

TC.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FİBER TAKVİYELİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN
BETONUN MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Nusret BOZKURT

Tez Yöneticisi
Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU

DOKTORA TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2009

TC.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FİBER TAKVİYELİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN
BETONUN MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Nusret BOZKURT

DOKTORA TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 17.09/2009 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman : Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU

Üye: Prof. Ali Sayıl ERDOĞAN

Üye: Doç.Dr. Zülfü Çınar ULUCAN

Üye: Yrd.Doç.Dr. Hüseyin TEMİZ

Üye: Yrd.Doç.Dr. Mehmet TUĞAL

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve doktora eğitimim boyunca her türlü desteği ile bana varlığını hissettiren, mesleki ahlak ve mesleki ilim kazanmamda en büyük paya sahip olan, yine eğitimim boyunca yüksek derecede yardımları ile birlikte iyi niyeti, hoşgörüsü, güler yüzü ile çalışmalarına destek olarak yön veren kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na en derin ve kalbi duygular ile teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar imkanlarını benim için seferber ederek laboratuvarında çalışmama imkan sağlayan Yrd. Doç. Dr. Mehmet TUĞAL'a ve eğitimim süresince ders aldığım gerek kendi bölümümden gerekse inşaat mühendisliği bölümünden hocalarım başta olmak üzere tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Teknik imkanlarını kullandığım ve zaman zaman görüş ve önerilerine ihtiyaç duyduğum Yrd. Doç. Dr. Tahir GÖNEN'e; bölüm teknisyenlerimiz M. Ali POLAT, Ümit ÖZEL, Ramazan GÜL ve Necati MAHMUT'a ve her türlü resmi yazışmalarda ilgi, iyi niyet, güler yüz ve özenle yardımlarını esirgemeyen bölüm sekreterlerimiz Musa ATABAY ve Örfi YARDIMCI'ya teşekkür ederim.

Çalışmam süresince boş vakitlerinde yardımcı olan bölümümüz öğrencilerine ve özellikle önemli derecede iş gücü olarak yardımlarını gördüğüm Taner ISLAK, Mevlüt ARDIÇ, Celil NALBANT, Kemal GÜLMEZ, Yüksel LALE'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmamı proje olarak destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne, deney malzemesi desteğinde bulunan BEKSA Çelik Kord San. AŞ ve SİKA Yapı Kimyasalları AŞ'ne teşekkürlerimi sunarım.

İyi bir eğitim imkanı sağlayarak, sınırsız ve koşulsuz maddi destekleri ile beni bu günlere getiren anne ve babama; yardım, destek ve iyi niyetleri ile hep yanımda olan kardeşlerime ve özellikle de benim için çok büyük emekler ve zaman harcayarak laboratuvar ortamında da işgücü olarak her zaman yardıma koşan kardeşim Harun BOZKURT'a; yüksek sabrından, tahammülünden, gösterdiği ilgi-alaka ve yardımlarından dolayı eşime geri kalan ömrüm boyunca teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	III
TABLOLAR LİSTESİ	XIV
SİMGELER	XV
KISALTMALAR	XVI
ÖZET	XVII
ABSTRACT	XVIII
1. GİRİŞ	1
1.2 Tez Çalışmasına Genel Bakış	2
1.3 Tez Metodolojisi	2
1.4 Tez Çalışmasının Amacı	3
2. FİBER TAKVİYELİ BETON	4
2.1 Fiber Takviyeli Betonun Tarihi Gelişimi	4
2.2 Beton Üretiminde Kullanılan Fiber Çeşitleri	6
2.3 Betonda Karma (Hibrit) Fiber Teknolojisi	13
3. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLAR	15
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	19
4.1 Kullanılan Malzemeler	19
4.2 Karışım Oranları	24
4.3 Taze Beton Deneyleri	25
4.4 Numunelerin Hazırlanışı	26
4.5 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesinde Uygulanan Deneyler	28
4.6 Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesinde Uygulanan Deneyler	30
4.7 SEM Analizi	36
5. DENEYSEL ÇALIŞMA BULGULARININ İNCELENMESİ	38
5.1 Taze Beton Özelliklerinin İncelenmesi	38
5.2 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi	44
5.2.1 Basınç Dayanımı Deneyi	44
5.2.2 Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi	52
5.2.3 Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi	59
5.2.4 USG Hızı Tayini	68
5.3 Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi	70

5.3.1 Yüksek Sıcaklık Deneyi Bulgularının İncelenmesi	70
5.3.2 Donma-Çözünme Deneyi Bulgularının İncelenmesi	83
5.3.3 Asit Dayanıklılık Deneyi Bulgularının İncelenmesi	99
5.3.4 Islanma-Kuruma Deneyi Bulgularının İncelenmesi	115
5.3.5 Karbonasyon Deneyi Bulguları	134
5.3.6 Rölatif Porozite Deneyi Bulguları	137
5.4 SEM Analizi Bulguları	142
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	149
6.1 Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar	149
6.2 Öneriler	153
KAYNAKLAR	154
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Tez metodolojisi	3
Şekil 2.1 Hornero adındaki kuşun kil-kamış karışımı ile inşa ettiği yuva	4
Şekil 2.2 Sınıflandırmaya göre çelik fiberler	8
Şekil 2.3 Betonda tekil olarak kul. farklı fiber (lif) çeşitlerinin çatlak köprüleme dav.	13
Şekil 2.4 Fibersiz ve karma fiberli olarak tasarlanan karışımların eğilme gerilmesi-sehim grafiği [69]	14
Şekil 4.1 Kullanılan agrega ve ilgili sınır tane dağılımı eğrileri	21
Şekil 4.2 Tez çalışmasında kullanılan fiberler: a) Sentetik makro fiber (Synmix), b) Sentetik mikro fiber (Duomix), c) Yüksek karbonlu düz çelik fiber (OL6/.16), d) Dramix RC 80/60 BN, e) Dramix RC 65/35 BN, f) Dramix ZP 305	23
Şekil 4.3 Taze beton deneylerinde kullanılan deney alet ve aparatları (L-kutusu, çökme-yayılma tablası, çökme hunisi, V-hunisi ve karıştırıcı)	26
Şekil 4.4 Kür havuzları ve su kürü uygulanan numuneler	27
Şekil 4.5 Yük kontrollü pres	28
Şekil 4.6 Yük kontrollü eğilmede çekme deney aleti	29
Şekil 4.7 Rölatif porozite deney düzeneği	31
Şekil 4.8 Hızlandırılmış karbonasyon deney aleti (a) ve numune üzerinde karbonasyon derinliğinin ölçümü (b)	32
Şekil 4.9 Yüksek sıcaklık deneyinde kullanılan laboratuvar tipi fırın	33
Şekil 4.10 Donma-çözünme deneyinde kullanılan dondurucu alet	34
Şekil 4.11 Asit dayanıklılık deneyi düzeneği	35
Şekil 4.12 Asit dayanıklılığı testi sonrası aşınmış olarak çıkarılan numuneler; a) silindirik, b) prizmatik numune	35
Şekil 4.13 Islanma-kuruma deneyinde kullanılan ayarlı fırın	36
Şekil 4.14 Islanma-kuruma deneyi sonrası bazı numunelerin görünümü	36
Şekil 4.15 SEM analizi için alınmış numune örnekleri; a) Etüvde kurutulurken b) Soğutma anında numune kaplarında bulunan örnekler	37
Şekil 4.16 SEM analiz ünitesi	37
Şekil 5.1 Değişen boy/çap oranı-normalleştirilmiş taze beton özellikleri	39
Şekil 5.2 Üç çubuklu L-kutusu deneyi sonucu bloklanma gözlenen 5 nolu FTKYB kar.	41
Şekil 5.3 Kontrol KYB ve tekil fiber içeren beton serilerinin kür süresi-basınç day. graf.	44
Şekil 5.4 KYB ve FTKYB serilerinin kür süresi-basınç dayanımı grafiği	46

Şekil 5.5 KYB ve “%50 uzun + %50 kısa” karma fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-basınç daynımı grafiği	46
Şekil 5.6 KYB ve “%50 uzun + %50 kısa” karma fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-basınç daynımı grafiği	47
Şekil 5.7 KYB ve “%25 uzun + %75 kısa” karma fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-basınç daynımı grafiği	47
Şekil 5.8 KYB ve “%25 uzun + %75 kısa” karma fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-basınç daynımı grafiği	48
Şekil 5.9 KYB ve %100 tekil çelik fiber içeren FTKYB serilerine göre basınç dayanımları	49
Şekil 5.10 KYB ve %100 tekil polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serilerine göre basınç dayanımları	49
Şekil 5.11 KYB ve “%50 uzun + %50 kısa” karma fiber içeren FTKYB serilerine göre basınç dayanımları	50
Şekil 5.12 Karışımında Ç1 kullanılan ve boyut yoğunluğu düşürülen serilerin basınç dayanımları	51
Şekil 5.13 Karışımında Ç2 kullanılan ve boyut yoğunluğu düşürülen serilerin basınç dayanımları	51
Şekil 5.14 Karışımında P1 kullanılan ve boyut yoğunluğu düşürülen serilerin basınç dayanımları	52
Şekil 5.15 Kontrol KYB ve tekil çelik FTKYB serilerinin kür süresi-yarmada çekme daynımı grafiği	53
Şekil 5.16 Kontrol KYB ve tekil polipropilen sentetik FTKYB serilerinin kür süresi-yarmada çekme daynımı grafiği	53
Şekil 5.17 Kontrol KYB ve tekil çelik FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımları	54
Şekil 5.18 Kontrol KYB ve tekil polipropilen sentetik FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımları	54
Şekil 5.19 Karışımında %100 ve %50 oranlarda Ç1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması ...	55
Şekil 5.20 Karışımında %100 ve %25 oranlarda Ç1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması ...	56
Şekil 5.21 Karışımında %100 ve %50 oranlarda Ç2 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması ...	56
Şekil 5.22 Karışımında %100 ve %25 oranlarda Ç2 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması	56

Şekil 5.23 Karışımında %100, %50 ve %25 oranlarda Ç3 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çek. dayanımlarının karş.	57
Şekil 5.24 Karışımında %100, %50 ve %25 oranlarda P1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çek. dayanımlarının karş.	58
Şekil 5.25 Farklı oranlarda P1 ve P2 kodlu fiberlerin birbiri ve çelik makro-mikro fiberler ile oluşturdukları FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması	58
Şekil 5.26 Kontrol KYB ve karışımında %25 oranlarda 4 farklı fiber içeren FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımları	58
Şekil 5.27 Kontrol KYB ve tekil çelik FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği	60
Şekil 5.28 Kontrol KYB ve tekil polipropilen sentetik FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı	60
Şekil 5.29 Kontrol KYB ve tekil çelik FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımları grafiği	61
Şekil 5.30 Kontrol KYB ve tekil polipropilen sentetik FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımları	61
Şekil 5.31 Kontrol KYB ve tüm tekil FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımları	61
Şekil 5.32 Kontrol KYB ve %50uzun+%50 kısa karma FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği	62
Şekil 5.33 Kontrol KYB ve %50uzun+%50 kısa karma FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği	63
Şekil 5.34 Kontrol KYB ve %25uzun+%75 kısa karma FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği	63
Şekil 5.35 Kontrol KYB ve %25uzun+%75 kısa karma FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği	63
Şekil 5.36 Karışımında %25 oranlarda 4 farklı fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği	64
Şekil 5.37 Karışımında %25 oranlarda 4 farklı fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği	64
Şekil 5.38 Kontrol KYB ve karışımında %100 ve %50 oranlarda Ç1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması	65

Şekil 5.39 Kontrol KYB ve karışımında %100 ve %25 oranlarda Ç1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması	65
Şekil 5.40 Kontrol KYB ve karışımında %100 ve %50 oranlarda Ç2 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması	66
Şekil 5.41 Kontrol KYB ve karışımında %100 ve %25 oranlarda Ç2 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması	66
Şekil 5.42 Kontrol KYB ve karışımında %100, %50 ve %25 oranlarda Ç3 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması	66
Şekil 5.43 Kontrol KYB ve karışımında %100, %50 ve %25 oranlarda P1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması	67
Şekil 5.44 Kontrol KYB ve farklı oranlarda P1 ve P2 fiberlerin birbiri ve çelik makro-mikro fiberler ile oluşturdukları FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması	67
Şekil 5.45 Kontrol KYB ve karışımında %25 oranlarda 4 farklı fiber içeren FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımları	67
Şekil 5.46 Kontrol KYB ve %100 tekil fiber içeren FTKYB serilerinin USG hızları	69
Şekil 5.47 Kontrol KYB ve %50uzun+%50kısa karma fiber içeren FTKYB serilerinin USG hızları	69
Şekil 5.48 Kontrol KYB ve %25uzun+%50kısa karma fiber içeren FTKYB serilerinin USG hızları	70
Şekil 5.49 Kontrol KYB ve karışımında 4 farklı fiber kullanılan FTKYB serilerinin USG hızları	70
Şekil 5.50 300°C sonrasında numune yüzeylerinde meydana gelen seyrek mikro çatlaklar	71
Şekil 5.51 600°C sonrasında numune yüzeylerinde meydana gelen yoğun mikro çatlaklar	71
Şekil 5.52 a) 900°C sonrasında numune yüzeylerinde meydana gelen yoğun makro çatlaklar, b) İçyapıdaki eriyen çelik fiberler (iri nokta şeklindeki görüntüler) c-d) 900°C sonrası P2 makro fiberin erimesinden dolayı beton yapısında oluşan boşluklar	72
Şekil 5.53 900°C sonrası çelik fiber çapındaki küçülme (ölçüm uygulanan fiber normal çapı:0.55 mm)	73

Şekil 5.54 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	74
Şekil 5.55 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %50uzun+%50kıs karm fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	75
Şekil 5.56 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %25uzun+%75kıs karm fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	75
Şekil 5.57 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	75
Şekil 5.58 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	77
Şekil 5.59 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %50uzun+%50kıs karm fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	78
Şekil 5.60 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %25uzun+%75kıs karm fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	78
Şekil 5.61 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	78
Şekil 5.62 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	80
Şekil 5.63 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %50uzun+%50kıs karm fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	80
Şekil 5.64 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %25uzun+%75kıs karm fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	80
Şekil 5.65 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	81
Şekil 5.66 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası tekil fib. içeren bet. serilerinin USG hızı değ. .	82
Şekil 5.67 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %50uzun+%50kıs karm fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	82
Şekil 5.68 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %25uzun+%75kıs karm fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	83
Şekil 5.69 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	83
Şekil 5.70 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	86
Şekil 5.71 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	86

Şekil 5.72 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	86
Şekil 5.73 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	87
Şekil 5.74 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	87
Şekil 5.75 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	87
Şekil 5.76 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	88
Şekil 5.77 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	88
Şekil 5.78 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	90
Şekil 5.79 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	91
Şekil 5.80 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	91
Şekil 5.81 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	91
Şekil 5.82 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	92
Şekil 5.83 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	92
Şekil 5.84 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	92
Şekil 5.85 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	93
Şekil 5.86 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	94
Şekil 5.87 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	95
Şekil 5.88 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	95

Şekil 5.89 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	95
Şekil 5.90 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	96
Şekil 5.91 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	96
Şekil 5.92 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	96
Şekil 5.93 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	97
Şekil 5.94 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin USG hızı değ.	98
Şekil 5.95 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	98
Şekil 5.96 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	99
Şekil 5.97 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	99
Şekil 5.98 Asit dayanıklılığı deneyi sonrası numune durumu a) Silindir numunedeki yüzey erimesi b) Yıkanan silindir numune c) Asit dayanıklılığı deneyi sonrası erimeyerek numune yüzeyinde beliren fiberler	100
Şekil 5.99 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	102
Şekil 5.100 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	102
Şekil 5.101 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	102
Şekil 5.102 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	103
Şekil 5.103 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	103
Şekil 5.104 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	103
Şekil 5.105 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	104

Şekil 5.106 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	104
Şekil 5.107 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	106
Şekil 5.108 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	106
Şekil 5.109 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	106
Şekil 5.110 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	107
Şekil 5.111 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	107
Şekil 5.112 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	107
Şekil 5.113 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	108
Şekil 5.114 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	108
Şekil 5.115 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	110
Şekil 5.116 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	111
Şekil 5.117 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	111
Şekil 5.118 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	111
Şekil 5.119 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	112
Şekil 5.120 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	112
Şekil 5.121 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	112
Şekil 5.122 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	113

Şekil 5.123 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	114
Şekil 5.124 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	114
Şekil 5.125 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	114
Şekil 5.126 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	115
Şekil 5.127 Çelik fiber içeren silindir numunede yüzey bozulması ve fiberlerde meydana gelen paslanma	116
Şekil 5.128 Polipropilen sentetik fiber içeren silindir numune ve bozulan yüzeyde fiberlerin görünümü	116
Şekil 5.129 FTKYB’da paslanarak bozulan fiberler ve yüzeyde görünen pamuklanma ...	117
Şekil 5.130 Kiriş numune yüzeyinde pullanma sonucu beton dökülmesi	117
Şekil 5.131 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	119
Şekil 5.132 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	119
Şekil 5.133 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	120
Şekil 5.134 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	120
Şekil 5.135 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	120
Şekil 5.136 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	121
Şekil 5.137 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi	121
Şekil 5.138 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı	121
Şekil 5.139 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	124
Şekil 5.140 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	124

Şekil 5.141 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	124
Şekil 5.142 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	125
Şekil 5.143 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	125
Şekil 5.144 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	125
Şekil 5.145 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi	126
Şekil 5.146 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı	126
Şekil 5.147 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	128
Şekil 5.148 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	129
Şekil 5.149 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	129
Şekil 5.150 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	129
Şekil 5.151 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	130
Şekil 5.152 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	130
Şekil 5.153 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi	130
Şekil 5.154 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı	131
Şekil 5.155 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	132
Şekil 5.156 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	133
Şekil 5.157 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	133

Şekil 5.158 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi	133
Şekil 5.159 Normal şartlar altında bulunan FTKYB serisinin karbonasyon deneyi sonrası görünümü	134
Şekil 5.160 Donma-çözünme deneyi uygulanan FTKYB serisinin karbonasyon deneyi sonrası görünümü	135
Şekil 5.161 Yüksek sıcaklık (300°C) uygulanan FTKYB serisinin karbonasyon deneyi sonrası görünümü	136
Şekil 5.162 Asit etkisine maruz bırakılmış FTKYB serisinin karbonasyon deneyi sonrası görünümü	137
Şekil 5.163 Islanma-kuruma deneyi uygulanan FTKYB serisinin karbonasyon deneyi sonrası görünümü	137
Şekil 5.164 Normal şartlar altında bulunan FTKYB serilerinin SEM analizi görüntüleri, a) 450x ile büyütülmüş seri, b) 50x ile büyütülmüş seri	142
Şekil 5.165 Normal şartlar altında bulunan FTKYB serilerinin SEM analizi görüntüleri, a) 150x ile büyütülmüş tekil çelik fiberli seri, b) 150x ile büyütülmüş karma fiberli seri	143
Şekil 5.166 300°C sonrası FTKYB serisinin, a) Beton mikroyapısı, b) Bozulmayan çelik fiberler	144
Şekil 5.167 300°C sonrası FTKYB serisinin EDX analiz görüntüsü (1000x)	144
Şekil 5.168 300°C sonrası FTKYB serisinde bozulmayan polipropilen sentetik fiberler, a) Makro fiber, b) Mikro fiber	144
Şekil 5.169 600°C sonrasında FTKYB serisinde mikroyapı ve fiber durumu, a) Karma fiber içeren FTKYB serisi mikroyapısı, b) Çelik fiberli mikroyapının görünümü	145
Şekil 5.170 900°C sonrası FTKYB'un mikroyapısı, a) 300x büyütülmüş görüntü, b) 2000x büyütülmüş görüntü	146
Şekil 5.171 900°C sonrası çelik fiberlerde gözlenen bozulma, a) 50x büyütülmüş görüntü, b) 150x büyütülmüş görüntü	147
Şekil 5.172 900°C sonrası polipr. sent. fiberlerde gözlenen bozulma, a) Makro fiberlerin erimesi ile beton yapısında oluşturduğu boşluklar, b) Yeri boşalan bir makro fiber oyuğu, c) Makro fiber oyuğunun yakından görüntülenmesi, d) Oyuk içerisindeki oluşumlar	147
Şekil 5.173 Asit dayanıklılık deneyi sonrası FTKYB'un içyapısı, a) Yüzeye yakın derinlikten alınan görüntü (1000x), b) Aynı numune üzerinden fiberler ile alınan görüntü	148
Şekil 5.174 Asit dayanıklılık deneyi sonrası FTKYB'un içyapısı, a) Çelik ve polipropilen sentetik fiberli matris, b) Beton matris içinde çelik fiberin görünümü	148

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Farklı tip fiberler ve bazı fiziksel özellikleri	6
Tablo 2.2. Cam Fiberler İçin Kullanılan Harfler ve Tanımları	10
Tablo 2.3 Cam Fiberlerin Bileşimleri Ve Fiziksel Özellikleri	11
Tablo 2.4 Sentetik fiber türleri ve bazı karakteristik özellikler	12
Tablo 3.1 KYB taze beton özellikleri ve uygulamadaki test metotları	16
Tablo 3.2 Uygulamadaki test metotları için sınıflamalar ve sınır değerler	16
Tablo 4.1 Deneylerde kullanılan çimentonun kimyasal ve bazı fiziksel özellikleri	19
Tablo 4.2 Kullanılan toz malzeme kimyasal özellikleri	20
Tablo 4.3 Kangal Uçucu Külü Kimyasal Kompozisyonunun Standart Sınırlarıyla Karşılaştırılması	20
Tablo 4.4 Kullanılan agrega fiziksel özellikleri	21
Tablo 4.5 Kimyasal katkıya ilişkin teknik bilgiler	22
Tablo 4.6 Kullanılan fiberlere ilişkin fiziksel bilgiler	23
Tablo 4.7 Karışım çeşitliliğini oluşturan fiberlerin serilerdeki oranları	24
Tablo 4.8 Kontrol KYB ve FTKYB serilerinin karışım oranları (%)	25
Tablo 5.1 Kontrol KYB ve tekil fiber kullanılan FTKYB serilerinin taze beton özel.	39
Tablo 5.2 Kontrol KYB ve 2’li (%50 uzun + %50 kısa) fiber kombinasyonları ile oluşturulan FTKYB serilerinin taze beton özellikleri	41
Tablo 5.3 Kontrol KYB ve 2’li (%25 uzun + %75 kısa) fiber kombinasyonları ile oluşturulan FTKYB serilerinin taze beton özellikleri	42
Tablo 5.4 Kontrol KYB ve 4’lü (4 x %25) fiber kombinasyonları ile oluşturulan FTKYB serilerinin taze beton özellikleri	43
Tablo 5.5 Yüksek sıcaklık deneyi ile porozite değişimi	138
Tablo 5.6 Donma-çözünme deneyi ile porozite değişimi	140
Tablo 5.7 Asit dayanıklılık deneyi ile porozite değişimi	141
Tablo 5.8 Islanma-kuruma deneyi ile porozite değişimi	141

SİMGELER

f_{ce} : Kullanılan çimentonun 28 günlük basınç dayanımı

Pr : Rölatif Porozite

V : Ultrasonik ses geçirgenlik hızı

KISALTMALAR

ASTM: The American Society for Testing and Materials

AŞ: Anonim Şirketi

Bkz: Bakınız

BRE: Building Research Establishment

CEM I 42.5 N:

CLTK: Cam Lifi (fiber) Takviyeli Kompozitler

ÇFTB: Çelik Fiber Takviyeli Beton

EFNARC: European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems

FTB: Fiber Takviyeli Beton

FTKYB: Fiber Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Beton

KYB: Kendiliğinden Yerleşen Beton

PCA: Portland Cement Association

SEM: Scanning Electron Microscope

UK: Uçucu Kül

USG: Ultrasonik Ses Geçirgenlik

vb.: Ve benzeri.

ÖZET

Doktora Tezi

FİBER TAKVİYELİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Nusret BOZKURT

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Anabilim dalı

2009, Sayfa:179

Bu tez çalışmasının amacı fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun mekanik ve durabilite özelliklerini araştırmaktır. Bu amaçla çökme-yayılma, V-kutusu ve L-kutusu deneyleri uygulanarak taze beton özellikleri belirlenen biri fibersiz kontrol kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ve 24 fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (FTKYB) tasarlanmıştır. FTKYB tasarımında 4 farklı uzunluk ve boy/çap oranına sahip çelik fiber ile 2 farklı uzunluk ve boy/çap oranında polipropilen sentetik fiber kullanılmıştır. Fiberler karışımlarda tekil ve 2'li, 4'lü kombinasyonlarda kullanılmıştır. Böylece çalışmada tekil fiber etkisi ve karma fiberlerin sinerjisi incelendiği gibi toplam fiber hacmine farklı boyutsal özelliklere sahip fiberlerin girmesi ile fiber boyut yoğunluğu etkisi incelenmiştir. Üretilen betonların normal şartlar altındaki mekanik özelliklerini belirlemek için basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve ultrasonik ses geçirgenlik (USG) hızı tayini deneyleri ile rölatif porozite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Durabilite özelliklerini belirlemek için ise sırası ile yüksek sıcaklık, donma-çözünme, asit dayanıklılık, ıslanma-kuruma ve karbonasyon deneyleri yapılmıştır. Normal şartlar altında uygulanan tüm deneyler durabilite deneyleri sonrasında tekrar uygulanarak durabilite deneyleri sonrasındaki mekanik özellikler belirlenmiştir. Ayrıca bazı numunelerin SEM görüntü analizleri yapılarak içyapı özellikleri incelenmiştir.

Genel sonuç olarak, tekil fiber kullanılan karışımlarda fiber uzunluk ve boy/çap oranının düşürülmesi ile taze beton özelliklerinde gelişme gözlenmiştir. Karma fiberli olarak tasarlanan karışımlarda, toplam fiber hacminde uzun ve boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğunun düşürülmesi ile taze beton özellikleri gelişmiştir. Uygulanan mekanik deneyler sonrasında karışımında mikro fiber kullanılan serilerin basınç dayanımında artış gözlenirken, makro fiberlerin basınç dayanımını düşürdüğü; yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarında ise makro fiber içeren serilerin mikro fiber içeren serilere göre daha yüksek değerler verdiği belirlenmiştir. Ayrıca makro fiberlerin mikro fiberler ile eşleştiği karma fiberli serilerde mekanik özelliklerin daha üstün olduğu belirlenmiştir. En yüksek dayanım kayıpları, yüksek sıcaklık deneyi uygulanan FTKYB serilerinden elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Mekanik özellikler, durabilite özellikleri, fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen beton

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF FIBER REINFORCED SELF COMPACTING CONCRETE

Nusret BOZKURT

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Construction Education

2009, Page:179

The aim of this thesis is to carry out an investigation into mechanical and durability properties of fibre reinforced self compacting concrete (FRSCC). The achievement of this aim, a control self compacting concrete (SCC) and 24 FRSCCs determined fresh concrete properties applying slump-flow, V-funnel and L-box tests were designed. In the design of FRSCC, 4 steel and 2 polypropylene synthetic fibres were used in different lengths and aspect ratios. These fibres were used as single and in combination with 2 and 4 of those fibres. In this way, not only the effect of single fibre and the synergy effect of hybrid fibres but also the size concentration effect of fibres had different dimensional properties in total fibre volume were investigated. Compressive strength, splitting tensile, flexural tensile strengths, ultrasonic pulse velocity tests and relative porosity test were carried out to determine mechanical properties of produced concretes at normal conditions. On the other hand, elevated temperature, freezing-thawing, acid resistance, wetting-drying and carbonation tests were performed to identify durability properties of produced concretes. Moreover, again all same tests applying at normal conditions were conducted out after durability tests to detect mechanical properties. Furthermore, internal structural properties of some concrete specimens were investigated through SEM image analyses.

General results of thesis; an improvement was observed on fresh concrete properties with decreasing fibres length and aspect ratio in the mixes used single fibres. Another improvement was observed on fresh concrete properties when the concentration of fibres which are so long and have high level of aspect ratios in total fibres volume was decreased in the mixes designed with hybrid fibres. After mechanical tests, on the one hand, concrete series have micro fibres showed an improvement at compressive strength while concrete series have macro fibres decreased, on the other hand, concrete series have macro fibres gave higher splitting and flexural tensile strengths while concrete series have micro fibres were giving lowers. After all tests were applied it was recognised that mechanical properties of concrete series with hybrid fibres which macro fibres match to micro fibres were superior. The highest strength losses were obtained from FRSCCs which applied elevated temperature test.

Key words: Mechanical properties, durability properties, fibre reinforced self compacting concrete

1.GİRİŞ

Bilim ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte daha iyiyi ve kaliteliyi bulma çabası inşaat biliminde de hız kazanmıştır. İnşaat sektöründe en fazla kullanım alanına sahip olan kompozit malzemelerden biri betondur [1]. Bu yüzden betondan beklenen özellikler de değişmiştir. Özellikle yeni dönem beton katkı malzemeleri sayesinde, farklı kullanım amaçlarına hitap eden farklı özelliklerde beton tipleri ortaya çıkmıştır. Fiber takviyeli beton (FTB) bu tip betonlara örnek olarak verilebilir. FTB terimi, fiberlerin beton bünyesinde üç boyutta rasgele bir biçimde yayılmasını içeren bir beton olarak tanımlanabilir. Son 30 yıl boyunca FTB'un kullanımı sürekli artış göstermiş ve dikkate değer gelişmeler gözlenmiştir [2-5].

Beton teknolojisinin gelişiminde, son yıllardaki en önemli gelişmelerden bir diğeri de kendiliğinden yerleşen beton (KYB)'dur [6]. İlk kez 1980'li yılların sonunda Japonya'da geliştirilen KYB, herhangi bir sıkıştırmaya gerek kalmadan kendi ağırlığı ile kalıba yerleşebilen ve sıkışabilen bir beton türü olarak tanımlanır [7-8]. Kendiliğinden yerleşen betonlar, süper akışkanlaştırıcılar ve viskozite düzenleyici katkıları sayesinde kalıpları doldurma yeteneği ve yüksek ayrışma direnci gibi iki önemli özelliğe sahiptirler [9]. Literatürdeki mevcut kendiliğinden yerleşen beton çalışmaları genellikle yeni beton tasarımları üzerine olup çeşitli olmasına rağmen fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen beton konusu hakkındaki çalışmalar oldukça yeni ve sınırlıdır [6,10-15].

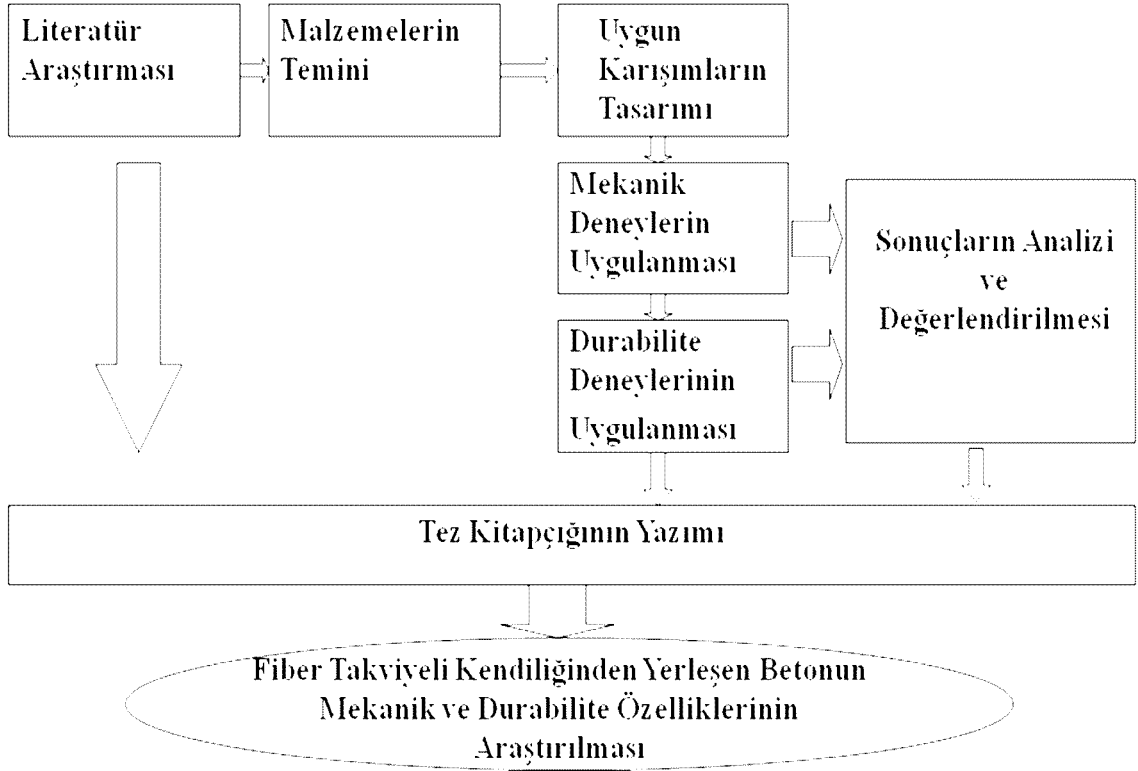
Ülkemizde genellikle büyük hacimli ve karmaşık yapı sistemleri inşa edilmektedir. Yapıların bu şekilde tasarımı ise ülkemizin yoğun tehdidi altında bulunduğu deprem felaketi açısından bir dezavantajdır. Piyasa talepleri, deprem ve benzeri felaketler göz önüne alındığında farklı birer özel beton olarak bilinen KYB ve FTB birleşimi ile elde edilebilecek Fiber Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Beton daha geniş teknik faydalar ve daha çok ekonomiklik sağlayabilecektir. Bu açıdan tez çalışmasının genel amacı değerlendirildiğinde, fiber takviyeli beton ve kendiliğinden yerleşen beton birleşimi kullanılarak hem taze hem de sertleşmiş durumda birbirlerinin olumsuz niteliklerini gidermek ve daha iyi mühendislik özelliklere sahip yeni bir özel beton tipi üretmeyi mümkün kılmaktır.

1.2 Tez Çalışmasına Genel Bakış

Fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırıldığı bu tez çalışması, tamamı 6 bölüm ve 179 sayfadan oluşmaktadır. Birinci bölüm önsöz niteliğinde olup, tez çalışmasının konusu, amacı ve metodolojisi hakkında genel bilgileri ihtiva etmektedir. İkinci bölümde ise tez konusuna temel kaynaklık eden fiber takviyeli betonlar hakkında ayrıntılı bilgiler sunulmaktadır. Bu bölümde fiber takviyeli betonun tarihi gelişimi ve kullanılan fiberler hakkında ayrıntılı bilgiler bulunmaktadır. Üçüncü bölümde ise kısaca kendiliğinden yerleşen betonlar ve fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonlar hakkında genel bilgiler sunulmaktadır. Dördüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan malzemeler ve malzeme özellikleri ile birlikte çalışmada uygulanan deneyler hakkında ayrıntılı bilgiler sunulmuştur. Beşinci bölümde, bir önceki bölümde tanıtılan malzemelerin kullanılması ve deneylerin uygulanması ile elde edilen araştırma bulguları grafiklerle desteklenerek sunulmaktadır. Altıncı bölüm ise çalışmanın sonuç kısmını oluşturmaktadır. Bu bölümde beşinci bölümde irdelenen araştırma bulgularından çıkarılan kritik araştırma sonuçları verilmektedir.

1.3 Tez Metodolojisi

Şekil 1.1’de tez metodolojisi ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması için öncelikle literatür çalışması yapılmış ve konu ile ilgili gerekli bilgi, döküman ve kaynaklar sağlanmıştır. Daha sonra çalışmada kullanılacak malzemelerin optimum düzeyde ve en kısa zamanda tedariki yapılmıştır. Tüm bu ön çalışmalar yapıldıktan sonra laboratuvar şartlarında, standartlara göre gerekli sistem ve düzenekler oluşturularak deneysel çalışmalara geçilmiştir. Öncelikle, tez konusu amacına uygun olarak karışım hesapları yapıp, deneme tasarım karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan bu deneme karışımlarına KYB işlenebilirlik deneyleri uygulanmıştır. KYB nitelikleri sağlandığında ise sırası ile mekanik ve durabilite deneysel çalışma kısmına geçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular değerlendirilerek sonuç tablo ve grafikleri oluşturulmuş ve bu şekilde tez kitapçığı hazırlanarak çalışma tamamlanmıştır.



Şekil 1.1 Tez metodolojisi

1.4 Tez Çalışmasının Amacı

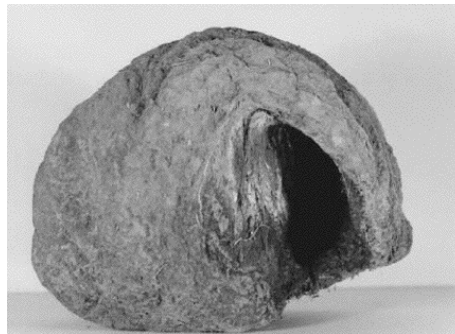
Fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (FTKYB) henüz çok yeni bir beton türüdür. Bu konuda yapılan araştırmalar sayıca oldukça azdır. Yapılan literatür araştırması sonucu bu çalışmaların çoğunda yalnızca tekil olarak ya çelik fiber ya da polipropilen sentetik fiberlerin kullanılmış olduğu göze çarpmaktadır [16-23]. Bu yüzden fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen beton tasarımında farklı fiberlerin kullanımı ve bunların karışımı ile oluşturulacak tasarımlar eksik kalmıştır. Bu çalışmada; işlenebilirlik ve segregasyon direnci açısından çok iyi özelliklere sahip bir beton türü olan KYB (normal ağırlıklı) ile işlenebilirliği zor olan FTB bir araya gelmesi ile iyi ve yeni bir kompozit malzemenin üretimi amaçlanmıştır. Sonuçta bu iki beton türü bir araya geldiğinden homojen, işlenebilirliği iyi, normal ağırlıklı fakat çarpma ve çatlak direnci yüksek her şeyden önemlisi dayanım ve dayanıklılık kriterleri yüksek bir betonun elde edilmesi beklenmektedir. Bu çalışmanın amacı fiber takviyeli beton ile kendiliğinden yerleşen betonun her ikisinin de özelliklerini içeren yeni bir kompozit beton elde edip, oluşturulan bu yeni kompozit malzemenin dayanım ve durabilite özelliklerini incelemektir.

2. FİBER TAKVİYELİ BETON

Hidrolik çimento, su, ince ve/veya kaba agrega ile birlikte süreksiz ayrık fiberlerin farklı tekniklerle karıştırılarak elde edilmesinden oluşan kompozit malzemeye fiber takviyeli beton (FTB) denilmektedir. Aynı zamanda FTB, geleneksel betonla birlikte kullanılan puzolanik katkı maddelerini ve diğer kimyasal katkıları da içerebilir. FTB üretimi amacı ile çelik, cam, sentetik ve doğal malzemelerden değişik boyut ve şekillerde üretilen fiberler kullanılmaktadır. Fiberler her ne kadar çeşitlilik gösterse de beton teknolojisinde yapısal ya da yapısal olmayan amaçlar için bugün en yaygın olarak kullanım alanına sahip olan çeşidi çelik fiberdir [24-26].

2.1 Fiber Takviyeli Betonun Tarihi Gelişimi

Gevrek malzemeleri güçlendirmek için fiberler çok eski zamanlardan beri kullanılmaktadır. Saman çöpünün güneş pişirimli tuğlaların güçlendirilmesinde kullanımı ve atıklarının kagir harcı ve sıvada kullanımı bu malzemenin yapı teknolojisinde ilk kullanımlarına örnek olarak verilebilir [27-29]. Mehta ve Monteiro [24] yazdıkları kitapta bu konuya değinerek, ilk kez mısırlıların saman çöplerini fiber olarak kullandıklarını belirtmişlerdir. Aynı zamanda asbest fiberin yaklaşık 5000 yıl önce kil çanakların yapısını güçlendirmede kullanıldığına dair kanıtlar olduğunu da ileri sürmüşlerdir. Diğer taraftan yine aynı eserde, Arjantin La Plata Üniversitesi'nden Profesör Alberto Fava tarafından, Hornero adındaki küçük bir kuş türünün, insanların fiber kullanımını keşfinden önce fiber benzeri doğal bir yapıyı, yuva yapımında kullandığı belirtilmiştir. Arjantin ve diğer güney Amerika ülkelerinde yaşayan bu küçük kuş, üst ağaç dallarında yuvasını itinalı bir biçimde, kamışla takviye edilmiş kilden inşa etmektedir (bkz şekil 2.1).



Şekil 2.1 Hornero adındaki kuşun kil-kamış karışımı ile inşa ettiği yuva [24].

Milattan önce 80-15 yılları arasında yaşamış olan Romalı yazar, mimar ve mühendis Marcus Vitruvius Pollio'nun mimarlık hakkında yazdığı kitabından o dönemlerde de doğal bir fiber sayılan saman çöplerinin tuğla ve biriket gibi malzemelerin güçlendirilmesinde kullanıldığı anlaşılmaktadır [30]. Vitruvius [30] "Mimarlık Hakkında On Kitap" adlı eserinin, daha sağlam ve dayanıklı tuğla-biriket üretimi için bilgiler verdiği üçüncü bölümünde, hangi kil tipinin seçilmesi gerektiğini vurgulamakta ve uygun kil tipinin seçilmesi durumunda, karışıma ilave edilmiş saman çöplerinin malzemeyi parçalanmadan daha iyi bir şekilde bir arada tutacağından bahsetmektedir [30]. Bu bilgiler ışığında da, yaklaşık 20 asır öncesinde saman ve benzeri fibersi doğal yapıların gevrek malzemelerin güçlendirilmesinde kullanıldığı yargısına varmak güç değildir.

Betonda takviye ve güçlendirme elemanı olarak ise çelik fiberlerin potansiyelini değerlendirmek için ilk büyük araştırma, ABD'nde 1950'li yılların sonlarında ve 1960'ların başında yapıldı [23,31]. PCA (Portland Cement Association) tarafından, kompozit malzeme prensipleri uygulanarak incelenen betona fiber takviyesi ilk çatlak dayanımını artırmaktan daha çok betonun tokluğunu artırdığını gösterdi [27,32]. 1960'ların ortasından bu yana çelik fiber takviyeli beton (ÇFTB) uygulamaları yol ve döşeme plakları ile ısıya dayanıklı malzemeler ve beton ürünlerini içermektedir [27]. Beton alanında gerçekleşen diğer gelişmeler, örneğin yüksek oranda su azaltıcı katkıların işlenebilirlik açısından avantajlar getirmesi gibi, ÇFTB'un üretim ve kullanılabilirliğine de katkıda bulunmuştur. O zamandan beri çelik fiber takviyeli beton hakkında tatmin edici araştırma, geliştirme, deney ve endüstriyel uygulama çalışmalarına teknolojinin sunduğu yenilik ve avantajlarla devam edilmektedir.

Betonda cam fiberlerin ilk kullanım denemeleri 1950'li yılların sonlarında, eski adı Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği olarak bilinen Rusya'da yapılmıştır [33]. Fakat kısa süre içinde, araştırmada kullanılan sıradan cam fiberlerin çimento pastası içindeki alkaliler tarafından tahrip edildiği ortaya koyulmuştur. Araştırmalarda çimento esaslı matriste takviye malzemesi olarak kullanılan boro-silikat esaslı (E-glass) cam fiber ve soda-kalsik esaslı (A-glass) cam fiberlerin içerdiği yüksek alkalinite yüzünden çok hızlı dayanım kaybına sebep olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak bahsi geçen bu iki tip cam fiberle yapılan ilk kompozit denemeleri uzun dönem kullanımları için güvenilir sonuçlar vermemiştir. Daha sonra alkali dirençli cam fiberlerin (AR-glass) üretimi ile dikkate değer bir geliştirme çalışması gerçekleştirilerek üretilen bu yeni tip cam fiberle uzun dönem dayanıklılık kriterleri sağlayan "Alkali Dirençli Cam Fiber Takviyeli Beton" üretimi gerçekleştirilmiştir. 1967 yılında Birleşik Krallık'ta BRE bilim adamları alkali dirençli cam fiberler üzerine bir dizi araştırma daha gerçekleştirdi ve başarılı bir şekilde, %16 zirkonya içerikli, yüksek oranda alkali direnci sergileyen bir cam kompozisyon formülize etmeyi başardılar. Bu çalışma cam fiber için, patentleşme ve ticari üretim anlamında

önemli gelişmelere sebep olmuştur [34]. Günümüzde beton teknolojisinde cam fiber kullanımı hakkındaki araştırmalar yaygınlaşmıştır [35-40].

Sentetik fiberlerin kullanımına gelince, bu malzemenin ilk kullanım çabaları, çelik ve cam fiber kullanımı kadar başarılı olmamıştır [41]. Bir yapı malzemesi olarak sentetik fiberlere olan ilgi ilk defa 1965 yılında rapor edilmiştir. Yapılan bu ilk çalışmaya kadar, 6-60 denier (saydamlık derecesi) arasındaki sentetik fiberler çatlak oluşumunu dağıtma, çatlak boyutunu küçültme ve betonun diğer özelliklerini geliştirme anlamında, performans olarak iyi özellikler göstermiştir. 1970'lerin sonunda sentetik fiberle yapılan diğer çalışmalarda 300-400 denier arasında ve daha düşük boy-çap oranına sahip fiberler kullanılmıştır. 80'li yıllar ve sonrasında ise daha ince saydamlık derecesinde sentetik fiberler kullanılmıştır [27].

2.2 Beton Üretiminde Kullanılan Fiber Çeşitleri

İnsanlığın ilk olarak doğal malzemelerden yararlanarak elde ettiği kompozit malzemeler üzerinde fiberlerin etkisinin farkına vardığı günden bugüne ve teknik imkanların sağladığı avantajlarla çok çeşitli fiber tipleri, gerek ticari gerekse deneysel kullanım amaçlı olarak üretilmektedir. Bugün en çok bilinen ve piyasada kullanılan fiber çeşitleri çelik, cam ve sentetik fiberlerdir [23]. Her ne kadar bugün kullanımı oldukça sınırlı olsa da doğal fiberler de bu temel gurubun içine katılabilir. Yün, ipek, kıl gibi hayvansal; bambu, Hindistan cevizi kabuğu, saman çöpü, keten, kenevir gibi bitkisel doğal kaynaklardan elde edilerek kompozit malzemelerde direkt kullanılabilen maddeler doğal liflerdir [42]. Elbette ki adı geçen ve her biri farklı bir malzeme kökenine sahip olan bu fiber çeşitleri de kendi arasında çeşitlilik göstermektedir. Malzeme kökeni dışında fiber çeşitliliğini belirleyen diğer önemli parametreler ise üretim şekli, dayanım sınıfı, narinlik oranı, geometrik yapı olarak sıralanabilir [27,43-44]. Tablo 2.1'de üretimi yapılan bazı fiber çeşitleri ve bunlara ait bazı özellikler verilmiştir [45-49].

Tablo 2.1 Farklı tip fiberler ve bazı fiziksel özellikleri.

Fiber tipi	Çekme day. (MPa)	Elastisite mod.(10 ³ .MPa)	Maks. uzama (%)	Özgül ağırlık (gr/cm ³)
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1
Asbestler	552-966	83-138	0.6	3.2
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1.5
Cam	1035-3795	69	1.5-3.5	2.5
Naylon	759-828	4.1	16-20	1.1
Polyester	724-863	8.3	11-13	1.4
Polietilen	690	0.14-0.4	10	0.95
Polipropilen	552-759	3.5	25	0.90
Çelik	276-2760	200	0.5-35	7.8

2.2.1. Çelik Fiber

Çelik fiberler yapı sektöründe, ticari anlamda üretim ve tüketim açısından en çok tercih edilen fiber türü olarak bilinmektedir. Metal malzemelerin en önemli özelliklerinden biri olan plastik şekil değiştirme yeteneklerinden dolayı çelik fiberler ile çok basit şekil ve boyutlardan çok karmaşık şekil ve formlara kadar üretim yapmak mümkündür [49-51]. Elbette beton takviyesinde kullanılacak çelik fiberler ülkeden ülkeye benzerlik ve de çeşitlilik gösterecek şekilde standardize edilmiştir. Örneğin ülkemiz ilgili standardı TS 10513 [43]'e göre çelik fiberler "A, B ve C" sınıfları olarak 3 ana gruba ayrılırken; Amerikan Standardı ASTM A 820 [52]'ye göre 4 tip şeklinde tanımlanmıştır. İlgili Amerikan standardına göre çelik fiberler;

Tip 1- Soğuk çekilmiş fiberler,

Tip 2- Plakadan kesilmiş fiberler,

Tip 3- Eritilerek çekilmiş fiberler ve

Tip 4- Diğer fiberler olarak sınıflandırılmıştır [52].

TS 10513/92 [43]'ye göre ise;

A: Düz pürüzsüz yüzeyli teller,

B: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller,

C: Sonu kancalı teller olarak sınıflandırılmış ve bu sınıflar da kendi arasında belirli tiplere ayrılmıştır. Buna göre B sınıfı çelik teller (fiberler):

- Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış teller,

-Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller,

-Ay biçimli dalgalı teller

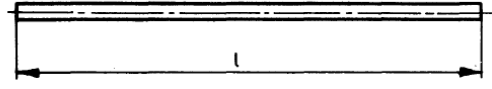
olarak 3 ve C sınıfı ise;

-İki ucu kıvrılmış teller,

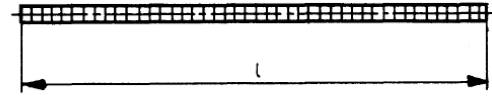
-Bir ucu kıvrılmış teller olarak 2 tipe ayrılmıştır [43].

Şekil 2.2'de yapılan bu sınıflandırmaya göre çelik fiberler aşağıda gösterilmektedir.

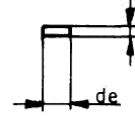
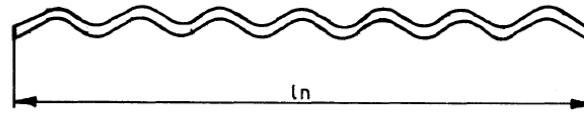
SINIF A-DÜZ, PÜRÜZSÜZ YÜZEYLİ TELLER



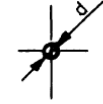
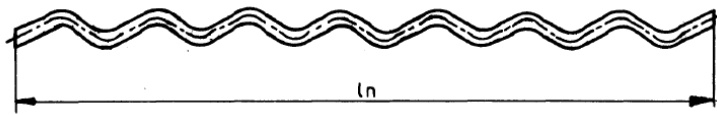
SINIF B-BÜTÜN UZUNLUĞUNCA DEFORME OLMUŞ TELLER
a) ÜZERİNDE GİRİNTİLER (ÇENTİKLER) AÇILMIŞ TELLER



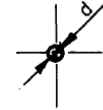
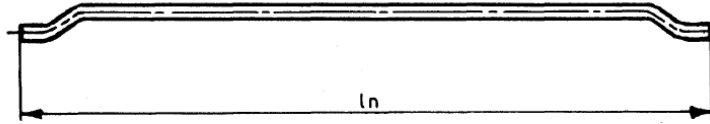
b) UZUNLUĞU BOYUNCA DALGALI TELLER



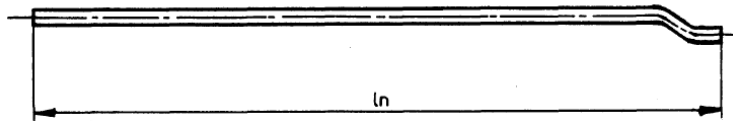
c) AY BİÇİMİ DALGALI TELLER



SINIF C-SONU KANCALI TELLER
a) İKİ UCU KIVRILMIŞ TELLER



b) BİR UCU KIVRILMIŞ TELLER



Şekil 2.2 Sınıflandırmaya göre çelik fiberler [43].

Başta ilgili Türk standardının ve buna dayanarak ilgili literatüre göre çelik fiberler düşük karbonlu çelik olan C 1008'den yaklaşık kopma dayanımı 1100-1200 MPa olarak üretildiği gibi artık yüksek karbonlu ve kopma dayanımı yaklaşık 2200 MPa olarak da üretildiği bilinmektedir [43,45,47,53]. Taşıma ve kullanım kolaylığı sağlaması amaçlanarak çelik fiberler, dizi halinde birbirine değişik tipteki tutkallar vasıtasıyla yapışmış demetler biçiminde üretilmektedir. Yaklaşık olarak 10-30 adet fiberden oluşan bu demetler beton karışımı esnasında, karışım suyunun birleşimi sağlayan tutkalı çözmesi ve aynı zamanda mekanik

etkilerden doğan kuvvetler yardımı ile çözünerek tekil hale gelmektedir. Fiber demetlerinin karışım içinde tekilleşme süresi, kullanılmış olan tutkal tipine ve fiber demetlerinin beton karışımına eklenme zamanına (beton karışımının kuru haldeki durumu ya da karışım suyu ilave edilmiş karışım durumu) bağlı olarak 2 ila 60 sn. arasında değişim göstermektedir [47,51]. Çelik fiber beton içerisine hacimsel olarak %0,5 ila %2,5 arasında katılmaktadır [24,42,45,46]. Bu güne dek yapılan araştırmalar, beklenen en iyi performansın elde edilebilmesi için, beton içerisine hacimsel olarak %1-2 oranının da fiber ilave etmenin yeterli olacağını göstermiştir. Bu hacimsel oran aralığı altında fiber ilave etmek betonun mekanik özelliklerine çok büyük katkılar sağlamazken; daha yüksek hacim oranlarında ilave etmekte hem taze beton özelliklerini hem mekanik özellikleri ters yönde etkilemektedir. Örneğin beton içerisinde çok yüksek oranda çelik fiber kullanmak karıştırma problemleri, yerleştirme problemleri ve basınç dayanımında da ciddi düşüslere sebep olacaktır. Özellikle çelik fiberler ile normal beton tasarımlarında karıştırma sırasında yüksek oranda kullanılan fiberler aşırı zorlanarak eğilip bükülmekte ve yerleştirme sırasında ise üniformluk korunamayabilmektedir. Benzer şekilde yüksek hacim oranında çelik fiberler ile yapılan KYB karışımlarında da fiberler yerleştirme sırasında topaklaşmaya sebep olmakta ve bu ise beton bünyesinde zayıf harç-agrega ara yüzeylerin oluşmasına sebep olabilmektedir [42,45-46]. Diğer taraftan Mehta ve Monteiro [24], fiber takviyeli kompozitleri, fiber hacminin bir fonksiyonu olarak sınıflara ayırmanın uygun olacağını belirtmişlerdir. Buna göre fiber takviyeli kompozitleri %1'den küçük olan “düşük hacim oranlı”, %1-2 arasında “ideal hacim oranlı” ve %2 den daha büyük olan “yüksek hacim oranlı” olarak 3 sınıfa ayrılmıştır. Düşük hacim oranlıların büzülme çatlaklarını düşürmek için plaka ve döşemelerde kullanılmakta olduğunu belirtmişlerdir. İdeal hacim oranının kopma modülünü, kırılma tokluğunu ve çarpma direncini arttırdığını vurgulayarak bu sınıf hacim oranının tabakalaşp ayrışmaya, pullanmaya ve yorulmaya karşı direnç gerektiren yapılarda kullanıldığını ifade etmişlerdir. Yüksek hacim oranının ise yüksek performanslı kompozitlerde kullanılmakta olduğunu savunmaktadırlar [24]. Çelik fiberin plastik büzülme çatlaklarını önleme özelliğinin yanı sıra betonun servis verebilme yeteneğini de olumlu yönde geliştirir [42]. Betona ilave edilecek çelik fiberlerin kırılmaksızın bükülebilir olması ve beton yapısına zarar verecek maddelerden (pas, yağ vb.) arındırılmış olması gerekir [51].

2.2.2. Cam Fiber

Cam fiber günümüzde, bilinen en iyi çok yönlü endüstriyel malzemelerden biri olarak tanınmaktadır. Cam fiber hemen hemen sınırsız kaynaktan elde edilebilen ham maddelerden kolayca üretilebilmektedir. Cam fiberlerde öncelikli bileşen doğal olarak oluşan silikon-

dioksittir. Aynı zamanda küçük miktarlarda diğer minerallerden de içerir. Çinko, alüminyum, titanyum oksitler gibi kimyasallar dengeleyici olarak magnezyum, lityum, baryum, kalsiyum, sodyum, potasyum oksitler ise düzenleyici olarak kullanılarak cam fiber permutasyonları oluşturulur. Bu dengeleyici ve düzenleyici maddelerin karışım içerisinde kullanım ve miktarları cam fiberin fiziksel özelliklerini değiştirebilir. Cam fiberler ham maddelerin yüksek sıcaklık fırınlarında karıştırılıp eritilmesi ile üretilirler [54]. Cam fiberler dayanım, esneklik ve sertlik gibi fiber özelliklerinin yanı sıra, sağlamlık şeffaflık, kimyasal etkilere karşı dayanım, kararlılık ve durağanlık gibi faydalı kütle özellikleri sergilerler. Bu gibi üstün özelliklerinin yanında ekonomik bir donatı türü olması dolayısı ile endüstride sıkça kullanılmaktadır. Cam takviyeli plastik endüstrisi başlıca kullanım alanıdır [51]. Yapısal kompozitlerin üretiminde ve özel amaçlı birçok ürünün üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Uygulamada cam fiberler, belirli boylarda kırılmış halde ya da sürekli fiberler halinde kullanılmaktadır. Tipik cam fiber çapı 3-20 µm arasında değişmektedir. Sınıf olarak cam fiberleri öncelikle düşük maliyet-genel kullanım amaçlı ve özel kullanım amaçlı cam fiberler olarak 2 gruba ayırmak mümkündür [55]. Bu iki gruptaki tüm cam fiberlerin %90'ından fazlası genel kullanım amaçlı ürünlerdir. Bu fiberler E-sınıfı cam (E-glass) olarak isimlendirilirler ve şartları ASTM'ce standardize edilmiştir. Özel kullanım amaçlı cam fiberler de E-sınıf cam fiberler gibi kendilerini tanımlayıcı harfler ile bilinmekle beraber ticari isimlere de sahiptirler fakat bunların tümü E-sınıf cam fiber gibi ASTM standardı ile karakterize edilmemiştir [55-56]. Cam fiberleri tanımlayan harfler ve tanımları tablo 2.2'de verilmiştir. Tablo 2.3'te ise bazı cam fiberlerin bileşimleri ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Cam Fiberler İçin Kullanılan Harfler Ve Tanımları.

Tanımlayıcı harf	Tanım
E	Elektriksel, düşük elektriksel iletkenlik
S	Dayanım, yüksek dayanım
C	Kimyasal, kimyasallara karşı yüksek durabilite
M	Sertlik, yüksek sertlik
A	Alkali, yüksek alkali
D	Düşük dielektrik sabiti

E-Cam; Kompozit malzemelerde kullanılan takviye cam fiberlerin en çok kullanılan türüdür. Düşük maliyetlidir, yalıtım özellikli ve aynı zamanda su emme oranı da düşük bir malzemedir.

S+R-Cam; Yüksek performanslı bir malzeme olup bu özelliğinden dolayı yüksek maliyetlidir. Yalnız uçak sanayinde kullanılır.

C-Cam; Yüksek kimyasal dirence sahip olup genelde depolama tankları imalinde kullanılır.

A-Cam; Kompozit malzemelerin takviyesinde pek kullanılmayıp, pencere ve şişe üretim sanayinde çokça kullanılan bir malzemedir [57].

Tablo 2.3 Cam Fiberlerin Bileşimleri Ve Fiziksel Özellikleri [57].

Özellikler	Cam tipi			
	A	C	E	S
Özgül ağı. (gr/cm ³)	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastikiyet mod.(GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme muk. (MPa)	3033	3033	3448	4585
Isısal genl. kat. (m/m/°Cx10 ⁶)	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727	749	841	970
SiO ₂	72.0	64.4	52.4	64.4
Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na ₂ O,K ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.3
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	-
BaO	-	0.9	-	-

Diğer taraftan cam fiberleri, devamlı fitil, kırpıntı demetler, cam keçe ve cam dokuma şeklinde dört ana gruba ayırmak mümkündür. Bir veya daha fazla fiber demetinden oluşan ve bobinler halinde bulunan cam fiber türü devamlı fitil olarak isimlendirilmektedir. Boyları genel olarak 3-5 mm arasında değişen, kullanım alanı ve ihtiyacına göre farklı boyutlarda üretilebilen cam fiber demetleri, kırılmış fiber olarak tanımlanmaktadır. Sürekli demetlerden ya da fitillerden kırılmış belirli boylarda, genelde 5 cm'lik cam fiberlerin rastgele dağılımla birleştirilmesi ile cam keçe olarak bilinen türü üretilmektedir. Cam dokuma ürünlere gelince, cam fitillerden ve cam ipliklerden üretilmektedir [51].

Cam fiberler genelde çimento hamuruna ya da harç karışımlarına ilave edilirken, kaba agregalı karışımlara yaygın olarak ilave edilmez [49]. Bu tür üretilen çimento esaslı kompozitler “Cam Lifi (fiber) Takviyeli Kompozitler (CLTK)” olarak adlandırılırlar. Bu tür kompozitler, karmaşık ve büyük boyutlu kaplama panellerden, ön-dökümlü betonların üretimine kadar çok çeşitli alanlarda kullanılabilmektedirler [49,58].

2.2.3. Sentetik Fiber

Polimer malzemeler insanoğlu tarafından antik çağlardan beri kullanılmaktadır. Örneğin ipek gibi doğal polimerler, giyim ve dekorasyon alanlarında kullanılmıştır. Kauçuk ve selüloz gibi modern polimerlerin keşfi modern yaşamda önemli bir etkiye sahip olmuştur. Polimer teknolojisinde son 50 yılı aşkındır yaşanan gelişmeler daha iyi fiziksel özelliklere sahip ve daha fazla geliştirilmiş polimer malzemelerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Polimer-teknoloji anlamında kimya endüstrisinin en önemli keşiflerinden biri sentetik polimerler olmuştur. Bu keşif sonrasında, kısa zaman içinde değişik endüstri alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu amaçla sentetik polimerler, çimentolu malzemelerin bilinen özelliklerini geliştirmek için de dizayn edildi ve büyük ticari ölçeklerde üretilmeye başlandı [59-60]. Çimentolu malzemelerde kullanılan sentetik polimerleri polimer-beton, polimer emdirilmiş (enjekte edilmiş) beton, polimer portland çimento betonu ve sentetik fiber takviyeli beton olarak 4 ana grupta toplamak mümkündür. Sentetik fiber, petrokimya ve tekstil endüstrisindeki araştırma ve geliştirmeler sonucunda ortaya çıkan suni fiber çeşididir. Bu tür fiberler değişik formüllerden elde edilen organik polimerlerden türetilerek üretilmektedir. Tablo 2.4'te farklı türdeki sentetik fiberler ve bunlara ait bazı karakteristik özellikler verilmiştir [27,61-62].

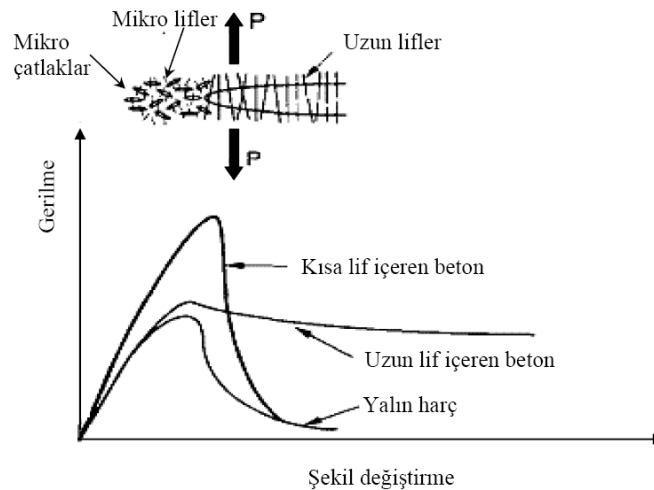
Çimentolu malzemelerde sentetik fiber kullanımı diğer fiber çeşitleri gibi birçok avantajlar sağlamaktadır. Yapılan araştırmalar açıkça göstermiştir ki, beton içerisine sentetik fiber ilave etmek büzülmeyi ve büzülmeden dolayı doğabilecek hasarları minimize etmekte oldukça faydalıdır [63-65]. Aynı zamanda yüzey sertliğini artırmada ve çimento matrisi içinde mikro-çatlakların gelişimi/büyümesini azaltmada faydalı olduğu da tanımlanmıştır [60-62]. Beton teknolojisinde kullanılan sentetik fiberler arasında en ucuz ve sık kullanılan polipropilen fiber tipidir. İyi derecede mekanik özelliklere sahip olup rölatif erime noktası 165°C, özgül ağırlığı 0.91 kg/dm³'tür ve kimyasal kararlılığı iyidir. Herhangi bir kimyasal etki karşısında, polipropilen fiber etkilenmeden çok önce matris tahrip edilmiş olacaktır [66].

Tablo 2.4 Sentetik fiber türleri ve bazı karakteristik özellikler

Sentetik fiber	Özgül ağı. (gr/cm ³)	Çekme ger. (MPa)	Elastikiyet mod. (MPa)	Maks. Uzama (%)	Erime sıcaklığı (°C)	Su emme (%)
Akrilik	1.16-1.18	269-1000	13790-19306	7.5-50	238-253	1-2.5
Aramid I	1.44	2930	62055	4.4	500	4.3
Aramid II	1.44	2344	117215	2.5	500	1.2
Karbon	1.6-1.7	482-793	27580-34475	2.0-2.4	417	38901
Naylon	1.14	965	5171	20	217-238	2.8-5
Polyester	1.34-1.39	227-1103	17237	12-150	275	0.4
Polietilen	0.92-0.96	76-586	5000	3-80	151	-
Polipropilen	0.9-0.91	138-689	3447-4826	15	183	-

2.3 Betonda Karma (Hibrit) Fiber Teknolojisi

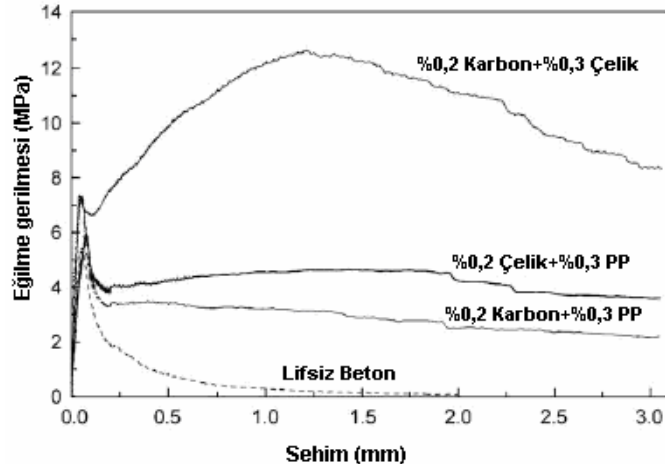
Karma fiber takviyeli beton, yapısına farklı tip ve boyutlarda fiber ilave edilmesi ile üretilen yeni bir kompozit malzemedir [67-68]. Beton kompleks bir malzeme olduğundan, yapısı çoklu faz içermektedir. Beton, bünyesinde mikron ölçeğinde kalsiyum-silikat-hidrat (c-s-h) jeli, milimetre ve santimetre ölçeklerinde kum ve kaba agregası ihtiva etmektedir. Böyle bir kompozit malzeme içerisinde tek tip ve boyutta fiber kullanımının tüm fazlarda iyileştirme sergileyeceğini beklemek mümkün değildir [69-70]. Şekil 2.3'te beton bünyesinde tekil olarak kullanılan farklı fiber çeşitlerinin sergilediği davranış modellenmiştir. Şekilden açıkça anlaşılacağı üzere mikro yapı üzerindeki çatlakların köprülenmesinde mikro fiberler (lifler); makro yapıdaki çatlakların köprülenmesinde makro ölçekteki uzun fiberler etkili olabilmektedir [50,71]. Fiber üretim teknolojisinin sunduğu farklı köken, tip ve boyutlardaki fiberlerin üretim avantajından dolayı beton bünyesinde tekil fiber kullanımının yerine farklı boyutsal özelliklerde (uzunluk, boy-çap oranı vb.) ve/veya farklı kökenlerde (çelik, cam, polimer vb.) fiberler kullanılarak dizayn edilecek karma yapıdaki fiber takviyeli beton daha yüksek mühendislik avantajları ve servis verebilme yeteneği sergileyecektir [72]. Çünkü karma fiber takviyeli beton teknolojisinde amaç yük altında oluşan çatlakların mikro düzeyden başlanarak kontrol altına alınabilmesidir [60,73-74].



Şekil 2.3 Betonda tekil olarak kullanılan farklı fiber (lif) çeşitlerinin çatlak köprüleme davranışı [41,60]

W. Yao ve diğ. [69], beton yapısındaki mikro fiberlerin, mikro düzeydeki çatlakları kontrol altına alarak, bu çatlakların makro çatlaklara dönüşmemesi yönünde çalıştıklarını ya da oluşumu geciktirdiklerini, boyutlarının çok küçük olması dolayısı ile matris içerisinde daha yoğun bir fiber dağılımı oluşturabildiklerini ve aynı zamanda elastik bölgedeki davranışı iyileştirerek geliştirdiklerini belirtirken; aynı zamanda makro fiberlerin, makro ölçekteki

çatlakları kontrol etmede, maksimum yük sonrasındaki davranışı iyileştirmede ve de elastikiyet modülü, çekme ve eğilme dayanımlarını artırmada etkili olduklarını vurgulamışlardır. Şekil 2.4'te de görüldüğü gibi lifsiz betona göre farklı karma fiber içeren beton serileri, toplam fiber hacimleri aynı olmasına rağmen farklı eğilme gerilmeleri ve sehimler sergilemişlerdir. Kabaca her bir serinin eğilme gerilmesi-sehim eğrisi altında kalan alan incelendiğinde, karma fiber içeren serilerin fiber içeriğine göre farklı enerjiler ortaya koyduğu görülür.



Şekil 2.4 Fibrersiz ve karma fiberli olarak tasarlanan karışımların eğilme gerilmesi-sehim grafiği [69]

3. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLAR

Son yıllarda beton teknolojisindeki en önemli gelişmelerden biri, beton teknolojisinde devrim niteliğinde bir gelişme olarak kabul edilen kendiliğinden yerleşen betondur (KYB). Fiber takviyeli betona kıyasla kendiliğinden yerleşen beton (KYB), segregasyonsuz yüksek akıcılığa ve kohezyona sahip olan oldukça yeni bir beton tipidir.

