

39263-

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ISIL İŞLEM UYGULAMASININ
LİFLİ BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Osman ÜNAL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Eylül 1994

Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Aralık 1994

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet UYAN

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Hulusi ÖZKUL

Doç. Dr. Turan ÖZTURAN

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

ARALIK 1994

ÖNSÖZ

Tezimi yöneten ve çalışmalarım sırasında bilgileri ve sabrı ile yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mehmet UYAN'a,

Araştırmalarım sırasında değerli fikir ve uyarılarından yararlandığım Sayın Prof. Dr. M. Süheyl AKMAN'a, Sayın Prof. Dr. Saim AKYÜZ'e ve Sayın Doç. Dr. Hulusi ÖZKUL'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımda emeği geçen tüm I.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı Çalışanlarına ve tezin yazımında emeği geçen Sayın İsmail MERCAN'a teşekkür ederim.

Öğretim hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen Aileme ve Sevgili Eşime bu vesile ile teşekkürü borç bilirim.

Eylül, 1994

Osman ÜNAL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
NOTASYON.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
TABLO LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bilgiler.....	3
1.1.1 Lifi ve Lifli Betonun Tanımlanması.....	3
1.1.2 Lifli Beton Bileşimindeki Parametrelerin Özelliklerine Etkisi.....	4
1.1.2.1 Lif Miktarı ve Narinlik Oranının Etkisi.....	4
1.1.2.2 Lif Tipinin Etkisi.....	5
1.1.2.3 Çimento ve Agreganın Etkisi.....	6
1.1.3 Lifli Betonlarla İlgili Literatür Çalışmaları.....	6
1.1.4 Lifli Betonların Mekanik Özellikleri İle İlgili Bağlıntılar.....	12
1.1.4.1 Elastik Sabitlerin Hesabı.....	15
1.1.5 Isıl İşlemler İle İlgili Genel Bilgiler.....	20
1.1.5.1 Isıl İşlemlerin Tanımı ve Sınıflandırılması.....	21
1.1.5.2 Isıl İşlemler Yöntemlerinin Hidratasyona Etkisi.....	22
1.1.5.3 Isıl İşlemi Etkileyen Faktörler.....	23
1.1.5.4 Isıl İşlem Çevrimi.....	23

1.2 Araştırmanın Amacı.....	26
1.3 Araştırmanın Kapsamı.....	27
BÖLÜM 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
2.1 Malzemenin Tanımlanması.....	29
2.1.1 Agreganın Özellikleri.....	29
2.1.1.1 Kum.....	29
2.1.1.2 Kırmataş.....	30
2.1.2 Çelik Lif.....	31
2.1.3 Çimento Özellikleri.....	32
2.2 Beton Karışımları.....	33
2.3 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme ve Saklama.....	35
2.4 Numune Boyutları.....	36
2.5 Uygulanan Isıl İşlem Çevrimleri.....	37
2.6 Beton Üzerinde Yapılan Deneyler ve Kullanılan Yöntemler.....	40
2.6.1 Taze Beton Deneyleri.....	40
2.6.2 Isıl İşlem Çevrimlerinin Uygulanması.....	40
2.6.3 Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	42
2.7 Deney Programı.....	46
BÖLÜM 3. DENEY SONUÇLARI.....	48
3.1 Taze Beton Deney Sonuçları.....	48
3.2 Sertleşmiş Beton Deneyi Sonuçları.....	48
BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ.....	59
4.1 Taze Beton Özellikleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi..	59
4.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	62
4.2.1 Kompozitte lif-Matris Aderans Gerilmesinin İncelenmesi.....	62
4.2.2 Eğilme Mukavemeti Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	69
4.2.3 Basınç Mukavemeti Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.	79
4.2.4 Özet Tablo.....	91
4.2.5 Ultrases Hızı Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	92

4.2.6 Kılcallık Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	97
4.2.7 Elastik Olmayan Özelliklere Ait Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	101
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	119
5.1 Taze Beton Özellikleri İle İlgili Sonuçlar.....	119
5.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri İle İlgili Sonuçlar.....	119
5.2.1 Kompozitte Lif-Matris Aderans Gerilmesi İle İlgili Sonuçlar.....	119
5.2.2 Eğilme Mukavemeti İle İlgili Sonuçlar.....	120
5.2.3 Basınç Mukavemeti İle İlgili Sonuçlar.....	120
5.2.4 Ultrases Hızı İle İlgili Sonuçlar.....	122
5.2.5 Kılcallık İle İlgili Sonuçlar.....	122
5.2.6 Betonun Kısa Süreli Basınç Altındaki Davranışı İle İlgili Sonuçlar....	123
KAYNAKLAR.....	125
ÖZGEÇMİŞ.....	130

NOTASYONLAR

S	: Ortalama Lif Aralığı
d	: Lif Çapı
p	: Hacimsal Olarak Lif Miktarı
σ_f	: Lifte Oluşan Çekme Gerilmesi
τ	: Aderans Gerilmesi
l	: Lif Boyu
P	: Dış Kuvvet
l/d	: Narinlik Oranı
$\bar{\sigma}_f$	: Ortalama Çekme Gerilmesi
η_1	: Boy Etkinlik Katsayısı
η_2	: Yön Etkinlik Katsayısı
F	: Alan
V	: Ultrases Hızı
L	: Numune Boyu
E	: Elastisite Modülü
ε	: Şekil Değiştirme Oranı
f	: Lif
m	: Matris
c	: Kompozit
σ_c	: Kompozit Malzemenin Mukavemeti
σ_m	: Matrixin Mukavemeti
V_f	: Lif Hacimsal Yüzdesi
K	: Reaksiyon Hızı
A	: Katsayı
R	: Gaz Sabiti
T	: Mutlak Sıcaklık
Q	: Mol Başına Kalori Cinsinden Aktivasyon Enerjisi
D'	: Difüzyon Katsayısı
S'	: Eğim
W_0	: Numunenin Kuru Ağırlığı
W_d	: Numunenin Suya Doygun Havadaki Ağırlığı
W_s	: Numunenin Suya Doygun Sudaki Ağırlığı
σ_d	: Süreksizlik Sınırı
σ_l	: Çözülme Sınırı
T'	: Kırılma Şekil Değiştirme İş

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No:

1.1	Çelik Lif Tip ve Şekilleri.....	5
1.2	Tek Lifin Aderans Deneyi.....	13
1.3	Lif Boyunca Çekme ve Aderans Gerilmelerinin Dağılımı.....	13
1.4	Liflerin Kuvvet Doğrultusuna Açık Yaparak Bulunmaları Hali.....	15
1.5	Tek Eksenli Çekme Halinde Lif Matris Kompoziti.....	16
1.6	Isıl İşlem Çevrimi.....	23
2.1	Beton Karışımında Kullanılan Agregaların Granülometri Eğrileri.....	31
2.2	Karışım Agregasının Granülometri Eğrisi.....	34
2.3	Uygulanan Isıl İşlem Çevrimleri.....	37
2.4	Yumuşak Çevrim Uygulanmış Betonda Sıcaklık Değişimi.....	39
2.5	Ilımlı Çevrim Uygulanmış Betonda Sıcaklık Değişimi.....	39
2.6	Sert Çevrim Uygulanmış Betonda Sıcaklık Değişimi.....	40
2.7	Isıl İşlem Çevrim Cihazı.....	41
2.8	Eğilme ve Basınç Deneyi Düzenleri.....	43
2.9	Kılcallık Deneyi Düzeni.....	44
2.10	Kısa Süreli Basınç Dayanımı Deney Düzeni.....	45
2.11	Boyuna ve Yanal Şekil Değiştirme Ölçme Düzeni.....	46
3.1	Gerilme-Şekil Değiştirme, Gerilme-Poisson Oranı ve Gerilme Hacimsal Deformasyon İlişkisi.....	58
3.2	Gerilme Şekil Değiştirme Diyagramı.....	58
4.1	Lif Miktarının Çökme Değeri İle Değişimi.....	60
4.2	Lif Miktarının Ve-Be Süresi İle Değişimi.....	60
4.3	Lif Miktarının Inverted Cone Süresi İle Değişimi.....	60
4.4	Lif Miktarının Hava Boşluğu Yüzdesine Göre Değişimi.....	61
4.5	1 Günlük Eğilme Deneyi Sonuçlarına (4.2) Bağıntısının uygulanması....	65
4.6	28 Günlük Eğilme Deneyi Sonuçlarına (4.2) Bağıntısının uygulanması..	65
4.7	90 Günlük Eğilme Deneyi Sonuçlarına (4.2) Bağıntısının uygulanması..	66
4.8	Lifli Betonlarda Isıl İşlemin Aderans Gelişimine Etkisi.....	67
4.9	1 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	75
4.10	28 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	75
4.11	90 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	76
4.12	1 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi.....	76

4.13	28 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi.....	77
4.14	90 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi.....	77
4.15	1 Günlük Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	86
4.16	28 Günlük Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	86
4.17	90 Günlük Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	87
4.18	1 Günlük Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi.....	87
4.19	28 Günlük Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi.....	88
4.20	90 Günlük Numunelerin Basınç Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi.....	88
4.21	1 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	94
4.22	28 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	94
4.23	90 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	95
4.24	1 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Lif Miktarına Göre Değişimi..	95
4.25	28 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Lif Miktarına Göre Değişimi	96
4.26	90 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Lif Miktarına Göre Değişimi	96
4.27	28 Günlük Numunelerin Difüzyon Katsayısının Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	99
4.28	28 Günlük Numunelerin Difüzyon Katsayısının Lif Miktarına Göre Değişimi.....	99
4.29	28 Günlük Numunelerde Görünen Porozitenin Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	100
4.30	28 Günlük Numunelerde Görünen Porozitenin Lif Miktarına Göre Değişimi.....	100
4.31	28 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırının Uygulanan Çevrim ile Değişimi.....	107
4.32	90 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırının Uygulanan Çevrim ile Değişimi.....	107
4.33	28 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırının Lif Miktarına Göre Değişimi.....	108
4.34	90 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırının Lif Miktarına Göre Değişimi.....	108
4.35	28 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırı / Basınç Dayanımını Oranının Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	109
4.36	90 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırı / Basınç Dayanımını Oranının Uygulanan Çevrim İle Değişimi.....	109
4.37	28 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırı / Basınç Dayanımını Oranın Lif Miktarına Göre Değişimi.....	110
4.38	90 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırı / Basınç Dayanımını Oranın Lif Miktarına Göre Değişimi.....	110

4.39	28 Günlük Numunelerde Çözülme Sınırının Uygulanan Çevrim ile Değişimi.....	111
4.40	90 Günlük Numunelerde Çözülme Sınırının Uygulanan Çevrim ile Değişimi.....	111
4.41	28 Günlük Numunelerde Çözülme Sınırının Lif Miktarına Göre Değişimi	112
4.42	90 Günlük Numunelerde Çözülme Sınırının Lif Miktarına Göre Değişimi	112
4.43	28 Günlük Numunelerde Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Uygulanan Çevrim ile Değişimi.....	113
4.44	90 Günlük Numunelerde Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Uygulanan Çevrim ile Değişimi.....	113
4.45	28 Günlük Numunelerde Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Lif Miktarına Göre Değişimi.....	114
4.46	90 Günlük Numunelerde Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Lif Miktarına Göre Değişimi.....	114
4.47	28 Günlük Numunelerde Elastisite Modülünün Uygulanan Çevrim ile Değişimi.....	115
4.48	90 Günlük Numunelerde Elastisite Modülünün Uygulanan Çevrim ile Değişimi.....	115
4.49	28 Günlük Numunelerde Elastisite Modülünün Lif Miktarına Göre Değişimi.....	116
4.50	90 Günlük Numunelerde Elastisite Modülünün Lif Miktarına Göre Değişimi.....	116
4.51	28 Günlük Numunelerde Kırılma Şekil Değiştirme İşinin Uygulanan Çevrim ile Değişimi.....	117
4.52	90 Günlük Numunelerde Kırılma Şekil Değiştirme İşinin Uygulanan Çevrim ile Değişimi.....	117
4.53	28 Günlük Numunelerde Kırılma Şekil Değiştirme İşinin Lif Miktarına Göre Değişimi.....	118
4.54	90 Günlük Numunelerde Kırılma Şekil Değiştirme İşinin Lif Miktarına Göre Değişimi.....	118

TABLO LİSTESİ

Sayfa No:

1.1	Kompozitlerde lif yönlenmesine bağlı olarak lif etkinlik katsayıları.....	15
2.1	Podima kumunun özellikleri.....	29
2.2	Agrega özellikleri.....	30
2.3	Çelik Lifin Özellikleri.....	32
2.4	Çimentonun Fiziksel Özellikleri.....	32
2.5	Çimentonun Mekanik Özellikleri.....	33
2.6	Karışım Agregasının Granülometrik Bileşimi.....	34
2.7	Birbirinden Bağımsız Isıl İşlem Çevrimlerinin Özellikleri.....	38
3.1	Betonların Bileşimine Giren Gerçek Malzeme Miktarları (1 m ³) İçin Taze Beton Özellikleri.....	49
3.2	Eğilme Mukavemeti Değerleri.....	50
3.3	Basınç Mukavemeti Değerleri.....	51
3.4	Ultrases Hızı Değerleri.....	52
3.5	28 Günlük Kılcallık Deneyi Sonuçları.....	53
3.6	28 Günlük Silindirik Numunelere Ait Sertleşmiş Beton Deneyi Sonuçları.....	56
3.7	90 Günlük Silindirik Numunelere Ait Sertleşmiş Beton Deneyi Sonuçları.....	57
4.1	1 Günlük Eğilme Mukavemeti Sonuçlarının (4.2) Bağintısına Uygulanması İçin Yardımcı Hesaplar.....	63
4.2	28 Günlük Eğilme Mukavemeti Sonuçlarının (4.2) Bağintısına Uygulanması İçin Yardımcı Hesaplar.....	64
4.3	90 Günlük Eğilme Mukavemeti Sonuçlarının (4.2) Bağintısına Uygulanması İçin Yardımcı Hesaplar.....	64
4.4	Eğilme Mukavemeti Sonuçlarının (4.2) Bağintısına uygulanması ile Bulunan Katsayılar ve Ortalama Aderans Gerilmesi Değerleri.....	66
4.5	(σ_{cu}/σ_m) Oranlarının Isıl İşlem ve Zamana Göre Değişimleri. (Eğilme)...	78
4.6	(σ_{cu}/σ_m) Oranlarının Isıl İşlem ve Zamana Göre Değişimleri. (Basınç)...	89
4.7	Lif Miktarının Sıcaklığa Bağlı Olarak Basınç ve Eğilme Mukavemetlerine Etkisinin Özeti.....	91

ÖZET

Bu çalışmada, betonun erken yaşlardaki mukavemet gelişimini hızlandırmada yararlanılan ısıtma işlemlerinin lifli betonlara uygulanması halinde, lifli betonun erken ve ileriki yaşlardaki elastik ve elastik olmayan özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Bu çalışmada beton numuneleri, karışım agregasının granülometri eğrisi TS 706 standardına göre (A₁₆ - B₁₆) referans eğrileri arasında kalacak şekilde ayarlanarak üretilmiştir. En büyük agrega boyutu, granülometrisi ve su/çimento oranları sabit olup betona katılan lif miktarları sırasıyla 0, 2.5, 5, 8 ve 10 dm³ / m³ olan 5 farklı bileşimde beton üretilmiştir. En yüksek lif miktarına ait beton karışımının kıvamı kuru-plastik en düşük lif miktarına ait beton karışımının kıvamını akıcı hale getiren su / çimento oranının 0.63 olduğu tespit edilmiş ve tüm beton karışımlarında bu oran sabit tutulmuştur. Üretildikten hemen sonra 20°C de havada bekletilen numunelere "20°C de saklanmış" adı verilmiştir. Uygulanan ısıtma işlem çevrimlerinin ön bekleme süreleri, ısınma ve soğuma hızları, ısıtma işlem sıcaklıkları ve bu sıcaklıkta bekleme süreleri birbirinden tamamen farklıdır. Bunlardan ısıtma işlem sıcaklığı 50°C olana "Yumuşak çevrim", 65°C olana "İlımlı Çevrim" ve 80°C olanada "Sert Çevrim" adı verilmektedir. Üretilen prizmatik numuneler üzerinde 1., 28 ve 90. günlerde ultrases hızı tayini, eğilme ve basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Ayrıca 28. günde kılcalık ve su emme özellikleri tayin edilmiştir. Silindirik numuneler üzerinde ise 28 ve 90. günlerde kısa süreli basınç deneyleri yapılarak ısıtma işlem uygulanan lifli betonların elastik ve inelastik özellikleri araştırılmıştır. Deneyler sonucunda, çalışmada elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir.

Betona katılan lifler, taze betonun işlenebilirlik özelliğini azaltmaktadır. Şahit ve lifli betona uygulanan çevrimin ısıtma işlem sıcaklığı arttıkça, 1 günlük numunelerin basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti, ultrases hızı ve lif-matris aderans dayanımı artmıştır. Betonun ilk üç özelliğine sert çevrim uygulaması 1. günde diğer kür uygulamalarına oranla en olumlu sonuçları vermiştir. Ayrıca liflerin yukarıda belirtilen özellikler üzerindeki artırıcı etkisi ısıtma işlem sıcaklığı 50°C den itibaren azalmıştır. Yine liflerin mukavemeti artırıcı etkisi ısıtma işlem sıcaklığı yükseldikçe ilk yaşlarda hem eğilme mukavemetinde hemde basınç mukavemetinde azalmasına karşılık, ileriki yaşlarda eğilme mukavemeti üzerine etkisi sabit kalırken, basınç mukavemetinde azalma devam etmiştir. 20°C de saklanan numunelerde lif miktarının sağladığı mukavemet artışı eğilme mukavemetinde betonun yaşı ilerledikçe azalmasına karşılık basınç mukavemetinde 28 günden sonra sabit kalmıştır. Birinci günde ve ileriki yaşlarda ısıtma işlem uygulamasının etkisi basınç mukavemetinde eğilme mukavemetine göre daha fazla olmuştur. Liflerin etkisi ise en fazla eğilme mukavemetini artırmıştır. Şahit ve lifli betonların ultrases hızları erken yaşlarda ısıtma işlem sıcaklığı arttıkça 20°C ye göre artmıştır. İleriki yaşlarda hem 20°C de saklanmış hemde ısıtma işlem görmüş betonların ultrases hızları lif miktarının artmasıyla azalmaktadır. Isıtma işlemleri betonun kılcalık özelliğini 20°C de bekletilmiş numunelere göre azaltırken görünen porozite oranını artırmıştır.

Betonun elastik ve inelastik özelliklerinden süreksizlik sınırı ve elastisite modülü bütün çevrimlerde lif miktarının artması ile azalmıştır. Buna karşılık lif miktarının artması betonun enerji emme kapasitesini artırdığından kırılma şekil değiştirme işi ve basınç dayanımındaki birim kısalma da artmaktadır. Araştırma sonuçlarına göre ısıtma işlem uygulamasının lifli beton özelliklerine gösterdiği etkiler normal betonlara göre farklı bulunmuştur.

SUMMARY

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT APPLICATION ON PROPERTIES OF FIBER REINFORCED CONCRETE

In this study, the influence of heat treatment application on the properties of fiber reinforced concrete at early and later ages have been investigated.

Steel fibrous concrete is composed of cement, aggregate, sand, water and steel fiber which, at first sight, is quite similar to normal reinforced concrete, with one exception the latter does not contain any fiber.

The characteristics of fibrous concrete are as follows;

- high degree of toughness as compared to the brittleness of plain concrete
- enhanced shock absorbing capability
- enhanced fatigue strength
- enhanced flexural strength

Because of these, in general, fiber reinforced concretes are used in the industrial floor slabs, concrete pavements, shotcrete, concrete pipes, refractory concrete and precast concrete products.

The purpose of heat treatment is to accelerate strength development of concrete at early ages. It is well known that the higher temperatures accelerate the hydration reactions responsible for the strength gain. In addition it makes casting in the precast works and the construction site largely independent of the weather. No modern concrete works should therefore be without a heating system for concrete hardening. Different systems are in the mean time available on the market so that an optimal solution can be found for every application. The proper heating system can thus only be selected following thorough analyses at the intended location and comprehensive consultation.

The increasing utilization of concrete in industrial and private building projects is due in no small measure to the increase of early

strength of concrete that was achieved during the past few decades. Efforts to attain increasingly higher early strengths are aimed at raising the productivity in concrete construction still further. Through the acceleration of the development of strength at an early concrete age, continuous production processes are possible in particular in the manufacture of serial parts. In this way, the major part of all concrete production activities at the construction site and in the precast works will become independent of seasonal temperature fluctuations.

An increase of early strength of concrete can be achieved through.

- utilization of rapid hardening cements
- as low water-cement ratios as possible
- use of accelerators
- heat treatment

The most widely used method among these is steam curing under atmospheric pressure, in other words "Application of Heat Treatment". Steam curing causes some reduction in strength of concrete at later ages, while increasing the early strength. This act was explored by many researchers for normal concrete containing normal cement contents. By this study, it was tried to find out the influence of steam curing on the properties of fiber reinforced concrete at early and later ages.

The study is presented in 5 chapters. In the first chapter general knowledge about the subject, definitions, related literature, the purpose and the necessity of the study are given. The characteristics of the concrete compositions, the proportions of concrete mixes, the methods of preparations and curing of concretes are given in the second chapter. The different types of heat treatment cycles and the experimental techniques used in tests are also given in the second chapter. The test results obtained of hardened concrete are listed and necessary explanations are given in the third chapter. Appraisals of test results and their discussion on the effect of the heat treatment are the subjects of the fourth chapter. The conclusions evolved from the study and proposals for further investigations are given in the last chapter.

Grading curves of the aggregate mixtures have been regulated so as to be between (A₁₆ - B₁₆) curves according to T.S. 706 standard. The maximum aggregate size and grading of aggregate and effective W/C were kept constant. The fiber content of mixtures was changed from 0.0 dm³/m³ up to 10 dm³/m³ at 2.5 dm³/m³ intervals.

The optimum W/C was obtained as 0.63 for all mixtures. To give acceptable consistency of fresh concretes. Normal portland cement (PC 32.5) was used.

Ve-Be time, Inverted slump cone time, slump and unit weight tests have been performed on the produced concrete mixtures.

After these experiments, fibrous concrete which are placed in their moulds have been placed in the air conditioner for heat treatment cycles.

Different heat treatment cycles have been applied by varying the presteaming period-holding, preset temperature rise period, maximum temperature period-heat treatment temperature-and cooling period and also total cycling period. When presteaming period is 4 hours, heating and cooling rate 10°C/h, maximum temperature 50°C and the total cycle time 22 hours, that cycle has been called "Long or soft cycle". When presteaming periods are 2 and 1 hour, heating and cooling rates 20°C/h and 30°C/h, maximum temperatures 65°C and 80°C and the total cycle times 10.5 hours and 8 hours, those cycles were called "moderate" cycle and "Short-hard" cycle, respectively.

After completion of heat treatment cycles, test specimens have been cured at laboratory atmosphere of 20°C temperature and 60±5% relative humidity till the testing day. They were tested in order to demonstrate the influence of the heat treatment cycles on the properties of fiber reinforced concrete compared to normal concrete.

