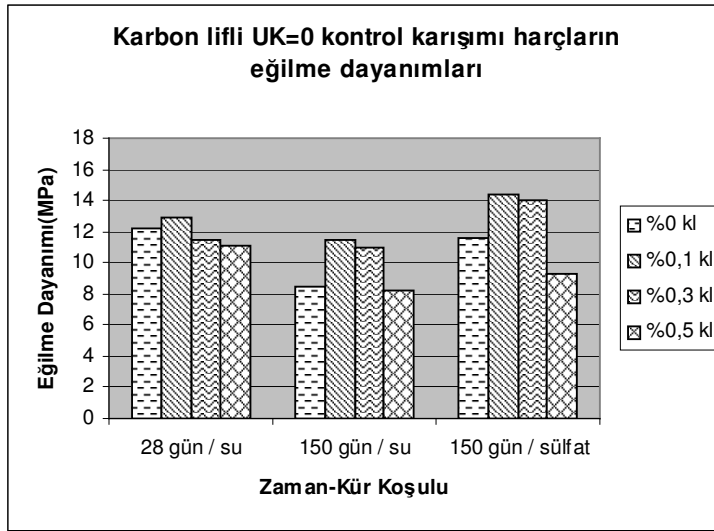
Tablo 3.15 Karbon lifli serilerin eğilme dayanımı sonuçları

Uçucu kül(%)	Karbon lif(%)	Eğilme Dayanımı(MPa)		
		28 gün / su	150 gün / su	150 gün / sülfat
0	0	12,26	8,45	11,64
	0,1	12,92	11,48	14,42
	0,3	11,46	10,97	14,02
	0,5	11,07	8,20	9,26
10	0	9,99	9,75	10,55
	0,1	10,97	11,07	14,83
	0,3	10,66	12,29	15,34
	0,5	11,78	7,86	8,49
20	0	9,55	9,10	10,38
	0,1	10,75	12,09	15,13
	0,3	12,85	11,38	15,13
	0,5	13,61	7,93	7,78
40	0	7,29	9,64	6,22
	0,1	10,38	11,38	12,80
	0,3	10,77	12,29	13,91
	0,5	10,56	6,85	9,66

Eğilme dayanımı açısından en başarılı sonuç; 150 gün sülfatta bekleyen %0,3 lif hacimli, %10 kül içeren harç numunesidir.

150 gün suda ve sülfatta bekleyen numunelerde %0,5 lif hacimli karışımlarda eğilme dayanımı, lifsiz numunelerdeki eğilme dayanımlarını aşmamıştır.

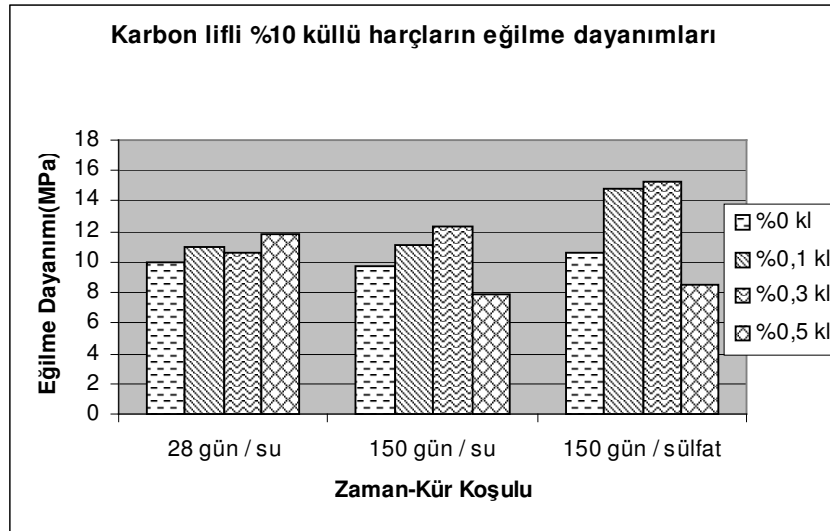
Aynı ilişkiler %0, %10, %20, %40 uçucu kül katkılı harçlar için ayrı olarak Şekil 3.30 Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'de verilmişlerdir.



Şekil 3.30 Karbon lifli uçucu külsüz (uk=0) kontrol karışımı harçların eğilme dayanımları

Uçucu külsüz karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde karbon lif katılmasıyla eğilme dayanımı lif içermeyen numuneye göre %0,3 ve %0,5 lif hacimli numunelerde azalma, %0,1 if hacimli numunelerde artış gözlenmiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 12,26 MPa, en iyi dayanımı veren %0,1 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı 12,92 MPa'dır. 150 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 28 gün suda bekleyen numunelere göre azalmıştır. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 8,45 MPa olup, en iyi dayanımı veren %0,1 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı 11,48 MPa'dır. En fazla düşüş gösteren %0,5 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı 8,20 MPa olup, lifsiz numunenin eğilme dayanımı değerini aşamamıştır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımında, 150 gün suda bekleyen numunelere göre artış olduğu gözlenmiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 11,64 MPa 'dır. En fazla artışı gösteren ve en iyi dayanımı veren %0,1 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı 14,42 MPa'dır.

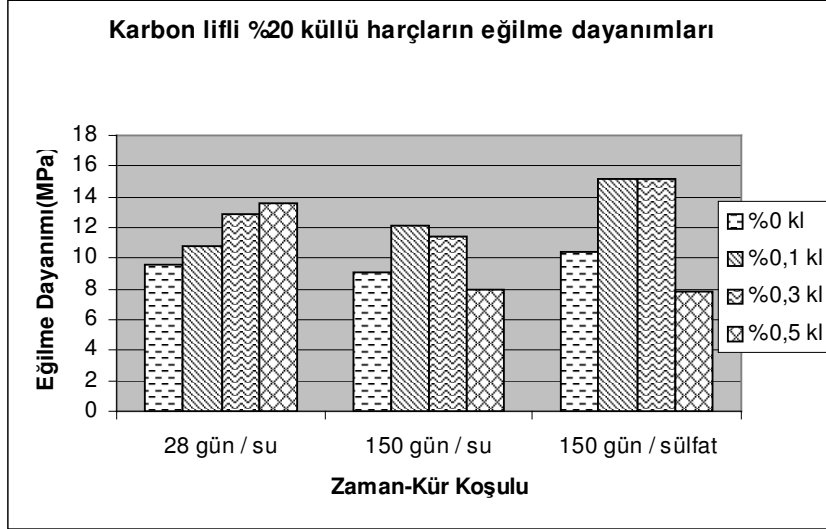
Bu bulgulara dayanarak, uçucu külsüz (uk=0) karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 150 gün sülfatta bekleyen %0,1 karbon lif hacimli numunenin olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.31 Karbon lifli %10 uçucu küllü harçların eğilme dayanımları

%10 uçucu küllü karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde karbon lif katılmasıyla eğilme dayanımında lif içermeyen numuneye göre artış gözlenmiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 9,99 MPa olup, en iyi dayanımı gösteren %0,5 lif numunenin eğilme dayanımı 11,78 MPa'dır. 150 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 28 gün suda bekleyen numunelere göre lifsiz ve %0,5 lif hacimli numunelerde azalma, %0,1 ve %0,3 lif hacminde artış görülmektedir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 9,75 MPa olup, en fazla artışı gösteren ve en iyi dayanımı veren %0,3 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı 12,29 MPa'dır. En kötü dayanımı veren ve lifsiz numunenin dahi altında değer veren %0,5 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı 7,86 MPa'dır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 150 gün suda bekleyen numunelere göre lifsiz ve %0,5 lif hacmi içeren numunelerde fazla değişiklik olmazken; %0,1 ve %0,3 lif hacimli numunelerde artış gözlenmektedir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 10,55 MPa olup, en iyi dayanımı veren %0,1 ve %0,3 lif hacimli numunelerin eğilme dayanımları birbirine yakın ve 15,0 MPa civarındadır. %0,5 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı, lifsiz numunenin altında değer almıştır.

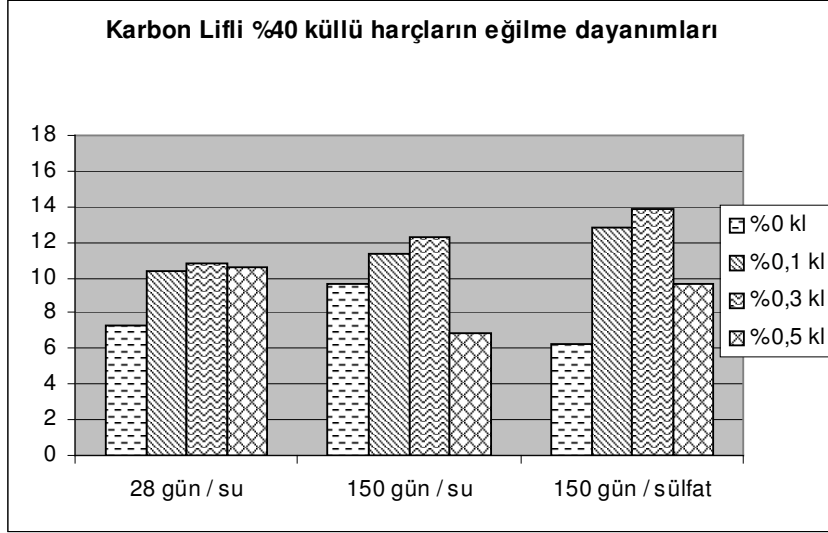
Bu bulgulara dayanarak, %10 uçucu küllü karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 150 gün sülfatta bekleyen %0,3 karbon lif hacimli numunenin olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.32 Karbon lifli %20 uçucu küllü harçların eğilme dayanımları

%20 uçucu kül olan karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde karbon lif katılmasıyla eğilme dayanımı lif içermeyen numuneye göre artış gözlenmiştir. Lif içermeyen numunenin eğilme dayanımı 9,55 MPa olup, en iyi dayanımı veren %0,5 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı 13,61 MPa'dır. 150 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 28 gün suda bekleyen numunelere göre %0,1 lif hacimli numunede artış, %0,5 lif hacimli numunede lifsiz numunenin eğilme dayanımının altına inerek azalma göstermiştir. Lifsiz numunenin eğilme dayanımı 9,10 MPa 'dır. En fazla artışı gösteren ve en yüksek dayanımı veren %0,1 lif hacimli numunenin eğilme dayanımı 12,09 MPa'dır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 150 gün suda bekleyen numunelere göre %0,1 ve %0,3 lif hacmi içeren numunelerde artış göstermiştir. Lifsiz numunenin eğilme dayanımı 10,38 MPa olup, %0,1 ve %0,3 lif hacmi içeren numunelerde eğilme dayanımları birbirine yakın ve 15,0 MPa civarındadır.

Bu bulgulara dayanarak, %20 uçucu kül olan karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 150 gün sülfatta bekleyen %0,1 ve %0,3 karbon lif hacimli numunenin olduğu saptanmıştır.