Beton yapıların dayanıklılık problemi Japonya’da 1983 yılı ve sonraki birkaç yıl için ana ilgi konusu olmuştur. Dayanıklı beton üretimi ise yüksek işçilik sonucu iyi sıkıştırma işlemi gerektiriyordu. Hajime Okamura [7] tarafından 1986 yılında, sıkıştırma işlemi gerektirmeyen ve kendiliğinden kalıba yerleşebilen bir betonun gerekliliği ileri sürüldü ve 1988 yılında KYB’un ilk prototipi tamamlandı. Bu tarih ile birlikte KYB hakkında ciddi çalışmalar başladı [7]. Genel bir ifade ile çoğu kaynakta KYB, sıkıştırmak için herhangi bir iç veya dış vibrasyona ihtiyaç duyulmayan bir beton türü olarak tanımlanmaktadır. Başka bir tanıma göre KYB, kendi ağırlığı ile herhangi bir sıkıştırma işlemi gerektirmeden sık donatılı ve aynı zamanda dar, derin kesitlere ayrışma ve terleme yapmadan yerleşen akıcı kıvamlı betondur [75-79]. Kendiliğinden yerleşen beton vibrasyon işlemi gerektirmediği için daha az işçilik gereksinimi ile birlikte gürültü kirliliğini de engeller. Düzgün yüzeyli elemanların üretimini mümkün kıldığı için inşaatların yapım sürecinde işçilik ve zamandan tasarruf sağlamakta ve gürültüyü azalttıklarından dolayı çevre kirliliğini önlemekte ve işçi sağlığına olumlu etki yaptığı bilinmektedir. Fakat bu avantajlarının yanı sıra yüksek akışkanlığından dolayı taşıma ve yerleştirme sırasında terleme ve ayrışma gibi bazı önemli sakıncaları ve dezavantajları da vardır. Karışımında kullanılan malzemeler olarak geleneksel betondan çok farklı olmamakla birlikte, akışkanlaştırıcı, viskozite düzenleyici gibi katkıların kullanımı ve içeriğindeki toz malzeme oranının fazla olması farklı yanları olarak açıklanabilir. Bunun yanında KYB üretimi, geleneksel betondan farklı bir ciddiyet ve hassasiyet gerektirmektedir. Geleneksel yolla üretilen betonların kıvamı yalnızca belirli bir miktar çökme ya da yayılma sergilemesi ile belirlenirken, KYB’un taze beton özellikleri belirli şartlarla sınırlandırılmıştır. Bir betonun KYB niteliği kazanabilmesi, şartları ve sınırları bilim adamlarınca belirlenmiş olan 4 ana taze beton özelliğini sergilemesine bağlıdır. Bu taze beton özellikleri akıcılık, geçiş yeteneği, doldurma yeteneği ve ayrışma direnci olarak sıralanabilir. Bu özelliklerin her birinin belirlenebilmesi için birden fazla test metodu geliştirilmiştir. Belirtilen bu 4 özellik birbiri ile bağlantılıdır. KYB kendi ağırlığı ile vibrasyon işlemine tabi tutulmadan, istenilen kalıba boşluksuz olarak yerleşebilmelidir. Doldurma yeteneği olarak tarif edilen bu özellik, büyük oranda çimento hamurunun akış (deformasyon) yeteneğine ve taneler arası sürtünmeye bağlıdır. Aynı şekilde akıcılık özelliği de bu şartlara

bağlıdır. Yüksek akıcılık kıvamı ile dar kalıpları doldurabildiği gibi donatılar arasından da geçerek doldurma yeteneğini kusursuz bir şekilde sergilemelidir. Tüm bu şartları üniform hali ile, agrega-harç fazı ayrışmadan ve terleme oluşmaksızın sağlamalıdır. Tablo 2.5’te, KYB’un taze beton özelliklerini belirlemek için uygulanan en yaygın test metotları ve değerlendirilen taze beton özellikleri birlikte verilmiştir [80]. Tablo 2.6’da ise bu test metotlarından bazıları için yapılan sınıflandırma ve sınır değerler görülmektedir.

Tablo 3.1 KYB taze beton özellikleri ve uygulamadaki test metodları [80]

Karakteristik	Test metodu	Ölçülen değer
Akıcılık/Doldurma yeteneği	Çökme-yayılma Kajima kutusu	Toplam yayılma Görsel doldurma
Akıcılık/Vizkozite	T ₅₀₀	Akma süresi
	V-hunisi	Akma süresi
	O-hunisi	Akma süresi
	Orimet	Akma süresi
Geçiş yeteneği	L-kutusu	Geçiş oranı
	U-kutusu	Yükseklik farkı
	J-kutusu	Yükseklik, Toplam akma
	Kajima kutusu	Görünür geçiş yeteneği
Ayrışma direnci	Penetrasyon	Derinlik
	Elek ayrışma	Köpüklenme yüzdesi
	Kolon oturma testi	Ayrışma oranı

Tablo 3.2 Uygulamadaki test metotları için sınıflamalar ve sınır değerler

Yayılma Sınıfları		Yayılma Çapı (mm)
SF1		550-650
SF2		660-750
SF3		760-850
Viskozite Sınıfları	Yayılma Süresi (T ₅₀₀)	V-Hunisi Akma Süresi
VS1/VF1	≤ 2	≤ 8
VS2/VF2	> 2	9-25
Geçiş Yeteneği Sınıfları		Bloklanma Oranı
PA1		≥ 0.80 (2 Donatı Engelli)
PA2		≥ 0.80 (3 Donatı Engelli)
Ayrışma Drenci		Ayrışma Drenci (%)
SR1		≤ 20
SR2		≤ 15

Fiberle homojen olarak donatılmış beton, yükler altında gösterdiği davranış açısından, geleneksel betondan farklı özellikler gösterir. Betona ilave edilen fiber, harç fazı matrisini takviye ederek, üzerinden gerilmelerin aktarıldığı küçük köprüler olarak rol oynarlar. Bu şekilde betonun fiberle takviye edilmesi onun zayıf olan özelliklerini güçlendirerek, tokluk, darbe ve ilk çatlak dayanımlarında önemli artışlar sağlamaktadır. Bunun yanında, betona fiber ilave edilmesi kullanılacak olan fiberin fiziksel özellikleri yüzünden işlenebilirliği önemli derecede düşürür.

FTKYB, beton teknolojisinde çok eski ve köklü bir tarihe sahip olan FTB'un mantığı ile 20 yıllık tarihi gelişimiyle tüm dünyada ilgi odağı haline gelmiş olan KYB'un özelliklerinin birleştirilmesi ile ortaya çıkan bir yeni dönem melez beton olarak tanımlanabilir. Fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen beton tasarımı mantık kendiliğinden yerleşen beton karışımını fiber ilavesi ile tasarlayarak bu iki özel betonun yüksek mühendislik özelliklerinden faydalanmaktadır. Günümüzde fiber takviyeli yüksek performanslı beton üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen beton çalışmaları da sayıca çok olmamakla birlikte, yapılan çalışmalar genel olarak çelik fiber kullanımı ile sınırlıdır. Fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen beton tasarımı diğer fiber çeşitlerinin kullanımı ise sayıca daha da azdır. Literatürdeki mevcut kendiliğinden yerleşen beton çalışmaları genellikle yeni beton tasarımları üzerine olup çeşitli olmasına rağmen fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen beton konusu hakkındaki çalışmalar oldukça yeni ve sınırlıdır. Bu konulardaki bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Özkul ve diğ. [9] çalışmalarında, kendiliğinden yerleşen beton hakkında temel ilke ve özellikleri açıklamışlar ve kendiliğinden yerleşen betonların kılcal ve basınçlı su geçirimsizliği, karbonatlaşma, klor geçirimsizliği gibi özelliklerini inceleyerek durabilite davranışlarını araştırmışlardır. Çalışma sonrasında elde edilen bulgulara göre, kendiliğinden yerleşen betonlarda su/çimento oranına bağlı olarak klor geçirimsizliği, kılcal geçirimsizlik, karbonatlaşma ve rötre değerlerinin düşük düzeylerde seyretmekte olduğunu dolayısıyla durabilite özelliklerinin gelişmekte olduğunu vurgulamışlardır.

Sahmaran ve diğ. [19], fiber takviyeli betona kıyasla kendiliğinden yerleşen beton, sağladığı yüksek avantajlarla nispeten yeni bir beton türü olduğunu belirtmişler ve çalışmalarında karma fiberle takviye edilmiş kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirlik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında 2 farklı çelik fiber kullanmışlardır. Çelik fiber etkilerini, fiber hacmi, uzunluğu ve boyutsal oranları temel alarak ölçmüşlerdir. Elde edilen sonuçlara göre bahsi geçen bu üç ana fiber özelliğinin yanı sıra biçim ve yüzey pürüzlülüğü gibi diğer fiber özelliklerinin de işlenebilirlik üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Sahmaran ve Yaman [81] çalışmalarında, yüksek hacimde kaba uçucu kül ile karma fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun taze beton özelliklerini ve mekanik özelliklerini

incelemişlerdir. Karışımında uçucu kül ağırlıkça çimentonun %50'si ile yer değiştirilmiş ve iki farklı çelik fiber tipi kullanılarak kendiliğinden yerleşen betonlar tasarlanmıştır. Taze beton özelliklerini tespit etmek için çökme-yayılma deneyi, V-hunisi deneyi ve hava içeriği testleri; sertleşmiş beton özelliklerini incelemek için ise basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ultrasonik ses hızı tayini testlerini uygulamışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, yüksek hacimde kaba uçucu kül kullanımı beton dayanımını bir miktar düşürmesine rağmen karma fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen beton tasarımında kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Grünewald ve Walraven [16] kendiliğinden yerleşen betonun taze beton özellikleri üzerinde çelik fiber ve kaba agreganın içeriğinin etkisi üzerine bir parametre araştırması yapmışlardır. Kendiliğinden yerleşen betonun ekonomik ve teknik faydalarına aynı zamanda çelik fiber kullanımının olanaklarının yaygınlaşmasına dikkati çektikleri çalışmalarında iki farklı tip agreganın ile döküldükleri referans betonları ile farklı oranlardaki değişik tip çelik fiberli betonların işlenebilirlik özelliklerini mukayese etmişlerdir. Bu amaçla, çökme-yayılma deneyi, J-halkası deneyi v.b. işlenebilirlik deneyleri yapmışlar ve sonuç olarak karışıma çelik fiber eklemenin, eklenen fiber oranının artırılmasının kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirlik özelliklerini ters yönde etkilediğini vurgulamışlardır.

Corinaldesi ve Moriconi [79], fiber takviyeli dayanıklı kendiliğinden yerleşen beton adlı çalışmalarında ince kesitli ön dökümlü elemanlar üretmek amacıyla bir kendiliğinden yerleşen beton tasarımı yapmışlardır. Beton üretimi sırasında karışıma kütlece çimentonun %10'u oranında çelik fiber ekleyerek karışımın homojenliğini sağlamışlardır. Üretilen betonlara basınç, eğilme dayanımı testleri ve aynı zamanda servis verebilme yeteneğini değerlendirmek amacıyla donma-çözünme, karbonatlaşma ve klorit penetrasyonu gibi durabilite deneyleri uygulamışlardır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Kullanılan Malzemeler

4.1.1 Çimento

Tez çalışmasında tüm deney numunelerinin tasarım ve üretiminde Elazığ çimento fabrikasından elde edilen CEM I 42.5 N tipi çimento kullanılmıştır. Deney sonuçlarının etkilenmemesi için, tüm deney serileri için gerekli olan çimento yaklaşık olarak hesaplanıp tek seferde temin edilerek rutubetsiz ve kuru bir ortamda saklanmıştır. Taze olarak temin edilen ve uygun koşullarda saklanarak kullanılan çimento, süresi içinde bozulmaya uğramadan tüketilmiştir. Kullanılan çimentoya ait kimyasal ve bazı fiziksel özellikler tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Deneylerde kullanılan çimentonun kimyasal ve bazı fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler							Fiziksel Özellikler			
Oksitler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K.K.	Blaine	Öz.Ağ.	f _{ce}
CEM I 42.5 N	21.12	5.62	3.24	62.94	2.73	1.79	1.78	3382	3.10	51.7

4.1.2 Viskozite Arttırıcı Toz Malzeme

Tez çalışması için tasarlanan karışımların ince malzeme oranını arttırmak için katkı malzemesi olarak uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül Sivas Kangal termik santralinden temin edilmiştir. Elde edilen bu mineralojik katkı maddesi laboratuvar şartlarında torbalanmış olarak çalışma süresince muhafaza edilerek kullanılmıştır. Kangal Termik santralinden elde edilen uçucu külün içerdiği hakim kristal fazlar: kuvarz, hematit, manyetit, anhidrit, feldspat ve serbest kireçtir. Ana faz ise amorf ve camı fazdır. Kangal uçucu külünün içeriği yakından incelendiğinde camı fazın silisle birlikte alümine içeren bir karakterde olduğu anlaşılır [82].

Bilindiği gibi uçucu küllerin kimyasal kompozisyonunu etkileyen birçok faktör vardır. Bunlardan bazıları; kömür yatağının değişmesi, üretilen elektrik enerjisi miktarı, termik santralin kısa süreli zorunlu duruşları, yakma sıcaklığının değişmesi olarak sıralanabilir. Aynı termik santralin farklı ünitelerinden farklı kompozisyonda uçucu küller elde edilmesi de bu nedenlerle olasıdır [82]. Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 Kullanılan toz malzeme kimyasal özellikleri

Oksitler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
% bileşen	38.34	16.69	5.11	27.62	1.60	4.44	1.29	0.61

Kangal Termik Santral’inden elde edilen uçucu kül, kimyasal kompozisyon açısından önemli değişiklikler göstermemektedir. Dolayısıyla, bu termik santralden üniform özelliklere sahip uçucu kül sağlanmasının mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Ortalama değerler göz önünde bulundurularak, standartlarda verilen sınır değerlerle karşılaştırma tablo 4.3’te verilmiştir. Tablo 4.3’teki değerlere bakıldığında Kangal uçucu külünün yüksek kireçli (CaO>%10), sülfokalsik bir uçucu kül (ENV 197-1’de W sınıfı) olduğu görülmektedir. Ayrıca, linyit kömürünün yakılmasıyla elde edildiğinden, ASTM C-618 C sınıfı uçucu küldür [82-83].

Tablo 4.3 Kangal Uçucu Külü Kimyasal Kompozisyonunun Standart Sınırlarıyla Karşılaştırılması

Oksit (%)	Kangal UK	TS 639 Sınırları	ASTM C 618 Sın.	EN 450 Sınırları	ENV 197-1 Sınırları	
					V	W
SiO ₂	38.34	-	-	-		
Al ₂ O ₃	16.69	-	-	-		
Fe ₂ O ₃	5.11	-	-	-		
S+A+F	60.14	> 70.0	> 50.0	-		
CaO	27.62	-	-	-		
Serbest CaO				< 1.0		
Reaktif CaO	~19.0	-	-		< 5.0	> 5.0
Reaktif SiO ₂	~32.50			> 25.0	>25.0	>25.0
Cl ⁻				< 1.0		
MgO	1.60	< 5.0	-			
SO ₃	4.44	< 5.0	< 5.0	< 3.0		
K ₂ O	1.29	-	-			
Na ₂ O	0.61	-	-			
K.K	0.79	< 10.0	< 6.0	< 5.0	< 5.0	< 5.0

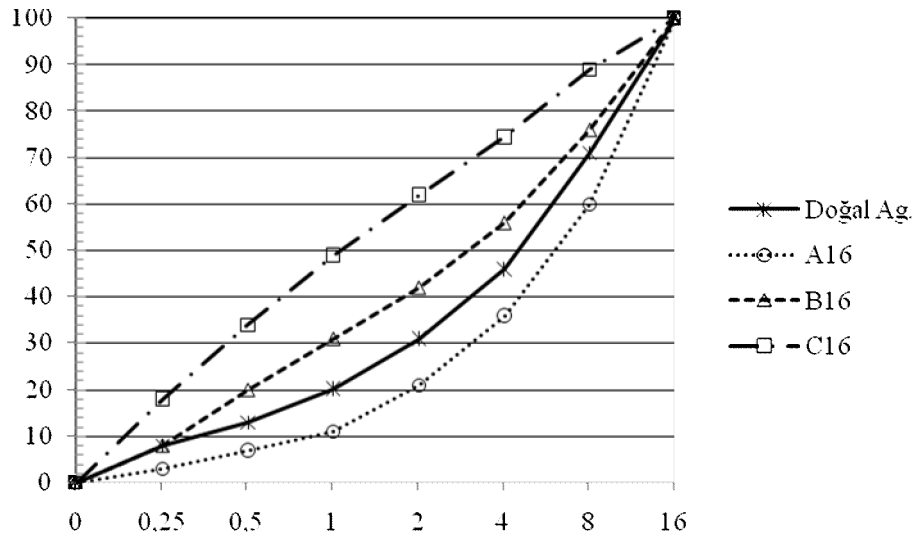
Tablo 4.3’te görüldüğü gibi Kangal uçucu külü TS 639’da belirtilen S+A+F>%70 koşulunu sağlayamamaktadır. Buna karşın ASTM 618 sınırını sağlamakta ve de ENV 197-1’de W tipi uçucu küller için belirtilmiş olan koşullara uygundur. Dolayısıyla TS 639 açısından kullanılabilir olmamakla birlikte diğer iki standart açısından Kangal uçucu külü, kimyasal kompozisyon bakımından kullanılabilir niteliktedir [83-84]. Kangal uçucu külünün fiziksel özellikleri ise; özgül ağırlığı 2.50 gr/cm³ ve blaine inceliği 1343 cm²/gr’dır. Kangal uçucu külünün portland çimentosuyla birlikte kullanılması halinde basınç dayanımı 18.1 N/mm², kireçle birlikte kullanılması durumunda ise 3.8 N/mm²’dir. Pozolanik aktivitesi de %34.3 olarak tespit edilmiştir [82].

4.1.3 Agregas

Tez çalışmasında kullanılmış olan iri ve ince agrega Elazığ Palu yöresi doğal agregasıdır. Kullanılan agrega da diğer deney malzemelerinde olduğu gibi toleranslı olarak hesaplanarak tek seferde temin edilmiştir. Beton tasarımında fiber takviyesi ve yüksek akıcılık ön planda olduğu için maksimum agrega çapı 16 mm olarak seçilmiştir. Malzemeler temin edildikten sonra nem ve rutubetten uzak laboratuvar şartlarında metal konteynırlara doldurularak depolanmıştır. Deney numunelerinin üretiminde agregaların nem içeriği kontrol edilerek, agregalar kısa süre içerisinde kullanılmış ve deney sonuçlarının agrega su içeriğinden etkilenmemesine dikkat edilmiştir. Kullanılan agregaya ait bazı fiziksel özellikler Tablo 4.4'te, tane dağılımı eğrileri ise Şekil 4.1'de verilmiştir [85].

Tablo 4.4 Kullanılan agrega fiziksel özellikleri

Fiziksel özellik	Doğal Agregas	
	İri	İnce
Özgöl ağırlık (kg/dm ³)	2.71	2.65
Gevşek birim ağırlık (kg/dm ³)	1.48	1.59
Aşınma kaybı (500 dev. %)	11.6	-
Su emme (%)	1.15	1.18



Şekil 4.1 Kullanılan agrega ve ilgili sınır tane dağılımı eğrileri

4.1.4 Karışım Suyu

Deneysel çalışma süresince, karışımların tasarımında ve deney numunelerinin üretiminde Elazığ şehir şebekesi içme suyu kullanılmıştır. Karışım suyu herhangi bir bekletme, dinlendirme gibi işlemlere tabi tutulmadan şebekeden alındığı gibi kullanılmıştır [86].

4.1.5 Kimyasal Katkı

Çalışmada kimyasal katkı olarak, Sika Yapı Kimyasalları AŞ'den temin edilen, yüksek performanslı bir hiper-akışkanlaştırıcı olan 3. nesil beton ve harç katkısı Sika ViscoCrete Hi-Tech 30 ürünü kullanılmıştır. Bu ürün yüksek oranda su azaltması yanında uzun işlenebilirlik sağlaması sebebiyle tercih edilmiştir. Bu özelliklerinin yanı sıra sık donatılı betonarme imalatında kullanımında da oldukça iyi performans sergilediği bilinmektedir [87]. Ayrıca çift etkili bir katkı olup çimento tanecikleri üzerinde elektriksel etkileşim ve saçaklanma yöntemleri ile hidrasyon sürecine paralel olarak:

- Yüksek oranda su azaltma, yüksek birim ağırlık ve dayanım olanağı,
- İyi derecede kendiliğinden yerleşme özelliği kazandırma,
- Dona karşı dayanıklılığı artırma,
- Klorür içermemesi dolayısı ile donatı zararını en az seviyeye indirme,
- Betonun karbonatlaşma hızını düşürme,
- Betonda büzülme azaltma

gibi bir çok avantaj sağlamaktadır [87]. Kullanılan bu ürünle ilgili bazı teknik bilgiler Tablo 4.5'te sunulmuştur.

Tablo 4.5 Kimyasal katkıya ilişkin teknik bilgiler

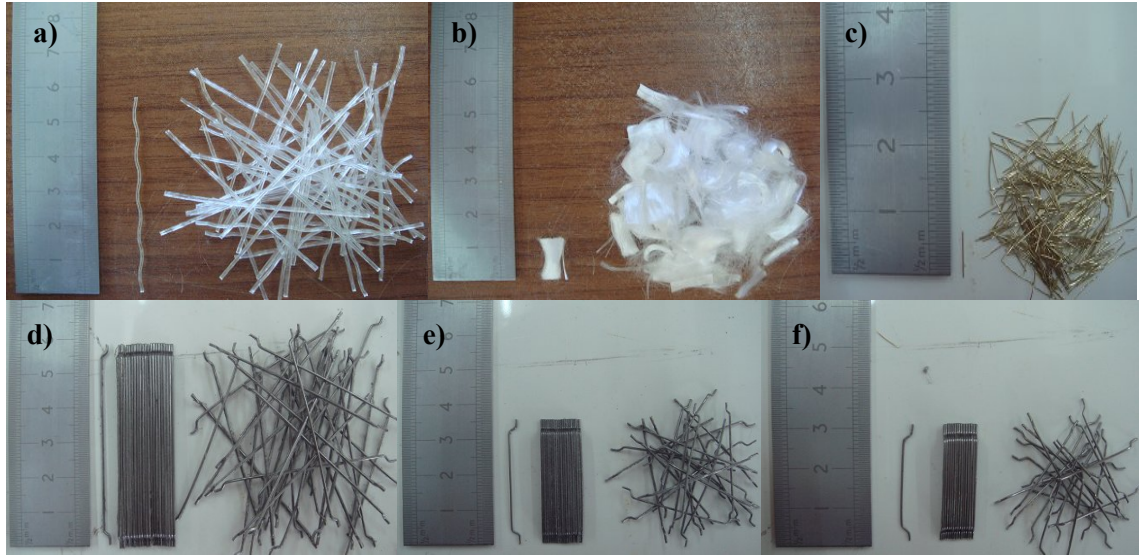
Sika ViscoCrete Hi-Tech 30	
Görünüm/Renk	Açık kahverengi sıvı
Kimyasal yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk (kg/l, 20°C'de)	1.07-1.11
Ph değeri	3-7
Donma noktası (°C)	-9
Suda çözünabilir klorür (%)	Maks. 0.1, klorür içermez
Alkali miktarı (%Na ₂ O eşdeğeri olarak)	Maks. 4

4.1.6 Kullanılan Fiberler

Tez çalışmasında fiber olarak metalik ve sentetik polimer esaslı olmak üzere 2 farklı kökene sahip fiberler kullanılmış olup, Beksa AŞ'den temin edilmiştir. Fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun mekanik ve durabilite özelliklerini araştırabilmek için 4 farklı boy/çap oranına sahip ve 2 farklı şekilde (kancalı ve düz uçlu) 4 çelik fiber; 2 farklı boyut ve şekilde de polimer esaslı sentetik fiber seçilmiştir. Seçilen fiberler Şekil 4.2'de ve bu fiberlere ait bazı fiziksel özellikler Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6 Kullanılan fiberlere ilişkin fiziksel bilgiler

	Özg. ağı. kg/dm ³	Uzunluk (mm)	Eşdeğer çap (mm)	Boy/çap oranı	Çek. day. (MPa)	Geometri
Çelik fiberler						
Dramix RC 80/60 BN	7.85	60	0.75	80	Min 1050	Kancalı
Dramix RC 65/35 BN	7.85	35	0.55	64	Min 1150	Kancalı
Dramix ZP 305	7.85	30	0.55	55	Min 1100	Kancalı
OL6/.16	7.17	6	0.15	40	2000	Düz
Sentetik Fiberler						
Synmix	0.92	55	0.80	70	400	Dalgalı
Duomix	0.92	13	22 mikron		400	Düz fibrilize



Şekil 4.2 Tez çalışmasında kullanılan fiberler: **a)** Sentetik makro fiber (Synmix), **b)** Sentetik mikro fiber (Duomix), **c)** Yüksek karbonlu düz çelik fiber (OL6/.16), **d)** Dramix RC 80/60 BN, **e)** Dramix RC 65/35 BN, **f)** Dramix ZP 305

4.2 Karışım Oranları

Fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun mekanik ve durabilite özelliklerini araştırmak amacıyla 6 tip fiber ile 24 farklı karışım oranına sahip beton serileri tasarlanmıştır. Bu 24 farklı fiber içeriğine sahip beton serilerine kontrollük etmesi amacı ile bu serilerle hemen hemen aynı karışım oranı içeriğine sahip kontrol KYB serisi tasarlanmıştır. Beton serilerinde fiberlerin KYB'un dayanım ve durabilite özelliklerinde tekil olarak kullanımı ile oluşturduğu etkiyi gözlemleyebilmek için 6 karışım serisinde fiberler tekil olarak kullanılırken, fiberlerin karışım içerisindeki sinerji etkilerini saptayabilmek için diğer karışım serilerinde, farklı tip fiberler farklı oranlarda, ikili ya da dördü fiber kombinasyonları şeklinde karma (hibrit) karışımlar olarak tasarlanmıştır. Çalışmada karışım çeşitliliğini oluşturan fiberler, kullanıldığı karışım serisindeki çeşit ve oranları ile birlikte Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7 Karışım çeşitliliğini oluşturan fiberlerin serilerdeki oranları *

Fiberlerin uzunluk ve boy/çap oranları	Verilen rumuzlar	Tasarlanan beton serileri			
		Seri no	Fiber içeriği	Seri no	Fiber içeriği
		1	%100 Ç1	13	%50Ç3+%50Ç4
		2	%100 Ç2	14	%50P1+%50Ç4
		3	%100 Ç3	15	%25Ç1+%75Ç2
60 mm,80 (makro fiber)	Ç1	4	%100 Ç4	16	%25Ç1+%75Ç3
35 mm,64 (makro fiber)	Ç2	5	%100 P1	17	%25Ç1+%75Ç4
30 mm,55 (makro fiber)	Ç3	6	%100 P2	18	%25Ç2+%75Ç3
6 mm, 40 (mikro fiber)	Ç4	7	%200 P2	19	%25Ç2+%75Ç4
55 mm,70 (makro fiber)	P1	8	%50Ç1+%50Ç2	20	%25Ç3+%75Ç4
13 mm, - (mikro fiber)	P2	9	%50Ç1+%50Ç3	21	%25P1+%75Ç3
		10	%50Ç1+%50Ç4	22	%25P1+%75Ç4
		11	%50Ç2+%50Ç3	23	%25x(Ç1+Ç2+Ç3+Ç4)
		12	%50Ç2+%50Ç4	24	%25x(Ç3+Ç4+P1+P2)

*25. seri fiber içermeyen kontrol KYB karışımı olarak tasarlanmıştır.

Yapılan 101 deneme tasarım karışımı neticesinde, üretilecek beton deney numunelerinin dayanım ve durabilite özelliklerinin beton bileşen yapısından etkilenmemesi amacı ile beton ana iskeleti olarak birbiriyle benzeşen karışım oranları deney karışım serileri olarak seçilmiştir. Tüm karışım serilerinde bağlayıcı dozajı (toplam toz) 500 kg. olarak tasarlanmıştır. Ekonomik bir beton karışımı elde edebilmek için bu dozajın ağırlıkça %30'u oranında UK mineral katkı

malzemesi olarak FTKYB karışımlarında kullanılmıştır. Üretilen FTKYB serilerinin taze beton ve dayanım özelliklerinin su/bağlayıcı oranından ve kullanılan akışkanlaştırıcı oranından etkilenmemesi için sırasıyla su/bağlayıcı oranı 0,40 ve akışkanlaştırıcı malzeme 3 seri haricinde tüm karışımlarda bağlayıcı malzemenin ağırlıkça %1.25 oranında kullanılarak sabit tutulmuştur. Kullanılan fiberlerin karışımlardaki oranına gelince; çelik fiberler 50 kg.m^{-3} , P1 makro fiber 6 kg.m^{-3} , P2 mikro fiber ise 600 gr.m^{-3} (düşük) ve 1200 gr.m^{-3} (yüksek) dozlarda ilave edilmiştir. Kontrol KYB ve FTKYB serilerine dair karışım oranları Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8 Kontrol KYB ve FTKYB serilerinin karışım oranları (%)

Seri no	Çimento	UK	Su	İnce agr.	Kaba agr.	Fiber	SA**
1	11.3	6	20	32.65	29.41	0.64	1.25
2	11.3	6	20	32.63	29.43	0.64	1.25
3	11.3	6	20	32.62	29.44	0.64	1.25
4	11.3	6	20	32.60	29.40	0.70	1.25
5	11.3	6	20	32.65	29.40	0.65	1.25
6	11.3	6	20	32.91	29.75	0.065	1.10
7	11.3	6	20	32.87	29.70	0.13	1.15
8	11.3	6	20	32.64	29.42	0.64	1.25
9	11.3	6	20	32.64	29.42	0.64	1.25
10	11.3	6	20	32.60	29.44	0.66	1.25
11	11.3	6	20	32.62	29.44	0.64	1.25
12	11.3	6	20	32.60	29.44	0.66	1.25
13	11.3	6	20	32.60	29.44	0.66	1.25
14	11.3	6	20	32.60	29.43	0.67	1.25
15	11.3	6	20	32.63	29.43	0.64	1.25
16	11.3	6	20	32.63	29.43	0.64	1.25
17	11.3	6	20	32.60	29.41	0.68	1.25
18	11.3	6	20	32.63	29.43	0.64	1.25
19	11.3	6	20	32.60	29.41	0.68	1.25
20	11.3	6	20	32.60	29.41	0.68	1.25
21	11.3	6	20	32.63	29.43	0.64	1.25
22	11.3	6	20	32.60	29.41	0.68	1.25
23	11.3	6	20	32.63	29.43	0.65	1.25
24	11.3	6	20	32.62	29.45	0.63	1.25
25*	11.3	6	20	32.95	29.75	-	1

*Fiber içermeyen kontrol KYB karışımıdır.

**SA karışıma ekstradan ilave edilmiş olup % miktarı, çimento miktarı temel alınarak tabloya eklenmiştir.

4.3 Taze Beton Deneyleri

Tez çalışmasının tüm deneysel ve teknik çalışma kısmı Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır. Taze beton deneyleri, standartlarca KYB elde etmek için tasarlanan aparatlar ile yapılmıştır. Bu çalışmada FTKYB karışımları tasarlayabilmek için çökme-yayılma (T_{500} ve yayılma çapı), V-hunisi ve L-kutusu deneyleri

yapılmıştır. Geçiş yeteneğinin değerlendirildiği L-kutusu deneyi, yüksek seviyede uzunluğa sahip çelik ve polipropilen sentetik makro fiberlerin kullanıldığı karışımlarda, donatı engeli olmaksızın, 1, 2 ve 3 donatı engelli olarak ayrı ayrı uygulanmıştır. Daha önceden yapılmış olan araştırmalar ve bu araştırmalarda önerilen tavsiyeler doğrultusunda bu tür bir uygulama yoluna gidilmiştir [53,80,88-89].

FTKYB üretimi için tasarım karışımları 52 dm³ hacim kapasiteli pan tipi karıştırıcı ile hazırlanmıştır. Gerekli miktarda deneme karışımları hazırlanarak, sırası ile çökme-yayılma çapı ve çökme-yayılma süresi (T₅₀₀), V-hunisi akış hızı ve L-kutusu deneyleri uygulanmıştır. Taze beton deneylerinde kullanılan deney alet ve aparatları Şekil 4.3'te sunulmuştur.



Şekil 4.3 Taze beton deneylerinde kullanılan deney alet ve aparatları (L-kutusu, çökme yayılma tablası, çökme hunisi, V-hunisi ve karıştırıcı)

4.4 Numunelerin Hazırlanışı

Deneme karışım oranları kullanılarak taze beton deneyleri uygulanması sonrasında tasarımları gerçekleştirilen kontrol KYB ve FTKYB karışımları sırasıyla hazırlanarak kalıplara dökülmüştür. Numunelerin hazırlanmasında öncelikle ince agregası, çimento ve toz katkı malzemesi (UK) kısa bir süre kuru olarak karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyunun belirli bir miktarı ilave edilmiş ve topaklaşmaya meydan vermemek için kaba agregası karışıma eklenmiştir.

Karışım suyunun geri kalan kısmı ve süper akışkanlaştırıcı malzeme ayrıca karıştırılarak betoniye ilave edilmiştir. Karışıma eklenecek fiber ise akışkanlaştırıcı madde etkisini tam olarak göstermeden karışıma ilave edilmiştir. Bu yolla, fiberlerin kuru bir karışıma eklenerek zorlanmalardan oluşacak eğilme ve bükülme riski ortadan kaldırılmış olurken aynı zamanda karışım tam olarak akıcılığa ulaşp yumuşamadığı için fiberlerin düzgünce ayrılarak üniform olarak yayılması sağlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan beton karışımları hazırlanan kalıplara tek seferde değil, her numune kalıbında hazırlanan taze beton karışımını temsil edebilmesi için 2 aşamada doldurulmuştur. Bu amaçla hazırlanan her numune kalıbı öncelikle yarısına kadar, daha sonra ise geri kalan kısmı tam olarak doldurulmuştur. Kalıpların doldurulma işlemi ise kalıpların merkezleri hedef alınarak ayrılmaya sebep olmayacak biçimde yapılmıştır. Kalıplara dökülen numuneler üzerlerine gerekli bilgiler etiketlenerek, laboratuvar ortamında 1 gün bekletilmiştir. Daha sonra bu numuneler kenar ve köşeleri kırılmayacak şekilde kalıplardan çıkartılarak $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki kür tankına yerleştirilmiş ve öngörülen sürelerde numunelere su kürü uygulanmıştır. Dayanım deneyi uygulanacak numunelere 3, 7, 28, 56 ve 90 günlük su kürü uygulanırken, durabilite deneyleri uygulanacak numunelere yalnızca 28 günlük su kürü uygulanmıştır. Şekil 4.4'te kür havuzları ve su kürü uygulanmakta olan numuneler gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Kür havuzları ve su kürü uygulanan numuneler

Uygulanacak dayanım ve durabilite deneyleri için 100x100 mm ölçülerinde küp, 100 mm çap 200 mm yüksekliğinde silindir, 75x75x300 mm ölçülerinde prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Her bir deney için 3'er adet numune hazırlanmıştır. Deney tarihi gelen numuneler kür havuzundan yaklaşık olarak 6 saat önce çıkarılıp hava ortamında bekletildikten sonra teste tabi tutulmuştur.

4.5 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesinde Uygulanan Deneyler

4.5.1 Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi 3, 7, 28, 56 ve 90 günlük su kürü sonrasında uygulanmıştır. Her bir FTKYB ve KYB serisinden 3'er adet 100x100 mm ölçülerindeki numuneler basınç deneyine tabi tutulmuştur. Numunelere basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3 [90] standardındaki hususlar dikkate alınarak uygulanmıştır. Basınç dayanımı deneyinin uygulanmasında 3000 kN yükleme kapasiteli hidrolik yük kontrollü, dijital göstergeli otomatik pres kullanılmıştır. Basınç deneyi sonrasında kırımı gerçekleştirilen her bir numuneye ait bilgiler özenle deney föylerine işlenerek, bu bilgiler ışığında sonuç grafikleri oluşturulmuştur. Basınç deneylerinin uygulandığı pres Şekil 4.5'te sunulmuştur.



Şekil 4.5 Yük kontrollü pres

4.5.2 Çekme Dayanımı Deneyleri

Tez çalışmasında üretilen beton serileri üzerinde 2 farklı çekme dayanımı deneyi uygulanmıştır. Uygulanan çekme dayanımı deneylerinden biri 100 mm çap ve 200 mm yükseklikteki silindir numuneler üzerinde uygulanan yarmada çekme dayanımı deneyi; diğeri ise 75x75x300 mm ebatlarındaki prizmatik kiriş numuneler üzerinde uygulanan 3 noktalı eğilmede çekme deneyidir. Yarmada çekme dayanımı deneyi Şekil 4.5’te sunulan otomatik yük kontrollü preste uygulanırken, eğilmede çekme dayanımı deneyi üç noktalı olarak düzenlenen ve Şekil 4.6’ sergilenen eğilmede çekme aleti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyinde olduğu gibi çekme dayanımı deneylerinde de her bir seriden 3’er adet deney numunesi 3, 7, 28, 56 ve 90 günlük su kürü sonrasında belirtilen çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Test edilen numunelere dair bilgiler deney föylerine işlenerek sonuç grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.6 Yük kontrollü eğilmede çekme deney aleti

4.5.3 Ultrasonik Ses Geçirgenlik Hızı Tayini

Üretilen beton serilerinin ultrasonik ses geçirgenlik (USG) hızını belirlemede Pundit cihazı kullanılmıştır. Bu alet kullanılarak ses dalgasının, numunenin düzgün bir yüzeyinden, karşılıklı olarak diğer yüzeyine geçiş süresi kaydedilmiştir. Ses dalgasının geçiş esnasında kat ettiği mesafe kaydedilen süreye oranlanarak USG hızı 4.1 denklemi ile bulunmuştur.

$$V = (S / t) 10^6 \quad (4.1)$$

Burada;

V = Dalga hızı (metre/saniye),

S= Beton bloğun ses-üstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe (m),

t = Dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zamandır (µsn) [91-92].

Tez çalışmasında USG hızı tayini için 100x100 mm ve 75x75x300 mm ebatlarındaki küp ve prizmatik numuneler kullanılmıştır. Küp numunelere 3, 7, 28, 56 ve 90 günlük su kürü sonrasında USG hızı tayini deneyi uygulanırken, prizmatik numunelere durabilite deneyleri öncesi ve sonrasında uygulanmıştır. Su kürü sonrasında uygulanan her deneyde olduğu gibi bu deneyde de numuneler deney öncesinde 6 saat bekletilerek yüzeylerinin kuruması ve bekletme neticesinde tüm deney numunelerinin su kürü sonrası durumlarının bir ölçüde standardize edilerek, deney sonuçlarının değişik nem içeriğinden etkilenmemesi sağlanmıştır. Bu bekleme süresi sonrasında deney numunelerinin yüzeyleri olası toz, kir, çapak ve benzerlerinden arındırılarak Pundit dalga verici ve alıcı uçlarının beton yüzeylerine tam teması sağlanmıştır. Ayrıca dalga verici ve alıcı uçların beton yüzeylerine iyice yapışarak okumaların daha düzgün yapılabilmesi için dalga verici ve alıcı uçları arasına bir miktar yağ sürülmüştür. Bu şekilde deneye hazırlanan beton numunelerin düzgün 4 yüzeyinden karşılıklı olarak 2 okuma yapılmış ve bu 2 değerın ortalaması alınarak deney föylerine işlenmiştir. Bu bilgiler ışığında USG hızı tayinine dair sonuç grafikleri oluşturulmuştur.

4.6 Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesinde Uygulanan Deneyler

4.6.1 Rölatif Porozite Deneyi

Rölatif porozite deneyi 75x75x300 mm ölçülerindeki prizmatik numuneler üzerinde uygulanmıştır. Rölatif porozite deneyi, mekanik dayanım deneyleri uygulanan numuneler hakkında fiziki bilgi edinebilmek, porozitenin deney sonuçların ne ölçüde etkilediğini gözleyebilmek ve durabilite deneyleri sonucunda porozitedeki değişimleri gözleyip bu değişimin oluşturduğu etkileri saptayabilmek için çalışma kapsamına alınmıştır. Rölatif porozite:

$$P_r = \frac{W_{dyk} - W_k}{W_{dyk} - W_s} \times 100 \quad (4.2)$$

formülü ile hesaplanır. Burada;

P_r : Rölatif porozite (%),

W_s : Numunenin su içindeki ağırlığı (kg),

W_k : Numunenin etüv kurusu ağırlığı (kg),

W_{dyk} : Numunenin doymun yüzey kuru ağırlığıdır (kg).

Rölatif porozite deneyi için hazırlanan deney düzeneği Şekil 4.7’de sunulmuştur.



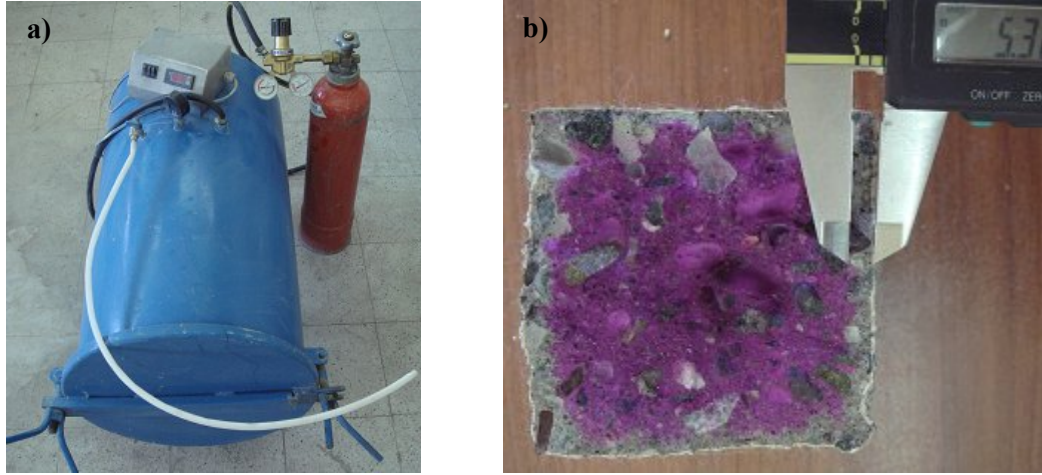
Şekil 4.7 Rölatif porozite deney düzeneği (Arşimet terazisi)

4.6.2 Karbonasyon Deneyi

Karbonasyon karbondioksitin malzeme üzerindeki etkisini açıklamak için kullanılan bir terimdir. Karbonatlaşma olarak da bilinen bu olay nadiren yapısal problemlere neden olur. Ancak korozyonu tetikleyen bir fenomen olarak karbonasyon, yapılar üzerinde çirkin kavlamalara, parçalanmalara neden olabilir. Çimentolu malzemelerin karbonasyonu, malzemelerin pH değerinde düşüşü netice verir. Bu olay malzemenin alkalın miktarını düşürdüğünden nötrleşme-nötralizasyon gibi terimlerde kullanılmaktadır [93-94]. Çeliği koruyan alkalın ise karbonasyon neticesinde etkinliğini yitirir ve beton bünyesinde bulunan çelik (betonarme donatı çeliği, çelik fiber vb.) korozyon tehlikesine açık hale gelir [95-97].

Beton üzerinde karbonasyon araştırmaları normal ortam koşulları altında karbonasyon ve hızlandırılmış karbonasyon olmak üzere 2 ayrı şekilde yapılmaktadır. Normal ortam koşulları altında karbonasyon araştırmaları çok uzun zaman almaktadır. Beton numuneler üzerinde uygulanan deney neticeleri ise, kısa zamanda ve gerçeği yansıtacak şekilde alınmak istendiğinden, karbonasyon için gerekli koşullar sağlanarak hızlandırılmış karbonasyon

teknikleri daha yaygın olarak uygulanmaktadır. Hızlandırılmış karbonasyon için ise diğer ortam koşullarının sabit tutulup, uygun sıcaklık, nem ve karbondioksit oranının kontrol edilebileceği bir deney atmosferinin oluşturabilmesi gereklidir [98]. Tez çalışmasında karbonasyon deneyi için, böyle bir suni atmosferin sağlandığı Şekil 4.8 a’da deney alet düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.8 Hızlandırılmış karbonasyon deney aleti (a) ve numune üzerinde karbonasyon derinliğinin ölçümü (b)

Deney aleti dış kısmında: 0-1 bar aralıklı manometre, ısı ve fan kontrol ünitesi, hava tahliye vanası, tek yönlü valf; iç kısmında ise: fan, delikli numune rafları, termostat ve su ısıtıcılı su kabı içermektedir. Yaklaşık 50 cm kadar iç çapı olan alet hava geçirimsiz ve basınca dayanıklı kapağa sahiptir. Bu özelliklere sahip deney aleti içerisine deney için hazırlanan numuneler belirli aralıklarla yerleştirildikten sonra alet kapağı sıkıca kapatılmıştır. Bu şekilde hazırlanan düzenek ile karbonasyon deneyleri yaklaşık olarak $\%55 \pm 3$ bağıl nem ortamında yapılmıştır. Alet içindeki su kabına sodyum-dikromat çözeltisi eklenmiş ve su sıcaklığı 20°C 'de sabitlenerek belirtilen nem oranı stabil hale getirilmiştir. Deneye başlanmadan önce yerleştirilen numuneler ile aletin nem oranının dengelenmesi için belirli bir süre beklenilmiştir. Daha sonra sisteme bağlı olarak bulunan karbondioksit tüpü yardımı ile ortama karbondioksit verilerek deneye başlanmıştır. Literatürdeki çoğu çalışmadan farklı olarak, bu çalışmada deney numunesi olarak 75x75x300 mm ebatlarındaki prizmatik numuneler kullanılmıştır. Numuneler düzenek içerisinden deneye başladıktan 1 hafta (7 gün) sonra çıkarılarak Şekil 4.10b’de gösterildiği gibi, numunede oluşan karbonasyon derinliğini temsil edecek ortalamada ölçümler alınmış ve kaydedilmiştir.

4.6.3 Yüksek Sıcaklık Deneyi

Yüksek sıcaklık, yangın direnci ve benzeri isimlerle literatürde isimlendirilen bu durabilite deneyi birçok araştırmacı tarafından ele alınmış ve incelenmiştir. Yapılan çoğu çalışmada beton numuneler üzerinde, farklı sıcaklıklar ve farklı uygulama süreleri denenmiş ve bu uygulamaların daha çok basınç dayanımı üzerindeki etkileri irdelenmiştir [98,101]. Literatürde yapılan bu tür araştırmalardan farklı olarak bu tez çalışmasında, 4 farklı sıcaklık (20, 300, 600, 900) derecesinde 1 saat süre ile sıcaklık deneyine tabi tutulan KYB ve FTKYB numuneleri üzerinde basınç, yarmada çekme, eğilmede çekme dayanımı deneyleri ile USG hızı tayini, rölatif porozite, karbonasyon ve basınçlı su geçirgenlik deneyleri uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık deneyi için Şekil 4.9’da sunulan otomatik ısı kontrollü fırın kullanılmıştır. Isınma hızı 6°C/dakika, 1200°C limit sıcaklık kapasitesi gibi teknik özelliklere sahip olan Prothern HLF 150 laboratuvar tipi bu fırınla, ısınma hızını, numunenin bekletileceği limit sıcaklık derecesini, bekleme süresini otomatik olarak ayarlama imkanı vardır. Deney sonunda alet yine otomatik olarak durmakta ve soğuma moduna geçmektedir. Bu kullanım koşulları altında uygulanan yüksek sıcaklık deneyi sonrasında deney numuneleri, fırının iç sıcaklığı numuneleri çıkarmaya elverişli dereceye düştüğünde, fırından çıkarılarak su soğutması (ani soğutma) uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık deneyinde 100x100x100 mm ölçülerinde küp, 75x75x300 mm ölçülerinde prizmatik ve 100 mm çap, 200 mm yüksekliğindeki silindir numuneler kullanılmıştır.



Şekil 4.9 Yüksek sıcaklık deneyinde kullanılan laboratuvar tipi fırın

4.6.4 Donma-Çözünme Deneyi

Donma-çözünme deneyinde Şekil 4.10’da sunulan dondurucu alet ve ısı ayarlı kür tankı kullanılmıştır. Deney numunesi olarak 75x75x300 mm ölçülerinde prizmatik, 100 mm çap ve 200 mm yükseklikteki silindirik numuneler kullanılmıştır. Teknik imkanların kısıtlılığı yüzünden deneyin uygulanışında standartlarda verilen şartlara tam olarak uyulamamış ancak tüm beton serileri için aynı şartlar uygulanarak deney döngüleri yapılmıştır [102-103]. Donma-çözünme döngüleri, 18 saat -20°C ’de dondurucuda ve 6 saat $+20^{\circ}\text{C}$ su içinde olmak üzere 150 kez tekrarlanmıştır [98]. 150 donma-çözünme döngüsü sonunda numuneler üzerinde basınç dayanımı, yarmada ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri ve rölatif porozite tayini, karbonasyon deneyi, USG hızı tayini deneyleri uygulanarak sonuçlar irdelenmiştir.



Şekil 4.10 Donma-çözünme deneyinde kullanılan dondurucu alet

4.6.5 Asit dayanıklılığı deneyi

Asit dayanıklılık deneyi için 75x75x300 mm ölçülerinde prizmatik, 100 mm çap ve 200 mm yükseklikteki silindirik numuneler kullanılmıştır. Deneyde sülfirik asit kullanılmıştır. Bu asit ile hazırlanan %5’lik sülfirik asit-su çözeltisi Şekil 4.11’de görüldüğü gibi plastik leğenlere doldurularak, prizmatik ve silindirik numuneler çözelti içine özenle yerleştirilmiştir. Diğer leğenlerle ağızları hava almayacak şekilde kapatılıp koli bandı ile bantlanan leğenler içerisinde numuneler, laboratuvar ortamında 45 gün boyunca bu etkiye maruz bırakılmıştır. 45. günün sonunda leğenler açıldığında Şekil 4.12a-b’de görüldüğü gibi beton numunelerin, yüzeylerinden belirli bir derinliğe kadar aşındığı gözlenmiştir. Tüm deney numuneleri yıkanıp dinlendirildikten sonra, diğer deneylerle benzer koşullar altında basınç dayanımı, yarma ve

eğilmede çekme dayanımı, USG hızı tayini, rölatif porozite tayini ve karboansyon deneylerine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 4.11 Asit dayanıklılık deneyi düzeneği



Şekil 4.12 Asit dayanıklılığı testi sonrası aşınmış olarak çıkarılan numuneler; a) silindirik, b) prizmatik numune

4.6.6 Islanma-Kuruma Deneyi

Uygulanan ıslanma-kuruma deneyinde numuneler için öncelikle %0.30 tuz konsantrasyonunda tuzlu su çözeltisi hazırlanmıştır. Islanma-kuruma deneyine tabi tutulacak numuneler üzerinde bu deneye tabi tutulmadan önce deney sonrası karşılaştırma amaçlı USG hızı tayini ve rölatif porozite tayini gibi bazı ön testler uygulanmıştır. Daha sonra bu numuneler Şekil 4.13'te sunulan ısı ayarlı etüv yardımı ile fırın kurusu hale getirilmiş ve laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numuneler hazırlanan tuzlu su çözeltisi içine yerleştirilerek numunelerin tuzlu suya doymun hale gelmesi sağlanmıştır. Bu hali ile numuneler 45°C sıcaklıktaki fırına yerleştirilerek ıslanma-kuruma çevriminin başlaması sağlanmıştır. Numuneler bu şekilde 4 saat fırın içerisinde kurumaya bırakılmış, sonrasında 1 saat laboratuvar ortamında soğumaya alınmıştır. Daha sonra soğuyan numuneler 3 saat tuzlu su çözeltisine

yerleştirilerek ıslanma etkisine bırakılmıştır. Bu şekilde ıslanma-kuruma deneyi 150 çevrimi tekrarlanmıştır. 150 çevrim uygulanan bazı deney numuneleri Şekil 4.14'te sunulmaktadır. Bu çevrim sonrasında serilerde meydana gelen bozulmalar kaydedilmiş ve numuneler üzerinde mekanik deneyler uygulanmıştır. Elde edilen veriler laboratuvar şartlarında aynı süre boyunca bekletilen numunelerden elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak bulgular kaydedilmiştir.



Şekil 4.13 Islanma-kuruma deneyinde kullanılan ayarlı fırın

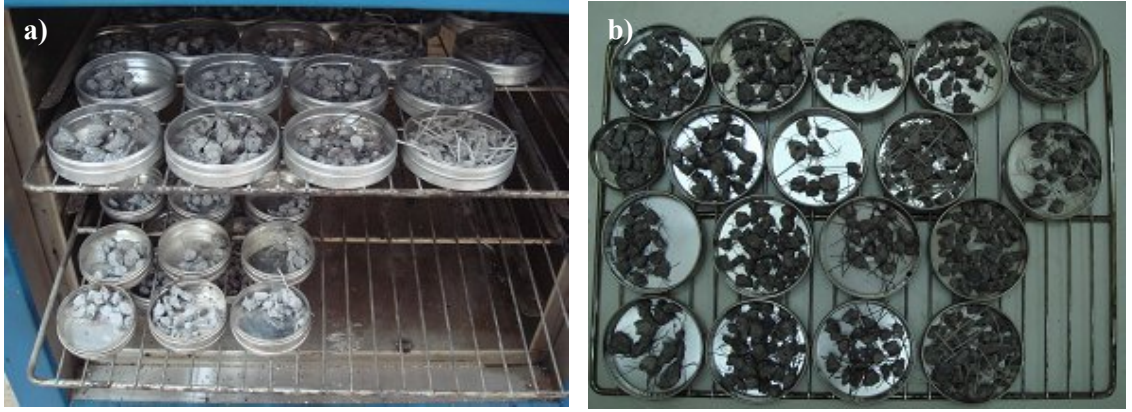


Şekil 4.14 Islanma-kuruma deneyi sonrası bazı numunelerin görünümü

4.7 SEM Analizi

SEM analizleri, normal şartlar altında deneyleri yapılan numuneler ve yüksek sıcaklık, asit dayanıklılığı gibi durabilite deneyleri uygulanan numuneler üzerinde yapılmıştır. Normal şartlar altında deneyleri yapılmış betonlardan alınan numunelerde içyapıya ve fiberlerin durumuna bakılmış ve bu numuneler kontrol numuneleri olarak kabul edilerek, üzerinde durabilite deneyleri yapılmış betonlardan çıkarılmış numuneler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Şekil 4.15a-b'de görüldüğü gibi, üretilen KYB ve FTKYB'lardan özenle çıkarılan küçük

numuneler etüvde kurutmaya tabi tutulduktan sonra Malatya İnönü Üniversitesi Araştırma Birimi Fizik laboratuvarında elektron tarama mikroskobu kullanılarak analiz görüntüleri alınmıştır. SEM analiz ünitesi şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.15 SEM analizi için alınmış numune örnekleri; a) Etüvde kurutulurken b) Soğutma anında numune kaplarında bulunan örnekler



Şekil 4.16 SEM analiz ünitesi

5. DENEYSEL ÇALIŞMA BULGULARININ İNCELENMESİ

5.1 Taze Beton Özelliklerinin İncelenmesi

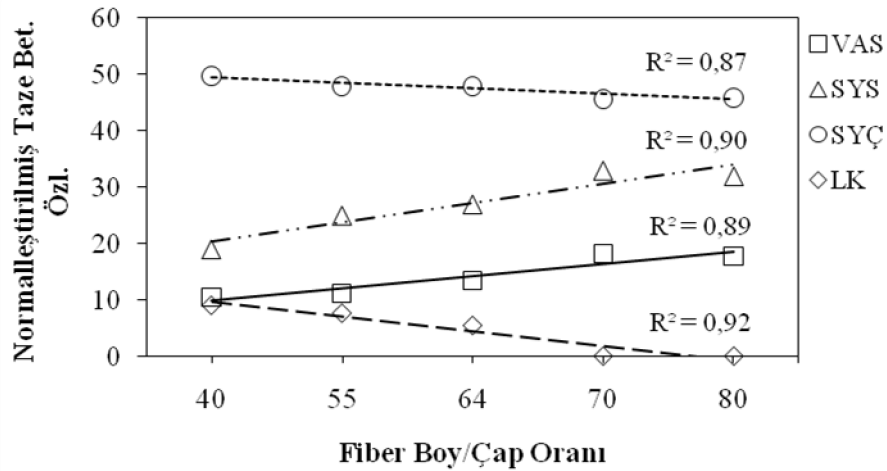
Deneme karışımları sonucu, taze beton özellikleri belirlenen 24 fiber takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (FTKYB) karışımı ve fiber içermeyen kontrol kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımının taze beton özellikleri Tablo 5.1-4'te verilmiştir. Tablolarda kullanılan roma rakamları (I,II,III), L-kutusu deneyinde kullanılan donatı çubuk sayısını işaret etmektedir. Aynı sütunda kullanılan “Ø” ise, çubuksuz olarak yapılan L-kutusu deneyini işaret etmektedir. Yine L-kutusu deney sonuçlarının verildiği sütunda kullanılan “T” harfi uygulanan L-kutusu deneyinde tıkanma oluştuğunu göstermektedir. Tablo 5.1, deneysel çalışma kısmında belirtilen 6 farklı fiberin, karışımlarda tekil olarak bulunduğu FTKYB karışımlarının ve kontrol KYB karışımının taze beton özellikleri verilmiştir. Tablo 5.2, toplam fiber hacmi sabit tutulup, 2 farklı fiber çeşidi yarı yarıya kullanılarak oluşturulan karma (hibrit) FTKYB serilerinin taze beton özelliklerini göstermektedir. Tablo 5.3'te ise, yine toplam fiber hacmi sabit tutulup, 2 farklı fiber tipi %25+%75 oranında karıştırılarak oluşturulan karma FTKYB serilerinin taze beton özellikleri verilmiştir. Karma fiberlerin oranlanmasında %25'lik oranı, karıştırılan fiberlerden uzunluk olarak büyük olanı oluştururken, %75'lik oranı ise kısa olan fiberler oluşturmaktadır. Tablo 5.4'de, 4 farklı fiberin %25 oranlarda karıştırılması ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin taze beton özellikleri yine kontrol KYB ile birlikte verilmiştir. Genel olarak taze beton özellikleri incelendiğinde, beton karışımı içinde kullanılan fiberlerin boyu kısaltıldığında ve karma fiberli karışımlarda fiber hacminde uzun fiber yoğunluğu düşürüldüğünde taze beton özelliklerinde gelişme gözlenmiştir. Elde edilen bu genel sonuçlar, Yazıcı ve diğ. [28]'nin bulguları ile örtüşmektedir.

Tablo 5.1'de sunulan %100 tekil fiber içeren 1-7 nolu beton serilerinin ilk 4'ü farklı fiber boyut oranına sahip çelik fiberler, 5-7 nolu beton karışımları ise polipropilen sentetik fiberleri içermektedir. Genel olarak Tablo 5.1 incelendiğinde, tüm beton serilerinin çökme-yayılma çapı 645 mm ile 745 mm arasında değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlar bize, 7 nolu beton serisi haricindeki diğer tüm serilerinin, EFNARC [80]'ın taze beton deneylerinde yaptığı sınıflandırmaya göre, çökme-yayılma çapı için SF2 içinde olduğunu ve 7 nolu serinin ise SF1 sınıfı içinde olduğunu göstermektedir. 1 nolu seride en uzun çelik fiber, 5 nolu seride ise uzun polipropilen sentetik makro fiber kullanıldığından çökme-yayılma çapları diğerlerinden düşük çıkmıştır. 6-7 nolu serilerde ise polipropilen sentetik mikro fiber kullanılmıştır. 7 nolu seride, 6 nolu seriye göre 2 kat fazla fiber kullanılmıştır. Polipropilen sentetik mikro fiber kullanılmasına

rağmen 7 nolu seri, yayılma çapı olarak en düşük değeri vermiştir. Bu sonuç bize yüksek fiber yoğunluğunun çökme-yayılma çapı üzerindeki negatif etkisini göstermektedir. 6 mm boyunda ve boyutsal oranı 40 olan mikro çelik fiber ise en iyi yayılma çapını vermiştir.

Tablo 5.1 Kontrol KYB ve tekil fiber kullanılan FTKYB serilerinin taze beton özellikleri

Beton seri no	Çökme-yayılma çapı (mm)	Çökme-yayılma süresi T_{500} (sn)	V-hunisi (sn)	L-kutusu	Taze birim ağırlık (gr/cm ³)
1	690	3.2	17.8	III	T
				II	T
				I	0.81
				Ø	0.88
2	720	2.7	13.4	III	0.55
				II	0.70
				I	0.83
				Ø	0.89
3	720	2.5	11.1	III	0.77
4	745	1.9	10.5	III	0.91
5	685	3.3	18.2	III	T
				II	0.58
				I	0.81
				Ø	0.95
6	700	2.1	8.0	III	0.94
7	645	3.4	8.8	III	0.88
Kontrol	740	1.7	9.0	III	0.95



Şekil 5.1 Değişen boy/çap oranı-normalleştirilmiş taze beton özellikleri

Çökme-yayılma süresi olarak Tablo 5.1 incelendiğinde, fiber boyu ve boyutsal oranı düştükçe, yayılma süresinin (T_{500}) kısaldığı görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 5.1'de değişen boy/çap oranına göre normalleştirilmiş taze beton özellikleri incelendiğinde SYS olarak

isimlendirilen çökme-yayılma süresi eğrisi fiber boyutsal oranı arttıkça, lineere yakın bir eğimle yükselmektedir. Yine Tablo 5.1’de polipropilen fiberlerin kullanıldığı 5-7 nolu karışımların çökme-yayılma süresi incelendiğinde, makro fiberin kullanıldığı 5 nolu karışımda yayılma süresi, mikro fiberin kullanıldığı 6 nolu karışımdan daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak 7 nolu karışımda mikro fiber kullanılmasına rağmen fiber oranı 2 kat artırıldığında fiber yoğunluğundan dolayı yayılma süresinin arttığı görülmektedir. Tablo 5.1’deki çökme-yayılma süreleri, EFNARC [80]’a göre viskozite değerlendirme amacı ile yapılan T_{500} sınıflaması ile karşılaştırıldığında, kontrol KYB ve 4 nolu FTKYB serilerinin VS1 sınıfı, diğerlerinin ise VS2 sınıfı içine girdiği anlaşılmaktadır.

Taze beton deneylerinden diğer bir viskozite değerlendirme deneyi olan V-hunisi deneyinden elde edilen akış süreleri, diğer taze beton deneyleri ile benzer sonuçlar vermiş olduğu Tablo 5.1 ve Şekil 5.1’den anlaşılmaktadır. Şekil 5.1’de VAS olarak isimlendirilen V-hunisi akma süresinin, fiber boyutsal oranın artması ile arttığı görülmektedir. Fiber boyu ve boyutsal oranı düşürüldükçe akma süresi de düşmüştür. Tablo 5.1’deki 6 ve 7 nolu seriler incelendiğinde, fiber hacim yoğunluğu artırıldığında ise akma süresinin yine artmış olduğu anlaşılır. En düşük akma süresi polipropilen mikro fiber kullanılan karışımlardan elde edilirken, en yüksek akma süreleri uzun boylu ve yüksek boyutsal orana sahip olan çelik ve polipropilen makro fiber kullanılan karışımlardan elde edilmiştir. Polipropilen makro fiber ise, 1 nolu karışımdaki çelik telden kısa ve düşük boyutsal orana sahip olmasına rağmen hafifliği, eşdeğer çapının daha kalın olması ve dalgalı yüzeye sahip olması yüzünden V-hunisi akma hızı süresi daha yüksek çıkmıştır.

Tablo 5.1 ve Şekil 5.1 L-kutusu deneyinden elde edilen bloklanma oranı değerlerine göre incelendiğinde, sırası ile 60 mm ve 55 mm fiber uzunluğuna sahip olan 1 ve 5 nolu karışımların 3 çubuk donatı engelli deney sonucunda tıkanıp, bloklanma olduğu gözlenmiştir. Deney anında alınan görüntü Şekil 5.2’de sunulmuştur. 1 nolu karışım 2 donatı engelli denendiğinde de yine yüksek oranda bloklanma gözlenmiştir. 5 nolu karışımın 2 çubuklu L-kutusu denemesi ise EFNARC [80]’ça belirlenen limit değerinin altındadır. Bu limitler göz önüne alındığında ancak 3, 4, 6 ve 7 nolu FTKYB karışımlarının belirlenen sınıflara uyduğu gözlenmektedir. Bu durumda 3 nolu karışım L-kutusu geçiş yeteneği sınıfı olarak PA1 sınıfı, diğerleri ise PA2 sınıfı içine girmektedir. Bu sınıflara uymayan diğer FTKYB serileri ise tek çubuklu L-kutusu deneyinde ve çubuksuz olarak yapılan denemelerde daha yüksek ve uygun performanslar sergilemişlerdir. Bu durum fiber uzunluğu ve boyutsal oranının, KYB’un geçiş yeteneği ve yerleşme üzerindeki negatif etkisini açıkça göstermektedir. Bu tip fiberler, daha geniş açıklıktaki donatı düzenlenmesi ile kullanılabileceği gibi, donatısız olarak tasarlanacak FTKYB karışımlarında kullanılabilir.



Şekil 5.2 Üç çubuklu L-kutusu deneyi sonucu bloklanma gözlenen 5 nolu FTKYB karışımı

Tablo 5.2 Kontrol KYB ve 2'li (%50 uzun + %50 kısa) fiber kombinasyonları ile oluşturulan FTKYB serilerinin taze beton özellikleri

Beton seri no	Çökme-yayılma çapı (mm)	Çökme-yayılma süresi T_{500} (sn)	V-hunisi (sn)	L-kutusu		Taze birim ağırlık (gr/cm^3)
8	705	3.1	15.1	III	T	2.38
				II	T	
				I	0.85	
9	700	3.1	14.3	III	T	2.35
				II	T	
				I	0.82	
10	725	2.3	10.5	III	0.40	2.42
				II	0.83	
11	715	2.8	13.7	III	0.60	2.32
				II	0.68	
				I	0.81	
12	730	2.1	13.3	III	0.63	2.31
				II	0.83	
13	730	2.0	11.6	III	0.60	2.38
				II	0.82	
14	710	2.0	11.3	III	T	2.43
				II	0.67	
				I	0.83	
Kontrol	740	1.7	9.0	III	0.95	2.38

Tablo 5.2'de %50'şer oranlar ile oluşturulan karma FTKYB karışımlarının taze beton özellikleri sunulmuştur. İlk üç seride, en büyük fiber uzunluğu ve boyutsal oranına sahip Ç1 makro çelik fiberi ile bu fiberden daha kısa olan diğer çelik fiberler (Ç2, Ç3, Ç4) ayrı ayrı karma olarak kullanılmıştır. Sonraki 3 seride de çelik fiberler aynı şekilde, kendilerinden daha kısa olan fiberler ile karma olarak kullanılmıştır. Son olarak ise zayıf taze beton özellikleri sergileyen polipropilen sentetik makro fiber ile taze beton özellikleri en iyi derecede olan en küçük ölçüdeki mikro çelik fiber birlikte kullanılarak karma FTKYB karışım serileri oluşturulmuştur. Böylece aynı hacmi dolduran, fakat karışım içerisinde fiber boyut yoğunluğu

değişim gösteren FTKYB serileri elde edilmiş ve bu karma FTKYB serilerinin taze beton özellikleri araştırılmıştır.

Tablo 5.2 incelendiğinde, %50 oranlarında 2’li karma fiber olarak oluşturulan FTKYB serilerinde toplam fiber hacmi içerisinde uzun ve boyutsal oranları yüksek olan fiberlerin yoğunluğu düşürüldükçe genel olarak taze beton özellikleri üzerinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Ancak yinede, Ç1 kodlu en uzun makro çelik fiberin kullanıldığı 8-9 karışımlarında ve P1 kodlu polipropilen sentetik makro fiberin kullanıldığı 14 nolu karışımda L-kutusu deneyinde tıkanma ve bloklanma gözlenmiştir. Fakat bu karma serilerde kullanılan uzun fiberlerin tekil olarak kullanımı ile üretilen 1 ve 5 nolu karışımların taze beton özellikleri, karma olarak oluşturulmuş ve uzun fiber boyut yoğunluğu %50 oranında düşürülmüş karışımların (8-9,14) taze beton özelliklerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. 10, 11, 12 ve 13 nolu karışımlarda %50 oranda kullanılan uzun fiberlerin, %100 oranında kullanıldığı 1, 2 ve 3 nolu karışımlar ile kıyaslandığında yine taze beton özelliklerinde gelişme görülmüştür.

Tablo 5.3’te yine farklı oranlar ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin taze beton özellikleri sunulmuştur. Karışımlarda kullanılan 2 farklı fiberden kısa olanı toplam fiber hacminin %75’ni oluştururken, karışıma giren uzun fiberler toplam fiber hacminin %25’ini oluşturmaktadır. Bir başka deyişle birbiri ile kıyaslandığında uzun olarak kabul edilen %100 tekil olarak kullanılmış fiberlerin toplam hacimdeki boyut yoğunluğu %75 düşürülerek, kendilerinden daha kısa olan fiberlerle eşleştirilip “%25 uzun + %75 ince” karışımından oluşan karma FTKYB serileri oluşturulmuştur. Bu şekilde oluşturulan karma FTKYB serilerinin taze beton özellikleri incelenmiştir.

Tablo 5.3 Kontrol KYB ve 2’li (%25 uzun + %75 kısa) fiber kombinasyonları ile oluşturulan FTKYB serilerinin taze beton özellikleri

Beton seri no	Çökme-yayılma çapı (mm)	Çökme-yayılma süresi T ₅₀₀ (sn)	V-hunisi (sn)	L-kutusu		Taze birim ağırlık (gr/cm ³)
15	710	2.7	10.1	III	0.78	2.32
16	700	2.0	10.5	III	0.81	2.35
17	730	1.9	7.7	III	0.88	2.42
18	720	2.2	8.1	III	0.80	2.31
19	735	1.8	7.4	III	0.90	2.36
20	735	1.6	7.6	III	0.92	2.38
21	690	2.8	9.8	III	0.81	2.40
22	730	1.8	7.3	III	0.83	2.41
Kontrol	740	1.7	9.0	III	0.95	2.38

Tablo 5.3'ten, 15 nolu karışım haricindeki tüm karışımların taze beton özelliklerinin uygun sınırlar içinde olduğu anlaşılmaktadır. 15 nolu karışım yalnızca 3 çubuklu L-kutusu deneyinde istenen limitler içerisinde olmamakla birlikte, 0,80 bloklanma oranı değerine oldukça yakındır. Aynı zamanda Tablo 5.1-3 birlikte incelendiğinde Tablo 5.3'teki FTKYB serilerinin taze beton özelliklerinin, kontrol KYB karışımı özelliklerine daha yakın olduğu görülür.

Tablo 5.4'te, biri toplam fiber hacminin %75'ini 3 farklı uzun çelik makro (%25Ç1+%25Ç2+%25Ç3) fiberler, %25'ini ise kısa çelik (Ç4) mikro fiber oluşturan; diğeri ise %50'si polipropilen sentetik makro ve mikro (%25P1+%25P2) fiberler, %50'si ise çelik makro ve mikro (%25Ç3+%25Ç4) fiberler oluşturan iki ayrı karma FTKYB ve kontrol KYB serilerinin taze beton özellikleri verilmiştir.

Kontrol KYB ve 4 farklı fiber ile oluşturulan FTKYB serilerinin sunulduğu Tablo 5.4 incelendiğinde, toplam fiber hacmini oluşturan boyut yoğunluğunun FTKYB serilerinin taze beton özellikleri üzerindeki etkileri daha iyi anlaşılmaktadır. Tablo 5.2-3'te oluşturulan beton serilerinde, toplam fiber hacmi içerisinde uzun fiber boyut yoğunluğu %50 ve %75 oranlarında düşürülürken Tablo 5.4'teki 23-24 nolu serilerde toplam fiber hacmindeki uzun fiber boyut yoğunluğu artırılmıştır.