The parameters of the heat treatment cycles, have been shown in table 1. and in Figure 1.

Table 1 - Properties of Cycle Parameters

CYCLE TYPE	DELAY (hour)	HEATING- COOLING RATE(°C/h)	MAX TEMP. (°C)	TOTAL CYCLE TIME (h)
KEEP AT 20°C	----	----	20	24
LONG CYCLE	4	10	50	22
MODERATE CYCLE	2	20	65	10.5
SHORT CYCLE	1	30	80	8

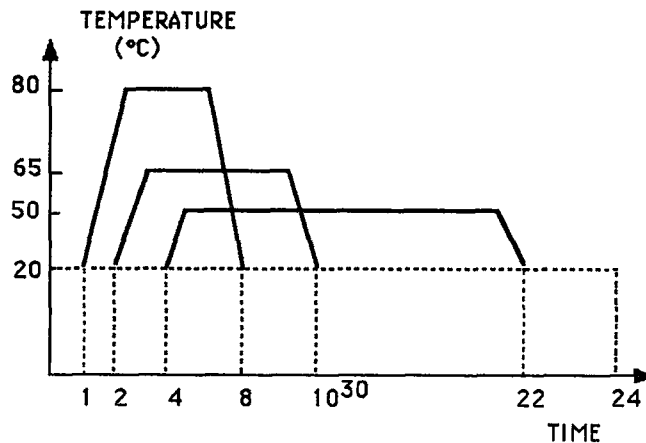


Figure 1 - Applied Heat Treatment Cycles.

On the hardened concrete specimens, the same testing program has been repeated at the ages of 1., 28 and 90 days nine prismatic specimens of 7x7x28 cm. dimensions had been manufactured from each mixture.

The ultrasonic velocity was measured at the ages of 1, 28 and 90 days on prismatic specimens in the usual manner. Then the same specimens have been tested under three point loading and the modified compressive strength tests were conducted on their broken pieces. Just at the age of 28 days, after beam flexure test has been performed, the durability and water absorption test were done on the other half of broken pieces.

In order to investigate the mechanical behaviour of the heat-treated concretes, short-term compressive loading have been performed on the cylindrical specimens at the ages of 28 and 90 days. The result of these experiments have been used to investigate the effects of the heat treatment application to elastic and inelastic properties of FRC.

The variation of concrete properties with the change in fiber content of concrete and with the application of heat treatment were shown on the graphs and the evaluations and discussions were based on these graphs.

Important results obtained in this study can be grouped as follows:

A) Results related with the fresh concretes

1) Factors that influence the behaviour of freshly mixed SFRC include matrix composition, fiber type, fiber volume fraction and fiber matrix interfacial bond characteristics.

As mentioned earlier, addition of fibers will make the composite stiffer.

In this study it was observed that fibers, which have been added to concrete, decreased workability.

B) Results related with the properties of hardened concrete

1) Results related with fiber-matrix bond strength of composites.

a) Although, heat treatment application increases bond strength of 1-day old specimens compared to those kept at 20°C, the situation for 28 and 90. day old specimens were reversed. This may be explained by defects arising from inclusion of increasing amount of fibers in concrete.

b) The rate of fiber-matrix bond strength development tends to increase in earlier ages and decrease in later ages.

2) Results related to flexural strength.

a) The highest strength values at the age of 1 day were obtained when the short cycle has been applied. It has been that when the heat treatment temperature was increased, the flexural strength of control and fibrous concretes have increased at the first day and 28th days, with respect to values of specimens kept at 20°C temperature. 90 day specimens have shown values lower than others.

It's known that rapid hydration may cause a reduction in the strength usually attained at later ages when steam curing-heat treatment-applied. But in this study, later age strength of heat treatment applied concrete was not lower than control concrete. Keeping the specimens in the air, and not in water.

b) It may be an explanation for this result that increasing of added fiber amount in specimens both kept at 20°C and heat treated increased the flexural strength at earlier and later days.

c) Rate of increase in the flexural strength of fibrous and control concretes, decreases with heat treatment temperature higher than 50°C. But for specimens at later ages, it was similar to the specimens kept at 20°C.

3) Results related to compressive strength

a) In general, heat treatment of fibrous concretes effect the flexural strength and the compressive strength in the same manner.

b) The 1 day relative compression strength of fibrous concrete was influenced in positive direction from heat treatment.

c) The results have shown that rate of increase of compressive strength is higher than rate of increase of flexural strength for 1-day specimens.

d) It has been seen that the highest increases in compressive strength of 1, 28 and 90 day specimens by the increasing amount of fibers have been obtained in specimens kept at 20°C.

4) Results related to ultrasound velocity

a) The 1 day relative ultrasound velocity of concrete was influenced by the heat treatment in the same manner with compressive and flexural strength of concrete.

b) Ultrasound velocity decreases with increasing amount of fiber at 28 and 90 days both at 20°C and when heat treatment applied.

c) The good correlation between the result from ultrasound velocity and compressive strength test of heat treated concretes shows that the measuring of ultrasound velocities gives meaningful results in determining the strength.

5) Results related to capilarity

a) Heat treatment application decreases capilarity of control and fibrous concretes at the age of 28.

6) Result related with inelastic behaviour

a) Increasing the fiber content of concretes decreases the modulus of elasticity and, discontinuity limit of 28th and 90th day specimens at 20°C but increases the loosening point strain at compressive strength, and ultimate strength.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnşaat Mühendisliği alanında, sağladığı avantajlar bakımından lifli betonların önemi hızla artmaktadır. Lifli beton; Çimento, agrega ve çoğunlukla süreksiz dağılı liflerin su ile karıştırılmasıyla meydana gelen beton olarak tanımlanmaktadır [1].

Beton içerisinde yaygın olarak kullanılan lifler; çelik, polipropilen, karbon ve alkali dirençli cam liflerdir. Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinde sağlanması gereken en önemli özellik liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır. Üniform bir şekilde dağılan lifler, beton içerisinde oluşan çatlakları önlemekte ve çatlakların beton içerisinde ilerlemesini yavaşlatarak betonu daha dayanıklı hale getirdiği bilinmektedir. Bu özelliğinden dolayı lifli betonun özellikle çekme ve eğilme dayanımını artıran faktörler darbe etkisine karşı dayanımını da artırır.

Bu nedenle betonarme kazık, yol ve hava alanları, su boruları, genel olarak büyük fabrika inşaatlarının döşeme betonlarında ve prefabrike yapı elemanları üretiminde lifli betonların tercih edilmeleri halinde daha iyi sonuçlar alınacağı bilinmektedir [1].

Lifli betonlar hakkında ilk çalışmalar, 1963'lü yıllarda beton içerisine cam liflerin katılmasıyla yapılmıştır [2]. Daha sonraları lifli betonlar üzerine çeşitli çalışmalar yapılarak betonun mukavemeti üzerine liflerin etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda; beton içerisinde süreksiz dağılı bulunan lifler genellikle betonda oluşan çatlak gelişimini en aza indirerek lifli betonun şekil değiştirme özelliğini artırmakta olduğu görülmüştür [3],[4]. Ayrıca lifli betonların basınç altındaki davranışlarını inceleyen araştırmalar sonucunda lifli betonların sünegliği ve tokluğunda da önemli artışlar elde edildiği belirtilmektedir [5], [6].

Diğer taraftan gelişen teknoloji koşullarında yapı dalında da üretim hızı giderek artmakta ve bu artışa ekonomik bir şekilde çözüm bulabilmek amacıyla seri üretime ve sanayileşmeye geçilmesi gerekmektedir. Bu amaçla prefabrike yapı elemanları üretiminde lifli beton kullanılarak; beton boru, kanalet, bordür ve panel elemanlarının kısa sürede üretimi yapılarak servise sunulması için betonun sertleşmesinin ve dayanım kazanma hızının artırılması istenmektedir. Bu durumun özel çimento kullanmak, priz hızlandırma ve akışkanlığı artırıcı katkıları kullanmak ve ısıtma işlemi uygulanması gibi belli başlı yöntemlerden birisinin tercih edilmesiyle mümkün olabileceği belirtilmektedir [7].

Genellikle günümüzde betona erken dayanım kazandırma ve kısa sürede kalıptan alınarak servise sunulması amacıyla en çok kullanılan yöntem ısıtma işlemi uygulamasıdır.

Betona ısıtma işlemi uygulanması ile erken yaşlarda dayanım artmakla birlikte ileriki yaşlarda ısıtma işlemi görmemiş betonlara nazaran dayanımın azalabileceği yapılan çalışmalarla anlaşılmıştır. Ancak lifli betonlar üzerine ısıtma işlemi uygulanmasının etkisi tam olarak bilinmemektedir. Bu amaçla, bu çalışmada ısıtma işlemi uygulamasının lifli betonun erken ve ileriki yaşlardaki özelliklerini ne şekilde etkilediği araştırılmıştır.

Araştırmada incelenen betonlara katılan lif miktarları; prizmatik numunelerde 2.5, 5, 8 ve 10 dm³/m³, silindirik numunelerde 5, 8, 11 dm³/m³ olarak seçilmiştir. Üretilen beton karışımına 20°C de saklama, 50°C'lik yumuşak çevrim, 65°C'lik ılımlı çevrim ve 80°C'lik sert çevrim olmak üzere 4 ayrı çevrim uygulanmıştır. Ayrıca lifli betonların bu çevrimler altındaki davranışlarını belirleyebilmek amacıyla da şahit (Lif katkısız) beton numuneler üretilmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde, liflerle ilgili bilgiler verilmiş, beton içerisinde kullanılan liflerin beton davranışına etkilerini inceleyen çalışmalar ele alınmıştır. Ayrıca betonun sertleşmesini hızlandırmak için kullanılan ısıtma işlemi uygulamasının genel sınıflandırılması yapılarak özellikleri belirtilmiştir.

İkinci bölümde, beton üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri verilmiştir. Üretilen beton numunelerinin yerleştirme ve saklama koşulları, ayrıca uygulanan ısıtma işlem çevrimleri ile sertleşmiş betonlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde, üretilen beton numuneleri üzerinde yapılan deneyler ve bu deneylerde elde edilen sonuçların nasıl hesaplandığı belirtilerek sonuçlar tablolar halinde verilmiştir.

Dördüncü bölümde, sonuçların değerlendirilmesi yapılarak lifli betonlar üzerine ısıtma işlem uygulamasının beton özelliklerine olan etkileri incelenerek sonuçlar çıkarılmıştır. Ayrıca lifli betonun kompozit malzeme olarak davranışı incelenerek lif-matrix aderansı üzerine ısıtma işlemin etkisi araştırılmıştır.

Beşinci bölümde ise bu çalışmada elde edilen sonuçlar sıralanmış, ısıtma işlem uygulamasının lifli betonların elastik ve inelastik özellikleri üzerine 20°C lik kür şartlarına göre etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca bu konuda ileride yapılabilecek çalışmalar özetlenmiştir.

1.1. Genel Bilgiler

Gevrek ve çekme dayanımı düşük olan normal betonun çekme gerilmeleri altında hemen çatladığı kabul edilmektedir. Lifli betonun ise eğilme ve çekme dayanımı, elastisite modülü ve darbe direnci gibi özellikler açısından daha mukavemetli olduğu bilinmektedir [1],[2],[3].

Bu bakımdan ileri teknolojiye sahip ülkelerde, endüstriyel döşeme betonları, yol ve hava alanları, beton boru, tünel kaplamaları ile prefabrike yapı elemanları üretiminde lifli betonun önemli bir şekilde kullanımı hızla artmaktadır [1],[2].

1.1.1 Lifin ve Lifli Betonun Tanımlanması

Betonu takviye amacıyla kullanılan ve değişik şekil ve büyüklüklerde olan lifler; cam, çelik, polipropilen ve organik polimerlerden üretilmektedir.

ACI komitesi 544 [1]., bir lifi tanımlayan en iyi nümerik parametrenin lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen "Boy/Çap" (aspect ratio) oranı olduğunu kabul etmektedir. Bu orana kısaca "Narinlik oranı" da denilmektedir. Eşdeğer lif çapı ise; alanı lifin kesit alanına eşit bir dairenin çapı olarak tanımlanmaktadır.

Ancak bazı liflerin uzunluklarının ve çaplarının farklı değerler alması, cam liflerde olduğu gibi liflerin demet şeklinde olması açısından lifleri sadece boy/çap oranına göre sınıflandırma yapmak mümkün olmamaktadır.

Lifli beton; hidrolik çimento, agrega ve beton içerisinde çoğunlukla süreksiz dağılılı liflerin suyla karıştırılmasından meydana gelen bir beton türüdür. Ayrıca hidrolik çimento ve liflerden oluşan bileşime de "Lifli beton" denilmektedir. Fakat matrix olarak sadece çimento hamurunun kullanılmasının hacim kararsızlığı sebebiyle zararlı olduğu söylenmektedir [2]. Bu çalışmada da çelik lif takviyeli betonlar kısaca "lifli beton" olarak ifade edilecektir.

1.1.2. Lifli Beton Bileşimindeki Parametrelerin Özelliklerine Etkisi

1.1.2.1. Lif Miktarı ve Narinlik Oranının Etkisi

Lifli beton konusunda yapılan çalışmalarda; beton bileşimine giren parametrelerin içerisinde beton özelliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörlerin narinlik oranı ile lif miktarı olduğu belirtilmektedir [8].

Genellikle beton karışımlarında lif yüzdeleri 0.50 ile 2.50 arasında değişen hacimsal oranlardaki liflerin beton özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Lifli betonun üretiminde karıştırma ve yerleştirme gibi aşamalarda lifin narinlik oranı önemli olmaktadır. Genellikle beton karışımlarında kullanılan liflerin narinlik oranları 50 ile 100 arasında değişmektedir. Bu oran ne kadar büyük olursa karışım içerisinde topaklanma olduğu ve liflerin homojen dağılmadığı gözlenmiştir. Yerleştirme sırasında kullanılan vibrasyon liflerin dönmesine ve belirli yönlerde dizilmelerine neden olmaktadır. Bu durum lifin narinlik oranıyla beraber vibrasyon

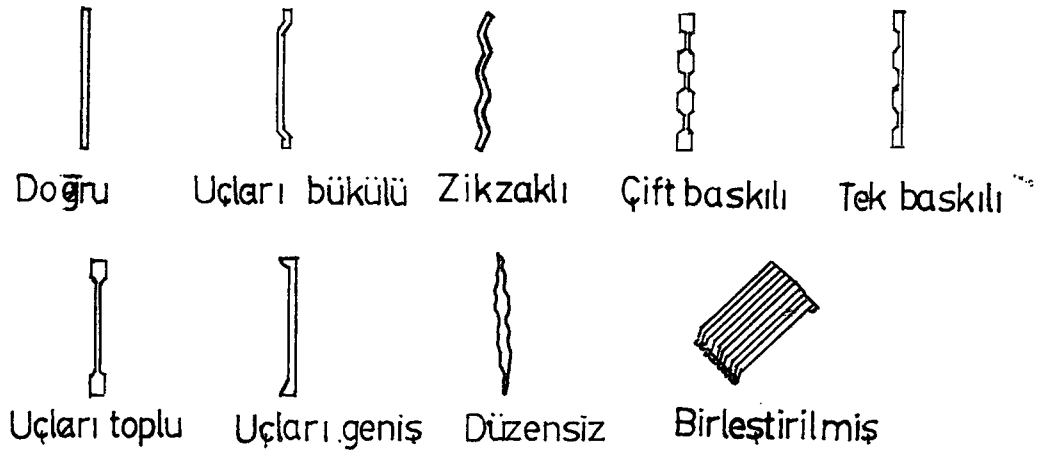
tipi ve kalıp boyutuna bağlıdır. Bu sebeple lifli betonların yerleştirilmesinde dış vibrasyon iç vibrasyona göre tercih edilmektedir [8].

1.1.2.2. Lif Tipinin Etkisi

Beton bileşimine katılan çelik lifler çoğunlukla sert çekilmiş düşük karbonlu çelikten üretilmektedir. Kullanma amacına uygun olarak farklı boyut ve şekillerde üretilen çelik liflerin beton içerisinde kullanılması hızla artmaktadır.

Genel olarak uygulama alanlarına göre üretilen lif tipleri şekil 1.1'de görülmektedir. Bunlar doğru, uçları bükülü, zigzaglı, çiftbaskılı, tekbaskılı, düzensiz, dişli ve birleştirilmiş hallerde bulunmaktadır [9].

Beton bileşimine katılan liflerin çeşidi ne olursa olsun liflerin homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonrada bozulmaması gerekmektedir. Lifler, sertleşen betonun her yanına üniform olarak dağılmalıdır. Ayrıca beton yerleştirildikten sonra liflerin dönmemesi ve belirli bölgelerde toplanmamaları istenir. Genellikle cam ve çelik lifli beton karışımında topaklanma, bir yönde dizilme görülmektedir. Bu durumun liflerin beton karışımına kuru olarak katılması halinde en aza indirilebileceği söylenmektedir [2].



Şekil 1.1 Çelik lif tip ve şekilleri

1.1.2.3 Çimento ve Agreganın Etkisi

Lifli betonların üretiminde bugüne kadar yapılan çalışmaların çoğunda portland çimentosu kullanılmıştır. Matrix olarak portland çimentosu hamurunun kullanılmasının çeşitli yararlar sağlamasına karşılık önemli bir sakıncası da vardır. Bu da çimento hamuru kırılma birim uzamasının çoğu liflerinkinden %0.02-0.06 mertebesinde düşük olması sonucu; bir yükleme durumunda, elastik limitin ötesinde çimento hamurunun matriksinde çatlakların oluşmasıdır. Bu da portland çimentosunun sakıncalı tarafıdır [2].

Lif geometrisi ve lif miktarından farklı olarak iri agreganın hacmi, biçimi ve boyutunun taze lifli beton karışımının reolojisi üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Agreganın boyutu artarken lif boyutunu artırmanın genellikle yararlı olacağı belirtilmiştir [2].

ACI 517 [10]., ısıtma işlem uygulamalarında portland çimentolarının bir çok türünün kullanılabileceğini, genelde bütün çimentoların hidratasyonlarının ısıtma işlemi ile aynı derecede hızlandırıldığını belirtmiştir.

Lifli beton bileşimlerinde matrixin fonksiyonu lifleri bir arada tutmak, onları korumak ve liflere ve liflerden gerilme transferini sağlamaktır.

1.1.3. Lifli Betonlarla İlgili Literatür Çalışmaları

Betona lif katılması sonucu betonun özelliklerinde meydana gelecek değişiklikleri araştırmak amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda daha çok lifli betonun işlenebilmesi, basınç ve eğilme dayanımlarıyla darbe direnci gibi özellikler araştırılarak elde edilen sonuçlar vurgulanmıştır. Bu konuda belli başlı çalışmalar ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

P. Sordushian ve Z. Bayasi [9]., lif tiplerinin beton özellikleri üzerine yaptığı etkileri belirtmek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarda doğru, uçları bükülü, zigzaglı ve birleştirilmiş lif tiplerinin beton karışımına katılmasıyla etkin olan lif tipi belirlenmiştir. Yapılan deneylerde, hacimce %2 oranında ve narınlık oranı

60 olan uçları bükülü (Hooked) liflerle üretilen betonun eğilme dayanımı ve enerji emme kapasitesinin ,diğer liflere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Betona lif katılmasının, betonun işlenebilme özelliği üzerine etkilerini inceleyen çalışmalarda [8], [11] liflerin beton içerisine katılmasıyla taze betonun işlenebilme özelliğinin, kullanılan lif miktarının artmasıyla azalmakta olduğu görülmüştür. Aynı şekilde liflerin narinlik oranları artarken de işlenebilme özelliği azalmaktadır.

Swamy [12], Çelik lifli betonların özelliklerini araştırmak amacıyla yaptığı çalışmada lifli beton kompozitlerinin durabilitesi ve çimento matriksi arasındaki ilişkinin önemini belirtmektedir. Yapılan çalışmada hacim artışından dolayı dışarıda kalan lifler dikkate alınmazsa, liflerin karışım içerisinde gelişi güzel dağıldığını belirtmektedir. Yapı elemanları üretiminde; lifli betonun kullanılması halinde işlenebilmeyi kolaylaştırmak amacıyla karışıma uçucu kül katılması lifli betonun aderans dayanımını artırdığı belirtilmektedir [12].

Kompozit malzeme olarak çalışan yapı elemanlarının, liflerle takviye edilmesinin sağladığı avantajların en önemlileri, kiriş ve kolonlarda oluşan çatlakları kontrol etmesi ve betonarme elemanlarda kayma direncini artırması gibi faydalar bir çok araştırma sonucunda açıklanmıştır [13], [14], [15].

Lifli beton ve harç matriksinin çekme ve basınç dayanımları ile sünekliliği üzerine lif boyu ve miktarının etkisinin araştırıldığı çalışmalarda [16], [17]; harç matriksinin çekme ve basınç dayanımı, lif yüzdesi 0.75 lif boyu 12.7 mm'de, lifli betonun çekme ve basınç dayanımı da lif yüzdesi 2.0 ve lif boyu 25.4 mm ile 12.7 mm olan liflerin kullanılmasıyla sağlanmıştır [16], [17].

Betonun çekme dayanımını artırmak amacıyla yapılan ilk çalışmalar ise 1963 yılında Romualdi ve Mandel tarafından başlatılmıştır. Bunlar betonun çekme bölgesinde birbirine paralel olarak yerleştirilmiş ince teller bulunan kirişler üzerinde deneyler yaparak kirişin eğilme dayanımının arttığını ve kırılma yüküne çok yaklaşıncaya kadar çatlakların fazla büyümediğini gözlemişlerdir [4].

Eğilme deneylerinde, maksimum eğilme yükünde ki şekil değiştirmelerin artan lif miktarı ve boyutunun bir fonksiyonu olarak önemli bir artış gösterdiği belirtilmektedir [17].

Betonun içine liflerin katılmasının ilk çatlak oluşumunda, gerilme ve deformasyonlar üzerinde önemli etkisi vardır. Fakat bu etki maksimum yüklemde elde edilen sonuçlara göre daha azdır.

Shah ve Rangan [18], yaptıkları çalışmada betonun basınç ve eğilme dayanımına lif miktarı, lif boyu ve liflerin karışım içerisindeki dağılım gibi faktörlerin etkilerini araştırmışlardır. % 0.25-1.25 arasında değişen lif miktarları ile üretilen betonların eğilme dayanımlarının lif miktarının artışıyla doğru orantılı olarak arttığını görmüşlerdir.

Snyder ve Lankart [19], lifli beton ve harcın eğilme dayanımına etki eden faktörleri belirtmişlerdir. Bunların başında karışımı oluşturan malzeme bileşenleri ile lif özelliklerinin eğilme dayanımına etkisi incelenmiştir. Lifli harç matrisinin ilk çatlak dayanımı ve maksimum eğilme dayanımına lifin na rinlik oranı ve miktarının etkili olduğu görülmüştür. Buna göre ilk çatlak ve eğilme dayanımı arasında lif miktarına göre değişen lineer bir ilişkinin olduğunu belirtmişlerdir. Su / Çimento oranı 0.45 ve lif miktarı %3-4 oranında değişen lifli harç numunelerinin eğilme dayanımının, aynı su/çimento oranı ve %2'lik lif miktarı ile üretilen harç numunelerinin eğilme dayanımından daha az olduğu görülmüştür.