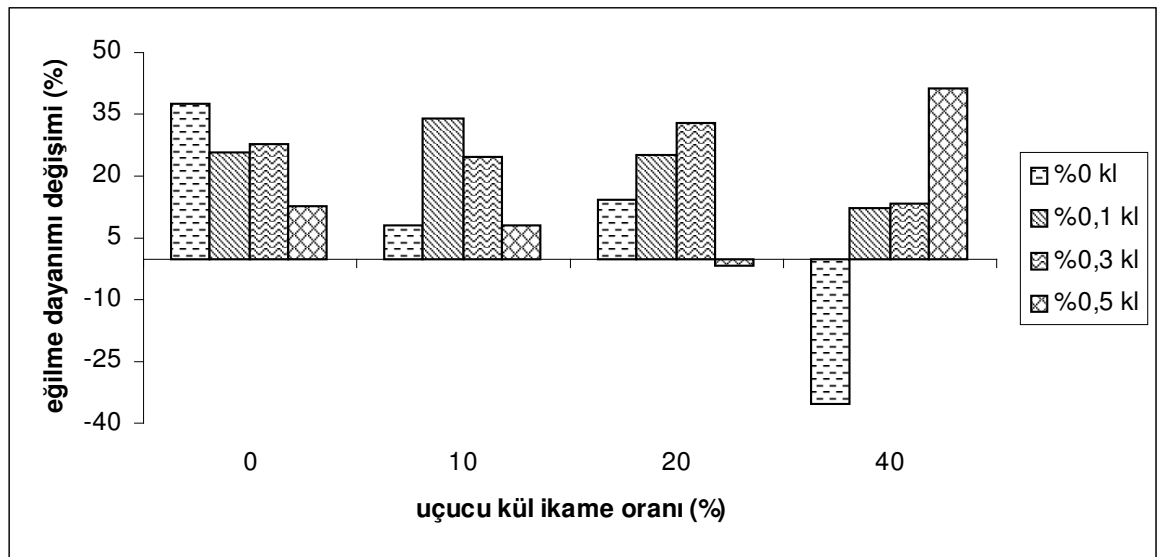


Şekil 3.33 Karbon lifli %40 uçucu küllü harçların eğilme dayanımları

%40 uçucu kül olan karışımlarda; 28 gün suda bekleyen numunelerde karbon lif katılmasıyla eğilme dayanımı lif içermeyen numuneye göre artış gözlenmiştir. Lifsiz numunenin eğilme dayanımı 7,29 MPa olup, %0,1 %0,3 ve %0,5 lif hacimli numunelerin eğilme dayanımları birbirine yakın ve 10,5 MPa'dır. 150 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 28 gün suda bekleyen numunelere göre %0,5 lif hacimli numunede azalma, diğer lif hacimlerinde artış görülmüştür. Lifsiz numunenin eğilme dayanımı 9,64 MPa olup, en iyi dayanımı %0,3 lif hacmi içeren numunenin eğilme dayanımı 12,29 MPa'dır. %0,5 lif hacmi içeren numune, lifsiz numunenin altında dayanım göstermektedir. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımı, 150 gün suda bekleyen numunelere göre artış göstermiştir. Lifsiz numunenin eğilme dayanımı 6,22 MPa olup, en iyi dayanımı veren %0,3 lif hacmi içeren numunenin eğilme dayanımı 13,91 MPa'dır.

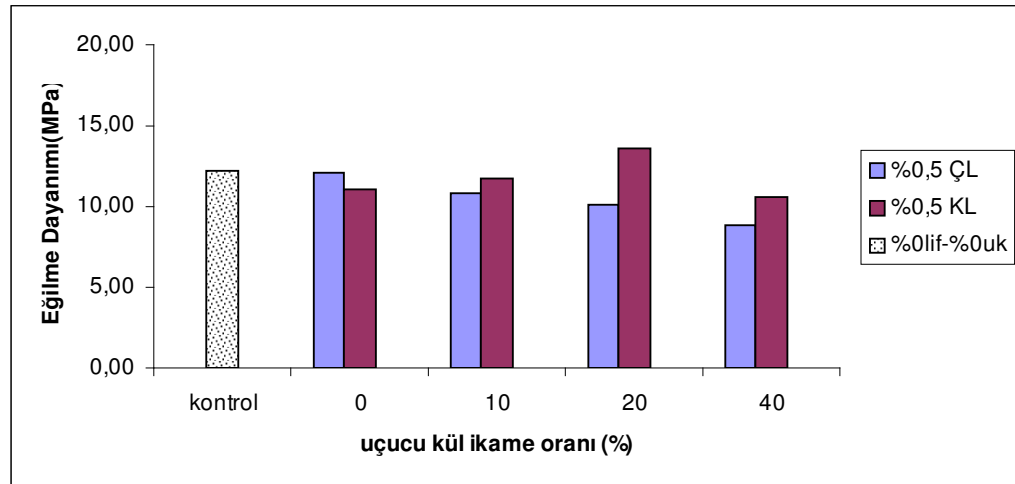
Bu bulgulara dayanarak, %40 uçucu kül olan karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı 150 gün sülfatta bekleyen %0,3 karbon lif hacimli numunenin olduğu saptanmıştır.

Şekil 3.34'den görüleceği üzere sülfatta 150 gün bekleyen karbon lifli numunelerde, 150 gün suda bekletilen numunelere kıyasla %20 uk-%0,5 lif hacimli numunede ve %40 uk-lifsiz numunede eğilme dayanımında azalma; diğer numunelerde artış görülmektedir. En fazla eğilme dayanım artışının %41 artışla %40 küllü, %0,5 karbon lif hacimli numune ve en fazla azalışın ise %36 azalma ile %40 küllü-lifsiz numune olduğu saptanmıştır.



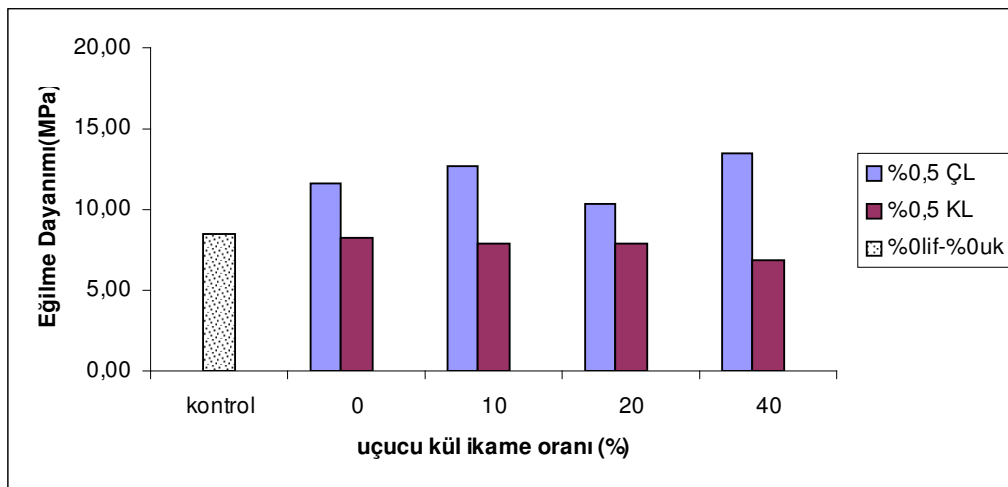
Şekil 3.34 Sülfatta 150 gün bekletilen karbon lifli örneklerin, 150 gün suda bekletilen karbon lifli örneklere kıyasla eğilme dayanımı değişimi(%)

Suda 28 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik lif hacimli numunelerin, %0,5 karbon lif hacimli numunelere kıyasla eğilme dayanımları Şekil 3.35'de verilmiştir.



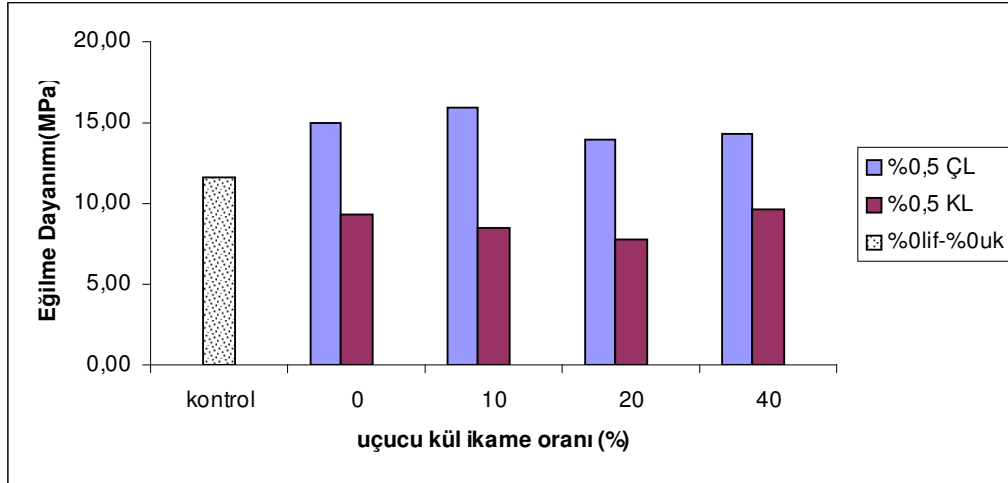
Şekil 3.35 Suda 28 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik ve karbon lifli numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

Suda 150 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik lif hacimli numunelerin , %0,5 karbon lif hacimli numunelere kıyasla eğilme dayanımları Şekil 3.36'da verilmiştir.



Şekil 3.36 Suda 150 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik ve karbon lifli numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

Sülfatta 150 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik lif hacimli numunelerin , %0,5 karbon lif hacimli numunelere kıyasla eğilme dayanımları Şekil 3.37’de verilmiştir.



Şekil 3.37 Sülfatta 150 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik ve karbon lifli numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

Çelik ve karbon lifin %0,5 lif hacminde %0, %10, %20, %40 uk oranında 28 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımları, kontrol (%0 lif-%0uk) numunesine göre daha düşüktür. 150 gün suda ve 150 gün sülfatta bekleyen %0,5 çelik lif hacmindeki numunelerin eğilme dayanımları kontrol (%0 lif-%0uk) numunesinden yüksek; %0,5 karbon lif hacmindeki numunelerinki ise düşüktür.

Çelik ve karbon lifin %0,5 lif hacminde %0-%10-%20-%40 uk oranlarında hem suda hem de sülfatta 150 gün bekleyen numuneler için çelik lifli örneklerin eğilme dayanımları daha yüksek çıkmıştır. 28 gün suda bekleyen %0,5 çelik ve karbon lif hacminde %10, %20, %40 uk oranlarında karbon lifli örneklerin eğilme dayanımları daha yüksektir.

3.5.2.4 Tokluk Değerleri

Lif içermeyen ve en yüksek lif hacmine sahip(%1,5çl ve %0,5kl), her orandaki uçucu kül ilaveli numunelerin tokluk değerleri, 13 cm mesnet açıklığında 3 noktalı eğilme deneyi sonucu elde edilen verilerden yük- deplasman eğrisi grafikleri çizildikten sonra, eğrilerin altında kalan alanın hesaplanması ile tespit edilmiştir. Tokluk değerlerinin belirlenmesinde 1,5 mm orta nokta deplasmanı referans kabul edilmiştir.

Lif içermeyen ve en yüksek lif hacmine sahip her orandaki uçucu kül ilaveli numuneler için hesaplanan tokluk değerleri ekler bölümünde çelik lifli numuneler için Tablo Ek A-13, Tablo Ek A-14'de; karbon lifli numuneler için Tablo Ek A-15, Tablo Ek A-16'da; sunulmaktadır.

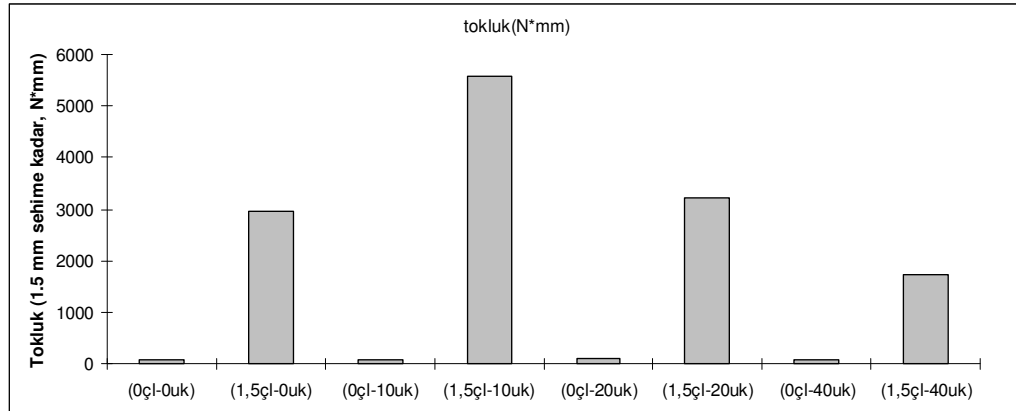
Çelik ve karbon lifli serilerde su ve sülfatta bekleyen numunelerde ilk çatlak dayanımları ile eğilme dayanımları aynı olduğu için grafikleri eğilme dayanımı bölümünde verilmiştir.

Tablo 3.16 'da çelik lifli serilerin su ve sülfatta bekleyen numunelerin hesaplanmış ortalama tokluk değerleri verilmektedir.