Tablo 5.4 Kontrol KYB ve 4'lü (4 x %25) fiber kombinasyonları ile oluşturulan FTKYB serilerinin taze beton özellikleri

Beton seri no	Çökme-yayılma çapı (mm)	Çökme-yayılma süresi T ₅₀₀ (sn)	V-hunisi (sn)	L-kutusu		Taze birim ağırlık (gr/cm ³)
23	660	2.5	9.2	III	0.75	2.36
24	610	3.5	8.0	III II	T 0.80	2.39
Kontrol	740	1.7	9.0	III	0.95	2.38

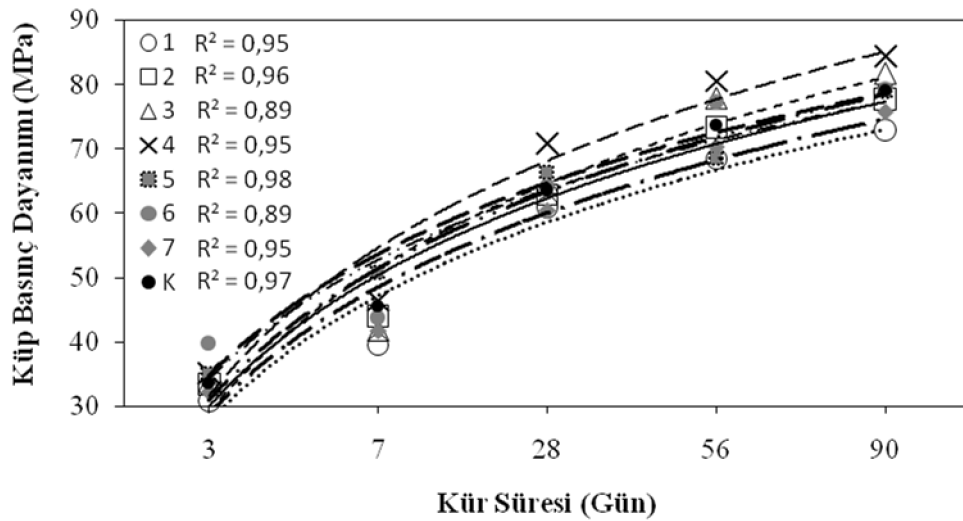
Tablo 5.4'te verilen taze beton özellikleri incelendiğinde toplam fiber hacminde uzun fiberlerin boyut yoğunluğunun artırılmasının taze beton özelliklerini olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Yinede toplam fiber hacminde %25 oranında Ç1 kodlu makro fiber kullanılması ile V-hunisi ve 3 çubuklu L-kutusu deneylerinde gelişme gözlenmiştir. 24 nolu seride ise toplam fiber hacminin %25 gibi yüksek bir oranında polipropilen sentetik mikro fiberin, çelik ve polipropilen makro fiberler ile birlikte kullanılması, V-hunisi deneyi haricindeki diğer taze beton deneyleri üzerinde olumsuz etki yapmıştır. Uygulanan taze beton deneyleri sırasında P2 kodlu polipropilen mikro fiberin yüksek oranda kullanılmasının hem diğer fiberler ile yapışarak, hem de agrega-harç fazı ile oluşturduğu yapı, taze betonun viskozitesini düşürürken, tıkanma, bloklanma riskini arttırmıştır.

5.2 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

5.2.1 Basınç Dayanımı Deneyi

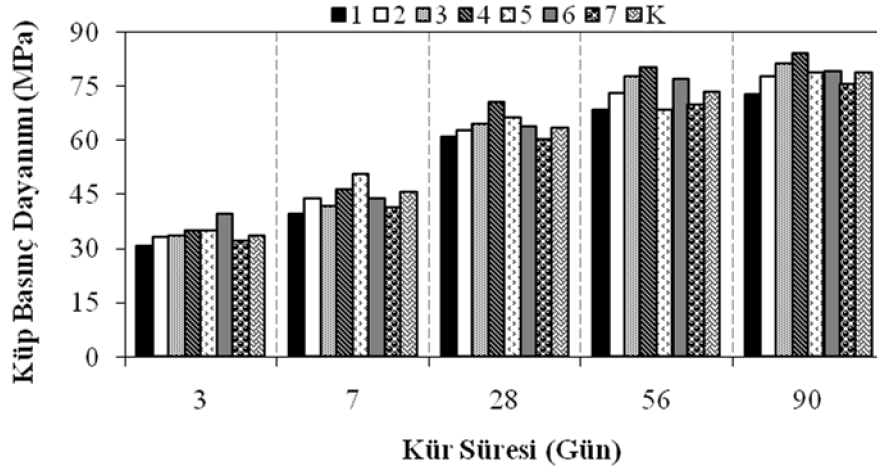
Biri kontrol (K) KYB ve 24'ü FTKYB olarak tasarlanan beton serilerine 3, 7, 28, 56 ve 90 günlük su kürü sonrasında uygulanan basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 5.3-14'te verilmiştir. Şekil 5.3-8'de beton serilerinin basınç dayanımı deney sonuçları, artan kür süresine göre ve aynı zamanda her bir kür süresinde ayrı ayrı olmak üzere grafikler halinde sunulmuştur. Şekil 5.9-14'te ise fiber karışımı olarak bir biri ile ilişkili olan beton serileri gruplandırılarak, 5 ayrı kür süresindeki basınç dayanımı eğrileri çizilmiştir. Böylece, fiber uzunluk, boy/çap oranı ve fiber boyut yoğunluğu gibi parametreler incelenmiştir.

Basınç dayanımı grafikleri incelendiğinde tüm beton serilerinin aynı yaşlarda benzer basınç dayanımı performansı sergiledikleri görülmektedir. Beton serilerinin karışımındaki tek değişken faktör farklı tip fiber ve bu fiberlerle oluşturulan farklı karma fiber grupları olduğu için beton basınç dayanımları da bir birine yakın sonuçlar vermiştir. Basınç dayanımı değerlerinin birbirine yakınlığı hem Şekil 5.3 hem de daha açık bir biçimde Şekil 5.4'te görülmektedir. Şekil 5.3-4 incelendiğinde polipropilen sentetik fiberli 5 ve 6 nolu karışımın daha yüksek basınç dayanımı sergilerken, ileri yaşlarda çelik mikro fiberin (Ç4) bulunduğu 4 nolu beton serisinin öne çıktığı görülmektedir.



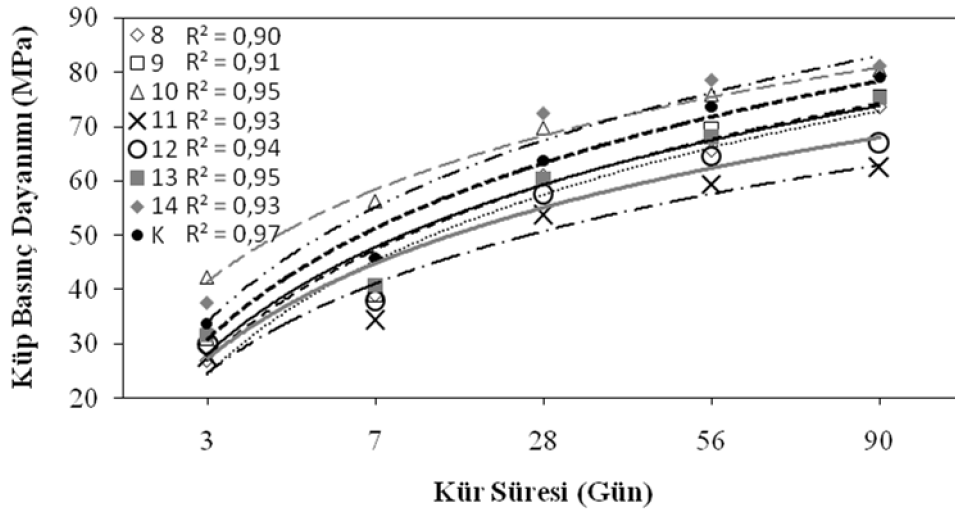
Şekil 5.3 Kontrol KYB ve tekil fiber içeren beton serilerinin kür süresi-basınç dayanımı grafiği

Şekil 5.3'teki R^2 değerleri gözönünde bulundurulduğunda 90 günlük kür yaşına kadar tüm beton serilerinin dayanımlarının logaritmik eğriye yakın basınç dayanımı değerleri kazandığı söylenebilir. Şekil 5.4 incelendiğinde, hemen hemen her yaşta en küçük basınç dayanımı değerine Ç1 içerikli 1 ve P2 içerikli 7 nolu serilerin sahip olduğu görülür. En yüksek basınç dayanımı değeride Ç4 kodlu fiber içerikli 4 nolu seride gözlenmiştir. Genel itibariyle çelik makro fiberlerin kontrol KYB serisinden daha düşük olduğu görülmekte ve çelik mikro fiberin ise kontrol betonundan daha yüksek basınç dayanımı değerleri sergilediği görülmektedir. Sahmaran ve Yaman [81] ile Nehdi ve Ladanchuk [104]'nın yapmış oldukları araştırmalar neticesinde de, karışımda makro fiber yerine mikro çelik fiber kullanımı ile basınç dayanımında daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Qian ve Stroeve [72] karışıma mikro fiber ilave etmenin basınç dayanımını yüksek ölçüde arttırdığını makro fiberin ise tersi yönde etki oluşturduğunu vurgulamışlardır. Diğer taraftan, Song ve Hwang [105], Yazıcı ve diğ. [28] fiber boyutsal oranının ve fiber hacminin artırılmasının basınç dayanımında artışa neden olduğunu savunurken, Kayalı ve diğ. [22], Yalçın ve diğ. [106], Quanbing ve Beirong [107] basınç dayanımında ciddi bir gelişme gözlenmediğini savunmuşlardır. Bu çalışmada ise, şekiller dikkatlice incelendiğinde çelik fiber uzunluğu ve boy/çap oranı düştükçe basınç dayanımında artma olduğu dikkati çekmektedir. Bu artışlarla, ilgili beton serilerinin basınç dayanımları, fiber uzunluk ve boy/çap oranı düştükçe kontrol karışımına yaklaştı, 3 ve 4 nolu beton serilerinde ise kontrol KYB serisini geçmiştir. 3 ve 4 nolu beton serilerinin 28 günlük basınç dayanımları, kontrol KYB serisinden sırası ile %1.62 ve %11.22 daha büyüktür. 56 günlük kür süresi sonrası ise bu fark %5.55 ve %9.15'tir. Polipropilen sentetik fiberli 5, 6 ve 7 nolu karışımların basınç dayanımı değerlendirmesine gelince, P1 kodlu makro fiberin kullanıldığı 5 nolu karışım ve normal kullanım dozajında P2 kodlu mikro fiberin kullanıldığı 6 nolu karışım, kontrol KYB serisine çok yakın basınç dayanımı değerleri vermiştir. P2 kodlu mikro fiberin yüksek oranda kullanıldığı 7 nolu karışımda ise, basınç dayanımının kontrol KYB serisine göre her bir kür süresinde sırası ile %4.48, %8.70, %5.17, %4.69 ve %4.25 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Sabir [59], Chena ve Liub [108] yaptıkları çalışmada benzer sonuçlara ulaşarak polipropilen sentetik fiber kullanımının basınç dayanımını düşürdüğünü belirtmişlerdir.

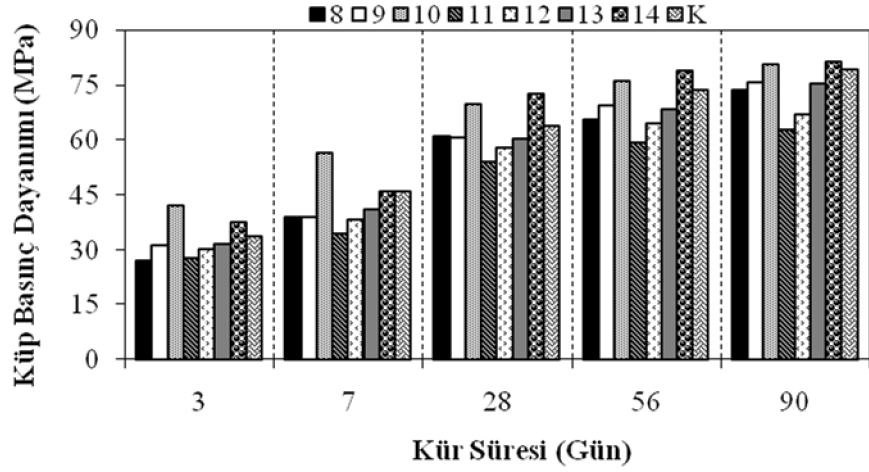


Şekil 5.4 KYB ve FTKYB serilerinin kür süresi-basınç dayanımı grafiği

Şekil 5.5-6'da %50 oranlar ile Şekil 5.7-8'de ise %25+%75 oranlar ile uzun ve kısa karma fiberler ile oluşturulan FTKYB ve kontrol KYB serilerinin basınç dayanımları kür sürelerine göre sunulmuştur. Şekil 5.3-4 ile Şekil 5.5-8 kıyaslandığında, oluşturulan 2'li karma FTKYB serilerinin basınç dayanımı değerlerinin %100 tekil fiber içeren serilerden daha fazla çeşitlilik gösterdiği görülmektedir. Genel olarak Şekil 5.5 incelendiğinde tüm beton serilerinin kür süresi arttıkça basınç dayanımında normal bir artış gözlenmektedir. Aynı şekilde Şekil 5.6 incelendiğinde toplam fiber hacminde %50 oranda fiber boyut yoğunluğunu değiştirmenin basınç dayanımındaki etkisi farkedilmektedir.

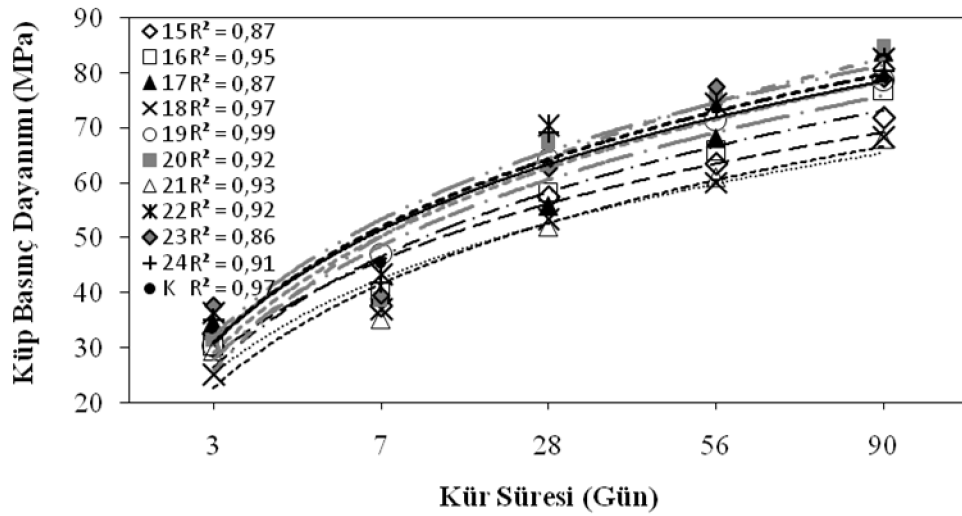


Şekil 5.5 KYB ve “%50 uzun + %50 kısa” karma fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-basınç dayanımı grafiği

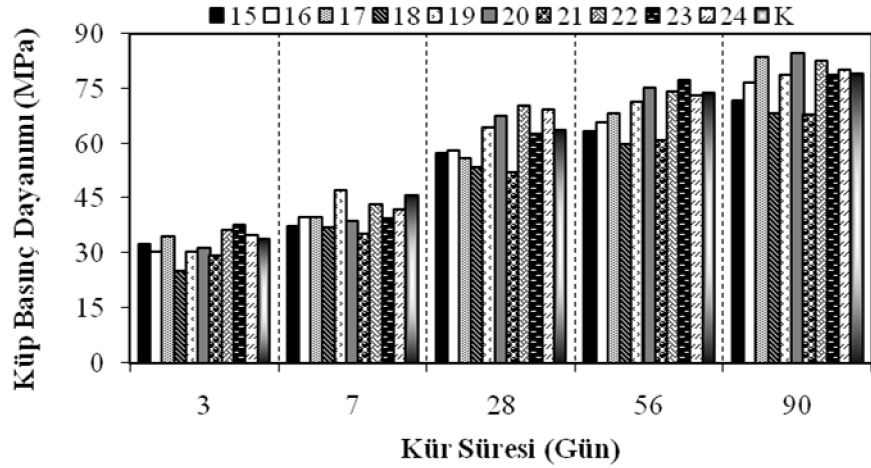


Şekil 5.6 KYB ve “%50 uzun + %50 kısa” karma fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-basınç dayanımı grafiği

90 günlük kür süresi sonrasında kontrol KYB karışımı ile, toplam fiber hacminde %100 Ç1 kodlu çelik makro fiber içeren 1 nolu karışım arasındaki dayanım farkı -%7.6 iken, sırası ile toplam fiber hacminde %50Ç1+%50Ç2 içeren 8, %50Ç1+%50Ç3 içeren 9 ve %50Ç1+%50Ç4 içeren 10 nolu karma FTKYB serileri ile kontrol KYB arasındaki dayanım farkı -%6.9, -%4.4 ve +%1.9’dur. Benzer şekilde Şekil 5.7-8’de sunulan 16 ve 17 (%25Ç1+%75Ç3, %25Ç1+%75Ç4) nolu karma FTKYB serileri ile kontrol KYB arasındaki basınç dayanımı farkı sırası ile +%2.8 ve +%6.1’dir. Şekil 5.3-8’de sunulan grafikler karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, fiber boyut yoğunluğu küçültüldükçe, FTKYB’un basınç dayanımında iyileşme görülmektedir.



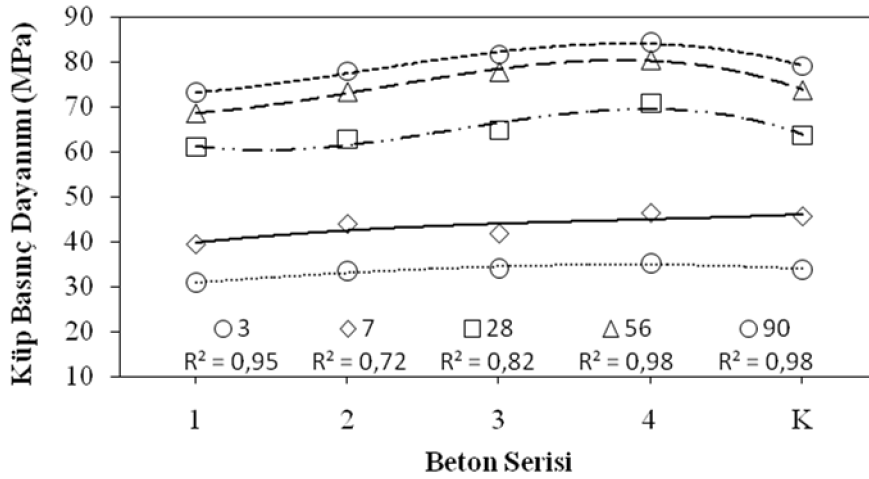
Şekil 5.7 KYB ve “%25 uzun + %75 kısa” karma fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-basınç dayanımı grafiği



Şekil 5.8 KYB ve “%25 uzun + %75 kısa” karma fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-basınç dayanımı grafiği

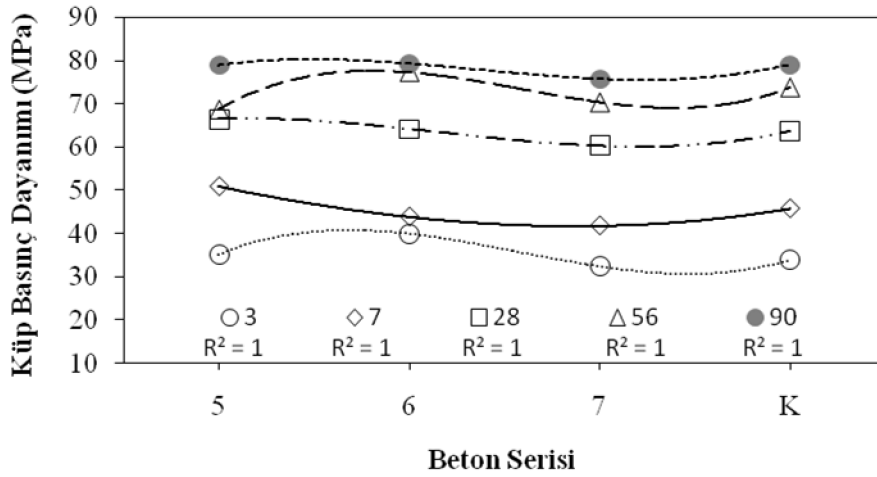
Fiber sinerjisinin ve toplam fiber hacmi içerisindeki farklı fiber boyut yoğunluğunun basınç dayanımı üzerindeki etkisi ile fiber karışımı birbiriyle ilişkili olan FTKYB serilerinin 5 farklı kür zamanındaki basınç dayanımları Şekil 5.9-14’te görülmektedir. Beton serilerinin basınç dayanımları birbirine yakın olduğundan, seriler arasındaki dayanım farklılığını daha net görebilmek için eğriler uydurulmuştur. Bu sayede farklı beton serileri arasında oluşan eğimden, bu beton serileri arasındaki dayanım farkının negatif ya da pozitif yönde olduğu kolayca anlaşılabilmektedir.

Karışımında toplam fiber hacminin %100’ü çelik tekil fiber olan ilk 4 FTKYB serisi ve kontrol KYB serisi Şekil 5.9’da verilmiştir. Erken yaşlarda net olarak fark edilemeyen basınç dayanımı değişimi 28 günlük kür süresinden sonra net bir şekilde fark edilmektedir. 28, 56 ve 90 günlük kür sonrasında, en uzun çelik makro fiber (Ç1) içeriğine sahip olan 1 nolu FTKYB serisinden, en kısa çelik fiber (Ç4, mikro fiber) içeriğine sahip 4 nolu FTKYB serisine doğru bir dayanım artışı açıkça görülmektedir. Bu seriden sonra K kontrol KYB serisinin basınç dayanımına doğru bir dayanım düşüşü söz konusudur.



Şekil 5.9 KYB ve %100 tekil çelik fiber içeren FTKYB serilerine göre basınç dayanımları

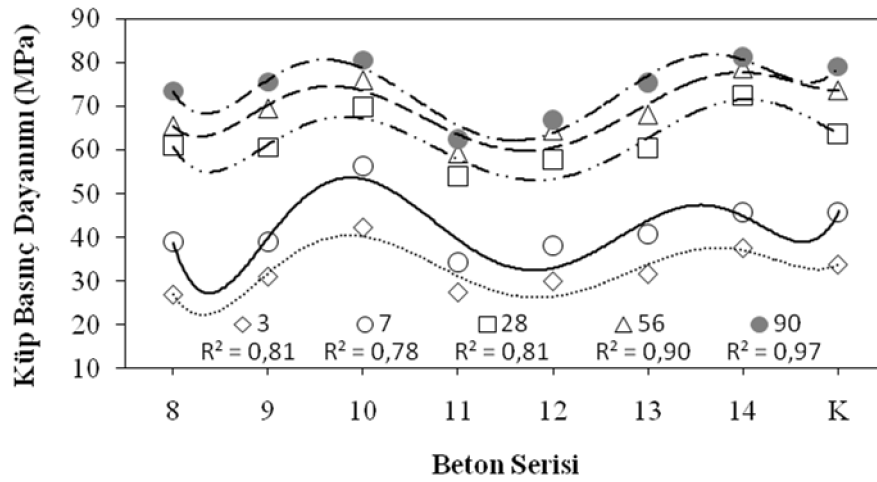
Şekil 5.10'da ise, ileri yaşlarda eğriler 6 nolu seride yükseliş gösterirken, 7 nolu seride belirgin bir düşüş ve sonra kontrol KYB serisinde tekrar yükselme eğilimindedir. Burada P2 kodlu fiberin 6 nolu seride düşük dozajda kullanımı ile kompozisyon olarak kontrol betonuna yakınlık göstermesinde bu serinin basınç dayanımı kontrol KYB serisi ile aynı seviyededir. 7 nolu seride ise aynı fiberin daha yüksek oranda kullanılması, taze beton özelliklerinde olduğu gibi basınç dayanımında da ciddi bir düşüşe neden olmuştur.



Şekil 5.10 KYB ve %100 tekil polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serilerine göre basınç dayanımları

%50'şer oranlar ile farklı uzun ve kısa fiberlerin 2'li gruplar halinde karışımlara ilave edilerek oluşturulan beton serilerinin basınç dayanımlarındaki değişimin görüldüğü Şekil 5.11'de basınç dayanımlarındaki farklılık dalgalanma şeklinde yansımıştır. Dalgalanmaya neden olan faktör ise toplam fiber hacmi içerisinde uzun fiber yoğunluğunun düşmesidir. 8-10 nolu karışımlarda, toplam fiber hacmi sabit tutularak Ç1 kodlu en uzun fiber, kendisinden daha kısa

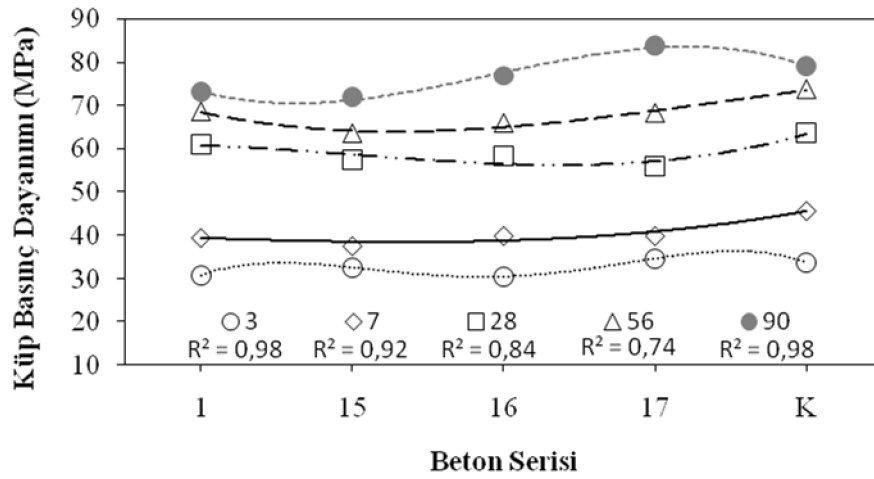
fiberlerle eşleştirilerek %50'şer oranlarda karıştırılmış, bu yolla fiber uzunluk ve boy/çap oranı düştüğü için basınç dayanımında artma meydana gelmiştir. 11 nolu karışımda ise Ç2 kodlu çelik makro fiber kendisinden daha kısa olan fiberler ile eşleştirilmiştir. 11 nolu karışımda toplam fiber hacmindeki uzun fiber yoğunluğu 8 nolu karışıma yakın olduğu için basınç dayanımında yine düşme gözlenmiş ve diğer karışımlarda uzun ve boy/çap oranı daha düşük fiberler kullanıldığı için basınç dayanımı yine artış göstermiştir. Bu şekilde oluşturulan karma FTKYB serilerinden, uzun fiberlerin çelik mikro fiberler ile eşleştirilmesi ile oluşturulan serilerde basınç dayanımı, kontrol serisinden daha yüksek çıkmıştır. Elde edilen bu sonuçlar ise Sahmaran ve Yaman [81], Nehdi ve Ladanchuk [104]'ün bulguları ile paralellik göstermektedir.



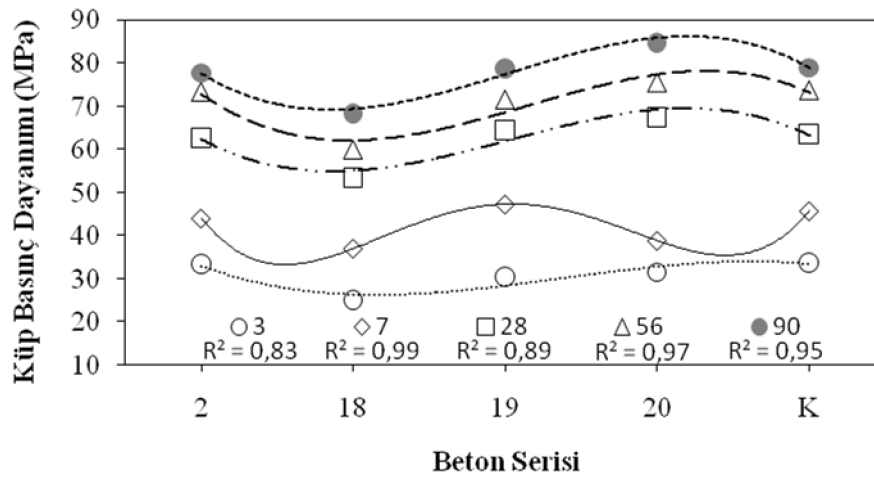
Şekil 5.11 KYB ve “%50 uzun + %50 kısa” karma fiber içeren FTKYB serilerine göre basınç dayanımları

Şekil 5.12’de Ç1, Şekil 5.13’te Ç2 kodlu fiberlerin toplam hacimde yoğunluğu %75 düşürülerek; Şekil 5.14’te ise P1 kodlu polipropilen makro fiber %50 ve %75 oranlarda düşürülerek oluşturulan karma FTKYB serilerinin farklı kür sürelerindeki basınç dayanımları bir arada sunulmuştur. Toplam fiber hacminde boyut yoğunluğu bakımından uzun fiberlerin %75 oranında düşürülmesi basınç dayanımında daha belirgin bir artış göstermektedir. 15 nolu karışım, %100 Ç1 kodlu tekil fiber kullanılan 1 nolu karışıma göre yakın basınç dayanımı sergilerken, 90 günlük kür neticesinde 16 ve 17 nolu karışımlarda 1 nolu karışıma göre basınç dayanımında sırası ile %5.2 ve %14.9 artma gözlenmiştir. Aynı biçimde, Şekil 5.13’te 18 ve 19 nolu karışımlar, %100 Ç2 kodlu tekil fiberin kullanıldığı 2 nolu karışıma oldukça yakın dayanım özellikleri sergilerken, yine 90 günlük kür neticesinde 20 nolu karışım, 2 nolu karışımdan %9.1 daha yüksek basınç dayanımı değeri sergilemiştir.

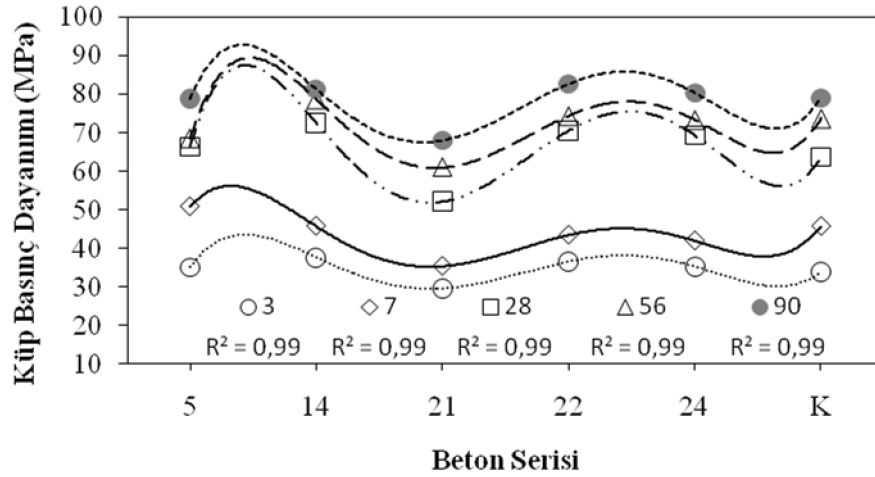
Şekil 5.14'te sunulan 5 nolu karışımda, toplam fiber hacminde %100 P1 kodlu polipropilen sentetik makro fiber kullanılırken, 14 nolu karışımda %50 oranında P1 kodlu fiber %50 oranda Ç4 kodlu fiberle, 21 ve 22 nolu karışımlarda ise, %25 oranında P1 kodlu fiber sırası ile Ç3 ve Ç4 fiberleri ile birlikte %75'er oranlarda kullanılmıştır. 24 nolu karışımda ise %25'er oranlar ile Ç3, Ç4, P1 ve P2 kodlu fiberler karıştırılmıştır. Polipropilen makro fiberin yoğunluğu düşürülerek yine polipropilen ve çelik fiberlerle oluşturulan bu karışımlarda da daha önce bahsedilen boyut yoğunluğu etkisi gözlenmektedir. %25 oranında P1 kodlu fiberin kullanıldığı 22 nolu karışımın basınç dayanımı %100 P1 kodlu fiber kullanılan 5 nolu karışımın basınç dayanımından ortalama %5 daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 5.12 Karışımda Ç1 kullanılan ve boyut yoğunluğu düşürülen serilerin basınç dayanımları



Şekil 5.13 Karışımda Ç2 kullanılan ve boyut yoğunluğu düşürülen serilerin basınç dayanımları



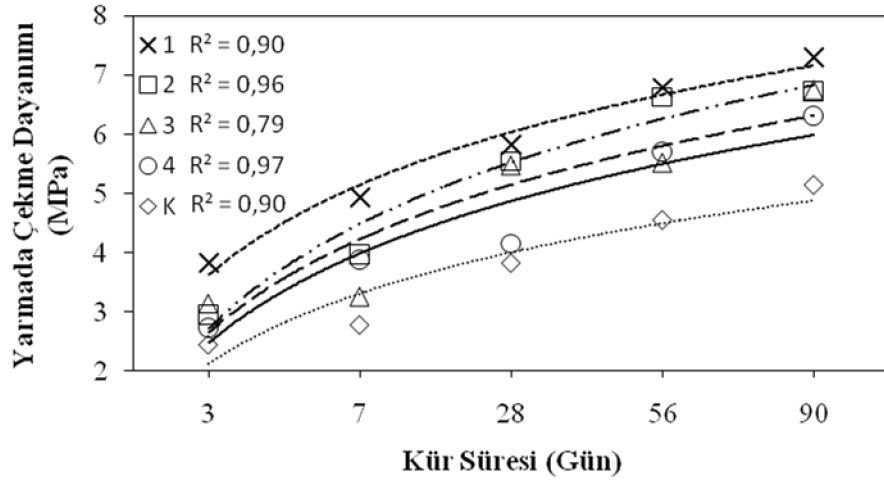
Şekil 5.14 Karışımında P1 kullanılan ve boyut yoğunluğu düşürülen serilerin basınç dayanımları

5.2.2 Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

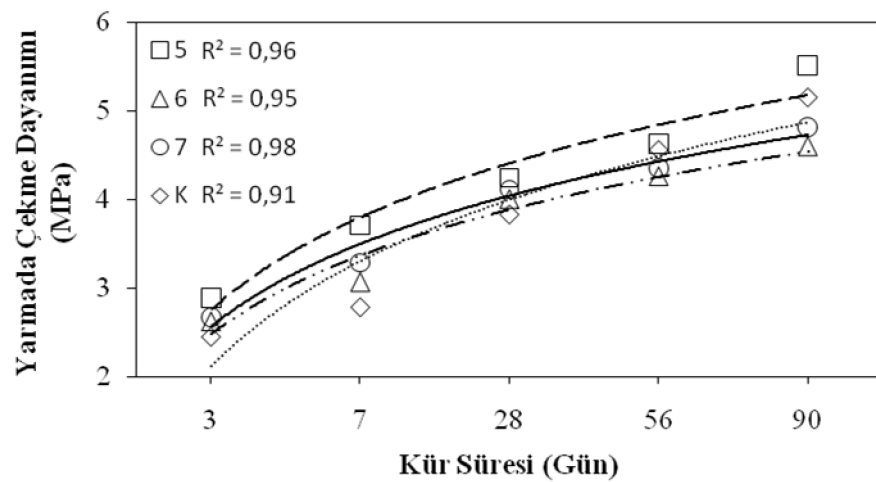
Kontrol KYB ve FTKYB serilerinin yarmada çekme deneyi sonucunda, %100 tekil fiberlerin kullanılması ile yarmada çekme dayanımında meydana gelen değişiklikler Şekil 5.15-18'de verilmiştir. Toplam fiber hacminde boyut yoğunluğu farklılaştırılarak oluşturulan karma FTKYB serilerinin yarmada çekme dayanımı deney sonuçları ise Şekil 5.19-26'da sunulmuştur. Basınç dayanımından elde edilen sonuçlar ile yarmada çekme dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, betona fiber takviyesinin betonun yarma dayanımına olan etkileri daha net görülebilmektedir.

Şekil 5.15 incelendiğinde %100 çelik fiber kullanılan karışımların yarmada çekme dayanımları, kontrol KYB serisinden yüksek çıkmıştır. 28 gün kür süresinden sonra, kontrol betonuna göre, Ç1, Ç2, Ç3 ve Ç4 kodlu fiberler kullanılan 1, 2, 3 ve 4 nolu beton serilerinin yarmada çekme dayanımları daha yüksek çıkmıştır. Yarmada çekme dayanımındaki bu değişkenlik kullanılan fiberlerin uzunluk ve boy/çap oranının farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır. Fiberlerin büyükten küçüğe doğru kullanıldığı 1-4 serilerindeki yarmada çekme dayanımlarının görüldüğü Şekil 5.17'de, kullanılan en uzun fibere göre fiber uzunluğu %41,7 ve boy/çap oranının %20 düşürülmesi ile yarmada çekme dayanımında %4,7 oranında düşme gözlenirken, fiber uzunluğu %50 ve boy/çap oranının %31,3 oranında düşürülmesi ile yarmada çekme dayanımında %6 düşüş gözlenmiştir. Ancak FTKYB tasarımında mikro çelik fiber kullanıldığında yarmada çekme dayanımında ciddi bir düşüş olduğu Şekil 5.17'den anlaşılmaktadır. Yapısında Ç4 kodlu çelik mikro fiberin kullanıldığı 4 nolu FTKYB serisinde bu şekilde bir düşme gözlenmiştir. Ç1 kodlu fiberin kullanıldığı 1 nolu seriye göre, fiber uzunluğu %90 ve boy/çap oranı %50 düşürülen 4 nolu serinin yarmada çekme dayanımı %28,5 düşüş göstermiştir. Qian ve Stroeven [72]'de çalışmalarında makro fiber kullanımının mikro fiber

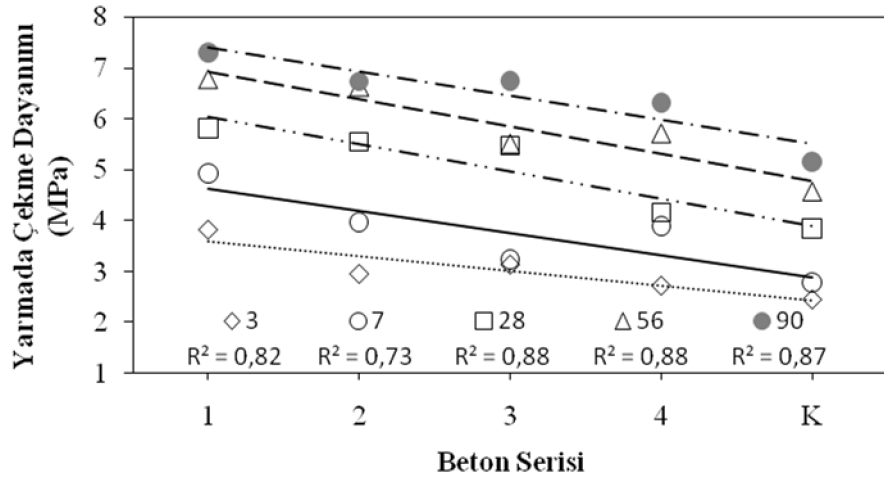
kullanımına göre daha yüksek sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır. Şekil 5.16 ve Şekil 5.18’de polipropilen fiberler kullanılarak elde edilen FTKYB serilerinin yarmada çekme dayanımları incelendiğinde, P1 kodlu makro fiberin kullanıldığı 5 nolu karışımın yarmada çekme dayanımının en yüksek değeri verdiği, en düşük değeri ise P2 kodlu mikro fiberin kullanıldığı 6 nolu serinin verdiği görülmektedir. Hatta yarmada çekme dayanımı olarak en düşük dayanımı kontrol KYB serisi ile 6 nolu FTKYB serisi sergilemiştir. Çalışmada düşük dozajda P2 kodlu polipropilen mikro fiber kullanılması (6 nolu seri) ile yarma dayanımında bir gelişme gözlenmemiştir. Ancak bu fiber tipinin yüksek oranda kullanılması ile (7 nolu seride), yarmada çekme dayanımı kontrol KYB serisine göre %7 daha yüksek çıkmıştır.



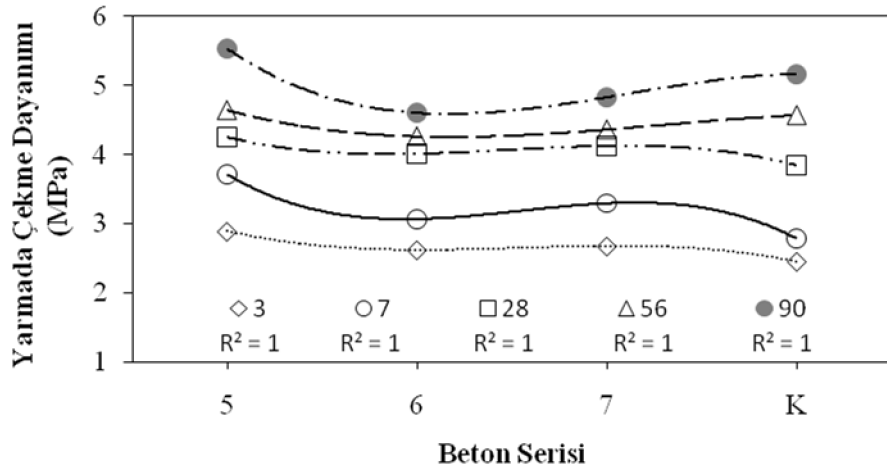
Şekil 5.15 Kontrol KYB ve tekil çelik FTKYB serilerinin kür süresi-yarmada çekme dayanımı grafiği



Şekil 5.16 Kontrol KYB ve tekil polipropilen sentetik FTKYB serilerinin kür süresi-yarmada çekme dayanımı grafiği



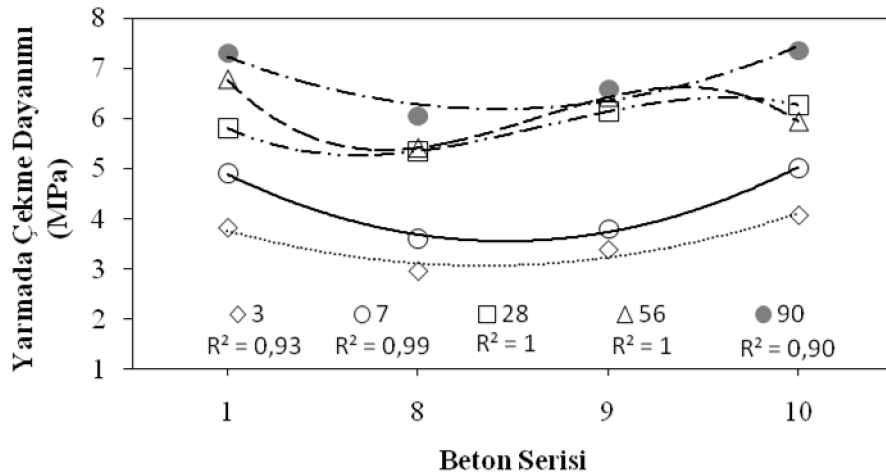
Şekil 5.17 Kontrol KYB ve tekil çelik FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımları



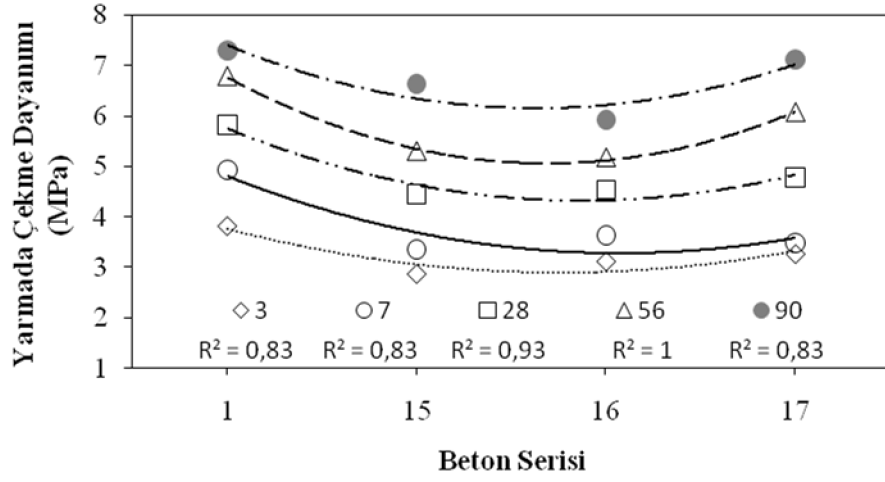
Şekil 5.18 Kontrol KYB ve tekil polipropilen sentetik FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımları

Şekil 5.19'da 1 nolu karışımda %100 oranda kullanılan Ç1 fiberi, diğer karışımlarda toplam fiber hacmi sabit tutularak %50 oranda azaltılıp yerine kendisinden daha kısa çelik fiberler eklenmiş ve %50 uzun+%50 kısa karma FTKYB serileri oluşturulmuştur. Böylece karışımda uzun ve boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğu düşürülerek oluşturulan karma FTKYB serilerinin, yarmada çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.20'de ise benzer şekilde yine Ç1 kodlu fiber %75 oranda düşürülerek aynı oranda kendisinden daha kısa fiberler ile eşleştirilip %25 uzun+%75 kısa fiber içeren FTKYB serileri oluşturulmuştur. Böylece, toplam fiber hacminde uzun ve boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğu daha düşük karışımlar elde edilerek, boyut yoğunluğunun yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 5.21-26'da da bu amaçla oluşturulan karma FTKYB serileri ile toplam hacimdeki boyut yoğunluğunun yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

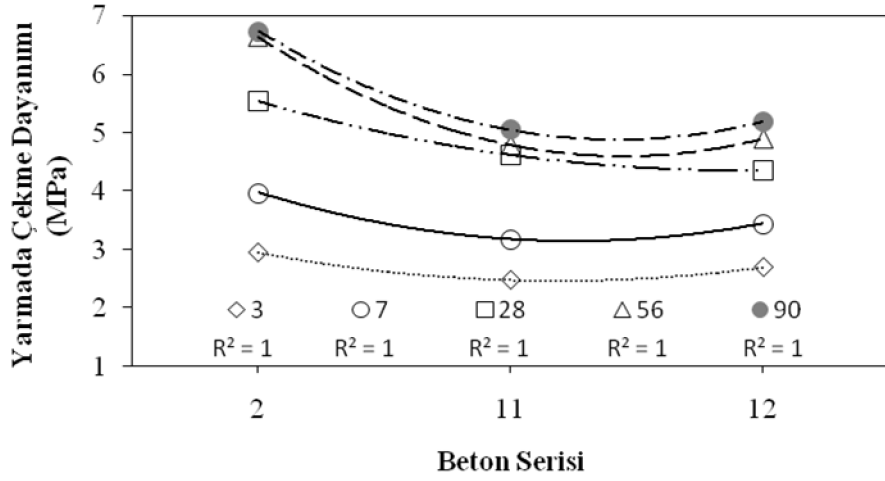
Şekil 5.19-20 incelendiğinde, toplam fiber hacminin uzun fiber yoğunluğu yine makro fiberler kullanılarak düşürülmesinin yarmada çekme dayanımında negatif bir etkiye neden olduğu açıkça görülmektedir. Yinede %50 oranında uzun fiber kendisinden %50 daha kısa ve %31.3 daha küçük boy/çap oranına sahip çelik fiberle yer değiştirildiğinde (9 nolu karışım), dayanımda tekrar yükselme meydana gelmiştir. Yine aynı oranda Ç1 kodlu fiberin kendisinden %90 daha kısa ve %50 oranda daha küçük boy/çap oranında olan Ç4 ile yer değiştirmesi ile elde edilen 10 nolu karma FTKYB serisinin yarmada çekme dayanımı 90 günlük kür sonrasında, 1 nolu seriye göre %1, kontrol KYB serisine göre ise %42.7 daha büyüktür. Ancak Şekil 5.20 incelendiğinde, toplam fiber hacminde uzun ve boy/çap oranı yüksek fiberlerin yoğunluğu %75 gibi yüksek bir oranda yer değiştirilmesi ile yarmada çekme dayanımında düşmeye neden olduğu görülmektedir. Şekil 5.20’de makro fiberlerin kullanıldığı 15 ve 16 nolu karışımlarda dayanım düşerken, mikro fiberin kullanıldığı 17 nolu karışımında yine 1 nolu karışımın dayanım seviyesinde bir dayanım elde edilmiştir. Bu durum makro ve mikro fiberlerin bir arada kullanıldığı karışımlarda fiberlerin birlikte çalışarak ortaya koydukları sinerjistik bir etkiden kaynaklanmaktadır. Çelik fiberlerin bu şekilde karma fiber karışımları oluşturularak tasarlanan ve Şekil 5.21-23’te sunulan diğer FTKYB serilerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.



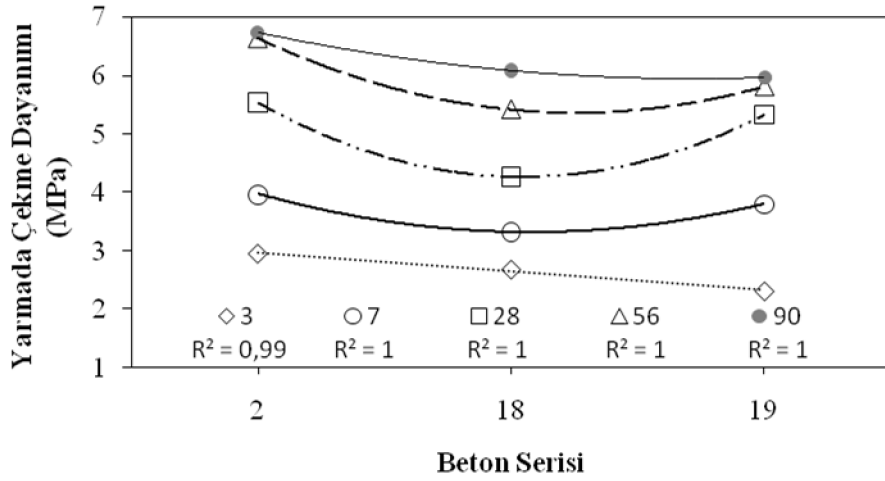
Şekil 5.19 Karışımında %100 ve %50 oranlarda Ç1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması



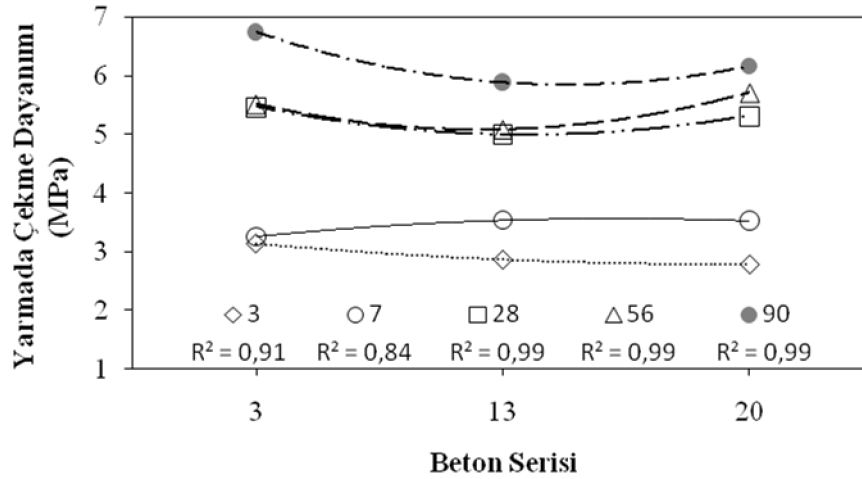
Şekil 5.20 Karışımında %100 ve %25 oranlarda Ç1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 5.21 Karışımında %100 ve %50 oranlarda Ç2 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması

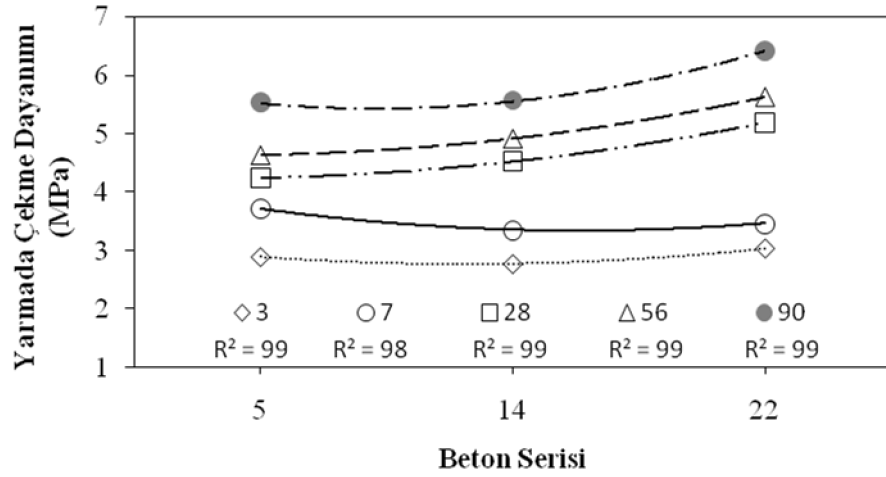


Şekil 5.22 Karışımında %100 ve %25 oranlarda Ç2 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması

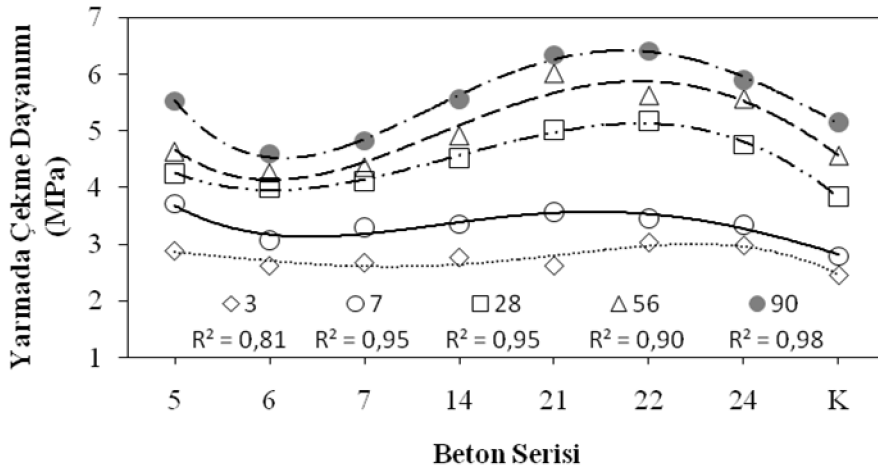


Şekil 5.23 Karışımında %100, %50 ve %25 oranlarda Ç3 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması

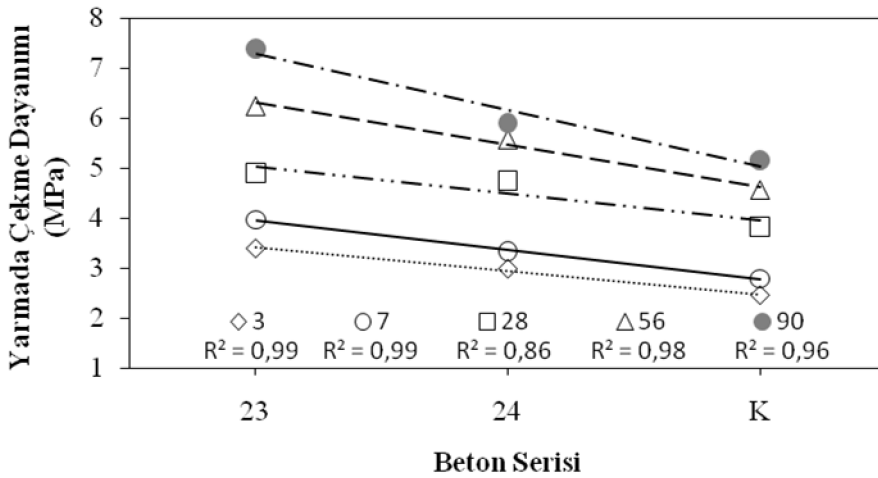
Polipropilen sentetik fiberler ile oluşturulmuş tekil ve karma FTKYB serilerinin yarmada çekme dayanımları, farklı fiber boyut yoğunluğuna ve sinerji etkisine göre Şekil 5.24-26'da verilmiştir. Dayanım özellikleri çelik fiberden düşük olan polipropilen sentetik fiberlerin, çelik fiberler ile oluşturdukları karma fiberli FTKYB serileri, yarma dayanımı açısından %100 tekil polipropilen sentetik fiber kullanılan serilerden daha iyi olduğu görülmektedir. Qian ve Stroeven [72]'de toplam fiber hacminde düşük oranlarda polipropilen sentetik fiber ile çelik fiberlerin oluşturduğu karma fiberli karışımların daha iyi yarmada çekme dayanımı sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. Şekil 5.24'te görüldüğü gibi toplam fiber hacminde çelik fiber yoğunluğu arttıkça, yarmada çekme dayanımında da artma söz konusudur. %100 P1 kodlu fiber içeren 5 nolu karışımında %50 oranla Ç4 yer değiştirildiğinde dayanımda %6.5, %75 oranla Ç4 yer değiştirildiğinde ise %22.1 artış gözlenmiştir. Polipropilen sentetik fiberlerin hem tekil olarak hemde birbiri ve çelik fiberler ile karma olarak kullanıldığı FTKYB serileri Şekil 5.25'te sunulmaktadır. Buradan polipropilen fiberler ile çelik fiberlerin bir arada kullanımından doğan sinerji etkisi ve toplam fiber hacminde çelik fiber yoğunluğunun artırılması ile oluşan etki açıkça görülmektedir. Şekil 5.26'da ise %25 oranlarda 4 farklı fiberler ile oluşturulan 23 ve 24 nolu karma FTKYB serileri ile kontrol KYB serisinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımları verilmiştir. Karışımında %25 oranlar ile Ç1, Ç2, Ç3 ve Ç4 kodlu fiber kullanılan 23 nolu karma FTKYB serisinin yarmada çekme dayanımı diğer serilerden daha yüksek çıkmıştır. 24 nolu seride ise %25 oranlarda P1, P2, Ç3 ve Ç4 kodlu fiberler kullanılmıştır. 24 nolu FTKYB serisinde, toplam polipropilen fiber miktarı karışımında %50 oranında ve bu oran içerisinde mekanik özelliklere etkisinin az olduğu bilinen %25 oranında P2 kodlu fiber kullanılmıştır. P2 kodlu fiberin kullanılması ile 24 nolu serinin yarmada çekme dayanımı 5, 6, 7 ve 14 nolu serilerden yüksek çıkmasına rağmen, 21 ve 22 nolu serilerden düşük çıkmıştır.



Şekil 5.24 Karışımında %100, %50 ve %25 oranlarda P1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 5.25 Farklı oranlarda P1 ve P2 kodlu fiberlerin birbiri ve çelik makro-mikro fiberler ile oluşturdukları FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımlarının karşılaştırılması

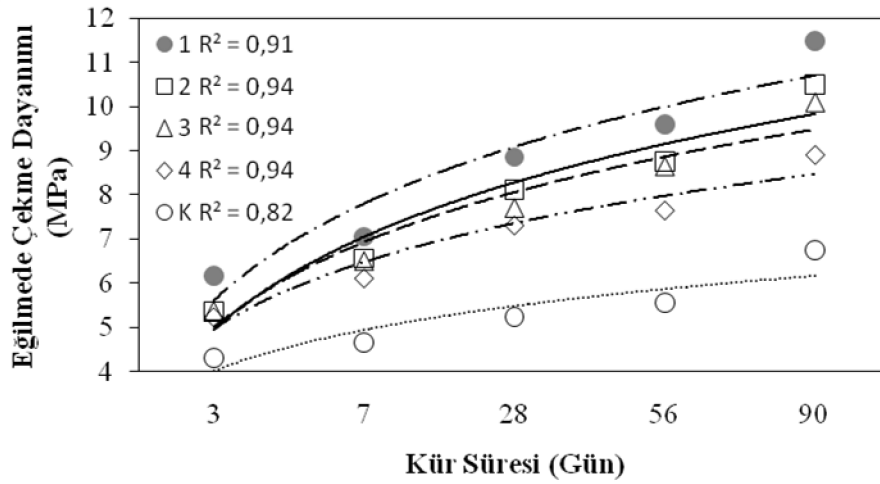


Şekil 5.26 Kontrol KYB ve karışımında %25 oranlarda 4 farklı fiber içeren FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki yarmada çekme dayanımları

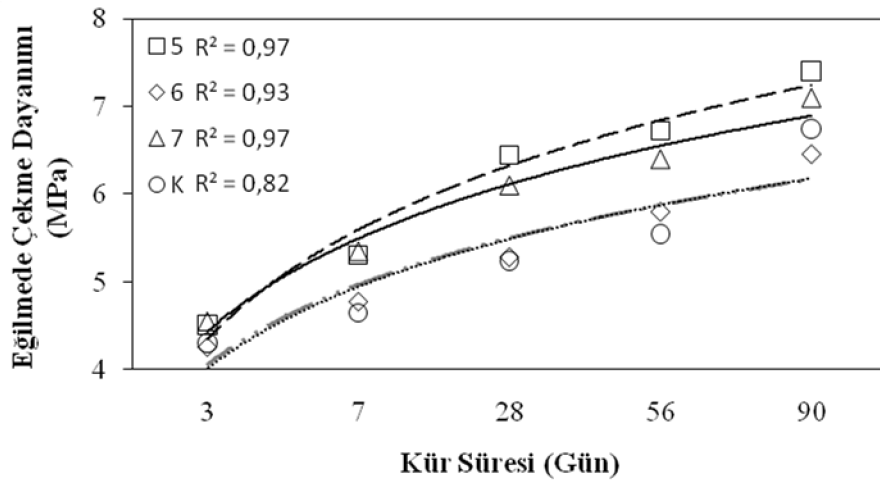
5.2.3 Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

FTKYB'un eğilmede çekme dayanımı deney sonuçlarının değerlendirildiği Şekil 5.27-31'de karışımında tekil olarak kullanılan fiberlerin etkisi verilmiştir. Şekil 5.27-28 incelendiğinde her FTKYB serisinin normal olarak kür yaşlarına göre dayanım kazandığı görülmektedir. Burada dikkati çeken nokta, beton serileri ilk 7 günlük yaşa kadar ve aynı zamanda 28-56 günlük yaşlar arasında dayanım kazanımı normallik gösterirken, 7 günlük yaştan 28 günlük yaşa ve 56 günlük yaştan 90 günlük kür yaşına geçişlerde dayanımlarda belirli bir sıçrama olmuştur. Bu sıçramalar, standart beton yaşı olarak kabul edilen 28 günlük yaşta beton dayanımının büyük bir kısmını kazanıyor olmasından ve karışımında toz malzeme olarak UK kullanımından dolayı, bu malzemenin puzolanik aktivitesini ileri yaşlarda gösteriyor olmasından kaynaklanmaktadır [91]. Şekil 5.29-31 incelendiğinde, 1 nolu seride kullanılmış olan Ç1 kodlu fiberin, FTKYB'un eğilmede çekme dayanımı üzerinde en iyi etkiye sahip olduğu gözlenmektedir. Aynı şekiller incelendiğinde en düşük dayanım özelliklerini sergileyen seriler ise, kontrol KYB ve P2 kodlu fiberin kullanıldığı 6 nolu FTKYB serisi olduğu görülmektedir. Şekil 5.29 incelendiğinde, yarmada çekme dayanımında olduğu gibi fiber uzunluğu ve boy/çap oranı düşürüldükçe eğilmede çekme dayanımında da belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Ç1 nolu fiberin kullanıldığı 1 nolu karışımdan elde edilen 90 günlük eğilmede çekme dayanımı sonucuna göre, fiber uzunluğu %41.7 ve boy/çap oranı %20 düşürüldüğünde eğilmede çekme dayanımında %8.7, fiber uzunluğu %50 ve boy/çap oranı %31.3 düşürüldüğünde eğilmede çekme dayanımında %12.2, fiber uzunluğu %90 ve boy/çap oranı %50 düşürüldüğünde ise eğilmede çekme dayanımında %22.6 düşüş gözlenmiştir. Benzer şekilde Yazıcı ve diğ. [28], Miao ve diğ. [109] çalışmalarından elde ettikleri bulgulara dayanarak karışımında fiber boyutsal oranının arttırılması ile ve aynı zamanda kullanılan fiber hacminin arttırılması ile yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımında artış meydana geldiğini belirtmiş, eğilmede çekme dayanımının bu yolla daha yüksek değerler verdiğini savunmuşlardır. Polipropilen sentetik tekil fiber kullanılmış FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımı seviyelerinin sunulduğu Şekil 5.30 incelendiğinde, eğilmede çekme dayanımında da P1 kodlu fiberin kullanıldığı 5 nolu FTKYB serisi diğer serilere göre daha yüksek ve 90 günlük kür sonrasında, kontrol KYB serisine göre %9.6 daha yüksek çıkmıştır. Düşük oranda P2 kodlu fiberin kullanıldığı 6 nolu karışımında ise, kullanılan fiberin eğilmede çekme dayanımında kontrol KYB serisi ile benzer değerler verdiğinden dolayı yüksek oranda etkiye sahip olmadığı gözlenmiştir. Ancak yüksek oranda kullanıldığı 7 nolu seride, 90 günlük kür sonrasında kontrol KYB serisine göre %5.2'lik dayanım artışı sergilemiştir. Tekil fiber kullanılan FTKYB serileri ve kontrol KYB serisinin 5 ayrı kür süresindeki eğilmede çekme

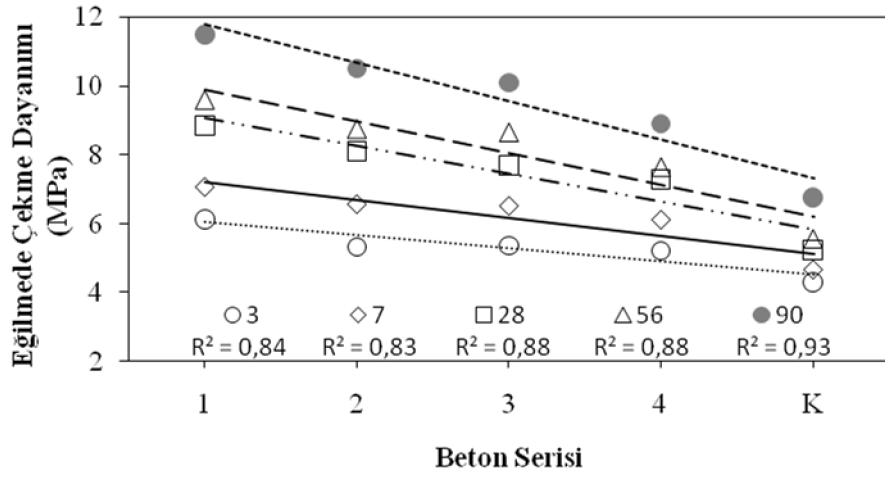
dayanımı değerlerinin bir arada sunulduğu Şekil 5.31’de, fiber uzunluğu ve boy/çap oranının düşmesi ile eğilmede çekme dayanımında düşüş meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca farklı malzeme kökenine sahip fiber kullanımının da eğilmede çekme dayanımında farklılığa neden olduğu görülmektedir. Burada karışımda çelik fiber kullanımı ile polipropilen kullanımından daha yüksek eğilmede çekme dayanımı elde edildiği görülmektedir.