Eğilme dayanımına etki eden diğer bir faktör de lif aralığıdır. Bu konuda yapılan çalışmalarda lif aralığının, lif çapına bağlı olarak değişimi matematiksel olarak ifade edilmektedir. Bu konuda Romualdi ve Mandel karışım içerisinde süreksiz dağılı liflerin geometrik merkezi arasındaki ortalama aralığı veren bağıntıyı aşağıdaki şekilde ifade etmişlerdir [4].

$$S=13.8 d (1/p)^{1/2} \dots\dots\dots(1.1)$$

Burada;

S: Ortalama lif aralığı (mm)

d: Lif çapı (mm)

p: Hacimsal olarak lif miktarı (%)

Bu bağıntıya göre aralık, lif çapına bağlı olarak değişmekte ve lif miktarı arttıkça da azalmaktadır.

Williamson [20], betonun basınç dayanımı üzerine liflerin etkisini araştırmış, maksimum agrega tane büyüklükleri 3/4 ve 3/8 inc. (19 ve 9.50 mm) olan karışımlara hacimsel olarak %1 ile %2.50 arasında değişen lif miktarı katmanın betonun basınç dayanımını önemli bir şekilde artırdığını belirtmiştir. Ayrıca bu karışımların elastisite modülü ve poisson oranı liflerin etkisiyle azalmıştır.

Wubs [21], lifli betonların eğilme dayanımı üzerine yaptığı araştırmada maksimum agrega tane büyüklüğü 16 mm, su/çimento oranı 0.53 olan karışıma 60/0.80 ebatındaki lifleri katarak deneyler yapmıştır. Bu deney sonuçlarına göre bütün deney numunelerinin ilk çatlaktan sonra bile belli bir yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu ve eğilme dayanımının lif miktarıyla arttığını görmüştür.

Harris, Varlow ve Ellis [22], lifli betonun kırılma davranışını incelemişlerdir. Deneyisel sonuçlardan yararlanılarak kırılma mekaniği esaslarını lifli betonlara uygulamayı tasarlamışlardır. Kiriş numuneleri üzerinde yapılan eğilme deneylerinde elde edilen sonuçlara göre kırılma işi; lif miktarına, karışım içerisindeki liflerin dağılımına ve lif tipine bağlı olarak belirlenmiştir. Hacimsal olarak %2 lif miktarında toplam kırılma işinin artmakta olduğu görülmüştür.

Tanigawa [23], Lifli betonun tekrarlı yükler altında gerilme-şekildeğiştirme davranışını incelemiştir. Deneyisel olarak yaptığı çalışmada narinlik oranı 60 ve 90 olan doğru şeklinde iki tip lif, hacimce %0.50 ile %2 arasında değişen oranlarda kullanılmıştır. Deney sonuçlarından yararlanılarak matematiksel bir model geliştirmeye çalışmıştır. Araştırma sonucunda normalize edilmiş gerilme-deformasyon eğrilerinin amaçlanan nümerik modele yeterli ölçüde uyum sağladığı ifade edilmiştir.

Taylor, Tai ve Roney [24], Lifli harç kompozitlerinin iki eksenli basınç altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Her iki yönde yüklemenin birlikte yapılması veya bir yöndeki yükün diğerlerinden sonra yüklenmesinin sonuçları etkilediği belirtilmektedir. İki eksenli halde gerilme kontrollü yüklemdeki maksimum mukavemet, şekil değiştirme kontrollü yüklemeye nazaran daha yüksek çıkmıştır. Liflerle pekiştirilmiş iki eksenli basınç durumu gevrek davranışlı harcı elasto-plastik bir malzeme haline dönüştürmektedir.

Traine ve Mansour [25], tek ve iki eksenli gerilme hallerinde normal ve lifli betonların basınç dayanımları ile gerilme şekil değiştirme davranışlarını araştırmışlardır. Karışımlarda narinlik oranı 33 ve 60 olan iki tip lif, hacimce %0.5, %1 ve %1.50 oranlarında kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre; lifli betonların tek eksenli basınç dayanımlarında, lif miktarı ve tipine bağlı olarak, normal betonla kıyaslandığında artma, azalma veya önemli bir değişiklik görülmemiştir. Tek eksenli gerilme halinde narinlik oranı 60 ve lif miktarı %1.5 olan karışımlar da basınç dayanımı %22 oranında artmıştır.

İki eksenli gerilme halinde ise bütün karışımlarda lifli betonun dayanımı normal betonun dayanımından daha yüksek bulunmuştur. Lif miktarı %1.5 ve narinlik oranı 60 olan karışımlarda basınç dayanımında ki artış oranı %78 olarak bulunmuştur. Lifli beton dayanımının iki eksenli gerilme halinde artış göstermesinin liflerin etkinliğine bağlı olduğunu söylemişlerdir.

Sonuç olarak, normal betonun tek eksenli basınç dayanımının, iki eksenli basınç dayanımı üzerindeki gelecekteki çalışmalarda parametre olarak kabul edileceğini ifade etmişlerdir.

Körmeling ve Reinhard [26], tek eksenli gerilme halinde lifli betonların mekanik özellikleri üzerine düşük sıcaklığın ve şekil değiştirme oranlarının etkisini incelemişlerdir. Lif miktarı %1.50-3 oranında değişen karışımların, +20°C ve -170°C sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrilerini elde etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, liflerin olumlu etkisi nedeniyle lifli betonun çekme dayanımı, maksimum dayanımdaki şekil değiştirme ve kırılma şekil değiştirme enerjisinde belirli bir artış sağlandığı görülmüştür. Bu özelliğinden dolayı yüksek şekil değiştirme oranlarına

sahip lifli beton daha az kırılğan olmaktadır (+20°C). Çoğu özellikler düşük sıcaklıklarda da artış göstermektedir. Yüksek şekil değiştirme oranlarına sahip lifli betonun kırılma şekil değiştirme enerjisi ise sıcaklığın azalması nedeniyle artmadığı görülmüştür (-170°C).

Purkiss [27], Lifli betonların yüksek sıcaklıklardaki davranışlarını incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmıştır. Karışımlarda lif yüzdeleri 0.75 ve 1.50 olan düz ve zigzaglı, 20 mm boyunda ve 0.25 mm çapında iki tip lif kullanmıştır. Bu beton karışımları 300°C ile 800°C arasında değişen sıcaklıklarda deneye tabi tutulmuşlardır. Deney sonuçlarından yararlanılarak uygulanan sıcaklıklardaki dayanım farkları, şahit betonlara göre, boyutsuz olarak hesaplanarak sıcaklıkla değişimleri gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, lifli betonların sıcaklık tesirleri altında lif tipi ve miktarından bağımsız olarak dayanımlarının, 600°C den düşük sıcaklıklarda, normal betona göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Fakat genel olarak 800°C sıcaklıkta tüm karışımların dayanımları azalmaktadır.

Aynı şekilde lifli betonların eğilme dayanımı üzerine sıcaklığın etkisi araştırıldığında; normal ve lifli betonun eğilme dayanımının artan sıcaklıkla ters orantılı olarak değiştiği belirtilmiştir [28]. En iyi sonuçların 350°C'ye kadar olan sıcaklıklarda sağlandığı ve 800°C' de dayanımda oldukça azalma görüldüğü gözlenmiştir.

Son zamanlarda yangın tesiri altında kalan betonun davranışlarını belirlemek amacıyla da bazı çalışmalar yapılmıştır.

Faiyadh ve Aussi'nin [29], yaptıkları çalışmada normal ve lifli betonların basınç dayanımları üzerine artan sıcaklığın ve tekrar soğutmanın etkisini incelemişlerdir. Yangının etkisi altında kalan betonların davranışlarını, gerilme-deformasyon özelliklerini ve yüksek ısı altında malzemede görülen hasarları belirlemek amacıyla yapmışlardır. Bu çalışmada, lifli betonlar üreterek 20°C ile 800°C arasında değişen sıcaklıklarda belirli süre bekletildikten sonra hem havada hemde suda saklamanın etkisini araştırmışlardır.

Sonuç olarak, bütün sıcaklıklarda lifli betonun dayanımı normal betona göre daha yüksek olmaktadır. Bu özelliğin, uygulanan sıcaklık etkisinden sonra, numuneler havada ve suda ayrı ayrı kür'e tabi tutulduğunda, beton içerisinde bulunan liflerin çatlak oluşumunu engellemesiyle sağlandığını söylemişlerdir. Ayrıca bu betonların yapısı itibariyle, çatlamayı engeleyerek enerji emme kapasitesini artırmakta ve oluşan çekme gerilmelerinin bir kısmını lifler taşımaktadır.

Kısaca beton içerisine katılan liflerin yapısı ve özelliklerine bağlı olarak yüksek dayanımlı beton üretilebilmekte ve bunun sonucunda ekonomik ve teknik yönden önemli avantajlar sağlanabilmektedir.

Daha önce yapılan çalışmalara dayanılarak, lifli betonların mekanik özelliklerine etkiyen en önemli parametrelerin lif miktarı ile narinlik oranının olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

1.1.4. Lifli Betonların Mekanik Özellikleri İle İlgili Bağıntılar

Lifli betonların mekanik özelliklerini, matrix ve liflerin sabitlerine bağlı olarak ifade eden bağıntılar, elastisite teorisi ve denge denklemleri yardımıyla çıkarılmaktadır.

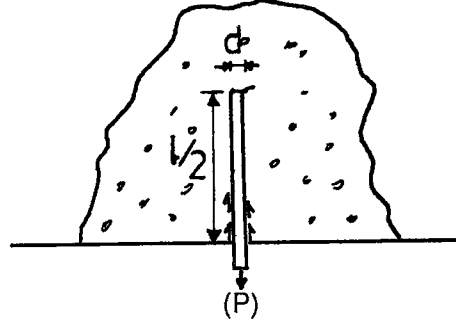
Lifli betonlarda yük, iki faz tarafından taşınmaktadır. Çekme gerilmelerini karşılayan ve süreksiz dağılı faz olarak adlandırılan lif fazına, yükün sürekli fazı teşkil eden matrix tarafından aktarıldığı kabul edilmektedir [30], [31], [32].

Lifler belli boylarda olduğu zaman lifte oluşacak gerilme sürekli haldekinden daha küçüktür. Çünkü bu gerilme lif ile matrix arasındaki aderansdan aktarılan kuvvetten meydana gelmektedir. Bunu, Şekil 1.2'de görüldüğü gibi, bir ucu $l/2$ kadar matrix içine gömülü bir lif üzerinde açıklamak mümkündür.

Lifleri gerilme yönüne paralel bir kompozitte, lifte oluşacak çekme gerilmeleri ile lif boyu, çapı ve lif-matrix aderans gerilmeleri arasında,

$$\sigma_f \cdot (\pi d^2/4) = \pi d \cdot (l/2) \cdot \tau \dots \dots \dots (1.2)$$

denge denklemi yazılabilir. Burada (σ_f) lifte oluşan çekme gerilmesi, (d) lif çapı, (l) lif boyu ve (τ) lif-matrix ara yüzeyinde yükleme etkisiyle oluşan ortalama aderans gerilmesidir. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi (P) dış kuvvet ile aderans gerilmelerinden doğan kuvvet denge halindedir.

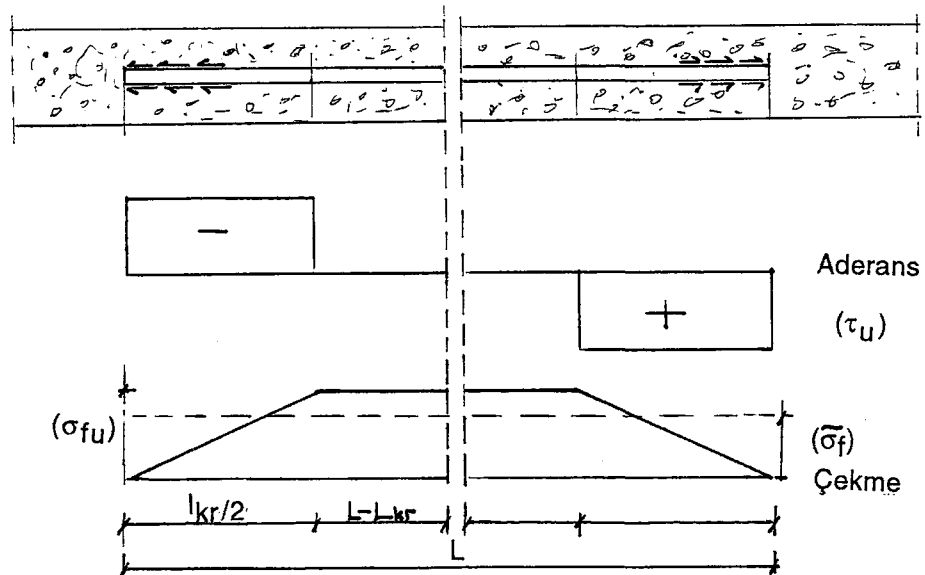


Şekil 1.2 Tek Lifin Aderans Deneyi.

Lifteki gerilme en fazla lifin çekme dayanımına (σ_{fu}) eşit olduğuna göre kritik narinlik oranı ifadesi de şu şekilde hesaplanabilir. Burada (τ_u) Kayma aderans dayanımıdır.

$$(l_{kr}/d) = (\sigma_{fu}/2\tau_u) \dots \dots \dots (1.3)$$

(l/d) narinlik oranı, kritik değerden büyük olan ve tümüyle matrix içinde bulunan bir lifin çekme gerilmesi ve aderans gerilmesinin lif boyunca dağılımı, Şekil 1.3'deki gibi kabul edilirse, belli bir (l) boyundaki lifin taşıdığı ortalama gerilme değeri (σ_f) moment diyagramından,



Şekil 1.3 Lif Boyunca Çekme Ve Aderans Gerilmelerinin Dağılımı

$$l.\tilde{\sigma}_f = \sigma_{fu} \cdot (l - l_{kr}) + (\sigma_{fu} \cdot l_{kr} / 4) \cdot 2 \dots \dots \dots (1.4)$$

$$\tilde{\sigma}_f = \sigma_{fu} \cdot (1 - l_{kr} / 2l) \dots \dots \dots (1.5)$$

şeklinde hesap edilir. Bu denklemlerdeki σ_f ve σ_{fu} gerilmelerinin birbirine oranı, Krenchel tarafından "Boy Etkinlik Katsayısı" (η_1) olarak ifade edilmektedir.

$$\eta_1 = \sigma_f / \sigma_{fu} = 1 - (l_{kr} / 2l) \dots \dots \dots (1.6)$$

Bu durumda liflerin beton içerisinde süreksiz dağılı olmaları halinde lifde oluşacak ortalama gerilme;

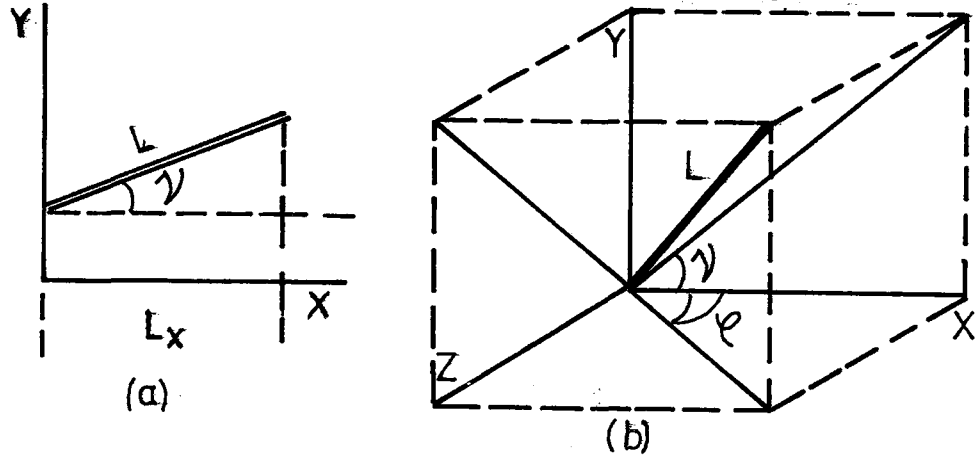
$$\tilde{\sigma}_f = \eta_1 \cdot \sigma_{fu} \dots \dots \dots (1.7)$$

şeklinde olacaktır.

Diğer taraftan, liflerin süreksiz dağılı olmalarının yanı sıra, kuvvet eksenine doğrultusuna paralel bulunmamaları halinde de etkinlikleri azalmakta, ikinci bir "Yön Etkinlik Katsayısı" (η_2) söz konusu olmaktadır. Şekil 1.4'de bir düzlemde ve üç boyutta serbestçe yönelmiş bir lifin durumu şematik olarak verilmektedir.

Böylelikle, hacimde üç boyutta dağılı süreksiz , belirli boydaki liflerin kompozite ait elastik sabitlerin hesaplanmasında boy ve yön bakımından η_1 ve η_2 katsayılarının etkili olduğu görülmektedir.

Romualdi ve Mandel'in düzlemde serbestçe dağılı ve uzayda üç boyutta gelişi güzel dağılı liflerin etkinlik katsayısı olarak verdikleri 0.637 ve 0.405 değerleri, Kameswara Rao[33]'nun yüzeye yaklaşıldıkça değişen etkinlik değerlendirmesi için iki boyutta ve uzayda bir alt sınır oluşturmaktadır. Tablo 1.1'de kompozitlerde lif yönelmesine bağlı olarak lif etkinlik katsayısı η_2 'nin değerleri verilmektedir [4].



Şekil 1.4 Liflerin Kuvvet Doğrultusuna Açılı Yaparak Bulunmaları Halleri,

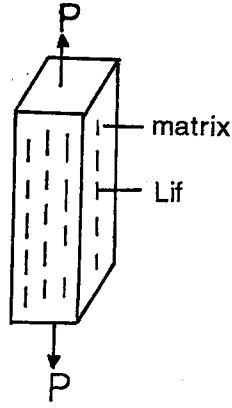
- a) Düzlemde Serbestçe Yönlenmiş Lif
- b) Üç Boyutta (Hacimde) Yönlenmiş Lif

Tablo 1.1. Kompozitlerde lif yönlenmesine bağlı olarak lif etkinlik katsayıları (η_2)

Lif Yönlenmesi	Cox	Krenchel	Romualdi-Mandel	Kamaswara Rao (alt ve üst sınır)
Kuvvet Yönünde	1	1	1	1
Düzlemde Dağılı	1/3	3/8	0.64	$2/\pi \leq \eta_2 \leq 1$
Uzayda Dağılı	1/6	1/5	0.41	$4/\pi^2 \leq \eta_2 \leq 2/\pi$

1.1.4.1. Elastik Sabitlerin Hesabı

Kompozit malzemenin elastik sabitlerinin teorik olarak hesaplanmasında bazı kabuller yapılmaktadır [30], [32]. Şekil 1.5'de görüldüğü gibi, lifler dış yüklerden dolayı sadece kendi doğrultusunda kuvvet almaktadır. Dış yükler hem yük doğrultusunda, hem de buna dik doğrultuda deformasyon meydana getirmektedir. Lif ve matrix malzemesinin Hooke kanuna uyduğu kabul edilmekte ve Poisson oranları arasındaki farklar ihmal edilmektedir.



Şekil 1.5 Tek Eksenli Çekme Halinde Lif-matrix Kompoziti

Bu kompozitin hacmi $V_c=1$ ve liflere dik herhangi bir kesitin alanı $F_c=1$ olarak kabul edildiğinde,

$$V_f/V_c = V_f/1 \dots\dots\dots (1.8)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m = \sigma_c/E_c = \sigma_f/E_f = \sigma_m/E_m \dots\dots\dots (1.9)$$

$$P = \sigma_c \cdot F_c = \sigma_f \cdot F_m + \sigma_m \cdot F_m \quad (F_m + F_f = F_c) \dots\dots\dots (1.10)$$

olarak yazılması mümkündür. Bu denklemlerde sırasıyla (F , V , E , σ , ϵ , P) alan, hacim, elastisite modülü, gerilme, şekildeğiştirme oranı ve kuvveti, (f , m , c) indis olarak lif, matrix, kompoziti ifade etmektedir. Bu durumda birim kompozit alanındaki ($F_c=1$) ortalama gerilme (σ_c) için,

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot F_f + \sigma_m (1 - F_f) \dots\dots\dots (1.11)$$

bağıntısı yazılabilir. Lif teknolojisinde genellikle hacim oranı kullanıldığından, birim boy ($l=1$) için alan oranlarını hacim oranlarına eşit kabul ederek,

$$V_c = F_c = 1 \text{ ve } V_f = F_f \text{ olduğundan,}$$

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m (1 - V_f) \dots\dots\dots (1.12)$$

ve iki tarafı (σ_m)'e bölersek,

$$\sigma_c/\sigma_m = \sigma_f/\sigma_m \cdot V_f + (1-V_f) \dots \dots \dots (1.13)$$

(1.9) eşitliğinin kabulü ile,

$$\sigma_c/\sigma_m = E_c/E_m = 1 + V_f \cdot ((E_f/E_m) - 1) \dots \dots \dots (1.14)$$

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m(1-V_f) \text{ veya,}$$

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m V_m \dots \dots \dots (1.15)$$

ifadelerini yazmak mümkündür [31], [32]. Burada:

E_c , E_m , E_f : Sırasıyla kompozit malzemesinin, matriksin ve lifin elastisite modüllerini göstermektedir. V_m , V_f : sırasıyla matriksin (Devamlı Faz) ve lifin (Dağılı Faz) kompozit malzeme içindeki hacimsel yüzdeleridir. ($V_m + V_f = 1$)

Liflerin sürekli ve kuvvet yönünde olduğu kabulü ile kompozitin elastisite modülü ve mukavemeti için elde edilen bağıntılar, lif boyu, süreksiz lif ve yönlenmesi faktörlerinin de eklenmesiyle aşağıdaki şekli almaktadırlar.

$$E_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot E_f \cdot V_f + E_m(1-V_f) \dots \dots \dots (1.16)$$

$$\sigma_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m(1-V_f) \dots \dots \dots (1.17)$$

Sürekli liflerle pekiştirilmiş kompozit malzemelerin çekme halindeki göçme (Ultimate) mukavemetinin hesaplanmasında (1.12) bağıntısından yararlanılmaktadır. Liflerin üniform yayılı olduğu ve hepsinin mukavemetinin aynı olduğu kabul edilirse belirli bir (V_{min}) hacimsal yüzdesinden fazla lif içeren bir kompozitin, teorik olarak liflerin göçmedeki şekil değiştirmesine eşit toplam bir şekil değiştirmeye vardığında göçtüğü söylenebilir. Buna göre,

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \cdot V_f + (\sigma_m')_{\epsilon = \epsilon_{fu}} (1-V_f) \dots \dots \dots (1.18)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada:

σ_{cu}, σ_{fu} : sırasıyla kompozit malzemenin ve lifin göçme mukavemetini,
 V_f : lif hacimsal yüzdesi,
 ε_f : Lifin kopmadaki (Göçme) şekildeğiştirme oranı,
 $(\sigma_m')_{\varepsilon=\varepsilon_{fu}}$: Matriksin σ - ε bağıntısında (ε_f) 'ye karşılık gelen gerilmeyi göstermektedir.