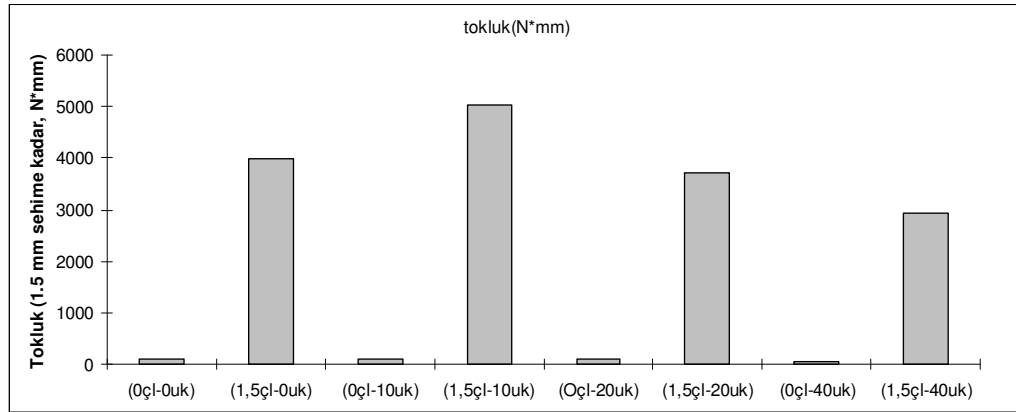
Tablo 3.16 Su ve sülfatta bekleyen çelik lifli serilerin tokluk değerleri

Seriler	Karışım kodu	Ortalama Tokluk(N.mm)
Çelik Lifli (suda)	(0çl-0uk)	67,3
	(1,5çl-0uk)	2967,8
	(0çl-10uk)	80,2
	(1,5çl-10uk)	5577,2
	(0çl-20uk)	94,5
	(1,5çl-20uk)	3228,1
	(0çl-40uk)	69,9
	(1,5çl-40uk)	1738
Çelik Lifli (sülfatta)	(0çl-0uk)	97,5
	(1,5çl-0uk)	3988,5
	(0çl-10uk)	96,9
	(1,5çl-10uk)	5031,4
	(0çl-20uk)	115,2
	(1,5çl-20uk)	3723,7
	(0çl-40uk)	39,7
	(1,5çl-40uk)	2938,1

Şekil 3.38’de suda bekleyen çelik lifli serilerin, Şekil 3.39’da ise sülfatta bekleyen çelik lifli serilerin tokluk değerleri verilmektedir.



Şekil 3.38 Suda bekleyen çelik lifli serilerin tokluk değerleri



Şekil 3.39 Sülfatta bekleyen çelik lifli serilerin tokluk değerleri

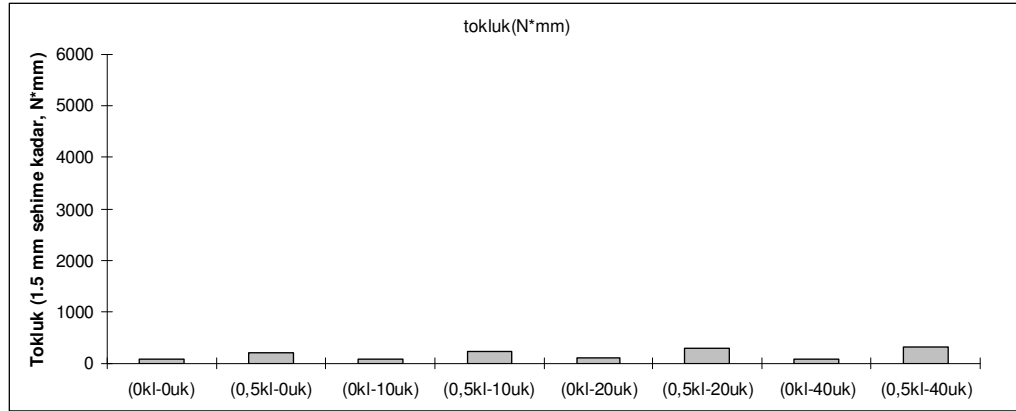
Şekil 3.38 ve Şekil 3.39'dan görüleceği üzere; uçucu kül içermeyen %1,5 çelik lif içeren numunenin tokluk değeri, sülfatta bekleyen suda bekleyene göre %34 artış; %10 uçucu kül içeren %1,5 çelik lif hacimli numunenin tokluk değeri, sülfatta bekleyen suda bekleyene göre %10 azalma; %20 uçucu kül içeren %1,5 çelik lif hacimli numunenin tokluk değeri, sülfatta bekleyen suda bekleyene göre %15 artış; %40 uçucu kül içeren %1,5 çelik lif hacimli numunenin tokluk değeri, sülfatta bekleyen suda bekleyene göre %70 artış saptanmıştır.

Tablo 3.17 'de karbon lifli serilerin su ve sülfatta bekleyen numunelerin hesaplanmış ortalama tokluk değerleri verilmektedir.

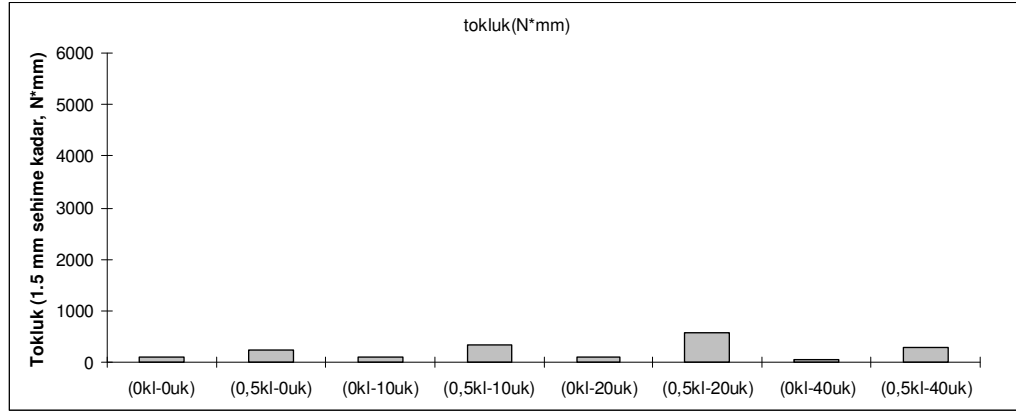
Tablo 3.17 Su ve sülfatta bekleyen karbon lifli serilerin tokluk değerleri

Seriler	Karışım kodu	Ortalama Tokluk(N.mm)
Karbon Lifli (suda)	(0kl-0uk)	67,3
	(0,5kl-0uk)	199,8
	(0kl-10uk)	80,2
	(0,5kl-10uk)	245,8
	(0kl-20uk)	94,5
	(0,5kl-20uk)	299,8
	(0kl-40uk)	69,9
	(0,5kl-40uk)	323
Karbon Lifli (sülfatta)	(0kl-0uk)	97,5
	(0,5kl-0uk)	244,1
	(0kl-10uk)	96,9
	(0,5kl-10uk)	334
	(0kl-20uk)	115,2
	(0,5kl-20uk)	588,8
	(0kl-40uk)	39,7
	(0,5kl-40uk)	285,5

Şekil 3.40'da suda bekleyen karbon lifli serilerin, Şekil 3.41'de ise sülfatta bekleyen karbon lifli serilerin tokluk değerleri verilmektedir.



Şekil 3.40 Suda bekleyen karbon lifli serilerin tokluk değerleri



Şekil 3.41 Sülfatta bekleyen karbon lifli serilerin tokluk değerleri

Şekil 3.40 ve Şekil 3.41'den görüleceği üzere; uçucu kül içermeyen %0,5 karbon lif hacim içeren numunenin tokluk değeri, sülfatta bekleyen suda bekleyene göre %22 artış; %10 uçucu kül içeren %0,5 karbon lif hacimli numunenin tokluk değeri, sülfatta bekleyen suda bekleyene göre %35 artış; %20 uçucu kül içeren %0,5 karbon lif hacimli numunenin tokluk değeri, sülfatta bekleyen suda bekleyene göre %96 artış; %40 uçucu kül içeren %0,5 karbon lif hacimli numunenin tokluk değeri, sülfatta bekleyen suda bekleyene göre %13 azalma saptanmıştır.

Grafikler lif bazlı incelendiğinde, çelik lif katkısının tokluk açısından iyileşme sağladığı görülmektedir. Tokluk değerinin yük-deplasman eğrisinin altında kalan alan olarak hesaplanması nedeniyle, elde edilen sonuçların karışımların yük-deplasman eğrisi karakterleri ile çok yakından bir ilgisi bulunmaktadır. Çelik mikroliflerin kopma yerine aşamalı olarak matristen sıyrılmaları nedeniyle yük-deplasman eğrisinin iniş eğimi yumuşak olmakta ve böylece altında kalan alan büyümektedir. Karbon mikrolifli serilerde ise tepe noktasına ulaşıldıktan sonra liflerin kopması sonucu ani düşüşler görülmekte ve bu nedenle yük-deplasman eğrisi altında kalan alan çelik lif tipinden küçük olmaktadır.

3.5.2.5 Boy Değişimleri

Sülfatlı suda bekleyen çelik ve karbon lifli numunelerin boy ölçüm değerlerinden elde edilen zamana bağlı boy değişimleri Tablo 3.18 ve Tablo 3.19'da sunulmuştur.

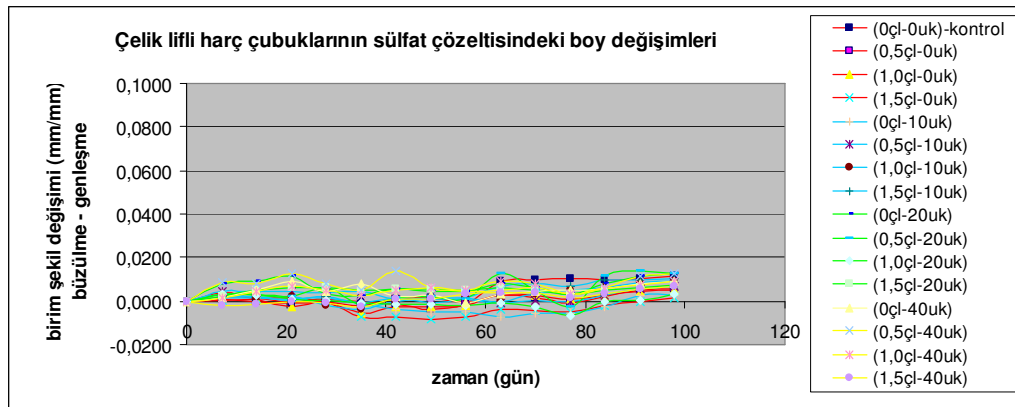
Boy ölçüm değerleri her bir seri için 2 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. 0.002 deplasman ölçen komparatör üzerinde, 285 mm'lik harç numunelerinin boy değişim değerleri: $\varepsilon = (\text{son ölçüm-ilk ölçüm}) \cdot 0.002/285 \cdot 100$ formülü ile bulunmuştur.