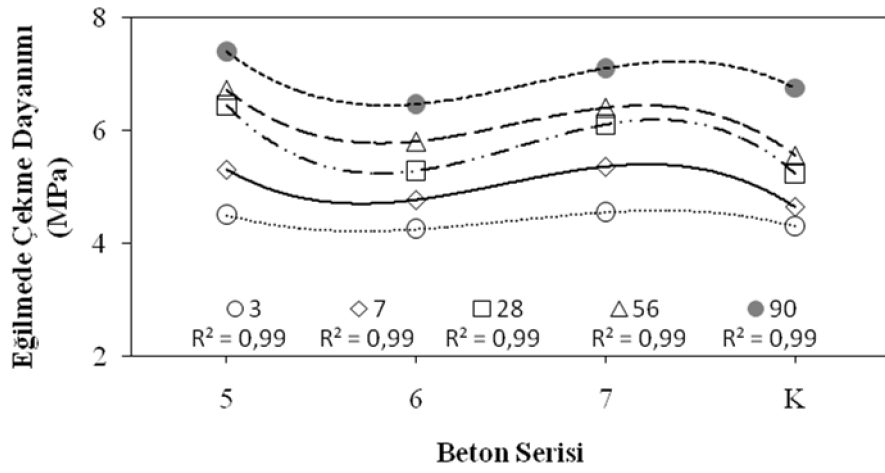
Şekil 5.27 Kontrol KYB ve tekil çelik FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği



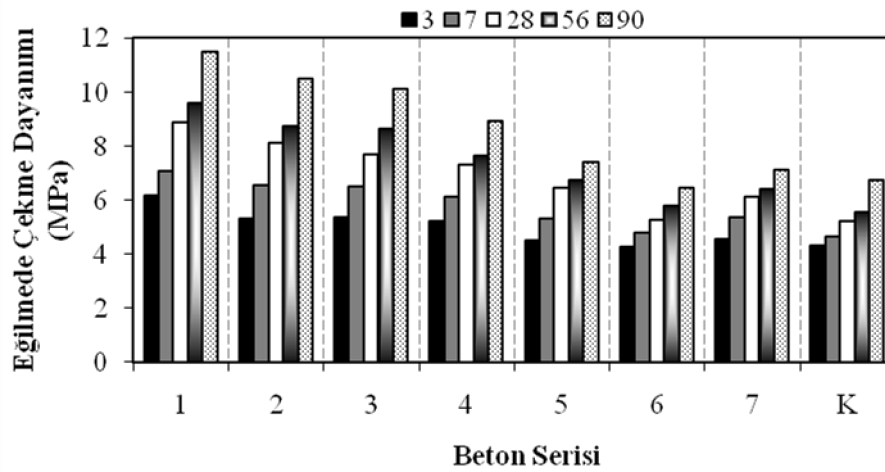
Şekil 5.28 Kontrol KYB ve tekil polipropilen sentetik FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği



Şekil 5.29 Kontrol KYB ve tekil çelik FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımları

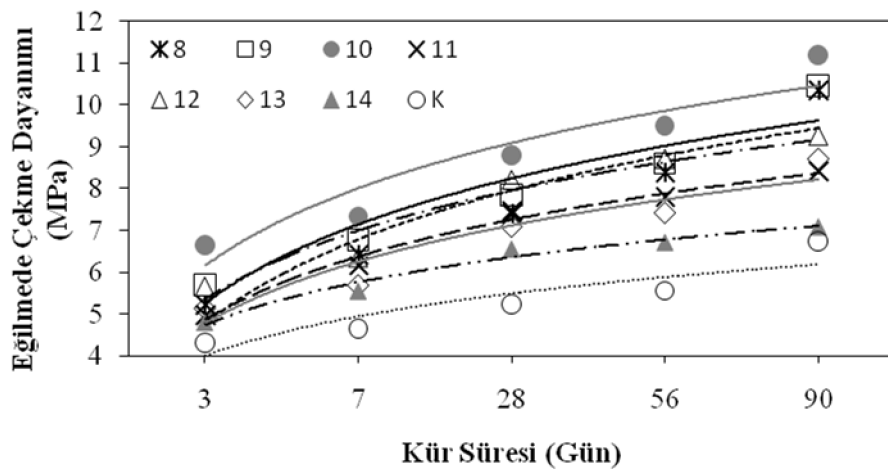


Şekil 5.30 Kontrol KYB ve tekil polipropilen sentetik FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımları

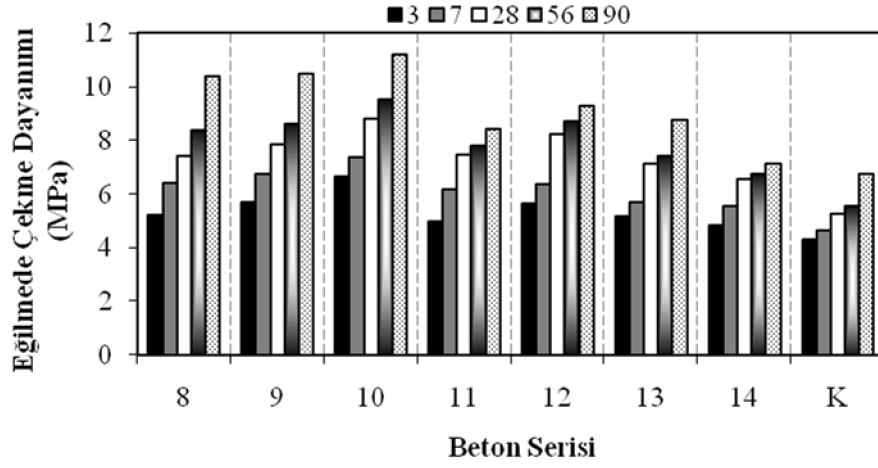


Şekil 5.31 Kontrol KYB ve tüm tekil FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımları

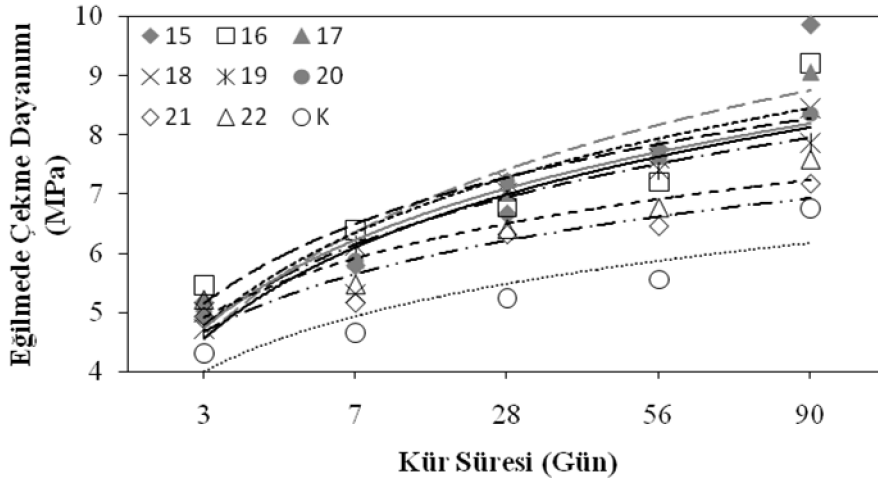
Şekil 5.32-33'te %50uzun+%50kısık olarak Şekil 5.34-35'te ise %25uzun+%75kısık olarak fiberlerin karma kullanımı neticesinde elde edilen FTKYB serilerinin, eğilmede çekme dayanımları toplu olarak sunulmuştur. Yine diğer grupların bir arada sunumunda gözlemlendiği gibi kür süresinin artışı ile beton dayanımlarında gelişme gözlemlenmiştir. Oluşturulan bu iki ayrı grupta da en düşük eğilmede çekme dayanımı, belirgin bir şekilde kontrol KYB serisinden elde edilmiştir. İlk grupta (%50uzun+%50kısık) en yüksek eğilmede çekme dayanımı 90 günlük kür süresi sonrasında kontrol KYB serisine göre %57.7 ile 10 nolu FTKYB serisinden elde edilmiştir. Diğer grupta (%25uzun+%75kısık) ise %38.7 artış ile 15 nolu FTKYB serisinde gözlemlenmiştir. İlk grupta toplam fiber hacminde bulunan uzun ve boy/çap oranı yüksek fiberlerin hacim yoğunluğu, kendilerinden daha kısa olan fiberler ile %50 oranında değiştirilmiş karma FTKYB serilerinde, toplam fiber hacminde kısa ve boy/çap oranı düşük fiberlerin artırılması ile eğilmede çekme dayanımında artma gözlemlenmiştir. Diğer taraftan uzun ve boy/çap oranı yüksek fiberlerin, toplam fiber hacmindeki yoğunluğu, yüksek miktarda düşürüldüğünde eğilmede çekme dayanımında düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.36-37'de ise toplam fiber hacminde %25'er oranlar ile 4 farklı fiberin kullanıldığı karma FTKYB serileri ve kontrol KYB serisinin kıyaslandığı eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları verilmiştir. Burada 23 nolu FTKYB serisi, 90 günlük kür süresi sonrasında kontrol KYB serisine göre %61 oranında artışla, eğilmede çekme dayanımı olarak en yüksek dayanım artış oranlarından birini sergilemiştir. Yun ve diğ. [110]'de çalışmalarında, karma fiber kullanımı ile eğilme ve yarmada çekme dayanımlarının, tekil fiber kullanımına göre daha yüksek oranda artışlar sağladığını vurgulamışlardır.



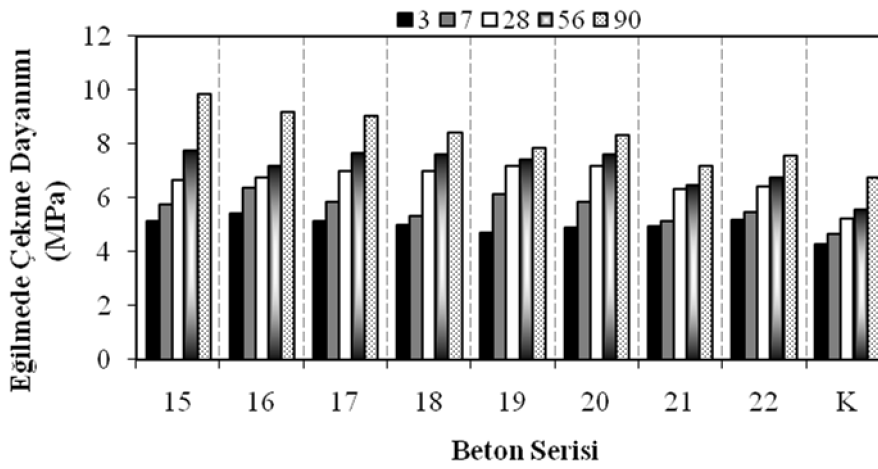
Şekil 5.32 Kontrol KYB ve %50uzun+%50kısık karma FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği



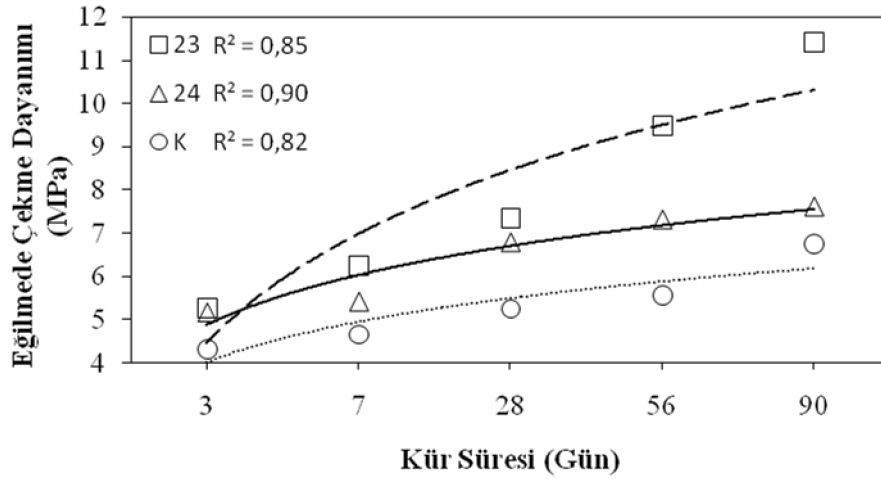
Şekil 5.33 Kontrol KYB ve %50uzun+%50kısa karma FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği



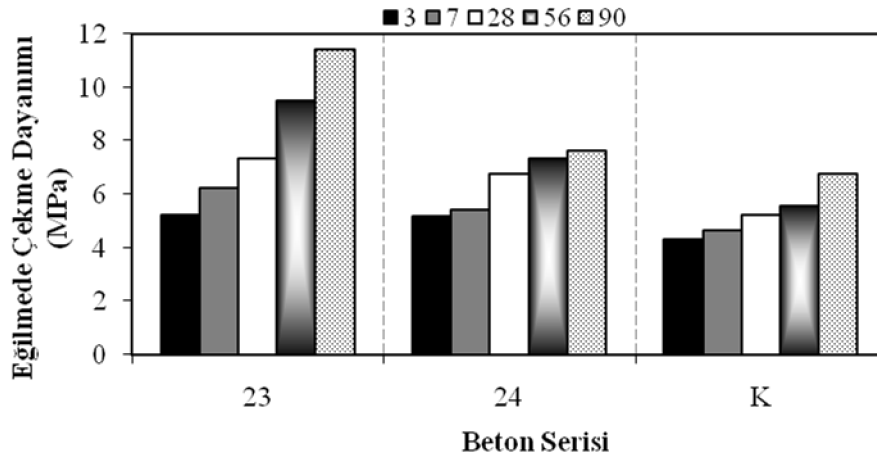
Şekil 5.34 Kontrol KYB ve %25uzun+%75kısa karma FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği



Şekil 5.35 Kontrol KYB ve %25uzun+%75kısa karma FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği



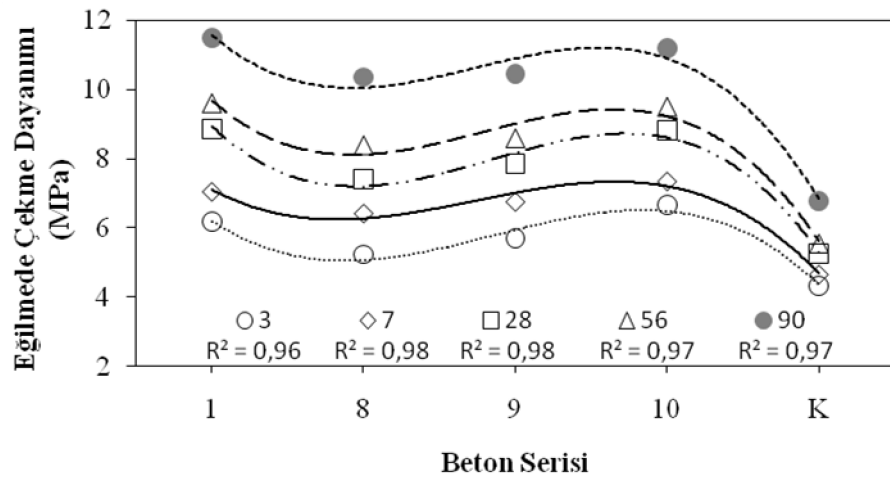
Şekil 5.36 Karışımında %25 oranlarda 4 farklı fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği



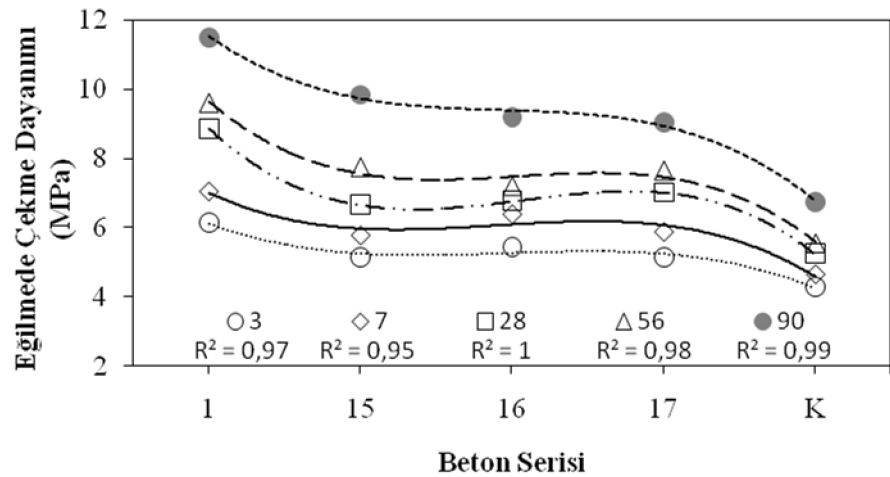
Şekil 5.37 Karışımında %25 oranlarda 4 farklı fiber içeren FTKYB serilerinin kür süresi-eğilmede çekme dayanımı grafiği

Şekil 5.38-45'te farklı uzunluk ve boy/çap oranlarına sahip çelik ve polipropilen sentetik fiberlerin, farklı oranlarda karıştırılması ile elde edilen karma FTKYB serilerinin eğilmede çekme dayanımları verilmiştir. Bunlardan Şekil 5.38-39'da Ç1 kodlu fiberin, Şekil 5.40-41'de Ç2 kodlu fiberin kendisinden daha kısa olan fiberler ile, toplam fiber hacminde %50 ve %75 oranlarda yer değiştirmesi ile elde edilen FTKYB beton serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Burada da yarmada çekme dayanımında elde edilen sonuçları destekler nitelikte benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Toplam fiber hacminde fiber uzunluk ve boy/çap oranının düşürülmesi ile eğilmede çekme dayanımında düşüş gözlenmiştir. Ancak genel olarak uzun ve boy/çap oranı yüksek makro fiberler ile mikro ölçekteki fiberlerin birlikte kullanımı sonucu daha iyi eğilmede çekme dayanımları elde edilmiştir. Ç3 kodlu fiberin farklı oranlarda, daha kısa fiberler ile karıştırılarak oluşturulmuş FTKYB serileri ise Şekil 5.42'de sunulurken, Şekil 5.43'de P1

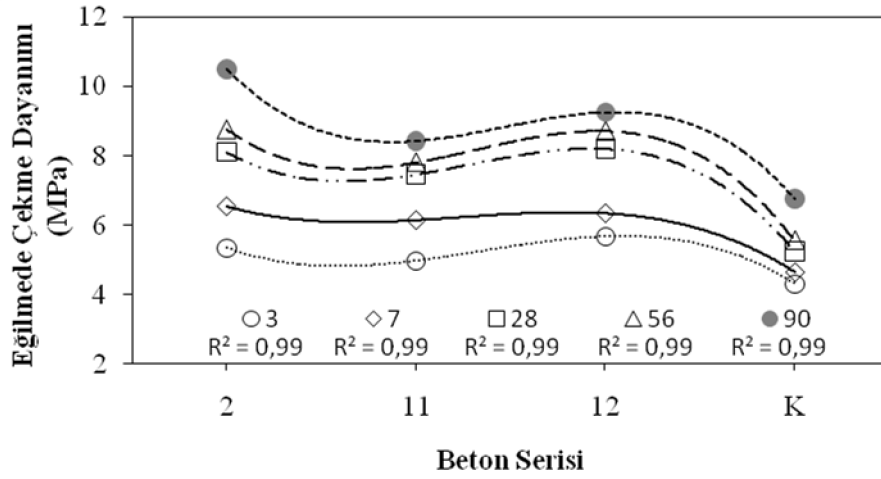
polipropilen sentetik makro fiberin farklı oranlarda Ç4 çelik mikro fiber ile oluşturduğu FTKYB serileri sunulmaktadır. Polipropilen sentetik makro ve mikro fiberlerin tekil olarak ya da birbiri ve çelik fiberler ile belli oranlar ile yer değiştirilerek elde edilen FTKYB serileri ise Şekil 5.44'te verilmiştir. Bu şekilde %50 oranlar ile uzun fiberlerin kendilerinden daha kısa fiberler ile yer değiştirmesi ile elde edilen serilerden en düşük eğilmede çekme dayanımı, 90 günlük kür neticesinde kontrol serisine göre, %11 artış ile P1+Ç4 kodlu fiberlerin kullanıldığı 14 nolu FTKYB serisinden elde edilirken, en yüksek eğilmede çekme dayanımı %58 artış ile Ç1+Ç4 kodlu fiberlerin kullanıldığı 10 nolu FTKYB serisinden elde edilmiştir.



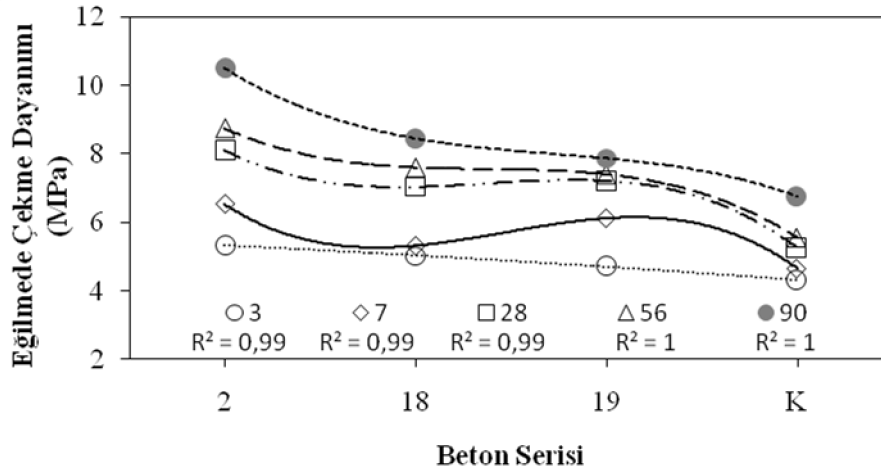
Şekil 5.38 Kontrol KYB ve karışımında %100 ve %50 oranlarda Ç1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması



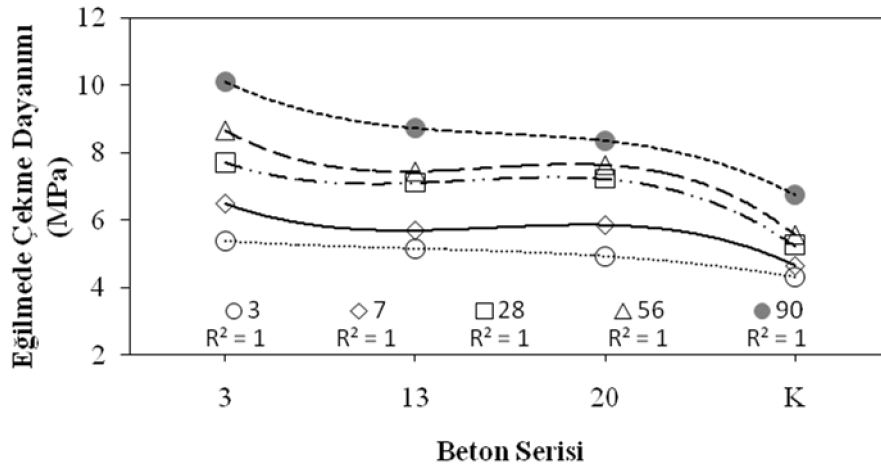
Şekil 5.39 Kontrol KYB ve karışımında %100 ve %25 oranlarda Ç1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması



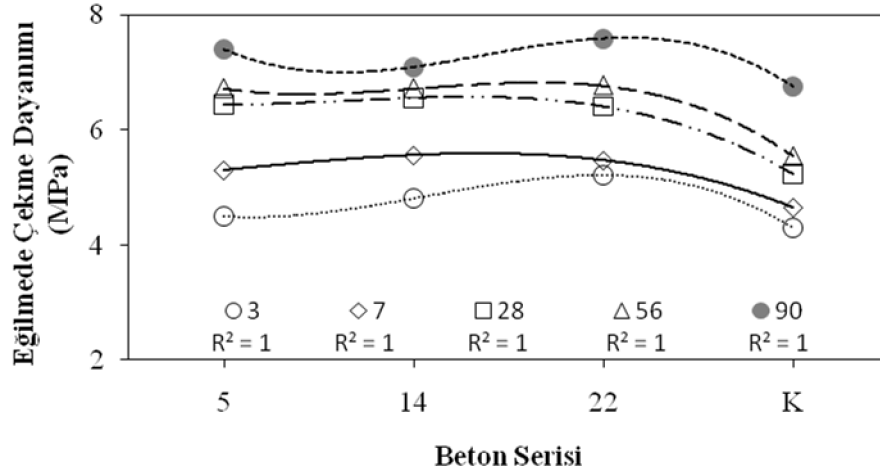
Şekil 5.40 Kontrol KYB ve karışımında %100 ve %50 oranlarda Ç2 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması



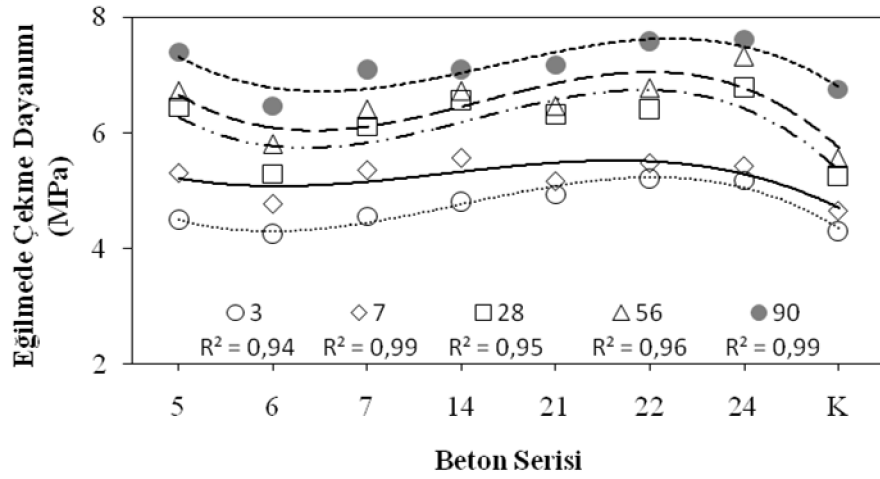
Şekil 5.41 Kontrol KYB ve karışımında %100 ve %25 oranlarda Ç2 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması



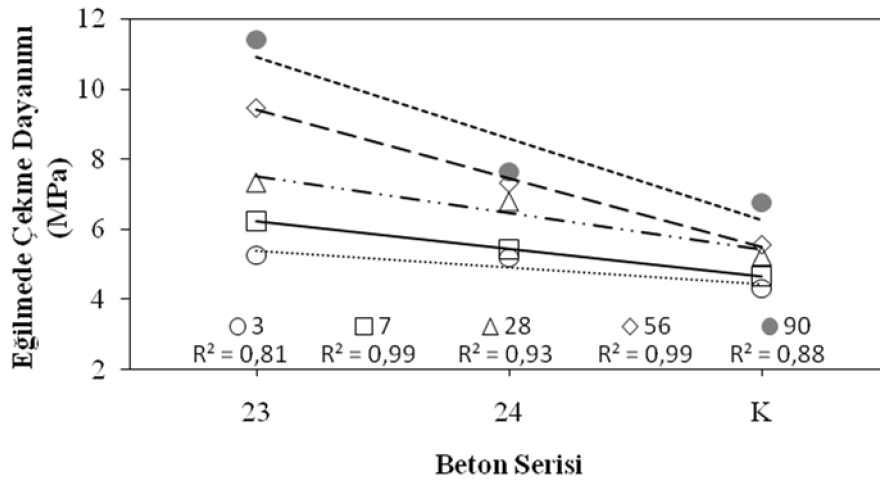
Şekil 5.42 Kontrol KYB ve karışımında %100, %50 ve %25 oranlarda Ç3 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 5.43 Kontrol KYB ve karışımında %100, %50 ve %25 oranlarda P1 kullanılarak boyut yoğunluğu düşürülen FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 5.44 Kontrol KYB ve farklı oranlarda P1 ve P2 fiberlerin birbiri ve çelik makro-mikro fiberler ile oluşturdukları FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması



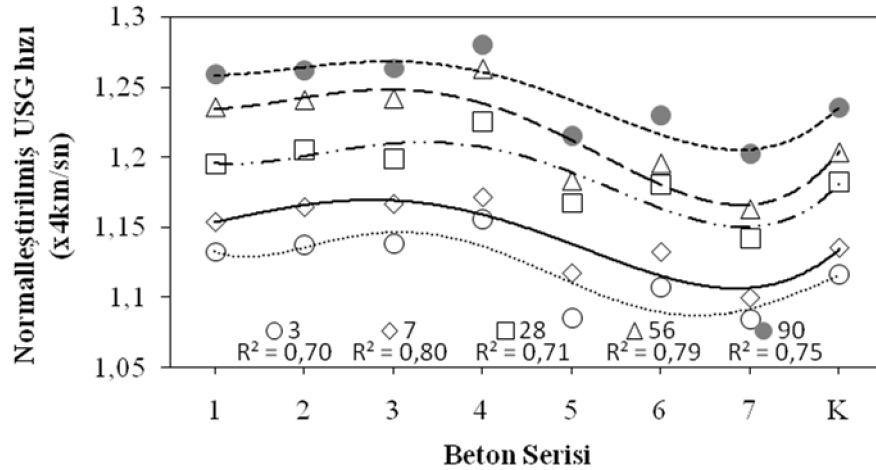
Şekil 5.45 Kontrol KYB ve karışımında %25 oranlarda 4 farklı fiber içeren FTKYB serilerinin aynı yaşlardaki eğilmede çekme dayanımları

Şekil 5.45'te %25 oranlar ile 4 farklı fiberin karma olarak kullanıldığı FTKYB serilerinde Ç1, Ç2, Ç3 ve Ç4 fiberlerinin bir arada kullanıldığı 23 nolu karma FTKYB serisinde, 90 günlük kür sonrası kontrol KYB serisine göre eğilmede çekme dayanımında %61 artış ile 2. en büyük dayanım değeri elde edilmiştir. 24 nolu seride ise polipropilen ve çelik fiberler ile oluşturulan karma fiber serisi sunulmaktadır. Burada da, kontrol KYB serisine göre, oluşturulan diğer polipropilen sentetik fiberli karışımlardan daha yüksek eğilmede çekme dayanımı elde edilmiştir.

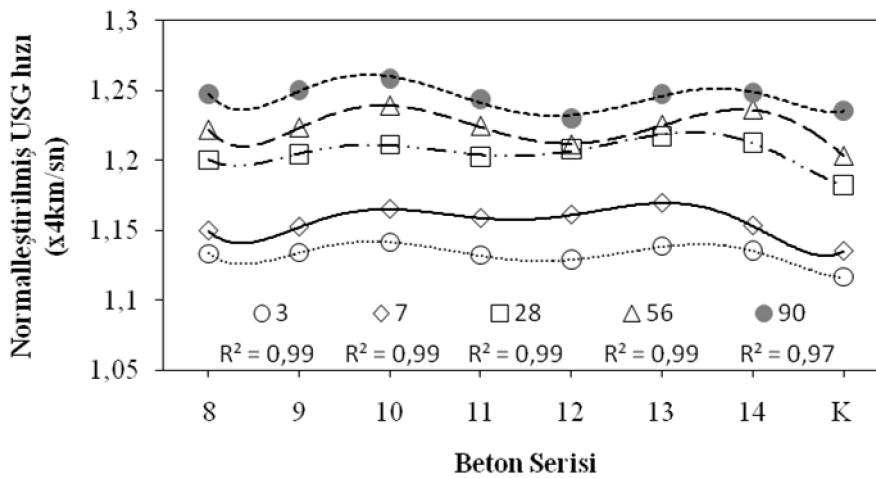
5.2.4 USG Hızı Tayini

Basınç dayanımı deneyinde olduğu gibi, uygulanan USG hızı deneyleri sonucu FTKYB serileri arasında çok belirgin bir fark oluşmamıştır. Beton içyapısında değişken malzeme fiber olduğundan ve fiberler de sabit miktarda kullanıldığından yalnızca çelik fiber kullanılan FTKYB serileri ile polipropilen sentetik fiber kullanılan FTKYB serileri arasında belirgin bir fark görülmüştür. Aynı malzemeden üretilen fiberler arasında ise dikkati çeken fark makro çelik fiberler ile mikro çelik fiberler arasında gözlenmiştir. Polipropilen sentetik fiberler ise, kontrol KYB serisi ile karşılaştırıldığında, USG hızı kontrol KYB serisinden düşük ya da yakın olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.46 karışımında %100 tekil çelik ve polipropilen sentetik fiber kullanılmış olan FTKYB serisinin USG hızları verilmiştir. Burada çelik fiber kullanılan FTKYB serilerinde USG hızının kontrol KYB ve polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serilerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Benzer şekilde kontrol KYB serisi de polipropilen sentetik fiberli FTKYB serilerinden daha yüksek çıkmıştır. Çelik fiber kullanılan karışımlarda ise fiber uzunluğu ve boy/çap oranı düşürüldükçe USG hızında da belirgin bir artış gözlenmektedir. Aynı hacmi dolduran fiber tane sayısı, fiber uzunluk ve boy/çap oranı düştükçe artış gösterdiğinden fiberlerin birbiri ile teması daha fazla olduğu ve matris içerisinde, birbiri ile temas halinde olan bu fiberlerin USG hızının artmasında etkin olduğu düşünülmektedir. Beton içerisindeki demir donatının USG hızını etkilediği bilinmektedir [91]. Karışımında polipropilen sentetik fiber kullanılan 5, 6 ve 7 nolu serilerde ise USG hızında belirgin bir düşüş gözlenmiştir. 5 ve 7 nolu FTKYB serilerinde 6 nolu seriye göre yüksek oranda polipropilen sentetik fiber kullanılmıştır. Şekil 5.46 incelendiğinde düşük polipropilen sentetik fiber kullanılan 6 nolu FTKYB serisinde USG hızının kontrol KYB serisine oldukça yakın değerler gösterdiği görülürken, 5 ve 7 nolu seride USG hızı kontrol KYB serisine göre dikkate değer ölçüde düşük çıkmıştır. %50'lik oranlar ile uzun ve kısa fiberlerin karma olarak kullanıldığı beton serilerinin USG hızının sunulduğu Şekil 5.47 incelendiğinde her FTKYB serisinin birbirine yakın değerler verdiği görülmektedir. Bu değerler birbirine yakın olmakla beraber nispeten makro fiberlerin mikro

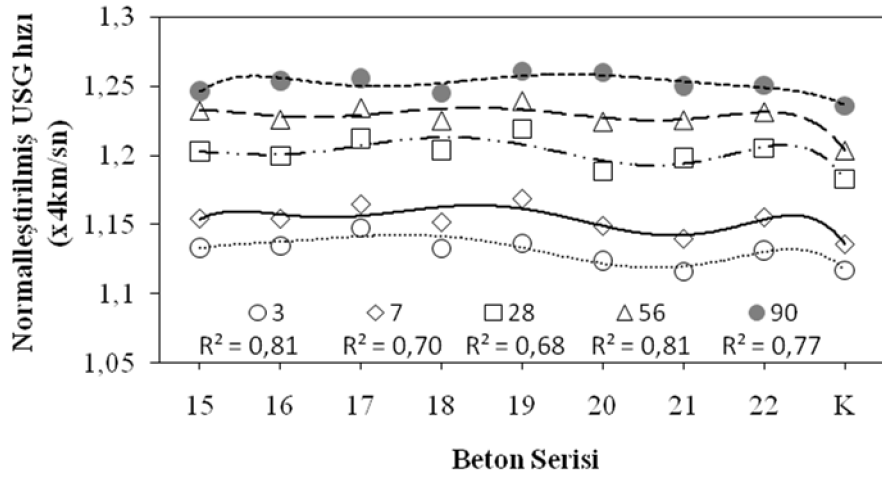
fiberler ile karıştırılarak kullanıldığı karışımlarda USG hızı daha yüksek çıkmıştır. Bu etki uzun fiberlerin kendilerinden daha kısa fiberlerle %75 oranında yer değiştirilerek oluşturulan FTKYB serilerinin sunulduğu Şekil 5.48’de de görülmektedir. İçeriğinde çelik fiber bulunan karışımların kontrol KYB serisinden daha yüksek USG hızı değerleri verdiği bu şekillerde de açıkça görülmektedir. Şekil 5.49’da sunulan ve karışımında 4 farklı fiberin %25’er oranlarda kullanılarak oluşturulan 23 ve 24 nolu FTKYB serilerinden de sonuçları destekler nitelikte benzer USG hızı değerleri elde edilmiştir. Karışımında %50 çelik (%25Ç3, %25Ç4) ve %50 polipropilen sentetik (%25P1, %25P2) fiberler bulunduran 24 nolu FTKYB serisi kontrol betonundan yüksek USG hızı değerleri verirken, toplam fiber hacminde %100 oranında çelik fiber (%25Ç1, %25Ç2, %25Ç3, %25Ç4) içeren 23 nolu seri, diğer serilerden daha yüksek USG hızı değerleri sergilemiştir.



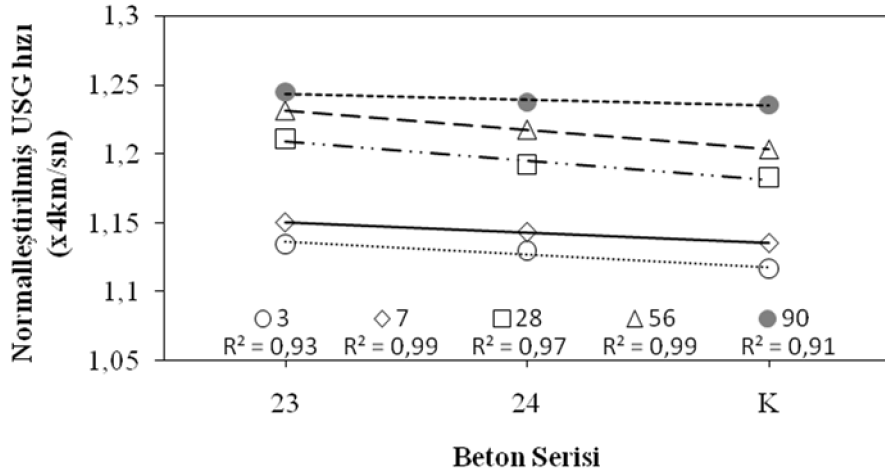
Şekil 5.46 Kontrol KYB ve %100 tekil fiber içeren FTKYB serilerinin USG hızları



Şekil 5.47 Kontrol KYB ve %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren FTKYB serilerinin USG hızları



Şekil 5.48 Kontrol KYB ve %25uzun+%50kısa karma fiber içeren FTKYB serilerinin USG hızları



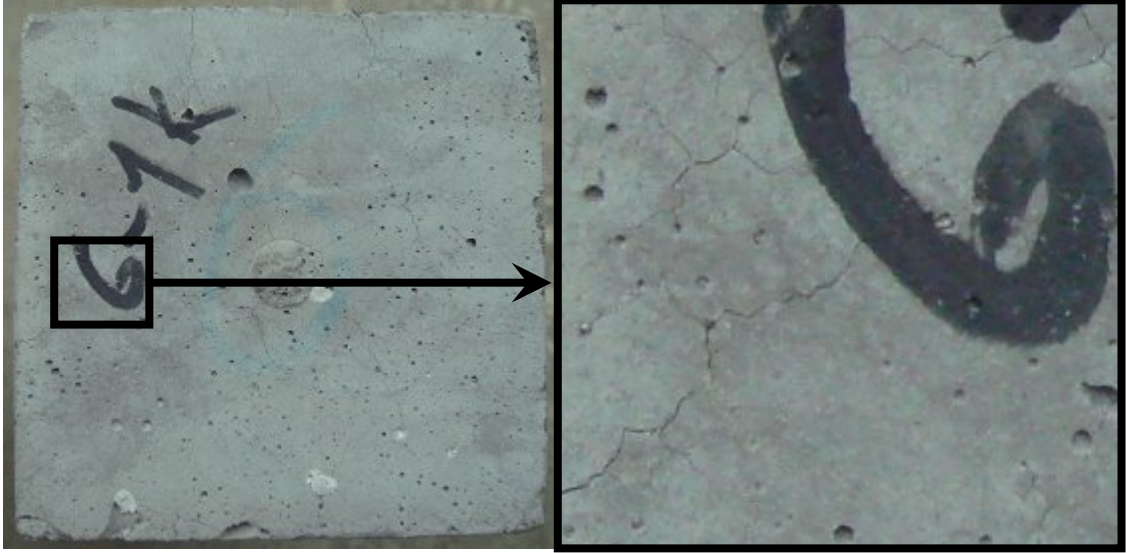
Şekil 5.49 Kontrol KYB ve karışımında 4 farklı fiber kullanılan FTKYB serilerinin USG hızları

5.3 Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi

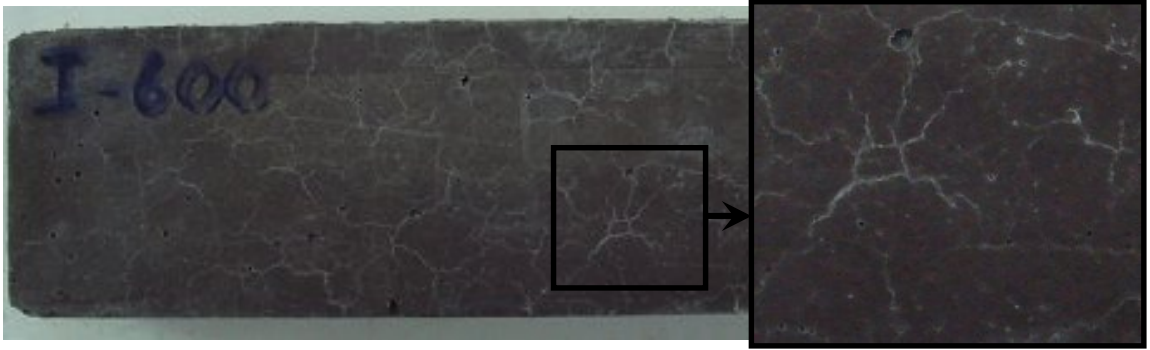
5.3.1 Yüksek Sıcaklık Deneyi Bulgularının İncelenmesi

Yüksek sıcaklık için hazırlanan deney numunelerine 300, 600 ve 900°C sıcaklıklar sonrasında bazı mekanik deneyler uygulanmıştır. Farklı sıcaklıklar neticesinde, üretilen FTKYB serilerinde öncelikle bazı fiziksel değişimler gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık deneyi sonrası numune yüzeylerinde, farklı ısı dereceleri uygulanmasından dolayı farklı renklemeler, farklı çatlak yoğunluğu ve genişliği gibi değişimler gözlenirken içyapıda bozulmalar gözlenmiştir. Uygulanan 300°C sıcaklık neticesinde, Şekil 5.50'de görüldüğü gibi numunelerde yer yer mikro yüzey çatlakları oluştuğu gözlenmiştir. Ancak bu mikro yüzey çatlaklarının kontrol KYB

betonundaki oranının, üretilen FTKYB serilerindekinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 300°C sonrasında beton numunelerde belirgin bir renk değişimi gözlenmemiştir.

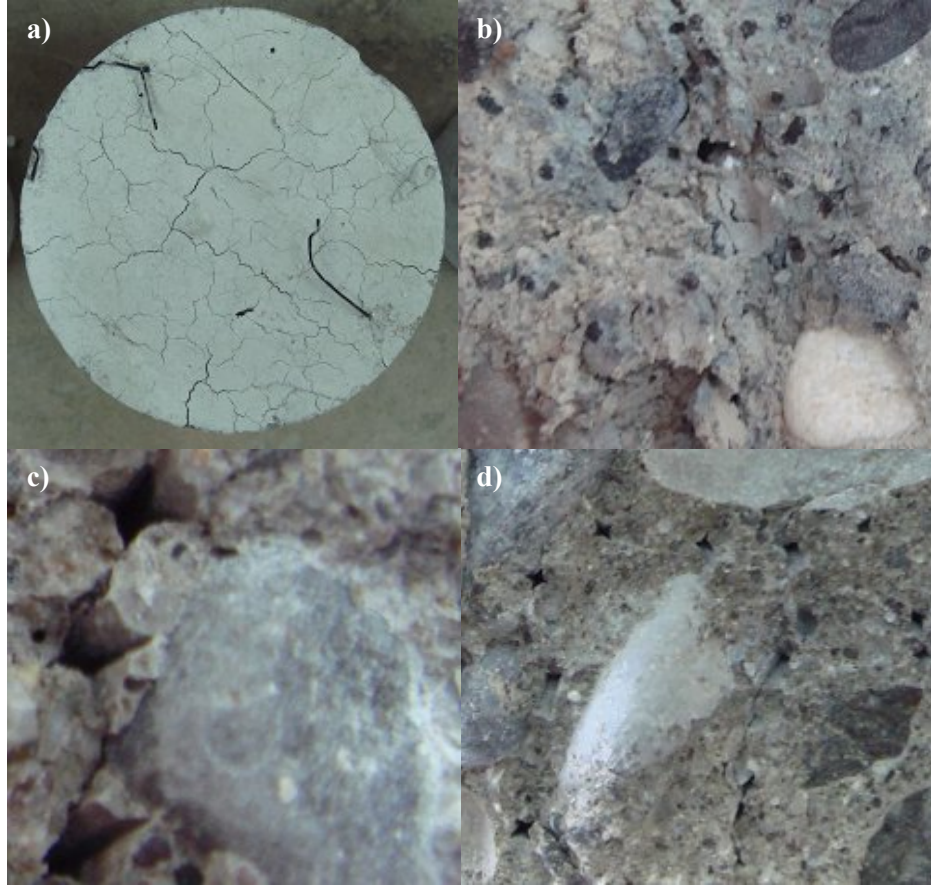


Şekil 5.50 300°C sonrasında numune yüzeylerinde meydana gelen seyrek mikro çatlaklar



Şekil 5.51 600°C sonrasında numune yüzeylerinde meydana gelen yoğun mikro çatlaklar

600°C derece sonrasında ise, numunelerde belirgin bir renk farklılığı gözlenmiştir. Numunelerin yüzey rengi 300°C sonrasında açık gri iken, 600°C sonrasında koyulaşarak siyaha yakın bir gri renge ulaşmıştır. Şekil 5.51’de görüldüğü gibi numune yüzeylerindeki mikro çatlak yoğunluğu ve genişliği artarak, büyütme işlemine gerek kalmaksızın gözle görülür ölçülere ulaşmıştır. Yine Şekil 5.51’de görüldüğü üzere çatlakların birbirine daha yakın olduğu ve birbiri ile bağlantılı bir ağ yapısı sergilediği gözlenmektedir.



Şekil 5.52 a) 900°C sonrasında numune yüzeylerinde meydana gelen yoğun makro çatlaklar, **b)** İçyapıdaki eriyen çelik fiberler (iri nokta şeklindeki görüntüler) **c-d)** 900°C sonrası P2 makro fiberin erimesinden dolayı beton yapısında oluşan boşluklar

900°C sonrasında ise numuneler tam olarak beyaz renge dönüşmüş ve 600°C sıcaklıkta gözlenmiş olan yoğun mikro çatlak yapısı makro yapıya ulaşmıştır. Şekil 5.52a’da bu durum herhangi bir büyütme işlemine gerek kalmaksızın açıkça görülmektedir. Şekil 5.52b’de ise kırılmaya tabi tutulan bir FTKYB serisinin yanılarak içyapısı fotoğraflanmıştır. Şekilde 5.52b’de görüldüğü gibi iç yüzey boyunca yayılmış olan çelik fiberlerin bir miktar eriyerek kendi etraflarındaki çevreye yayıldığı görülmektedir. Beton bünyesinde bulunan çelik fiberler bir miktar incelmış olsalar da polipropilen sentetik fiberler gibi beton içerisinde boşluk oluşturmamışlardır. Şekil 5.52c-d incelendiğinde kullanılan polipropilen sentetik fiberlerin beton yapısı içerisinde ne denli büyük ve yoğun boşluklar bıraktığı görülmektedir. Polipropilen sentetik fiberli beton serilerine 300°C sıcaklık uygulandığında, beton yüzeylerinde yüzeye yakın fiberlerin eriyerek beton dış yüzeyine sızdığı ve soğutma sonrasında beton yüzeyinde damla görüntüsü oluşturduğu gözlenmiştir. Ancak bu numuneler mekanik deneylere tabi tutularak kırıldığında, içyapıda fiberlerin sağlam olarak kendilerini muhafaza ettiği gözlenmiştir. 600°C sonrasında ise, 900°C’de gözlemlendiği gibi beton içyapısında fiberlerden dolayı boşluklara

rastlanırken bu boşluk çevresinde parlak ıslaksı bir yapı fark edilmiştir. 300-600°C sıcaklıklar sonrasında çelik fiberlerde fazla bir değişiklik fark edilmezken, 900°C sonrasında çelik fiber çapında incelme gözlenmiştir. Bu incelme uygulanan yüksek sıcaklık neticesinde yanan çelik fiberlerde oluşan ufalanma ya da erimeden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.53’de 900°C sıcaklık sonrasında bu şekilde oluşan incelme sonucunda etkin fiber çapı ölçümü gösterilmektedir. Şekil 5.53’de 3 nolu FTKYB serisi içindeki Ç3 kodlu 0.55 mm çapındaki çelik fiber incelenmektedir. Görüldüğü gibi çelik fiber çapında 0.25 mm’lik ve % 45.5 oranında bir ölçü kaybı söz konusudur. 900°C sıcaklık uygulanan ve karışımında çelik fiber kullanılan diğer FTKYB serilerinde de benzer durum söz konusudur.

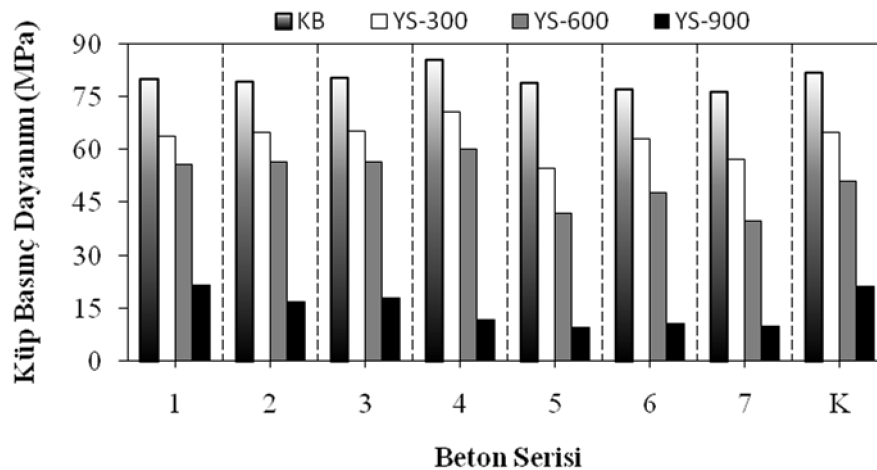


Şekil 5.53 900°C sonrası çelik fiber çapındaki küçülme (ölçüm uygulanan fiber normal çapı:0.55 mm)

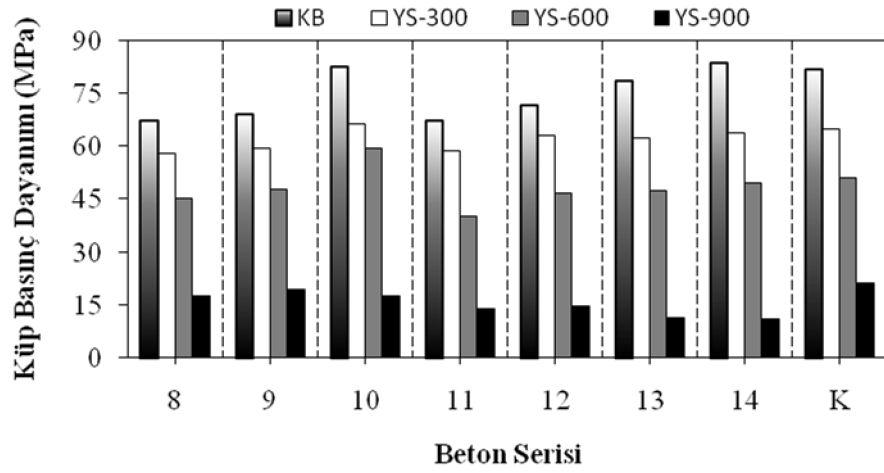
a) Basınç Dayanımı Deneyi

Yüksek sıcaklık deneyi sonrasında, FTKYB serileri ve kontrol KYB serisi basınç dayanımı deneyine tabi tutularak elde edilen veriler Şekil 5.54-57 sunulmuştur. Yüksek sıcaklık deneyinin değerlendirilmesinde, her seri için kendisi ile eş ve ortam sıcaklığında ($23^{\circ}\text{C}\pm 2$) bekletilmiş olan numunelerin basınç dayanımı ortalamaları kullanılmıştır. Şekillerde sunulan sütun grafiklerde, her bir beton serisi için sıcaklık derecelerine göre dayanımı gösteren 4 sütun kullanılmıştır. Bunlar sırası ile KB, YS-300, YS-600 ve YS-900’dür. KB kodu, kontrol KYB ve her bir FTKYB serisinin ortam sıcaklığında bekletilmiş kendi kontrol serisini ifade etmektedir. YS-300 kodu ise, kontrol KYB ve her bir FTKYB serisinin 300°C yüksek sıcaklık uygulanan serisini ifade etmektedir. Diğer kodlamalar da 300°C’de olduğu gibi, her bir beton serisinin diğer yüksek sıcaklık uygulamalarından elde edilen basınç dayanımı değerlerini ifade etmektedir.

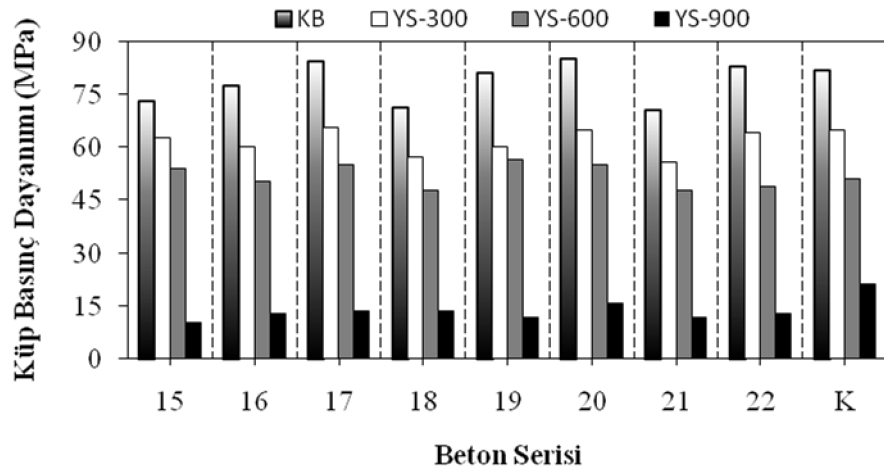
Normal şartlar altında uygulanan basınç dayanımında olduğu gibi, genel bir ifade ile yüksek sıcaklık deneyi sonrası uygulanan basınç dayanımı deneyinde de benzer etkiler göze çarpmıştır. Şekil 5.54-57’de görüldüğü gibi, uygulanan sıcaklığın artırılması ile beton basınç dayanımında normal olarak düşüş gözlenmiştir. Genel itibari ile tüm şekiller incelendiğinde yüksek sıcaklık deneyi sonrasında FTKYB serilerinin benzer basınç dayanımı değerleri sergilediği görülür. Bu benzerliğin, karışımda tek değişkenin fiber olmasından ve fiberlerin hemen hemen her karışımda aynı oranda kullanılmış olmasından kaynaklandığı daha önce de ifade edilmişti. Yinede polipropilen sentetik fiber içeren karışımların daha fazla etkilenecek, daha düşük basınç dayanımı değerleri verdiği gözlenmiştir. Şekil 5.54 incelendiğinde en düşük dayanım değerlerinin polipropilen sentetik fiber içeren 5, 6 ve 7 nolu FTKYB serilerinden elde edildiği görülmektedir. Bu numunelere 900°C sıcaklık uygulaması sonucu, dayanımlarında sırası ile %88, %86 ve %87 oranlarında düşüşler kaydedilmiştir. 300°C sonrasında tüm serilerin basınç dayanımında %13 ile %25.8 oranları aralığında düşüşler gözlenmiştir. Kontrol KYB serisi dahil, Şekil 5.54’de verilen FTKYB serilerinin ortalama basınç dayanımı kayıpları sırası ile 300°C’de %21.25, 600°C’de %36,22 ve 900°C’de %81.5’tir. Şekil 5.55’te sunulan %50uzun ve %50kısa karma fiber içeren FTKYB serilerinde ise ortalama basınç dayanımı kayıpları 300°C’de %17.3, 600°C’de %35.7 ve 900°C’de %78.9’dur. %25uzun ve %75kısa karma fiber kullanılan FTKYB serilerinin sunulduğu Şekil 5.56’da ise ortalama basınç kayıpları sırası ile 300°C’de %21.4 600°C’de %33.9 ve 900°C’de %82.8’dir. Karışımın da %25 oranlar ile 4 farklı fiberin kullanıldığı FTKYB serileri ve kontrol KYB serisinin ortalama basınç dayanımı kaybına gelince, bunlarda sırası ile 300°C sonrasında %25.9, 600°C sonrasında %40.1 ve 900°C sonrasında %80.6 olarak kaydedilmiştir.



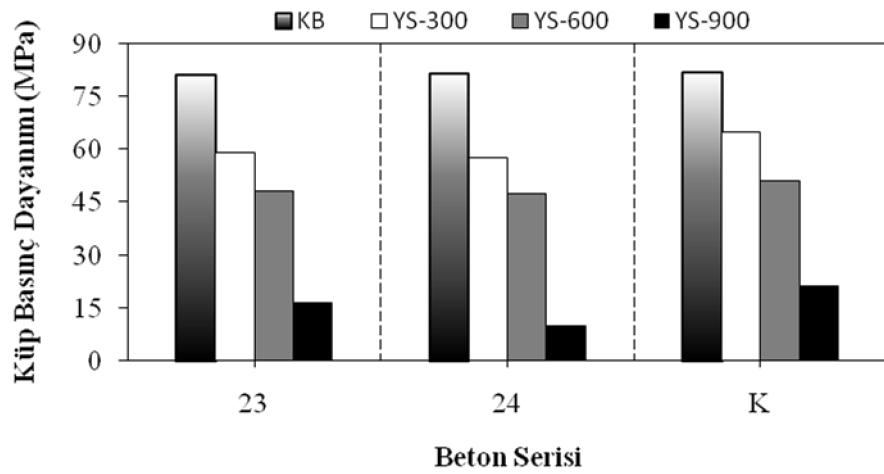
Şekil 5.54 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



Şekil 5.55 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



Şekil 5.56 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi

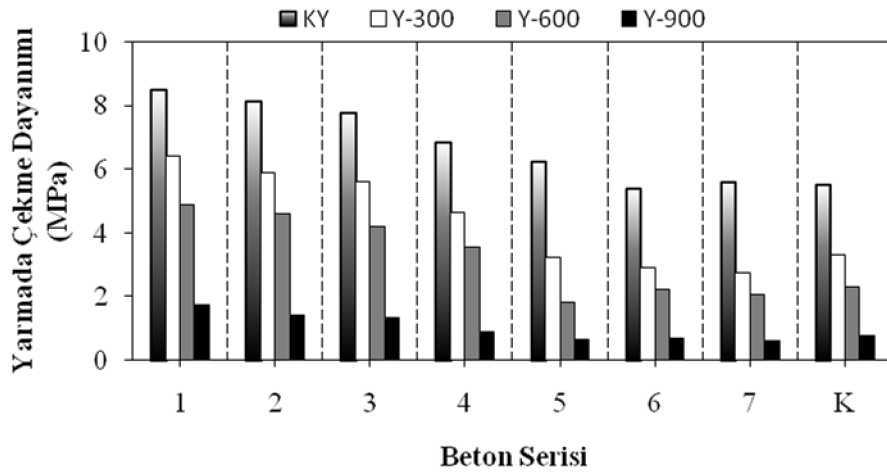


Şekil 5.57 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi

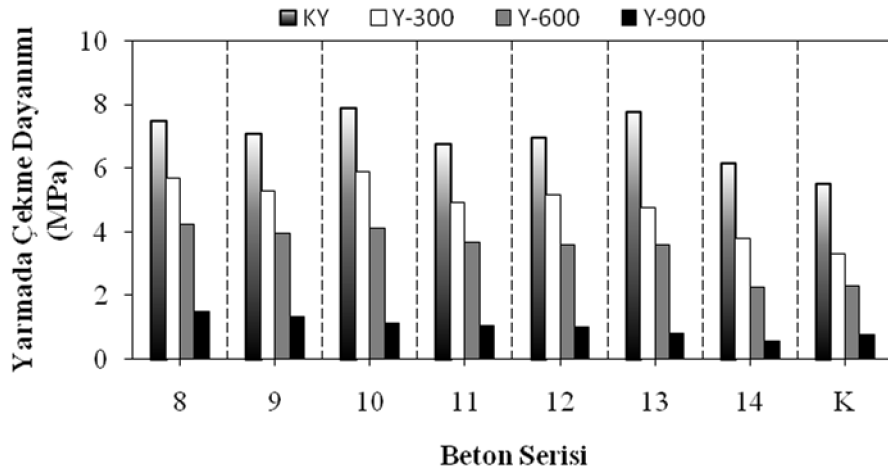
b) Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Yüksek sıcaklık deneyi sonrasında kontrol KYB ve FTKYB serilerinin yarmada çekme dayanımı deney sonuçları Şekil 5.58-61’de sunulmaktadır. Şekiller incelendiğinde, her bir beton serisinin yarmada çekme dayanımı, uygulanan sıcaklığın artırılması ile düşmüş olduğu görülür. Şekil 5.58 incelendiğinde karışımında tekil fiber içeren FTKYB serilerinden en düşük yarmada çekme dayanımı değerini, her sıcaklık seviyesinde kontrol KYB ve polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serilerinden elde edildiği görülmektedir. Ancak bu numunelerin sıcaklık deneyine girmeyen KY (kontrol yarma) serileri kıyaslandığında polipropilen sentetik fiber içeren 5, 6 ve 7 nolu FTKYB serilerinin KY değerleri kontrol KYB serisinin KY değerinden yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 5.58’de görüldüğü gibi her sıcaklık seviyesinde en yüksek dayanım değerleri çelik makro fiber içeren 1, 2 ve 3 nolu FTKYB serilerinden elde edilmiştir. Bu FTKYB serileri 300°C, 600°C, 900°C sıcaklıklar sonrasında yarmada çekme dayanımlarında kendi KY serilerine göre sırası ile 1 nolu seride %24.7, %42.5, %79.6; 2 nolu seride %27.4, %43.4, %82.5; 3 nolu seride ise %27.7, %45.8, %82.5 oranlarında kayıplar oluşmuştur. Ç4 kodlu çelik mikro fiber içeren 4 nolu FTKYB serisinde ise bu değerler sırası ile %32.4, %48.3 ve %87.2’dir. Bu sonuçlar, FTKYB serilerinde kullanılan fiber uzunluğu ve boy/çap oranının düşmesi ile yüksek sıcaklık sonrasında yarmada çekme dayanımlarında düşüş oranında ters orantılı olarak artışa neden olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda FTKYB serilerinde polipropilen sentetik fiber kullanımı yüksek sıcaklık deneyinde zayıflığa neden olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.59 incelendiğinde yüksek sıcaklık sonrasında yine yapısında P1 polipropilen sentetik fiber içeren 14 nolu FTKYB serisi ile kontrol KYB serisi en düşük yarmada çekme dayanımı değerlerini vermiştir. Ancak 14 nolu FTKYB serisi karışımında %50 oranında P1 ve %50 oranında Ç4 içermesi dolayısı ile karışımında %100 P1 içeren 5 nolu FTKYB serisinden yüksek değerler vermiştir. 300°C sonrasında yapısında Ç4 mikro çelik fiber içeren FTKYB serilerinde kendi KY serilerine nispeten daha az dayanım düşüşü gözlenirken, bu fiberlerin kullanıldığı serilerde daha yüksek sıcaklıklarda daha yüksek dayanım düşüşleri gözlenmiştir. Bu sonuca dayanarak mikro çelik fiberin performans azalma oranının, sıcaklık artışı ile makro fiberlerden daha yüksek olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Nitekim makro çelik fiberlerin kullanıldığı %50 karma FTKYB serilerinde, 900°C sonrasında da en yüksek yarmada çekme dayanımı değerleri verdiği Şekil 5.59’da görülmektedir. Şekil 5.60’ta da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Karışımında makro fiberlerin kullanıldığı karma FTKYB serilerinin yarmada çekme dayanımları mikro fiber ve polipropilen sentetik fiber kullanılan seriler ile kontrol KYB serisinden daha yüksek çıkmıştır. Şekil 5.59 ve Şekil 5.60 karşılaştırıldığında, FTKYB serilerinin toplam fiber hacminde uzun ve boy/çap oranı yüksek fiber oranının azaltılması,

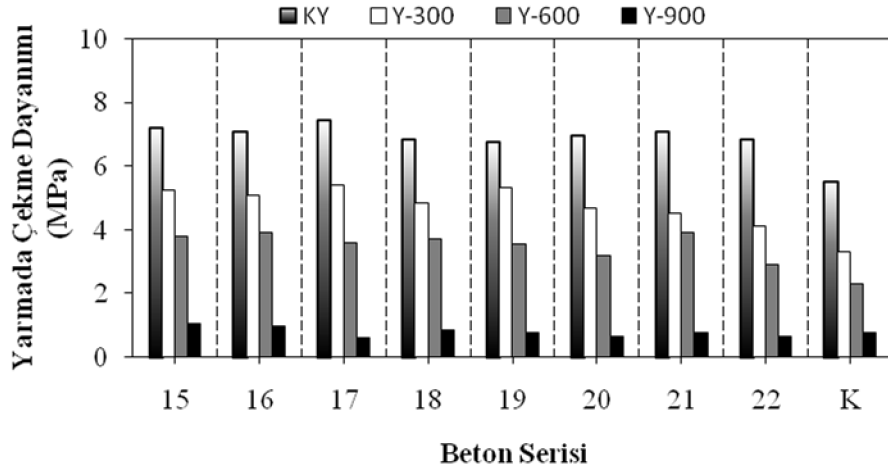
yarmada çekme dayanımında düşmeye neden olmuştur. Karışımında %25 oranlar ile 4 farklı fiberin kullanıldığı seriler ile kontrol KYB serisinin sunulduğu Şekil 5.61’de ise yarmada çekme dayanımı değeri en küçük olan seri, yine kontrol KYB serisinden elde edilmiştir. Karışımında %25’er oranlar ile tamamıyla çelik fiberler bulunan 23 nolu karma FTKYB serisi kendi KY serisine göre sırası ile %25.2, %42.3 ve %80.9 oranlarında yarmada çekme dayanımı kaybı sergilerken, karışımında %50 çelik fiberler (%25Ç3+%25Ç4) ve %50 polipropilen sentetik fiberler (%25P1+%25P2) içeren 24 nolu FTKYB serisinde dayanım kayıpları sırası ile %40.5, %56.8 ve %94 olarak elde edilmiştir. Şekil 5.59 ve Şekil 5.60’ta sunulan FTKYB serilerinde toplam fiber hacminde uzun ve boy/çap oranı yüksek fiberlerin yoğunluğu düşürülürken, Şekil 5.61’de sunulan 23 nolu seride fiber uzunluk ve boy/çap oranı arttırılmıştır. %75 oranında 3 farklı makro çelik fiber (%25Ç1+%25Ç2+%25Ç3) ile %25 oranında Ç4 mikro çelik fiberin birlikte kullanıldığı 23 nolu karma FTKYB serisinden elde edilen bu sonuç, fiber boyut yoğunluğunun arttırılması ile yüksek sıcaklık sonucu yarmada çekme dayanımında artışa neden olduğunu ortaya koymaktadır.



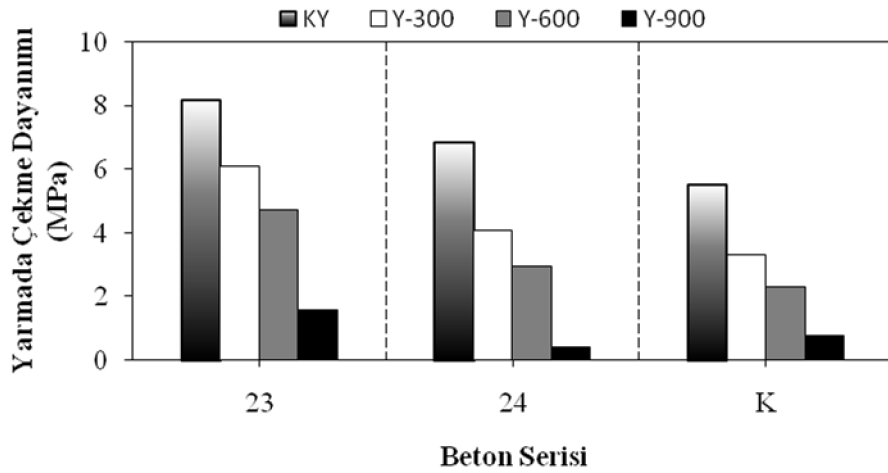
Şekil 5.58 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



Şekil 5.59 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



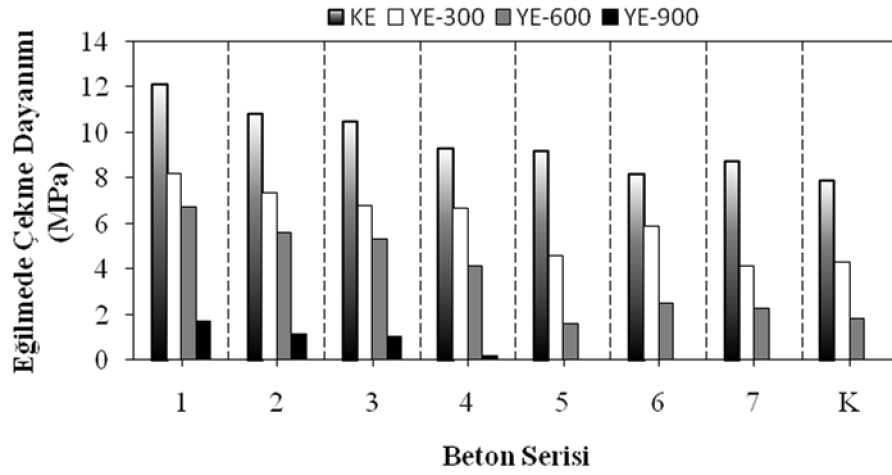
Şekil 5.60 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



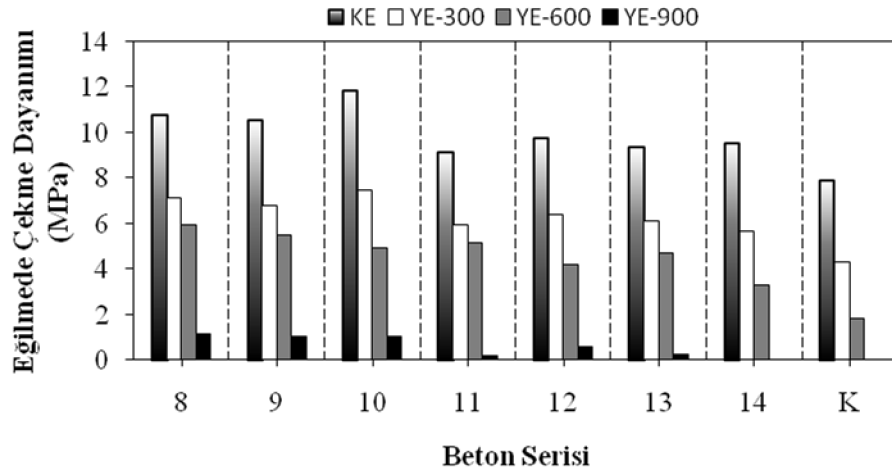
Şekil 5.61 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi

c) Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

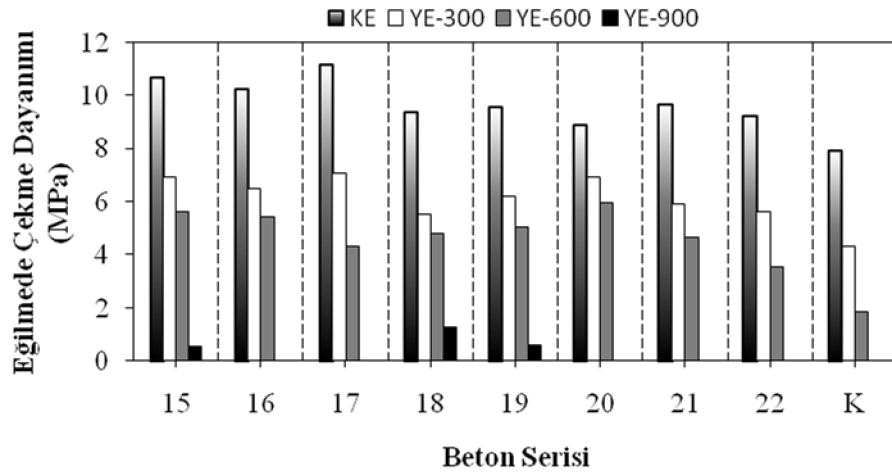
Yüksek sıcaklık deneyi sonrası numunelere uygulanan eğilmede çekme dayanımı deneyinde, yarmada çekme dayanımını destekleyici sonuçlar alınmıştır. Eğilmede çekme dayanımı sonucunda alınan değerler Şekil 5.62-65'te sütun grafiklerde verilmiştir. Şekil 5.62-65'te sunulan eğilmede çekme dayanımı değerleri birlikte incelendiğinde, bu deney neticesinde de uygulanan sıcaklığın artırılması ile eğilmede çekme dayanımında düşme meydana geldiği görülmektedir. Genel itibari ile toplam fiber hacminde boy/çap oranı yüksek fiberlerin yoğunluğu fazla olan FTKYB serilerinin eğilmede çekme dayanımının yüksek sıcaklık deneyinden daha az etkilendiği görülmektedir. Eğilmede çekme dayanımında da yüksek sıcaklıktan en çok etkilenen serilerin, P1 ve P2 polipropilen sentetik fiber içerikli FTKYB serileri ile kontrol KYB serisi olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.62, Şekil 5.63 ve Şekil 5.64 karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, toplam fiber hacminde uzun ve boy/çap oranı yüksek fiberlerin düşürülmesi ile FTKYB serilerinin yüksek sıcaklık deneyinden etkilenme oranının artış gösterdiği görülmüştür. Karışımında tekil fiberlerin kullanıldığı FTKYB serilerinin sunulduğu Şekil 5.62 incelendiğinde 300°C, 600°C ve 900°C yüksek sıcaklık seviyelerinde eğilmede çekme dayanımından en az etkilenen seri %32.2, %44.6 ve %85.9 oranları ile 1 nolu FTKYB serilerinde gözlenmiştir. En yüksek oranda etkilenenler ise %43.7, %75.6 ve %100 ortalama oranları ile P1 ve P2 kodlu fiber içeren FTKYB serilerinden elde edilmiştir. Aynı zamanda tüm FTKYB serileri arasında bu seriler yüksek sıcaklık deneyi sonucunda en yüksek etkilenen seriler olmuştur. Şekil 5.63 ve Şekil 5.64'te verilen boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğu düşürülmüş FTKYB serilerinde ise, yarmada çekme dayanımında olduğu gibi fiber boy/çap oranının toplam fiber hacminde düşmesi ile eğilmede çekme dayanımı değerlerinin yüksek sıcaklıktan etkilenme oranı artış göstermiştir. Bu etkilenme oranı artışı, Şekil 5.65'te sunulan ve fiber hacminde boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğunun arttırıldığı 23 nolu seride 300°C, 600°C ve 900°C'lerde %33, %44.5 ve %88.1 oranlarına gerilemiştir. Buda FTKYB serilerinde karma fiber kullanımının ve boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğunun fazla tutulmasının önemini açığa çıkarmaktadır.