Kompozit malzemelerin boyutlandırılmasında çoğu zaman teorik modellerden yararlanılmaktadır. Bu modellere ait bağıntıların çıkarılmasında uygulanan karışım kuralı çoğu kez göçme mukavemetleri arasındaki ilişkinin araştırılmasında kullanılmaktadır. Aynı şekilde liflerin süreksiz olması durumunda da

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \dots \dots \dots (1.19)$$

bağıntısı kullanılmaktadır [34].

Ancak, o zaman liflerin göçme (akma) mukavemetine erişmesi veya bu değere ulaşmadan kayma mukavemetinin aşılması liflerin matriks içinden sıyrılıp çıkarak, kompozitin taşıma gücüne katkılarının ortadan kalkması lif boyuna bağlıdır.

Lifteki ortalama çekme gerilmesi (σ_f) ile ortalama lif-matrix kayma gerilmesi (τ) arasında (1.3) bağıntısına göre;

$$\sigma_f = 2\tau \cdot l/d \dots \dots \dots (1.20)$$

şeklinde bir ilişki yazılabilir. Burada (l) lif boyu ve (d) lif çapını göstermektedir. (1.20) bağıntısı, ideal plastik matriks içinde elastik liflerin olması hali için çıkarılmıştır. (1.20) bağıntısını (1.19)'da yerine yazarsak,

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + (2\tau \cdot l/d) V_f \dots \dots \dots (1.21)$$

elde edilir. Bu bağıntının çekme ve eğilme halleri için geçerli olduğu daha önce yapılan çalışmalarda görülmüştür [8].

Bu yüklenme halinde (1.21) bağıntısındaki (σ_c) ve (σ_m) gerilmeleri, kompozit ve matriks malzemelerindeki eğilme-çekme gerilmeleri olarak düşünülmelidir. Lifler kompozit malzeme içinde yönlenmiş ve gelişi güzel dağılmışsa, gerilmenin etkidiği yönde (V_f) hacimli liflerin tümü etkili olmayacaktır. Bu durumda (1.21) bağıntısında (V_f) değerini etkinlik katsayısı olarak tanımlanan bir (η) katsayısı ile çarpmak gerekecek ve bağıntı,

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot (1 - V_f) + (2\tau \cdot l/d) \eta V_f \dots \dots \dots (1.22)$$

şekline dönüşecektir. Romualdi ve Mandel [4], yaptıkları bir çalışmada (η) etkinlik katsayısının (0.41) alınabileceğini ileri sürmüşlerdir. Bu değer (1.22) bağıntısında yerine konulursa,

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot (1 - V_f) + (2\tau \cdot l/d) (0.41) V_f \dots \dots \dots (1.23)$$

veya,

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot (1 - V_f) + (0.82\tau \cdot l/d) V_f \dots \dots \dots (1.24)$$

olur. Bu ifade yeniden düzenlenirse,

$$\sigma_c / ((l/d) V_f) = \sigma_m \cdot (1 - V_f) / ((l/d) V_f) + (0.82\tau) \dots \dots \dots (1.25)$$

şekline dönüşür. Göçme mukavemeti için elde edilen bu bağıntı kompozit malzemede ilk çatlağın ortaya çıktığı kritik gerilme için de geçerlidir. Aynı şekilde Swamy ve Mangat [34], yaptıkları çalışmada çelik lifli betonların eğilme dayanımı sonuçlarına (1.25) bağıntısını uygulayarak,

$$\sigma_c = 0.97\sigma_m \cdot (1 - V_f) + 3.41 V_f \cdot (l/d) \dots \dots \dots (1.26)$$

bağıntısını bulmuşlardır. Bu bağıntıya göre $\tau = 3.41/0.82 = 4.16 \text{ N/mm}^2$ dir.

1.1.5. Isıl İşlemler İle İlgili Genel Bilgiler

Beton, inşaat sanayiinde yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Betonun dayanımını erken kazanması ve daha kısa sürede servise sunulması, gelişmekte olan endüstrileşmenin bir neticesidir. Bu konuda çeşitli yöntemler uygulanarak betona erken dayanım kazandırılmaktadır [7], [36].

Bu yöntemleri kısaca şu şekilde sınıflandırmak mümkündür [36], [37], [38].

- 1) Priz hızlandırıcı ve akışkanlığı artırıcı katkıları kullanmak,
- 2) Kristal çekirdekleri kullanmak,
- 3) Isıl işlem yöntemi,
- 4) Yüksek basınç altında sıcaklığı artırmak,

Betona erken dayanım kazandırma yöntemlerinin uygulanmasıyla aşağıdaki sonuçlara ulaşmak mümkün olabilecektir.

- Soğuk havalarda beton üretimi yapabilmek,
- Üretim artışını hızlandırmak, iklim koşullarının getirdiği olumsuz etkilerden kurtulmak,
- Yapıda kalıp alma süresini kısaltarak kalıbı daha rasyonel şekilde kullanmak,
- Ön gerilmeli betonlarda, ön gerilmenin daha çabuk uygulanmasını sağlamak,
- Üretilen yapı elemanlarının depolarda bekleme süresini kısaltarak daha küçük depolama alanlarına ihtiyaç duymak,
- Üretilen betonun kalite kontrolünün daha kısa sürede yapılmasına imkan sağlanmaktadır.

Prefabrike yapı elemanlarının üretiminde kullanılan betonun, normal şartlarda, erken yaşlardaki mukavemet artış hızı prefabrikasyonun gerektirdiği hızın gerisinde kalır. Betonun erken yaşlardaki mukavemet gelişimini hızlandırmada kullanılan yöntemler arasında en yaygın olanı ISIL İŞLEM'dir. Aşağıda bu yöntem ayrıntılı olarak incelenecektir.

1.1.5.1. Isıl İşlemlerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Isıl işlemler, çeşitli teknolojilerden yararlanarak betonu ısıtmak suretiyle, betonun daha kısa sürede mukavemet kazanmasını ve hizmete sunulmasını amaçlayan yöntemler olarak tanımlanabilir.

Isıl işlem yöntemleri uygulama prensiplerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılır [7], [39].

- 1) Betonun yerleştirilmesinden önce ısıtılması,
 - a) Betonun oluşturan karma suyu ve agreganın ısıtılması,
 - b) Taze betonun ısıtılması,
- 2) Betonun yerleştirilmesinden sonra elemanın ısıtılması,
 - a) İç ısıtma,
 - b) Dış ısıtma (Atmosfer Basıncında Buhar Kürü, Sıcak Hava),

Başka bir sınıflandırma ise basınçlı ve basınçsız (Atmosfer basıncında) olmak üzere yapılabilir. Bu sınıflandırmaya göre, basınçlı buhar kürü dışındaki bütün ısıtma işlem yöntemlerinin uygulanmasında sağlanan sıcaklıklar 100°C 'nin altında kalmakta ve bunların hidrotasyon reaksiyonları üzerindeki etkileri de benzer olmaktadır. Basınçlı buhar kürü yönteminde ise sıcaklık $160\text{-}190^{\circ}\text{C}$ arasında uygulanmaktadır [10], [39], [40]. Dolayısıyla bu yöntemin hidrasyon sonucunda verdiği ürünler farklılık göstermektedir.

Betona kalıpta ısıtma işlem uygulaması fiziksel prensiplere bağlı olarak aşağıdaki şekilde gruplandırılmaktadır [41], [42], [43].

- 1) Isı transferi ile ısı uygulaması,
 - a) Doymuş buhar ile ısı transferi,
 - b) Sıcak hava ile ısı transferi,
- 2) Kondüksiyon yolu ile ısı transferi,
- 3) Işınlama (Radyasyon) yolu ile ısı transferi

Bu araştırmada uygulanan ısı ışlem yönteminde, doygun buhar ortamında ısı transferi ile dış ısıtma uygulaması olan "Atmosfer Basıncında Buhar K r " yönteminden yararlanılmıştır [44], [45].

Beton elemanlara uygulanan ısı ışlem sırasında ortam neme doygun olduğundan ve betonda buharlaşmanın önlenmesi gibi özellikler açısından bu yöntemin diğer yöntemlere göre üstünlükleri vardır. Bu ışlem genellikle kalıptan çıkarılmış beton blok veya boru gibi yapı elemanlarında önem kazanır [10], [46].

1.1.5.2. Isıl ışlem Yöntemlerinin Hidratasyona Etkisi

Betona erken dayanım kazandırma yöntemlerinden ısı ışlem yöntemi; beton sıcaklığını artırmaktır. Sıcaklığın artması sonucunda  imento bileşenleri     nerek hidratasyonun kinetiğini etkilemektedir. Hidratasyon olayına etki eden bütün parametreler betonun mukavemetini de aynı şekilde etkilemektedir. Hidratasyonun reaksiyon hızı arttıkça buna paralel olarak betonun mukavemet kazanma hızı da yükselir. Bu reaksiyonlardaki artış, 4-100 C sıcaklıkları arasında geçerli olan ARRHENIUS denklemine uygun olarak şöyle ifade edilmektedir [38], [43].

$$K=Ae^{-Q/RT}$$

burada,

K :Reaksiyon Hızı

A :Denkleml Sabiti

Q :Aktivasyon Enerjisi (Kal./Mol.)

R :Gaz Sabiti (1.986 Kal./Mol. K)

T :Mutlak Sıcaklık ( K)

Son   olarak hidrotasyon reaksiyonlarının hızlanmasıyla beraber betonun mukavemeti de kısa sürede yüksek değerlere ulaşır.

1.1.5.3 Isıl İşlemi Etkiyen Faktörler

Isıl işlem yöntemini etkileyen faktörler aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir [7].

- 1) Malzeme özellikleri
 - a) Beton Bileşimi
 - b) Betonun Yerleştirme ve Sıkıştırma Olanakları
- 2) Yapı elemanının Geometrik özellikleri
- 3) Isıl İşlem Çevrimi
- 4) Teknolojik Veriler (Ortamin nemi, Konveksiyon Katsayısı, homojenlik, Kalıp türü)
- 5) Saklama Koşulları

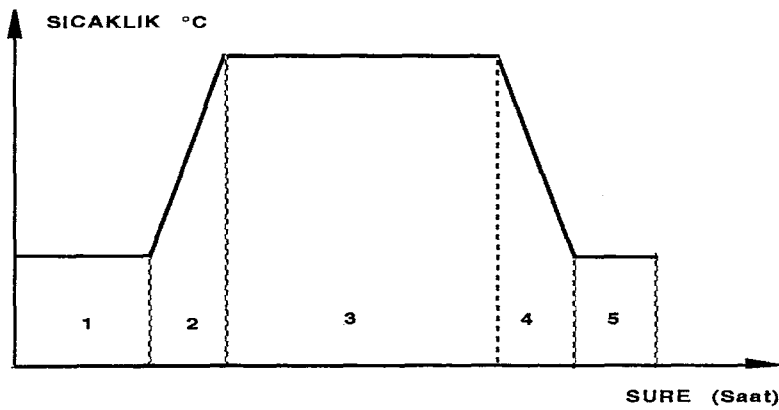
Bu faktörler arasında en önemlisi ısı işlem çevrimidir.

1.1.5.4. Isıl İşlem Çevrimi

Betonun kalıba yerleştirilmesinden sonra elemanın doygun buhar ortamında dışarıdan ısıtılması yoluyla uygulanan ısı işlemde; ısı işlem çevrimi Şekil 1.6'da gösterildiği gibi şu dönemlerden oluşmaktadır [7], [41], [45], [47].

- 1) Ön Bekleme Dönemi (Presteaming Period)

Betonun kalıba yerleştirilmesi ile ısıtmanın başlaması arasında geçen süredir. Bu dönemin parametreleri süre ve sıcaklıktır.



Şekil 1.6 Isıl İşlem Çevrimi

2) Isıtma Dönemi (Temperature Rise Period)

Kalıba yerleştirilen betonun istenen bir sıcaklık artış hızıyla belirlenen maksimum sıcaklığa yükselmesidir. Bu döneme ait parametre sıcaklık artış hızıdır.

3) İşlem Dönemi (Period of Maksimum Temperature)

Beton elemanlarının belirlenen maksimum sıcaklıkta tutulduğu dönemdir. Sıcaklık ve süre bu döneme ait parametrelerdir.

4) Soğutma Dönemi (Cooling Period)

Isıtmadaki işlem dönemi sona erip elemanların istenen bir hızla sıcaklığının azalmasıdır. Burada soğuma hızı bu dönemin parametresidir.

Bunlardan da anlaşılacağı gibi ısıtma işlemi çevrimi sıcaklık ve zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu parametrelerin değişimine göre, pratikte uygulanan çevrimler aşağıdaki şekilde gruplandırılmaktadır [7].

1) Hızlı (Sert) çevrimler

İşlem sıcaklığı 80-90°C arasında değişen ve toplam çevrim süresi 6-7 saat olan çevrimlerdir. Günde üç rotasyona imkan verirler. Ön bekleme süresi en fazla 1 saat, ısıtma ve soğutma hızı 30°C/Saat civarındadır. Soğutma tamamlanmadan kalıp alınır.

2) Orta (İlımlı) çevrimler

İşlem sıcaklığı 70°C civarında ve toplam çevrim süresi 9-11 saat olan çevrimlerdir. Günde iki rotasyona olanak sağlar. Ön bekleme süresi 2-3 saat, ısıtma ve soğutma hızları 15-20°C/Saat'dır. Soğuma tamamlanmadan kalıp alınır.

3) Yavaş (Yumuşak) çevrimler

İşlem sıcaklığı 60°C geçmeyen ve toplam çevrim süresi 20-22 saat olan çevrimlerdir. Ön bekleme süresi 4 saat, ısıtma ve soğutma hızları 10°C/Saat'dır. Kalıp alınırken soğuma tamamlanmıştır.

Isıl işlem uygulamanın amacı, betonun mukavemet gelişimini hızlandırarak en kısa sürede gerekli yüksek dayanımına erişmesini sağlamaktır. Ancak, ısıl işlem erken yaşlardaki mukavemeti artırmaya karşılık, genellikle ileriki yaşlardaki mukavemeti, normal şartlar altında kürlenmiş betonun dayanımına oranla azaltmaktadır. Bu azalma, özellikle yumuşak çevrimlerden sert çevrimlere geçildikçe artmaktadır. Dolayısı ile elverişsiz bir ısıl işlem çevriminin uygulanması betona büyük zararlar vermektedir. [7], [36], [39].

Buradan anlaşılacağı gibi uygulanacak ısıl işlem çevriminde, kısa sürede sağlanan mukavemetin yanında ileri yaşlardaki mukavemetin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu bakımdan ısıl işlemin başarı derecesi, "Mukavemette Kısa sürede sağlanan artışın yüksekliği ve ileri yaşlarda gözlenen kaybın düşüklüğü" olarak değerlendirilmektedir [39].

Beton sıcaklığının artmasına paralel olarak hidrasyon reaksiyonlarındaki hızlanma ile beton dayanımı kısa sürede yüksek değerler alır. Betonda dayanım artışının fazla olması için sıcaklık artışının yanında ortamın yeterince neme doymuş olması gereklidir [10]. Isıl işlem sırasında betondan suyun buharlaşması en az olmaktadır.

Öztekin [7], çalışmasında yapmış olduğu yayın taraması ve analiz sonucu olarak, ısıl işlemin beton üzerindeki etkisini iki değişik açıdan ele almanın gerekli olduğunu söylemiştir.

1)Sertleşmiş çimento hamuru yapısında, yüksek sıcaklıkta hidrasyon sonucu oluşan kaçınılmaz yapısal bozukluk (Hidrasyon ürünlerinin heterojen dağılımı, artan kristalleşme ve porozite),

2) Aşırı genleşme, ısı gerilmeler ve su kaybı sonucu oluşan kaçınılmaz fiziksel bozukluk (Kalıcı hacim artışı, mikro ve makro çatlaklar, aşırı su kaybı ve kuru saklama koşulları nedeni ile tamamlanamayan hidrasyon)

Burada göz önüne alınması gereken özelliklerden birisi ısı işlemi olumsuz yönden etkileyen işlem parametrelerinin (Kısa ön bekleme süresi gibi), yapı elemanlarının üretim hızını olumlu yönde etkileyerek, bir çelişki yaratmasıdır. Bu yüzden ısı işlem uygulamaları yapı elemanından beklenen özelliklere göre büyük çeşitlilik gösterir. Örneğin ön gerilmeli beton elemanlarında yapı güvenliği nedeniyle yumuşak çevrimler tercih edilirken, beton duvar elemanlarında maliyet nedeniyle daha sert çevrimler uygulanabilir. Yani tüm elemanlar için optimum bir çevrimden söz etmek olanak dışıdır.

Yukarıda sözü edilen fiziksel kusurlara neden olan aşırı su kaybı, buhar kürü uygulaması ile önemli ölçüde önlenabilmektedir. Basit bir teknolojiye sahip olduğu için tercih edilen buhar kürü uygulamasında ortamı %100 bağıl nemle doyurmak pek mümkün olmamaktadır. Bunun yanında hidrasyon ısı sonucu beton sıcaklığının artması ortam sıcaklığının üstüne çıkabilmesi, beton serbest suyu buhar basıncını ortamdaki kısmi buhar basıncından yüksek olmasına ve beton suyunun buharlaşmasına neden olabilir. Herşeye rağmen buhar, ısı ve nemin beton ürününe en ekonomik ve en etkin şekilde temin edildiği bir yöntem olduğu için atmosferik basınç altında buhar kürü uygulaması en yaygın ısı işlem uygulamasıdır.

1.2 Araştırmanın Amacı

Agrega, çimento ve beton içerisinde çoğunlukla süreksiz dağılılı liflerin suyla karıştırılmasından meydana gelen lifli betonun mekanik özellikleri, bileşenlerin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Beton içerisinde homojen olarak dağılılı lifler, belli bir yüklemeden sonra meydana gelen çekme gerilmelerini karşılamaktadır. Bu yüzden lifler betonun iç yapısındaki çatlak oluşumunu engelleyerek eğilme dayanımlarını artırmaktadır. Ayrıca betonun parçalanmadan büyük şekil değiştirme yapmasına olanak sağladığından tokluğu ve darbe yüklerine karşı direnci de artırmaktadır.

Ekonomik ve teknik açıdan önemli avantajlar sağlayan lifli betonun, mukavemet gelişimini hızlandırmada, ısıtım işlem uygulamasının betonun ilk ve ileriki yaşlardaki mukavemet gelişimini ne şekilde etkilediğini araştırmak çalışmanın esas amacını oluşturmuştur.

Lifli betonlara ısıtım işlem uygulanması ile, ilk yaşlardaki mukavemet artışı daha da yükselebilir. Bu yüzden erken yaşlarda kazanılan bu mukavemet artışı, bilhassa prefabrike yapı elemanları üretiminde kalıp süresini kısaltarak elemanın daha az bir zamanda servise sunulmasına olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla hem zamandan hem de kalıptan daha ekonomik bir şekilde yararlanmak mümkün olacaktır.

Yapılan çalışmalar sonunda, çimentolu sistemler içine katılan liflerin başlıca rolünün betonda oluşan çatlakların matrix içinde ilerlemelerinin yavaşlatılmasıdır. Bu sebeple ısıtım işlem uygulanmış elemanların taşınması ve yerleştirilmesi esnasında oluşacak çatlama ve kırılmalar da lifler tarafından önlenabilir.

Ayrıca eğilme dayanımı sonuçları ile lif-matrix aderansının ısıtım işlem uygulamasına bağlı olarak değişiminin araştırılması ve aralarındaki ilişkinin ne mertebede olduğunun incelenmesi de amaçlanmıştır.

Sonuç olarak, lifli betonlara uygulanacak ısıtım işlem çevrimlerinin betonun elastik ve inelastik özelliklerini ne şekilde etkilediğinin araştırılmasıyla, betona lif katılmasının ısıtım işlem çevriminin başarı derecesi üzerindeki etkinliği belirlenmiştir.

1.3. Araştırmanın Kapsamı

Bu çalışmada, betonun ilk yaşlardaki mukavemet gelişimini hızlandırmada yararlanılan ısıtım işlem uygulamasının lifli betonun erken ve ileriki yaşlardaki mukavemet gelişimini ne şekilde etkilediğini anlamak için deneysel bir araştırma yapılmıştır.

Çalışmada lif yüzdeleri 0 ile 1.0 arasında değişen 5 farklı bileşimde beton üretilmiştir. Üretilen betonların karışımında maksimum agrega tane boyutu 16 mm

olarak sabit tutulmuştur. Agrega karışım granülometrisi ve etkin su-çimento oranı da sabittir.

Araştırmada kullanılan çimento türü PÇ 325 Portland çimentosu ve dozajı 350 kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur.

Hacimsal lif yüzdeleri 0, 0.25, 0.50, 0.80 ve 1.0 olarak değişen betonlara ön bekleme süreleri, ısınma ve soğuma hızları, ısıtma işlem sıcaklıkları ve toplam çevrim süreleri birbirinden farklı 3 tip ısıtma işlem uygulanmıştır. Bunlardan işlem sıcaklığı 50°C olan ısıtma işlemi "Yumuşak Çevrim", 65°C olan çevrime "İlımlı Çevrim" ve 80°C olan çevrimde "Sert Çevrim" denilmiştir.

Isıtma işlem uygulanan betonlara ait özelliklerinin değişimini rölatif olarak inceleyebilmek için, her lif yüzdesi için üretilen betonlardan, birer seri ısıtma işlem uygulanmadan sıcaklığı $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ve rutubeti $\%60 \pm 5$ olan klima odasında, kuru edilmiştir. Bu betonlara, çalışma içerisinde " 20°C de saklama" veya "Isıtma sıcaklığı 20°C olan betonlar" şeklinde bahsedilecektir.

Parametrelerin bu şekilde kabul edildiği bu çalışmada; prizmatik olarak üretilen betonlarla 1, 28 ve 90 günlük ultrases hızı, basınç ve eğilme mukavemetleri saptanmıştır. Ayrıca 28. günde kılcallık ve su emme deneyleri yapılarak numunelerin difüzyon katsayısı, görünen porozite ve birim ağırlık oranları bulunmuştur. Silindirik numuneler üzerinde ise 28 ve 90 günlük kısa süreli basınç deneyleri yapılarak lifli betonun elastik ve elastik olmayan özellikleri belirlenmiştir. Bulunan eğilme deney sonuçlarından faydalanılarak, lifli betonun mekanik özelliklerine ait daha önce yapılan çalışmalarda bulunan bağıntılar yardımıyla, lif-matrix kayma aderans gerilmesi üzerine ısıtma işlem çevrimlerinin etkisi de araştırılmıştır.

Sonuç olarak, farklı lif yüzdeleri kullanılarak üretilen lifli betonlara, değişik ısıtma işlem çevrimleri uygulanarak, betonun elastik ve elastik olmayan özellikleri üzerine ısıtma işlemlerin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu etki, 20°C 'de saklanan liffsiz beton numunelerin değerlerine göre karşılaştırılarak irdelenmiştir.