Tablo 3.18 Sülfatlı suda bekleyen çelik lifli serilerin zamana bağlı boy değişim değerleri(%)

Karışım kodu	Zaman (gün)							
	0	7	14	21	28	35	42	
(0çl-0uk)-kontrol	0,0000	0,0007	0,0000	-0,0007	0,0007	0,0000	-0,0014	
(0,5çl-0uk)	0,0000	0,0021	0,0014	-0,0007	0,0000	-0,0021	0,0007	
(1,0çl-0uk)	0,0000	0,0039	0,0007	-0,0025	0,0000	-0,0053	-0,0028	
(1,5çl-0uk)	0,0000	0,0004	0,0007	0,0014	-0,0004	-0,0074	-0,0070	
(0çl-10uk)	0,0000	0,0032	0,0018	0,0007	0,0014	-0,0014	-0,0039	
(0,5çl-10uk)	0,0000	0,0046	0,0042	0,0046	0,0039	0,0046	0,0011	
(1,0çl-10uk)	0,0000	0,0014	0,0014	0,0021	-0,0021	-0,0035	0,0000	
(1,5çl-10uk)	0,0000	0,0021	0,0021	0,0004	0,0021	-0,0007	0,0014	
(0çl-20uk)	0,0000	0,0077	0,0091	0,0112	0,0035	0,0028	0,0056	
(0,5çl-20uk)	0,0000	0,0035	0,0035	0,0021	0,0063	-0,0021	0,0014	
(1,0çl-20uk)	0,0000	0,0035	0,0028	0,0011	0,0004	-0,0011	-0,0014	
(1,5çl-20uk)	0,0000	0,0021	0,0049	0,0063	0,0063	0,0049	0,0056	
(0çl-40uk)	0,0000	0,0014	0,0049	0,0091	0,0042	0,0077	0,0021	
(0,5çl-40uk)	0,0000	0,0088	0,0077	0,0126	0,0077	0,0049	0,0140	
(1,0çl-40uk)	0,0000	0,0014	0,0042	0,0067	0,0049	0,0025	0,0049	
(1,5çl-40uk)	0,0000	-0,0021	-0,0014	-0,0004	-0,0007	-0,0025	0,0011	
Zaman (gün)								
49	56	63	70	77	84	91	98	
-0,0035	-0,0014	0,0091	0,0098	0,0105	0,0098	0,0105	0,0112	(0çl-0uk)-kontrol
0,0014	0,0000	0,0028	0,0014	-0,0007	0,0021	0,0049	0,0056	(0,5çl-0uk)
-0,0025	-0,0018	0,0032	0,0028	0,0007	0,0028	0,0046	0,0053	(1,0çl-0uk)
-0,0084	-0,0074	-0,0039	-0,0042	-0,0049	-0,0018	0,0000	0,0014	(1,5çl-0uk)
-0,0049	-0,0049	-0,0070	-0,0056	-0,0056	-0,0025	0,0028	0,0025	(0çl-10uk)
0,0011	0,0011	-0,0007	0,0004	0,0000	0,0028	0,0056	0,0070	(0,5çl-10uk)
0,0014	0,0014	0,0000	0,0035	0,0049	0,0063	0,0084	0,0091	(1,0çl-10uk)
-0,0011	0,0018	0,0067	0,0081	0,0070	0,0095	0,0095	0,0105	(1,5çl-10uk)
0,0042	0,0042	0,0077	0,0063	0,0035	0,0077	0,0112	0,0126	(0çl-20uk)
0,0021	0,0007	0,0126	0,0049	-0,0028	0,0112	0,0140	0,0126	(0,5çl-20uk)
-0,0014	-0,0021	-0,0011	-0,0028	-0,0067	0,0000	0,0004	0,0032	(1,0çl-20uk)
0,0056	0,0053	0,0060	0,0049	0,0032	0,0049	0,0060	0,0074	(1,5çl-20uk)
0,0028	-0,0007	0,0035	0,0042	0,0049	0,0056	0,0077	0,0091	(0çl-40uk)
0,0060	0,0042	0,0049	0,0060	0,0032	0,0060	0,0112	0,0126	(0,5çl-40uk)
0,0063	0,0049	0,0091	0,0081	0,0032	0,0056	0,0074	0,0091	(1,0çl-40uk)
0,0007	0,0032	0,0039	0,0039	0,0018	0,0035	0,0056	0,0070	(1,5çl-40uk)

Tablo 3.18’de çelik lifli numunelerin sülfatlı suda gösterdiği boy değişimleri görülmektedir. Negatif değerler büzülme, pozitif değerler ise şişmeyi temsil etmektedir. Tablodaki boy değişim değerlerinin birimi mm/mm’dir.

Şekil 3.42’den görüleceği üzere her hafta yapılan ölçümlerle 98 günlük değişimlere bakıldığında her set numunede büzülme ve genleşmeler konusunda deney süresinin kısa olmasından dolayı çok belirleyici bir sonuç alınamamıştır. Ölçülen değerlere göre en fazla genleşen harç serisi; %20 uçucu küllü lifsiz ve %0,5 lif hacimli numuneler ile %40 uçucu küllü %0,5 lif hacimli numune; en az genleşen ise uçucu külsüz %1,5 lif hacimli numunedir.



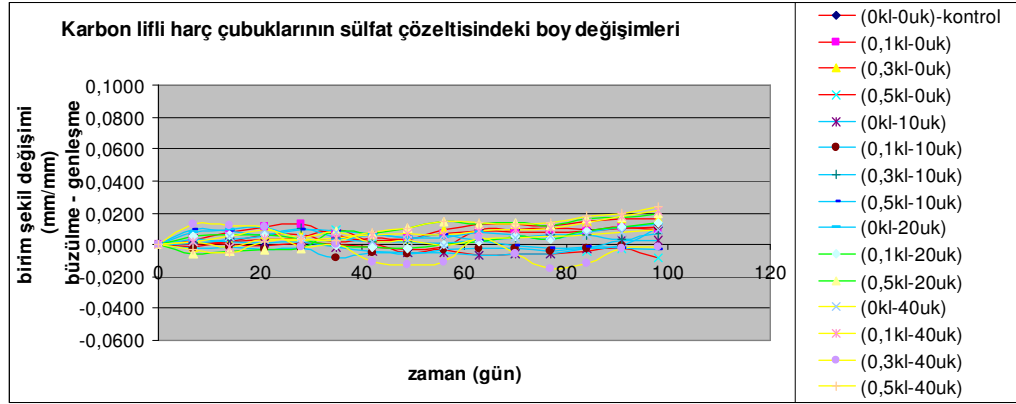
Şekil 3.42 Çelik lifli harç çubuklarının sülfat çözeltisindeki boy değişimleri

Tablo 3.19’da karbon lifli numunelerin sülfatlı suda gösterdiği boy değişimleri görülmektedir. Negatif değerler büzülme, pozitif değerler ise şişmeyi temsil etmektedir.

Tablo 3.19 Sülfatlı suda bekleyen karbon lifli serilerin zamana bağlı boy değişim değerleri(%)

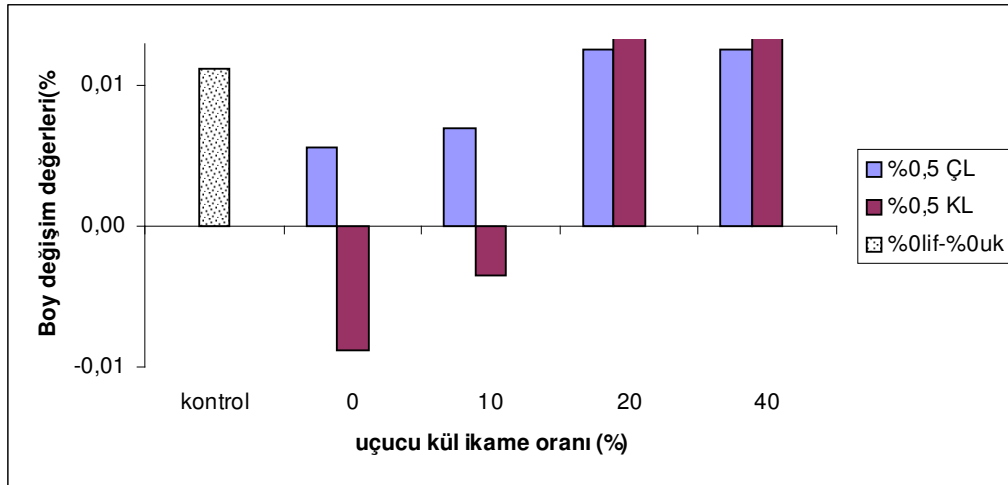
Karışım kodu	Zaman (gün)							
	0	7	14	21	28	35	42	
(0kl-0uk)-kontrol	0,0000	0,0007	0,0000	-0,0007	0,0007	0,0000	-0,0014	
(0,1kl-0uk)	0,0000	0,0025	0,0074	0,0112	0,0126	0,0063	0,0025	
(0,3kl-0uk)	0,0000	-0,0018	0,0021	0,0060	0,0060	0,0014	0,0046	
(0,5kl-0uk)	0,0000	0,0004	0,0021	0,0039	0,0046	0,0091	0,0011	
(0kl-10uk)	0,0000	0,0032	0,0018	0,0007	0,0014	-0,0014	-0,0039	
(0,1kl-10uk)	0,0000	-0,0025	-0,0018	-0,0032	-0,0025	-0,0081	-0,0049	
(0,3kl-10uk)	0,0000	0,0007	0,0035	0,0049	0,0105	0,0042	0,0021	
(0,5kl-10uk)	0,0000	0,0091	0,0084	0,0063	0,0098	0,0084	0,0070	
(0kl-20uk)	0,0000	0,0077	0,0091	0,0112	0,0035	0,0028	0,0056	
(0,1kl-20uk)	0,0000	0,0049	0,0056	0,0063	0,0035	-0,0007	-0,0014	
(0,3kl-20uk)	0,0000	-0,0035	-0,0063	-0,0158	-0,0211	-0,0312	-0,0312	
(0,5kl-20uk)	0,0000	-0,0056	-0,0042	-0,0035	-0,0021	0,0088	0,0070	
(0kl-40uk)	0,0000	0,0014	0,0049	0,0091	0,0042	0,0077	0,0021	
(0,1kl-40uk)	0,0000	0,0014	-0,0014	0,0035	0,0028	0,0042	0,0056	
(0,3kl-40uk)	0,0000	0,0126	0,0119	0,0112	-0,0014	0,0000	-0,0112	
(0,5kl-40uk)	0,0000	-0,0035	-0,0049	0,0021	0,0035	0,0028	0,0077	
Zaman (gün)								
49	56	63	70	77	84	91	98	
-0,0035	-0,0014	0,0091	0,0098	0,0105	0,0098	0,0105	0,0112	(0kl-0uk)-kontrol
0,0035	0,0070	0,0088	0,0081	0,0077	0,0084	0,0109	0,0091	(0,1kl-0uk)
0,0035	0,0091	0,0130	0,0126	0,0116	0,0147	0,0165	0,0165	(0,3kl-0uk)
-0,0053	-0,0032	-0,0070	-0,0060	-0,0056	-0,0039	-0,0028	-0,0088	(0,5kl-0uk)
-0,0049	-0,0049	-0,0070	-0,0056	-0,0056	-0,0025	0,0028	0,0025	(0kl-10uk)
-0,0056	-0,0032	-0,0025	-0,0025	-0,0042	-0,0021	-0,0004	0,0112	(0,1kl-10uk)
0,0021	0,0007	0,0028	0,0042	0,0063	0,0056	0,0035	0,0070	(0,3kl-10uk)
0,0042	0,0056	0,0028	-0,0007	-0,0028	-0,0014	-0,0028	-0,0035	(0,5kl-10uk)
0,0042	0,0042	0,0077	0,0063	0,0035	0,0077	0,0112	0,0126	(0kl-20uk)
-0,0028	0,0000	0,0021	0,0049	0,0035	0,0084	0,0112	0,0133	(0,1kl-20uk)
-0,0305	-0,0267	-0,0239	-0,0225	-0,0140	-0,0158	-0,0133	-0,0102	(0,3kl-20uk)
0,0102	0,0144	0,0130	0,0137	0,0123	0,0165	0,0172	0,0200	(0,5kl-20uk)
0,0028	-0,0007	0,0035	0,0042	0,0049	0,0056	0,0077	0,0091	(0kl-40uk)
0,0070	0,0063	0,0084	0,0091	0,0105	0,0133	0,0182	0,0211	(0,1kl-40uk)
-0,0126	-0,0105	0,0042	-0,0056	-0,0154	-0,0119	-0,0028	-0,0014	(0,3kl-40uk)
0,0105	0,0147	0,0133	0,0126	0,0140	0,0175	0,0196	0,0239	(0,5kl-40uk)

Şekil 3.43'den görüleceği üzere her hafta yapılan ölçümlerle 98 günlük değişimlere bakıldığında her set numunede büzülme ve genleşmeler konusunda deney süresinin kısa olmasından dolayı çok belirleyici bir sonuç alınmamıştır. Ölçülen değerlere göre en fazla genleşen harç serisi; %40 uçucu küllü %0,5 lif hacimli numune, en fazla büzülen ise %20 uçucu küllü %0,3 lif hacimli numunedir.



Şekil 3.43 Karbon lifli harç çubuklarının sülfat çözeltisindeki boy değişimleri

Sülfatlı suda 98 gün bekletilen %0,5 çelik lif hacimli numunelerin, %0,5 karbon lif hacimli numunelere kıyasla boy değişim değerleri (%) Şekil 3.44'de verilmiştir.