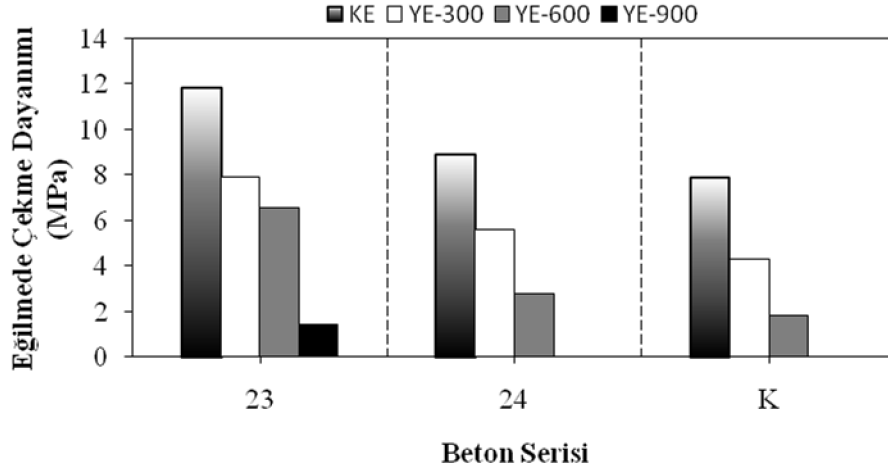
Şekil 5.62 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



Şekil 5.63 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



Şekil 5.64 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi

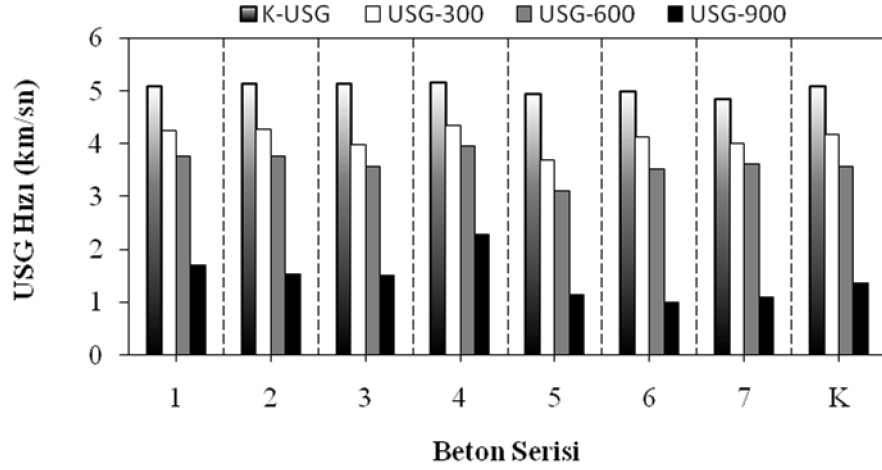


Şekil 5.65 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi

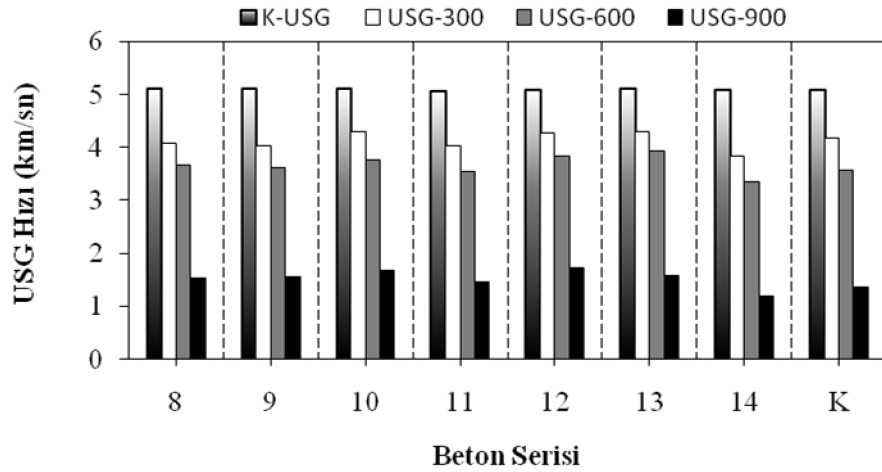
d) USG Hızı Tayini

Yüksek sıcaklık deneyi sonrasında numunelere uygulanan USG hızı tayini neticesinde elde edilen veriler Şekil 5.66-69’da sunulmuştur. Şekil 5.66-69 genel olarak incelendiğinde, ilk olarak göze çarpan nokta 900°C yüksek sıcaklığa tabi tutulan ve karışımından mikro çelik fiber içeren FTKYB serilerinin USG hızı değerlerinin daha yüksek olduğudur. Çok belirgin olmasa da 300°C ve 600°C sonrasında elde edilen USG hızı değerlerinde de benzer sonuçlar alınmıştır. Bununla birlikte göze çarpan bir diğer önemli nokta ise 300°C ve 600°C sonrasında elde edilen USG hızı değerleri bir biri ile nispeten yakın değerler gösterirken, 900°C sonrasında elde edilen değerler ile bu değerler arasındaki fark daha yüksektir. Şekil 5.66 incelendiğinde karışımında tekil makro çelik fiber bulunan FTKYB serilerinin USG hızı değerlerinin bir biri ile yakınlık göstermekte olduğu görülür. Şekil 5.66’da sunulan tekil fiber içeren beton serilerinden, yüksek sıcaklık deneyi sonucu USG hızı değerinde en yüksek düşüş oranı 900°C sonrasında ortalama olarak %78’lik düşüş ile P1 ve P2 polipropilen sentetik fiber içeren 5, 6 ve 7 nolu serilerden elde edilmiştir. En düşük USG hızı kaybı oranları ise her seviyede (K-USG, USG-300, USG-600 ve USG-900) Ç4 mikro çelik fiber içeren 4 nolu FTKYB serisinden elde edilmiştir. 4 nolu seri kendi K-USG kontrol serisine göre, 300°C sıcaklık sonrası USG hızı değerini belirten USG-300’de %15.5, USG-600’de %23.1 ve USG-900’de %55.8 oranlarında USG hızı kaybına uğramıştır. Şekil 5.67 incelendiğinde hemen hemen tüm FTKYB serilerinin birbiri ile benzer USG hızı değerleri sergilediği görülmektedir. Aynı durum Şekil 5.68 ve Şekil 5.69 içinde geçerlidir. Daha önce ifade edildiği gibi karma fiberli olarak üretilen bu FTKYB serilerindeki USG hızı değeri farklılığı en çok Ç4 mikro çelik fiber ve P1, P2 polipropilen sentetik fiberlerin

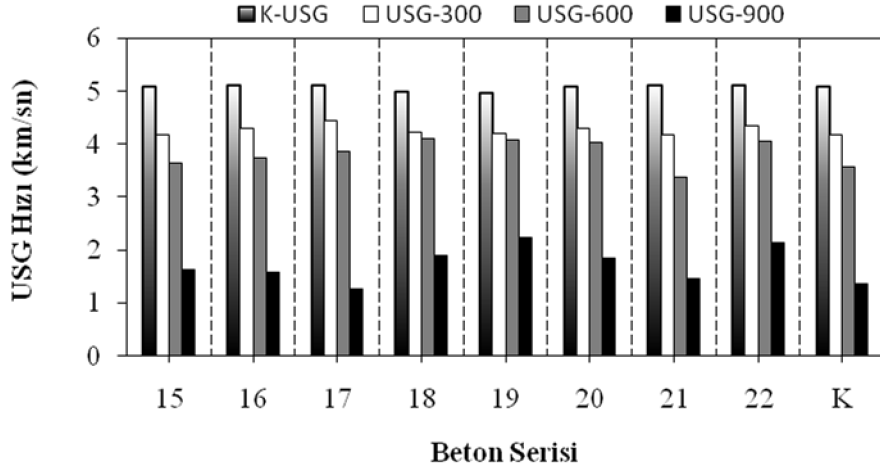
kullanıldığı serilerde gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık deneyi sonucunda da karışımda mikro yapıda çelik fiber kullanmak USG hızını arttırmış, polipropilen sentetik fiber kullanmak ise düşürmüştür. Bu etki en belirgin olarak, 900°C sonrası elde edilen değerleri belirten USG-900 serisinde göze çarpmaktadır.



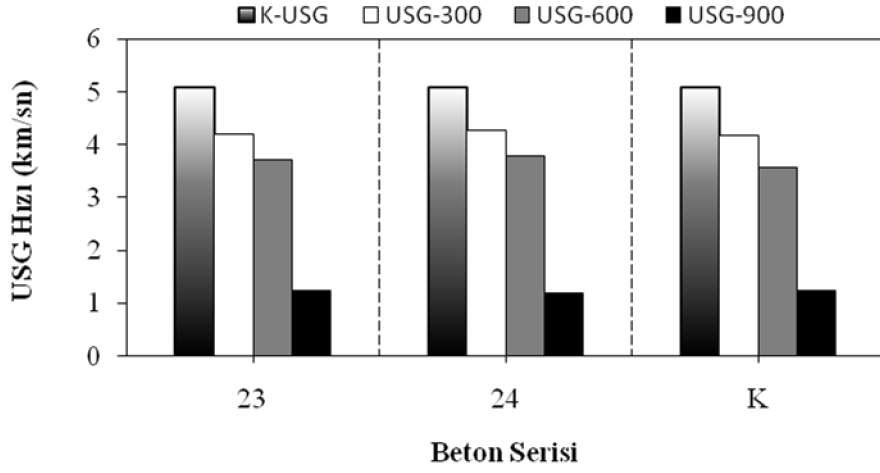
Şekil 5.66 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi



Şekil 5.67 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi



Şekil 5.68 Yüksek sıcaklık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi



Şekil 5.69Yüksek sıcaklık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi

5.3.2 Donma-Çözünme Deneyi Bulgularının İncelenmesi

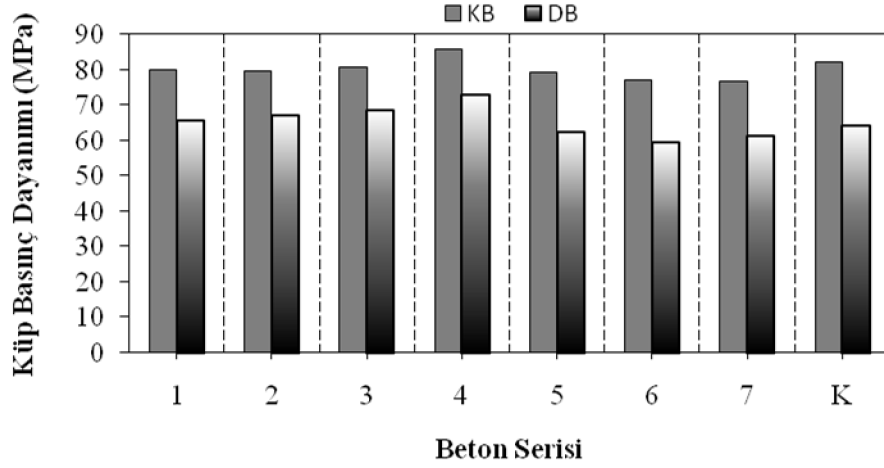
FTKYB serilerine 150 donma-çözünme çevrimi sonunda basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve USG hızı tayini deneyleri uygulanarak üretilen FTKYB serilerinin performansları değerlendirilmiştir. Genel gözlem olarak donma-çözünme deneyi sonrasında üretilen kontrol KYB serisi dahil olmak üzere, hiçbir FTKYB serisinde parça kaybı yada belirgin yüzey çatlağına rastlanmamıştır. Yinede uygulanan deneyler sonucu farklı oranlarda kayıpların olduğunun belirlenmesi, içyapı bozulmalarını ortaya koymaktadır. Corinaldesi ve Moriconi [79] yapmış oldukları çalışmada 200 çevrim sonucunda üretilen fiber takviyeli betonların rölatif dinamik elastisite modülünden yüksek oranda düşüş meydana geldiğini belirtmişlerdir. Donma-çözünme sonrasında uygulanan mekanik deneylerden ve bu mekanik deneyleri desteklemek için uygulanan USG hızı tayini deneyinden elde edilen veriler

şekillerle ayrıntılı olarak verilmiş ve oluşan dayanım kayıpları hesaplanarak ayrıca sunulmuştur. Şekillerin kolay kavranabilmesi için tüm şekillerde aynı sunum yöntemi uygulanmıştır. Dayanım değerlerini belirten tüm şekillerde sunulan sütun grafiklerde her bir beton serisi donma-çözünme çevrimine girmeyen kendi serisi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aynı zamanda tüm grafiklerde kontrol KYB serisi de sunulduğundan, grafikler incelendiğinde her bir FTKYB serisi kendi kontrol serisi ile kıyaslanabileceği gibi kontrol KYB ile de karşılaştırılması sağlanmıştır. Belli gruplar oluşturularak dayanım değerleri sunulan kontrol KYB ve FTKYB serilerinde oluşan dayanım kayıpları da her bir grubun sunulduğu grafikten sonra verilmiştir. Şekillerdeki beton serilerinin isimlendirilmesinde, USG hızı tayini deneyi haricindeki tüm şekillerde ikili harf kodlamasından oluşmaktadır. Bunlardan ilk harf çiftinin birinci harfi her bir beton serinin donma-çözünme deneyine girmeyen kontrol serisini belirten K ve ikincisi uygulanan deneyi belirtmektedir (KB: Kontrol Basınç, KY: Kontrol Yarma vb). Diğer harf çifti ise donma-çözünme çevrimine giren seriyi belirten D harfi ve yine uygulanan deneyi belirten harften oluşmaktadır (DE: Donma Eğilme vb).

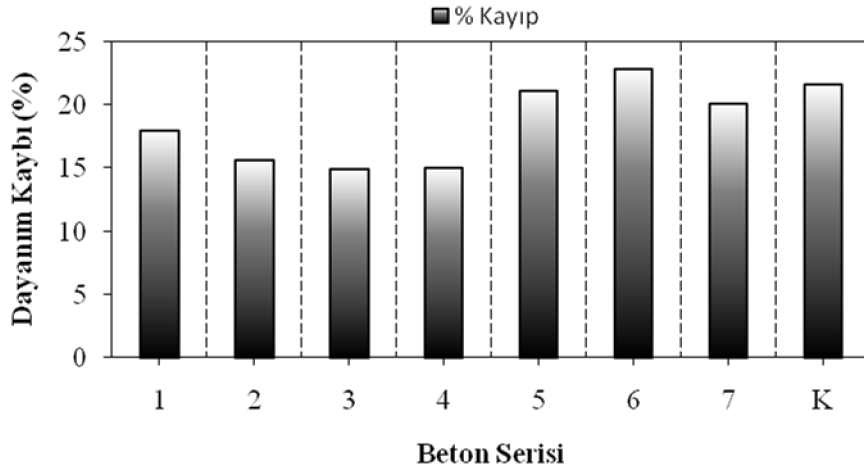
a) Basınç Dayanımı Deneyi

Donma-çözünme deneyi sonrası uygulanan basınç dayanımı deney sonuçları ve FTKYB serilerinde oluşan % olarak dayanım kayıpları Şekil 5.70-77'de hem kendi kontrol serileri ile hem de kontrol KYB serisi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Donma-çözünme deneyi sonrası en düşük basınç dayanımı değerleri P1 ve P2 polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serilerinden elde edilmiştir. Şekil 5.70'de görüldüğü gibi Ç4 mikro çelik fiber içeren 4 nolu FTKYB serisi en yüksek basınç dayanımı değerini sergilerken, en düşük basınç dayanımı değerlerini ise P1 ve P2 kodlu fiberleri içeren 5, 6 ve 7 nolu FTKYB serilerinden elde edildiği görülmektedir. Yine aynı şekilde fiber uzunluk ve boy/çap oranının düşmesi ile basınç dayanımında artış görülmektedir. Tekil fiber içeren FTKYB serilerinde % olarak basınç dayanımı kayıplarının sunulduğu Şekil 5.71 incelendiğinde kontrol KYB ve P1, P2 kodlu fiber içeren 5, 6 ve 7 nolu FTKYB serilerinde en yüksek dayanım kayıpları oluşmuştur. Yine tekil çelik fiberlerin kullanıldığı 1, 2, 3 ve 4 nolu FTKYB serilerinde oluşan dayanım kayıpları incelendiğinde, fiber boyutunun küçülmesi ile dayanım kaybı oranlarında da düşme gözlenmiştir. Bu grupta sunulan FTKYB serilerinde en düşük dayanım kaybı oranı %15 ile Ç4 kodlu fiberde gözlenirken, en yüksek dayanım kaybı oranı %23 ile P2 kodlu fiber içeren 6 nolu FTKYB serisinden elde edilmiştir. %50 oranlar ile uzun ve kısa fiberlerin birlikte kullanıldığı karma FTKYB serilerinin bir arada gösterildiği Şekil 5.72 incelendiğinde, basınç dayanımı değerlerinde düşük oranda düşüş gözlenirken, Şekil 5.73'de %50 karma serilerde oluşan

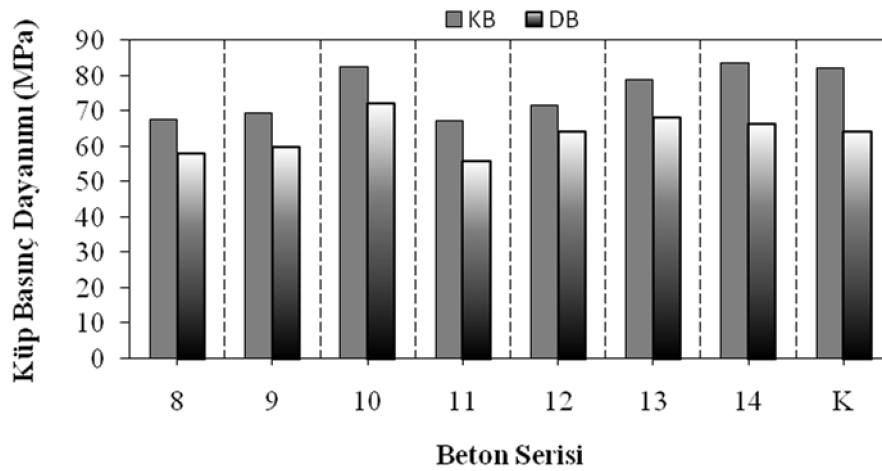
dayanım kayıplarında daha yüksek oranda düşüş gözlenmiştir. %50 uzun ve kısa karma fiberler ile oluşturulan FTKYB serilerindeki bu basınç dayanımı düşüşü toplam fiber hacminde uzun ve boy/çap oranı yüksek fiberlerin kullanıldığı FTKYB serilerinde gözlenmiştir. Diğer bir ifade ile toplam fiber hacminde boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğu düşürüldükçe donma-çözünme deneyi sonrası uygulanan basınç dayanımında da artış gözlenmiştir. Ayrıca toplam fiber hacminde boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğunun düşürülmesi Şekil 5.73'te görüldüğü gibi FTKYB serilerinin basınç dayanımında meydana gelen dayanım kaybı oranında da düşmeye sebep olmuştur. Şekil 5.73'te mikro çelik fiber kullanılarak boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğu fazla miktarda düşürülen 10, 12 ve 13 nolu karma FTKYB serilerindeki dayanım kaybı bu düzenleme ile sırası ile %12.7, % 10.7 ve %13.6 olarak kaydedilmiştir. Şekil 5.71 ve Şekil 5.73 karşılaştırmalı olarak incelendiğinde toplam fiber hacminde %50 uzun ve %50 oranında da kullanılan uzun fiberden daha kısa fiber kullanılması basınç dayanımı kayıplarında düşüşe sebep olmuştur. %25 uzun ve %75 kısa fiberlerin bir arada kullanılması ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin donma-çözünme deneyi sonrasındaki basınç dayanımı değerlerinin ve basınç dayanımında meydana gelen dayanım kayıpları Şekil 5.74 ve Şekil 5.75 verilmektedir. Bu gruptaki karma FTKYB serilerinde de toplam fiber hacminde boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğunun düşürülmesi ile daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Fakat boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğunun %75 gibi yüksek bir oranda düşürülmesi ise bu karışımların donma-çözünme deneyi sonrasındaki basınç dayanımındaki kayıp oranında artışa sebep olmuştur. %50 oranlar ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin oluşturduğu grupta ortalama basınç dayanımı kaybı %14.5 iken, %25 uzun ve %75 kısa fiber kullanılarak oluşturulan karma FTKYB serilerinin oluşturduğu grupta ise ortalama %18.6 oranında dayanım kaybı olduğu gözlenmiştir. Dayanım kaybındaki bu artışa toplam fiber hacminde kısa ve boy/çap oranı düşük fiberlerin yüksek oranda kullanılması olduğuna bağlanmıştır. Bu sebebi kuvvetlendiren önemli bir bulgu Şekil 5.76 ve Şekil 5.77'de sunulan 23 nolu seriden elde edilen sonuçlardır. Şekil 5.74'te sunulan karma serilerde toplam fiber hacminde boy/çap oranı yüksek fiberler %75 oranında düşürülmüşken, 23 nolu seride %25'er oranlar ile 3 farklı makro çelik fiber (Ç1, Ç2, Ç3) ile %25 oranında Ç4 mikro çelik fiber bir arada kullanılarak %75 arttırılmıştır. Bu şekilde oluşturulan 23 nolu serinin basınç dayanımı kaybı ise %13 olarak kaydedilmiştir. Tüm bu sonuçlar FTKYB serilerinde tekil fiber kullanımı yerine karma fiber kullanımının daha avantajlı olduğunu gösterirken, karma fiber kullanımında da optimum boyut yoğunluğunun önemli olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda Şekil 5.76 ve Şekil 5.77'de görüldüğü gibi toplam fiber hacminde plastik fiber yoğunluğunun arttırılması da donma-çözünme deneyi sonrası basınç dayanım kaybı artışına sebep olmaktadır.



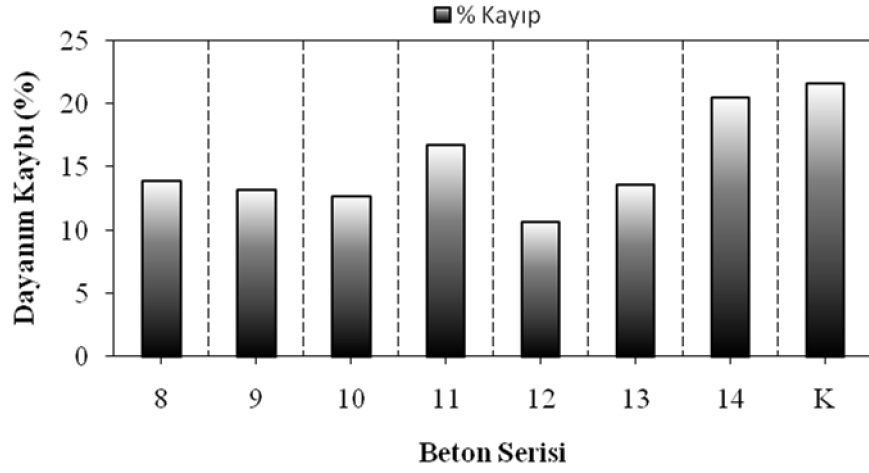
Şekil 5.70 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



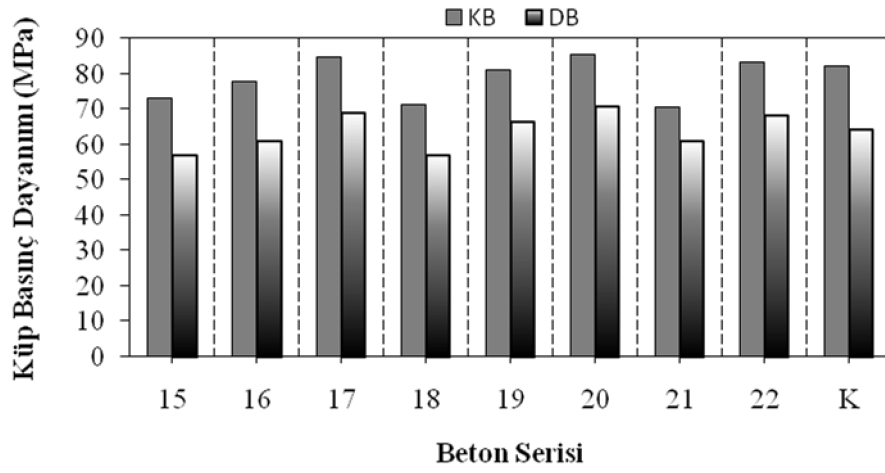
Şekil 5.71 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı



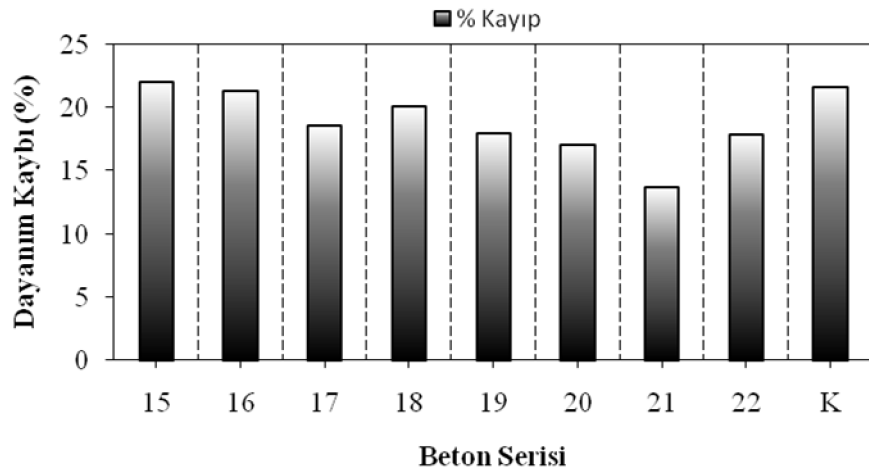
Şekil 5.72 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



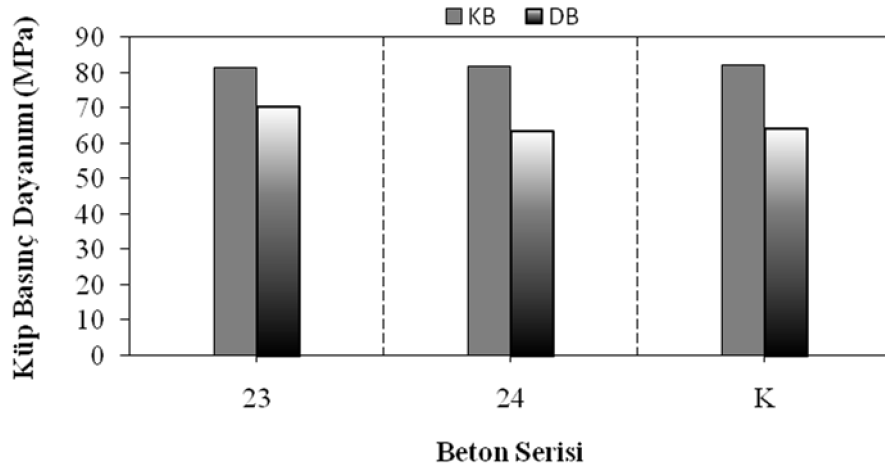
Şekil 5.73 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı



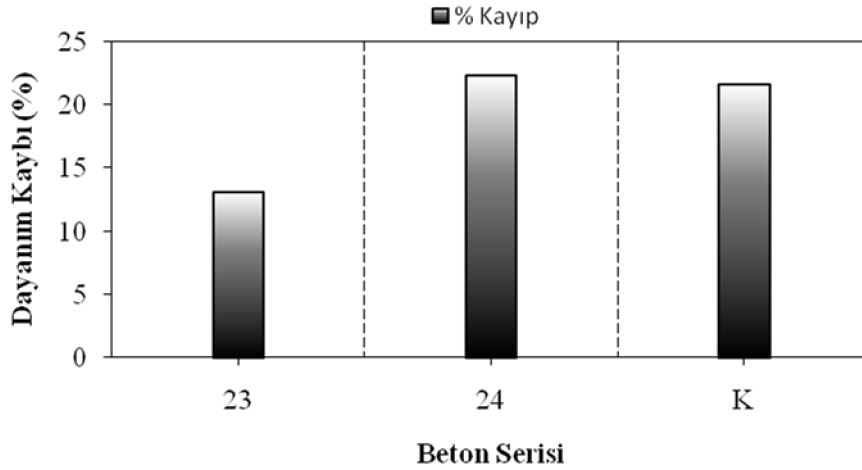
Şekil 5.74 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



Şekil 5.75 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı



Şekil 5.76 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



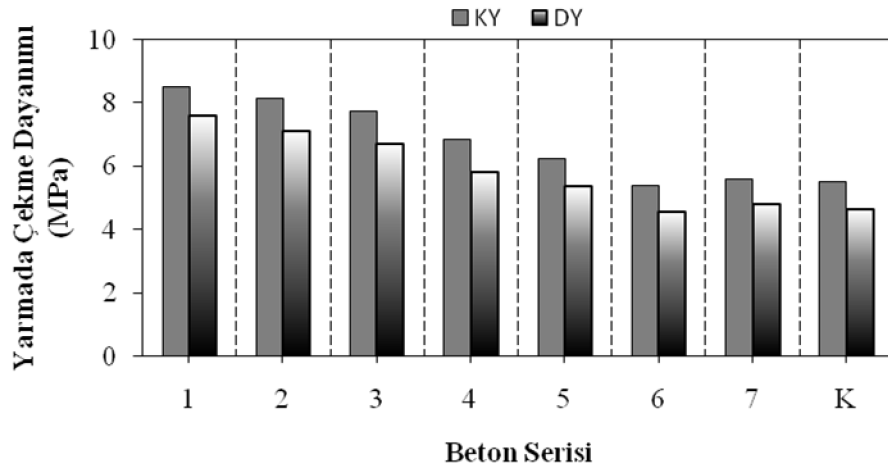
Şekil 5.77 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı

b) Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

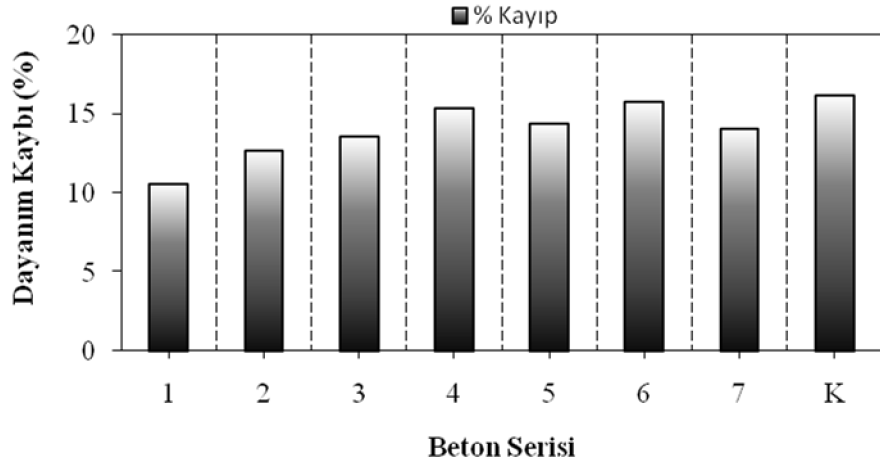
Donma-çözünme deneyi sonrasında uygulanan yarmada çekme deneyinden elde edilen veriler Şekil 5.78 -85'te sunulmuştur. Toplam fiber hacminde tekil fiberlerin kullanıldığı Şekil 5.78'de fiber uzunluk ve boy/çap oranının düşmesi ile FTKYB serilerinin yarmada çekme dayanımında düşüş gözlenmiştir. Aynı zamanda FTKYB üretiminde polipropilen sentetik fiber kullanımı FTKYB'un yarmada çekme dayanımına katkıda bulunmasına rağmen, kontrol KYB serisinden sonra yarmada çekme dayanımı düşük çıkan seriler yine polipropilen sentetik fiber katkılı FTKYB serileri olmuştur. Her bir beton serisinin kendi kontrol serisi ile kıyaslanarak yarmada çekme dayanımındaki % olarak kayıpların sunulduğu Şekil 5.79 incelendiğinde, kullanılan fiber uzunluk ve boy/çap oranının düşmesi ile yarmada çekme dayanımındaki

dayanım kayıplarının arttığı görülmektedir. Karışımında çelik fiberlerin kullanıldığı ilk 4 FTKYB serisinde donma-çözünme sonrası yarmada çekme dayanımında sırası ile %10.6, %12.7, %13.5 ve %15.3 oranlarında dayanım kaybı oluşmuştur. En yüksek dayanım kayıpları ise başta fibersiz olarak tasarlanan kontrol KYB serisi ile birlikte P1 ve P2 kodlu polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serilerinde gözlenmiştir. Kontrol KYB serisindeki dayanım kaybı %16.2 iken 5, 6 ve 7 nolu FTKYB serilerinde sırası ile %14, %16 ve %14 olarak kaydedilmiştir. Donma-çözünme deneyine giren seriler kontrol KYB serisi ile kıyaslandığında ise 6 nolu seri haricindeki diğer tüm FTKYB serilerinin yarmada çekme dayanımları yüksek çıkmıştır. Donma-çözünme deneyine giren kontrol KYB serisi ile çelik fiber içeren 1, 2, 3 ve 4 nolu FTKYB serileri kıyaslandığında kontrol KYB serisine göre yarmada çekme dayanımları sırası ile %64.2, %53.4, %44.7 ve %25.3 oranlarında yüksek çıkmıştır. Karışımında düşük oranda P2 kodlu polipropilen sentetik mikro fiber kullanılan 6 nolu seri kontrol KYB serisine göre %1.7 düşük değer verirken, P1 polipropilen sentetik makro fiber kullanılan 5 nolu seri ve yüksek oranda P2 mikro fiber kullanılan 7 nolu seri sırası ile %15.6 ve %3.8 oranlarında yüksek çıkmıştır. Şekil 5.80-81'de %50 oranlarda uzun ve kısa fiberlerin birlikte kullanıldığı karma FTKYB serilerinin donma-çözünme deneyi sonrası yarmada çekme dayanımı ve % olarak dayanım kayıpları incelendiğinde, her bir karma FTKYB serisinin donma-çözünme çevrimi sonrasında yarmada çekme dayanımı kontrol KYB serisinden daha yüksek çıkmıştır. Toplam fiber hacminde iri fiberlerin yoğunluğunun düşürülmesi ile yarmada çekme dayanımında bir miktar düşüş gözlenirse de, serilerin yarmada çekme dayanımı kaybı küçülmüştür. %50 oranlar ile Ç1+Ç2, Ç1+Ç3 ve Ç1+Ç4 kodlu fiberlerin karma olarak kullanıldığı 8, 9 ve 10 nolu FTKYB serileri donma-çözünme deneyi sonrasında kendi kontrol serileri ile kıyaslandığında yarmada çekme dayanımlarında sırası ile % 13.3, %11.9 ve %10.1 oranlarında dayanım kayıpları oluşmuştur. Bu betonların yalnızca donma-çözünme çevrimine giren serileri yine donma-çözünme çevrimine giren kontrol KYB seri ile kıyaslanıldığında ise yarmada çekme dayanımları kontrol KYB serisine göre %40.4, %35 ve %53.4 oranlarda yüksek çıkmıştır. Donma-çözünme çevrimine giren 11, 12 ve 13 nolu seriler çevrime girmeyen kendi serileri ile kıyaslandığında, çevrime girmeyen kendi serilerine göre %12.5, %10.7 ve %11.6 oranlarda dayanım kaybı gözlenirken, çevrime giren kontrol KYB ile kıyaslandığında kontrol KYB serisine göre %27.4, %34 ve %48 oranlarda daha yüksek değerler vermiştir. Toplam fiber hacminde %50 P1 kodlu polipropilen sentetik makro fiber ve %50 Ç4 kodlu çelik mikro fiberin birlikte kullanıldığı 14 nolu karma FTKYB serisinde ise kendi serisine göre dayanım kaybı %10.6 iken, kontrol KYB serisine göre %18.8 oranında yarmada çekme dayanımı yüksek çıkmıştır. Toplam fiber hacminde %25 uzun ve %75 kısa fiber kullanılan FTKYB serilerinin sunulduğu Şekil 5.82 ve Şekil 5.83 incelendiğinde, donma-çözünme çevrimi sonrasında da

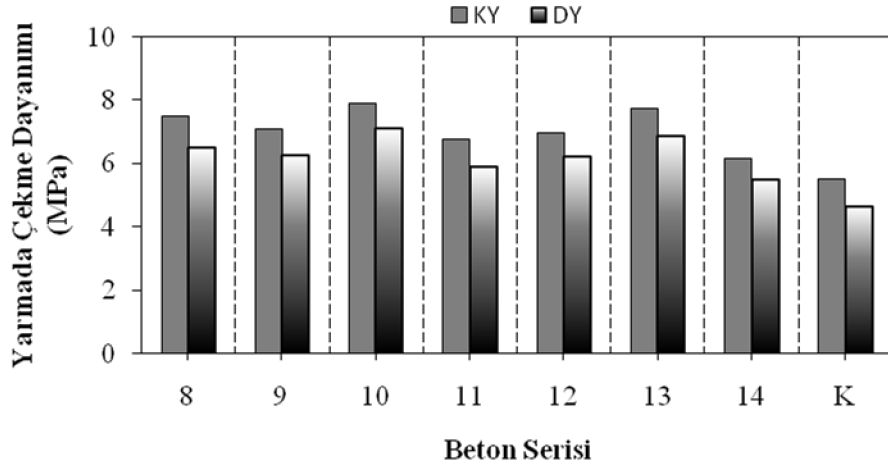
makro ve mikro fiberlerin birlikte kullanıldığı karışımlarda yarmada çekme dayanımı daha yüksek çıkmıştır. Ancak Şekil 5.82'deki dayanım değerleri, %50 oranlar ile uzun ve kısa fiberler ile oluşturulan FTKYB serilerinin dayanım değerlerinin verildiği Şekil 5.80 ile karşılaştırıldığında, %25 uzun + %75 kısa fiberler ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin dayanım değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuç toplam fiber hacminde iri fiber yoğunluğunun belirli bir orandan sonra negatif bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Diğer taraftan %25 P1 kodlu polipropilen sentetik makro fiber ile sırası ile Ç3 ve Ç4 kodlu çelik fiberlerin karma olarak kullanıldığı 21 ve 22 nolu FTKYB serilerinde ise karışımda çelik fiber artışı normal şartlar altında olduğu gibi donma-çözünme deneyi sonrası uygulanan yarmada çekme dayanımında da artışa sebep olmuştur. Yinede en yüksek yarmada çekme dayanımı kaybı 22 nolu seride gözlenmiştir. %25'er oranlar ile 4 farklı fiberin birlikte kullanılması ile oluşturulan FTKYB serilerinin verildiği Şekil 5.84 ve Şekil 5.85 incelendiğinde, tüm seriler içerisinde dayanım kaybı en düşük serilerin 23 ve 24 nolu FTKYB serileri olduğu görülür. Bu serilerin donma-çözünme çevrimi sonrasındaki yarmada çekme dayanımlarında kayıplar sırası ile %9.8 ve %9.9'dur. Bu betonların donma-çözünme çevrimine giren serileri yine donma-çözünme çevrimine girmiş kontrol KYB serisi ile kıyaslandığında, yarmada çekme dayanımları kontrol KYB serisinden sırası ile %59 %33 oranlarında yüksek çıkmıştır.



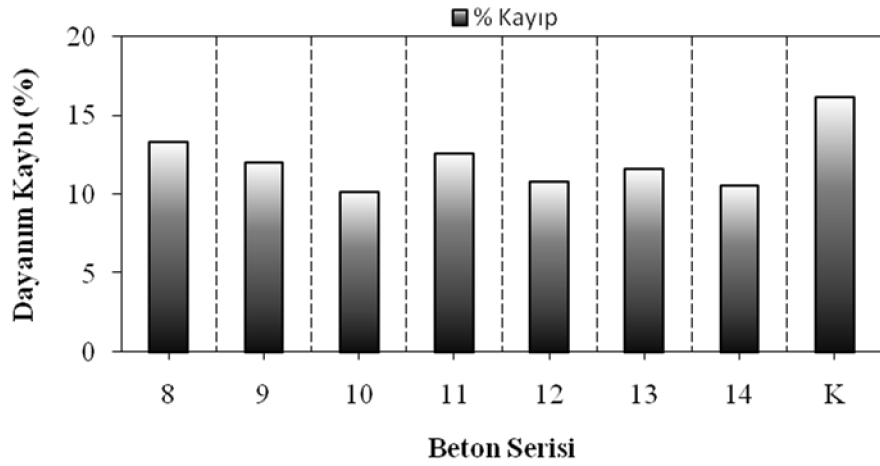
Şekil 5.78 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



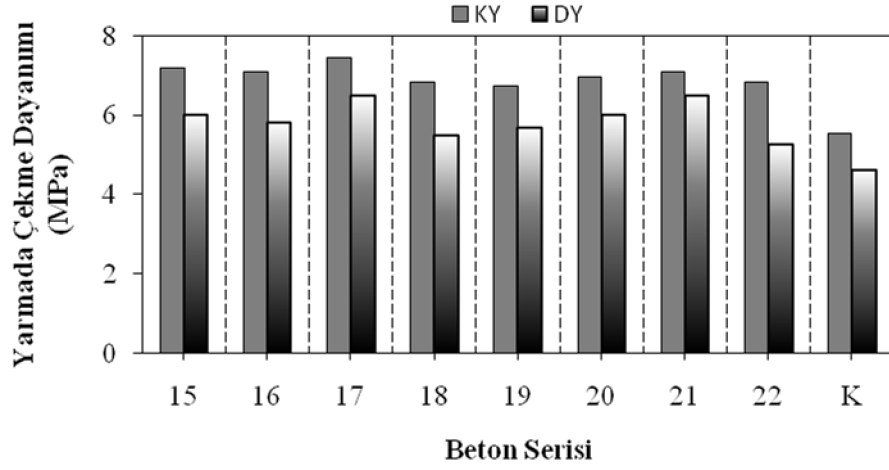
Şekil 5.79 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı



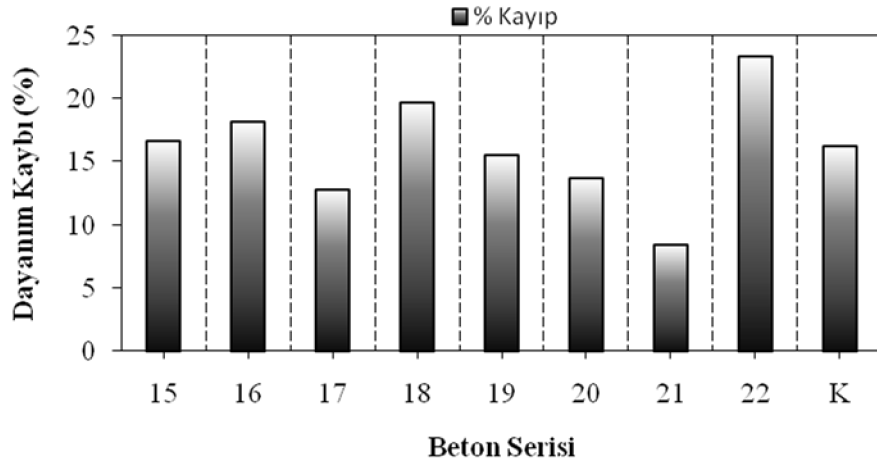
Şekil 5.80 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



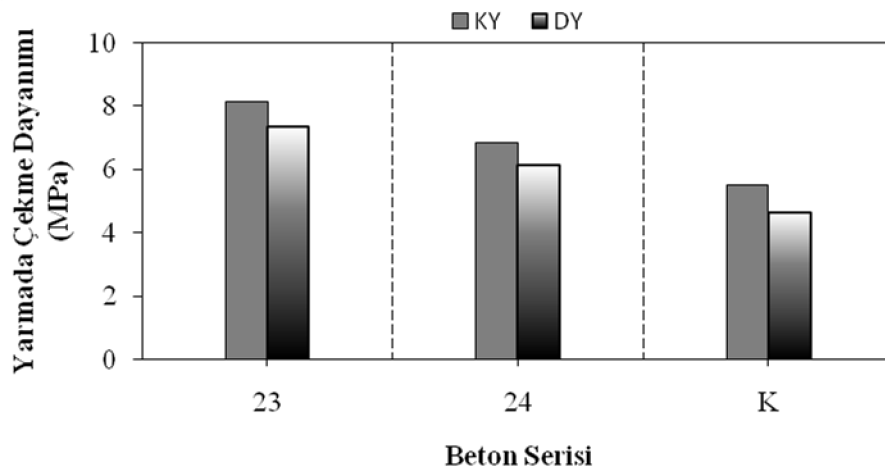
Şekil 5.81 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı



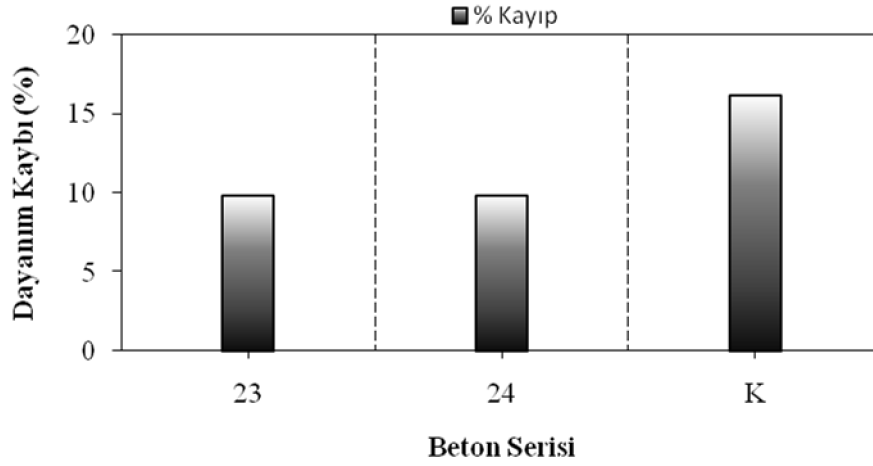
Şekil 5.82 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



Şekil 5.83 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı



Şekil 5.84 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi

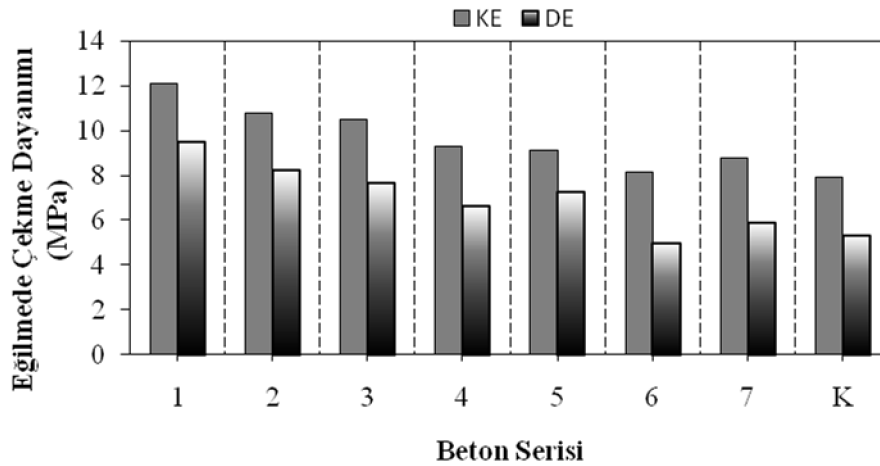


Şekil 5.85 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı

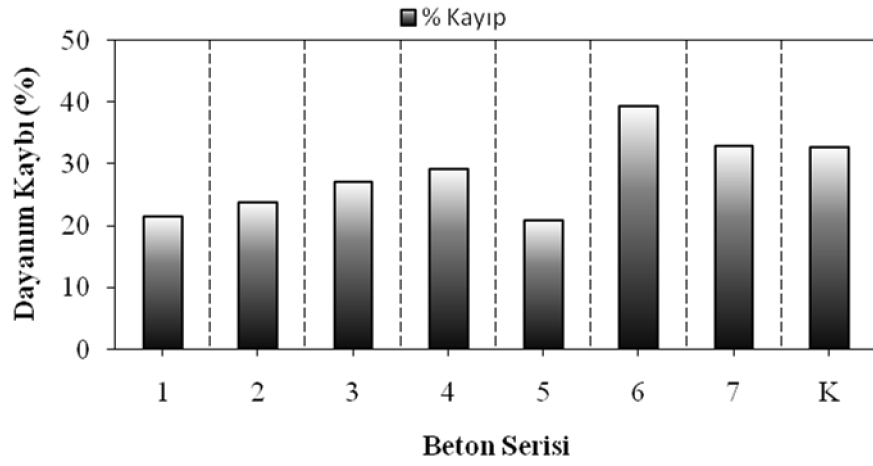
c) Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

Donma-çözünme deneyi sonrası, üzerinde deney uygulanan kontrol KYB ve FTKYB serileri ile bunlara kontrollük edecek karşılıkları eğilmede çekme deneyine tabi tutularak sonuçlar Şekil 5.86-93'te sunulmuştur. Şekil 5.86-87'de sırası ile karışımında %100 tekil fiber içeren ve donma-çözünme çevrimine giren ve girmeyen FTKYB serilerinin eğilmede çekme dayanımları karşılaştırmalı olarak verilirken, diğerinde donma-çözünme deneyi sonrasında her bir serideki dayanım düşüşü % olarak verilmiştir. Şekil 5.88-89, Şekil 5.90-91 ve Şekil 5.92-93'te de aynı biçimde diğer FTKYB serileri ve dayanımlarındaki düşmeler görülmektedir. Şekil 5.86-87'de görüldüğü gibi, donma-çözünme deneyi sonrasında kontrol KYB ve tüm tekil fiber içeren FTKYB serilerinde belirli bir dayanım düşüşü oluşmuştur. En yüksek eğilmede çekme dayanımı düşüş oranı %39.3 ile P2 kodlu polipropilen sentetik fiber içeren 6 nolu FTKYB serisinde gözlenirken, en küçük eğilmede çekme dayanım düşüşü %21.4 ile Ç1 kodlu fiber içeren 1 nolu FTKYB serisinde gözlenmiştir. Şekil 5.87 incelendiğinde donma-çözünme deneyi sonrasında karışımında uzun ve boy/çap oranı yüksek fiber bulunan FTKYB serilerinin kendinden daha kısa ve küçük boy/çap oranına sahip fiber içeren FTKYB serilerinden daha düşük dayanım düşüşü olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde karışımında düşük oranda P2 kodlu fiber kullanılan 6 nolu seri ile yüksek oranda P2 kodlu fiber bulunduran 7 nolu seri kıyaslandığında, karışımında fiber miktarının artması ile donma-çözünme deneyi sonrası eğilmede çekme dayanım düşüş oranında da azalmaya neden olduğu gözlenmiştir. %50uzun+%50 kısa fiberler ile oluşturulmuş FTKYB serilerinin sunulduğu Şekil 5.88-89 incelendiğinde, donma-çözünme deneyi sonrasında en yüksek eğilmede çekme dayanımı değerleri yine karışımında makro ve mikro ölçekteki fiberlerin bir arada kullanıldığı seriler olduğu görülmektedir. Yinede

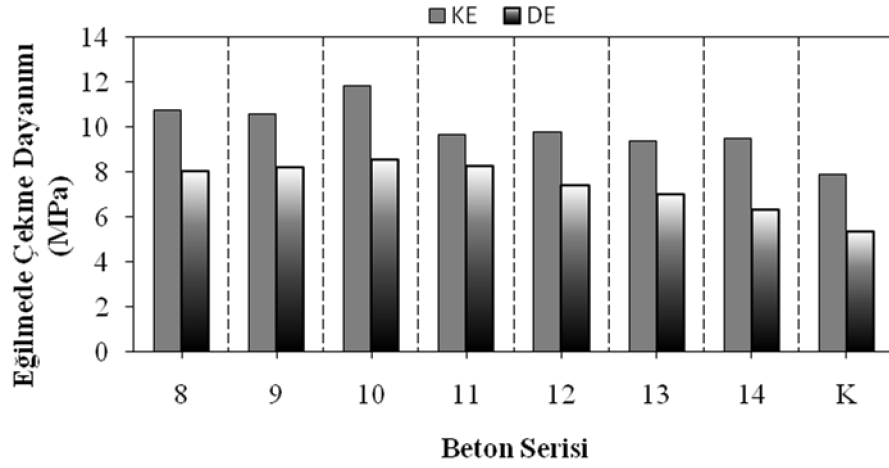
bu serilerden 14 nolu FTKYB serisi, yapısında P1 kodlu polipropilen sentetik fiber bulundurduğu için, eğilmede çekme dayanımı çelik fiberli karışımlardan daha düşük çıkmıştır. Bu gruptaki FTKYB serilerinde ise en yüksek dayanım düşüş oranı %33,6 ile 14 nolu FTKYB serisinden elde edilmiştir. Şekil 5.90-91’de %25uzun+%75kısıkarma fiber karışımı FTKYB serileri sunulmuştur. Toplam fiber hacminde uzun ve boy/çap oranı yüksek fiberlerin yoğunluğu düşürüldükçe donma-çözünme deneyi sonrası eğilmede çekme dayanımındaki düşme oranında da düşüş gözlenmiştir. Özellikle toplam fiber hacminde fiber yoğunluğunun %75’ini mikro fiberlerin oluşturduğu karışımlarda daha düşük oranlarda eğilmede çekme dayanımı düşüşleri gözlenmiştir. Bu şekilde sonuçlar elde edilmesinde, donma-çözünme deneyi sonrasında olası mikro çatlak oluşumunun kullanılmış olan mikro fiberler ile daha iyi köprülenmiş olması sonucu çıkarılabilir. Şekil 5.92-93’te ise karışımında %25 oranlar ile 4 farklı fiber bulunan FTKYB serileri ile kontrol KYB serisinin donma-çözünme deneyine giren ve girmeyen serilerinin, karşılaştırmalı olarak eğilmede çekme dayanımı değerleri ile donma-çözünme deneyi sonrası serilerdeki % olarak eğilmede çekme dayanım kayıpları verilmiştir. Bu grupta da donma-çözünme deneyi sonrasında en küçük eğilmede çekme dayanımı kontrol KYB serisinden ve daha sonra karışımında P1 ve P2 kodlu polipropilen sentetik fiber bulunduran 24 nolu seriden elde edilmiştir. Donma-çözünme deneyi sonrasında bu gruptaki % olarak dayanım düşüşleri ise sırası ile %33 kontrol KYB serisinden, %27 24 nolu FTKYB serisinden ve %26 23 nolu FTKYB serisinden elde edilmiştir.



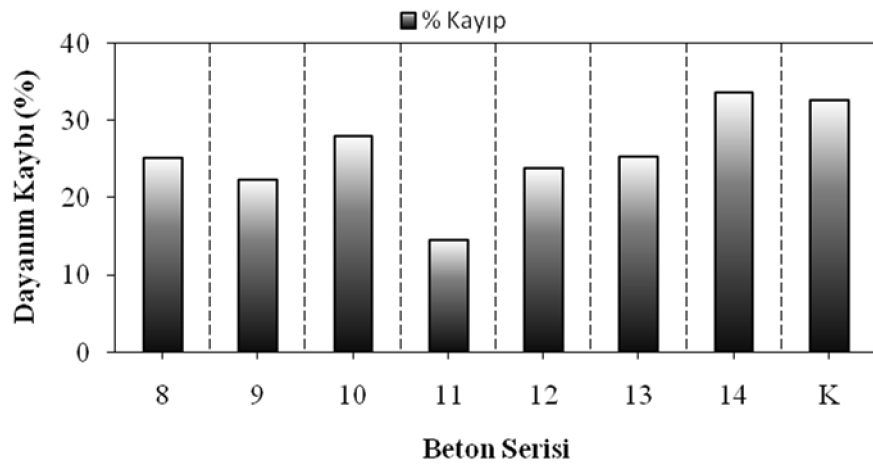
Şekil 5.86 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



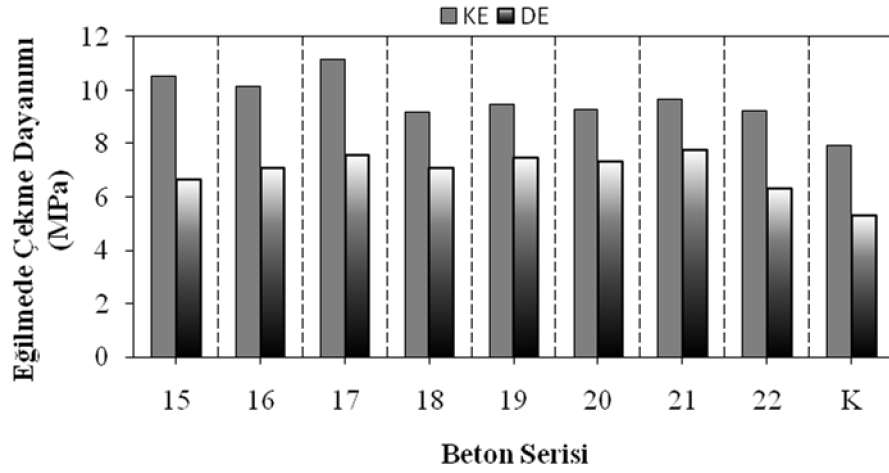
Şekil 5.87 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı



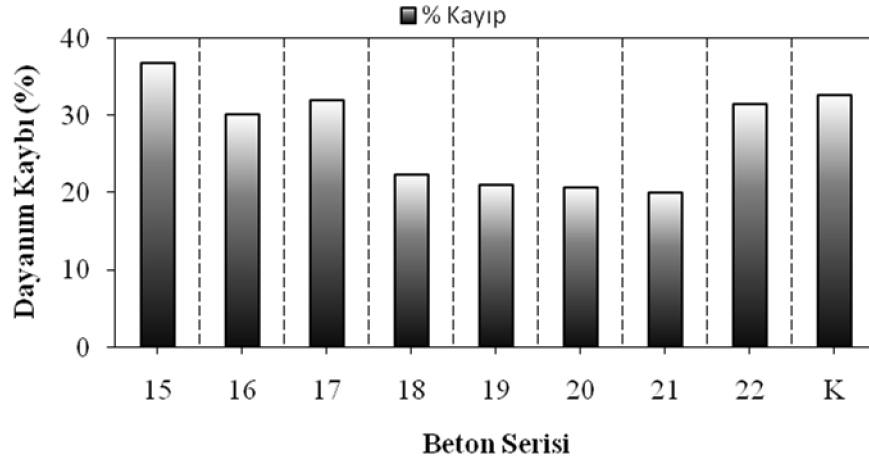
Şekil 5.88 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



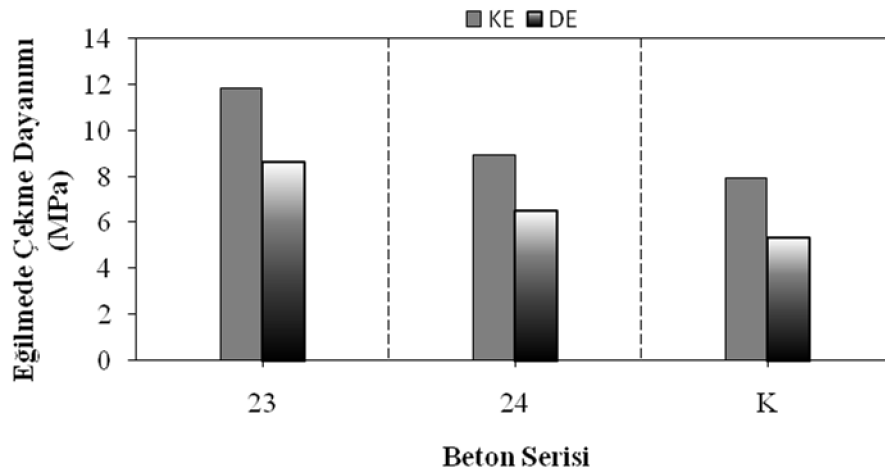
Şekil 5.89 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı



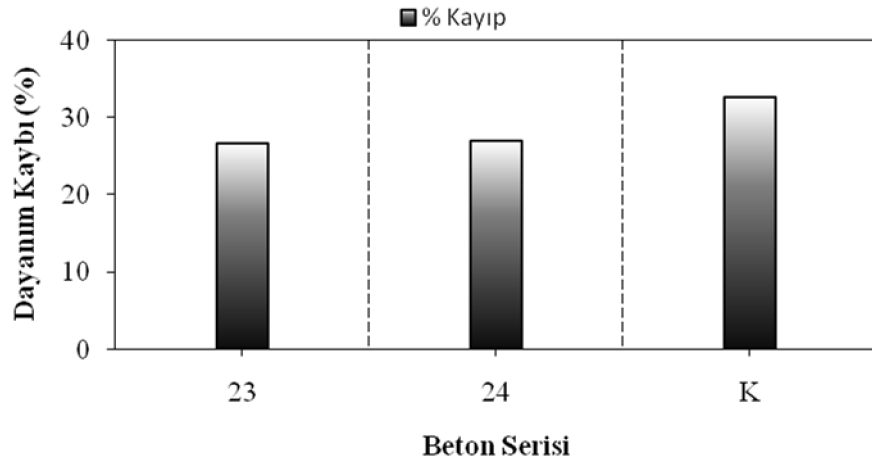
Şekil 5.90 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



Şekil 5.91 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı



Şekil 5.92 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi

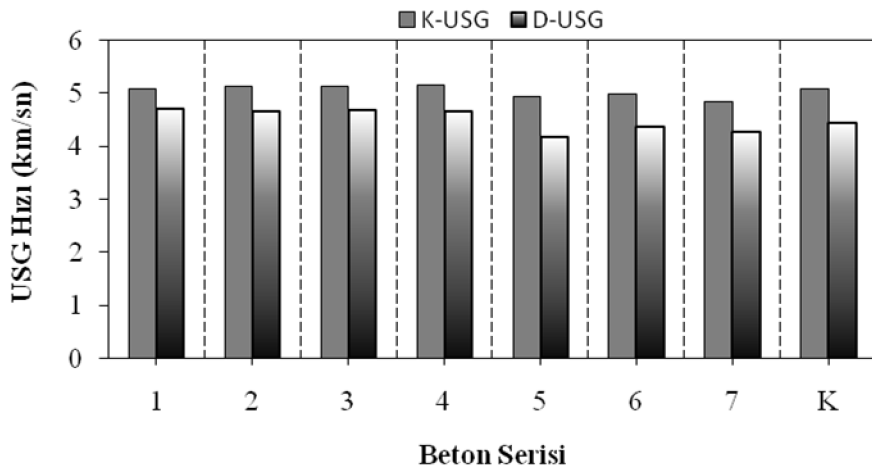


Şekil 5.93 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı

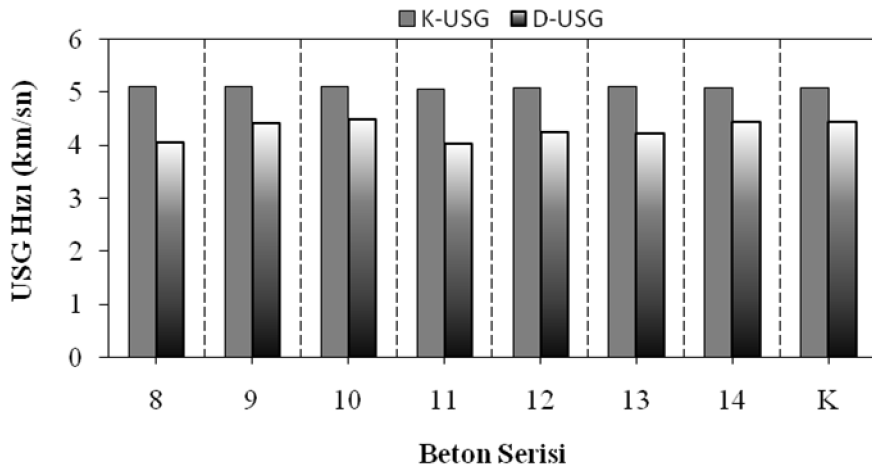
d) USG Hızı Tayini

Donma-çözünme deneyi sonrasında FTKYB serileri üzerinde uygulanan USG hızı tayini deney sonuçları Şekil 5.94-97’de sunulmuştur. Genel olarak şekiller değerlendirildiğinde donma-çözünme çevrimi sonrasında FTKYB serilerinin USG hızlarında düşüş gözlenmiştir. Fakat bu düşüş yüksek sıcaklık deneyinde numunelerde meydana gelen düşüş kadar belirgin değildir. FTKYB serileri hemen hemen aynı oranlarda fiber içerdiği için aynı grupta bulunan FTKYB serilerinde donma-çözünme deneyi sonrası USG hızları da birbirine çok yakın değerler vermiştir. Fakat yinede gruplanarak farklı şekiller içinde sergilenen FTKYB serileri arasında da dikkate değer USG hızı farklılıkları gözlenmiştir. Bu açıdan Şekil 5.94 incelendiğinde karışımında tekil fiber içeren çelik fiberler ile polipropilen sentetik fiberler arasında hız farkı daha belirgindir. Kullanılan çelik fiberler arasında ise mikro çelik fiber içeren 4 nolu FTKYB serisi diğerlerinden daha yüksek değerler vermiştir. Bu ise toplam hacme giren fiber sayısının mikro fiberlerde çok daha fazla olmasından dolayı, beton içerisinde daha üniform bir yapı oluşturarak ses iletkenliğine daha fazla katkıda bulunduğundandır. Kontrol KYB serisi ise çelik fiberli karışımlardan daha düşük, polipropilen sentetik fiberli karışımlardan daha yüksek hız değerleri vermiştir. Şekil 5.95-97’de de benzer sonuçlar alınmıştır. Bu şekillerde dikkati çeken nokta ise polipropilen sentetik fiber ile çelik fiberin bir arada kullanılması ile USG hızında yükselmenin gözlenmesidir. Şekil 5.94’te sunulan 5 nolu FTKYB serisinde %100 oranda P1 kodlu fiber kullanılmışken, Şekil 5.95’te sunulan 14 nolu karışımında bu hacmin yarısı kadar P1 fiberi Ç4 ile yer değiştirilmiştir. Şekil 5.96’da sunulan 21 ve 22 nolu karışımlarda ise %75 oranında P1 kodlu fiber sırası ile Ç3 ve Ç4 kodlu fiberler ile yer değiştirilmiştir. Bu düzenlemeler sonrasında çelik fiber oranının toplam fiber hacminde artması ile FTKYB

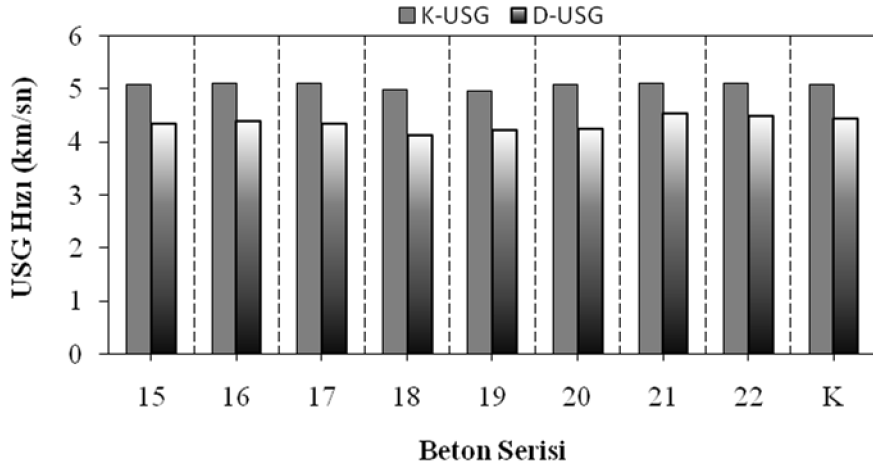
serilerinin USG hızlarında da artış gözlenmiştir. Şekil 5.97’de sunulan 24 nolu seride ise yine toplam fiber hacmindeki polipropilen sentetik fiber oranı %50’ye düşürülmüştür. Bu seride ise USG hızı %75 oranında çelik fiber içeren polipropilen sentetik fiberli serilerden daha düşük değerler vermiştir. Elde edilen bu sonuçların nedenleri, normal şartlar altında uygulanan USG hızı deneyinden elde edilen sonuçların nedenleri ile çok benzerlik göstermektedir. Donma-çözünme deneyinin FTKYB serilerinin USG hızı değerlerine olan en büyük ve göze çarpan etkisi aslında FTKYB serilerinin USG hızlarını belirli oranlarda düşürmesidir. Ancak gözlenen bu etki oranı yüksek sıcaklık sonucu oluşan etki oranlarından çok daha düşüktür.