BÖLÜM 2.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemenin Tanımlanması

2.1.1. Agrega Özellikleri

2.1.1.1. Kum

Çelik lifli beton numunelerinin üretiminde, İstanbul'da Karadeniz'in batı kıyısında çıkarılan tabii Podima kumu kullanılmıştır. 4 mm'lik kare gözlü elekten elenen kum üzerinde yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar Tablo 2.1'de verilmektedir. Granülometrik analiz T.S. 706'daki elek takımına göre belirlenmiştir [48], [49].

Tablo 2.1. Podima kumunun özellikleri.

Kumun Kökeni	Elekten Geçen Malzeme (%)					Özgül Ağırlık (Kg/m ³)	Su Emme (%)	Gevşek Birim Ağırlık (Kg/m ³)
	0.25 (mm)	0.50 (mm)	1.0 (mm)	2.0 (mm)	4.0 (mm)			
Podima	10	78	84	88	100	2620	0.68	1510

Podima kumu üzerinde yapılan deneylerde, organik madde bulunmadığı (renk açık), 24 saat dinlendirme sonucunda ağırlıkça %1.02 oranında çamurlu madde bulunduğu saptanmıştır. Deney TS 3527'e göre yapılmıştır [50].

2.1.1.2. Kırmataş

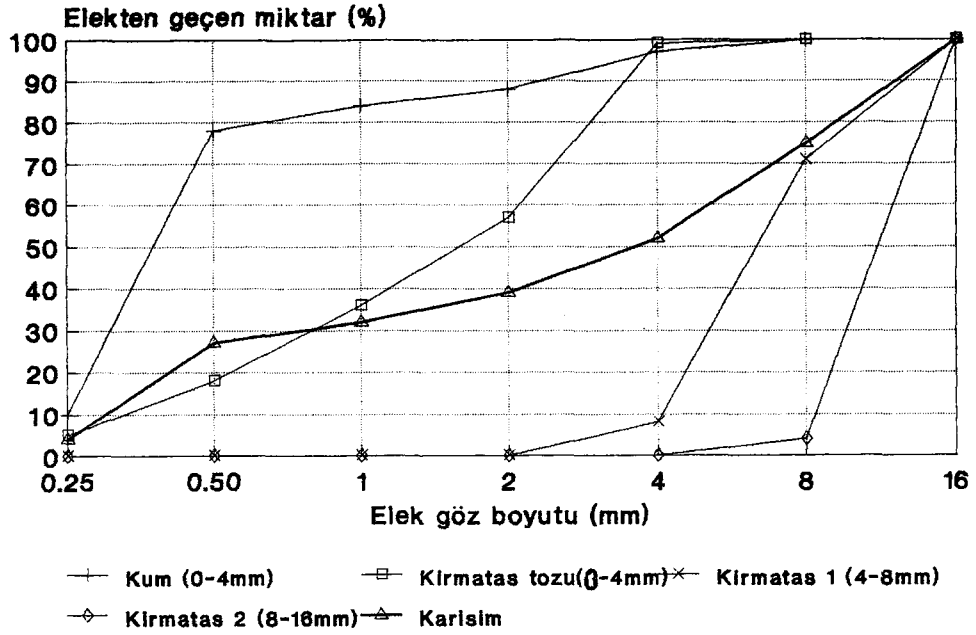
Lifli beton numunelerinin üretiminde üç çeşit kırmataş agregası kullanılmıştır. Bunlar karışımın ince malzeme miktarının ayarlanmasında kullanılan kırmataş tozu ile Gebze Kurtkal yöresinde çıkarılan Kırmataş I ve Kırmataş II agregalarıdır. Kırmataş tozu 0.50-4.0 mm arasında değişen tanelere sahip olup, kum ile beraber karışımın ince malzeme miktarını oluşturmaktadır. Lif katkılı betonun üretilmesinde, karıştırma ve yerleştirme zorluklarını azaltmak ve liflerin karışım içerisinde topaklanma oluşturmaması için karışımın maksimum agregata tane boyutu 16 mm olarak seçilmiştir. Bundan dolayı kırmataş agregaları 4/8 ve 8/16 mm olacak şekilde iki tane gurubuna ayrılmışlardır.

Beton bileşimine giren agregaların elek analizleri T.S 706'ya göre (Karedelikli elek ile) yapılarak granülometri değerleri ve özgül ağırlıkları Tablo 2.2'de verilmiştir [49].

Tablo 2.2. Agregata özellikleri

Agregata Cinsi	Elekten Geçen (%)							Özgül Ağırlık (kg/m ³)	Gevşek Birim Ağırlık (kg/m ³)
	0.25 (mm)	0.50 (mm)	1.0 (mm)	2.0 (mm)	4.0 (mm)	8.0 (mm)	16.0 (mm)		
Kırmataş Tozu	5	18	36	57	99	100	100	2680	1460
Kırmataş I	0	0	0	0	8	71	100	2710	1440
Kırmataş II	0	0	0	0	0	4	100	2700	1425

Agregalar, karışım hesaplarında suya doymun kuru yüzey olarak kabul edilmişlerdir. Şekil 2.1'de karışıma giren agregaların granülometri eğrileri ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Beton Karışımında Kullanılan Agregaların Granülometri Eğrileri

Granülometrik bileşenleri belli olan agregaların karışım içerisindeki oranları TS 706 şartnamesine göre (A₁₆-B₁₆) referans eğrileri arasında kalacak şekilde ayarlanarak (%) olarak değerler aşağıda verilmiştir.

Podima kumu	: %30
Kırmataş tozu	: %20
Kırmataş I	: %35
Kırmataş II	: %15

2.1.2. Çelik lif

Beton bileşimine katılan lif tipleri parağraf 1.1.2.2.'de belirtilmiştir. Bu çalışma da iki ucu bükülü birleştirilmiş çelik lifler kullanılmıştır. Bu liflerin en belirgin özelliği beton içerisinde çekme gerilmeleri altında kopmadan direnç göstermeleridir. Ayrıca beton içerisinde homojen olarak dağılmayı kolaylaştırmak amacıyla özel bir tutkalla (su içinde kolayca çözünebilen) birleştirilmiştir. Bu liflerin özellikleri Tablo 2.3.'de verilmiştir [6], [21].

Tablo 2.3. Çelik Lifin Özellikleri.

Lif Tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Narinlik Oranı	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Elastisite Modülü (N/mm ²)	Kg. daki Lif Sayısı (Adet)
ZP 30/0.5	30	0.5	60	1250	200000	21770

Deneylerde kullanılan lifin özgül ağırlığı 7480 kg/m³ olarak belirlenmiştir.

2.1.3. Çimento Özellikleri.

Deneylerde ROTA Denizcilik tarafından yurt dışından ithal edilen PÇ 32.5 tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. T.S 24'e göre çimento'nun fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiş ve T.S 19'da belirtilen PÇ 32.5 Standart değerlere uygun olduğu görülmüştür. Çimento'nun fiziksel ve mekanik özelliklerine ait sonuçlar aşağıda verilmektedir.

Tablo 2.4 Çimento'nun Fiziksel Özellikleri

Blaine Özgül Yüzeyi (cm ² /gr)	:3160
4700 Delikli Elekte Kalan (%)	:3.1
950 Delikli Elekte Kalan (%)	:0.2
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	:3.16
Normal Kıvam Suyu (%)	:27
Le Chatelier İğnelerinin Toplam Açılması (mm)	:1
Priz Başlangıcı	:3 Saat 15 Dak.
Priz Sonu	:4 Saat 45 Dak.

PÇ 32.5 çimentosunun iki günlük hidratasyon ısısı 72 cal/gr olarak bulunmuştur.

Tablo 2.5 Çimentonun Mekanik Özellikleri (Ortalama Değerler)

	Numunenin Yaşı	
	7 Gün	28 Gün
Basınç Mukavemeti (N/mm ²)	28.5	39.1
Eğilme Mukavemeti (N/mm ²)	5.4	7.1

PC 32.5 Portland çimentosunun mekanik özellikleri Rilem Cembureau yöntemine göre yapılmıştır. Bu çimentonun ana bileşenlerini oluşturan karmaoksitleri, aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

C ₃ S	: % 51.83
C ₂ S	: % 17.91
C ₃ A	: % 8.93
C ₄ AF	: % 11.43
Çözünmeyen	: % 0.4

2.2. Beton Karışımları

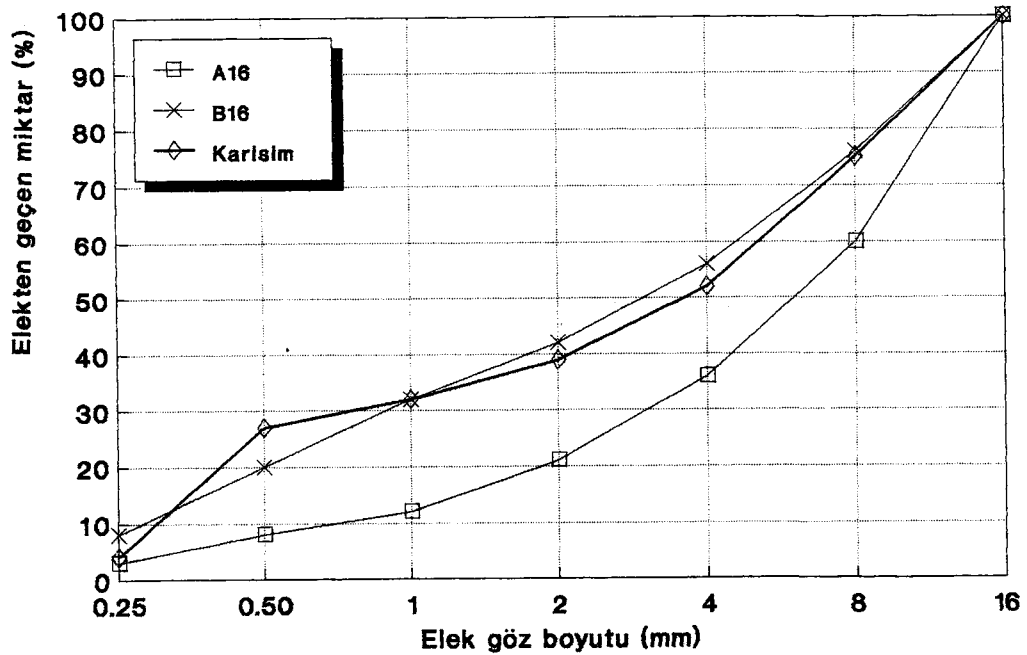
Lifli betonların üretiminde maksimum agrega tane boyutu 16 mm olarak seçilmiştir. Karışım agregasının granülometri eğrisi, TS 706 şartnamesine göre (A₁₆-B₁₆) referans eğrileri arasında kalacak şekilde saptanmıştır. A₁₆, B₁₆ ve karışım agregasının granülometri bileşimleri Tablo 2.6'da verilmiştir. Bunlara ait granülometri eğrileri Şekil 2.2'de grafik olarak gösterilmiştir.

Bütün beton bileşimlerinde çimento dozajı 350 kg/m³ olarak sabit alınmıştır. Karışıma lif katılması halinde, işlenebilmeyi kolaylaştırmak ve yerleştirme esnasındaki zorlukları aza indirebilmek amacıyla etkin su/çimento oranı 0.63 olarak saptanmıştır. Aynı şekilde karışıma katılacak maksimum lif miktarı da işlenebilme özelliği dikkate alınarak prizmatik numunelerde %1, silindirik numunelerde %1.10 olarak seçilmiştir.

Tablo 2.6 Karışım Agregasının Granülometrik Bileşimi.

	Geçen Malzeme Miktarı (%)						
Elek Göz Boyutu (mm)	0.25	0.50	1	2	4	8	16
A ₁₆	3	8	12	21	36	60	100
B ₁₆	8	20	32	42	56	76	100
Karışım	4	27	32	39	52	75	100

Beton karışım hesaplarında, karışıma katılacak lif miktarının hacimsal oranları da dikkate alınmıştır. Bu bileşimlerde hacimsal olarak ilave edilecek lif yüzdeleri prizmatik numunelerde 2.5, 5, 8, 10 dm³/m³ ve silindirik numunelerde 5, 8, 11 dm³/m³ olarak seçilmiştir. Üretilen şahit (lifsiz) ve 4 farklı lif yüzdelerine ait betonların 1 m³'üne giren gerçek malzeme miktarları ve taze beton özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Tabloda, beton türlerindeki 0, 2.5, 5, 8, 10 sayıları, 1 m³ beton karışımı içerisinde bulunan liflerin dm³ cinsinden hacimsal oranlarını belirtmektedir.



Şekil 2.2 Karışım Agregasının Granülometri Eğrisi

2.3. Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme ve Saklama

Betonların üretimi, 55 lt kapasiteli Eirich marka, SKG 1 tipi, düşey eksenli, zorlamalı karıştırıcılı betoniyerde yapılmıştır. Şahit (lifsiz) betonların üretiminde agrega ve çimento kuru olarak 60 sn. karıştırıldıktan sonra gerekli miktarda su ilave edilerek, karıştırma işlemine 1.50 dakika daha devam edilmiştir. Lifli betonların üretimi ise , kuru agrega-çimento karışımı üzerine lifler elle atılarak yukarıda belirtilen sürelerde karıştırma işlemine devam edilerek yapılmıştır.

Bundan sonra lifli ve şahit (lif katkısız) beton karışımları üzerinde taze beton deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden sonra beton tekrar betoniye konularak yerleştirmeden önce 30 sn. daha karıştırılmıştır.

Çalışmada, üretilmesi planlanan beton hacminin betoniyer kapasitesinden fazla olması ve aynı zamanda ısıtma işlem cihazının iç hacminin yeterli olmamasından dolayı prizmatik ve silindirik numunelerin üretilmesi iki seri halinde yapılmıştır. Bu serilerin birincisinde 7x7x28 cm. boyutunda 12 adet prizmatik kalıplar, ikincisinde de Ø15x30 cm. ebadında 7 adet silindirik kalıp kullanılarak beton üretimleri farklı zamanlarda yapılmıştır. Betonlar kalıplara titreşim tablası ile yerleştirilmişlerdir. Kalıplarına yerleştirilen betonların üst yüzeyleri düzlendikten sonra, üzeri hava ile temas etmesini önlemek amacıyla cam plakalarla kapatılarak numunelerin su kaybı önlenmeye çalışılmıştır.

Üretildikten sonra, 20°C'de havada bekletilecek olan numuneler, kalıba yerleştirildikten hemen sonra sıcaklığı 20°C±2°C ve %60±5 arasında değişen klima odasına taşınmıştır. 1 gün sonra kalıbı sökülen bu numuneler deney gününe kadar bu odada açıkta saklanmıştır.

Isıtma işlem uygulanacak numuneler ise kalıba yerleştirildikten hemen sonra M319 model Sistem Teknik firmasının üretimi olan elektronik ısıtma işlem programlı klima dolabına taşınmıştır. Numuneler klima dolabına yerleştirildikten sonra, ısıtma işlem sırasında su kaybını önlemek için, üzerleri cam plakalarla örtülmüş ayrıca fırının içine metal bir kap ile su konarak ortamın rutubetli kalması sağlanmıştır.

Fırının içindeki ısı dağılımının, fırın hacminin her noktasında aynı olmasını sağlayabilmek için, fırın içinde yükselmiş olan sıcak hava bir fan vasıtasıyla üstten emilip alttan tekrar üflenmektedir. Böylece sıcak havanın fırın içinde sirkülasyonu sağlanmış olmaktadır.

Numuneler fırına yerleştirildikten sonra, numunelere uygulanacak ısıtma işlemi çevrimine ait değişkenler ST319 model programlayıcı vasıtasıyla verilmiştir.

Isıtma işlemi parametrelerinden ön bekleme dönemi, numunelere fırın içinde uygulanmıştır. Isıtma işlemi sonunda, kalıplar fırından çıkartılıp, hava ile beton arasındaki ısı farkından etkilenmesine olanak vermeden doğrudan sıcaklığı $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve rutubeti $\%60\pm 5$ olan klima odasına taşınmıştır.

Burada kalıpları sökülen numunelerden 1. günde deneye tabi tutulacak olanlar deney saatine kadar ahşap bir ızgara üzerinde, diğer günlerde deney uygulanacak olan numuneler ise her numune partisi dikey ve aralıklı dizilerek ortalarından hava akımı geçebilecek şekilde deney gününe kadar bu ortamda bekletilmişlerdir.

2.4. Numune Boyutları

Lifli betonların eğilme, basınç ve ultrases hızı gibi mekanik özellikleri $7\times 7\times 28$ cm.'lik numuneler üzerinde saptanmıştır. Ultrases hızı tayin edilen numunelerin daha sonra eğilme dayanımları belirlenmiştir. Eğilme deneyinden arta kalan parçalar üzerinde ise 7×7 cm.'lik çelik başlıklar kullanılarak basınç deneyleri yapılmıştır.

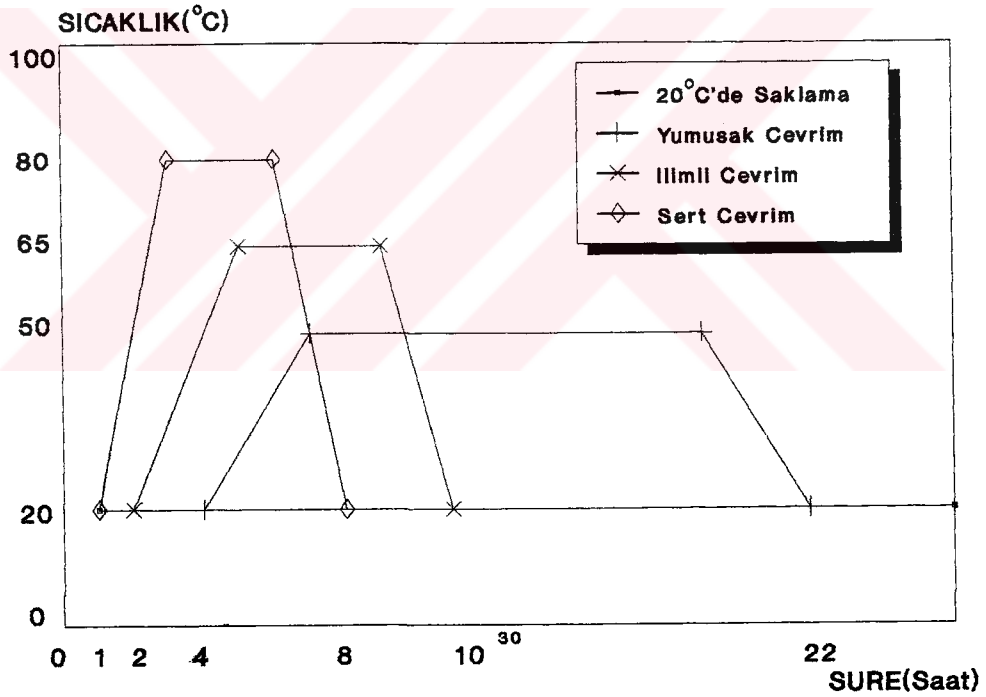
Ayrıca kılcallık ve su emme deneyleri $7\times 7\times 28$ cm.'lik prizmatik numunelerden $7\times 7\times 7$ cm. ebadlarında kesilerek elde edilen küp numuneleri üzerinde yapılmıştır.

Lifli ve şahit betonların, elastik ve elastik olmayan özelliklerini belirlemek için yapılan kısa süreli basınç deneylerinde 15 cm çapında, 30 cm yüksekliğindeki silindirlere den yararlanılmıştır.

2.5. Uygulanan Isıl İşlem Çevrimleri

Bu çalışmada, betonlara bir normal kür 3 ayrı çevrim uygulanmıştır. Bunlardan birincisi üretildikten hemen sonra klima odasına götürülen ve deney gününe kadar 20°C de havada bekletilen numunelerdir ki, bunlara "20°C'de saklanmış" adı verilmiştir. Diğer üç çeşit ısıtma işlemi ise ön bekleme süreleri, ısınma ve soğuma hızları ve ısıtma sıcaklıkları birbirlerinden tamamen farklı çevrimlerdir. Bunlardan işlem sıcaklıkları 50°C olana "Yumuşak çevrim", 65°C olana "İlmlil Çevrim", 80°C olana "sert çevrim" adı verilmektedir [7].

Isıtma işlem çevrimlerine ait sıcaklık ve süre parametrelerinin çevrim çeşidi ile değişimleri Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3 Uygulanan Isıl İşlem Çevrimleri ve Normal Kür

Isıtma işlem çevrimi için klima dolabına yerleştirilen numunelerin gerekli ön bekleme süresi tamamlandıktan sonra elektronik kumanda merkezine ısıtma sıcaklığı, ısınma hızı ve ısıtma sıcaklığında geçecek süre program dahilinde verilmiştir. Ancak soğutma hızı program ile kontrol edilemediğinden klima dolabının kendi karakteristiğine göre uygulanmıştır.

Soğutma dönemi sonunda numuneler fırından alınarak, kalıplar sökülüştür. Kalıplar fırından çıkarıldığı anda numune iç sıcaklığı, yumuşak çevrim uygulanan betonlarda 25°C, ılımlı ve sert çevrim uygulanan numunelerde ise 35-40°C civarında olduğu saptanmıştır. Numune iç sıcaklıklarının yüksek değerlerde olmaması nedeniyle sakınca görülmemiştir. Isıl işlem çevrimlerinin işlem sıcaklıkları klima dolabının içindeki havanın sıcaklığıdır.

Isıl işlem çevrimleri uygulanırken numunenin yüzeyi ile merkezindeki sıcaklıklar, demir-konstantan termokupllar yardımı ile belirli sürelerde ölçülmüştür. Klima dolabındaki hava sıcaklığı ve numunenin yüzeyi ile merkezindeki sıcaklıkların gelişimi her bir çevrim için Şekil 2.4, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü gibi, bilhassa ısıtma döneminde, numunelerin sıcaklığı havanın sıcaklığından daha düşük bir eğimle artmıştır. Diğer dönemlerde fazla bir değişiklik olmamıştır. Tablo 2.7'de ayrıca hava sıcaklığına göre hesaplanan ağırlıklı olgunluk dereceleri de verilmiştir.