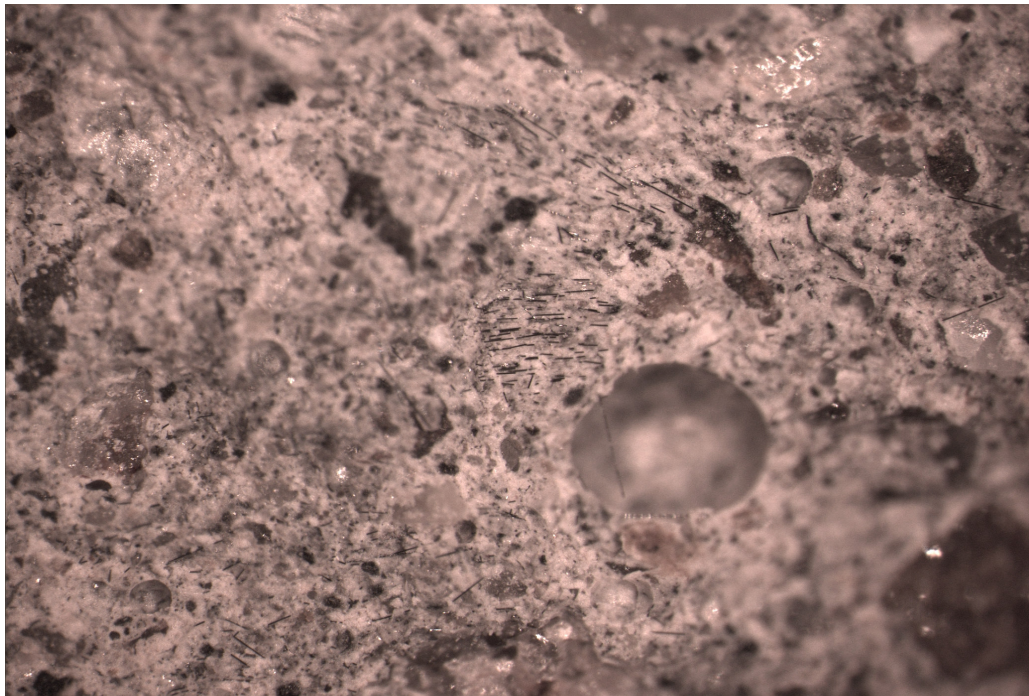


Şekil 3.44 Sülfatlı suda 98 gün bekletilen kontrol numunesi ile %0,5 çelik ve karbon lifli numunelerin boy değişim değerleri(%) karşılaştırılması

Çelik ve karbon lifin %0,5 lif hacminde, %20 ve %40 uk oranında 98 gün sülfatlı suda bekleyen numunelerin boy değişim değerleri (%), kontrol (%0 lif-%0 uk) numunesine göre daha yüksek, %10 uk oranında ise daha düşüktür.

3.5.2.6 Karbon Mikrolifin Mikroskop Görüntüleri

Şekil 3.45'de karbon mikroliflerin mikroskop altındaki görüntüsü görülmektedir.



Şekil 3.45 Karbon mikroliflerin mikroskop altındaki görüntüsü

Karbon mikrolif kullanılarak üretilen çimentolu kompozitlerin mikroskop altında görüntülerinin alınmasında, liflerin düzensiz dağılımı nedeniyle zorluklar yaşanmıştır. Görüntü alınabilmesi için gerekli ışığın, ışık kaynağına dik yönde olan lifleri yansıtması ve çimentolu kompozitin ışığı geçirecek inceliğe getirilebilmesinin de kompozit içindeki mikrolifler nedeniyle mümkün olmaması nedeniyle görüntü

analizi yapılamamıştır. Görüntü Leica Stereo S8 APO markalı cihaz ile 40 kez büyütülerek alınmıştır.

Karbon mikroliflerin mikroskop altındaki görüntüsü ile, deney sonuçları doğrultusunda ortaya çıkan, karbon liflerin koptuğu yönündeki düşünce desteklenmiştir.

BÖLÜM DÖRT

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen genel sonuçlar ve ileride yapılacak çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

Yayılma çapı: Harçların yayılma çapları, mikroliflerin özgül yüzeyi ve lif çapları ile belirgin bir şekilde ilişkilidir. Karbon mikroliflerin, çelik mikroliflere göre lif çaplarının küçük ve özgül yüzeylerinin de yüksek olması nedeniyle, karbon mikrolif kullanılan serilerde işlenebilme problemi daha fazladır. Mikrolif oranının artırılması sonucu harçların yayılma çapında azalmalar görülmüştür. Aynı zamanda uçucu kül oranının artması ile de yayılma çaplarında azalma olduğu saptanmıştır.

Eğilme sonrası basınç dayanımı: 28 gün suda bekleyen numunelerde basınç dayanımının, uçucu külsüz ve uçucu küllü harçlara çelik lif katkısı ile arttığı saptanmıştır. 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları beklenildiği gibi, 28 gün suda bekleyen numunelere göre artmıştır. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin basınç dayanımları, 150 gün suda bekleyen numunelere göre %40 uçucu kül ilavesi ile artış göstermiş, diğer uçucu kül oranlarında dalgalanmalara (artış ve azalmalar) uğramıştır. Özellikle yüksek uçucu kül oranlarında sodyum sülfat etkisinde kalan örneklerin basınç dayanımlarındaki artış literatürdeki benzer çalışmalar ile uyumludur.

Basınç dayanımı açısından en başarılı sonuç; 150 gün sülfatlı suda bekleyen külsüz %1,5 çelik lif hacimli numunedir. Her uçucu kül oranı için de yine %1,5 çelik lif hacimli 150 gün sülfatlı suda bekletilmiş numune en yüksek basınç dayanımına sahiptir.

Çelik lifli serilerde en fazla basınç dayanımı artışı %24 ile %40 uçucu küllü, %1,5 çelik lif hacimli numune; en fazla azalışı ise %10 uçucu küllü, %1 çelik lif hacimli numune olduğu gözlenmiştir.

Karbon lifli örneklerde ise sülfatta 150 gün bekletilen numunelerde, suda 150 gün bekletilen numunelere kıyasla uçucu külsüz-%0,1 ve %0,3 lif hacimli numunede, %10 uçucu küllü-%0,1 ve %0,3 lif hacimli numunede, %20 uçucu küllü-%0, %0,1 , %0,3 , %0,5 lif hacimli numunede basınç dayanımında artış olduğu; diğer numunelerde azalma olduğu görülmektedir. En fazla basınç dayanımı artışını %18 ile gösteren %20 uçucu küllü, lifsiz numunenin olduğu, en fazla azalışı ise %16 ile %40 uçucu küllü, %0,3 lif hacmi içeren numunenin olduğu görülmüştür.

Çelik ve karbon lifin %0,5 lif hacminde %10, %20, %40 uk oranında 28 gün suda ve 150 gün suda bekleyen numunelerin basınç dayanımları kontrol (%0lif-%0uk) numunesine göre daha düşüktür. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerde ise %10uk-%0,5çl ve %20uk-%0,5kl içeren numunenin basınç dayanımı kontrol numunesine göre yüksek, diğerleri daha düşüktür.

Çelik ve karbon lifin %0,5 lif hacminde %10 uk oranında hem suda hem de sülfatta 150 gün bekleyen numuneler için çelik lifli örneklerin basınç dayanımı daha yüksek çıkmıştır. Aynı lif oranında %20 ve %40 uk oranlarında ise karbon lifin basınç dayanımı daha yüksektir. Yüksek uk oranlarında karbon lifin daha iyi performans gösterdiği anlaşılmaktadır.

Eğilme dayanımı: Uçucu kül ve lif katkılı olan ve 28 gün suda bekleyen numunelerde eğilme dayanımları azalmıştır. 150 gün suda ve 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımı değerlerinde dalgalanmalar(artış ve azalmalar) olmuştur. 150 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımları, 28 gün suda bekleyen numunelere göre uçucu külsüz-çelik lif hacmi %0 ve %0,5 ve %10 uçucu küllü-lif hacmi %0 ve %20 uçucu küllü-çelik lif hacmi %0 olan numunelerde azalma;diğerlerinde artış gözlenmiştir. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımları, 150 gün suda bekleyen numunelere göre %40

uçucu küllü ve çelik lif hacmi %0 ve %1 olan numunelerde azalma; diğerlerinde artış göstermiştir.

Sülfatlı suda 150 gün bekleyen numunelerde, %0,5 ve %1 çelik lif hacimli numunelerin eğilme dayanımları artarken, %1,5 çelik lif hacimli numunenin eğilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bu durumu lifin yayılma çapındaki düşüşün işlenebilirliği azaltması sonucu numunenin iyi sıkıştırılmamasına bağlayabiliriz.

Eğilme dayanımı açısından en başarılı sonuç; 150 gün sülfatta bekleyen %10 küllü, %0,5 çelik lif hacmi içeren numune ve uçucu külsüz %1 çelik lif hacmi içeren numunedir.

Sülfatta 150 gün bekleyen numunelerde,150 gün suda bekleyen numunelere kıyasla eğilme dayanımlarında %40 uk- lifsiz ve %1 çelik lif hacimli numunede azalma, diğerlerinde artış olduğu gözlenmektedir. En fazla eğilme dayanımı artışını %38 artışla , %0 uçucu küllü-lifsiz numune; en fazla azalışın ise %36 azalma ile %40 uk-lifsiz numune olduğu saptanmıştır.

Uçucu kül ve karbon lif artışı ile eğilme dayanımı değerlerinde dalgalanmalar olmuş, kesin bir yargıya varılamamıştır. 150 gün suda bekleyen numuneler, 28 gün suda bekleyen numunelere göre %0,1 karbon lif hacmi için artış, diğer lif hacimleri için azalma göstermiştir. 150 gün sülfatta bekleyen numunelerin eğilme dayanımları, 150 gün suda bekleyen numunelere göre literatürdeki benzer çalışmalarda olduğu gibi genelde artışa uğramıştır.

Sülfatlı suda 150 gün bekleyen numunelerde, %0,1 ve %0,3 karbon lif hacimli numunelerin eğilme dayanımları artarken, %0,5 karbon lif hacimli numunenin eğilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bu durumu lifin yayılma çapındaki düşüşün işlenebilirliği azaltması sonucu numunenin iyi sıkıştırılmamasına bağlayabiliriz.

Eğilme dayanımı açısından en başarılı sonuç; 150 gün sülfatta bekleyen %0,3 karbon lif hacimli, %10 kül içeren harç numunesidir.

Sülfatta 150 gün bekleyen karbon lifli numunelerde, 150 gün suda bekletilen numunelere kıyasla %20 uk-%0,5 lif hacimli numunede ve %40 uk-lifsiz numunede eğilme dayanımında azalma; diğer numunelerde artış görülmektedir. En fazla eğilme dayanım artışının %41 artışla %40 uçucu küllü, %0,5 karbon lif hacimli numune ve en fazla azalışın ise %36 azalma ile %40 uçucu küllü-lifsiz numune olduğu saptanmıştır.

Çelik ve karbon lifin %0,5 lif hacminde %0, %10, %20, %40 uk oranında 28 gün suda bekleyen numunelerin eğilme dayanımları, kontrol (%0 lif-%0uk) numunesine göre daha düşüktür. 150 gün suda ve 150 gün sülfatta bekleyen %0,5 çelik lif hacmindeki numunelerin eğilme dayanımları kontrol (%0 lif-%0uk) numunesinden yüksek; %0,5 karbon lif hacmindeki numunelerinki ise düşüktür.

Çelik ve karbon lifin %0,5 lif hacminde %0-%10-%20-%40 uk oranlarında hem suda hem de sülfatta 150 gün bekleyen numuneler için çelik lifli örneklerin eğilme dayanımları daha yüksek çıkmıştır. 28 gün suda bekleyen %0,5 çelik ve karbon lif hacminde %10, %20, %40 uk oranlarında karbon lifli örneklerin eğilme dayanımları daha yüksektir.

Tokluk: Lifsiz ve en fazla lif hacmine sahip örneklerin(çelik lifli serilerde %1,5, karbon lifli serilerde %0,5 lif hacimleri için) tokluk değerleri hesaplanmış olup, çelik lif katkısının tokluk değerlerinde daha fazla iyileşme sağladığı görülmüştür.Suda ve sülfatta 150 gün bekletilen numunelerde en yüksek tokluk değerine %1,5 çelik lif hacimli %10 uçucu kül katkılı örnekte ulaşılmıştır. Sülfatlı suda 150 gün bekletilen çelik lifli örneklerin tokluk değerleri, 150 gün suda bekletilen örneklere kıyasla %1,5 çelik lif hacmi için ,%10 uçucu kül oranında azalma, %20 ve %40 oranlarında ise artış göstermiştir. Karbon lif katkılı

numunelerin tokluk değerlerinin lif içermeyen numunelerin tokluk değerlerine yakın olduğu görülmüş, dolayısıyla karbon lifin önemli derecede lif etkisi göstermediği kanaatine varılmıştır.