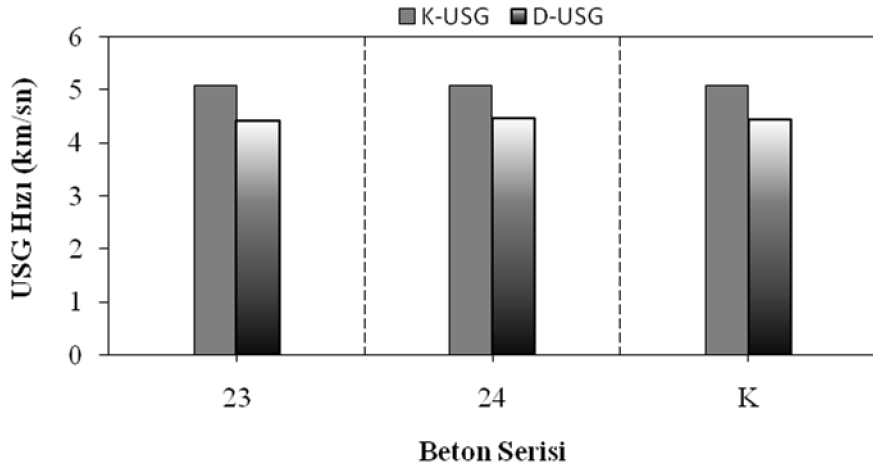
Şekil 5.94 Donma-çözünme deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi



Şekil 5.95 Donma-çözünme deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi



Şekil 5.96 Donma-çözünme deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi

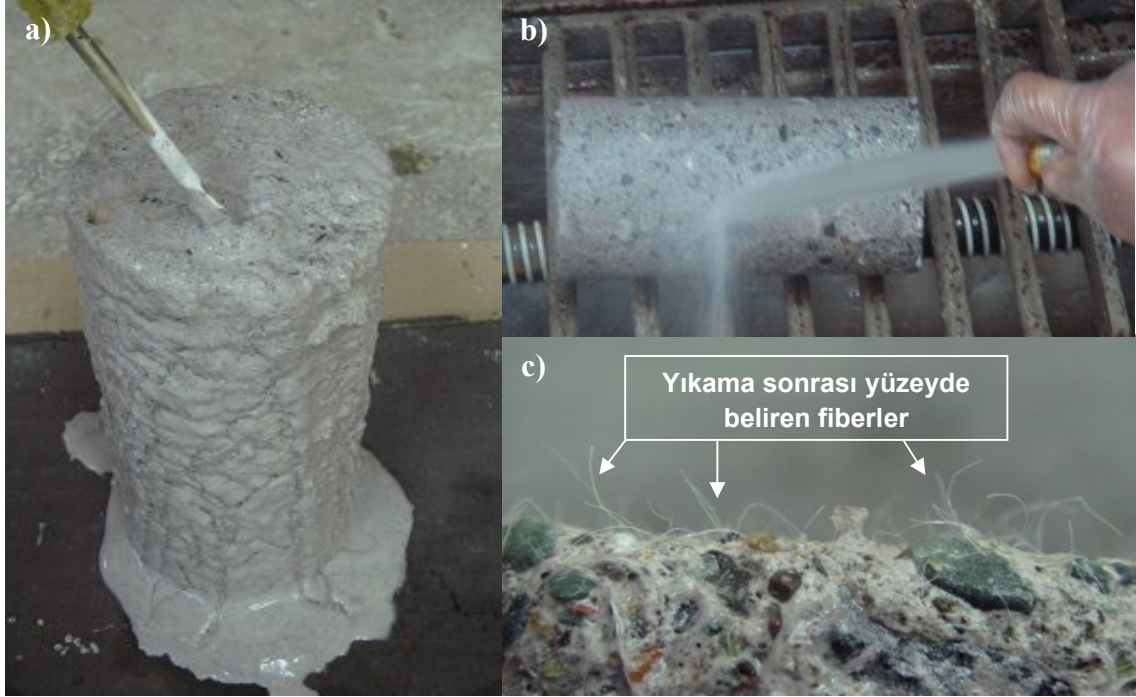


Şekil 5.97 Donma-çözünme deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi

5.3.3 Asit Dayanıklılık Deneyi Bulgularının İncelenmesi

Tez çalışmasında, kontrol KYB ve FTKYB serilerinin asitli ortamlara karşı direncini belirleyebilmek için beton serileri asit etkisi altında bırakılmıştır. Bölüm 4'te detayları anlatıldığı şekli ile asit etkisi altında bırakılan seriler üzerinde: basınç dayanımı, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri sonucu kayıplar belirlenmiştir. Ayrıca mekanik özellik deneylerini desteklemesi açısından, dayanım özellikleri ile bağlantılı olan USG hızı tayini de asit etkisi öncesi ve sonrasında uygulanarak değerler Şekil 5.99-126'da grafiklere yansıtılmıştır. Beton serileri kontrol KYB serisi ile karşılaştırılabileceği gibi, asit etkisine tabi tutulmayan kendi kontrol serisi ile de karşılaştırılabilecek biçimde şekiller tasarlanmıştır. Her bir beton serisinin asit etkisi uygulanmayan kontrol serisi ile kıyaslanarak hesaplanan % olarak dayanım ve USG hızı kayıpları da şekillerde sunulmuştur.

Şekil 5.98a’da görüldüğü gibi asit etkisine maruz bırakılan numune yüzeylerinde erime ve bundan dolayı çamurlaşma gözlenmiştir. Bu şekilde asitli ortamdan çıkarılan numuneler Şekil 5.98b’de görüldüğü gibi yıkanarak temizlenmiştir. Yıkanan FTKYB serilerinden karışımında çelik fiber içerenlerinin, yüzeye yakın kısımda çelik fiberlerin eriyerek işlevini yitirdiği gözlenmiştir. Polipropilen sentetik fiber içeren serilerin yüzeylerinde ise beton matraste oluşan erime neticesinde Şekil 5.98c’de görüldüğü gibi fiberler açığa çıkmıştır.



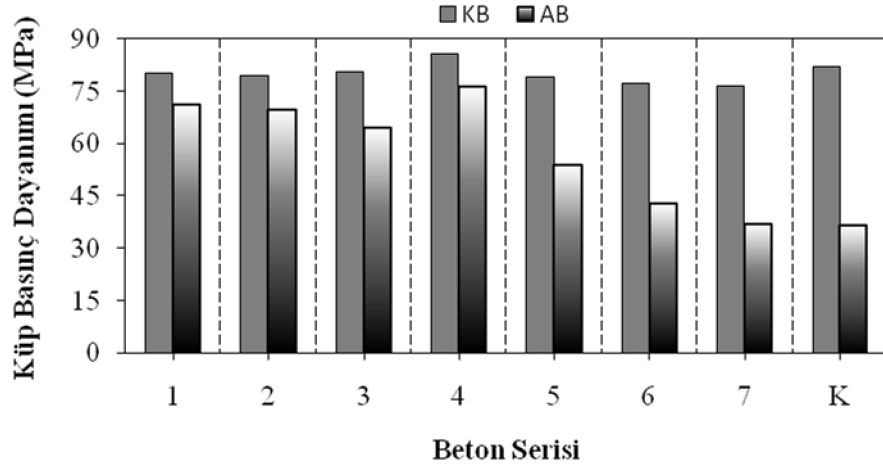
Şekil 5.98 Asit dayanıklılığı deneyi sonrası numune durumu **a)** Silindir numunedeki yüzey erimesi **b)** Yıkanan silindir numune **c)** Asit dayanıklılığı deneyi sonrası erimeyerek numune yüzeyinde beliren fiberler

a) Basınç Dayanımı Deneyi

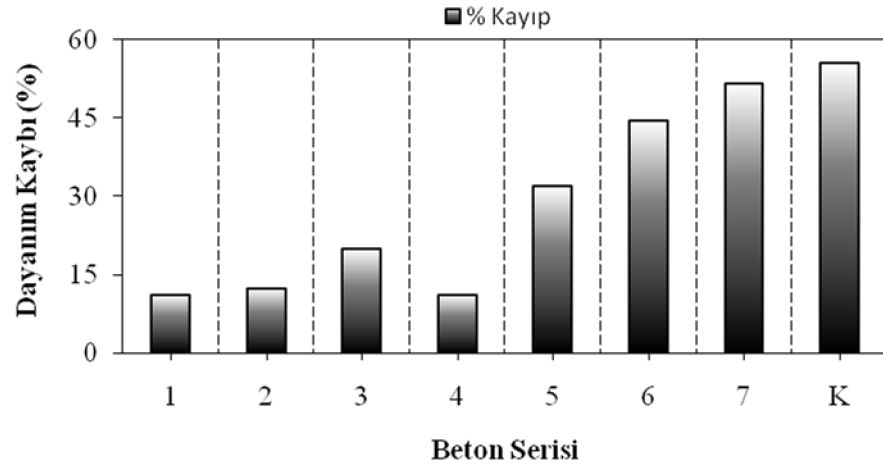
Asit etkisine maruz bırakılan kontrol KYB serisi ve FTKYB serileri ile, bu etkiye maruz kalmayan kontrol numunelerinin basınç dayanımı sonuçları ve basınç dayanımlarındaki kayıplar Şekil 5.99-106’da verilmiştir. Asit etkisi sonrası basınç dayanımında, kontrol KYB ve polipropilen sentetik fiber içerikli FTKYB serileri yüksek oranda bu dayanıklılık deneyinden etkilenmiştir. FTKYB serilerinin dayanıklılık özelliklerini belirlemek için uygulanan deneylerden yüksek sıcaklık ve donma-çözünme deneylerinde, numuneler arası basınç dayanımı farklılıklarında benzerlik gözlenirken, asit dayanıklılık deneyi sonrası basınç dayanımı değerlerindeki farklılık daha belirgindir. Şekil 5.99-100 incelendiğinde bu farklılık hemen göze çarpmaktadır. Karışımında makro tekil çelik fiberler kullanılan ilk 3 seride basınç dayanımı

değerleri birbiri ile benzerlik gösterirken, en düşük basınç dayanımı değerleri polipropilen sentetik fiber içeren 5, 6 ve 7 nolu FTKYB serileri ile fiber içermeyen kontrol KYB serisinden elde edilmiştir. Benzer biçimde, basınç dayanımı kaybı da en yüksek kontrol KYB serisinden, bunu takiben P1 ve P2 kodlu polipropilen sentetik fiber içeren 5, 6 ve 7 nolu FTKYB serilerinden elde edilmiştir. Asit etkisi sonrası kontrol KYB serisi ile bu etkiye maruz olmayan kontrol KYB serisi kıyaslandığında kontrol KYB serisinin basınç dayanımı kaybı %55.55 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde polipropilen sentetik fiber içeren 5, 6 ve 7 nolu FTKYB serileri kendi kontrol serileri ile karşılaştırıldığında basınç dayanımlarında sırası ile %31.9, %44.5 ve %51.7 oranlarında kayıplar olduğu tespit edilmiştir. Çelik fiber içeren 1, 2, 3 ve 4 nolu FTKYB serilerinde ise dayanım kayıpları sırası ile %11.2, %12.4, %19.9 ve %11.2 oranlarındadır. Karışımında %50 uzun ve kısa fiberlerin birlikte kullanıldığı karma FTKYB serilerinin sunulduğu Şekil 5.101-102 incelendiğinde serilerin basınç dayanımında düşüş olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.99'da FTKYB serilerinin kontrol KYB serisine göre asit etkisi sonrası ortalama dayanım fazlalığı %62.6 iken, bu oran Şekil 5.101'deki karma FTKYB serilerinde %40'a gerilemiştir. %25 uzun ve %75 kısa fiberlerin karma olarak kullanıldığı FTKYB serilerinin sunulduğu Şekil 5.103'te ise bu oran daha da düşerek %34.5 değerine gerilemiştir. Bu sonuç, toplam fiber hacminde büyük ölçülerde uzun ve boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğunu düşürmenin asit deneyi sonrası basınç dayanımı değerlerinde negatif etki oluşturduğunu göstermektedir. Şekil 5.99'da %100 P1 kodlu tekil polipropilen sentetik fiber içeren 5 nolu FTKYB serisi ile, Şekil 5.101'de %50P1+%50Ç4 oranlarında karma fiber içeren 14 nolu FTKYB serisi karşılaştırıldığında, karışımında %50 oranında P1 kodlu fiber ile Ç4 kodlu çelik fiberin yer değiştirmesi ile basınç dayanımında %71.9 oranında artış gözlenmiştir. Ancak 5 nolu seriye göre bu dayanım artışı 21 nolu seride %75 oranla Ç3 ve 22 nolu karışımında yine %75 oranla Ç4 ile yer değiştirilmesi sonucu dayanım artış oranı düşerek sırası ile %27 ve %24.6 oranlarına gerilemiştir. Bu sonuçlar da daha önce belirtildiği gibi, fiber uzunluk ve boy/çap oranının yüksek miktarda düşürülmesinden dolayı asit deneyi sonrası basınç dayanımında negatif etki oluşturduğu fikrini desteklemiştir.

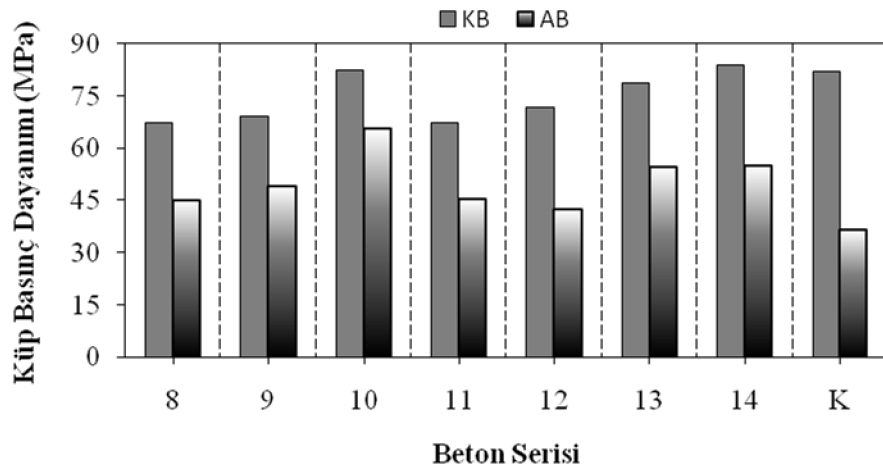
Şekil 5.105-106'da %25'er oranlar ile 4 farklı fiber tipinin birlikte kullanılması ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin, asit etkisi sonrası basınç dayanımı değerlerini ve bunların kontrol serileri ile kıyaslanması ile elde edilen dayanım kayıpları verilmiştir. Burada da kontrol KYB serisi en düşük dayanım değerini verirken, karışımında polipropilen sentetik fiber bulunan 24 nolu seri 2. düşük dayanım değerini vermiştir. Bu grupta en yüksek dayanım değeri ve en düşük dayanım kaybı oranı ise karışımında 4 farklı çelik fiber içeren 23 nolu FTKYB serisinden elde edilmiştir. 23 nolu FTKYB serisinin dayanım kaybı %32.4 iken, 24 nolu FTKYB serisinin dayanım kaybı %52'dir.



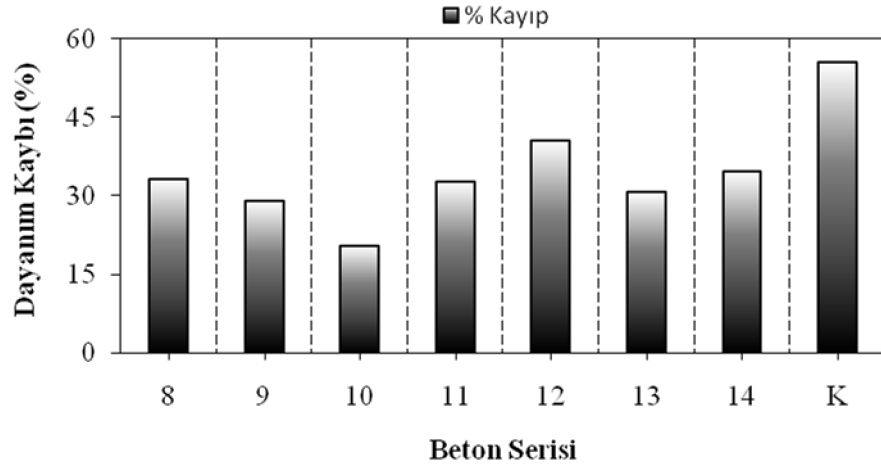
Şekil 5.99 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



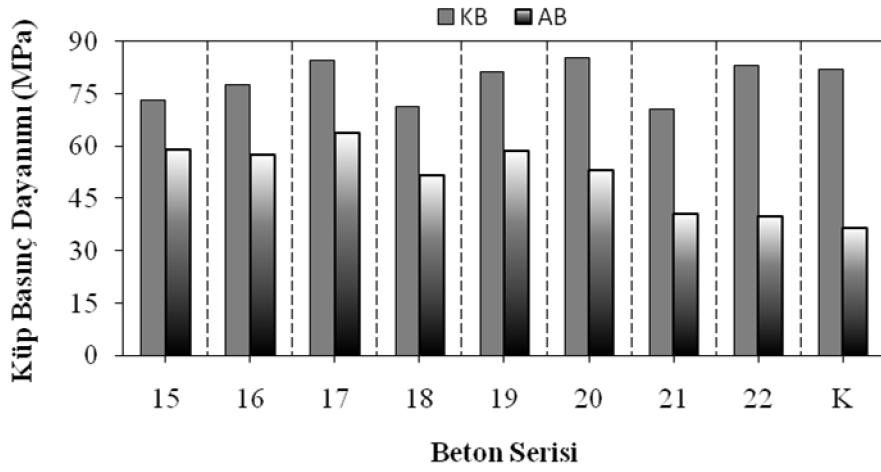
Şekil 5.100 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı



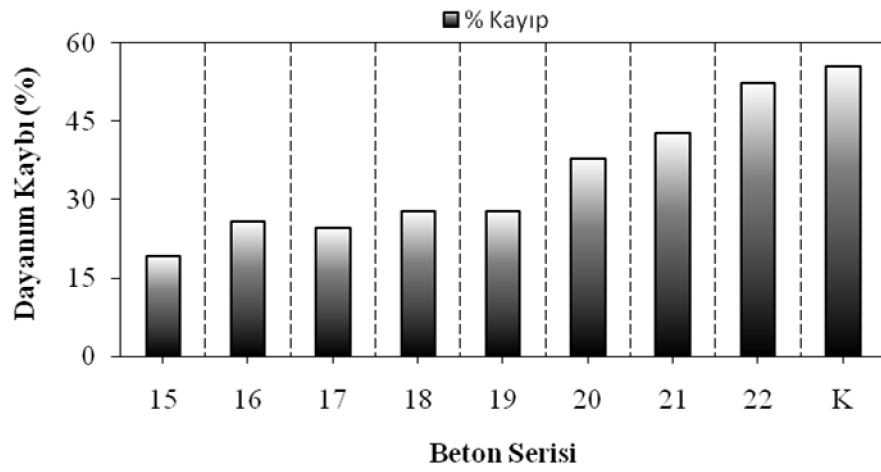
Şekil 5.101 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



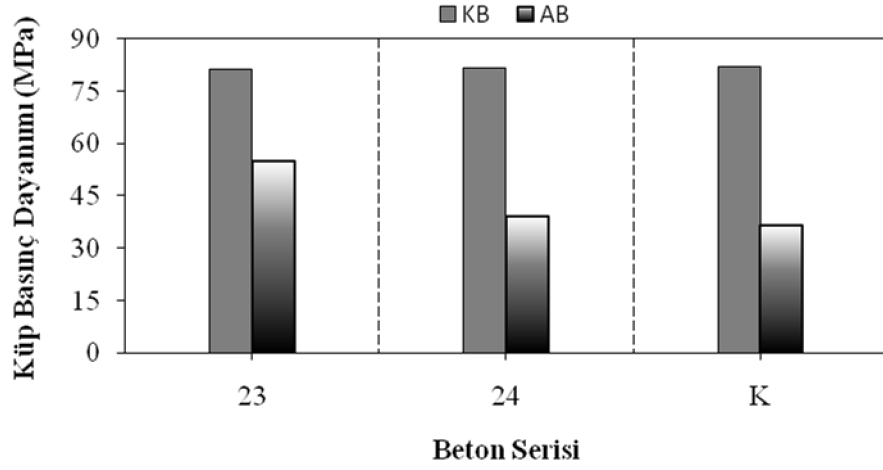
Şekil 5.102 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı



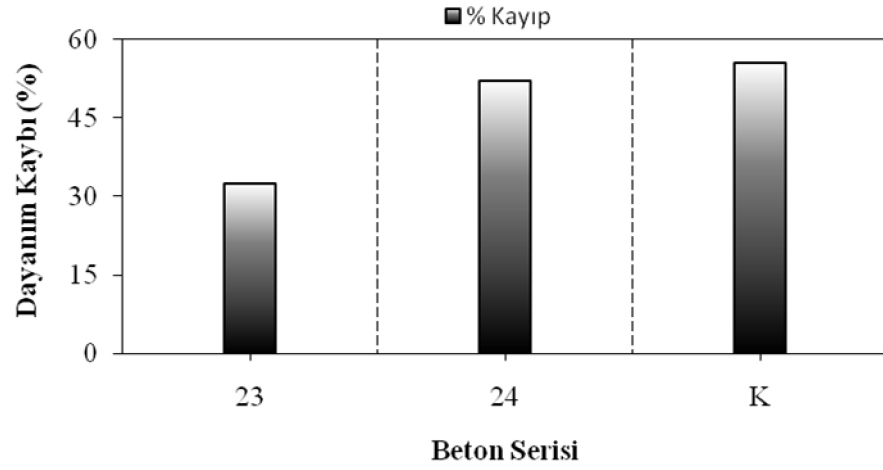
Şekil 5.103 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



Şekil 5.104 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı



Şekil 5.105 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi

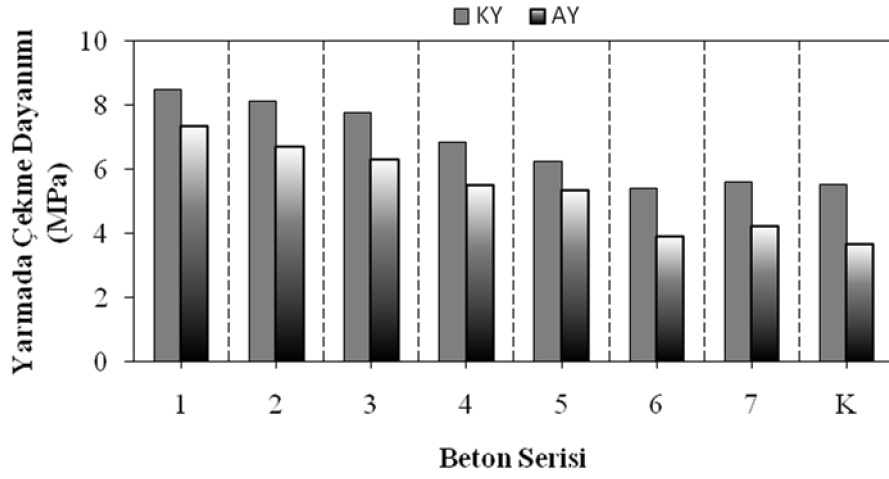


Şekil 5.106 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı

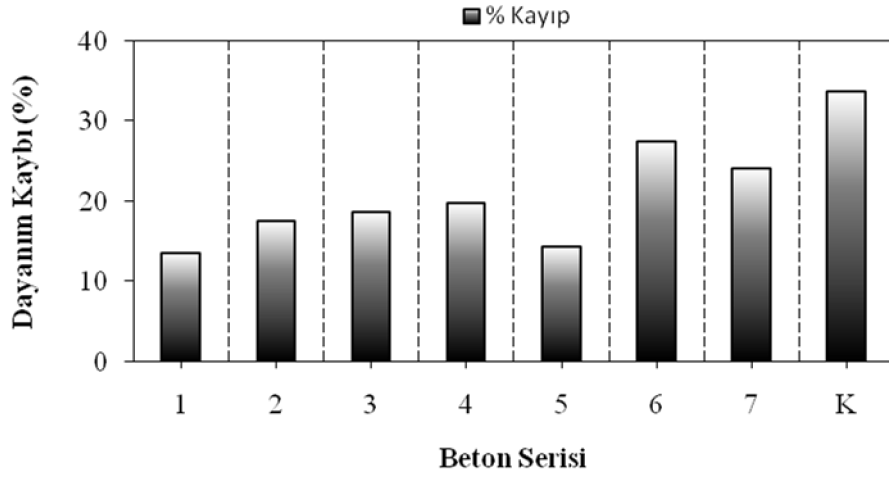
b) Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Asit dayanıklılık deneyi sonrası yarmada çekme dayanımı değerleri ve dayanım kayıpları Şekil 5.107-114'te sunulmaktadır. Şekiller incelendiğinde asit dayanıklılık deneyinden FTKYB serilerinin etkilenecek dayanımlarında belirli kayıplar olduğu görülmektedir. Toplam fiber hacminde tekil fiberlerin kullanıldığı FTKYB serilerinin sunulduğu Şekil 5.107 incelendiğinde, tekil olarak kullanılan fiber serilerinin uzunluk ve boy/çap oranının düşmesi ile asit sonrası yarmada çekme dayanımlarında da düşüş oluşmuştur. Bu gruptaki beton serilerinde en düşük yarmada çekme dayanımı kontrol KYB serisinde gözlenmiştir. Bunu takiben karışımında P1 ve P2 kodlu fiber kullanılan FTKYB serilerinde gözlenmiştir. Kullanılan çelik fiberler içinde ise en düşük yarmada çekme dayanımı karışımında Ç4 kodlu mikro fiber kullanılan FTKYB serisinden elde edilmiştir. Asit etkisi sonrası beton serilerinin yarmada

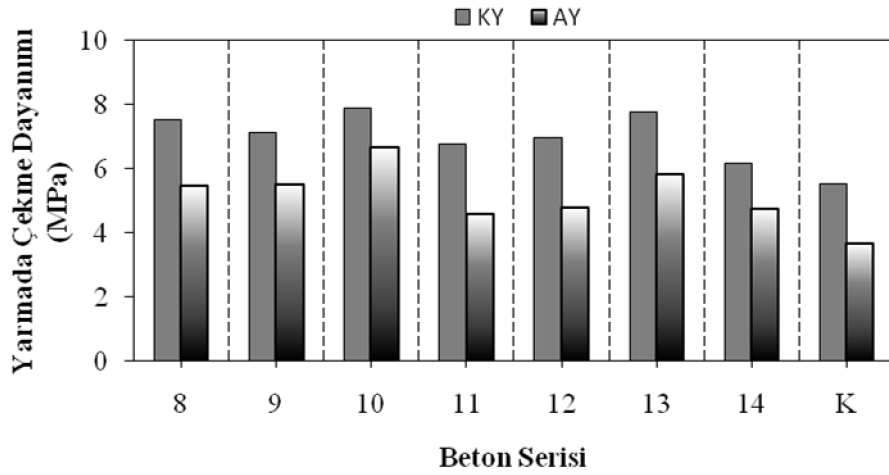
çekme dayanımlarında meydana gelen %'ce dayanım kayıplarının verildiği Şekil 5.108'de görüldüğü gibi en yüksek dayanım kaybı %33.71 ile fiber içermeyen kontrol KYB serisinde gözlenmiştir. Bunu takiben %27.5 dayanım kaybı ile karışımında düşük oranda P2 kodlu polipropilen sentetik fiber içeren 6 nolu seride görülmüştür. En düşük dayanım kaybı %13.5 oranı ile Ç1 kodlu fiberin kullanıldığı 1 nolu seride gözlenirken, çelik fiberler arasında en yüksek oranda dayanım kaybı ise %19.8 ile Ç4 kodlu mikro fiberin kullanıldığı 4 nolu FTKYB serisinde gözlenmiştir. %50 oranlar ile uzun ve kısa fiberlerin karma olarak kullanıldığı FTKYB serilerinin verildiği Şekil 5.109-110 incelendiğinde, toplam fiber hacminde bulunan iri fiber yoğunluğunun düşmesinden dolayı genel olarak yarmada çekme dayanımlarında tekil fiberlere oranla düşüş gözlenmiştir. Aynı zamanda, Şekil 5.107-108'de görüldüğü gibi tekil fiber içeren FTKYB serilerinin tümünün ortalama yarmada çekme dayanım kaybı (%19.4), %50 oranlar ile uzun ve kısa karma fiberlerin oluşturduğu FTKYB serisi grubunun yarmada çekme dayanım kaybı oranı (%25.3) ile kıyaslandığında karma fiber kullanımı ile dayanım kaybında da artış olduğunu ortaya koymuştur. Bunun yanında %50 oranlar ile karma fiber oluşturan serilerden, karışımında makro fiber kullanımı ile oluşturulan serilerin dayanım kaybı, karışımında %50makro+%50 mikro fiberler kullanılarak oluşturulan FTKYB serilerinin dayanım kaybından daha büyük değerlere ulaştığı gözlenmiştir. Toplam fiber hacminde %25uzun ve %75 kısa fiber kullanılan Şekil 5.111-112'deki FTKYB serileri, diğer FTKYB serisi grupları ile karşılaştırılarak incelendiğinde, fiber uzunluk ve boy/çap oranının düşürülmesi ile yarmada çekme dayanımında düşüş ve de dayanım kaybında artış gözlenmiştir. Karışımında tekil fiber kullanılan ve %50 karma olarak düzenlenen FTKYB gruplarındaki toplam ortalama yarmada çekme dayanım kayıpları sırası ile %19.4 ve %25.3 iken, bu gruptaki FTKYB serilerinin dayanımlarındaki ortalama kayıp %27.5 olarak kaydedilmiştir. 15 nolu serinin yarmada çekme dayanımı kontrol KYB serisinden %27 daha yüksek çıkmasına rağmen, dayanım kaybı kontrol KYB serisine çok yakın çıkmıştır. %25'er oranlar ile 4 farklı fiber serisinin karma olarak birlikte kullanıldığı beton serilerinin kontrol KYB ile birlikte sunulduğu Şekil 5.113-114 incelendiğinde karışımında tümü ile çelik fiber kullanılan karma FTKYB serisinin en yüksek yarmada çekme dayanım değerini ve en düşük dayanım kaybı oranını verdiği görülmektedir. Bu gruptaki toplam fiber hacminde tümüyle çelik fiber (Ç1, Ç2, Ç3 ve Ç4) içeren 23 nolu FTKYB serisinin yarmada çekme dayanımı asit etkisi sonrası %85.3 oranında kontrol KYB serisinden yüksek çıkarken, karışımında %50 oranda çelik (%25Ç3, %25Ç4) fiberler ile %50 oranda polipropilen sentetik (%25P1, %25P2) fiberler içeren 24 nolu seri ise kontrol KYB serisinden %48.6 oranında daha yüksek çıkmıştır. Bu FTKYB serilerinin ve fiber içermeyen kontrol KYB serisinin asit etkisine tabi tutulmayan kendi serileri ile kıyaslandığında ise yarmada çekme dayanımlarında sırası ile %16.7, %20.6 ve %33.7 oranlarında kayıpların oluştuğu gözlenmiştir.



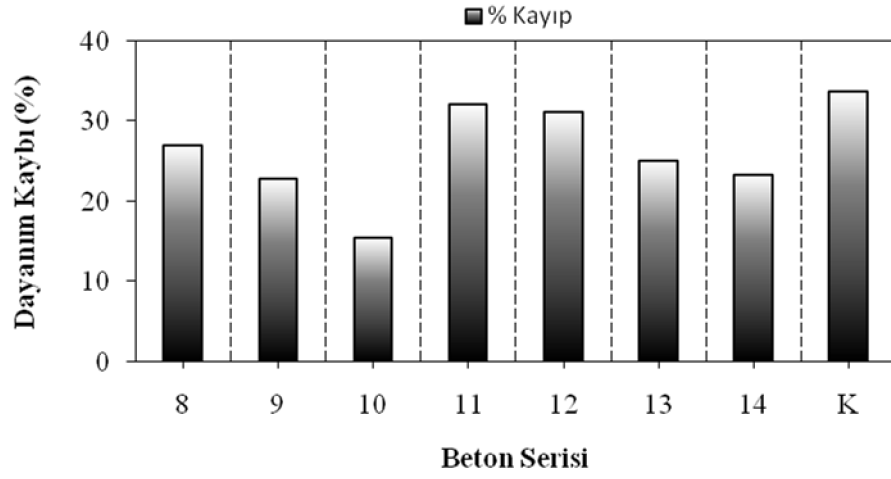
Şekil 5.107 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



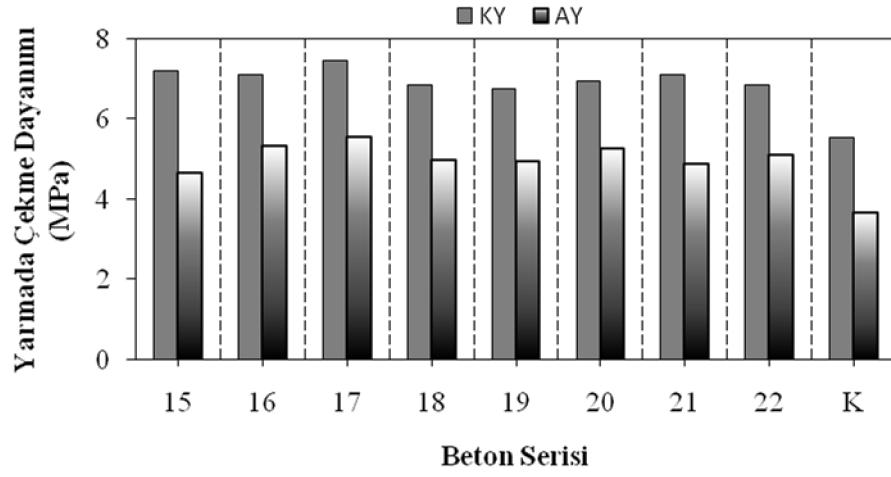
Şekil 5.108 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı



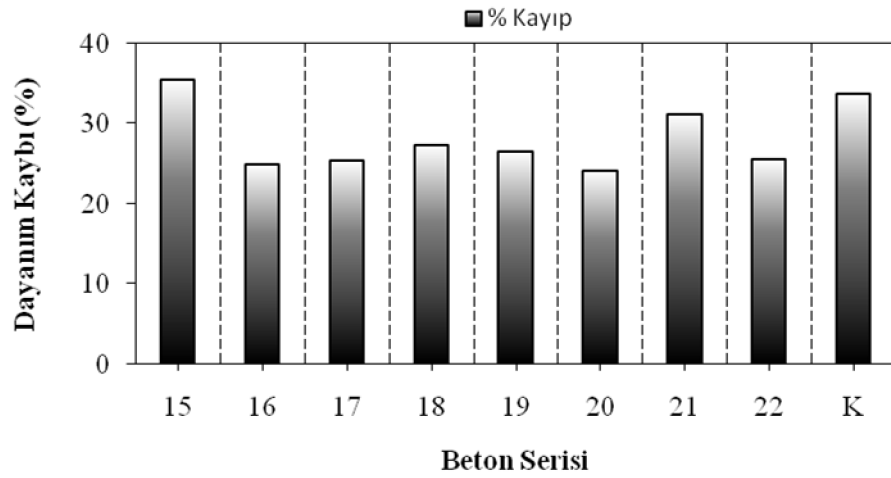
Şekil 5.109 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kıs karmı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



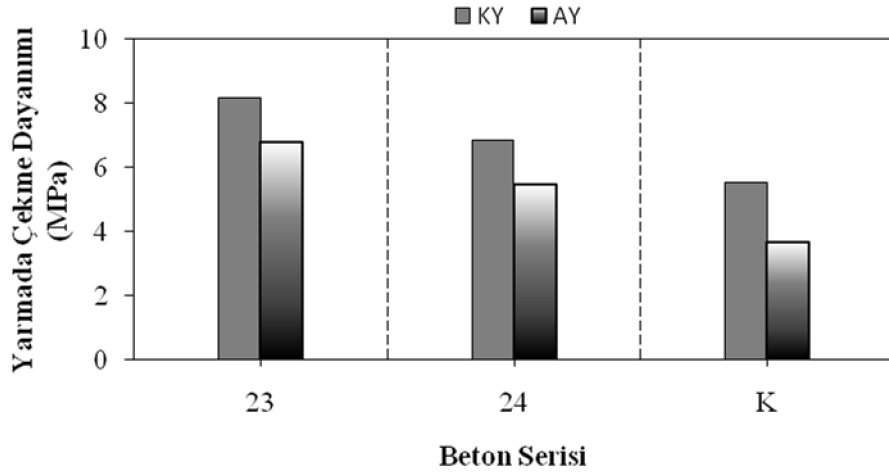
Şekil 5.110 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısıkarma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı



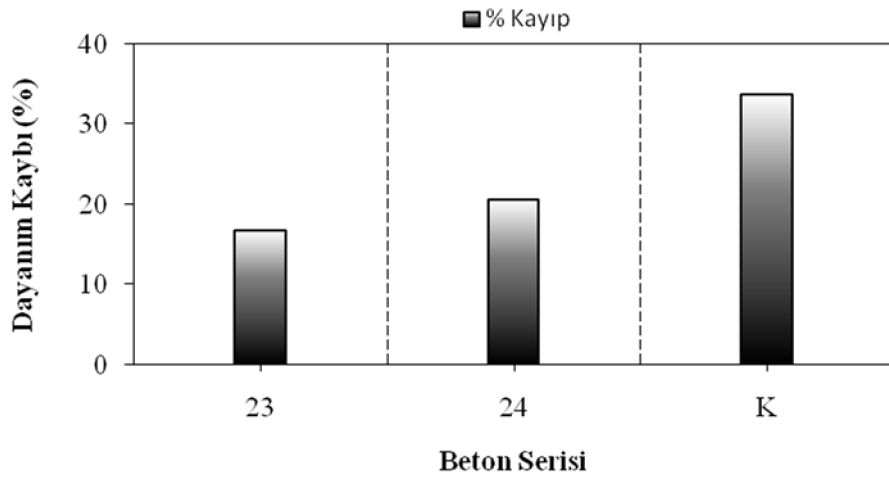
Şekil 5.111 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



Şekil 5.112 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısıkarma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı



Şekil 5.113 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



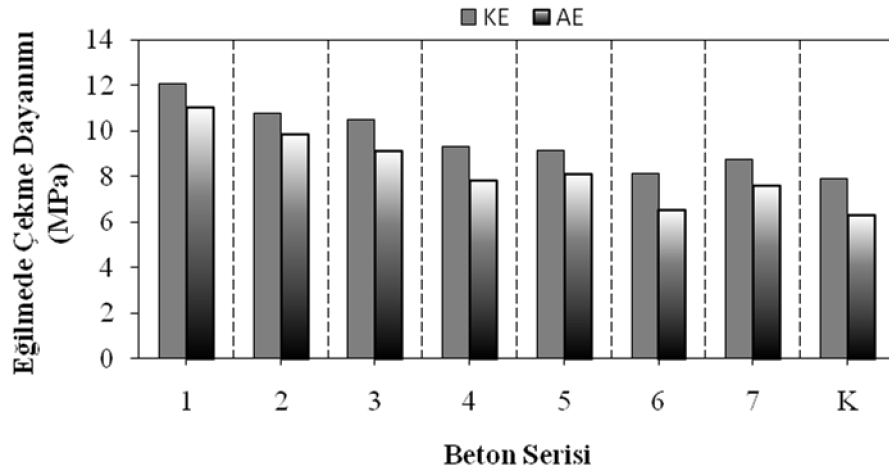
Şekil 5.114 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı

c) Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

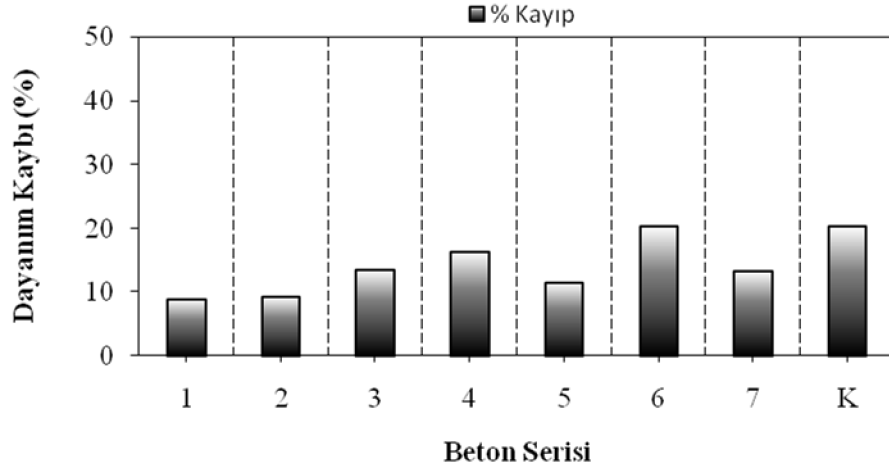
Asit dayanıklılık deneyi uygulanan numuneler ile bu numulere kontrollük eden beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değerleri ve bu serilerin eğilmede çekme dayanımlarının birbiri ile kıyaslanması sonucu meydana gelen eğilmede çekme dayanım kayıpları Şekil 5.115-122’de verilmiştir. Asit etkisi sonrası tüm beton serilerinin eğilmede çekme dayanımında düşüş gözlenmiştir. Şekil 5.115’te tekil fiber içeren FTKYB serilerinin asit etkisine maruz bırakılan ve bırakılmayan serilerinin eğilmede çekme dayanımları verilmiştir. Şekil 5.115 incelendiğinde bu gruptaki FTKYB serilerinde en düşük eğilmede çekme dayanımı değerlerinin kontrol KYB ve 6 nolu FTKYB serisinden elde edildiği görülür. Çelik fiber içeren ilk 4 serinin eğilmede çekme dayanımları incelendiğinde, tekil fiber içeren serilerde fiber uzunluk ve boy/çap oranının

düşmesi ile eğilmede çekme dayanımında da düşüş gözlenmiştir. Hem asit etkisine maruz bırakılan hemde asit etkisine maruz bırakılmayarak bu serilere kontrollük eden serilerde en yüksek eğilmede çekme dayanımı en uzun ve boy/çap oranı en yüksek olan 1 nolu FTKYB serisinden elde edilmiştir. Bu serinin asit etkisine maruz olanı, yine asit etkisine maruz bırakılan kontrol KYB serisine göre %75.1 oranında daha yüksek eğilmede çekme değeri verirken, yine 1 nolu FTKYB'un kontrol serisi asit etkisine maruz olmayan kontrol KYB serisi ile kıyaslandığında ise %53.2 oranında daha yüksek eğilmede çekme değeri vermiştir. Görüldüğü gibi asit dayanıklılık deneyi sonrası FTKYB'un fiber içermeyen KYB'a üstünlüğü artmaktadır. 1 nolu FTKYB serisi kendi kontrol serisi ile kıyaslandığında ise dayanımında %8.8 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. Çelik fiber içeren 2, 3 ve 4 nolu FTKYB serilerinde ise kendi kontrol serilerine göre %9.1, %13.3 ve %16.2 oranlarında eğilmede çekme dayanımı kaybı oluşmuştur. Polipropilen sentetik fiber kullanılan 5, 6 ve 7 nolu serilerde ise kendi kontrol serilerine göre dayanım kaybı oranları sırası ile %11.5, %20.3 ve %13.1'dir. Görüldüğü gibi bu FTKYB serilerinde, makro fiberin kullanıldığı 5 nolu seride dayanım kaybı daha düşükken, mikro fiberli 6 ve 7 nolu seride daha yüksektir. Burada, 6 ve 7 nolu seride polipropilen sentetik mikro (P2) fiber kullanıldığı ve karışım oranı olarak polipropilen sentetik makro (P1) fiberden daha düşük olduğu da göz ardı edilmemelidir. P2 kodlu fiberin farklı oranlarda kullanıldığı bu FTKYB serilerinin hem kontrol serileri hemde asit etkisine maruz bırakılan serileri incelendiğinde P2 kodlu fiberin yüksek oranda kullanıldığı 7 nolu seride eğilmede çekme dayanımları daha yüksek çıkmıştır. Aynı zamanda bu seriler kendi kontrol serileri ile kıyaslandığında 6 nolu seride %20.3 oranında dayanım kaybı gözlenirken, 7 nolu seride bu oran %11.7'ye gerilemiştir. Tekil fiberli FTKYB serilerine ait dayanım kayıpları Şekil 5.116'da sunulmuştur. Toplam fiber hacminde %50 oranlar ile uzun ve kısa fiberlerin karma olarak kullanıldığı FTKYB serilerinin verildiği Şekil 5.117-118 incelendiğinde genel olarak bu gruptaki beton serilerinin eğilmede çekme dayanımlarının, tekil fiberlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak bu gruptaki seriler kendi içinde değerlendirildiğinde makro fiberlerin mikro fiberler ile eşleştirilmesi sonucu oluşturulan karma FTKYB serilerinin eğilmede çekme dayanımının daha yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Yinede bu serilerin asit etkisi sonrası eğilmede çekme dayanımları, tekil fiber içeren serilerden daha düşük ve dayanım kayıpları ise daha yüksek seviyededir. Şekil 5.116'da gösterilen tekil fiber içeren FTKYB serilerinin ortalama eğilmede çekme dayanım kaybı %13.2 iken, Şekil 5.118'de verilmiş olan %50 karma FTKYB serilerinde oluşan eğilmede çekme dayanım kaybı %28.8'dir. Şekil 5.119-120'de, %25uzun+%75kısa karma fiberler ile oluşturulan FTKYB serilerinde ise daha yüksek oranda dayanım kayıpları gözlenmiştir. Bu gruptaki FTKYB serilerinin ortalama eğilmede çekme dayanım kaybı ise %37.2 oranındadır. Burada asit dayanıklılık deneyi sonrası FTKYB serilerindeki uzun fiber

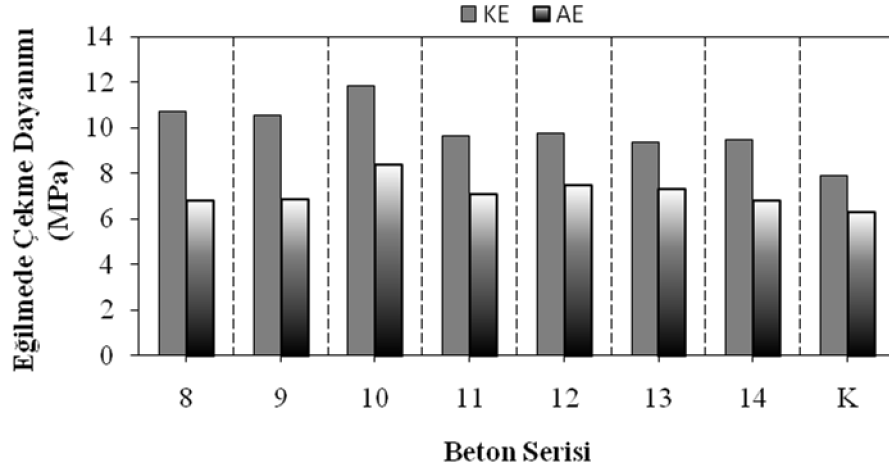
boyut yoğunluğunun düşmesi ile eğilmede çekme dayanım kaybı oranında yükselmenin olduğu görülmüştür. Şekil 5.121-122’de ise %25’er oranlarla 4 farklı fiberin birlikte kullanılması ile oluşturulan FTKYB serileri ve kontrol KYB serisi görülmektedir. Asit dayanıklılık deneyi sonrasında tamamıyla çelik fiberlerden oluşan 23 nolu serinin eğilmede çekme dayanımı her ne kadar polipropilen sentetik fiber içeren 24 nolu seriden yüksek olmasına rağmen, 23 nolu serinin eğilmede çekme dayanım kaybı 24 nolu seriden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. 23 nolu serinin boyutsal yönden fiber içeriği incelendiğinde, %75 oranında makro fiber ve %25 oranında mikro fiber içerdiği görülmektedir. %75 oranında makro fiber içeren 23 nolu seri ile, karışımında %75 oranında mikro fiber kullanılmış olan ve Şekil 5.119-120’de verilen 17, 19, 20 ve 22 nolu seriler kıyaslandığında, 23 nolu serinin eğilmede çekme dayanımı sırası ile %16, %70.5, %59.4 ve %27.2 oranlarında daha yüksek çıkarken, dayanım kaybı oranı ise yine 17, 19 ve 20 nolu serilere göre sırası ile %19.8, %42.9 ve %36 oranlarında daha düşük çıkmıştır. 22 nolu seri ile ise, dayanım kayıpları hemen hemen benzer çıkmıştır. 24 nolu seride ise, yine hem eğilmede çekme dayanımı hemde oluşan dayanım kaybı polipropilen içeren 21 ve 22 nolu serilerden daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar ise daha önce, FTKYB karışımlarında kullanılan fiber boyut yoğunluğu ile asit dayanıklılık deneyi sonrası eğilmede çekme dayanımındaki değişim ve dayanım kayıpları üzerine bulunan sonuçları desteklemektedir.



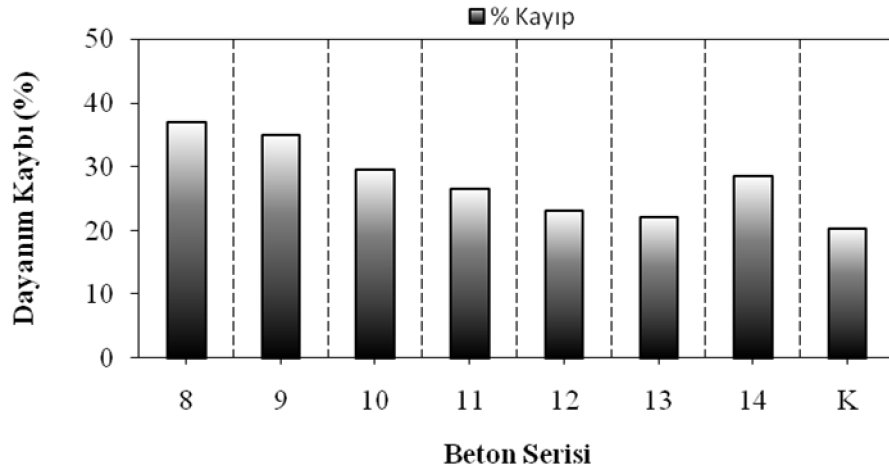
Şekil 5.115 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



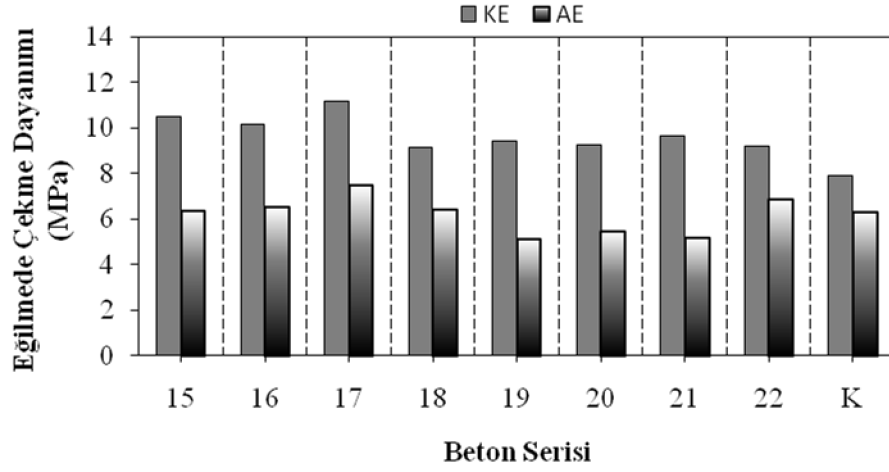
Şekil 5.116 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı



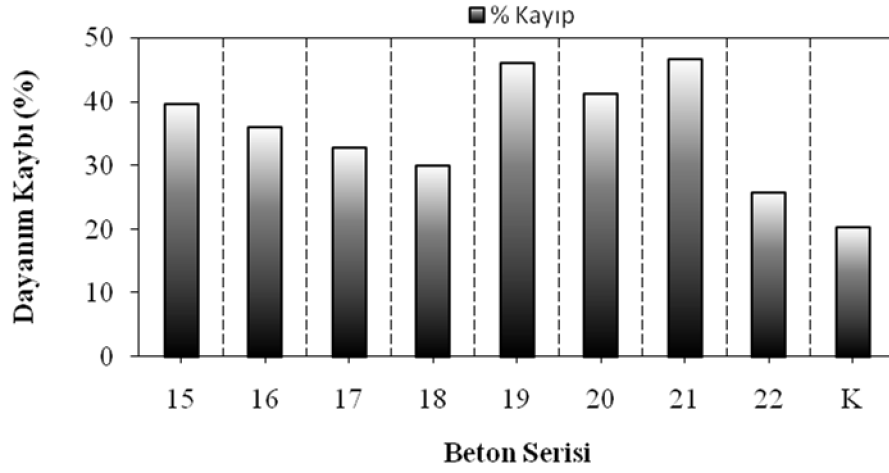
Şekil 5.117 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



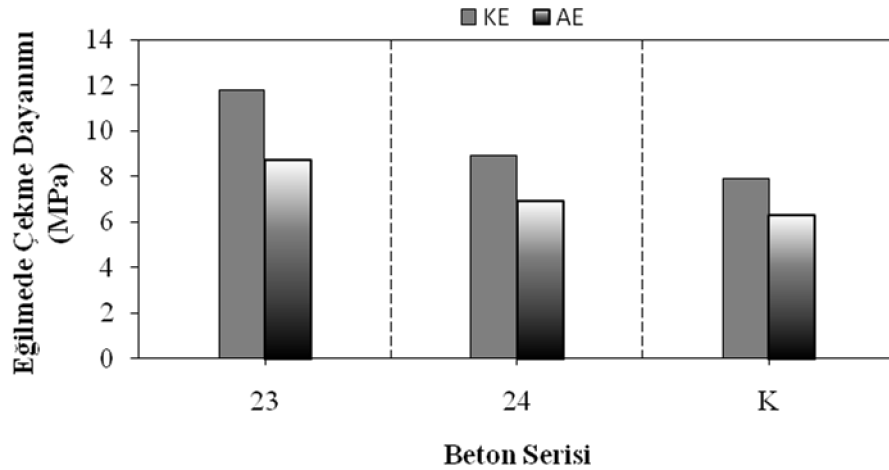
Şekil 5.118 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı



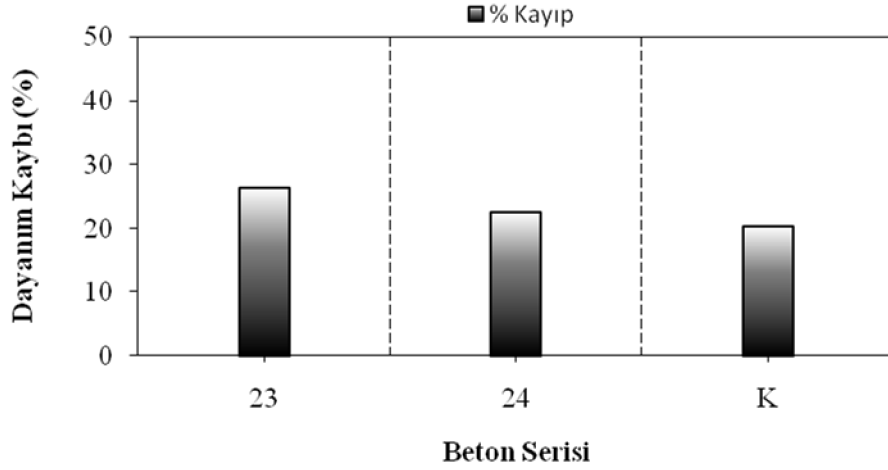
Şekil 5.119 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



Şekil 5.120 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı



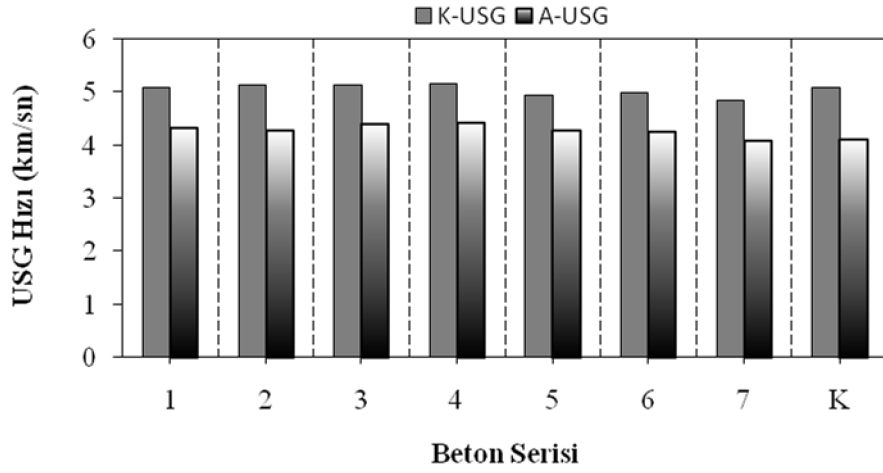
Şekil 5.121 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



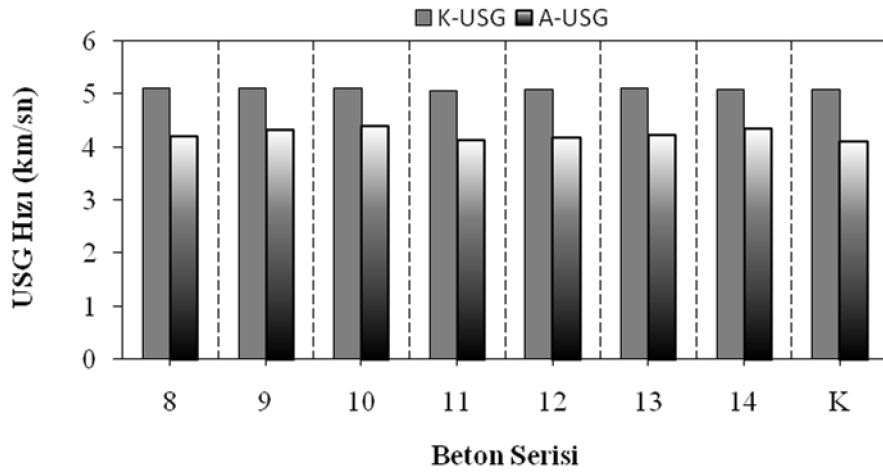
Şekil 5.122 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin %'ce eğilmede çekme dayanımı kaybı

d) USG Hızı Tayini

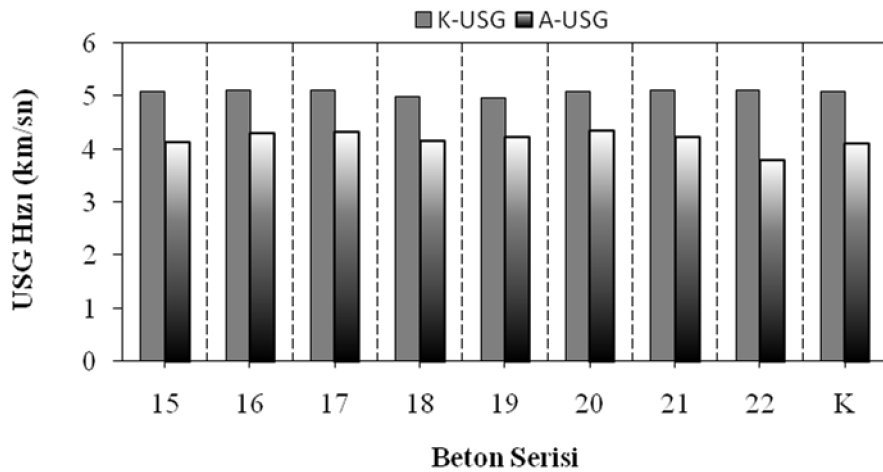
Asit dayanıklılık deneyi sonrası uygulanan USG hızı tayini deneyinden elde edilen veriler Şekil 5.123-126'da görülmektedir. Asit etkisi sonrası tüm numunelerin USG hızlarında düşüş gözlenmiştir. Tüm seriler içinde USG hızı düşüş oranı en yüksek olanı %19.2'lik oranda kontrol KYB serisinde gözlenmiştir. Tüm şekiller birlikte incelendiğinde beton serilerinin diğer durabilite deneylerinde olduğu gibi USG hızı değerlerinin birbirine yakınlık gösterdiği görülmektedir. Asit deneyi sonrası ölçülen USG hızlarında, tüm tekil fiber kullanılan serilerdeki toplam ortalama hız kaybı oranı, diğer gruptaki serilerin ortalama hız kaybı oranlarından daha düşük değerdedir. Tekil fiber içeren serilerin grup ortalama hız kaybı %14.9, %50 karma fiber içeren serilerin grup ortalama hız kaybı ise %16.5 ve %25uzun+%75kısa karma fiber içeren serilerin grup ortalama hız kaybı ise %17.5 olarak hesaplanmıştır. Şekillerde USG hızları verilen her bir FTKYB serisi grubunda karışımında mikro çelik fiber içeren seriler daha yüksek USG hızı değerleri vermiştir. Şekil 5.123'te 4 nolu seri asit etkisi sonrası kontrol KYB serisine göre USG hızı %7.5 oranında daha yüksek çıkarken, Şekil 5.124'te verilen 10, 12 ve 13 nolu serilerde yine kontrol KYB serisine göre sırası ile %7, %1.5 ve %3.1 oranlarındadır. Şekil 5.125'te 17, 19 ve 20 nolu serilerde ise sırası ile %5, %2.7 ve %6 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Şekil 5.126'da ise çok belirgin olmamakla birlikte 23 nolu seri en yüksek USG hızı değerini verirken karışımında %50 oranında (%25P1+%25P2) polipropilen sentetik fiberler bulunduran 24 nolu seri ise en düşük USG hızı değerini vermiştir.



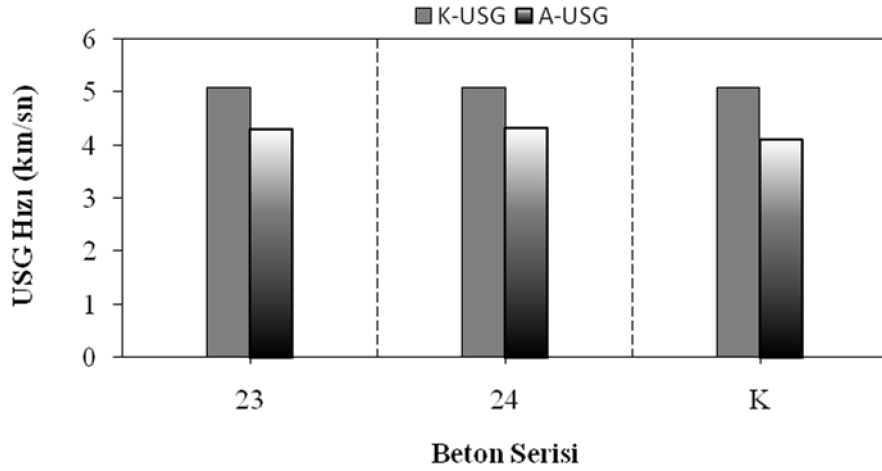
Şekil 5.123 Asit dayanıklılık deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi



Şekil 5.124 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi



Şekil 5.125 Asit dayanıklılık deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi

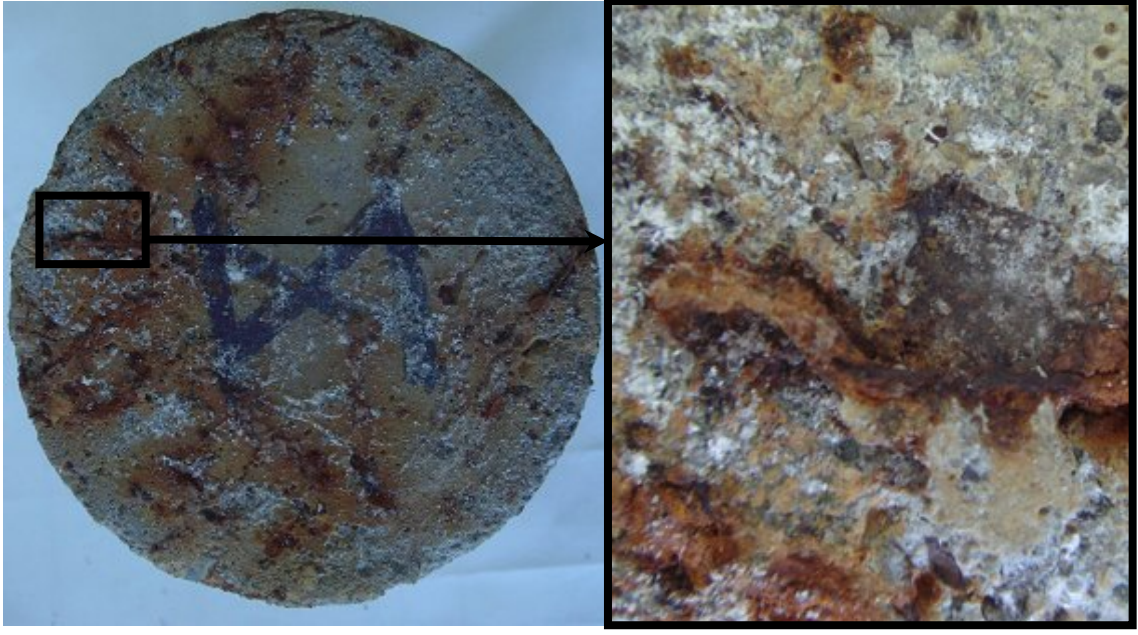


Şekil 5.126 Asit dayanıklılık deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi

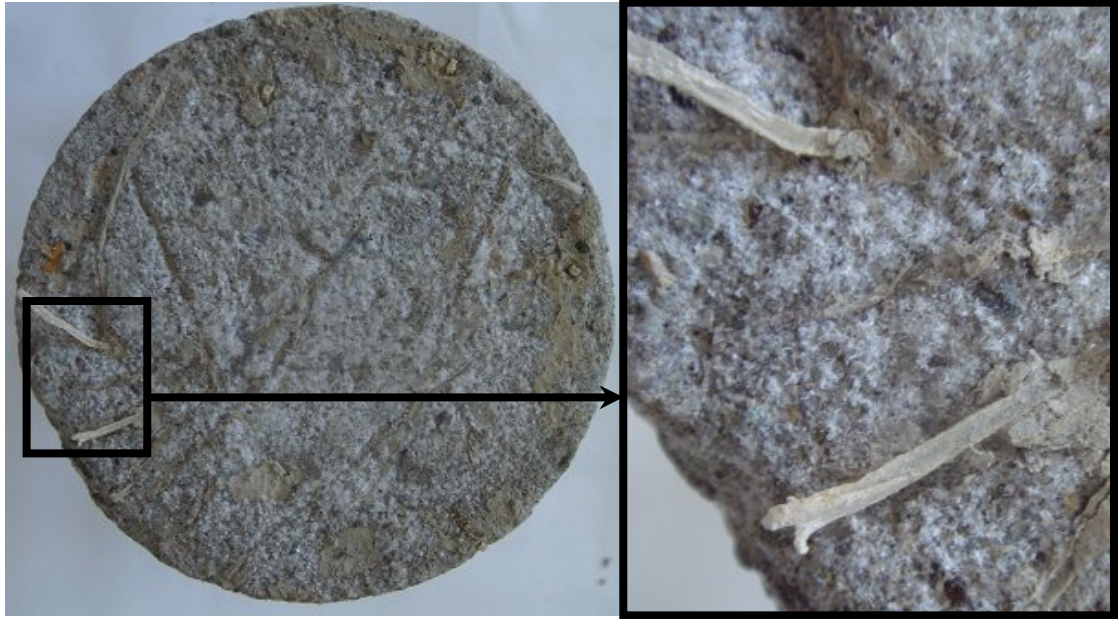
5.3.4 Islanma-Kuruma Deneyi Bulgularının İncelenmesi

FTKYB serileri üzerinde etkili olan bir diğer dayanıklılık deneyi de ıslanma-kuruma deneyidir. Islanma-kuruma deneyinde FTKYB serileri ile fiber içermeyen kontrol KYB serisi 150 çevrime tabi tutulduktan sonra belirtilen beton serilerinin mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir.

Islanma-kuruma deneyi sonrası beton numunelerin durumu incelendiğinde, çelik fiber içeren FTKYB serilerinin yüzeylerinde yoğun bir şekilde paslanma, pamuklanma ve pullanma gözlenirken, karışımında yalnızca polipropilen sentetik fiber içeren serilerin yüzeylerinde ise pamuklanma ve pullanmalar gözlenmiştir. Çelik fiber içeren FTKYB serilerinin yüzey ve yüzeye yakın bölgelerinde bulunan fiberlerde bozulma oranı yüksek düzeylerde iken, karışımında yalnızca polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serilerinin yüzey kısmındaki fiberlerin hiçbir şekilde etkilenmediği gözlenmiştir. Ancak bu fiberlerin beton yüzeyinde olanlarının, pullanmadan dolayı beton numuneden ayrıldığı gözlenmiştir. Şekil 5.127’de çelik fiber içeren silindir beton numunesinde ıslanma kuruma sonrası oluşan yüzey bozulması ve beton yüzeyinde fiber içeren kısmın, yakın pozisyon fotoğraf çekimi ile fiberde meydana gelen bozulma gösterilmektedir. Şekil 5.128’de ise polipropilen sentetik fiber içeren silindir beton serisinin yüzey kısmında meydana gelen bozulma ile yine beton yüzeyinde fiberli kısmın yakın pozisyon çekimi ile durumu gösterilmektedir. Şekil 5.128’de görüldüğü gibi yüzeye yakın ve betona bir kısmı gömülü olan polipropilen sentetik fiberlerde herhangi bir bozulma görülmemekle birlikte, beton yüzeyinden ayrılan fiberlerin yerleri de bellidir. Bu şekillerde net olmasa da beton yüzeyinde de pamuklaşma ve pullanma görülmektedir.



Şekil 5.127 Çelik fiber içeren silindir numunede yüzey bozulması ve fiberlerde meydana gelen paslanma



Şekil 5.128 Polipropilen sentetik fiber içeren silindir numune ve bozulan yüzeyde fiberlerin görünümü

Islanma-kuruma deneyi sonrası beton yüzeylerinde oluşan pamuklaşma Şekil 5.129’da daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Beton yüzeylerinde oluşan pamuklaşma beton yüzeylerini çirkin göstererek görüntü kirliliğine neden olmaktadır. Şekil 5.130’da ise pullanma neticesinde beton yüzeyinde oluşan beton dökülmesi görülmektedir.