Tablo 2.7 Birbirinden Bağımsız Isıl İşlem Çevrimlerinin Özellikleri

Çevrim Türü	Ön Bekleme Süresi (Saat)	Isınma Ve Soğuma Hızı (°C/Saat)	İşlem Sıcaklığı (°C)	İşlem Sıcaklığında geçen süre (Saat)	Hava Sıcaklığına göre 24 Saatlik A.O.D (°CxSaat)
20°C'de Saklama	---	---	20	24	480
Yumuşak Çevrim	4	10	50	12	2030
İlimli Çevrim	2	20	65	4	2128
Sert Çevrim	1	30	80	3	3484

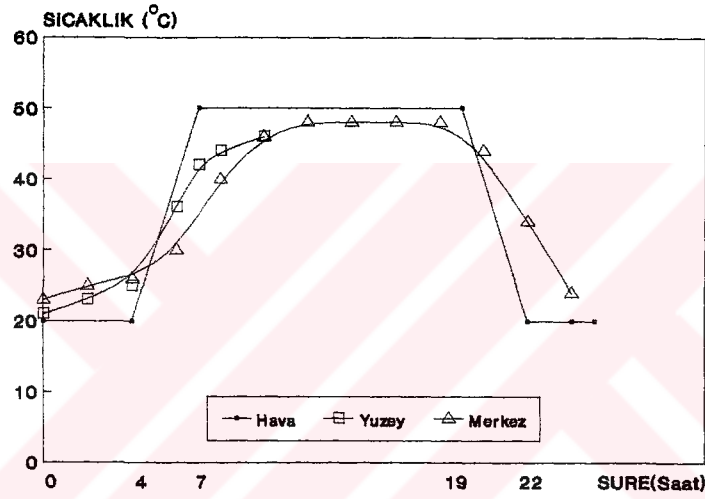
Ağırlıklı olgunluk derecesi Papadakis [75], 'in ileri sürdüğü bir kavramdır. Buna göre sıcaklıkdaki artışın hidrasyon reaksiyonlarını gittikçe hızlandırdığı düşüncesinden hareketle, her bir 10°C'lik artışa belirli bir ağırlık verilmiştir. Bu durumda olgunluk derecesi:

$$A.O.D. = \sum S \cdot A^n = S_1 \cdot A^0 + S_2 \cdot A^1 + S_3 \cdot A^2 \dots (2.1)$$

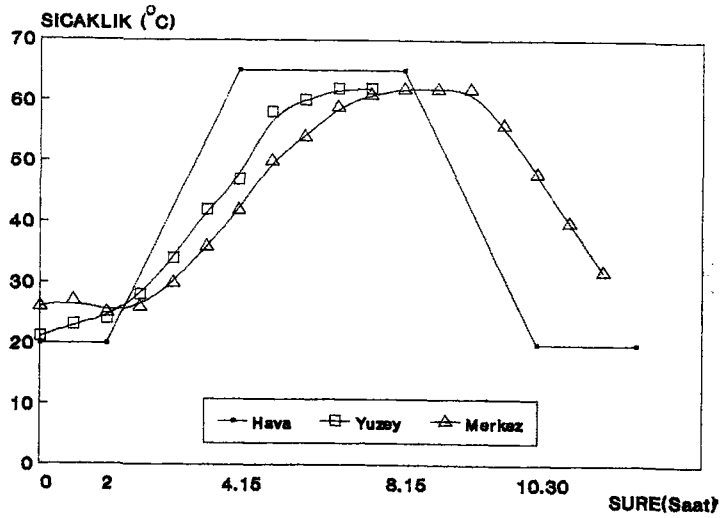
şeklinde hesaplanmaktadır.

Burada:

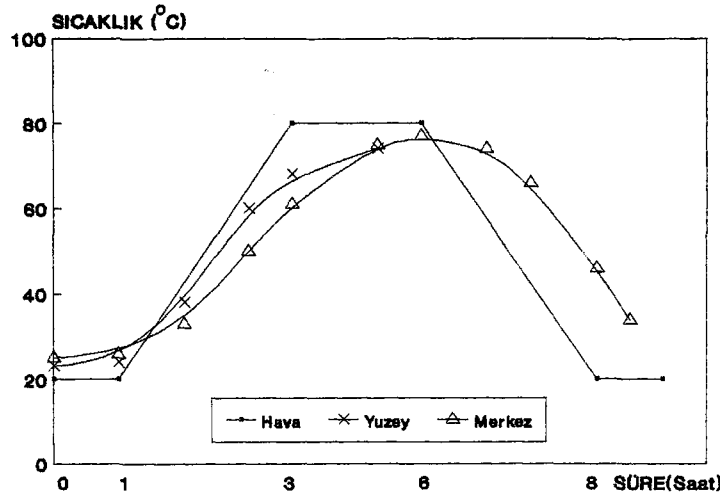
- A.O.D. : Ağırlıklı olgunluk derecesi,
 S : Her bir 10 °C'lik dilimin alanı,
 A : Çimento cinsine bağlı olarak değişen bir sabittir.
 (Hesaplarda 1.8 alınmıştır.)
 n : Sıcaklığın artan fonksiyonu olmak üzere 0, 1, 2, 3, 4 değerlerini almaktadır.



Şekil 2.4. Yumuşak Çevrim Uygulanmış Betonda Sıcaklık Değişimi.



Şekil 2.5. Ilımlı Çevrim Uygulanmış Betonda Sıcaklık Değişimi.



Şekil 2.6. Sert Çevrim Uygulanmış Betonda Sıcaklık Değişimi.

2.6. Beton Üzerinde Yapılan Deneyler ve Kullanılan Yöntemler

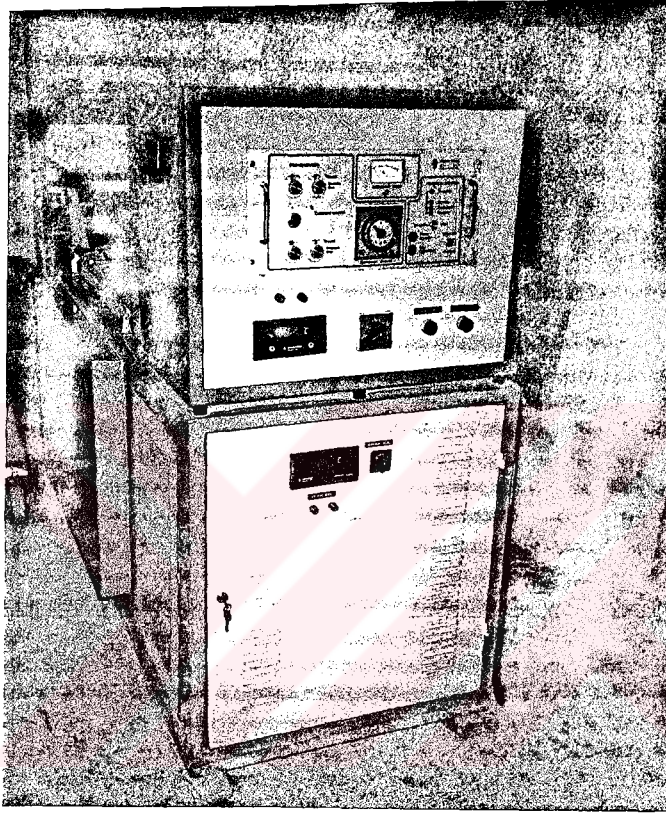
2.6.1. Taze Beton Deneyleri

Üretilen beton karışımları üzerinde taze birim ağırlık ve işlenebilme özellikleri tayin edilmiştir. Taze birim ağırlık deneyleri 8 lt'lik bir kap kullanılarak yapılmıştır. İşlenebilme özelliği Ve-Be, Çökme ve ters koni deneyleri ile yapılmıştır. Ters koni deneyi (Inverted Cone Time) ASTM C 1018'de belirtilen yöntemle göre ters çevrilmiş Abrams konisi içerisine, üç tabaka halinde yerleştirilen lifli betonun, üst merkezinden aşağıya doğru dalıcı vibratör uygulanarak koninin içerisindeki betonun boşalma süresi kronometre ile ölçülerek yapılmıştır. Her beton serisi için tekrarlanan bu deneylerde sonuçların birbirine çok yakın çıkması, aynı bileşime sahip, fakat farklı zamanlarda üretilen beton karışımlarının kontrollu bir şekilde üretildiğini göstermektedir [51].

2.6.2. Isıl İşlem Çevrimlerinin Uygulanması

Isıl işlem çevrimlerinin uygulanmasında M. KARAGÜLER'in [37], geliştirdiği ve Sistem-Teknik firmasına yaptırılan M319 Model elektronik kumandalı bir klima dolabından yararlanılmıştır. Klima dolabı iç ölçüleri 0.50 x 0.80 x 0.65 m. olup iç hacmi 260 lt. dir. Şekil 2.7'de kullanılan ısıtma cihazı görülmektedir.

Taze beton kalıplara yerleştirilip, buharlaşma kaybını önlemek için üst yüzeyleri birer cam kapak ile örtüldükten sonra klima dolabına yerleştirilmişlerdir. Prizmatik numunelerin yerleştirilmesinde, alta 5 adet prizmatik numune yerleştirildikten sonra üzerlerine ahşap bir ızgara konulmuştur. Ahşap ızgaranın üzerine de 4 adet prizmatik numune yerleştirilmiştir.



Şekil 2.7 Isıl İşlem Çevrim Cihazı.

Deneyler sırasında numunelerdeki ağırlık kayıplarını belirlemek amacıyla çevrimden önce ve sonra beton numuneleri kalıplarıyla beraber tartılmışlardır. Bulunan ağırlık kayıpları ortalama net beton ağırlığına oranla %0.30 civarında olduğu görülmüştür. Uygulanan çevrimler sırasında, silindir numuneler üzerinde, merkezi ve yüzey sıcaklıkları ölçülmeye çalışılmıştır. Bu amaçla numunenin yüzeyine konulan cam kapağa açılan deliklerin birisinden yüzey sıcaklığı, diğerinden merkezi sıcaklık demir-konstantan termokupl vasıtasıyla, belirli sürelerde ölçülmüştür. Uygulanan çevrim tamamlandığında, numuneler klima dolabından alınarak, deney gününe kadar, sıcaklığı $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ve rutubeti $\%60 \pm 5$ olan klima odasında tutulmuşlardır.

2.6.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri.

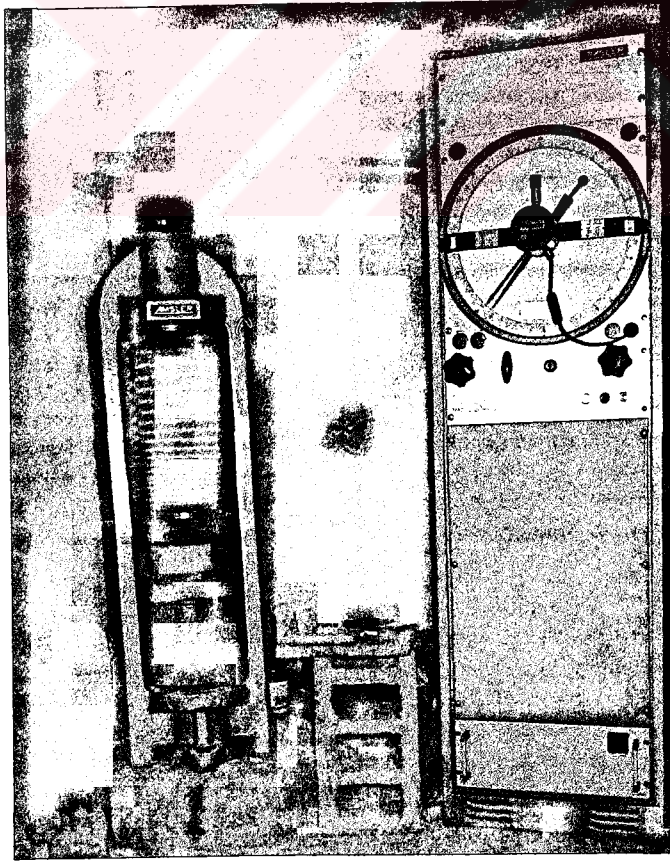
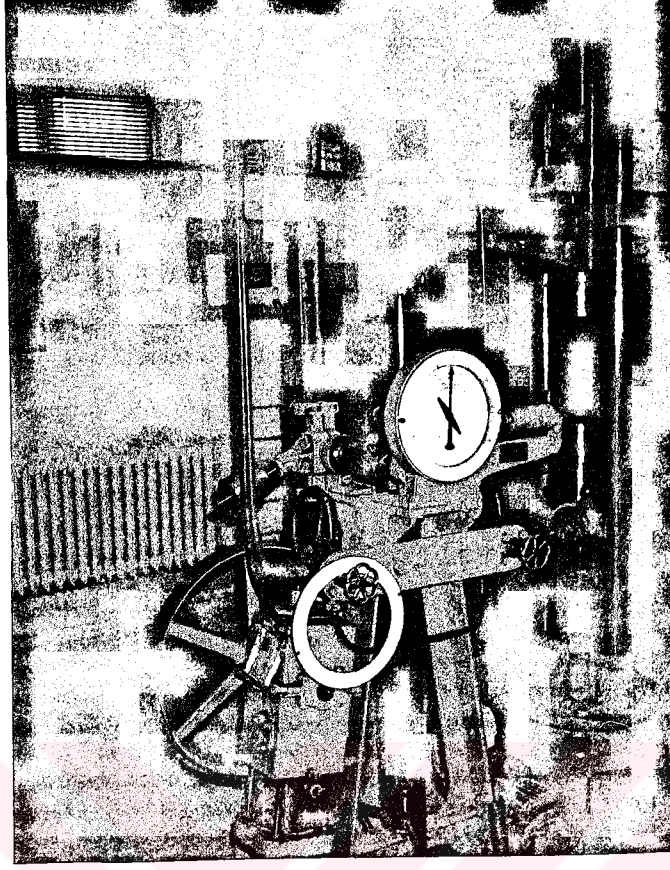
Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde 1., 28 ve 90. günlerde aynı deney programları uygulanmıştır. Numuneler önce ultrases hızı sonra eğilme ve basınç mukavemeti deneylerine tabi tutulmuştur. 28. günlük numuneler üzerinde de kılcallık ve su emme deneyleri yapılmıştır.

Ultrases hızı deneyleri, concrete tester CCT-4 Proceq marka ultrases cihazı kullanılarak yapılmıştır.

Eğilme deneyleri 20 ton kapasiteli Amsler marka Universal deney aletinde yapılmıştır. Kullanılan aletin deney esnasındaki kapasitesi maksimum 2 tondur. Deney numunelerinin mesnet açıklığı 24 cm. olarak alınmış ve uygulanan kuvvet, açıklığın ortasından tatbik edilmiştir. Burkulma etkisini önlemek için mesnetlere kauçuk parçalar yerleştirilmiştir.

Basınç mukavemeti, eğilme deneyinden arta kalan parçalar üzerinde ölçülmüştür. Bunun için numuneler 7x7 cm.'lik çelik plakalar arasına yerleştirilerek saniyede 0.2 N/mm²'lik bir hızla basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu amaçla 1000 kN kapasiteli Amsler marka prestan yararlanılmıştır. Eğilme ve basınç deneylerinin yapıldığı cihazlar Şekil 2.8'de görülmektedir.

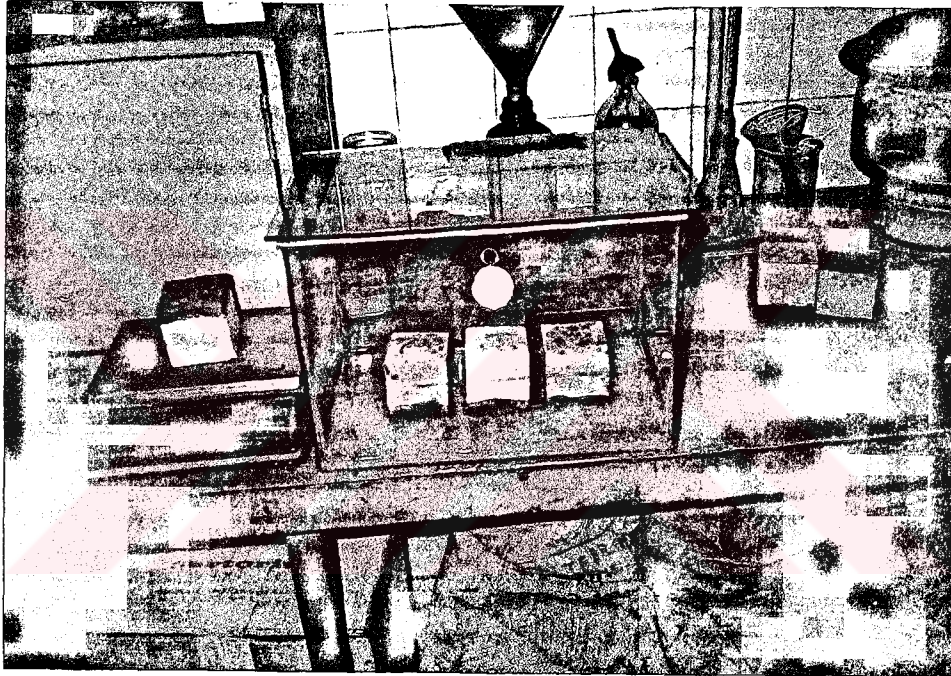
Kılcallık ve su emme deneyleri prizmatik numunelerden taş kesme makinesiyle 7x7x7 cm. ebadlarında kesilerek elde edilen küp numuneleri üzerinde yapılmıştır. Numuneler deney gününden önce 105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilerek kurutulmuşlardır. Etüvden alınan numunelerin desikatörde ortam sıcaklığına gelene kadar soğumaları sağlanmıştır. Suyla temas eden yüzeyin yan yüzleri parafin ile izole edilerek, kılcallık ile su emmenin sadece bir yüzeyden olması sağlanmıştır. Deney numunesinin alt yüzü suyla temas ettirilerek, emilen su miktarı, deney başlangıcından itibaren 1, 4, 9, 16 ve 25. dakikalarda tartılarak bulunmuştur. Tartılar 0.10 gram duyarlı elektronik dijital terazi ile yapılmıştır.



Şekil 2.8 Eğilme ve Basınç Deneyi Düzenleri.

Kılcallık deneyi esnasında kullanılan kabın üst yüzeyi bir cam kapak ile kapatılarak buharlaşma önlenmeye çalışılmıştır. Her bir tartı sırasında numune deney kabından alınarak, ıslak yüzü hafifce kurulandıktan sonra tartılmıştır. Kılcallık deneyinin yapıldığı kap ve tartı aleti Şekil 2.9'da gösterilmektedir.

Su emme deneyi ise kılcallık deneyinin sonunda numuneler su dolu kap içerisinde 48 saat bekletilmek suretiyle yapılmıştır. Sudan çıkarılan numune önce suya doygun olarak havada, sonra su içinde tartılarak ağırlıklar saptanmıştır [52].



Şekil 2.9 Kılcallık Deneyi Düzeni.

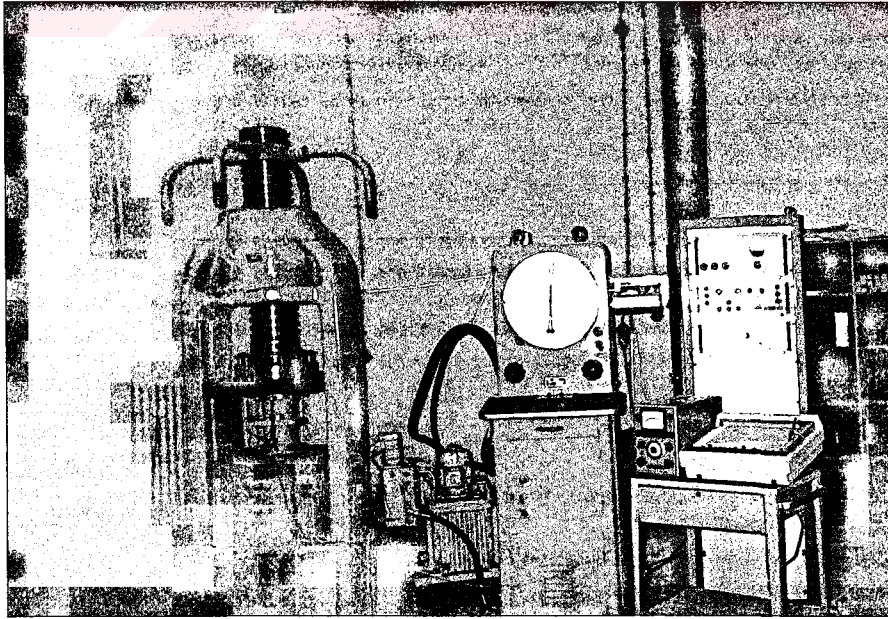
Üretilen betonların elastik ve inelastik davranışlarını belirlemek amacıyla yapılan kısa süreli basınç deneylerinde ise MFL marka, servo kontrollü elektro-hidrolik regülatöre bağlı Amsler marka 500 ton kapasiteli press kullanılmıştır.

Deneyler yükleme hızı kontrollü olacak şekilde yapılmıştır. Deney düzeninin genel görünüşü Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

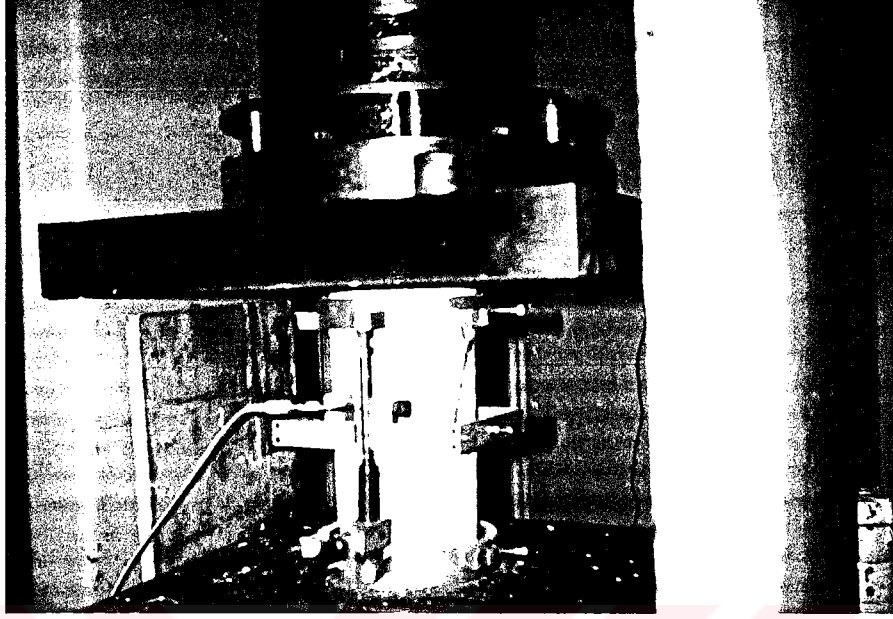
Boyuna şekil değiştirmelerin ölçümlerinde, numune üzerine takılan ve ekseninde 250 mm'lik ölçü boyutuna sahip bir çerçeveden yararlanılmıştır. Çerçeve numunenin üzerine özel yaylı ayaklarla tutturulmaktadır. Numunede oluşan yanıl

uzamalar bu yaylar tarafından karşılanmakta, böylece çerçevede aşırı çekme gerilmelerinin doğması, numuneye de yanal uzamaların etki etmesi önlenmektedir. Bu çerçeveye takılan transdüser ile şekil değiştirmeler ölçülmüştür. Yanal şekil değiştirme değerleri, HBM marka, WIT/2 tipi indüktif trasdüseri ile ölçülmüştür. Boyuna ve yanal şekil değiştirme ölçme düzeni Şekil 2.11'de görülmektedir.

Gerilme-şekil değiştirme eğrileri Hewlett-Packard marka 7044 a tipi bir X-Y kaydedici yardımıyla sürekli olarak kaydedilmiştir. Yanal şekil değiştirmeler 150 μ D.'luk boyuna şekil değiştirme aralıklarında HBM marka, KWS/II-5 tipinde bir Amplifikatör den okunmuştur.