Yapılan deneylerden, elik mikroliflerin karbon mikroliflere nazaran daha rijit olması ve eğilme yükü altında kopma yerine aşamalı olarak sıyrılması sonucu yük-deplasman eğrisinin iniş eğiminin yumuşak olduğu görülmüştür. Böylece yük-deplasman eğrisi altında kalan alan da karbon lifli serilerdekine göre daha büyük olmaktadır. Karbon mikroliflerin, düşük lif çapları nedeniyle artan eğilme yükü altında koptuğu ve yük-deplasman eğrisinde maksimum yükten sonra ani düşüşler olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle karbon mikroliflerin tokluk enerjileri elik mikrolifli serilere göre daha düşük kalmaktadır.

Boy değişimleri: Sülfatlı suda bekletilen elik ve karbon lifli numunelere her hafta yapılan ölçümlerle 98 günlük değişimlere bakıldığında her set numunede büzülme ve genleşmeler konusunda deney süresinin kısa olmasından dolayı çok belirleyici bir sonuç alınamamıştır. Ölçülen değerlere göre elik lifli serilerde en fazla genleşen harç serisi; %20 uçucu küllü lifsiz ve %0,5 lif hacimli numuneler ile %40 uçucu küllü %0,5 lif hacimli numune; en az genleşen ise uçucu külsüz %1,5 lif hacimli numunedir. Karbon lifli serilerde ise; en fazla genleşen harç serisi; %40 uçucu küllü %0,5 lif hacimli numune, en fazla büzülen ise %20 uçucu küllü %0,3 lif hacimli numunedir.

elik ve karbon lifin %0,5 lif hacminde, %20 ve %40 uk oranında 98 gün sülfatlı suda bekleyen numunelerin boy değişim değerleri (%), kontrol (%0 lif-%0 uk) numunesine göre daha yüksek, %10 uk oranında ise daha düşüktür.

Gerçekleştirilen bu çalışmada elik ve karbon mikroliflerin çeşitli lif dozajlarında, ve çeşitli uçucu kül oranlarında kullanımının imento harçların sülfata dayanıklılık özelliklerine etkisi incelenmiştir. İleriki çalışmalarda;

- değişik tipteki çimentoların, özellikle sülfata dayanıklı çimentonun kullanımının,
- farklı mineral katkı kullanımının,
- farklı lif çeşitlerinin tekil ve karma olarak kullanımının,

lifli çimento harçların sülfata dayanıklılık özelliklerine etkilerinin incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

ACI Committe 544.1R-96, (November 1973). “*State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete*”, ACI Journal, pp.729-744.

ACI Committe 544.3R-93, (1998). “*Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete*”, ACI Journal.

ACI Committe 544.4R-88, (1999). “*Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*”, ACI Journal.

Almussalam, A. A., Maslehuddin M., Abdul-Waris, M., Dakhil, F. H., & Al-Amoudi, O. S. B. (1999). “*Plastic shrinkage cracking of blended cement concretes in hot environments*”. *Magazine of Concrete Research*, 51 (4), 241-246.

Altun, F., Özcan, D.M., Vekli, M. ve Karahan, O., “*Çelik Lif Katkılı C20 Betonunun Mekanik Özelliklerinin Deneysel Araştırılması*” Afyon Kocatepe Üniversitesi Dergisi, 4:31-40., 2004

Arslan, A.(1993). “ *Çelik Lifli Betonların Özellikleri ve Kullanım Potansiyeli* ”, Türkiye Mühendislik Haberleri, sayı 369, s.29-33.

Arslan, A. ve Aydın, A.C. (1999). “*Lifli Betonların Genel Özellikleri*”, Hazırbeton, Kasım-Aralık, s.67-75.

Arslan, A. ve Aydın, A., (1999). “*Lifli Betonların Darbe Etkisi Altında Genel Özellikleri*” Beksa Lifli Beton Semineri, Sabancı Center, İstanbul.

ASTM1116-C-91. (1991)., Annual Book of ASTM Standarts.

ASTM C 1018/85. (1985)., Annual Book of ASTM Standarts.

ASTM C-1012-95a (1995).,Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. American Society for Testing and Materials, Committee C-1, Subcommittee C01.29

- Atıf, C. D., Kılıç, A., & Sevim, U. K. (2004). “*Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash.*” *Cement and Concrete Research*, 34, 99-102.
- Augl, J. M. , AD Report 780430/5 GA, 1974, p. 37.
- Bacon, R., Tang,M.M., *Carbon* 2 (1964),p. 211.
- Bansel, C., Donnet, J. B., “*Carbon Fibers*”, New York, 1990.
- Baradan, B. (2000). “*Yapı Malzemesi I*” (4. Baskı). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Baradan, B. (2000). “*Yapı Malzemesi II*”, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No:207, İzmir.
- Bartos, P. (1981). Rewiev Paper: “*Bond in Reinforced Cement and Concretes*”, *International Journal of Cement Composites*, Vol:3, No:3, pp. 159-177.
- Beddar, M., Belgaraa, L., & Ayadat, T., “*Optimising of Steel Fiber Reinforced Concrete Mix Design* ” *Journal of Civil Engineering Research and Practice*, 1(2):67-75, 2004
- Bentur, A., & Mindness, S. (1990). “*Fibre Reinforced Cementitious Composites*” Elsevier Applied Science, London and Newyork.
- Betterman, L. R., Ouyang, C. and Shah, S. P., “*Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar*”, *Advanced Cement Based Materials*, 2, pp. 53-61, 1995
- “*Beton Donatıları*”, Haziran 2007, <http://www.draco.com.tr>
- Biricik , H. & Aköz ,F. (2000) “ *Sodyum Sülfat Çözeltisinin Buğday Sapı Külü Katkılı ve Katkısız Harçlara Etkileri, Çimento ve Beton Dünyası*” (*Cement and Concrete World*), Vol:5 No:26

- Brown,P.W. (1981) “*An Evaluation of The Sulfate Resistance of Cements in a Controlled Environment*”, Cement and Concrete Research , Vol.11, pp. 719-727,
- Damodaran, S., P. Desai and A. S . Abhıraman, *J. Text. Inst.*, (1990),p. 384.
- Dramix Çelik Tel Donatılı Betonlar İçin Tasarım Esasları, Beksa A.Ş.
- “*Dramix-Beton donatısı için çelik teller*”, Haziran 2007,<http://www.beksa.com.tr>
- D.S.I. (1994). “*Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton*”, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Yayın No: MLZ-878.
- Economy J., Wohrer,L., “*In Proceedings of 2nd Shirley International Seminar*” (Shirley Institute, Manchester, England, Sept. 1970).
- Edison T., US Patent No. 223898 (Jan.1880).
- Ersoy, H.Y. (2001). “*Kompozit Malzeme*”, Literatür Yayınları, No : 66, İstanbul.
- Erbaş, M., (1999). “*Lif Donatılı Betonlar*”, Hazır Beton Dergisi, Ocak-Şubat, s.93-95.
- Erdoğan, T.Y., (2003). “*Beton*”, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayınları, Mayıs, Ankara.
- Fitzer, E., *ibid.*, 27, (1989)
- Fanella, D.A., Naaman, A.E., (1985). “*Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Concrete in Compression*”, ACI Journal, Vol.82, No.4, pp. 475-483
- Irassar, E.F., Di Maio, A.and Batic, O.R.(1996) “*Sulfate attack on concrete with mineral admixtures*” Cement and Concrete Research, 26(1), pp. 113-123
- John, D.A., (1982). “*An Usual Case of Ground Water sulphate Attack on Concrete*”, Cement and Concrete Research, 12, 663-689

- Kalyoncu, H. (2007). “Çelik, karbon ve polivinil alkol mikroliflerin tekil ve karma olarak kullanımının çimento harçların mekanik özelliklerine etkisi” Yüksek lisans tezi, D. E. Ü.
- Khatri, R.P., Sirivivatnanon, V., & Yang, J.L. (1997) “Role of Permeability in Sulfate Attack”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, p. 1179-1189
- Kollek, J., Lumley, J.S., (1990) “*Sulfate Resistance of SRPC and Portland Slog Cements, Durability of Building Materials*”, Proc. of 5th Symp., Brighton
- Kumar, S., Anderson D.P., Crasto, S., *ibid.* 28, 1993
- Kützing, L., “*Use of Fiber Cocktails to Increase Ductility of High Performance Concrete*”, Annual Civil Eng. Report (LACER), LACER No. 2, pp. 125-133, Leipzig, 1997.
- Look, T.S., Xiao, J.R., (1999). “*Flexural Strength Assessment of Steel Fiber Reinforced Concrete*”, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.11, No.3, pp. 188-196.
- Lorenzo, M.P., Goni, S. Ve Guerrero, A. (2003). Role of aluminous component of fly ash on the durability of cement-fly ash pastes in marine environment. *Waste Management*.
- Mehta, P.K., & Monteiro, P.J.M. (1997). *Concrete; “ Microstructure, Properties, and Materials ”*, Indian Edition, Indian Concrete Institute Pres.
- Miao, C., Tian, Q., & Sun, W., (2002) “ Effect of Sulfate Solution on the Frost Resistance of Concrete with and without Steel Fiber Reinforcement. ” *Cement and Concrete Research*, 32(1):31-34.
- Obla, K. H., Hill, R. L., Thomas, M. D. A., Shashiprakash S. G. & Perebatova O. (2003). “*Properties of concrete containing ultra-fine fly ash.* ” *ACI Materials Journal*, 100 (5), 426-433.

- Owens, P.L., (1979) "Fly Ash and its Usage in Concrete" The Journal of Concrete Society, England, 13(7):21-26.
- Özyurt, N., Taşdemir, C., Ilki, A., Şengül, Ö. ve Taşdemir, M.A., "*Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı*", 2001.
- Papadakis, V. G. (1999). "*Effect of fly ash on Portland cement systems.*" Cement and Concrete Research, 29, 1227-1736.
- Park, Y.S., Suh, J.K., Lee, J.H., & Shin, Y.S.(1999) " Strength Deterioration Of High Strength Concrete in Sulfate Environment ", Cement and Concrete Research., Vol:29, pp.1397-1402
- Pierre, P., Pleau, R., & Pigeon, M. (1999). "*Mechanical Properties of Steel Microfiber Reinforced Cement Pastes and Mortars*", Journal of Materials in Civil Engineering, November, pp. 317-324.
- Rossi, P., "*Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPRC): An Overview*", Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), pp. 87–100, Lyon, France, 2000
- Qian, C., Stroven, P., Dalhuisen, D. H., & Moczko, A., "*Fracture Properties and Acoustic Emission Response of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre Reinforced Concrete*", Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), pp. 491–500, Lyon, France, 2000.
- Santhanam, M., Cohen, M.D., & Olek, J. (2001) "Sulfate Attack Research " Cement and Concrete Research, pp.845-851
- Shinohara, H., Sato, T., Saito, F., Journal of Materials Science, V. 28, 1993
- Shah, S.P., & Rangan, B.V. (1971). "*Fiber Reinforced Concrete Properties*", ACI Materials Journal, Title No:68-14, pp. 126-136.

- Sideris, K.K., & Sava, A.E (2002) “ *Resistance of plain and blended cements under different sulfate environments*” Concrete for Extreme Conditions, Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK
- Smith, W.S., “*Engineered Materials Handbook-Vol.1*” (ASM International, Ohio, 1987) p.49.
- Swammy, R.N., & Mangat, P.S. (1974). “*A Theory for the Flexural Strength of Fiber Reinforced Concrete*” Cement and Concrete Research, Vol:4, No:2, pp. 313-325.
- Tabak, V., (2004), “*Çelik Lifli Betonda Lif ve Lif Boy/Çap Oranlarının Değişiminin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi*”, Yüksek Lisans Tezi, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, İzmir.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., ve Yerlikaya, M. (2003). “*Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar*”, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı:426, s.76-84.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N. ve Yerlikaya, M., (2004). “*Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler*”, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, Haziran, İstanbul.
- Tokyay, M., Ramyar, K. ve Turanlı, L. (1991). “*Polipropilen ve Çelik Lifli Yüksek Dayanımlı Betonların Basınç ve Çekme Yükleri Altındaki Davranışları*”, Yüksek Dayanımlı Betonda II. Ulusal Teknik Kongre Bildiriler Kitabı, İstanbul, s. 303-311.
- Tunçbilek, B., (1998) “ *Effects of Some Turkish Fly Ashes on the Properties of Portland Cement-Fly Ash Pastes and Mortars* ”METU The Department of Civil Engineering, Master of Science, Ankara, 118p.
- TS 10513. (1992). “*Çelik Teller-Beton Takviyesinde Kullanılan*”, Türk Standartları Enstitüsü.