Islanma-kuruma deneyi sonrasında numunelere deneyler uygulanmadan önce, numune yüzeyindeki kir, pas, pamuklaşma ürünü ve pullanarak kopma boyutuna gelen beton parçacıkları fırçalanarak temizlenmiş ve numuneler deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5.129 FTKYB’da paslanarak bozulan fiberler ve yüzeyde görünen pamuklanma



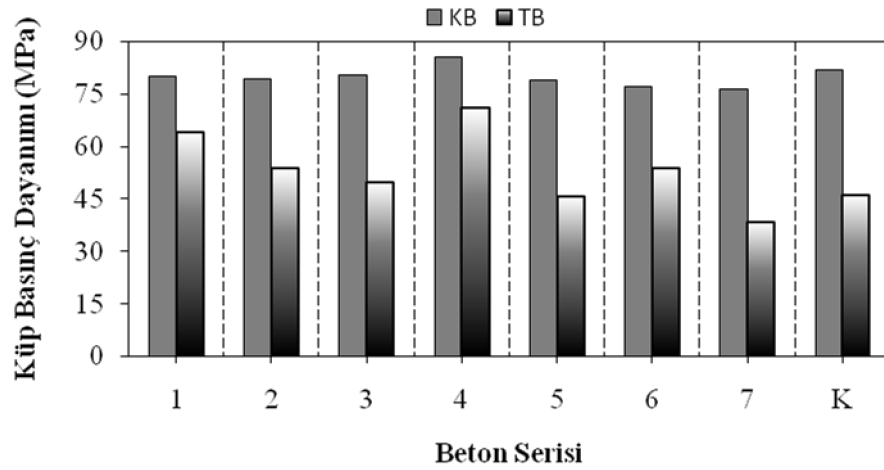
Şekil 5.130 Kiriş numune yüzeyinde pullanma sonucu beton dökülmesi

a) Basınç Dayanımı Deneyi

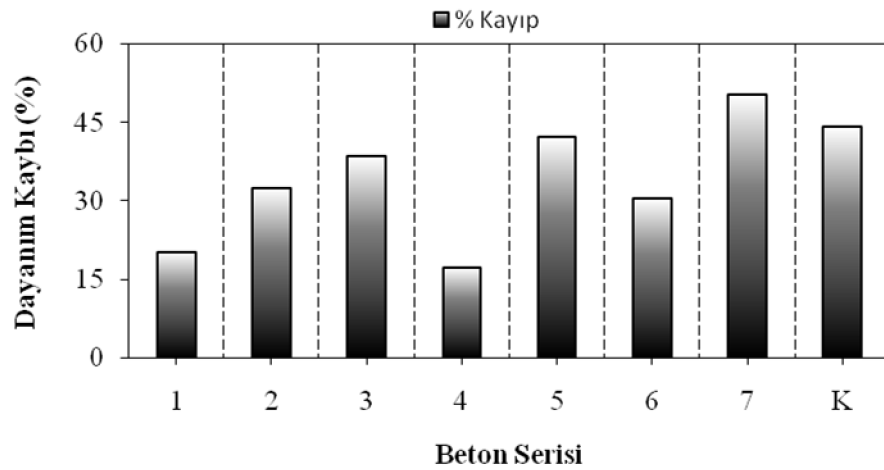
Asit dayanıklılık deneyinde olduğu gibi, FTKYB serilerinin dayanıklılık özelliklerini belirlemek amacı ile uygulanan deneylerden ıslanma-kuruma deneyi sonrasında da numunelerin basınç dayanımlarında belirgin bir farklılık gözlenmiştir. Şekil 5.131-138’de ıslanma-kuruma deneyi sonrası uygulanan basınç dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlar ve oluşan % olarak

basınç dayanımı kayıpları verilmiştir. Genel olarak makro fiber içeren serilerin daha düşük basınç dayanımı değerleri verdiği görülürken bu serilerin aynı zamanda dayanım kayıp oranları da daha yüksek olduğu görülmektedir. Karışımında mikro çelik fiber kullanılan FTKYB serilerinin ise yüksek basınç dayanımı değerleri sergilerken ıslanma-kuruma deneyinden etkilenme oranının da daha düşük olduğu göze çarpmaktadır. Şekil 5.131 incelendiğinde en düşük basınç dayanımı değerine ve en yüksek basınç dayanımı kaybı oranına P2 kodlu fiber içeren 7 nolu serinin sahip olduğu görülmektedir. 7 nolu seri kendi kontrol serisine oranlandığında ise basınç dayanımında %50.1 dayanım kaybı gerçekleştiği görülmüştür. Bu grupta %17.2 oranında basınç dayanımı kaybı ile en düşük dayanım kaybı değerine sahip olan seri ise Ç4 kodlu mikro çelik fiber içeren 4 nolu FTKYB serisi olmuştur. %50 oranlarda uzun ve kısa fiberlerin karma olarak kullanıldığı Şekil 5.133'te ise en küçük basınç dayanımı değerleri toplam hacimde tamamıyla makro fiber kullanılan FTKYB ve kontrol KYB serilerinden elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değerleri ise %50 oranda makro fiberlerin, %50 oranda mikro fiberler ile eşleşerek oluşturdukları karma FTKYB serilerinden elde edilmiştir. Şekil 5.134'e göre, toplam fiber hacminde %50uzun makro ve %50kısa makro fiberlerin kullanıldığı 8, 9 ve 11 nolu karışımlarda ıslanma-kuruma deneyi sonrası basınç dayanımlarında sırası ile %33.2, %27.2 ve %35.5 oranlarında kayıp oluşmuştur. %50 makro ve %50 mikro fiberlerin birlikte karma olarak kullanıldığı 10, 12 ve 13 nolu karışımlarda ise basınç dayanımı kayıpları sırası ile %25, %21.5 ve %20.7'dir. Toplam fiber hacminde %50P1 ve %50Ç4 bulunan 14 nolu FTKYB serisi ise, toplam fiber hacminde %100 oranında P1 kodlu makro fiber bulunan 5 nolu FTKYB serisi ile kıyaslanmıştır. 5 nolu seride meydana gelen dayanım kaybı %42 iken, 14 nolu serideki kayıp %30.6 oranına gerilemiştir. Ayrıca ıslanma-kuruma sonrası, 5 nolu FTKYB serisinin basınç dayanımı hemen hemen kontrol KYB karışımına eşit iken, 14 nolu FTKYB serisinin basınç dayanımı kontrol KYB serisinden %26.4 daha yüksek çıkmıştır. Bu etki fiber sinerjisinden, toplam fiber hacminde iri fiber boyut yoğunluğunun düşürülmesinden ve karışıma çelik fiber ilavesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.135-136'da ise toplam fiber hacminde %25 uzun ve %75 kısa fiberler ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin basınç dayanımları ve ıslanma-kuruma neticesinde dayanımlarında meydana gelen kayıplar verilmiştir. Bu grupta da makro çelik fiberlerin mikro çelik fiberler ile eşleştirilmesi ile oluşturulan karma FTKYB serilerinde basınç dayanımı değeri daha yüksek çıkmıştır. Burada dikkati çeken ise 21 ve 22 nolu FTKYB serilerinin dayanım kayıplarının daha düşük değerlerde olmasıdır. Bu kez toplam fiber hacmine %75 oranda P1 yerine çelik fiberler eklenmesi ile ıslanma-kuruma deneyi sonrasında bu serilerin basınç dayanımında kontrol KYB serisine göre sırası ile %18.8 ve %32.4 oranlarında daha yüksek değerler verdiği görülmüştür. Burada, 21 nolu karışımda P1 polipropilen sentetik makro fiber, yine bir makro fiber olan Ç3 çelik fiber ile karma grup

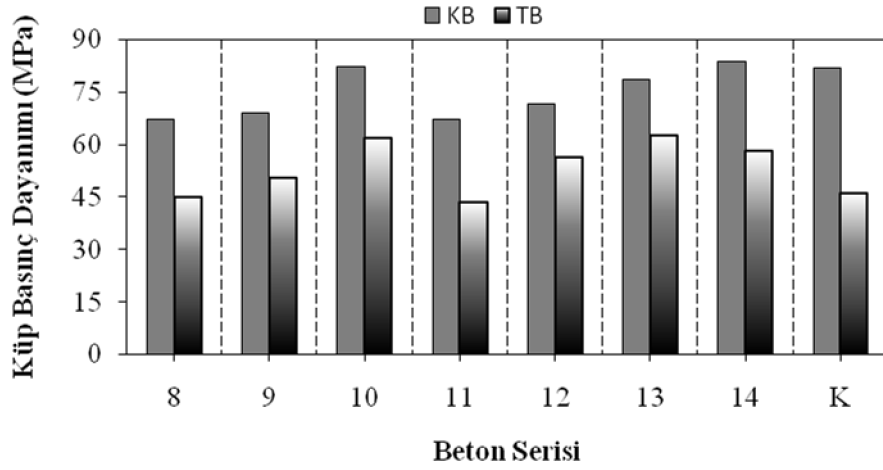
oluşturduğundan dayanım artışı 22 nolu seriye göre daha düşük kalmıştır. Şekil 5.137-138’de sunulan FTKYB serilerinden elde edilen değerlerde bu sonuçları destekler niteliktedir. Bu kez, toplam fiber hacminde bulunan uzun ve boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğu arttırılmış olan 23 nolu seri ıslanma-kuruma sonrası basınç dayanımına tabi tutulduğunda, kendi kontrol serisine göre %45.5 basınç dayanımı kaybı olduğu gözlenmiştir. Aynı FTKYB serisi kontrol KYB serisi ile karşılaştırıldığında ise basınç dayanımı değerinin kontrol KYB serisinden %3.7 oranında daha düşük olduğu gözlenmiştir. 24 nolu seride ise basınç dayanımında %29 oranında kayıp oluşurken, bu seride kontrol KYB serisine göre %30 daha yüksek basınç dayanımı değeri vererek, daha önce polipropilen sentetik fiberli betonlar hakkında gözlenen bulguyu desteklemiştir.



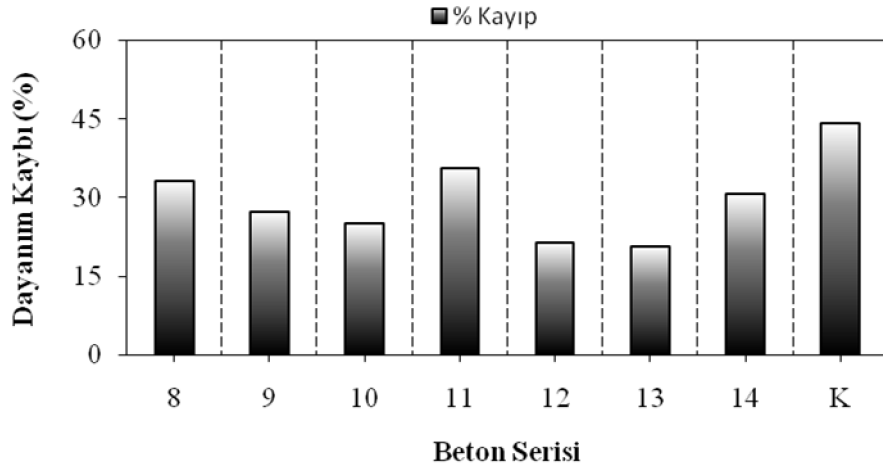
Şekil 5.131 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



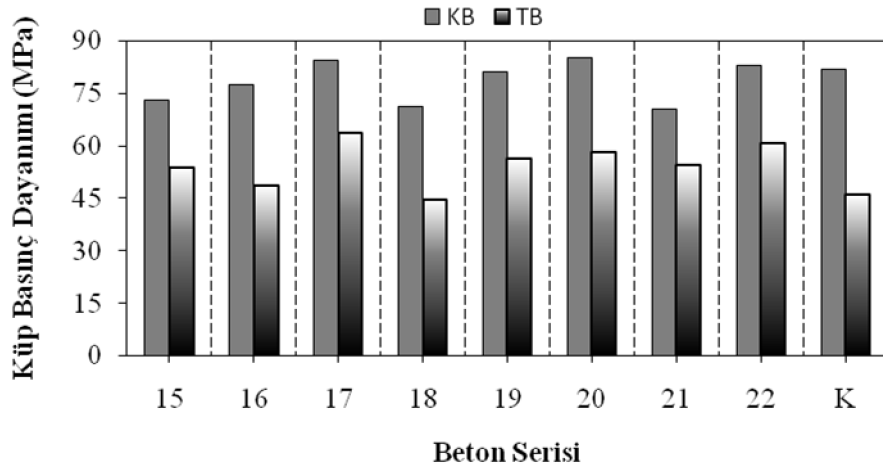
Şekil 5.132 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı



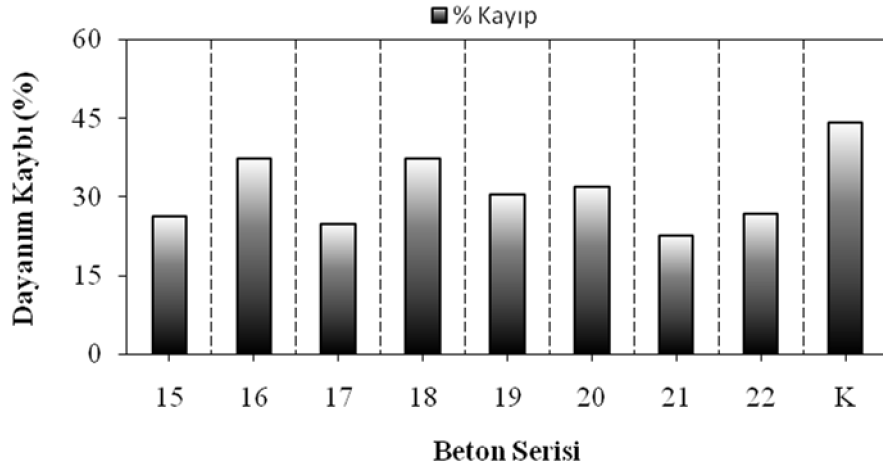
Şekil 5.133 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



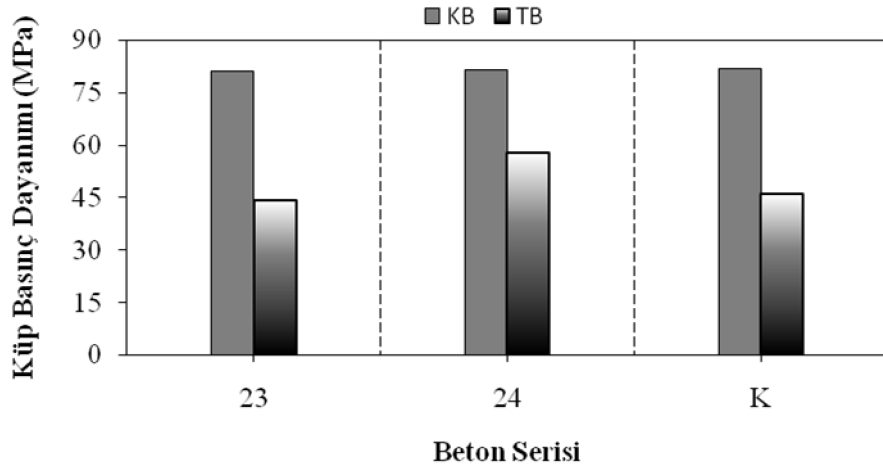
Şekil 5.134 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı



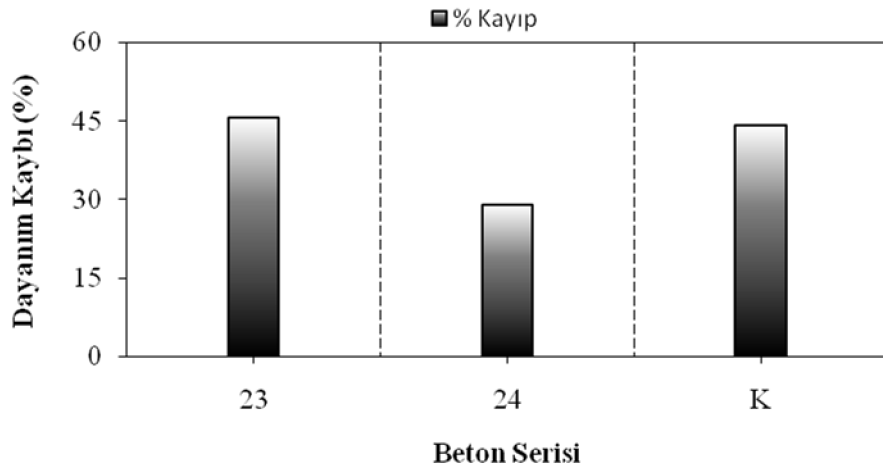
Şekil 5.135 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi



Şekil 5.136 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı



Şekil 5.137 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı değişimi

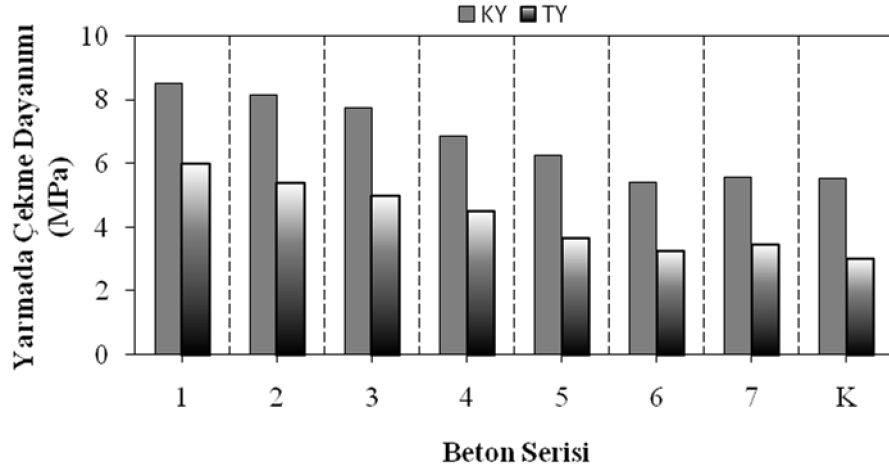


Şekil 5.138 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin basınç dayanımı kaybı

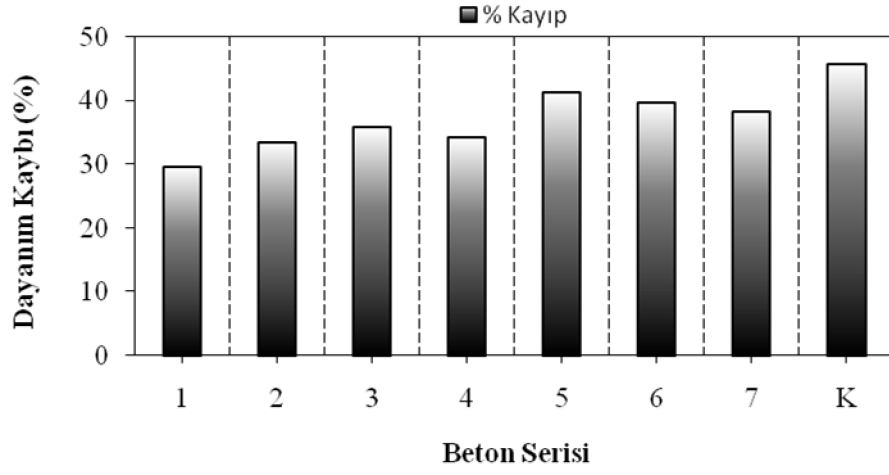
b) Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Islanma-kuruma deneyi neticesinde serilerin yarmada çekme dayanımları ve bu serilerin yarmada çekme dayanım kayıpları Şekil 5.139-146'da verilmiştir. Islanma-kuruma neticesinde tüm beton serilerinin yarmada çekme dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Bu deney neticesinde en düşük yarmada çekme dayanımı değeri kontrol KYB serisinden elde edilmiştir. Toplam fiber hacminde tekil fiber içeren FTKYB serileri ve kontrol KYB serisinin birlikte sunulduğu Şekil 5.139-140 incelendiğinde, ıslanma-kuruma deneyi sonrasında kontrol KYB serisini takiben yarmada çekme dayanımı en düşük değerde olan serilerin polipropilen sentetik fiber içeren 5, 6 ve 7 nolu seriler olduğu görülür. Karışımında tekil çelik fiber içeren serilerde ise en düşük dayanım değeri Ç4 kodlu mikro çelik fiber içeren 4 nolu FTKYB serisinden elde edilmiştir. Karışımında büyükten küçüğe doğru çelik fiber kullanılmış olan ilk 4 serinin ıslanma-kuruma deneyi sonrası yarmada çekme dayanımları, kontrol KYB serisi ile kıyaslandığında bu serilerin sırası ile %99.3, %80.3, % 65.7 ve %50.2 oranlarında kontrol KYB serisinden daha yüksek değerler vermiş olduğu tespit edilmiştir. Bu seriler kendi kontrol serileri ile kıyaslandığında ise yarmada çekme dayanımlarında sırası ile %29.7, %33.5, %35.9 ve %34.2 oranlarında kayıp olduğu görülmüştür. Polipropilen sentetik fiber kullanılan 5, 6 ve 7 nolu FTKYB serilerinin ıslanma-kuruma deneyi sonrası yarmada çekme dayanımları kontrol KYB serisine göre %22.3, %8.7 ve %15 oranlarında yüksek çıkarken, bu serilerin sırası ile dayanım kayıpları %41.3, %39.6 ve %38.2 dir. Şekil 5.141-142'de ise %50 oranlar ile uzun ve kısa fiberlerin karma olarak kullanılması ile oluşturulan FTKYB serileri sunulmaktadır. Genel olarak Şekil 5.141-142 incelendiğinde ıslanma-kuruma deneyi sonrasında bu gruptaki FTKYB serilerinin yarmada çekme dayanımı değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca yine bu gruptaki beton serilerinin dayanım kaybının da bir miktar artış gösterdiği görülmektedir. Tekil fiber içeren FTKYB serilerinin ortalama yarmada çekme dayanım kaybı (%36) ile bu gruptaki FTKYB serilerinin ortalama yarmada çekme dayanım kaybı (%40) karşılaştırıldığında dayanım kaybındaki artış görülmektedir. Diğer taraftan bu gruptaki serilerin yarmada çekme dayanımları ile kontrol KYB serisi kıyaslandığında, kontrol KYB ile bu seriler arasındaki farkın tekil fiber içeren seriden daha düşük olduğu da görülür. 8-13 FTKYB serileri ıslanma-kuruma deneyi sonrasında kontrol betonuna oranla sırası ile %51.8, %43.1, %59.4, %16.5 %39.9 ve %66.3 oranlarında daha yüksek yarmada çekme dayanımı değerleri vermiştir. %50 karma olarak oluşturulan bu gruptaki FTKYB serilerinin yarmada çekme dayanımları her ne kadar tekil fiberli serilerden düşük olsa da bu gruptaki serilerde makro fiberlerin mikro fiberler ile eşleşerek oluşturdukları 10, 12 ve 13 nolu FTKYB serilerinin yarmada çekme dayanımları kontrol betonuna oranla daha yüksek çıkmıştır. Karışımında %50 P1 kodlu polipropilen sentetik makro

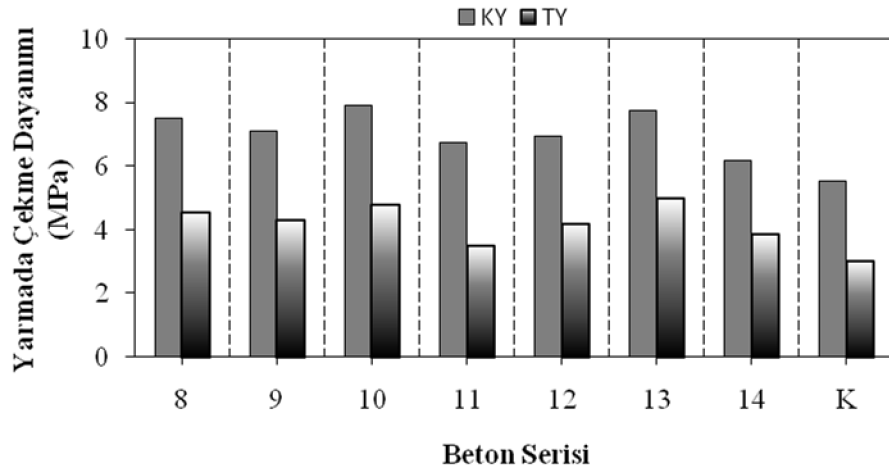
fiber ve %50 Ç4 mikro çelik fiber kullanılan FTKYB serisinin kontrol KYB serisine oranla yarmada çekme dayanımı %29.2 oranında yüksek olduğu hesaplanırken, bu değer %100 P1 kodlu fiberin kullanıldığı 5 nolu karışımda yine kontrol KYB serisine kıyasla %22.3 olarak hesaplanmıştı. Görüldüğü gibi polipropilen sentetik makro fiberin %50 oranda hacimden çıkartılıp yerine %50 oranda Ç4 çelik mikro fiber ilave etmek FTKYB serisinin ıslanma-kuruma deneyi sonrası yarmada çekme dayanımında %30.9 oranında yükselme sağlamıştır. Şekil 5.143-144'te %25uzun+%75kısa karma fiberler ile oluşturulan FTKYB serileri görülmektedir. Bu gruptaki beton serilerinde de %50 karma olarak hazırlanan FTKYB serilerinde olduğu gibi makro fiberlerin mikro fiberler ile eşleştirildikleri FTKYB serileri daha iyi performans sergilemişlerdir. Bu grupta çelik makro fiberlerin kullanıldığı 15, 16 ve 18 nolu karma FTKYB serilerinin yarmada çekme dayanımları ıslanma-kuruma deneyi sonrasında kontrol KYB serisine oranla sırası ile %45, %17.2 ve %49.6 oranlarda daha yüksek çıkarken, makro çelik fiberlerin mikro çelik fiberler ile oluşturdukları 17, 19 ve 20 nolu karma FTKYB serilerinde yine kontrol KYB serisine oranla %72.1, %58 ve %51.5 oranlarda daha yüksek değerler vermiştir. Toplam fiber hacminde %25P1+%75Ç3 fiberlerinin bulunduğu 21 ve %25P1+%75Ç4 mikro fiberlerinin bulunduğu 22 nolu karma FTKYB serileri ise kontrol KYB serisine oranla %42 ve %77.9 daha yüksek yarmada çekme dayanımı değerleri vermiştir. Bu gruptaki serilerin dayanım kayıp oranları ise birbiri ile yakınlık göstermektedir. Toplam fiber hacminde %25'er oranlarda 4 farklı fiberin kullanılması ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin ve kontrol KYB serisinin yarmada çekme dayanımı ve dayanım kayıplarının sunulduğu Şekil 5.145-146'da, karışımında tamamıyla çelik fiberler kullanılan 23 nolu serinin ıslanma-kuruma sonrası yarmada çekme dayanımı değeri kontrol KYB serisine oranla %43.5 oranında artış göstermiştir. Bu serinin dayanım kaybı ise %47.2 oranındadır. Bu seride %75 oranında makro fiber %25 mikro fiber ile kullanıldığı dikkate alınırsa karışımda makro çelik fiberlerin ıslanma-kuruma sonrası yarmada çekme dayanımında daha fazla dayanım kaybına uğradığı anlaşılr.



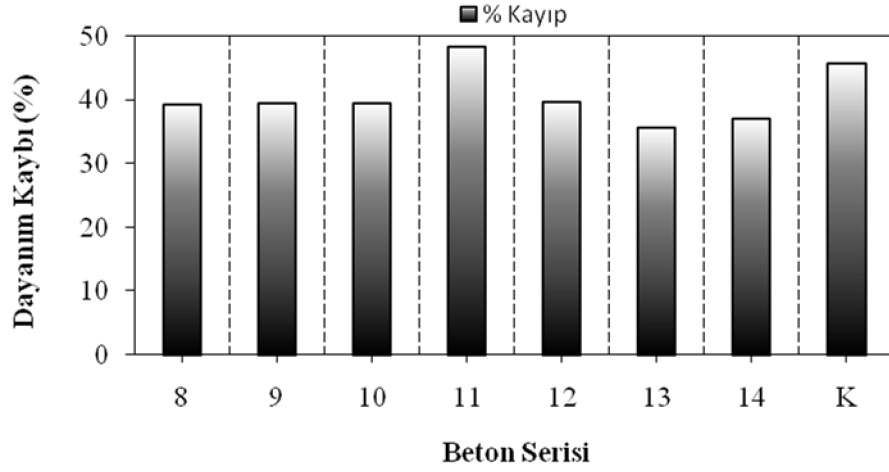
Şekil 5.139 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



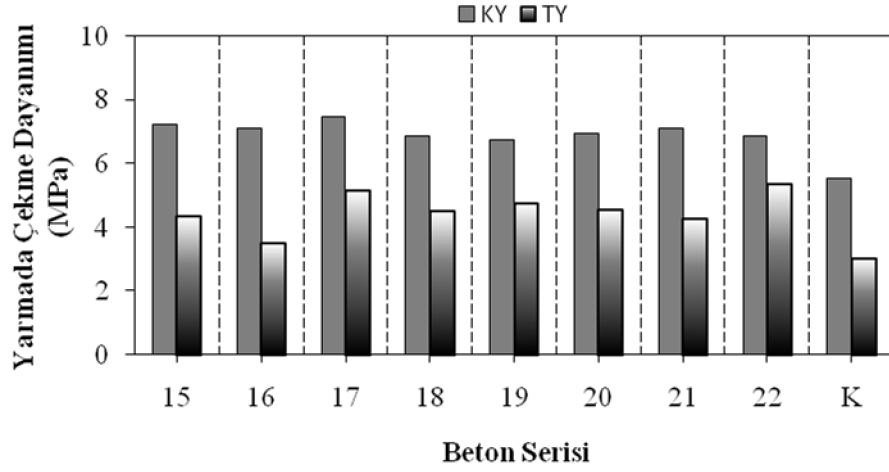
Şekil 5.140 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı



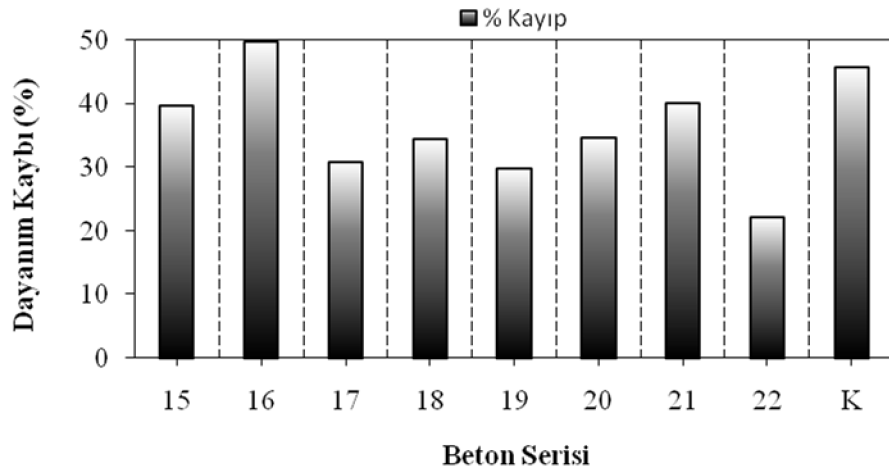
Şekil 5.141 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



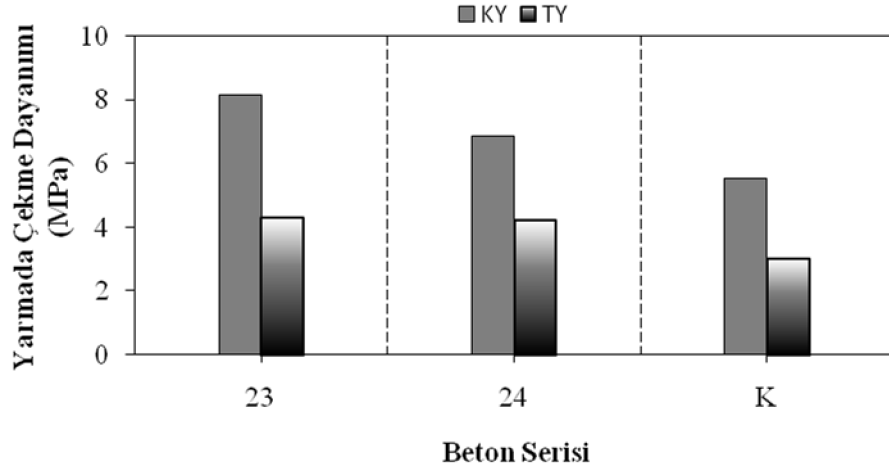
Şekil 5.142 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı



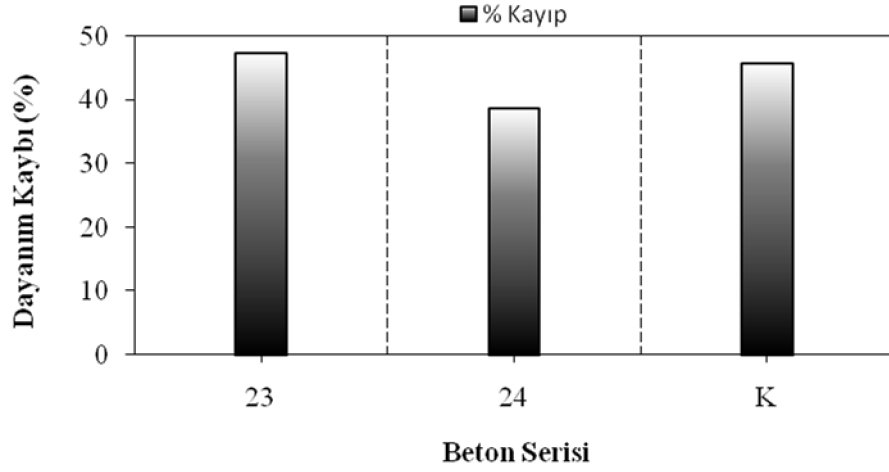
Şekil 5.143 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



Şekil 5.144 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı



Şekil 5.145 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı değişimi



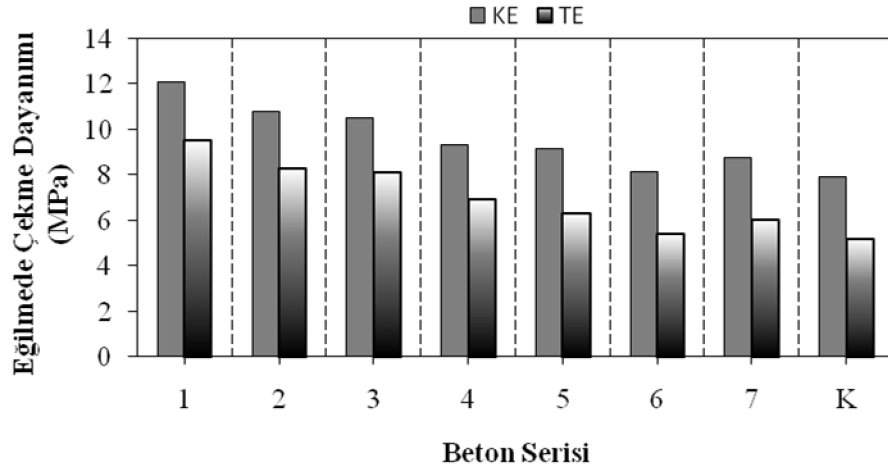
Şekil 5.146 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin yarmada çekme dayanımı kaybı

c) Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

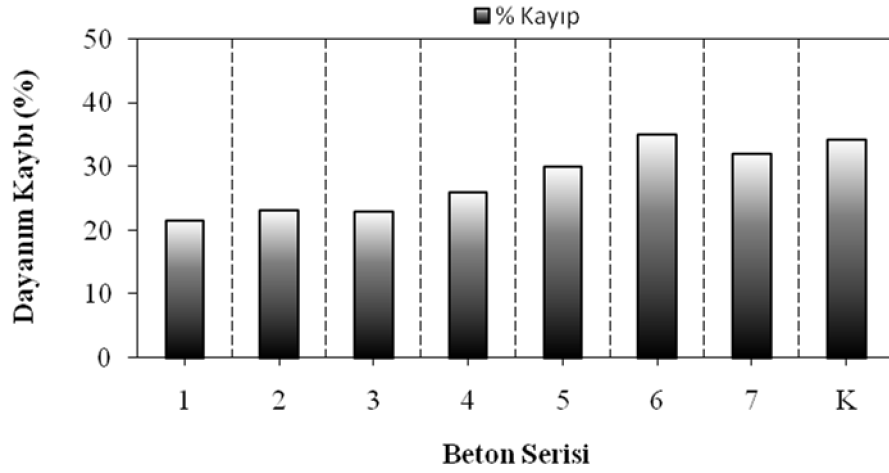
Islanma-kuruma deneyi sonrası beton serilerinin eğilmede çekme dayanımları ve kontrol serileri ile karşılaştırılmaları sonucu eğilmede çekme dayanımlarında meydana gelen % kayıplar Şekil 5.147-153'te verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi tüm beton serilerinin ıslanma-kuruma deneyi sonrasında eğilmede çekme dayanımlarında düşüş oluşmuştur. Şekil 5.147-148 incelendiğinde eğilmede çekme dayanımı değeri en düşük olan serinin karışımında fiber kullanılmayan kontrol KYB serisi olduğu görülmektedir. Kontrol KYB serisi kendi kontrol serisi ile kıyaslandığında ıslanma-kuruma deneyi sonrasında %34.2 oranında eğilmede çekme dayanımı kaybına uğradığı belirlenmiştir. Kontrol KYB serisini takiben eğilmede çekme dayanımı düşük değerler veren seriler, yine polipropilen sentetik makro ve mikro fiberlerin kullanıldığı FTKYB serileri olmuştur. P1 ve P2 fiberlerin kullanıldığı 5, 6 ve 7 nolu seriler

kontrol KYB serisine göre ıslanma-kuruma deneyi sonrasında %21.2, %3.9 ve %15.4 oranlarında daha yüksek eğilmede çekme dayanımı değerleri verirken, bu serilerin kendi kontrol serileri ile kıyaslandığında dayanımlarında sırası ile %30, %35 ve %32 oranlarında kayıpların olduğu belirlenmiştir. Toplam fiber hacminde çelik tekil fiberlerin kullanıldığı (1-4) FTKYB serileri incelendiğinde ise, bu serilerin ıslanma-kuruma deneyi sonrasında kontrol KYB serisine oranla %82.7, %59.6, %55.8 ve %32.7 oranlarında daha yüksek eğilmede çekme dayanımı değerleri verdiği gözlenmiştir. Serilerin içerdiği fiberlerin uzunluk ve boy/çap oranının düşürülmesi ile eğilmede çekme dayanımlarında da düşüşler görülmektedir. Bu serilere ait dayanım kayıpları ise sırası ile %21.5, %23.2, %22.9 ve %25.9 oranlarında olduğu belirlenmiştir. Görüldüğü gibi karışımlarda tekil fiber kullanımında fiber uzunluk ve boy/çap oranının düşürülmesi ile dayanım kayıplarında da artış görülmektedir. %50 oranlar ile uzun ve kısa fiberlerin birlikte kullanılması ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin sunulduğu Şekil 5.149-150 incelendiğinde beton serilerinin ıslanma-kuruma deneyi sonrası eğilmede çekme dayanımlarının tekil fiber kullanılan serilere oldukça yakın olduğu gözlenmektedir. Bununla beraber bu gruptaki çoğu beton serisinin eğilmede çekme dayanımında gözlenen kayıp miktarının tekil fiberli serilerden daha düşük olduğu gözlenmektedir. Özellikle karışımında %50P1 ve %50Ç4 fiberlerinin birlikte kullanılması ile oluşturulan 14 nolu FTKYB serisinin, fiber karışımında böyle bir düzenleme sonucu eğilmede çekme dayanımı %100P1 kullanılan 5 nolu seriye göre %12.5 artış göstermiştir. 5 ve 14 nolu serilerin eğilmede çekme dayanımında meydana gelen dayanım kayıpları ise sırası ile %30 ve %24.7'dir. Görüldüğü gibi polipropilen sentetik fiberin hacimde %50 azaltılarak yerine %50 oranında mikro çelik fiber ilave edilmesi ile dayanımda artış ile birlikte, ıslanma-kuruma deneyi sonrası dayanım kaybında da düşüş meydana gelmiştir. Toplam fiber hacminde %25uzun ve %75kısa fiberlerin birlikte kullanılması ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin sunulduğu Şekil 5.151-152 incelendiğinde ise, yine bu gruptaki beton serilerinin de eğilmede çekme dayanım kayıplarının tekil fiberli FTKYB serilerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Burada da en düşük eğilmede çekme dayanımı değerlerini polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serileri ile kontrol KYB serisi sergilemiştir. 21 nolu FTKYB serisinde %25P1 ile %75Ç3 kodlu fiberlerin; 22 nolu FTKYB serisinde ise %25P1 ile %75Ç4 kodlu fiberlerin birlikte kullanılması ile ıslanma-kuruma deneyi sonrası eğilmede çekme dayanımlarında kontrol KYB serisine göre sırası ile %25 ve %17.3 artış gözlenmiştir. Görüldüğü gibi kontrol KYB ile kıyaslandıklarında, 21 nolu seri %100 P1 kodlu fiberin tekil olarak kullanıldığı 5 nolu seriden daha yüksek eğilmede çekme dayanımı performansı sergilerken, 22 nolu seri daha düşük bir performans sergilemiştir. Bu sonuç ise ıslanma-kuruma deneyi sonrası eğilmede çekme dayanımı için toplam fiber hacminde polipropilen sentetik makro fiberin yüksek miktarda hacim yoğunluğunu düşürmenin negatif bir

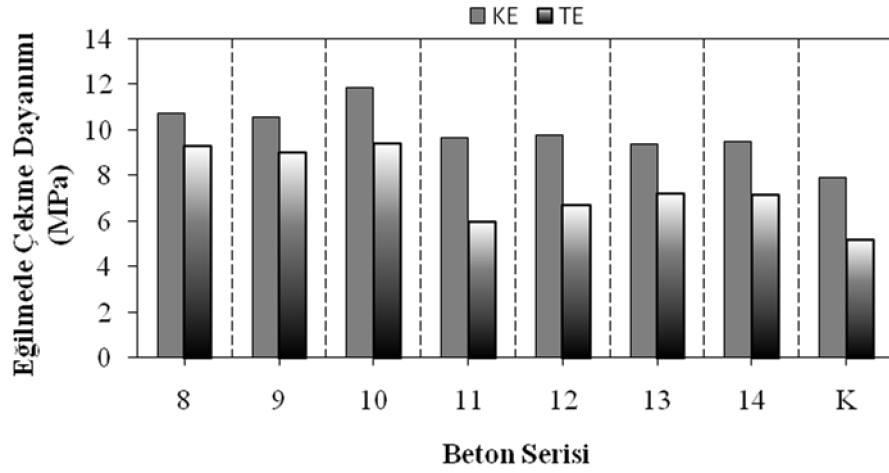
etki oluşturduğunu göstermektedir. Fakat yinede bu gruptaki karma FTKYB serilerinin eğilmede çekme dayanım kayıplarının sunulduğu Şekil 5.152 incelendiğinde, bu serilerin eğilmede çekme dayanımı kayıplarının daha düşük değerlerde seyrettiği görülmektedir. Bu sonucu destekleyen önemli bir bulgu, toplam fiber hacmindeki makro fiber yoğunluğu %75 oranına yükseltile ve mikro fiber yoğunluğu %25 olan, 4 farklı çelik fiberle oluşturulan 23 nolu karma FTKYB serisinin eğilmede çekme dayanımı ve dayanım kaybı sonuçlarıdır. 23 nolu serinin eğilmede çekme dayanımı kontrol KYB serisine göre %45 daha üstün değerde olmasına rağmen serinin kendi kontrol serisi ile karşılaştırılması neticesinde dayanım kaybı oranı %36.4 olarak hesaplanmıştır. Karışımında yine 4 farklı (%25Ç3, %25Ç4, %25P1, %25P2) fiberin kullanıldığı 24 nolu seri incelendiğinde ise, bu serisinde ıslanma-kuruma deneyi sonrası eğilmede çekme dayanımı kontrol KYB serisine göre %23.3 oranında daha yüksek bir değer sergilerken, kendi kontrol serisi ile kıyaslandığında %28.2'lik bir dayanım kaybı sergilediği gözlenmiştir.



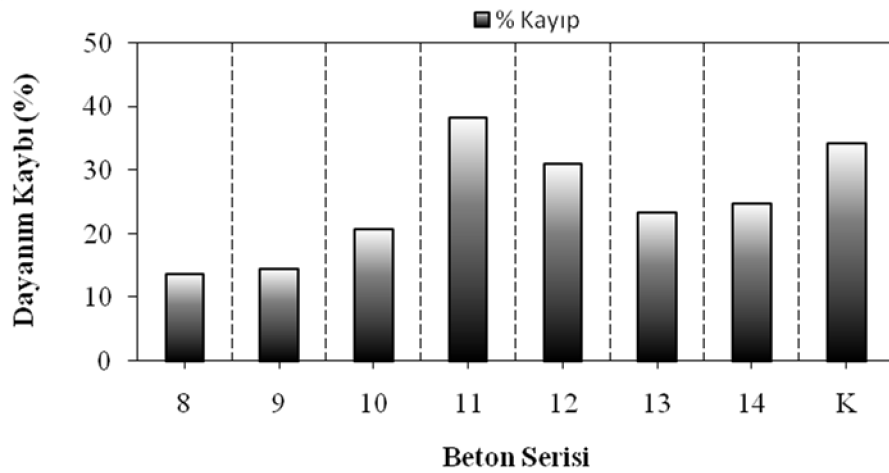
Şekil 5.147 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



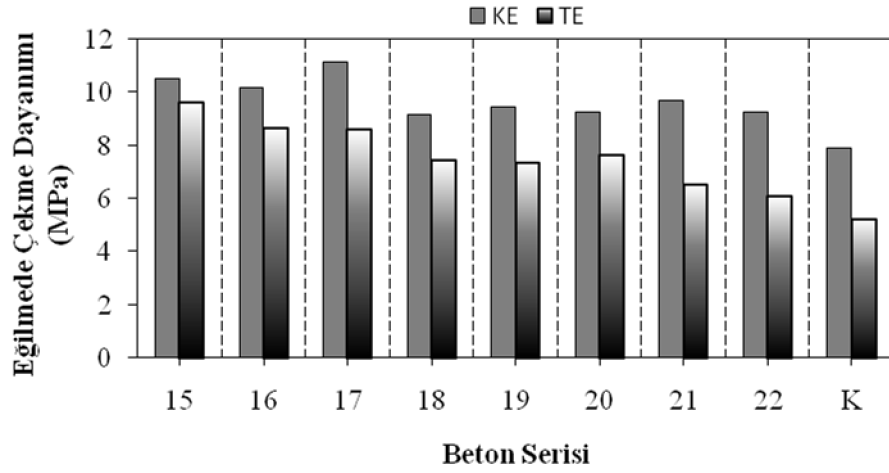
Şekil 5.148 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı



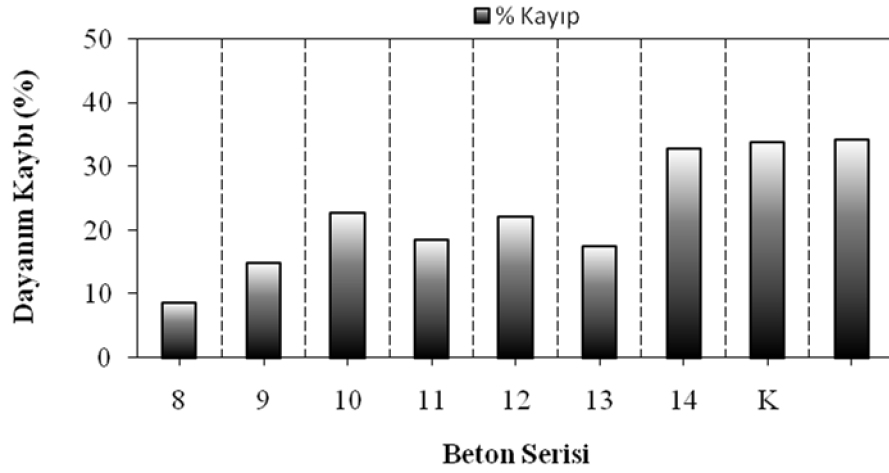
Şekil 5.149 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



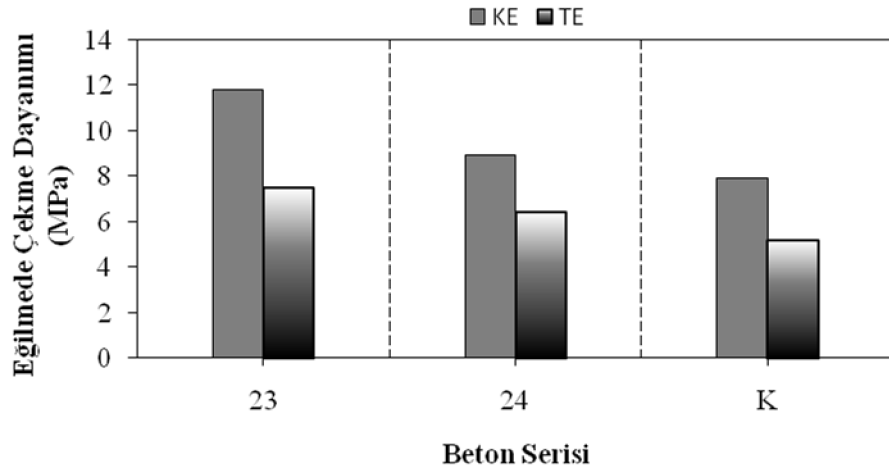
Şekil 5.150 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı



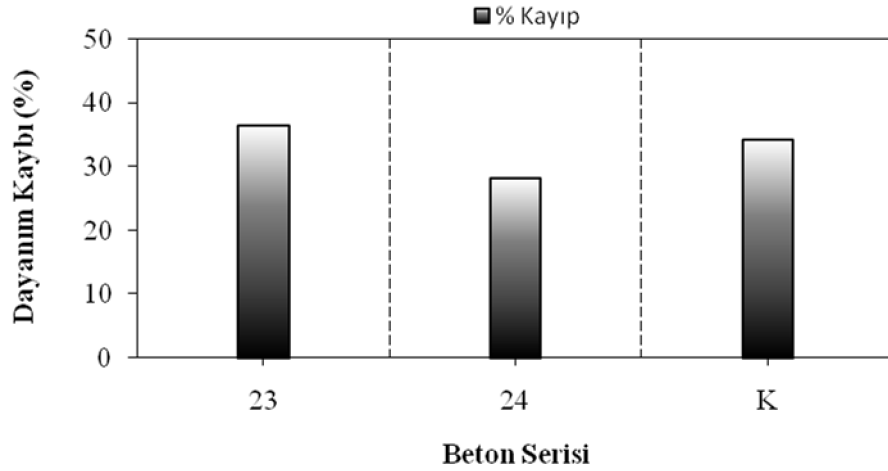
Şekil 5.151 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi



Şekil 5.152 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı



Şekil 5.153 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı değişimi

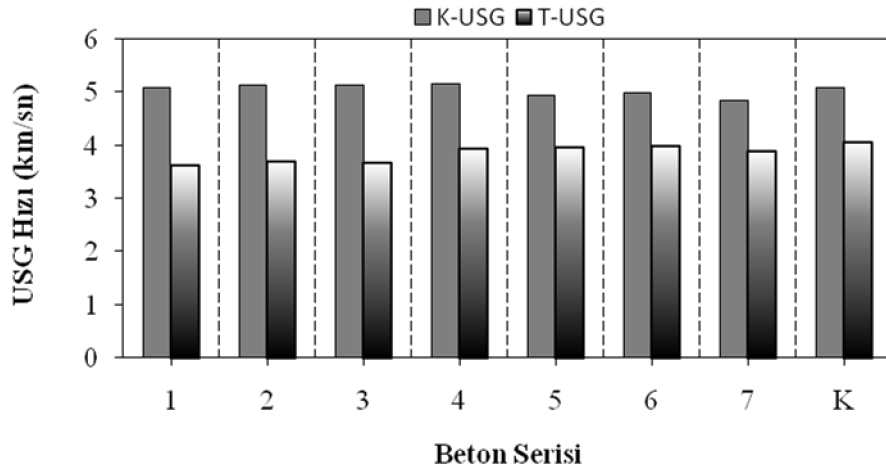


Şekil 5.154 İslanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin eğilmede çekme dayanımı kaybı

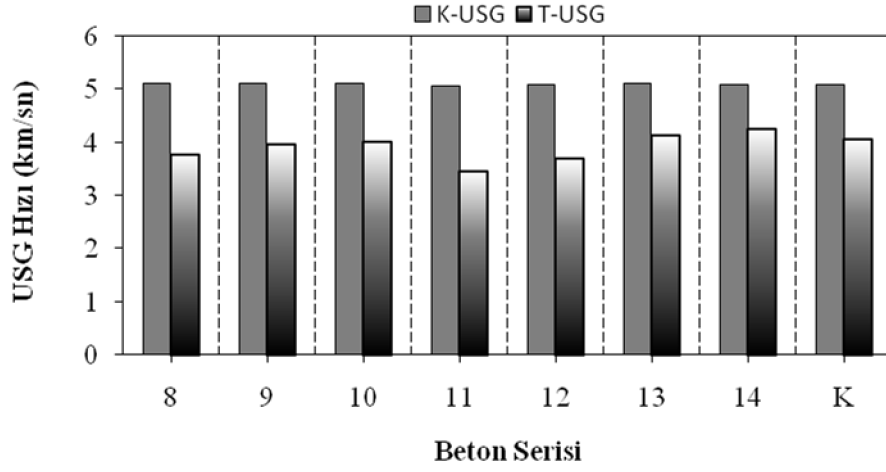
d) USG Hızı Tayini

Dayanıklılık deneyleri sonrasında uygulanan USG hızı tayini deneylerinde serilerin birbirine yakın değerler verdiği gözlenirken, ıslanma-kuruma deneyi sonrası uygulanan USG hızı tayini deneyinde hız farkları daha belirgindir. Şekil 5.155-158’de ıslanma-kuruma deneyi öncesi ve sonrasında ölçülen USG hızı değerleri gruplandırılarak verilmiştir. Şekil 5.155’te ilk grubu oluşturan tekil fiber içeren FTKYB serilerinin USG hızları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. İslanma-kuruma öncesi USG hızları en yüksek olan seriler tekil çelik fiber içeren FTKYB serileri iken, sonrasında ise en yüksek değerler kontrol KYB ve polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serilerinden elde edilmiştir. Bu durumda kendi kontrol serilerine göre en yüksek oranda hız kaybına uğrayan serilerin tekil çelik fiber içeren FTKYB serileri olduğu açıktır. Bununla birlikte bu serilerde, fiber uzunluk ve boy/çap oranının düşmesi ile USG hız kaybı oranı düşüş göstermiştir. Azalan uzunluk ve boy/çap oranında tekil çelik fiber içeren ilk 4 FTKYB serisi sırası ile %29, %27.7, %28.6 ve %23.5 oranlarında hız kaybına uğramıştır. Polipropilen sentetik fiberlerde ise düşük hacimde P2 kodlu fiberin kullanıldığı 6 nolu FTKYB serisinde hız kaybı %20.2 iken, yüksek oranda aynı fiberin kullanıldığı 7 nolu seride hız kaybı %19.6 ya gerilemiştir. Şekil 5.156’da ise %50 oranlar ile uzun ve kısa fiberlerin eşleştirilmesi ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin USG hızları görülmektedir. Bu serilerde ıslanma-kuruma deneyi öncesi USG hızı değerlerinin yakınlık gösterdiği gözlenirken, sonrasında ise hız değerlerinde belirgin bir kayıp söz konusudur. Bu serilerde de makro ve mikro ölçekteki fiberler ile oluşturulan karma serilerin USG hız kayıplarının daha düşük olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda yine toplam fiber hacminde fiber uzunluk ve boy/çap oranının düşürülmesi ile hız kaybı oranında da düşüş gözlenmiştir. Bu grupta en yüksek hız değeri ise %50P1+%50Ç4 karma fiberlerini içeren 14 nolu seriden elde edilmiştir. 5 nolu seride %100 oranında P1

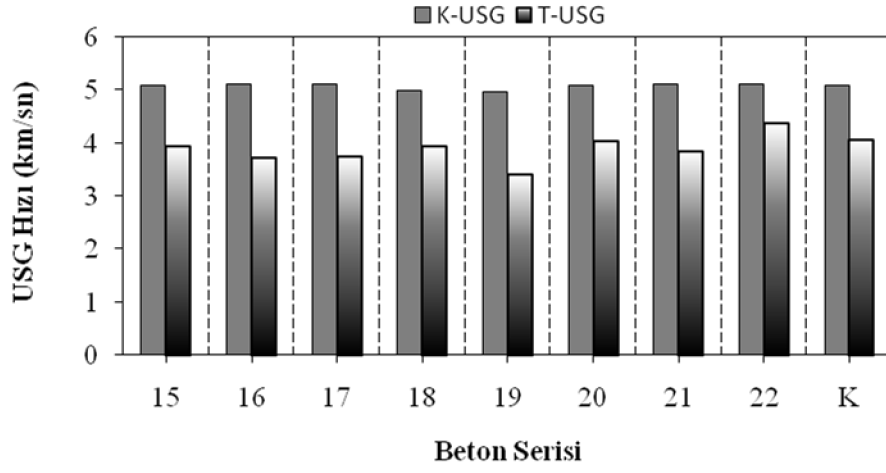
kullanılmışken 14 nolu seride %50 oranda Ç4 çelik mikro fiberin yer değiştirmesi ile hem ıslanma-kuruma öncesi hem de sonrası hız değerlerinde artış gözlenmiştir. Islanma-kuruma deneyi sonrası 14 nolu serideki hız artış oranı, 5 nolu seriye göre %7.3'tür. Dayanım kaybı ise 5 nolu seriye göre %17 düşüş göstermiştir. Şekil 5.157'de seriler, %25 uzun fiber ve %75 kısa fiberlerin eşleştirilmesi ile oluşturulan karma FTKYB serilerinden oluşmaktadır. Bu gruptaki seriler de diğer FTKYB serileri gibi belirgin şekilde ıslanma-kuruma deneyinden etkilenmiştir. İri fiberlerin toplam fiber hacminde %75 oranında düşürülmesi ile çelik fiberlerde meydana gelen USG hızı kayıpları birbirine daha yakın çıkmıştır. Polipropilen sentetik fiber içeren serilerde ise %25P1 ve %75Ç4 mikro fiber ile oluşturulan 22 nolu FTKYB serisinde dayanım kaybı oranı (%14.3) diğer serilere göre düşüş göstermiştir. Buna karşılık P1 kodlu fiberin %75Ç3 makro çelik fiber ile eşleştirilmesi ile oluşturulan 21 nolu serideki hız kaybı %24.8'dir. %25'er oranlar ile 4 farklı fiberin birlikte kullanılması ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin kontrol KYB serisi ile sunulduğu Şekil 5.158'de en yüksek USG hızı değerini karışımında %50 oranda çelik (%25Ç3, %25Ç4) fiberler ile, %50 oranda polipropilen sentetik (%25P1, %25P2) fiberlerin kullanıldığı 24 nolu seriden elde edilmiştir. 24 nolu serinin ıslanma-kuruma sonrası USG hızı değeri %11.5 oranında kontrol KYB serisinden daha yüksek çıkarken, bu grupta en düşük USG hızı değerine sahip olan 23 nolu seri ise kontrol KYB serisinden %8.1 oranında daha düşük değerde çıkmıştır. 24 nolu serinin USG hızı kaybı %11.1 oranındayken, karışımında tamamen çelik fiber kullanılmış olan ve toplam fiber hacminde fiber uzunluk ve boy/çap oranı artırılmış olan 23 nolu seride ise USG hızı kaybı oranı %26.5'tir.



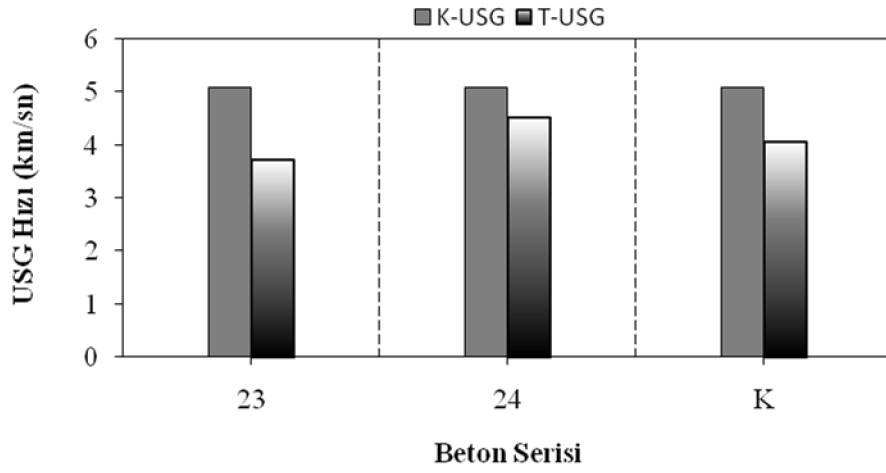
Şekil 5.155 Islanma-kuruma deneyi sonrası tekil fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi



Şekil 5.156 Islanma-kuruma deneyi sonrası %50uzun+%50kısa karma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi



Şekil 5.157 Islanma-kuruma deneyi sonrası %25uzun+%75kısa karma fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi



Şekil 5.158 Islanma-kuruma deneyi sonrası 4 farklı fiber içeren beton serilerinin USG hızı değişimi

5.3.5 Karbonasyon Deneyi Bulguları

Hızlandırılmış karbonasyon deneyi, öncelikle dayanıklılık deneyleri uygulanmayan seriler olmak üzere, donma-çözünme, ıslanma-kuruma, yüksek sıcaklık ve asit etkisine maruz bırakılmış FTKYB seriler üzerinde ayrı ayrı uygulanmıştır. Her bir dayanıklılık deneyine maruz bırakılan FTKYB serileri, gruplandırılarak toplu halde karbonasyon tankına yerleştirilmiş ve aynı koşullar altında deneye tabi tutulmuştur. Bu çalışmada üretilen FTKYB serilerinin tasarımındaki karışım oranı aynı ve karışım çeşitliliğini oluşturan tek unsurun kullanılan fiberlerin fiziksel özellikleri olduğu için, aynı koşullar altındaki FTKYB serilerinin karbonasyon derinlikleri de hemen hemen aynı bulunmuştur.

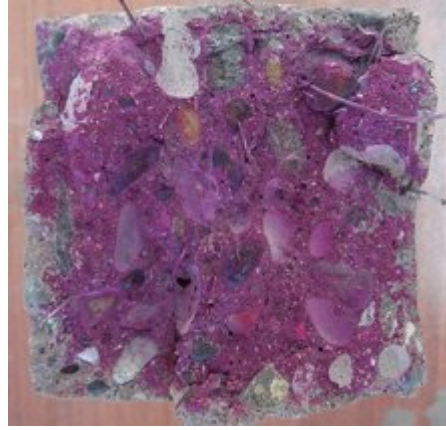
Mekanik özellikler olarak yüksek performans sergileyen FTKYB serileri normal şartlar altında karbonasyon deneyinde de oldukça yüksek bir performans sergilemiştir. durabilite deneyleri uygulanmayan FTKYB serileri 7 günlük hızlandırılmış karbonasyon etkisine tabi tutulduğunda fiber fiziksel özelliklerine bakılmaksızın tüm seriler 1.5 mm ile 2 mm aralığında karbonasyon derinliğine sahiptir. Diğer taraftan, Corinaldesi ve Moriconi [79] 6 ay süre ile normal hava koşullarında beklettikleri numunelerde karbonasyon derinliğinin ölçülemediğini belirtmişlerdir. Şekil 5.159'da normal şartlar altında bulunan FTKYB serisinin karbonasyon deneyi sonrasında, beton iç kısmına kimyasal madde püskürtülmesi sonucu oluşan renklenme gösterilmiştir. Renklenme oluşmayan kısım uygulanan karbondioksitin etkideği derinliği göstermektedir.



Şekil 5.159 Normal şartlar altında bulunan FTKYB serisinin karbonasyon deneyi sonrası görünümü

Donma-çözünme deneyi sonrası numunelerin dış görünümünde çatlak ya da pullanma sonucu dökülmeler gözlenmemiştir. Yalnızca bazı numunelerde, gözle görülebilir derecede yüzey çatlaklarına rastlanmıştır. Donma-çözünme deneyi sonrasında FTKYB serilerinin karbonasyon derinlikleri 5 mm ile 8.50 mm arasındadır. Ancak Şekil 5.160'ta da görüldüğü gibi beton

serilerinde, numunelerin kenarları boyunca düzgün derinlikler elde edilemeyip okunan en yüksek derinlik etkin derinlik olarak kabul edilmiş, diğer birbiri ile yakınlık gösteren derinliklerin ise ortalaması kaydedilmiştir. Bunun sonucunda, donma-çözünme deneyi sonrasında numunelerde 5.35 mm ortalama karbonasyon derinliği elde edilirken, etkin derinlik olarak ifade edilen en büyük derinlik ölçümü 8.50 mm olarak elde edilmiştir. Numunelerin çevresi boyunca düzgün karbonasyon derinliği hatlarının elde edilememesinin nedeni beton yüzeyine yakın kısımlarda çatlakların olasılığıdır. Bu çatlaklar sayesinde ortama verilen karbondioksit, çatlak ve çevresi boyunca ilerlemiştir. Bu yüzden numunelerin kenarları boyunca kimi bölgelerde karbonasyon derinliği daha derinlere inmiştir.



Şekil 5.160 Donma-çözünme deneyi uygulanan FTKYB serisinin karbonasyon deneyi sonrası görünümü

Numunelere yüksek sıcaklık uygulanmasının ardından uygulanan karbonasyon deneyinden elde edilen karbonasyon derinlikleri de donma-çözünme deneyinde olduğu gibi numunelerin kenarları boyunca düzgün bir hat oluşturmamakla birlikte, donma-çözünme sonrası oluşan karbonasyon derinliklerindeki hat farklılıklarının nedeni için yapılan çıkarımları destekler niteliktedir. Uygulanan farklı yüksek sıcaklıklar neticesinde FTKYB serilerinde donma-çözünme deneyinde olduğundan daha fazla çatlaklar oluşmuştur. Bunun neticesinde yine numune iç yüzeylerinde karbonasyon derinliği numune kenarları boyunca farklılık göstermiştir. Bu durum Şekil 5.161’de görülmektedir. Şekil 5.161’de 300°C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış FTKYB serisinde oluşan karbonasyon derinlikleri görülmektedir. Görüldüğü gibi üst kenarda yer yer iç kesimlere doğru ilerleme etkisi olsa da, beton bu yüzeyi üzerine yerleştirildiğinden dolayı bu kenarda fazla bir karbonasyon etkisi gözlenememiştir. Tüm numunelerin asıl etkinin gözlemlendiği diğer 3 kenardan ölçümler yapılarak ortalama değerler kaydedildiğinde 300°C sonrası FTKYB serilerinin ortalama 2.93 mm derinliğe kadar genel bir etki gözlenirken etkin derinlik 12.83 mm olarak ölçülmüştür. 600°C sonrası numunelerin genel

karbonasyon derinlikleri ortalama 7.48 mm iken etkin derinlik 20.66 mm ölçüsüne ulaşmıştır. 600°C sonrası uygulanan karbonasyon deneyi sonuçlarında bir diğer dikkati çeken nokta ise, iç kesimlerde iri agraga tanelerinin etrafında da karbonasyon etkisinin görülmüş olmasıdır. Yüksek sıcaklık etkisi ile genleşen agraga tanesi soğuma sonrasında tekrar büzülerek agraga etrafında boşluk oluşumuna sebep olmasından ve birbirine bağlantılı çatlaklarca karbonasyon etkisinin bu boşluklara taşınmış olmasından kaynaklanmaktadır. 600°C yüksek sıcaklığa tabi tutulan tüm numunelerde benzer netice gözlenmiştir. 900°C sonrasında ise tüm numunelerde bütün alan boyunca karbondioksit etkisi renklenme oluşmaksızın gözlenmiştir.



Şekil 5.161 Yüksek sıcaklık (300°C) uygulanan FTKYB serisinin karbonasyon deneyi sonrası görünümü

Asit etkisine maruz bırakılmış FTKYB serilerinin, karbonasyon deneyi sonrası iç yüzey alanlarında karbonasyon derinliği daha belirgin bir hat oluşturmuştur. Şekil 5.162’de görüldüğü gibi numunenin her kenarı boyunca karbonasyon derinliği sabit bir hat şeklindedir. Daha önce de belirtildiği gibi beton serilerinin karbonasyon tankına yerleştirildikleri yüzeyinde karbonasyon derinliği daha küçük değerlerde çıkmıştır. Bu yüzeyler göz ardı edildiğinde asit etkisi sonrası çelik fiber içeren FTKYB serilerinde karbonasyon derinliği 4.86 mm olarak ölçülürken, karışımında polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serilerinde ise karbonasyon derinliği 4.73 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.162 Asit etkisine maruz bırakılmış FTKYB serisinin karbonasyon deneyi sonrası görünümü

Islanma-kuruma deneyi sonrasında da numunelerin iç yüzey alanlarında düzgün bir karbonasyon derinliği hattı oluşmamıştır. Islanma-kuruma deneyi sonrasında da beton yüzeylerinde bozulma ve çatlaklar gözlenmiştir. Bunun yanında çelik fiber kullanılan FTKYB serilerinde, numunelerin iç kısmında da yer yer paslanma gözlenmiştir. Islanma-kuruma deneyi sonrasında da kesin sabit bir karbonasyon derinliği tesbit edilemezken numunelerin genelinde ortalama 6.75 mm karbonasyon derinliği ölçülürken, etkin derinliğin 19.73 mm'ye kadar ulaştığı gözlenmiştir.



Şekil 5.163 Islanma-kuruma deneyi uygulanan FTKYB serisinin karbonasyon deneyi sonrası görünümü

5.3.6 Rölatif Porozite Deneyi Bulguları

Normal şartlar altında deneylere tabi tutulan FTKYB serileri ile durabilite deneyleri uygulanan FTKYB serilerinin, ölçümler sonucu hesaplanan rölatif porozite değerleri Tablo 5.5-8'de verilmiştir. Rölatif porozitelerin belirlenmesinde, şartları ayrı olan her seri için ayrı kontrol serilerinin rölatif poroziteleri değerlendirilmiştir. Örnek olarak, 300°C yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulan her bir serinin, deney uygulanmadan ve deney uygulandıktan sonra porozite değerleri ölçüldüğü gibi donma-çözünme, ıslanma-kuruma, asit dayanıklılık deneyleri içinde

ayrı değerler hesaplanmıştır. Böylece her bir farklı şart uygulanan beton serisi, yine kendi ile değerlendirilmiştir.

Tablo 5.5'te yüksek sıcaklık deneyi uygulana FTKYB serileri ile yine bu serilerin yüksek sıcaklığa tabi tutulmayan kontrol serilerinden elde edilen porozite değerleri ve bu durabilite deneyi sonrasında FTKYB serilerinde meydana gelen % olarak porozite değişimleri sunulmuştur. Tablo 5.5 incelendiğinde, sıcaklık seviyesinin artması ile porozite miktarında da artma gözlenmiştir.

Tablo 5.5 Yüksek sıcaklık deneyi ile porozite değişimi

Numune No	K	300-P _r	% Değişim *	K	600- P _r	% Değişim *	K	900- P _r	% Değişim *
1	9.13	16.81	-84.12	9.05	23.85	-163.54	9.08	30.95	-240.86
2	9.26	16.56	-78.83	9.33	23.79	-154.98	9.21	31.05	-237.13
3	9.23	16.45	-78.22	9.28	23.28	-150.86	9.26	31.38	-238.88
4	10.03	16.38	-63.31	10.15	23.22	-128.77	9.97	28.85	-189.37
5	11.49	20.85	-81.46	11.77	31.22	-165.25	11.26	38.75	-244.14
6	11.23	15.91	-41.68	11.25	23.12	-105.51	11.27	27.58	-144.72
7	11.26	16.25	-44.25	11.52	23.93	-107.77	11.68	28.88	-147.19
8	9.48	17.18	-81.22	9.31	23.95	-157.25	9.54	31.54	-230.61
9	11.18	20.14	-80.21	11.00	26.11	-137.33	12.14	37.36	-207.64
10	9.56	16.45	-72.07	9.75	22.32	-128.92	9.63	29.42	-205.50
11	10.81	19.08	-76.43	10.07	24.54	-143.76	10.46	34.48	-229.78
12	10.67	17.84	-67.17	10.31	23.23	-125.18	10.39	31.28	-200.91
13	11.89	19.77	-66.23	11.72	23.65	-101.74	12.80	26.24	-104.85
14	9.08	16.29	-79.38	8.94	22.76	-154.57	8.75	29.55	-237.65
15	9.85	17.55	-78.20	9.32	23.66	-153.80	9.84	31.58	-221.10
16	10.63	18.63	-75.22	10.70	26.94	-151.66	11.08	35.11	-216.87
17	11.82	19.81	-67.60	11.32	27.12	-139.53	11.56	35.63	-208.09
18	12.49	21.26	-70.16	12.62	31.44	-149.05	12.65	36.86	-191.48
19	11.62	19.11	-64.46	11.29	26.55	-135.16	11.51	34.48	-199.57
20	11.48	19.21	-67.36	11.71	27.25	-132.73	11.87	34.84	-193.49
21	10.47	17.87	-70.67	10.22	27.25	-166.54	11.86	36.61	-208.60
22	9.20	16.54	-79.84	9.26	24.18	-161.09	9.48	31.65	-233.77
23	9.57	17.58	-83.79	9.56	23.65	-147.43	9.21	26.63	-189.20
24	8.96	15.88	-77.17	9.48	22.85	-141.03	9.64	26.82	-178.20
K	11.56	16.42	-42.00	11.30	22.43	-98.54	11.44	27.29	-138.63

* negatif yüzde oranları porozite değerinde artma olduğunu belirtmektedir.