Şekil 2.10 Kısa Süreli Basınç Dayanımı Deney Düzeni



Şekil 2.11 Boyuna ve Yanal Şekil Değiştirme Ölçme Düzeni

2.7. Deney Programı

Bu çalışmada; lif miktarları 0, 2.50, 5.0, 8.0, 10.0 dm^3/m^3 olan 5 farklı bileşimde beton üretilmiştir. Her seri betona, işlem sıcaklıkları 20°C, 50°C, 65°C ve 80°C olmak üzere 4 ayrı ısıtma işlemi uygulanmıştır. Böylece prizmatik numuneler için toplam 20 seri beton üretilmiştir. Ayrıca silindirik numunelere ait betonların elastik ve inelastik özelliklerini saptamak amacıyla 0, 5.0, 8.0 ve 11.0 dm^3/m^3 oranlarda lifler kullanılarak üretilen 4 farklı beton bileşimine de aynı çevrimler uygulanmıştır. Böylece iki aşamalı olarak toplam 20+16=36 seri beton üretilmiştir. Bu numunelerden, lif katkısız olarak üretilen ve 20°C'de havada saklanan numuneler, şahit numune olarak kabul edilmiştir.

Ultrases hızı, eğilme ve basınç mukavemetleri 1., 28. ve 90. günlerde saptanmıştır. 1 günlük deneyler betonun kalıba yerleştirilmesinden itibaren 24 saat ± 15 dakika içerisinde tamamlanmıştır. Ultrases hızı ve eğilme mukavemeti 3'er numune üzerinde yapılmıştır. Eğilme deneylerinden arta kalan 6 parça üzerinde basınç mukavemeti saptanmıştır.

Kılcallık ve su emme deneyleri 3'er numune üzerinde sadece 28. günde yapılmıştır.

Üretilen betonların elastik ve inelastik özelliklerini saptamak için yapılan kısa süreli basınç deneylerinde 2'şer numune kullanılmıştır. Bu deneyler 28 ve 90. günlerde yapılmıştır. Deneylerde numunelerin yük altındaki boyuna ve yanal şekil değiştirmeleri ölçülerek elastisite modülü, süreksizlik ve çözülme sınırı ile kırılma şekil değiştirme işi değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca basınç mukavemeti ve basınç mukavemetindeki birim kısalma değerleride hesaplanmıştır. Araştırmada ultrases hızı ve eğilme deneyleri için en az 3'er numune, basınç dayanımı için 6 numune üzerinde bulunan sonuçların aritmetik ortalamaları alınmış ve bu değerlere göre sonuçlar değerlendirilmiştir. Kısa süreli basınç deneylerinde ise en az 2'şer numunenin ortalaması alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir.



BÖLÜM 3.

DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde, üretilen betonlara ait deney sonuçları tablolar halinde verilecektir. Ayrıca sonuçların nasıl hesaplandığı hakkında gerekli açıklamalar yapılacaktır.

3.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton özellikleri, Tablo 3.1'de beton bileşimleriyle beraber gösterilmiştir. Burada verilen hava boşluğu, taze betonunun birim hacim ağırlık sonuçlarına göre hesaplanmıştır.

3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Üretilen beton numuneleri iki ayrı grupta incelenerek değerlendirilmiştir. Bunlardan birincisi prizmatik numunelere ait, ikincisi silindirik numuneler üzerinde yapılan sertleşmiş beton deneyleridir.

Prizmatik numuneler üzerinde yapılan 1., 28. ve 90 günlük ultrases hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneylerinde elde edilen sonuçlar Tablo 3.2., Tablo 3.3. ve Tablo 3.4.'de verilmiştir. Tablo'daki değerler eğilme dayanımı ve ultrases hızı için 3'er numunenin, basınç dayanımının da 6 numunenin ortalama değeridir.

Ayrıca, kılcallık ve su emme deneylerinde bulunan sonuçlar yardımıyla hesaplanan 28 günlük difüzyon katsayısı, birim ağırlık ve görünen porozite değerleri Tablo 3.5.'de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 3.1 Betonların Bileşimlerine Giren Gerçek Malzeme Miktarları (1 m³ için) ve Taze Beton Özellikleri

BETON TÜRÜ		Podima kumu	Kırmaşak tozu	Kırmaşak I	Kırmaşak II	Çimento	Su	Lif Miktarı	Taze Birim Ağırlık	Taze Beton Özellikleri					Kompasite
										İşlenebilme			Hava Boşluğu		
Kür	V _f	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg/m ³)	(cm)	(sn)	(sn)	(%)	(m ³ /m ³)	
20°C'de Saklama		dm ³ /m ³													
		0.0	512	347	616	264	349	220	0	2310	14	1.8	3	1.9	0.76
		2.5	511	348	615	263	350	220.4	18.7	2325	13	1.5	4.1	1.8	0.762
		5	506	345	610	261	349	220	37.3	2329	10.5	2	6.2	2.1	0.759
		8	507	345	611	261	349	220	59.7	2353	10.5	2.1	7.8	1.7	0.755
Yumuşak Çevrim		10	503	343	606	260	348	219	74.4	2353	8.5	2.6	11	2.1	0.760
		0.0	513	349	619	266	351	221	0	2318	14.5	1.5	4.2	1.5	0.764
		2.5	510	348	615	262	350	220	18.7	2323	14	1.8	6	1.9	0.761
		5	506	345	610	261	349	220	37.3	2326	12	1.6	8.5	2	0.759
		8	504	344	607	261	348	219	59.5	2341	9	2.4	6.9	2.1	0.759
İlmlil Çevrim		10	503	341	606	267	348	219	74.4	2348	9	2.2	8	2.2	0.758
		0.0	514	349	619	265	361	221	0	2320	15	1.5	4.1	1.5	0.764
		2.5	510	347	614	263	349	220	18.7	2321	12	2	8	1.9	0.761
		5	507	346	611	260	350	220	37.4	2333	12	1.8	7	1.9	0.761
		8	503	344	606	258	348	219	59.4	2340	11	1.8	6.8	2.2	0.758
Sert Çevrim		10	505	342	609	266	349	220	74.6	2358	9	4	11	1.9	0.761
		0.0	514	349	620	263	351	221	0	2321	14.5	1.6	4.3	1.4	0.765
		2.5	512	349	616	263	351	221	18.7	2330	13	2.1	5.2	1.6	0.764
		5	507	345	611	262	350	220	37.3	2333	105	2.2	6.7	2	0.760
		8	503	344	606	260	348	219	59.4	2340	8.5	2.8	7.9	2.3	0.758
	10	506	343	609	259	350	220	74.7	2360	7.5	3.2	1.3	1.8	0.762	

Tablo 3.2. Eğilme Mukavemeti Değerleri (N/mm²)

Beton Türü		Eğilme Mukavemeti (N/mm ²)					
Kür	V _f dm ³ /m ³	1. Gün		28. Gün		90. Gün	
20°C'de Saklama	0	1.9	(44.8)	4.24	(100)*	5.30	(125)
	2.5	2.06	(48.6)	4.67	(110.1)	5.21	(123)
	5	2.30	(54.2)	5.12	(120.8)	5.82	(137.3)
	8	2.08	(49.1)	5.66	(133.5)	5.89	(138.9)
	10	3.23	(76.2)	5.80	(136.8)	6.19	(146)
Yumuşak Çevrim (50°C)	0	3.19	(75.2)	4.77	(112.5)	5.12	(120.8)
	2.5	3.43	(80.9)	4.97	(117.2)	5.42	(127.8)
	5	3.98	(93.9)	5.03	(118.6)	5.46	(128.8)
	8	4.22	(99.5)	5.25	(123.8)	5.67	(133.7)
	10	4.19	(98.8)	5.92	(139.6)	5.94	(140.1)
İlımlı Çevrim (65°C)	0	3.50	(82.5)	5.05	(119.1)	5.22	(123.1)
	2.5	3.60	(84.9)	5.15	(121.5)	5.48	(129.2)
	5	3.68	(86.8)	5.20	(122.6)	5.61	(132.3)
	8	3.88	(91.5)	5.67	(133.7)	5.63	(132.8)
	10	4.22	(99.5)	5.80	(136.8)	5.79	(136.6)
Sert Çevrim (80°C)	0	3.81	(89.8)	4.64	(109.4)	5	(117.9)
	2.5	4.03	(95)	4.91	(115.8)	5.39	(127.1)
	5	4.65	(109.6)	6.45	(152.1)	5.67	(133.7)
	8	4.60	(108.5)	6.21	(146.5)	5.89	(138.9)
	10	4.60	(108.5)	5.99	(141.3)	5.87	(138.4)

* Parantez içindeki değerler eğilme mukavemetlerinin, 20°C'de saklanmış şahit numunelerin 28 günlük eğilme mukavemetlerine göre yüzdeleridir.

Tablo 3.3. Basınç Mukavemeti Değerleri (N/mm²)

Beton Türü		Basınç Mukavemeti (N/mm ²)					
Kür	V _f dm ³ /m ³	1. Gün		28. Gün		90. Gün	
20°C'de Saklama	0	8.7	(29.7)	29.3	(100)*	30.6	(104.4)
	2.5	9.2	(31.4)	28.4	(102)	31.4	(107.1)
	5	10	(34.1)	32.4	(110.7)	33.9	(115.7)
	8	10.2	(34.8)	32.5	(110.9)	35.4	(120.7)
	10	12.5	(42.7)	35.3	(120.5)	36.6	(124.9)
Yumuşak Çevrim (50°C)	0	14.6	(49.8)	28.8	(98.4)	29.5	(100.6)
	2.5	14.9	(50.9)	29.4	(100.2)	31.3	(106.8)
	5	16.2	(55.3)	30.1	(102.6)	31.0	(105.9)
	8	16.3	(55.5)	31.0	(105.8)	32.6	(111.3)
	10	15.7	(53.5)	30.1	(102.7)	33.1	(113.1)
İlımlı Çevrim (65°C)	0	15.9	(54.3)	30.0	(102.3)	31.1	(106)
	2.5	17.8	(60.8)	31.1	(106)	32.4	(110.4)
	5	16.9	(57.7)	31.0	(105.8)	31.9	(109)
	8	16.9	(57.7)	31.4	(107.1)	33.1	(113.1)
	10	16.1	(55.1)	30.1	(102.6)	31.5	(107.6)
Sert Çevrim (80°C)	0	18.8	(64.2)	29.4	(100.4)	31.9	(108.9)
	2.5	22	(75.1)	30.3	(103.5)	34.4	(117.2)
	5	21.9	(74.7)	33.6	(114.8)	34.5	(117.7)
	8	21.4	(73)	34.9	(119)	35.1	(119.8)
	10	18.6	(63.5)	32.3	(110.2)	33.6	114.7

* Parantez içindeki değerler basınç mukavemetlerinin, 20°C'de saklanmış şahit numunelerin 28 günlük basınç mukavemetlerine göre yüzdeleridir.

Tablo 3.4. Ultrases Hızı Değerleri (km/sn)

Beton Türü		Ultrases Hızı (km/sn)					
Kür	V_f dm ³ /m ³	1. Gün		28. Gün		90. Gün	
20°C'de Saklama	0	3.34	(76.9)	4.31	(100)*	4.26	(98.8)
	2.5	3.44	(79.8)	4.35	(100.9)	4.20	(97.4)
	5	3.48	(80.7)	4.45	(103.2)	4.30	(99.8)
	8	3.52	(81.7)	4.26	(99)	4.31	(100)
	10	3.69	(85.6)	4.30	(99.8)	4.35	(101)
Yumuşak Çevrim (50°C)	0	4.02	(93.3)	4.38	(101.6)	4.24	(98.4)
	2.5	3.97	(92.1)	4.34	(100.7)	4.22	(98)
	5	4.0	(92.8)	4.31	(100)	4.18	(97)
	8	3.99	(92.6)	4.28	(99.3)	4.14	(96)
	10	3.89	(90.3)	4.24	(98.4)	4.12	(95.6)
Ilımlı Çevrim (65°C)	0	4.06	(94.2)	4.38	(101.6)	4.28	(99)
	2.5	4.06	(94.2)	4.37	(101.4)	4.15	(96.3)
	5	3.91	(90.7)	4.30	(99.8)	4.17	(96.8)
	8	3.88	(90.0)	4.25	(98.6)	4.13	(96)
	10	3.84	(89.1)	4.20	(97.4)	4.12	(95.6)
Sert Çevrim (80°C)	0	4.13	(96)	4.28	(99.3)	4.16	(96.5)
	2.5	4.15	(96.3)	4.19	(97.2)	4.24	(98.4)
	5	4.10	(95.1)	4.30	(99.8)	4.19	(97.2)
	8	4.07	(94.4)	4.29	(99.5)	4.11	(95.4)
	10	3.79	(87.9)	4.19	(97.2)	4.14	(96.1)

* Parantez içindeki değerler ultrases hızı değerlerinin, 20°C'de saklanmış şahit numunelerin 28 günlük ultrases hızlarına göre yüzdeleridir.

Tablo 3.5. 28 Günlük Kılcallık Deneyi Sonuçları

Beton Türü		Difüzyon Katsayısı (D')		Görünen Porozite		Birim Ağırlık	
Kür	V_f dm ³ /m ³	$D' \times 10^{-5}$ cm ² /dak		%		Kg/m ³	
20°C'de Saklama	0	310	(100)*	13.8	(100)*	2213	(100)*
	2.5	304	(98)	14	(101)	2234	(100.9)
	5	270	(87)	14.4	(104)	2241	(101.3)
	8	248	(80)	14.8	(107)	2260	(102)
	10	233	(75)	15	(109)	2273	(102.7)
Yumuşak Çevrim (50°C)	0	284	(92)	14	(101)	2219	(100.3)
	2.5	279	(90)	14.6	(106)	2241	(101.3)
	5	257	(83)	14.8	(107)	2252	(101.8)
	8	229	(74)	15.2	(110)	2254	(101.9)
	10	212	(68)	15.3	(111)	2268	(102.5)
Ilımlı Çevrim (65°C)	0	248	(58)	14.2	(103)	2245	(101.4)
	2.5	239	(56)	14.3	(104)	2219	(100.3)
	5	226	(53)	14.5	(105)	2231	(100.8)
	8	208	(67) -	14.8	(107)	2226	(100.6)
	10	158	(51)	14.9	(108)	2234	(100.9)
Sert Çevrim (80°C)	0	242	(78) +	14.4	(104)	2226	(100.6)
	2.5	177	(57)	14.7	(107)	2240	(101.2)
	5	143	(46)	14.8	(107)	2244	(101.4)
	8	133	(43)	14.9	(108)	2262	(102.2)
	10	149	(48)	15.2	(110)	2265	(102.3)

* Parantez içindeki değerler Kılcallık deneyi sonuçlarının, 20°C'de saklanmış şahit numunelerin 28 günlük kılcallık deneyi sonuçlarına göre yüzdelidir.

Sonuçlar mutlak değerleriyle beraber, 20°C'de havada saklanmış şahit numune (lif katkısız)'nin 28 günlük deneylerinde elde edilen değerlerine oranlanarak yüzde cinsinden rölatif değerleri de verilmiştir. Böylece üretilen betonlara ait sonuçların değerlendirilmesi ve irdelenmesi parantez içindeki bu oranlara göre yapılacaktır. Ultrases hızı, basınc ve eğilme dayanımına ait deney sonuçlarının hesaplanmasında basit mukavemet formullerinden yararlanılmıştır.

Kılcallılık deneylerinin hesaplanmasında Uyan [54], 'ın geliştirdiği matematiksel modelden yararlanılmış ve bu modele göre numunelerin difüzyon katsayıları saptanmıştır. Bu katsayının tayini için önce numunenin kuru ağırlığı tartıldıktan sonra 1, 4, 9, 16 ve 25. dakikalarda emdiği su miktarları tesbit edilmiştir. Emilen su miktarları ($\text{cm}^3/\text{cm}^2=\text{cm.}$) birimi ile düşey ekseninde, zamanın karekökü ($\sqrt{\text{dak}}$) birimi ile yatay ekseninde gösterilerek kılcal su emme-zaman bağıntısı çizilmiştir. Deney sonunda elde edilen noktaların arasından "En Küçük Kareler Metoduna" göre en uygun doğru geçirilmiştir. Daha sonra, bu doğrunun eğiminden (S) faydalanarak, difüzyon katsayısı (D') şu şekilde hesaplanmıştır.

$$D' = (\pi/4) \times S^2 \quad (\text{cm}^2/\text{dak}) \dots \dots \dots (3.1)$$

$$S' : \text{Eğim (cm}/\sqrt{\text{dak}})$$

Kılcallık deneyi uygulanan numunelerde görünen porozite ve birim ağırlık değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki bağıntılardan yararlanılmıştır.

$$\text{Görünen Porozite} = ((W_d - W_0)/(W_d - W_s)) \times 100 \quad (\%) \dots \dots \dots (3.2)$$

$$\text{Birim Ağırlık} = (W_0/(W_d - W_s)) \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \dots \dots \dots (3.3)$$

Burada;

W_0 : Numunenin kuru ağırlığı (kg)

W_d : Numunenin suya doymun havadaki ağırlığı (kg)

W_s : Numunenin suya doymun sudaki ağırlığı (kg)

Isıl işlem uygulanmamış ve ısıtılmış silindirik beton numunelere ait kısa süreli basınç deneyleri sonunda elde edilen elastik ve inelastik özelliklere ait toplu sonuçlar Tablo 3.6. ve Tablo 3.7.'de verilmiştir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar 20°C'lik normal kūr uygulanmış şahit numunelerden elde edilen 28 günlük değerlere oranlanarak yüzde cinsinden parantez içinde gösterilmiştir. Ancak Tablo'da (σ_D/R) kolonunda verilen özellik için bu anlamda bir oranlama yapılmamıştır.

Süreksizlik sınırını (σ_D)'yi bulmak için, önce yanal şekil değiştirme değerlerini boyuna şekil değiştirme değerlerine bölerek poisson oranları hesaplanmıştır. Buradan gerilme-poisson oranı değişimine ait eğri çizilmiştir. Bu eğriler üzerinde Poisson oranının belirgin bir şekilde artmaya başladığı gerilme değeri süreksizlik sınırı olarak alınmıştır. Bunun için şu şekilde hareket edilmiştir. Yük bir kademe artırıldığında poisson oranı en az 0.003'lük bir artış gösteriyor ve bu artış en az bu değerde artarak devam ediyorsa, artışın meydana geldiği yükten bir önceki kademeye karşılık gelen gerilme değeri süreksizlik sınırı olarak kabul edilmiştir.

Çözülme sınırı, tekrarsız yüklemede betonun hacminin artmaya başladığı gerilme değeri olarak belirtilmektedir [55]. Bu değeri bulmak için tepe noktasına kadar 150 μD 'luk boyuna şekil değiştirme (ϵ_b) aralıklarında okunan yanal şekil değiştirme (ϵ_g) değerleri yardımıyla bunlara karşı gelen hacimsal şekil değiştirmeler ($\epsilon-2\epsilon_g$) şeklinde hesaplanmışlardır. Hacimsal şekil değiştirmenin yön değiştirdiği yani hacmin azalmaya başladığı gerilme değeri çözülme sınırı (σ_L) olarak saptanmıştır. Şekil 3.1.'de örnek uygulama görülmektedir.

Basınc dayanımı (f_c) tepe noktasındaki gerilme değeri olarak, basınç dayanımındaki şekil değiştirme (ϵ_u) ise bu gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme değeri olarak eğri üzerinden okunmuşlardır.

Elastisite modülünün (E) saptanmasında gerilme-şekil değiştirme diyagramında basınç dayanımının 1/3'üne kadar olan noktalardan geçen en olasılıklı doğrunun eğimi "En Küçük Karalar Yöntemiyle" hesaplanmıştır.

Tablo 3.6 28 Günlük Silindirik Numunelere Ait Sertleşmiş Beton Deneyi Sonuçları

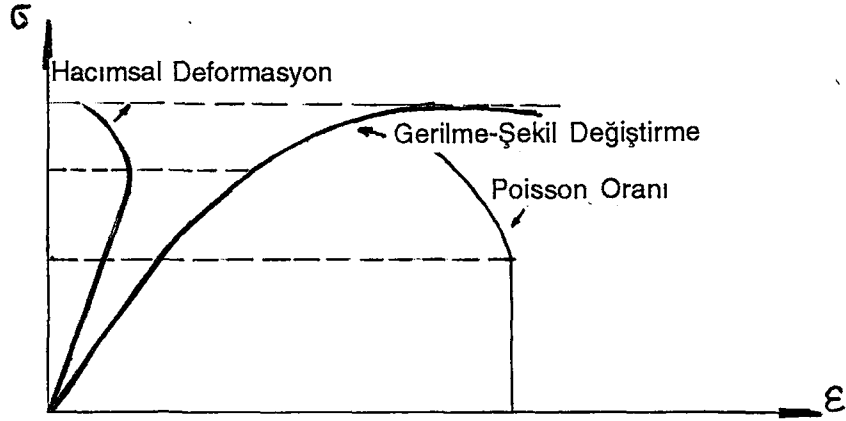
Beton Türü	Kür	V _f	σ_D (N/mm ²)		σ_L (N/mm ²)		f_c (N/mm ²)		ε_u (μD)		σ_D R (%)	E (N/mm ²)		Kırılma Şekil Değiştirme İşi x10 ⁻³ (N/mm ²)		
														T'	T''	T
20°C'de saklama		0.0	20.1	(100)*	23.5	(100)	23.8	(100)	2400	(100)	84	23800	(100)	4.1	5.1	9.2 (100)
		5	18.4	(91.5)	24.6	(105)	24.8	(104)	2550	(106)	74	21824	(92)	4.4	5.4	9.8 (107)
		8	18.5	(92)	24.8	(106)	25	(105)	3750	(156)	74	19326	(81)	5.5	6	11.5 (125)
		11	18	(90)	25	(106)	26	(109)	3450	(144)	69	17280	(73)	6	6.1	12.1 (132)
Yumuşak Çevrim		0.0	19.2	(96)	22	(97)	23.2	(97)	2550	(106)	83	19600	(82)	4.3	4.8	9.1 (99)
		5	16.6	(83)	22.8	(97)	23.7	(99)	2700	(112)	70	19500	(82)	4.2	5.1	9.3 (101)
		8	16.3	(81)	23.2	(99)	23.9	(101)	2850	(119)	68	19125	(80)	4.1	5.4	9.5 (103)
		11	15.8	(79)	23.4	(100)	23.6	(99)	3000	(125)	67	18975	(80)	4.6	5.2	9.8 (107)
İlmi Çevrim		0.0	18	(90)	23.8	(101)	24.3	(102)	2850	(119)	74	20670	(86)	4.4	4.1	8.5 (92)
		5	16.7	(83)	24	(102)	24.5	(103)	2750	(115)	68	19374	(81)	4.7	4.6	9.3 (101)
		8	16.3	(81)	24.5	(104)	24.8	(104)	2850	(119)	66	18330	(77)	4.2	5.1	9.3 (101)
		11	15.6	(78)	23	(98)	23.4	(98)	3000	(125)	67	18867	(79)	4.6	5	9.6 (104)
Sert Çevrim		0.0	17.2	(86)	23.7	(101)	24.1	(101)	2550	(106)	71	22867	(96)	4.3	4.3	8.6 (94)
		5	16.1	(80)	23.9	(102)	24.6	(103)	2850	(119)	65	19135	(80)	4.1	4.8	8.9 (97)
		8	15.6	(78)	25	(106)	25.3	(106)	3300	(138)	62	17330	(73)	5.3	5.6	10.9 (118)
		11	15.3	(76)	23.6	(100)	24.2	(102)	4300	(179)	63	16700	(70)	6.1	5.3	11.4 (124)

* Parantez içindeki değerler 20°C şaht-28 günlük numunelerden saftanan değere göre yüzdelilerdir.