- TS 10514. (1992). “*Beton-Çelik Tel Takviyeli-Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları*”, Türk Standartları Enstitüsü.
- TS 10515. (1992). “*Beton-Çelik Tel Takviyeli-Eğilme Mukavemeti Deney Metodu*” Türk Standartları Enstitüsü.
- Türkel, S. (2004).“*Bağlayıcı Maddeler.*”Bağlayıcı Maddeler yüksek lisans dersi ders notları, D. E. Ü.(Basılmamış)
- Uğurlu, A., (1994): “*Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Özellikleri ve Su Yapılarında Kullanılması*”, DSİ Teknik Bülteni, Sayı:80, s.17-25.
- Ural, F. (1999). “*Beton Dayanımında Katkı Ve Fiberlerin Rolü*”, Hazırbeton, Ocak-Şubat, s. 65-66.
- “*What is Carbon Fiber*”, Ocak 2007, <http://www.zoltek.com>.
- Wu, H. C., & Li, V. C. (1997). “*Basic interfacial characteristics of polyethylene fiber/cement composites and its modification by plasma.*” Proc., 5th Int. Symp. On Brittle Matrix Compos. (BMC-5), Warsaw, Poland, 14–23.
- Yazıcı, Ş. (2004).“*Özel betonlar.*” Özel Betonlar yüksek lisans dersi ders notları, EÜ
- Yazıcı, H., Türkel, S., Yiğiter, H. ve Aydın, S. (2003). Beton içindeki bağlayıcı miktarının betonun deniz suyuna dayanıklılığının etkisi. 5.Ulusal Beton Kongresi Bildiriler kitabı, 27-36.İstanbul.
- Yerlikaya, M., (1998). “*Çelik Teller İle Donatılmış Beton Elemanların Düşey Yük Altında Davranışları*”, Hazır Beton Dergisi, Eylül-Ekim, s. 72-73.
- Yiğiter, H., (2002). “*Yüksek Performanslı Betonların Süneklik Özelliğinin Araştırılması*”, Yüksek Lisans Tezi, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, İzmir.

EKLER

Tablo Ek A-1 28 gün suda bekleyen çelik lifli serilerin eğilme sonrası basınç dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)		Ortalama (MPa)
(0çl-0uk)	56,4	56,7	54,7
	54,7	53,8	
	52,3	54,3	
(0,5çl-0uk)	62,3	60,5	60,0
	59,2	57,5	
	61,3	59,4	
(1,0çl-0uk)	61,1	55,9	56,1
	61,7	55,6	
	55,4	46,9	
(1,5çl-0uk)	59,3	57,8	60,7
	63,8	60,1	
	59,3	63,9	
(0çl-10uk)	54,5	52,9	53,1
	52,4	52,3	
	54,8	51,8	
(0,5çl-10uk)	53,2	54,2	54,0
	55,8	54,7	
	55,1	51,2	
(1,0çl-10uk)	53,1	56,2	54,9
	53,4	54,9	
	56,9	54,9	
(1,5çl-10uk)	50,9	57,4	57,1
	60,8	58,7	
	53,1	61,4	
(0çl-20uk)	38,2	42,2	38,8
	35,9	38,5	
	36,7	41,2	
(0,5çl-20uk)	46,2	44,4	43,3
	41,3	43,7	
	44,2	39,7	
(1,0çl-20uk)	48,3	41,9	49,1
	50,6	52,9	
	48,9	52,2	
(1,5çl-20uk)	50,1	49,3	50,1
	51,1	50,4	
	48,5	51,2	
(0çl-40uk)	25,1	25,6	28,0
	26,3	28,2	
	29,7	33,1	
(0,5çl-40uk)	30,1	33,5	32,6
	31,5	32,3	
	33,7	34,6	
(1,0çl-40uk)	38,7	38,7	38,7
	39,9	39,9	
	37,7	37,4	
(1,5çl-40uk)	37,8	39,5	38,9
	40,1	40,3	
	38,9	36,6	

Tablo Ek A-2 150 gün suda bekleyen çelik lifli serilerin eğilme sonrası basınç dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)		Ortalama (MPa)
(0çl-0uk)	63,8	63,5	70,4
	64,9	67,7	
	76,9	85,5	
(0,5çl-0uk)	69,5	70,0	67,7
	66,6	66,1	
	67,4	66,3	
(1,0çl-0uk)	70,5	66,4	73,9
	76,9	79,4	
	78,9	71,1	
(1,5çl-0uk)	63,5	57,9	74,1
	81,1	80,1	
	81,8	80,1	
(0çl-10uk)	58,7	64,5	65,7
	66,7	64,7	
	71,2	68,2	
(0,5çl-10uk)	69,4	70,7	69,4
	69,5	69,1	
	67,9	69,6	
(1,0çl-10uk)	80,0	73,8	75,8
	75,5	77,6	
	74,9	72,8	
(1,5çl-10uk)	70,3	79,8	76,1
	78,2	75,8	
	76,8	75,4	
(0çl-20uk)	53,6	45,0	49,8
	49,6	41,5	
	53,5	55,4	
(0,5çl-20uk)	61,3	60,0	60,7
	64,4	60,7	
	57,7	60,1	
(1,0çl-20uk)	71,8	78,2	74,6
	74,1	74,7	
	74,6	74,3	
(1,5çl-20uk)	77,9	69,8	74,8
	70,1	78,9	
	75,7	76,3	
(0çl-40uk)	57,4	56,7	54,0
	56,9	53,0	
	50,3	49,8	
(0,5çl-40uk)	51,9	52,2	54,7
	50,8	48,5	
	62,9	61,7	
(1,0çl-40uk)	58,4	51,0	55,3
	60,8	60,7	
	50,5	50,5	
(1,5çl-40uk)	49,2	56,5	56,0
	59,2	56,1	
	58,4	56,5	

Tablo Ek A-3 150 gün sülfatta bekleyen çelik lifli serilerin eğilme sonrası basınç dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)		Ortalama (MPa)
(0çl-0uk)	69,3	66,7	67,1
	70,8	70,6	
	62,7	62,2	
(0,5çl-0uk)	67,2	71,2	68,3
	70,5	68,1	
	68,9	63,8	
(1,0çl-0uk)	69,4	71,6	73,0
	74,7	70,4	
	75,9	75,8	
(1,5çl-0uk)	86,7	84,6	86,4
	89,4	88,0	
	86,3	83,5	
(0çl-10uk)	65,4	69,3	64,5
	64,7	68,3	
	61,5	57,5	
(0,5çl-10uk)	68,2	69,5	69,2
	71,2	70,9	
	70,6	64,7	
(1,0çl-10uk)	67,6	65,9	68,7
	71,4	71,2	
	65,4	70,8	
(1,5çl-10uk)	90,5	86,7	86,2
	87,4	95,6	
	79,8	76,9	
(0çl-20uk)	54,0	58,7	58,7
	56,8	62,6	
	59,6	60,7	
(0,5çl-20uk)	61,9	61,8	57,8
	56,9	54,5	
	58,7	53,0	
(1,0çl-20uk)	68,1	71,7	69,7
	66,3	69,9	
	71,6	70,3	
(1,5çl-20uk)	77,3	84,7	82,7
	79,6	85,9	
	81,1	87,6	
(0çl-40uk)	52,9	52,2	54,7
	50,4	61,9	
	56,9	53,9	
(0,5çl-40uk)	50,8	57,8	54,9
	53,4	57,9	
	56,4	53,0	
(1,0çl-40uk)	58,3	65,3	61,8
	61,8	61,0	
	62,4	62,0	
(1,5çl-40uk)	67,1	75,4	69,7
	69,9	74,0	
	65,6	66,1	

Tablo Ek A-4 28 gün suda bekleyen karbon lifli serilerin eğilme sonrası basınç dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)		Ortalama (MPa)
(0kl-0uk)	56,4	56,7	54,7
	54,7	53,8	
	52,3	54,3	
(0,1kl-0uk)	40,9	37,2	42,7
	44,2	39,8	
	43,7	50,3	
(0,3kl-0uk)	30,0	36,5	38,9
	42,8	42,1	
	39,6	42,5	
(0,5kl-0uk)	44,2	47,5	42,2
	39,2	37,8	
	41,1	43,2	
(0kl-10uk)	54,5	52,9	53,1
	52,4	52,3	
	54,8	51,8	
(0,1kl-10uk)	37,5	40,6	39,5
	42,3	37,3	
	39,6	39,4	
(0,3kl-10uk)	38,9	36,4	38,9
	34,9	35,7	
	45,2	42,0	
(0,5kl-10uk)	49,6	48,4	41,8
	41,8	35,6	
	38,3	37,1	
(0kl-20uk)	38,2	42,2	38,8
	35,9	38,5	
	36,7	41,2	
(0,1kl-20uk)	38,1	35,3	35,6
	30,5	41,4	
	31,2	37,1	
(0,3kl-20uk)	46,4	51,8	50,3
	46,1	55,3	
	50,8	51,5	
(0,5kl-20uk)	48,8	57,1	52,1
	52,1	54,9	
	51,1	48,8	
(0kl-40uk)	25,1	25,6	28,0
	26,3	28,2	
	29,7	33,1	
(0,1kl-40uk)	40,9	38,4	40,5
	40,1	38,8	
	44,3	40,5	
(0,3kl-40uk)	43,8	42,3	42,9
	41,9	45,4	
	39,5	44,3	
(0,5kl-40uk)	40,4	42,3	42,3
	43,5	43,1	
	40,9	43,4	

Tablo Ek A-5 150 gün suda bekleyen karbon lifli serilerin eğilme sonrası basınç dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)		Ortalama (MPa)
(0kl-0uk)	63,8	63,5	70,4
	64,9	67,7	
	76,9	85,5	
(0,1kl-0uk)	58,7	60,7	56,2
	60,6	56,5	
	41,5	59,3	
(0,3kl-0uk)	46,8	55,7	49,5
	36,3	52,4	
	51,4	54,2	
(0,5kl-0uk)	73,9	68,4	64,7
	70,4	66,7	
	55,9	52,9	
(0kl-10uk)	58,7	64,5	65,7
	66,7	64,7	
	71,2	68,2	
(0,1kl-10uk)	46,5	48,3	51,2
	50,8	56,4	
	51,7	53,2	
(0,3kl-10uk)	49,4	50,4	52,6
	56,1	45,6	
	55,9	58,1	
(0,5kl-10uk)	50,9	59,5	57,3
	63,1	52,7	
	63,8	53,8	
(0kl-20uk)	53,6	45,0	49,8
	49,6	41,5	
	53,5	55,4	
(0,1kl-20uk)	51,8	55,1	52,6
	53,1	55,8	
	49,3	50,5	
(0,3kl-20uk)	59,1	51,0	56,4
	57,7	55,7	
	54,5	60,4	
(0,5kl-20uk)	63,4	66,6	64,5
	61,1	63,7	
	68,3	64,1	
(0kl-40uk)	57,4	56,7	54,0
	56,9	53,0	
	50,3	49,8	
(0,1kl-40uk)	55,6	54,3	51,4
	51,1	47,2	
	49,5	50,9	
(0,3kl-40uk)	51,4	57,3	55,1
	51,8	56,4	
	55,6	58,0	
(0,5kl-40uk)	54,1	58,2	57,2
	58,1	61,1	
	53,6	58,0	