300°C sıcaklık sonrasında FTKYB serilerinin porozitelerinde, kontrol serilerine göre %41.68-%84.12 oran aralığında artış gözlenmiştir. 600°C sonrasında bu oran %98.54-%166.54 aralığına yükselirken, 900°C sonrasında %104.85-244.14 oran aralığında değişmiştir. Tablo 5.5 incelendiğinde porozite değerlerinin yüksek sıcaklık deneyi sonrasında, kullanılan fiber çeşidine (çelik, polipropilen sentetik) göre değişim gösterirken, fiber uzunluk ve boy/çap oranı, fiber boyut yoğunluğu faktörlerinden etkilendiği de gözlenmiştir. Polipropilen sentetik makro fiberin kullanıldığı FTKYB serilerinde diğer serilere göre daha yüksek porozite değerleri elde edilmiştir. Karışımında mikro fiberler kullanılan ve fibersiz olarak üretilen kontrol KYB

serisinde ise, yüksek sıcaklıklar sonrasında en düşük porozite değerleri elde edilmiştir. Tekil çelik makro fiberlerin kullanıldığı FTKYB serilerinde fiber uzunluğunun düşmesi ile porozite artış yüzdesinde düşüş gözlenirken, fiber uzunluk ve boy/çap oranının oluşturulan karma seriler ile düşürüldüğü karma FTKYB serilerinde, bu düzenleme neticesinde porozite değerlerinde ve dolayısı ile porozite artış oranlarında daha belirgin düşüşler gözlenmiştir.

Donma-çözünme deneyi sonucu poroziteler ve porozitelerde meydana gelen değişimler Tablo 5.6'da sunulmuştur. Donma-çözünme deneyi sonrasında üretilen kontrol KYB serisi ve FTKYB serilerinin porozite değerleri %1.51-28.31 aralığında değişim göstermiştir. Burada ise kullanılan polipropilen sentetik mikro fiber ile üretilen FTKYB serilerindeki porozite artış oranının düşüklüğü dikkati çekmektedir. Benzer şekilde çelik mikro fiberlerin de porozite artış oranları kullanılan makro fiberlerin artış oranlarından oldukça düşük değerlerdedir. Kullanılan makro fiberler ile üretilmiş FTKYB serilerinin porozite değerleri ve artış oranları kontrol KYB serisi ile yakınlık göstermektedir. Fiber uzunluk ve boy/çap oranı ile fiber boyut yoğunluğunun etkisi burada da görülmektedir. Özellikle makro fiberler ile mikro fiberlerin birlikte kullanılarak toplam fiber hacmindeki uzun ve iri fiberlerin boyut yoğunluğunun düşürülmesi ile donma-çözünme deneyi sonrası porozite artış oranlarında, karışımında tekil makro fiber kullanılan serilere göre önemli düşüşler gözlenmiştir.

Asit dayanıklılık deneyi ve ıslanma-kuruma deneyi sonrasında ise porozite değerlerinde beklenmedik bir şekilde düşüş gözlenmiştir. Asit dayanıklılık deneyi ve ıslanma-kuruma deneyi ile kontrol KYB ve FTKYB serilerinin porozitelerinde meydana gelen değişimler sırası ile Tablo 5.7-8'de sunulmuştur. Her iki deney sonrasında da porozite değerlerinde ve dolayısı ile porozite değişim oranlarında her biri kendi kontrol serileri ile karşılaştırıldığında düşüş gözlenmiştir. Richardson [93], yazmış olduğu eserde böylesi bir etkiden bahsederek, asit içerikli sıvının hareket halinde betona zararının yüksek seviyelerde olduğunu belirtirken, statik konumda beton dış yüzeyinde bir miktar erime ile birlikte beton içyapısında ise erime neticesinde oluşan ürünlerin betonun boşluk yapısında bloklama rolü oynayabileceğini belirtmiştir. Çalışmada asit dayanıklılık deneyi etkisini gözlemlemek için, numunelerin fırın kurusu halleri ile 45 gün asitli ortamda bekletildikleri de hesaba katıldığında böylesi bir etkinin gözlenebileceği netlik kazanmaktadır. Benzer şekilde ıslanma-kuruma deneyi ile numunelerin belirli bir çevrimde tuzlu suya maruz bırakmada da benzer sonuçlar alınmıştır. Richardson [93], Mehta ve Monteiro [24] yazdıkları eserlerde, deniz suyunun beton üzerindeki negatif etkilerini anlatırken, betonun kapılar çekim ile tuz adsorbe edebileceğini ve bu sayede içyapıda tuz kristalizasyonu oluşacağını belirtmişlerdir. Çalışmada ıslanma-kuruma deneyinin tuzlu su ortamında yapıldığı ve literatürde yapılan bu açıklamalar göz önünde bulundurulduğunda, bu deney sonrası üretilen betonların boşluk yapısının tuz kristalizasyonu ile tıkanmış olabileceği

görülmüştür. Ayrıca bu deneyde de numunelerin öncelikle tamamen kurutulduktan sonra ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutuldukları da dikkate alındığında belirtilen olasılığın kuvveti artmaktadır.

Tablo 5.6 Donma-çözünme deneyi ile porozite değişimi

Num. No	D-Ç Öncesi P_r	D-Ç Sonrası P_r	% Değişim
1	9.31	11.17	-20.00
2	9.52	10.82	-13.64
3	9.73	11.15	-14.65
4	10.11	10.56	-4.45
5	8.58	11.00	-28.31
6	11.23	12.75	-13.54
7	12.08	12.26	-1.51
8	9.61	11.37	-18.33
9	9.47	10.80	-14.05
10	8.86	10.23	-15.44
11	9.77	12.24	-25.28
12	9.67	10.85	-12.21
13	9.22	11.03	-19.63
14	9.50	11.27	-18.62
15	10.05	11.45	-13.96
16	10.14	11.75	-15.88
17	10.76	11.93	-10.87
18	11.56	13.16	-13.84
19	11.83	13.03	-10.14
20	9.31	10.35	-11.17
21	8.77	11.18	-27.48
22	8.51	9.88	-16.12
23	9.05	10.44	-15.41
24	8.33	9.45	-13.45
K	10.65	12.63	-18.59

Tablo 5.7 Asit dayanıklılık deneyi ile porozite değişimi

Num. No	AD Öncesi P_r	AD Sonrası P_r	% Değişim
1	9.40	4.82	48.66
2	9.72	4.72	51.47
3	9.79	5.23	46.62
4	10.02	5.15	48.62
5	9.03	6.20	31.40
6	12.89	7.02	45.50
7	12.49	7.34	41.22
8	9.71	6.13	36.87
9	9.20	6.97	24.25
10	8.78	5.46	37.80
11	9.56	6.64	30.57
12	9.56	6.81	28.74
13	9.16	6.03	34.13
14	9.13	6.15	32.57
15	9.90	6.56	33.80
16	12.14	6.53	46.16
17	11.74	6.93	41.00
18	12.66	7.12	43.78
19	14.53	6.77	53.43
20	11.50	7.00	39.14
21	8.32	6.05	27.33
22	8.66	6.43	25.76
23	9.08	6.18	31.93
24	9.08	6.29	30.72
K	11.99	7.14	40.47

Tablo 5.8 Islanma-kuruma deneyi ile porozite değişimi

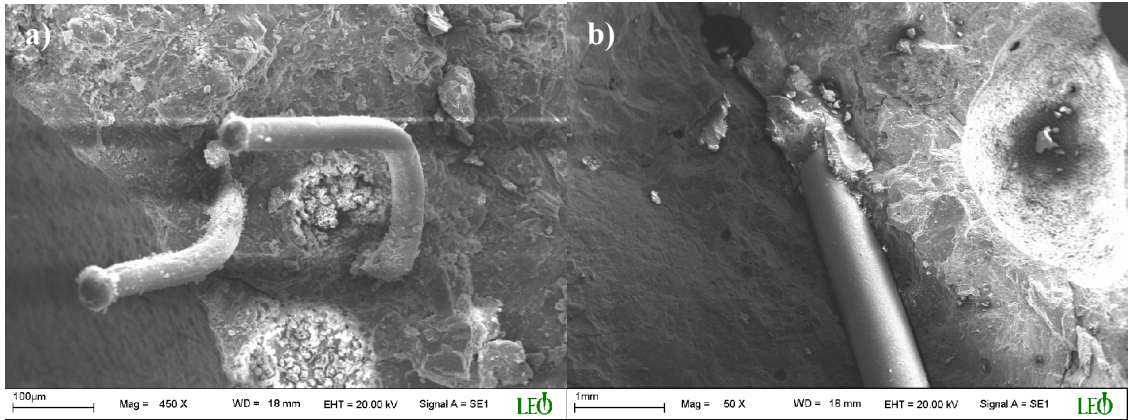
Numune No	I-K Öncesi P_r	I-K Sonrası P_r	% Değişim
1	9.22	6.33	31.39
2	9.33	6.75	27.56
3	9.66	6.35	34.27
4	10.20	6.50	36.25
5	8.12	5.53	31.88
6	12.61	6.41	49.14
7	11.67	5.93	49.16
8	9.50	6.83	28.08
9	9.74	5.92	39.18
10	8.94	6.45	27.88
11	9.97	7.23	27.51
12	9.78	6.78	30.71
13	8.83	5.97	32.37
14	9.88	6.64	32.72
15	10.19	5.22	48.73
16	11.37	4.61	59.49
17	12.21	4.41	63.93
18	13.65	6.54	52.07
19	14.58	6.49	55.53
20	11.42	5.14	55.02
21	8.34	6.39	23.40
22	8.36	6.39	23.53
23	9.02	5.71	36.66
24	9.51	7.00	26.39
K	10.77	5.52	48.73

5.4 SEM Analizi Bulguları

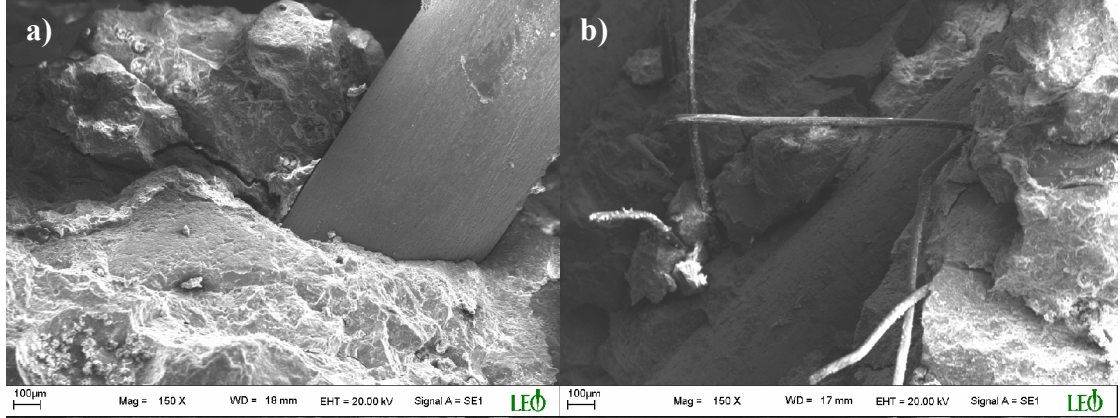
Tez çalışmasında tasarlanan FTKYB serilerinin SEM analizleri, normal şartlar altında bulunan seriler ve durabilite deneylerine tabi tutulan seriler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, normal şartlar altında bulunan FTKYB serilerinin içyapı beton özellikleri ve fiber özellikleri ile durabilite deneyleri sonrasında olası değişimlerin incelenmesi amaçlanmıştır.

Dayanıklılık deneyleri uygulanmamış FTKYB serilerinden elde edilen SEM analizi görüntüleri kontrol numuneleri olarak kabul edilmiş ve bu numunelerle durabilite deneyleri uygulanan FTKYB serilerinin SEM analiz görüntüleri ile karşılaştırılmıştır.

Dayanıklılık deneyleri uygulanmamış FTKYB serilerinin tümünde beton içyapı benzerlik göstermektedir. Aynı zamanda bu serilerde, fiberlerde gözlenen durumda benzerlik göstermektedir. Şekil 5.164'te normal şartlar altında deneylere tabi tutulan FTKYB serilerinden alınmış SEM analiz görüntüleri görülmektedir. Şekil 5.164a'da 450x ölçekte büyütülerek görüntülenen polipropilen sentetik mikro fiber içeren FTKYB serisinin içyapısı görülmektedir. Şekil 5.164b'de ise çelik fiber içeren FTKYB serisinin 50x ölçekte büyütülmüş SEM analizi görüntüsü verilmiştir. Beton içyapısının daha yakından görülebildiği Şekil 5.164a incelendiğinde ve Şekil 5.166, Şekil 5.169, Şekil 5.171 ve Şekil 5.172'de sunulmuş olan durabilite deneyleri sonrası alınmış SEM analiz görüntüleri ile kıyaslandığında içyapının tok, sağlam ve çatlaksız görünümü dikkati çekmektedir. Aynı biçimde fiber görünümünden de, fiberlerin yıpranmamış ve pürüzsüz bir yüzey görüntüsüne sahip olduğu da görülmektedir. Belirtilen bu husus Şekil 5.165'te verilen 150x ölçeğinde alınmış görüntülerde daha açıktır.

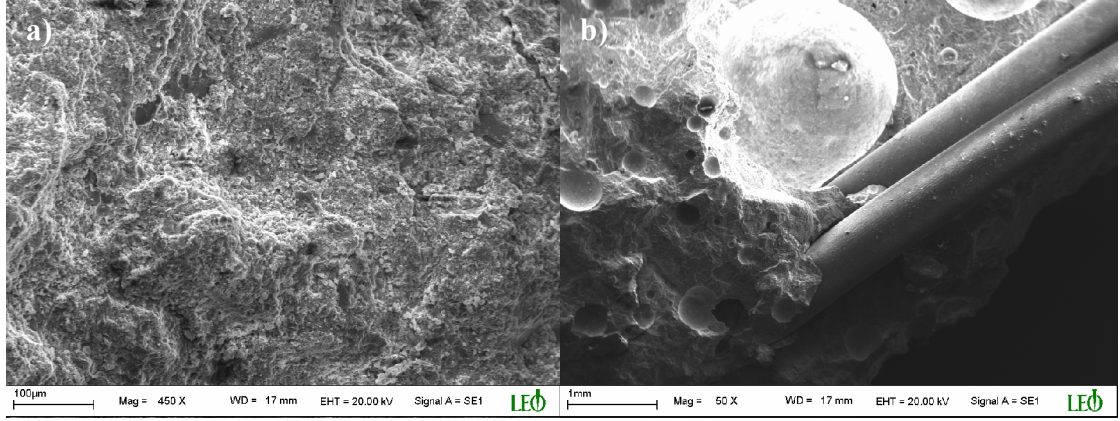


Şekil 5.164 Normal şartlar altında bulunan FTKYB serilerinin SEM analizi görüntüleri, **a)** 450x ile büyütülmüş seri, **b)** 50x ile büyütülmüş seri

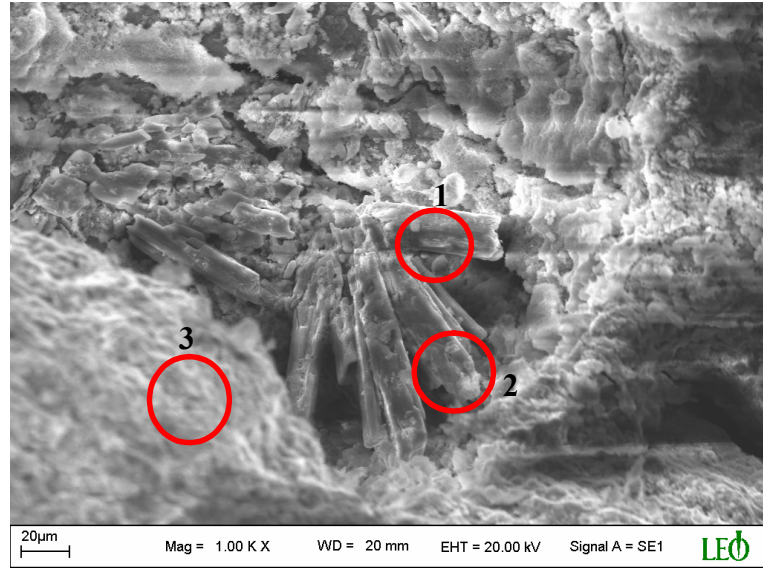


Şekil 5.165 Normal şartlar altında bulunan FTKYB serilerinin SEM analizi görüntüleri, **a)** 150x ile büyütülmüş tekil çelik fiberli seri, **b)** 150x ile büyütülmüş karma fiberli seri

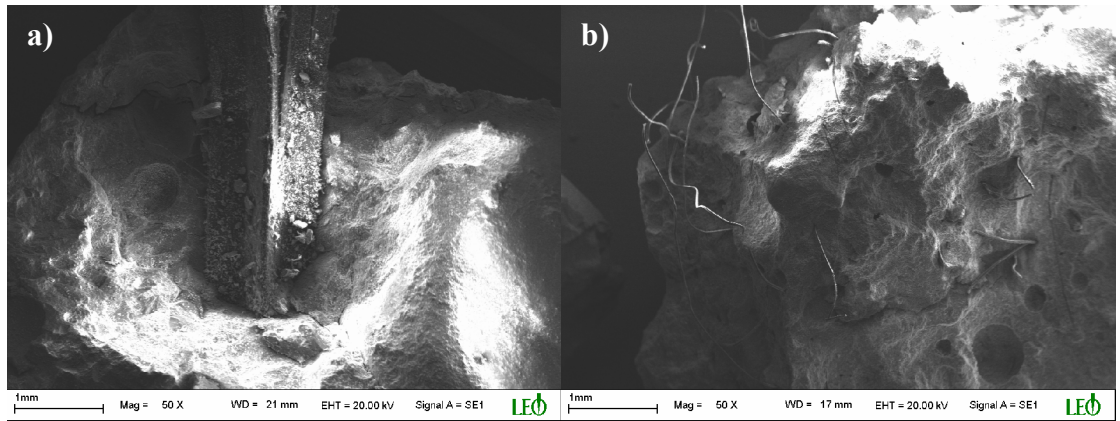
Yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulan FTKYB serilerinden alınan SEM analizleri, kontrol FTKYB serileri ve diğer durabilite deneyleri uygulanmış olan FTKYB serilerinden daha çarpıcı olarak görüntülere yansımıştır. Şekil 5.166'da 300°C yüksek sıcaklığa tabi tutulan FTKYB serisinin içyapısı görüntülenmektedir. Şekil 5.166a'da FTKYB serisinin 300°C sonrasındaki, 450x büyütülmüş mikro yapısı incelendiğinde içyapıda bozukluklar fark edilmektedir. Şekil 5.164a ile Şekil 5.166a karşılaştırıldığında, 300°C sonrasında beton mikro yapısında beyaz rengi andıran görüntünün arttığı görülmektedir. Yapılan araştırmalarda da belirtildiği gibi bu gibi yüksek sıcaklıklarda, hidratasyon ürünlerinin ayrışması ile mikro yapıda değişimler meydana gelmektedir [24,111-112]. SEM görüntü analizlerine ek olarak yapılan EDX analizi neticesinde de elde edilen bulgular, yapılmış araştırmalarla paralellik göstermektedir. Şekil 5.167'de görüldüğü gibi 300°C sonrasında mikro yapı içerisinde yer yer iğne şeklinde yapıların oluştuğu gözlenmiştir. İğneleşme görülen yerlerde 1 ve 2 numaralı alanlar ile bozulma gözlenmeyen 3 numaralı alan karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, 1 ve 2 numaralı bölgelerde özellikle Si olmak üzere Fe, Al gibi maddelerde yüksek miktarda azalma görülürken Ca ve O miktarının yüksek miktarda arttığı gözlenmiştir. Bu ise silikatlı yapıların parçalanmaya başladığının işaretidir. 600°C ve 900°C sonrası alınan SEM görüntü analizleri ve bazı bölgelerden alınan EDX analiz sonuçlarında gözlenen yapıların, 300°C sıcaklıkta oluşmaya başladığı saptanan bu yapılarla aynı olması bu bulgunun kuvvetini arttırmaktadır. Yüksek sıcaklık deneyinde 300°C sonrasında numunelerin fiziksel görünümünde fazla bir değişiklik gözlenmemesi ile birlikte uygulanan mekanik deneyler sonucu dayanımda meydana gelen kayıplar, içyapıda 300°C ile başlayan bu bozulmalar yolu ile oluşmuştur.



Şekil 5.166 300°C sonrası FTKYB serisinin, **a)** Beton mikroyapısı, **b)** Bozulmayan çelik fiberler

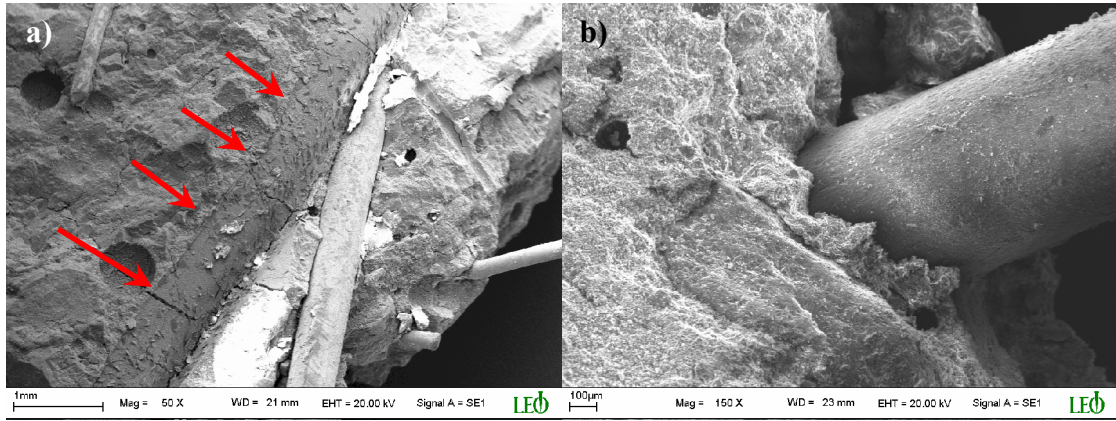


Şekil 5.167 300°C sonrası FTKYB serisinin EDX analiz görüntüsü (1000x)



Şekil 5.168 300°C sonrası FTKYB serisinde bozulmayan polipropilen sentetik fiberler, **a)** Makro fiber, **b)** Mikro fiber

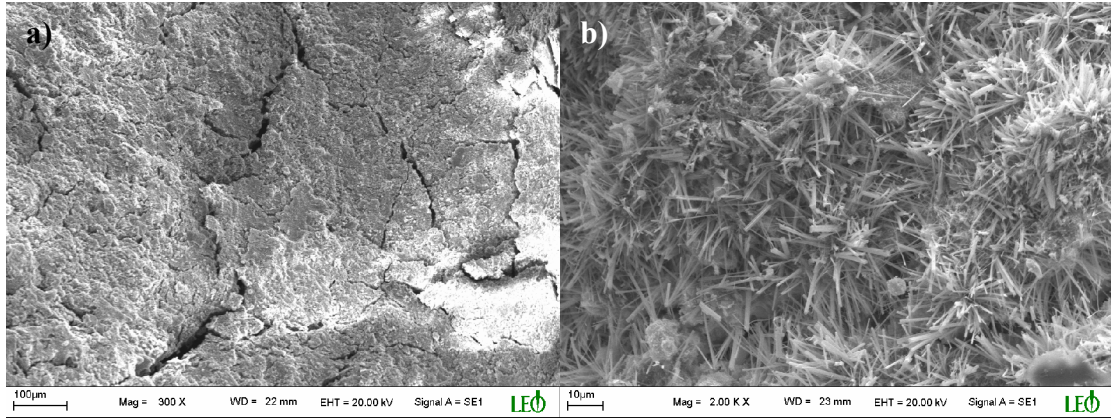
50x büyütülerek çelik fiberlerin de görüntülediği Şekil 5.166b’de, çelik fiberlerin içyapıda 300°C sonrasında da zarar görmediği, pürüzsüz yüzey şekillerinden anlaşılmaktadır. Ayrıca yine Şekil 5.166b’de beton mikro yapısında oluşan boşluklar da dikkati çekmektedir. Şekil 5.168 a ve b’de ise 300°C yüksek sıcaklığa maruz kalmasına rağmen beton içyapısında polipropilen sentetik fiberlerin erimeyerek sağlam bir şekilde kendilerini muhafaza ettikleri görülmektedir. Şekil 5.169’da 600°C sıcaklık sonrası FTKYB serilerinin içyapıları görülmektedir. Genel olarak içyapıda çatlaklar artmış, bozulmaların çoğaldığı görülmüştür. Şekil 5.169a’da, karışımında polipropilen sentetik makro fiber de içeren FTKYB serisi verilmiştir. Şekil üzerine çizilmiş olan oklar boyunca polipropilen sentetik makro fiberin beton içyapısında oluşturduğu yuva görülmektedir. Ancak 600°C sıcaklık sonrası polipropilen sentetik makro fiber eriyerek yok olmuştur. Yinede, polipropilenin molekül yapısındaki tersiyer karbon atomu nedeniyle bu bölgelerde yapılan EDX analizi sonucu fiber bulunmayan bölgelere göre, nispeten yoğun olarak C izlerine rastlanmıştır. Şekil 5.169b’de ise çelik fiber üzerinde de pürüzlenme başladığı dikkati çekmektedir.



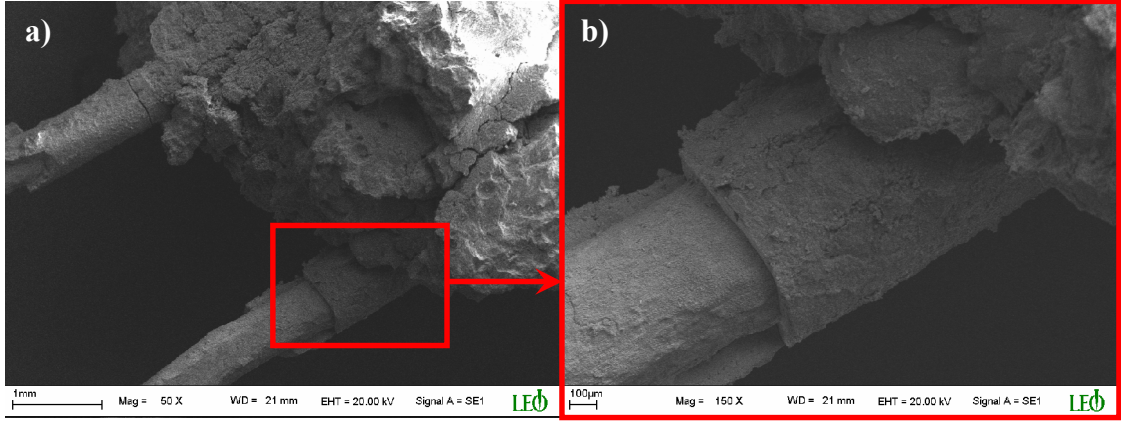
Şekil 5.169 600°C sonrasında FTKYB serisinde mikroyapı ve fiber durumu, **a)** Karma fiber içeren FTKYB serisi mikroyapısı, **b)** Çelik fiberli mikroyapının görünümü

Şekil 5.170-172’de ise 900°C yüksek sıcaklık sonrasında FTKYB’un içyapısında ve fiberlerde meydana gelen bozulmalar görüntülenmiştir. Şekil 5.170a’da FTKYB’un 300x büyütülmüş görüntüsü sergilenmektedir. Bu görüntü normal şartlar altındaki FTKYB serisinden ve 300°C yüksek sıcaklık uygulanmış FTKYB serisinden alınmış olan 450x büyütülmüş görüntülerle karşılaştırıldığında, beton içyapısında ne denli büyük çatlakların oluştuğu anlaşılabılır. Şekil 5.170b’de ise, Şekil 5.170a’da verilen görüntünün herhangi bir yerinden alınarak 2000 kez büyütülmüş mikroyapı görülmektedir. Burada 300°C sıcaklık ile oluşmaya başladığı belirtilen ve beton içyapısının bozulması sonucu oluşan iğne şeklindeki yapılar görüntülenmektedir. Bu oluşumlar üzerinde yapılan EDX analizlerine göre ortamda yüksek

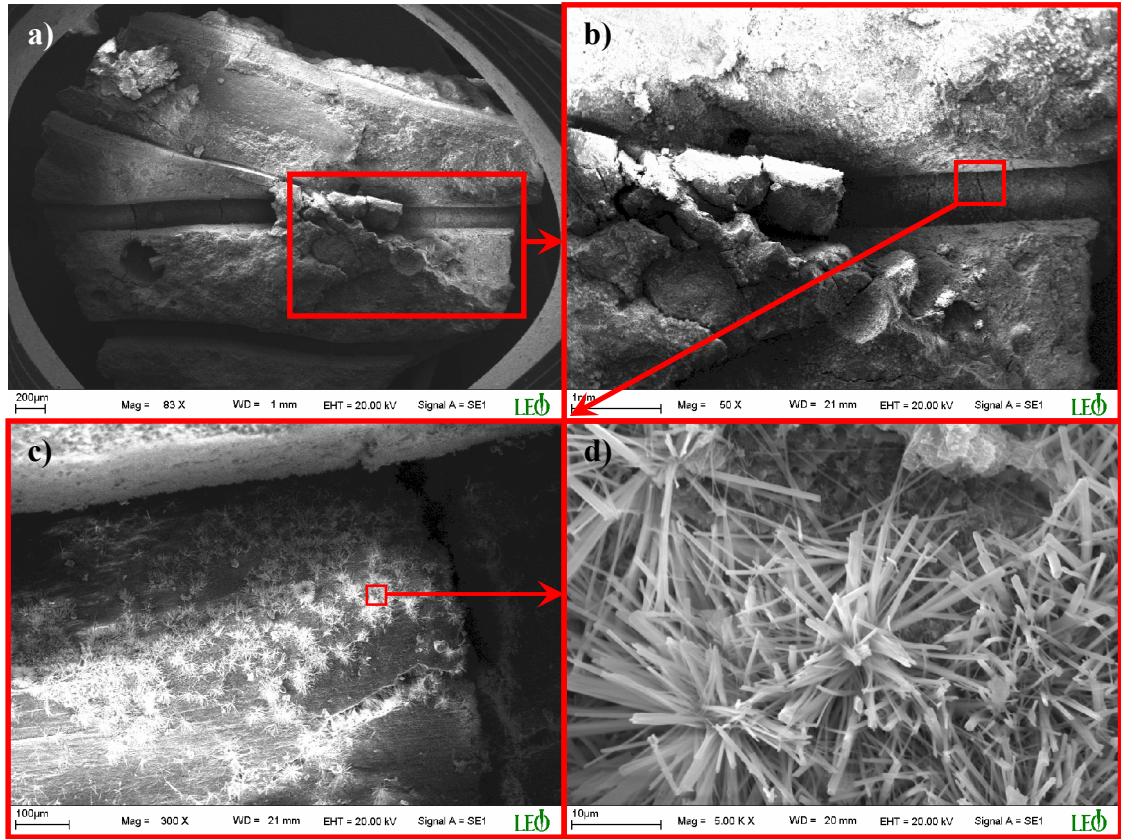
miktarda Ca'un varlığı dikkati çekmiştir. Zira beton bünyesinde C-S-H haricinde başka bir önemli bileşik Ca(OH)_2 'tir. Yapılan araştırma bulgularına göre, çok yüksek sıcaklıklarda Ca(OH)_2 , CaO'e (serbest kireç) dönüşmekte ve oluşan bu yeni yapı tekrar hidrate olarak yaklaşık %44'lük bir hacim artışı meydana getirmektedir [113-114]. Yüksek sıcaklık deneyi gözlemlerine göre numunelerde 900°C sonrası büzüşme ve hacim değişikliklerinin oluşması ve EDX analizi sonucu Ca'un yoğun olarak görülmesi Şekil 5.170b'deki görüntünün böyle bir bozulma olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 5.171'de ise 900°C sonrasında FTKYB bünyesindeki çelik fiberlerde meydana gelen bozulmalar görülmektedir. Şekil 5.171a'da ve Şekil 5.171b'de çelik fiberlerde de yüksek oranda bozulma olduğu ve bu bozulmalar neticesinde fiberlerin yapısında incelmenin olduğu görülmektedir. Benzer biçimde, Şekil 5.172'de polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serisinin 900°C sonrası durumu sergilenmektedir. Şekil 5.172a'da polipropilen sentetik fiberlerin, erime sonrasında beton yapı içerisinde geride bıraktıkları boşluklar görülmektedir. Şekil 5.172b'de ise bu boşluklardan birine odaklanılmış, Şekil 5.172c'de ise boşluk içi görüntülenmiştir. Boşluk içerisinde çatlaklar ve beton içyapının bozulması sonucu bazı oluşumlar görülmektedir. Bu oluşumların daha yakından görüntülediği Şekil 5.172d'de ise, Şekil 5.170'te sunulan beton bozulmaları ile aynı fakat daha yoğun bir şekli olduğu görülmüştür.



Şekil 5.170 900°C sonrası FTKYB'un mikroyapısı, **a)** 300x büyütülmüş görüntü, **b)** 2000x büyütülmüş görüntü

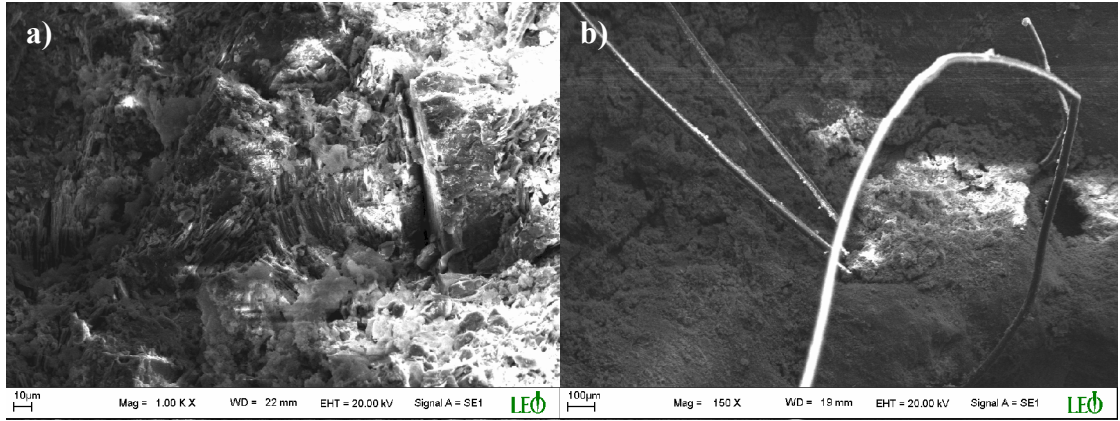


Şekil 5.171 900°C sonrası çelik fiberlerde gözlenen bozulma, **a)** 50x büyütülmüş görüntü, **b)** 150x büyütülmüş görüntü

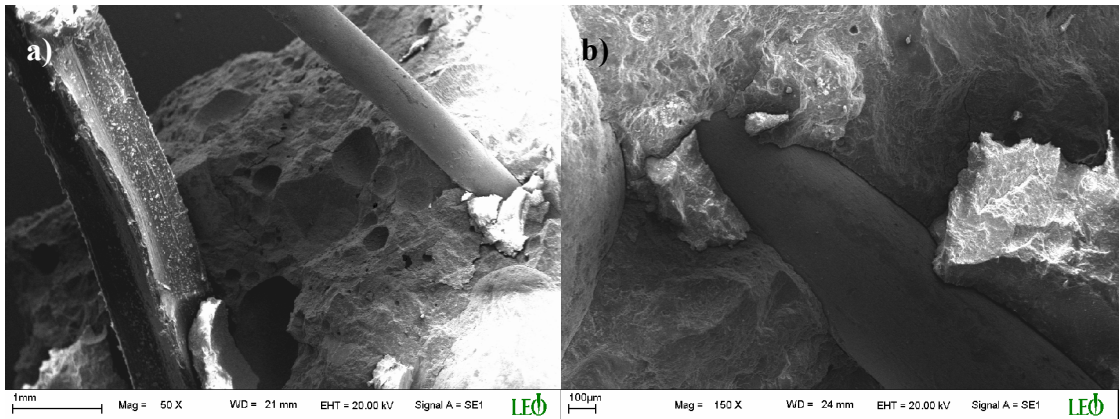


Şekil 5.172 900°C sonrası polipropilen sentetik fiberlerde gözlenen bozulma, **a)** Makro fiberlerin erimesi ile beton yapısında oluşturduğu boşluklar, **b)** Yeri boşalan bir makro fiber oyuğu, **c)** Makro fiber oyuğunun yakından görüntülenmesi, **d)** Oyuuk içerisindeki oluşumlar

Şekil 5.173-174'te asit dayanıklılık deneyi uygulanan FTKYB serilerinin SEM görüntü analizleri sunulmuştur. Şekil 5.173a'da 1000 kez büyütme ile yüzeye yakın bir bölgeden alınmış parçacığın, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile fotoğraflanarak asit etkisinin beton yapı üzerinde oluşturduğu etki gözlenmeye çalışılmıştır. Şekil 5.173a'da görüldüğü gibi asit etkisine maruz bırakılan FTKYB'un yüzeye yakın iç kısmında, beton matrisin pütürlü ve tırtıklı bir yapı gözlenmektedir. FTKYB'da böyle bir yapının, asit saldırısı sonucu belli bir derinliğe kadar oluştuğu düşünülmektedir. Ancak polipropilen fiberlerin asit saldırısından etkilenmediği açıkça Şekil 5.173b'de görülmektedir. Şekil 5.174 incelendiğinde ise FTKYB'un daha derin kısımlarında böyle bir etki söz konusu değildir. Şekil 5.174a'da ve b'de beton içyapısı ve fiberlerin durumu neredeyse normal şartlar altında bekletilmiş numunelerden alınan görüntüler gibidir. Beton matris oldukça sağlam bir görünüm sergilerken, fiberlerde pürüzsüz görünümleri ile daha derinlerde asitten dolayı negatif bir etkinin olmadığını sergilemektedirler.



Şekil 5.173 Asit dayanıklılık deneyi sonrası FTKYB'un içyapısı, **a)** Yüzeye yakın derinlikten alınan görüntü (1000x), **b)** Aynı numune üzerinden fiberler ile alınan görüntü



Şekil 5.174 Asit dayanıklılık deneyi sonrası FTKYB'un içyapısı, **a)** Çelik ve polipropilen sentetik fiberli matris, **b)** Beton matris içinde çelik fiberin görünümü

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar ve daha sonraki yapılacak çalışmalar için öneriler kısaca bu bölümde verilmiştir.

6.1 Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

❖ Tekil fiber kullanılan serilerde, kullanılan fiber boyu, boyutsal oranı ve karışım içindeki fiber yoğunluğunun değişmesi ile taze beton özelliklerinde değişim gözlenmiştir. En iyi taze beton özellikleri çelik mikro fiber kullanılan karışımdan elde edilirken, FTKYB karışımında karma olarak hazırlanan serilerde de taze beton özellikleri kontrol betonuna yakın sonuçlar vermiştir. FTKYB karışımlarında 35 mm'den daha uzun fiber kullanılması taze beton özelliklerinde yüksek oranda performans düşüklüğü meydana getirmiştir.

❖ Toplam fiber hacminde karma fiberli karışımlar oluşturularak makro fiberlerin mikro fiberler ile kullanılması sonucu, karışım içerisinde uzun ve boy/çap oranı yüksek fiberlerin yoğunluğunun düşmesi ile taze beton özelliklerinde iyileşme gözlenmiştir.

❖ Karma fiberli serilerde yüksek oranda (%75) makro fiberlerin yoğunluğunun düşürülmesi yine uzun ve boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğu düşmesi ile bu serilerin taze beton özellikleri daha üstün çıkarken, mekanik özelliklerde yüksek miktarda performans kaybına neden olmuştur.

❖ Genel olarak makro tekil fiber içeren serilerde L-kutusu deneyi 3, 2, 1 donatı engeli ile ve donatı engeli olmaksızın denenmiştir. Sonuçta donatı sıklığının azalması ile geçiş yeteneğinde artış, tıkanma riskinde ise azalma görülmüştür. Kullanılan donatı sıklığından çok daha büyük fiber kullanımı durumunda her ne kadar karışım kıvamı iyi, akma ve yayılma yeteneği yüksek de olsa tıkanma meydana gelmiştir. Donatı ile birlikte fiber takviyesi kullanımı durumunda, kullanılacak fiberin donatı sıklığına göre tercih edilmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır.

❖ Çalışmada üretilen tüm beton serileri, kendi grupları içerisinde aynı yaşlarda benzer basınç dayanımları sergilemiştir. Tekil fiber kullanımında fiber uzunluk ve boy/çap oranının düşmesi ile karma fiber kullanımında uzun ve boy/çap oranı yüksek fiber yoğunluğunun düşmesi ile basınç dayanımında artma meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri (84.34 MPa) Ç4 kodlu mikro çelik fiberin tekil olarak kullanıldığı 4 nolu FTKYB serisinden elde edilirken, karma fiberli serilerde ise makro ve mikro fiberlerin birlikte oluşturdukları serilerden elde edilmiştir.

❖FTKYB serilerinin çekme dayanımları kontrol KYB serisine göre oldukça yüksek çıkmıştır. Toplam fiber hacminde kullanılan tekil fiberlerin uzunluk ve boy/çap oranının düşürülmesi ile çekme dayanımlarında da düşüş gözlenmiştir. Toplam fiber hacminde fiberlerin karma olarak kullanımları sonucu çekme dayanımları, fiberlerin tekil olarak kullanımı ile oluşturulan serilerden yüksek olduğu gözlenmiştir. En yüksek çekme dayanım değerleri 4 çelik fiberin %25'er oranlar ile birlikte kullanılması ile oluşturulan (23) karma FTKYB serisinden elde edilmiştir.

❖Karışımlarda tekil olarak polipropilen sentetik fiber kullanımı yerine değişen oranlarda bu hacme çelik fiberler ilave edilmesi ile oluşturulan karma FTKYB serilerinin çekme dayanımlarında gelişme meydana gelmiştir.

❖USG hızı tayini deneyi neticesinde çelik fiber içeren tüm FTKYB serilerinin kontrol KYB serisinden yüksek değerler verirken, polipropilen sentetik fiber kullanımı USG hızında düşüşe sebep olmuştur. FTKYB serilerinde çelik fiber kullanımı neticesinde USG hızları birbirine yakınlık gösterirken, karışımda mikro fiber kullanımı USG hızını daha fazla arttırmıştır. Benzer şekilde polipropilen sentetik makro fiber kullanılan seride USG hızı kontrol KYB serisinden düşük değerlerde iken bu fiberin mikro çelik fiberle oluşturduğu karma serilerde USG hızı daha yüksek değerlere ulaşmıştır.

❖Uygulanan farklı yüksek sıcaklıklar neticesinde tüm beton serilerinin dış görünümünde fiziksel değişimler ve bozulmalar gözlenmiştir. Sıcaklık artışı ile numunelerde çatlak boyu, genişliği ve yoğunluğu artış göstermiştir. 600°C ve 900°C sonrasında polipropilen sentetik fiberlerin tam olarak eriyerek beton yapısında ciddi boşluk hacimleri oluşturduğu SEM analizlerinden anlaşılmıştır. Benzer şekilde 600°C sıcaklığa kadar çelik fiberlerde ciddi bozulmalar gözlenmezken, 900°C sıcaklık sonrasında çelik fiberlerin etkin çaplarında ufalanma ya da erime vasıtası ile daralma oluşmuştur.

❖FTKYB serileri en çok yüksek sıcaklık deneyinden etkilenmiştir. 900°C yüksek sıcaklık sonrasında serilerde beton özellikleri yok olmakla birlikte, çelik fiberli serilerin beton bünyesinde kendini tutabilen bir yapı sergileyerek dayanım gösterdiği ortaya çıkmıştır. Uygulanan farklı yüksek sıcaklıklar sonrasında en yüksek basınç dayanımı kayıpları tekil polipropilen sentetik fiberli (5, 6, 7) karışımlardan elde edilmiştir. Polipropilen sentetik fiberlerin tekil olarak FTKYB'da kullanımı zayıflığa neden olmuştur.

❖Uygulanan 150 donma-çözünme çevrimi sonrası beton serilerinde yüzey bozulmalarına rastlanmazken, uygulanan deneylerden elde edilen bulgular içyapı bozulmalarını ortaya koymuştur. Karma fiberli seriler de genel olarak makro fiber ile mikro fiberlerin birlikte kullanıldığı serilerde daha düşük dayanım kayıpları elde edilmiştir.

❖FTKYB serilerinin asit etkisine maruz bırakılması sonucu beton yüzeylerinde erime oluşmuştur. Bu erime sonucu yüzeye çok yakın çelik fiberler eriyerek işlevini yitirmiş ancak polipropilen sentetik fiberler etkilenmemiştir. Asit dayanıklılık deneyi sonrasında da yüksek sıcaklık deneyinde olduğu gibi, serilerin mekanik özelliklerinde yüksek oranda dayanım kayıpları oluşmuştur. En yüksek dayanım kaybı kontrol KYB serisinde oluşmuştur.

❖Islanma-kuruma deneyi sonrası çelik fiber içeren FTKYB serilerinin yüzeylerinde yoğun bir şekilde paslanma, pamuklanma ve pullanma oluşmuştur. Karışımında yalnızca polipropilen sentetik fiber içeren serilerin yüzeylerinde ise pamuklanma ve pullanmalar oluşmuştur. Çelik fiber içeren FTKYB serilerinin yüzey ve yüzeye yakın bölgelerinde bulunan fiberler yüksek düzeylerde etkilenirken, karışımında yalnızca polipropilen sentetik fiber içeren FTKYB serilerinin yüzey kısmındaki fiberler hiçbir şekilde etkilenmemiştir. Karışımında mikro çelik fiber kullanılan FTKYB serilerinin mekanik özellikler olarak ıslanma-kuruma deneyinden etkilenme oranı daha düşüktür.

❖Durabilite deneyleri uygulanmayan serilerin hızlandırılmış karbonasyon deneyi sonucu, fiber fiziksel özelliklerine bakılmaksızın tüm seriler 1.5 mm ile 2 mm aralığında karbonasyon derinliği değeri sergilemişlerdir. Donma-çözünme deneyi sonrasında FTKYB serilerinin karbonasyon derinlikleri 5 mm ile 8.50 mm arasında çeşitlilik göstermiştir. Karbonasyon deneyinde en yüksek derinlik yüksek sıcaklık deneyi sonrası uygulanan serilerden elde edilmiştir. Özellikle 900°C sonrası serilerde herhangi bir derinlik tespit edilemeyerek tamamiyle karbonasyona uğradığı belirlenmiştir.

❖Porozite oranları yüksek sıcaklık deneyi sonrasında, kullanılan fiber çeşidine göre değişim gösterirken, fiber uzunluk ve boy/çap oranı, fiber boyut yoğunluğu faktörlerinden etkilendiği de gözlenmiştir. Sıcaklık seviyesinin artması ile porozite miktarında da artma gözlenmiştir. Donma-çözünme deneyi sonrasında serilerin porozite değerleri %1.51-28.31 aralığında değişim göstermiştir. Kullanılan polipropilen sentetik mikro fiber ile üretilen FTKYB serilerindeki porozite artış oranı daha düşüktür. Benzer şekilde çelik mikro fiberlerin de porozite artış oranları, makro fiberlerin artış oranlarından oldukça düşüktür.

❖Asit dayanıklılık deneyi ve ıslanma-kuruma deneyi sonrasında porozite değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüşler asit dayanıklılık deneyinde, kullanılan asit etkisi ile ve ıslanma-kuruma deneyinde ise tuz kristali oluşumu ile beton içyapısındaki boşluklarda tıkanma olasılığına bağlanmıştır.

❖SEM analizi sonrası, durabilite deneyleri uygulanmayan tüm FTKYB serilerinin içyapıları benzerlik göstermiştir. Bu serilerin içyapılarının tok, sağlam ve çatlaksız, fiberlerin ise zarar görmemiş olduğu belirlenmiştir.

❖ 300°C sonrasında, genel olarak üretilen betonların mikro yapısında bozukluklar gözlenmiştir. İçyapıda çelik fiberlerin zarar görmediği saptanmıştır. 600°C sonrasında içyapıda çatlaklar artarak bozulmalar çoğalmıştır. İçyapıda çelik fiberlerde bozulmaların başladığı belirlenmiştir. Polipropilen sentetik fiberler 600°C sonrasında eriyerek yok olmuş ve beton hacmi içerisinde ciddi boşluklar bırakmıştır. Numunelere 900°C yüksek sıcaklık uygulaması ile betonun kimyevi yapısının bozulması sonucu içyapıda iğne şeklinde yapılar oluşmuştur.

❖ Asit etkisine maruz bırakılan serilerin yüzeye yakın iç kısmında, asit saldırısı sonucu belli bir derinliğe kadar beton matriste pütürlü ve tırtıklı bir yapı oluşmuştur. FTKYB'un daha derin kısımlarında böyle bir etki söz konusu değildir. Polipropilen sentetik fiberler asit saldırısından etkilenmezken, yüzeye yakın çelik fiberler erimiştir. Derin kısımlarda ise, beton içyapısı ve fiberlerin durumu normal şartlar altında bekletilmiş numunelerden farksızdır.

6.2 Öneriler

Lifsiz KYB karışımlarının taze beton özelliklerini belirlemek amacı ile tasarlanmış olan deney yöntemlerinin, lif takviyesi ile tasarlanacak olan karışımların taze beton özelliklerini belirlemede yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Bu çalışmada özellikle makro fiberler ile oluşturulan karışımların L-kutusu ve V-hunisi deneylerinde problemler yaşanmıştır. 35 mm'den daha büyük ölçüde makro fiber kullanımı ile ya da toplam fiber hacminde karma fiber kullanılması durumunda bu fiberlerin %25'ten daha büyük oranda kullanımı ile V-hunisi çıkış ağzında ve L-kutusu donatı engeli önünde tıkanmalar oluşturmaktadır. Diğer taze beton özellikleri çok iyi olmasına rağmen bu deneylerde performans düşüklüğünün yaşanması deney aparatlarının boyutsal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden FTKYB tasarımı için taze beton özelliklerinin belirlenmesinde daha uygun test metotları geliştirmek uygun olacaktır. Ancak bu deneylerin uygulama zorunluluğunun devamı durumunda L-kutusu deneyi için donatı engeli açıklıkları ve V-hunisi için çıkış ağzı ölçüleri fiber boyutuna göre düzenlenmelidir.

Beton yapı elemanlarının FTKYB ile tasarımı durumunda kullanılacak fiber boyutları ve donatı sıklığı kesinlikle dikkate alınmalıdır. 35 mm'den daha büyük fiber kullanımı ya da karma fiberli tasarımlarda toplam fiber hacminde %25'ten daha büyük oranda uzun fiber kullanımı donatılı betonlarda kalıba yerleşme açısından ciddi problemler doğurabilir.

Karma FTKYB tasarımında, taze beton ve sertleşmiş beton özelliklerinde yüksek performans elde edebilmek için makro fiberler ile mikro fiberlerin eşleştirilmesi ile birlikte toplam fiber hacminde makro ve mikro fiberlerin kullanım hacmi optimize edilmelidir.

FTKYB karışımında tekil olarak polipropilen sentetik fiber kullanmak yerine, bu fiber ile çelik fiberlerin belli oranlarda birleştirilerek karma olarak kullanımı daha iyi teknik avantajlar sağlayacaktır.

Polipropilen sentetik mikro fiberin karışımlarda tekil olarak düşük hacimde kullanılması ile bu çalışmada mekanik özelliklere katkısı olmadığı belirlenmiştir. Bu çalışmada, bu fiberin karışımlarda tekil olarak kullanımı durumunda 1200gr/m^3 miktarında mekanik özelliklerde gelişme gözlenmiştir. Bu yüzden bu fiberin 1200gr/m^3 ya da daha yüksek miktarlarda kullanımı mekanik özellikler açısından daha avantajlı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Çivici, F., Eren, İ., 2004, Çelik Lifli Betonun Direkt Çekme Dayanımının Ölçülmesi Üzerine DeneySEL Bir Çalışma, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı: 2004/6-434, 49-53
2. Lim, D. H. and Nawy, E. G., 2005, Behaviour of Plain and Steel-Fibre-Reinforced High-Strength Concrete under Uniaxial and Biaxial Compression, Magazine of Concrete Research, 57, No. 10, 603–610
3. Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ., Şahin, Y., 2008, Combined Effect of Silica Fume and Steel Fiber on the Mechanical Properties of High Strength Concretes, Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 8, pp 1874-1880.
4. YERLİKAYA, M., 2003, Çelik Tel Donatılı Betonların Deprem Etkisi Altında Davranışları, Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
5. Nataraja, M.C., Dhang, N., Gupta, A.P., 1999, Stress-Strain Curves for Steel-Fiber Reinforced Concrete under Compression, Cement & Concrete Composites, 21, 383-390
6. Byfors, J., 1999, SCC is an Important Step Towards Industrialisation of the Building Industry, 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by A. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, 15-22
7. Okamura, H. and Ouchi, M., 2003, Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Thnology, 1, No. 1, 5-15.
8. Nunes, S., Figueiras, H., Milheiro Oliveira, P., Coutinho, J. S., Figueiras, J., 2006, A Methodology to Assess Robustness of SCC Mixtures, Cement and Concrete Research, 36, 2115-2122
9. Özkul, M.H., Doğan Ü.A., Işık İ.E., Sağlam A.R., Parlak N., 2006, Kendiliğinden Yerleşen Beton: Temel İlkeler ve Özellikler, Hazır Beton, Yıl. 13, sayı 74, 54-61.
10. Ouchi, M., Nakamura, S.-A., Osterberg, T., Hallberg, S.-E., Lwin, M., 2003, Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and The United States, ISHPC.
11. Xie, Y., Liu, B., Yin, J., Zhou, S., 2002, Optimum Mix Parameters of High-Strength Self-Compacting Concrete with Ultrapulverized Fly Ash, Cement and Concrete Research, 32, 477-480
12. Dietz, J., Ma, J., 2000, Preliminary Examinations for the Production of Self-Compacting Concrete Using Lignite Fly Ash, Leipzig Annual Civil Engineering Report No. 5, 125-139.
13. Oh, S.G., Noguchi, T. and Tomosawa, F., 1999, Toward Mix Design for Rheology of Self-Compacting Concrete, 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by A. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, 361-372.

14. Edamatsu, Y., Nishida, N., Ouchi, M., 1999, A Rational Mix-Design Method for Self-Compacting Concrete Considering Interactions between Coarse Aggregate and Mortar Particles, 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by A. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, 309-320.
15. Sedran, T. and de Larrard, F., 1999, Optimization of Self-Compacting Concrete Thanks to Packing Model, 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by A. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, 321-332.
16. Grünewald, S., Walraven, J. C., 2001, Parameter-Study on the Influence of Steel Fibers and Coarse Aggregate Content on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, 31, 1793-1798
17. Torrijos, M.C., Barragan, B.E., Zerbino, R.L., 2007, Physical–Mechanical Properties, and Mesostructure of Plain and Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete, Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 8, pp 1780-1788.
18. Aydin, A.C., 2007, Self Compactability of High Volume Hybrid Fiber Reinforced Concrete, Construction and Building Materials 21, 1149-1154
19. Sahmaran, M., Yurtseven, A., Yaman, I. O., 2005, Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, Building and Environment, 40, 1672–1677
20. Ambroise, J., Rols, S., Pera, J., 2001, Properties of Self-Levelling Concrete Reinforced by Steel Fibres, IBRACON.
21. Won, J.-P. , Lim, D.-H. and Park, C.-G., 2006, Bond Behaviour and Flexural Performance of Structural Synthetic Fibre-Reinforced Concrete, Magazine of Concrete Research, , 58, No. 6, 401–410
22. Kayali, O., Haque, M.N., Zhu, B., 2003, Some Characteristics of High Strength Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete, Cement & Concrete Composites, 25, 207–213
23. Altun, F., Özcan D. M., Vekli M., Haktanır, T., 2002, Çelik Lif Katkılı Betonarme Kirişlerin Taşıma Gücünün Deneysel İncelenmesi, ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye
24. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., 2006, *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. McGraw-Hill Professional Publishing third edition, USA, 684p.
25. Berbergil, V., 2006, Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Çelik Lif Kullanımının İşlenebilirliğe Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 55s.
26. Ramakrishna, G., Sundararajan, T., 2005, Impact Strength of a few Natural Fibre Reinforced Cement Mortar Slabs: a comparative study, Cement & Concrete Composites, 27, 547–553

27. ACI Committee, 1997, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, 544ACI 544.1R-96, ACI.
28. Yazıcı, Ş., İnan, G., Tabak, V., 2007, Effect of Aspect Ratio and Volume Fraction of Steel Fiber on The Mechanical Properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, 21, 1250–1253
29. Siddique, R., 2003, Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash and San Fibers, *Cement and Concrete Research*, Volume 34, Issue 1, pp 37-42.
30. Vitruvius, M. P., Translated by Morgan M. H., 1914, *The Ten Books on Architecture*. Harward University Press, 461p.
31. Romualdi, J. P., and Batson, G. B., 1963, Mechanics of Crack Arrest in Concrete, *J. Eng. Mech. Div.*, ASCE, 89, No. EM3, 147-168.
32. Shah, S. P., and Rangan, B. V., 1970, Ductility of Concrete Reinforced with Stirrups, Fibers and Compression Reinforcement, *Structural Division*, ASCE, 96, No. ST6, 1167-1184.
33. Biryukovich, K. L., and Yu, D. L., 1965, *Glass Fiber Reinforced Cement*, *Civil Eng. Res. Assoc*, No. 12, 41p.
34. Majumdar, A. J., 1976, Properties of Fiber Cement Composites, *RILEM Symp.*, Construction Press, London, Lancaster, 279-314.
35. Litherland, K.L., Maguire, P., Proctor, B.A., 1984, A Test Method for the Strength of Glass Fibres in Cement, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Volume 6, Issue 1, pp 39-45.
36. Kakemi, M., Hannant, D. J., 1996, Effect of Autoclaving on Cement Composites Containing Polypropylene, Glass and Carbon Fibres, *Cement and Concrete Composites*, Volume 18, Issue 1, pp 61-66.
37. Purnell, P., Short, N. R., Page, C. L., Majumdar, A. J., 2000, Microstructural Observations in New Matrix Glass Fibre Reinforced Cement, *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Issue 11, pp 1747-1753.
38. Faiz A. M., Soroushian, P., 2002, Effects of Alkali-Resistant Glass Fiber Reinforcement on Crack and Temperature Resistance of Lightweight Concrete, *Cement and Concrete Composites*, Volume 24, Issue 2, pp 223-227.
39. Purnell, P., Beddows, J., 2005, Durability and Simulated Ageing of New Matrix Glass Fibre Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Composites*, Volume 27, Issues 9-10, pp 875-884.
40. Barluenga, G., Hernández-Olivares, F., 2007, Cracking Control of concretes Modified with Short AR-Glass Fibers at Early Age. Experimental Results on Standard Concrete and SCC, *Cement and Concrete Research*, Volume 37, Issue 12, pp 1624-1638.

41. Goldfein, S., 1963, Plastic Fibrous Reinforcement for Portland Cement, Army Research and Development Laboratories, No. 1757-TR, 1-16.
42. İpek, G., 2007, Beton Büz Üretiminde Farklı Liflerin Kullanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 46s.
43. TS 10513, 1992, Çelik Teller -Beton Takviyesinde Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
44. Durmaz, B., 2007, Bölgesel Basınca Maruz Lifli Betonlarda Yatak Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 62s.
45. Düzgün, O.A., 2001, Çelik Liflerin Hafif Betonların Dayanımları Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 112s.
46. Gençel, O., 2006, Farklı Çelik Lif Tipi ve Miktarının Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 71s.
47. Sancak, E., 1998, Hafif Agregalı Beton Blokların Mekanik Özellikleri Üzerine Çelik Lif Kullanımının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 79s.
48. Sertbaş, B., 2006, Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Polipropilen Lif Kullanımının İşlenebilirliğe Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 66s.
49. Kurt, G., 2006, Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 87s.
50. Bulutlar, Y.A., 2006, Çelik Tel İçeriğinin ve Dayanımının SIFCON'un Mekanik Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 64s.
51. Bahadır, B., 2007, Liflerin Beton Kırılma Tokluğuna Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 95s.
52. ASTM A 820, 1996, Standart Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, The American Society for Testing and Materials, USA.
53. Yardımcı, M.Y., 2007, Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 391s.
54. Committee on Toxicology, 2000, Review of the U.S. Navy's Exposure Standard for Manufactured Vitreous Fibers, National Academy Press, Washington D.C., 91p.
55. ASM Committee, 2001, *ASM Metal Hand Book Volume 21 Composites*, ASM International Handbook Committee.

56. ASTM D 578-98, 1998, Standard Specification for Glass Fiber Strands, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, USA.
57. Baştürk, Ö., 2008, Beton Yüzeylerine Sarılan Lifli Kompozitlerin Basınç Dayanımına Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 103s.
58. Barluenga, G., Hernández-Olivares F., 2007, Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC, Cement and Concrete Research, 37, 1624–1638
59. Sabir, B.B., 2001, Toughness and tortuosity of polypropylene fibre reinforced concrete, Magazine of Concrete Research, 53, No. 3, 163-170
60. Miller, M., 2005, Polymers in Cementitious Materials, Smithers Rapra, Shropshire-UK, 196p.
61. McIntyre, J.E., 2005, Synthetic Fibres: Nylon, Polyester, Acrylic, Polyolefin, Woodhead Publishing Limited, 308p.
62. National Research Council Staff, 1991, High Performance Synthetich Fibers for Composites, National Academies Press, Washington, D.C., 145p.
63. Wang, Y., Li, V. C., Backer, S., 1990, Tensile Properties of Synthetic Fiber Reinforced Mortar, Cement and Concrete Composites, Volume 12, Issue 1, pp 29-40.
64. Oh, B. H., Park, D. G., Kim, J. C., Choi, Y. C., 2005, Experimental and Theoretical Investigation on the Postcracking Inelastic Behavior of Synthetic Fiber Reinforced Concrete Beams, Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 2, pp 384-392.
65. Bezerra, E.M., Joaquim, A.P., Savastano Jr. H., John, V.M., Agopyan, V., 2006, The Effect of Different Mineral Additions and Synthetic Fiber Contents on Properties of Cement Based Composites, Cement and Concrete Composites, Volume 28, Issue 6, pp 555-563.
66. Halliwell, S.M., 2003, Polymers in Building and Construction, Smithers Rapra, Shropshire-UK, 150p.
67. Doğru, D., 2006, Yüksek Performanslı Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışına 200°C Sıcaklıkta Kür Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 88s.
68. Komlos, K., Babal, B., Nürnbergerova, T., 1995, Hybrid Fibre-Reinforced Concrete under Repeated Loading, Nuclear Engineering and Design, 156, 195-200,
69. Yao, W., Li, J., Wu, K., 2003, Mechanical Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction, Cement and Concrete Research, 33, 27–30.
70. Avar, D., 2006, Karma Lifli Betonların Mekanik Davranışına Buhar Kürü Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 89s.

71. Banthia, N., Nandakumar, N., 2003, Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites, *Cement & Concrete Composites*, 25, 3-9.
72. Qian, C.X., Stroeven, P., 2000, Development of Hybrid, Polypropylene-Steel Fibre-Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Research*, 30, 63–69
73. Sharma, A., Reddy, G.R., Varshney, L., Bharathkumar, H., Vaze, K.K., Ghosh, A.K., Kushwaha, H.S., Krishnamoorthy, T.S., 2009, Experimental Investigations on Mechanical and Radiation Shielding Properties of Hybrid Lead–Steel Fiber Reinforced Concrete, *Nuclear Engineering and Design*, 239, 1180–1185.
74. Ahmed, S.F.U., Maalej, M., Paramasivam, P., 2007, Flexural Responses of Hybrid Steel-Polyethylene Fiber Reinforced Cement Composites Containing High Volume Fly Ash, *Construction and Building Materials*, 21,1088-1097.
75. Dehn, F., Holschemacher, K., Weibe, D., 2000, Self-Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour, *LACER No. 5*, 115-124.
76. Bouzoubaa, N., Lachemi, M., 2001, Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash Preliminary Results, *Cement and Concrete Research*, 31, 413-420.
77. Poon, C.S., Ho, D.W.S., 2004, A Feasibility Study on the Utilization of r-FA in SCC, *Cement and Concrete Research*, 34, 2337–2339.
78. Su, N., Hsu, K-C., Chai, H-W., 2001, A Simple Mix Design Method for Self-Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, 1799–1807.
79. Corinaldesi, V., Moriconi, G., 2004, Durable Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, 249–254.
80. EFNARC, 2005, The European Guidelines for Self Compacting Concrete-Specification, production and use, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC), pp. 68.
81. Sahmaran, M., Yaman, I. O., 2007, Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete with a High-Volume Coarse Fly Ash, *Construction and Building Materials*, 21,150-156
82. Tokyay, M., Erdoğan, K., 1998, Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
83. ASTM C 618, 1994, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.
84. TS 639, 1975, Uçucu Küller, TSE, Ankara.
85. TS 802, 2009, Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, TSE, Ankara.

86. TS EN 1008, 2003, Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, TSE, Ankara.
87. Sika Ürün Bilgi Föyü, 2009, Sika ViscoCrete Hi-Tech 30, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş., İstanbul.
88. Grünewald, S., 2004, Performance-Based Design of Self-Compacting Fibre Reinforced Concrete, PhD Thesis, Delft University of Technology.
89. Groth, P., 2000, Fibre reinforced concrete – Fracture Mechanics Methods Applied on Self-Compacting Concrete and Energetically Modified Binders, PhD. Thesis, Lulea University of Technology.
90. TS EN 12390-3, 2003, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.
91. Erdoğan, T .Y., 2003, *Beton*, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
92. ASTM C 597, 1994, Standart Test Method For Pulse Velocity Through Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
93. Richardson, M.G., 2002, *Fundamentals of Durable Reinforced Concrete*, Spon Press, London, 260p
94. Newman J., Choo B.S., 2003, *Advanced Concrete Technology: Concrete Properties*. Elsevier, Oxford-Great Britain, 349p.
95. Gönen, T., 2003, Betonda Sıkıştırma Faktörünün Karbonatlaşmaya Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 54 s
96. Gönen, T. ve Yazıcıoğlu, S., 2005, Betonda Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi ve Aparatı, Politeknik Dergisi, Cilt 8, Sayı 2, s 233-237
97. Gönen, T. ve Yazıcıoğlu, S., 2007, The Influence of Compaction Pores on Sorptivity and Carbonation of Concrete, Construction and Building Materials, Volume 21(5), p 1040-5
98. Gönen, T., 2009, Kendiliğinden yerleşen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekaniksel ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 115s.
99. Raju, M.P., Rao, K. S., Raju, P.S.N., 2007, Compressive Strength of Heated High-Strength Concrete, Magazine of Concrete Research, Volume 59, No 2, 79-85p
100. Hertz, K.D., 2005, Concrete Strength for Fire Safety Design, Magazine of Concrete Research, Volume 59, No 8, 445-453p
101. Han, L. H., Zheng, Y. Q., Teng, J. G., 2006, Fire Resistance of RC and FRP-Confined RC Columns, Magazine of Concrete Research, Volume 55, No 8, 533-546p

102. TS 3449, 1980, Çabuk Donma ve Çözülme Koşulları Altında Betonda Dayanıklılık Faktörü Tayini, TSE, Ankara.
103. ASTM C666 / C666M – 03, 2008, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Annual Book of ASTM Standards.
104. Nehdi, M., Ladanchuk, J. D., 2004, Fiber Synergy in Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 101, No 6, pp 508-517.
105. Song, P.S., Hwang, S., 2004, Mechanical Properties of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete, Construction and Building Materials, 18,669–673
106. Yalçın, M., Taşdemir, C., Gökalp, İ., Ekim, H., Yerlikaya, M., 2007, Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanılabilirlik ve Taşıma Gücü Sınır Durumlarına Göre Tasarımı, 7. Ulusal Beton Kongresi: Beton Teknolojisinde Gelişmeler ve Uygulamalar, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul.
107. Quanbing, Y., Beirong, Z., 2005, Effect of Steel Fiber on the Deicer-Scaling Resistance of Concrete, Cement and Concrete Research, 35, 2360 – 2363.
108. Chena, B., Liub, J., 2005, Contribution of Hybrid Fibers on The Properties of the High-Strength, Lightweight Concrete Having Good Workability, Cement and Concrete Research, 35, 913–917.
109. Miao, B., Chern, J.-C. and Yang, C.-A., 2003, Influences of Fiber Content on Properties of Self-Compacting Steel Fiber Reinforced Concrete, Journal of Chinese Institute of Engineers, Vol. 26, No 4, pp 523-530.
110. Yun, H.-D., Yang, I.-S., Kim, S.-W., Jeon, E., Choi C.-S. and Fukuyama, H., 2007, Mechanical Properties of High-Performance Hybrid-Fibre-Reinforced Cementitious Composites (HPHFRCCs), Magazine of Concrete Research, 59, No. 4, 257–271.
111. Topçu, İ. B., Canbaz, M., 2009, Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufllu Harçların Yüksek Sıcaklıklara Maruz Kaldıktan Sonraki Mikroyapıları, Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt:10, Sayı: 1, s319-326.
112. Khoury, G. A., 2000, Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures, Imperial College, Prog. Struct. Engng Mater., vol. 2, 429-447.
113. Özturan, T. and Cülfik, M.S., 2000, Residual Strength and Elastic Properties of Normal and High Strength Concrete Subjected to High Temperature, Proc. Cement and Concrete Technology in the 2000's, İstanbul, V2, pp. 97-106.
114. Noumowe, A.N., Clastres, P., Debicki, G. and Bolvin, M., 1994, High Temperature Effect on High Performance Concrete, (70-600°C), Strength and Porosity, ACI-SP145, Proc. 3rd. Intern. Conf. on Durability of Concrete, pp. 157-172.

ÖZGEÇMİŞ

Nusret BOZKURT 1980 yılında Tokat'ta doğmuştur. İlk, orta öğrenimini Tokat ilinin Turhal ilçesinde sırasıyla Kahraman Cengiz İlkokulu ve Alparslan Ortaokulu'nda yapmıştır. Lise öğrenimini ise Tokat ilinde bulunan Tokat Teknik Anadolu Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamlamıştır. 1998 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği Bölümünü kazanmış ve 2002 yılında başarı ile mezun olmuştur. Aynı yıl, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Araştırmalarını farklı tip agregalar üzerinde yaparak 2004 yılında yüksek lisans eğitiminden mezun olan BOZKURT akademik kariyerine ara vermeden aynı Üniversitede doktora öğrencisi olarak devam etmiştir. Doktora eğitiminde özel betonlar konusu üzerine yoğunlaşan BOZKURT, araştırmalarını Kendiliğinden Yerleşen Betonlar ve Fiber Takviyeli Betonlar üzerine yapmıştır. Bu araştırmalarının bir yılını İngiltere Coventry Üniversitesinde sürdürmüş ve doktora derslerinin bir kısmını da bu üniversiteden alarak başarı ile tamamlamıştır. İngiltere'de kaldığı süre içerisinde Coventry Üniversitesi İnşaat Mühendisliği departmanında Student Practor olarak çalışarak danışman hocasını asiste etmiş, bir proje geliştirme şirketi olan AER-TECH firmasının özel bir beton türü üzerine olan projesinde proje elemanı olarak görev almış ve Lanchester kütüphanesi araştırmacısı olarak bulunmuştur. Doktora tezi deneysel çalışma kısmını Türkiye'de Fırat Üniversitesi'nde tamamlamıştır.