Tablo Ek A-6 150 gün sülfatta bekleyen karbon lifli serilerin eğilme sonrası basınç dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)		Ortalama (MPa)
(0kl-0uk)	69,3	66,7	67,1
	70,8	70,6	
	62,7	62,2	
(0,1kl-0uk)	56,6	53,5	59,0
	59,6	58,8	
	67,0	58,4	
(0,3kl-0uk)	54,5	51,1	51,5
	47,1	52,5	
	53,0	51,0	
(0,5kl-0uk)	62,3	62,8	63,5
	62,3	69,0	
	60,0	64,4	
(0kl-10uk)	65,4	69,3	64,5
	64,7	68,3	
	61,5	57,5	
(0,1kl-10uk)	56,5	56,9	56,2
	55,4	56,4	
	53,7	58,5	
(0,3kl-10uk)	57,9	58,9	58,7
	58,9	58,3	
	58,2	60,1	
(0,5kl-10uk)	52,6	55,1	53,8
	57,9	51,6	
	54,1	51,3	
(0kl-20uk)	54	58,7	58,7
	56,8	62,6	
	59,6	60,7	
(0,1kl-20uk)	49,5	51,7	55,3
	66,4	56,6	
	53,2	54,3	
(0,3kl-20uk)	61,7	58,4	61,4
	59,7	64,4	
	59,0	64,9	
(0,5kl-20uk)	70,4	81,8	69,0
	68,6	65,5	
	62,9	64,7	
(0kl-40uk)	52,9	52,2	54,7
	50,4	61,9	
	56,9	53,9	
(0,1kl-40uk)	44,7	49,8	45,7
	47,3	47,4	
	46,3	38,9	
(0,3kl-40uk)	51,2	44,5	46,4
	46,1	47,7	
	49,4	39,4	
(0,5kl-40uk)	49,2	57,5	56,5
	60,2	63,3	
	53,2	55,6	

Tablo Ek A-7 28 gün suda bekleyen çelik lifli serilerin eğilme dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama (MPa)
(0çl-0uk)	12,49	12,26
	11,73	
	12,55	
(0,5çl-0uk)	12,49	12,11
	11,46	
	12,37	
(1,0çl-0uk)	13,41	12,96
	12,37	
	13,10	
(1,5çl-0uk)	11,88	11,80
	11,58	
	11,94	
(0çl-10uk)	10,05	9,99
	10,36	
	9,57	
(0,5çl-10uk)	11,88	10,87
	10,05	
	10,66	
(1,0çl-10uk)	11,88	11,88
	11,88	
	11,88	
(1,5çl-10uk)	10,36	10,66
	10,05	
	11,58	
(0çl-20uk)	9,75	9,55
	9,14	
	9,75	
(0,5çl-20uk)	10,85	10,12
	10,36	
	9,14	
(1,0çl-20uk)	10,97	11,21
	11,27	
	11,40	
(1,5çl-20uk)	11,09	11,31
	11,27	
	11,58	
(0çl-40uk)	7,31	7,29
	7,25	
	7,31	
(0,5çl-40uk)	8,53	8,84
	9,14	
	8,84	
(1,0çl-40uk)	8,10	8,13
	7,92	
	8,35	
(1,5çl-40uk)	9,51	9,26
	8,84	
	9,45	

Tablo Ek A-8 150 gün suda bekleyen çelik lifli serilerin eğilme dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama (MPa)
(0çl-0uk)	8,23	8,45
	8,38	
	8,74	
(0,5çl-0uk)	11,58	11,68
	12,49	
	10,97	
(1,0çl-0uk)	12,19	13,00
	13,71	
	13,10	
(1,5çl-0uk)	10,60	11,90
	13,13	
	11,97	
(0çl-10uk)	10,60	9,75
	9,51	
	9,14	
(0,5çl-10uk)	12,80	12,70
	12,19	
	13,10	
(1,0çl-10uk)	16,15	15,13
	15,23	
	14,02	
(1,5çl-10uk)	11,94	12,62
	13,04	
	12,89	
(0çl-20uk)	9,54	9,10
	8,32	
	9,45	
(0,5çl-20uk)	10,36	10,36
	11,27	
	9,45	
(1,0çl-20uk)	14,63	12,49
	10,97	
	11,88	
(1,5çl-20uk)	11,00	11,35
	10,82	
	12,25	
(0çl-40uk)	9,41	9,64
	10,09	
	9,41	
(0,5çl-40uk)	11,88	13,51
	13,71	
	14,93	
(1,0çl-40uk)	12,19	13,61
	12,19	
	16,45	
(1,5çl-40uk)	10,82	10,43
	10,18	
	10,30	

Tablo Ek A-9 150 gün sülfatta bekleyen çelik lifli serilerin eğilme dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama (MPa)
(0çl-0uk)	11,58	11,64
	11,67	
	11,67	
(0,5çl-0uk)	15,84	15,03
	14,63	
	14,63	
(1,0çl-0uk)	15,54	15,95
	15,54	
	16,76	
(1,5çl-0uk)	15,14	14,89
	14,23	
	15,30	
(0çl-10uk)	10,18	10,55
	11,52	
	9,96	
(0,5çl-10uk)	17,06	15,95
	15,54	
	15,23	
(1,0çl-10uk)	14,63	15,64
	15,54	
	16,76	
(1,5çl-10uk)	14,38	13,24
	11,43	
	13,92	
(0çl-20uk)	10,85	10,38
	10,30	
	9,99	
(0,5çl-20uk)	13,71	13,91
	14,63	
	13,41	
(1,0çl-20uk)	15,23	15,84
	16,76	
	15,54	
(1,5çl-20uk)	13,04	11,60
	11,79	
	9,96	
(0çl-40uk)	6,03	6,22
	6,95	
	5,67	
(0,5çl-40uk)	14,93	14,32
	13,71	
	14,32	
(1,0çl-40uk)	14,02	13,00
	13,41	
	11,58	
(1,5çl-40uk)	10,73	11,00
	9,17	
	13,10	

Tablo Ek A-10 28 gün suda bekleyen karbon lifli serilerin eğilme dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama (MPa)
(0kl-0uk)	12,49	12,26
	11,73	
	12,55	
(0,1kl-0uk)	13,10	12,92
	12,80	
	12,86	
(0,3kl-0uk)	12,43	11,46
	10,66	
	11,27	
(0,5kl-0uk)	11,58	11,07
	10,66	
	10,97	
(0kl-10uk)	10,05	9,99
	10,36	
	9,57	
(0,1kl-10uk)	11,27	10,97
	10,66	
	10,97	
(0,3kl-10uk)	10,36	10,66
	10,05	
	11,58	
(0,5kl-10uk)	11,58	11,78
	12,80	
	10,97	
(0kl-20uk)	9,75	9,55
	9,14	
	9,75	
(0,1kl-20uk)	10,66	10,75
	10,24	
	11,33	
(0,3kl-20uk)	13,10	12,85
	12,49	
	12,95	
(0,5kl-20uk)	13,41	13,61
	14,02	
	13,41	
(0kl-40uk)	7,31	7,29
	7,25	
	7,31	
(0,1kl-40uk)	10,36	10,38
	10,36	
	10,42	
(0,3kl-40uk)	10,66	10,77
	10,97	
	10,66	
(0,5kl-40uk)	10,05	10,56
	11,27	
	10,36	

Tablo Ek A-11 150 gün suda bekleyen karbon lifli serilerin eğilme dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama (MPa)
(0kl-0uk)	8,23	8,45
	8,38	
	8,74	
(0,1kl-0uk)	9,75	11,48
	13,10	
	11,58	
(0,3kl-0uk)	12,19	10,97
	11,58	
	9,14	
(0,5kl-0uk)	8,20	8,20
	8,23	
	8,17	
(0kl-10uk)	10,60	9,75
	9,51	
	9,14	
(0,1kl-10uk)	11,27	11,07
	10,66	
	11,27	
(0,3kl-10uk)	13,71	12,29
	10,97	
	12,19	
(0,5kl-10uk)	7,86	7,86
	7,83	
	7,89	
(0kl-20uk)	9,54	9,10
	8,32	
	9,45	
(0,1kl-20uk)	11,27	12,09
	12,49	
	12,49	
(0,3kl-20uk)	10,66	11,38
	10,36	
	13,10	
(0,5kl-20uk)	8,10	7,93
	8,01	
	7,68	
(0kl-40uk)	9,41	9,64
	10,09	
	9,41	
(0,1kl-40uk)	11,58	11,38
	11,27	
	11,27	
(0,3kl-40uk)	11,88	12,29
	12,49	
	12,49	
(0,5kl-40uk)	6,86	6,85
	7,10	
	6,58	

Tablo Ek A-12 150 gün sülfatta bekleyen karbon lifli serilerin eğilme dayanımları

Karışım kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama (MPa)
(0kl-0uk)	11,58	11,64
	11,67	
	11,67	
(0,1kl-0uk)	13,71	14,42
	14,32	
	15,23	
(0,3kl-0uk)	14,93	14,02
	13,41	
	13,71	
(0,5kl-0uk)	9,69	9,26
	9,05	
	9,05	
(0kl-10uk)	10,18	10,55
	11,52	
	9,96	
(0,1kl-10uk)	14,63	14,83
	14,93	
	14,93	
(0,3kl-10uk)	15,54	15,34
	15,23	
	15,23	
(0,5kl-10uk)	8,10	8,49
	8,26	
	9,11	
(0kl-20uk)	10,85	10,38
	10,30	
	9,99	
(0,1kl-20uk)	14,93	15,13
	14,63	
	15,84	
(0,3kl-20uk)	14,93	15,13
	15,84	
	14,63	
(0,5kl-20uk)	8,14	7,78
	7,37	
	7,83	
(0kl-40uk)	6,03	6,22
	6,95	
	5,67	
(0,1kl-40uk)	13,41	12,80
	12,49	
	12,49	
(0,3kl-40uk)	13,41	13,91
	14,32	
	14,02	
(0,5kl-40uk)	9,75	9,66
	9,84	
	9,38	

Tablo Ek A-13 150 gün suda bekleyen çelik lifli serilerin tokluk değerleri

Karışım kodu	Tokluk Değerleri (N.mm)	Ortalama (N.mm)
(0çl-0uk)	65,8	67,3
	60,7	
	75,5	
(1,5çl-0uk)	3315,0	2967,8
	3053,8	
	2534,6	
(0çl-10uk)	84,3	80,2
	70,4	
	85,8	
(1,5çl-10uk)	5070,1	5577,2
	5921,7	
	5739,8	
(0çl-20uk)	95,3	94,5
	99,8	
	88,5	
(1,5çl-20uk)	3387,2	3228,1
	2589,5	
	3707,5	
(0çl-40uk)	61,5	70,0
	89,1	
	59,3	
(1,5çl-40uk)	1110,8	1738,0
	1892,9	
	2210,4	

Tablo Ek A-14 150 gün sülfatta bekleyen çelik lifli serilerin tokluk değerleri

Karışım kodu	Tokluk Değerleri (N.mm)	Ortalama (N.mm)
(0çl-0uk)	84,9	97,5
	101,2	
	106,3	
(1,5çl-0uk)	3113,5	3988,5
	4685,1	
	4167,0	
(0çl-10uk)	92,8	97,0
	94,5	
	103,6	
(1,5çl-10uk)	3953,2	5031,4
	5866,5	
	5274,5	
(0çl-20uk)	102,4	115,2
	124,7	
	118,4	
(1,5çl-20uk)	4092,7	3723,7
	3265,3	
	3813,0	
(0çl-40uk)	33,9	39,7
	51,6	
	33,6	
(1,5çl-40uk)	3065,7	2938,1
	2964,9	
	2783,6	

Tablo Ek A-15 150 gün suda bekleyen karbon lifli serilerin tokluk değerleri

Karışım kodu	Tokluk Değerleri (N.mm)	Ortalama (N.mm)
(0kl-0uk)	65,8	67,3
	60,7	
	75,5	
(0,5kl-0uk)	129,6	199,8
	247,8	
	222,0	
(0kl-10uk)	84,3	80,2
	70,4	
	85,8	
(0,5kl-10uk)	152,2	245,8
	250,7	
	334,5	
(0kl-20uk)	95,3	94,5
	99,8	
	88,5	
(0,5kl-20uk)	377,7	299,8
	316,0	
	205,6	
(0kl-40uk)	61,5	70,0
	89,1	
	59,3	
(0,5kl-40uk)	332,4	323,0
	439,0	
	197,6	

Tablo Ek A-16 150 gün sülfatta bekleyen karbon lifli serilerin tokluk değerleri

Karışım kodu	Tokluk Değerleri (N.mm)	Ortalama (N.mm)
(0kl-0uk)	84,9	97,5
	101,2	
	106,3	
(0,5kl-0uk)	232,5	244,1
	221,4	
	278,3	
(0kl-10uk)	92,8	97,0
	94,5	
	103,6	
(0,5kl-10uk)	342,9	334,0
	316,4	
	342,8	
(0kl-20uk)	102,4	115,2
	124,7	
	118,4	
(0,5kl-20uk)	155,0	588,8
	1294,0	
	317,5	
(0kl-40uk)	33,9	39,7
	51,6	
	33,6	
(0,5kl-40uk)	212,6	285,5
	444,3	
	199,7	