Tablo 3.7 90 Günlük Silindirik Numunelere Ait Sertleşmiş Beton Deneyi Sonuçları

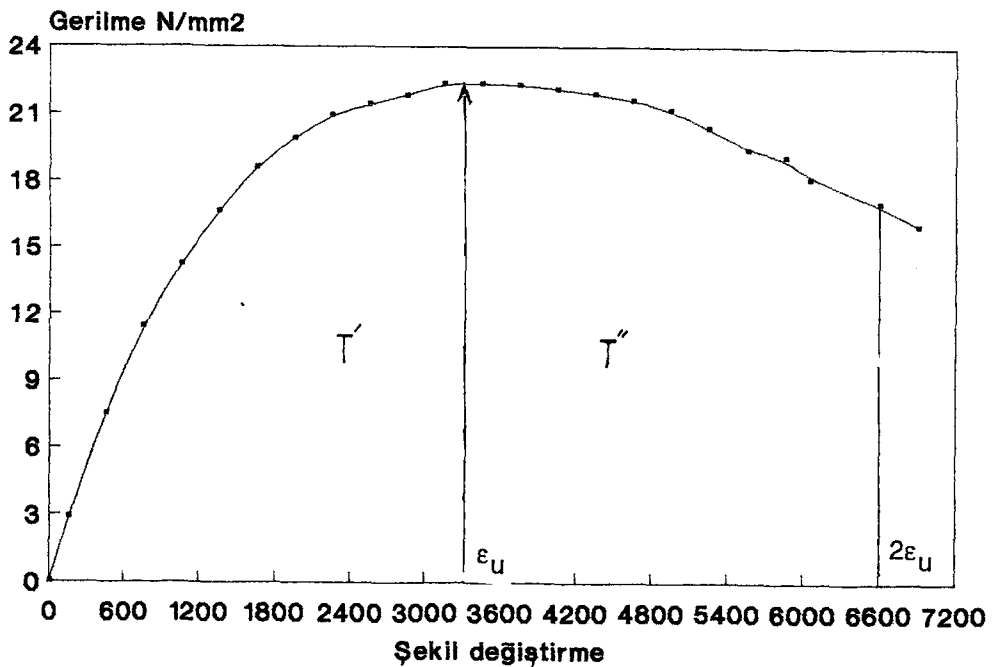
Beton Türü		Kür	V _f	σ _D (N/mm ²)		σ _L (N/mm ²)		f _c (N/mm ²)		ε _u (μD)		σ _D R (%)	E (N/mm ²)		Kırılma Şekil Değiştirme İşi x10 ⁻³ (N/mm ²)		
															T'	T''	T
20°C'de saklama		0.0	21.9	109()	25	(106)	25.4	(107)	2830	(118)	86	23467	(98)	5.4	6.5	11.9	(129)
		5	21.3	(107)	26.1	(111)	28.9	(121)	2963	(124)	77	22533	(95)	6.8	7.8	14.6	(158)
		8	20.8	(103)	30	(128)	30.5	(128)	3450	(144)	68	19310	(81)	6.8	8.3	15.1	(163)
		11	19.7	(98)	27.9	(119)	28.5	(120)	3450	(144)	69	17500	(74)	6.9	7.1	14	(152)
Yumuşak Çevrim		0.0	20	(99)	23.3	(99)	23.8	(100)	2750	(115)	84	23567	(99)	4.5	5.2	9.7	(105)
		5	19.8	(98)	24.1	(103)	24.2	(102)	2775	(116)	82	19984	(84)	4.6	5.4	10	(109)
		8	21.6	(107)	25.6	(109)	26	(109)	2925	(122)	83	19040	(80)	5.4	7.3	12.7	(138)
		11	20.4	(101)	26.8	(114)	27	(114)	3150	(131)	75	19080	(80)	5	6.2	11.2	(122)
İlımlı Çevrim		0.0	22.8	(113)	24.2	(103)	25.8	(104)	3040	127	88	20104	(85)	5.7	5.3	11	(111)
		5	21	(104)	25.3	(108)	26.2	(110)	3375	(141)	81	19800	(83)	5	6.4	11.4	(124)
		8	19.6	(98)	26.8	(114)	27.4	(115)	3375	(141)	72	18800	(79)	5.6	7.1	12.7	(137)
		11	19.2	(96)	25	(106)	25.9	(109)	3225	(134)	74	19000	(80)	5.7	7.3	13	(141)
Sert Çevrim		0.0	20.1	(100)	24.6	(105)	26.4	(111)	2440	(102)	76	20000	(84)	4.2	4.3	8.6	(93)
		5	19.2	(96)	25.7	(109)	27.1	(114)	3285	(137)	71	18668	(78)	6.2	7.9	14.1	(152)
		8	17.5	(87)	26	(111)	28.3	(119)	3325	(139)	62	19867	(84)	6.3	8.1	14.4	(156)
		11	17	(84)	26.5	(113)	28	(118)	3825	(159)	61	18934	(80)	7.8	8.3	16.1	(175)

* Parantez içindeki değerler 20°C şaht-28 günlük numunelerden saptanan değere göre yüzdelerdir.



Şekil 3.1. Gerilme-Şekil Değişirme, Gerilme-Poisson Oranı ve Gerilme-Hacımsal Deformasyon ilişkisi.

Tekrarsız yüklemde numunenin kırılmasına kadar birim hacim başına yapılan işe "Kırılma şekil değişirme işi" denilmektedir. Bunun değeri olağan gerilme-şekil değişirme eğrisinin altında kalan alana eşittir [56], [57], [58]. Bu çalışmada da üretilen betonlara ait kırılma şekil değişirme işinin hesaplanması bir planimetre yardımıyla (σ - ϵ) eğrisinin altındaki alanlar ölçülerek bulunmuştur. Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi, tepe noktasından önceki şekil değişirme işi T' ile tepe noktasından sonraki de T'' ile gösterilmiştir. Ancak eğrinin kaydedilebilen kısmı üretilen betonlarda tepe noktasındaki şekil değişirmenin 2~3 katı arasında değişmekte olduğundan, $2\epsilon_U$ 'ya kadar olan kısım bütün karışımlarda ortak olduğundan, T'' olarak ϵ_U ile $2\epsilon_U$ arasında kalan alan dikkate alınmıştır.



Şekil 3.2. Gerilme Şekil Değişirme Diyagramı.

BÖLÜM 4.

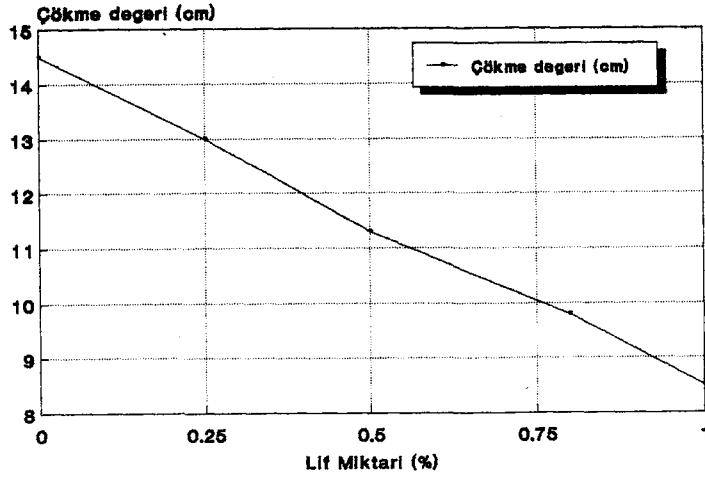
DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ

Bu bölümde; üretilen beton serilerine ait Bölüm 3.'de verilen Ultrases hızı, basınç ve eğilme dayanımı, kılcallık ile betonun kısa süreli basınç altındaki davranışına ait elastik ve inelastik özelliklere ait deney sonuçları değerlendirilecek ve irdelenecektir.

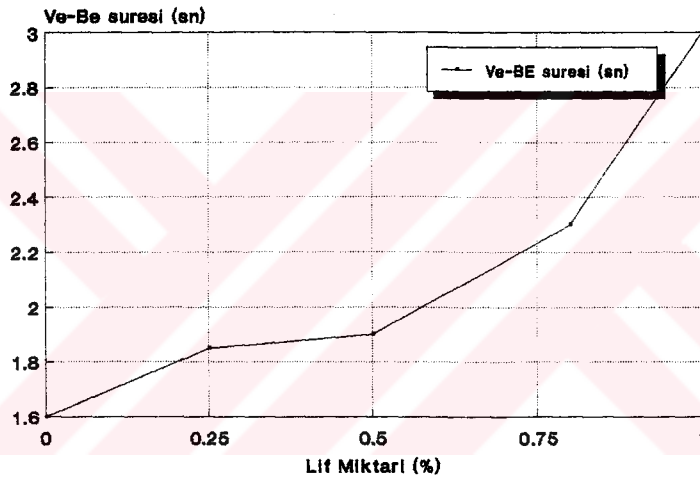
4.1. Taze Beton Özellikleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Bu çalışmada, lif yüzdeleri 0, 0.25, 0.50, 0.8 ve 1.0 olan 5 farklı bileşimde beton üretilmiş ve bunlara 4 ayrı ısıtma işlemi uygulanmıştır. Tablo 3.1.'de verilen sonuçların incelenmesiyle görülebileceği gibi farklı tarihlerde üretilen aynı lif yüzdelerine ait betonların işlenebilme özelliklerinde önemli farklılıklar yoktur. Dolayısıyla, her lif yüzdesinde 4 ayrı ısıtma işlemi için üretilen betonların özelliklerinin aynı olması, betonların kontrollü bir şekilde üretildiğini göstermektedir. Taze beton özellikleri sonuçlarının, her lif yüzdesine karşılık gelen 4 ayrı ısıtma işlemi için üretilen beton karışımları sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak, lif yüzdelerine göre değişimleri Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.3., Şekil 4.4.'de gösterilmiştir.

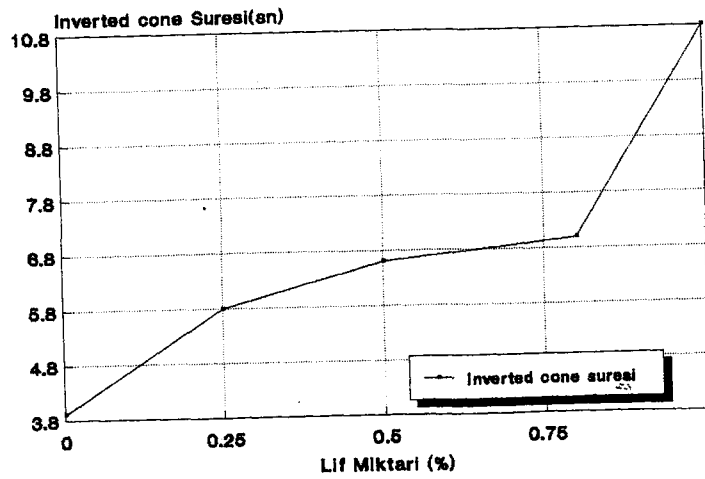
Bu şekillerin incelenmesinden görülebileceği gibi, betona lif katılması sonucu, Ve-Be süresi ile ters koni süreleri artmaktadır (Şekil 4.1., Şekil 4.2.). Öteyandan çökme değerleri de belirgin olarak azalmaktadır (Şekil 4.3.). Örneğin çökmesi 14-15 cm civarında olan akıcı kıvamda betonlara hacim olarak %1 oranında lif katılması halinde çökme değeri 7-8 cm'ye kadar düşmektedir.



Şekil 4.1 Çökme Değerinin Lif Miktarı İle Değişimi.



Şekil 4.2 Ve-Be Süresinin Lif Miktarı İle Değişimi



Şekil 4.3 Ters Koni Süresinin Lif Miktarı İle Değişimi

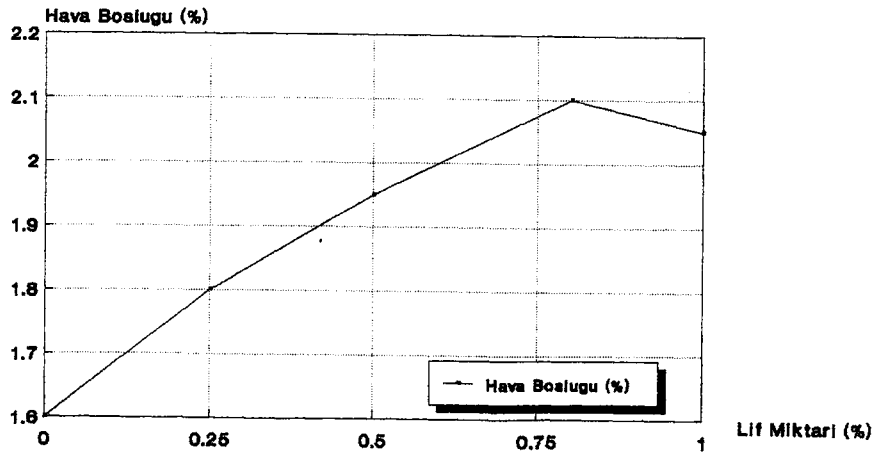
Sonuç olarak lifli betonların işlenebilme özelliği üzerine yapılan çalışmalarda [8], [11]. belirtildiği gibi, bu çalışmada da, sabit su/çimento oranına göre üretilen taze betonun işlenebilme özelliğinin, lif yüzdesinin artışı ile azalmakta olduğu görülmüştür.

Diğer taraftan betona lif katılması sonucu karşılaşılan en önemli problemlerden biriside liflerin karışım içerisinde birbirlerine yapışarak topaklanma oluşturmalarıdır [8]. Bu çalışmada, lifli betonların üretimi sırasında betoniyerdeki karıştırma sonrası liflerde topaklanma görülmemiştir. Dolayısıyla, deneylerde kullanılan lifin geometrisi, lif ve agrega hacim oranları karışım sırası ve karıştırma sürelerinin uygun olarak seçildiği söylenebilir. Ayrıca liflerin tutkalla birleştirilmiş olmasının da etkili olduğu ileri sürülebilir.

Yerleştirmede vibrasyona itina gösterilmesine rağmen, betona katılan lifler, hava boşluğu oranını artırmıştır (Şekil 4.4). Ancak lif %'si 0.8 den sonra görülen azalmayı deney hatası olarak ifade edersek, lif yüzdesinin artışı boşlukların dağılımını değiştirmekte ve genelde boşluk miktarını artırıcı yönde bir etki yapmaktadır.

Ayrıca Tablo 3.1'de verilen sonuçlara göre betona lif katılması betonun taze birim hacim ağırlığını belirgin bir şekilde artırmakta olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre lifli betonların işlenebilme özelliğinin ölçülmesi için çökme ve ters koni deneyleri ile daha anlamlı sonuçlar alınabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4 Hava Boşluğu Yüzdesinin Lif Miktarına Göre Değişimi

4.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Beton içerisine katılan lifler, betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bilhassa eğilme dayanımı üzerine liflerin olumlu etkisinin olduğu literatürde belirtilmektedir [17]., [34].

Diğer taraftan, normal betonun erken yaşlardaki dayanımının genel olarak ısıtılma işlem uygulaması ile arttığı, ileriki yaşlarda ise dayanımda önemli bir artışın olmadığı ve bazı durumlarda dayanımın azaldığı bilinmektedir [7].

Bu çalışmada; ısıtılma işlem uygulamasının lifli betonların özelliklerini ilk günlerde ve ileriki yaşlarda ne şekilde etkilediği araştırılmıştır. Ayrıca ısıtılma işlem uygulanmış ve uygulanmamış beton numunelerinin eğilme dayanımı sonuçlarından yararlanılarak, kompozitte lif-matrix aderans gerilmesinin teorik bir modelle incelenmesi de düşünülmüştür.

4.2.1 Kompozitte Lif-matrix Aderans Dayanımının İncelenmesi

Kompozit malzemelerin çeşitli özellikleri fazların özelliklerine ve hacim oranlarına bağlı olarak ifade edilebilmektedir. Bu bakımdan kompozit malzemelerin boyutlandırılmasında çoğu zaman teorik modellerden yararlanılmaktadır. Bu modellerin uygulanabilmesi için çıkarılan bağıntılara kompozit malzemeler literatüründe "Karışım Kuralı" (Rule Of Mixture) de denilmektedir [30], [31], [32], [35].

Lifli betonların mekanik özelliklerini matrix ve liflerin sabitlerine bağlı olarak ifade eden bağıntılar bölüm 1.1.4 de ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu bağıntılardan hareketle teorik olarak kompozitte lif-matrix aderans dayanımının hesaplanmasında (1.22) bağıntısı esas alınarak, kompozitin dayanımı ile matrixin dayanımı arasında, aşağıdaki bağıntı yazılabilmektedir [35].

$$\sigma_c = \sigma_m(1-V_f) + 2\eta_2\tau V_f(l/d) \dots\dots\dots(4.1)$$

Burada eşitliğin sağındaki ilk terim matrix fazının, ikinci terim de liflerin katkısını belirtmektedir. Bu bağıntıda (τ) lif - matrix ara yüzeyindeki aderans gerilmesi, (η_2) lif yön etkinlik katsayısı, V_f hacimsal lif yüzdesi, (l/d) narinlik oranı (σ_c) kompozitin dayanımı, (σ_m) matriksin (lifsiz beton) dayanımıdır. Bu bağıntıdan hareketle eğilme deneyi sonuçlarına göre aderans gerilmesinin hesaplanmasında, lif yüzdesi 0.25 den 1.0'a kadar değişirken (l/d) oranı sabit olup 60 değerindedir. Ayrıca (η_2) katsayısı içinde Romualdi ve Mandel [4] tarafından belirlenen 0.41 değeri alınmıştır. Yukarıda yapılan kabüller doğrultusunda aderans gerilmesinin hesabı için (4.1) bağıntısının her iki tarafı V_f (l/d) ile bölünerek lineer bir denklem haline getirilmektedir [35].

$$\sigma_c/V_f(l/d) = \sigma_m(1-V_f)/V_f(l/d) + 0.82\tau \dots\dots\dots(4.2)$$

Bu çalışmada 1., 28 ve 90 günlük eğilme deneyi sonuçlarından yararlanılarak (4.2) bağıntısına göre yapılan yardımcı hesaplara ait sonuçlar Tablo 4.1., Tablo 4.2. ve Tablo 4.3.'de verilmiştir. Burada ısıt işlem görmüş (Yumuşak çevrim, ılımlı çevrim ve Sert çevrim değerlerinin ortalaması alınmıştır) ve 20°C de saklanmış beton numuneleri için hesaplanan değerlerden $\sigma_m(1-V_f)/V_f(l/d)$ ifadesi x ekseninde, $\sigma_c/V_f(l/d)$ ifadesi y ekseninde gösterilerek deney sonuçlarına ait noktalardan geçirilen en uygun doğruya göre regrasyon analizi sonuçları bulunmuş ve değişimler Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7. gösterilmiştir.

Tablo 4.1 1 Günlük Eğilme Dayanımı Sonuçlarının (4.2) Bağıntısına Uygulanması İçin Yardımcı Hesaplar.

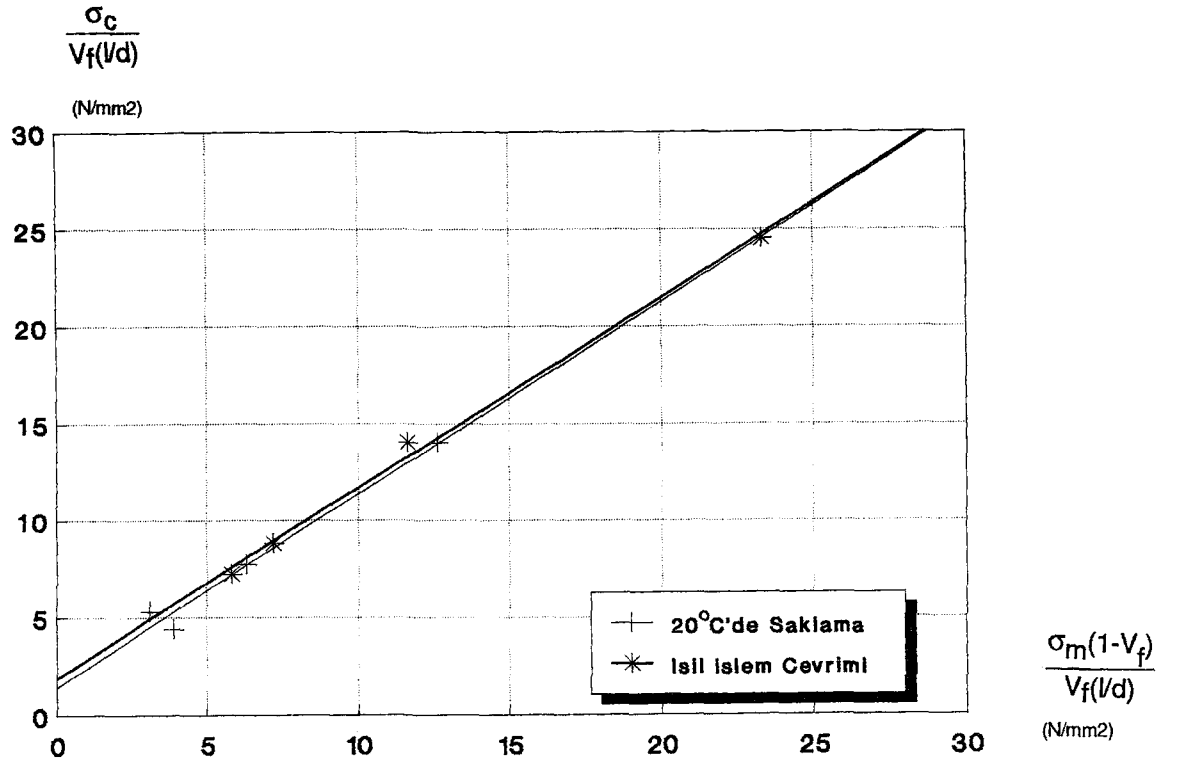
BETON TÜRÜ		σ_c (N/mm ²)	σ_m (N/mm ²)	$\frac{\sigma_m(1-V_f)}{V_f(l/d)}$ (N/mm ²)	$\frac{\sigma_c}{V_f(l/d)}$ (N/mm ²)
KÜR	Lif Hacmi				
20°C'de Saklama	0	1.9	1.9		
	2.5	2.1	1.9	12.6	14
	5	2.3	1.9	6.3	7.7
	8	2.1	1.9	3.9	4.4
	10	3.2	1.9	3.1	5.3
Isıt İşlem Çevrimi	0	3.5	3.5		
	2.5	3.7	3.5	23.3	24.5
	5	4.2	3.5	11.6	14
	8	4.23	3.5	7.2	8.8
	10	4.33	3.5	5.8	7.2

Tablo 4.2 28 Günlük Eğilme Dayanımı Sonuçlarının (4.2)
Bağıntısına Uygulanması İçin Yardımcı Hesaplar

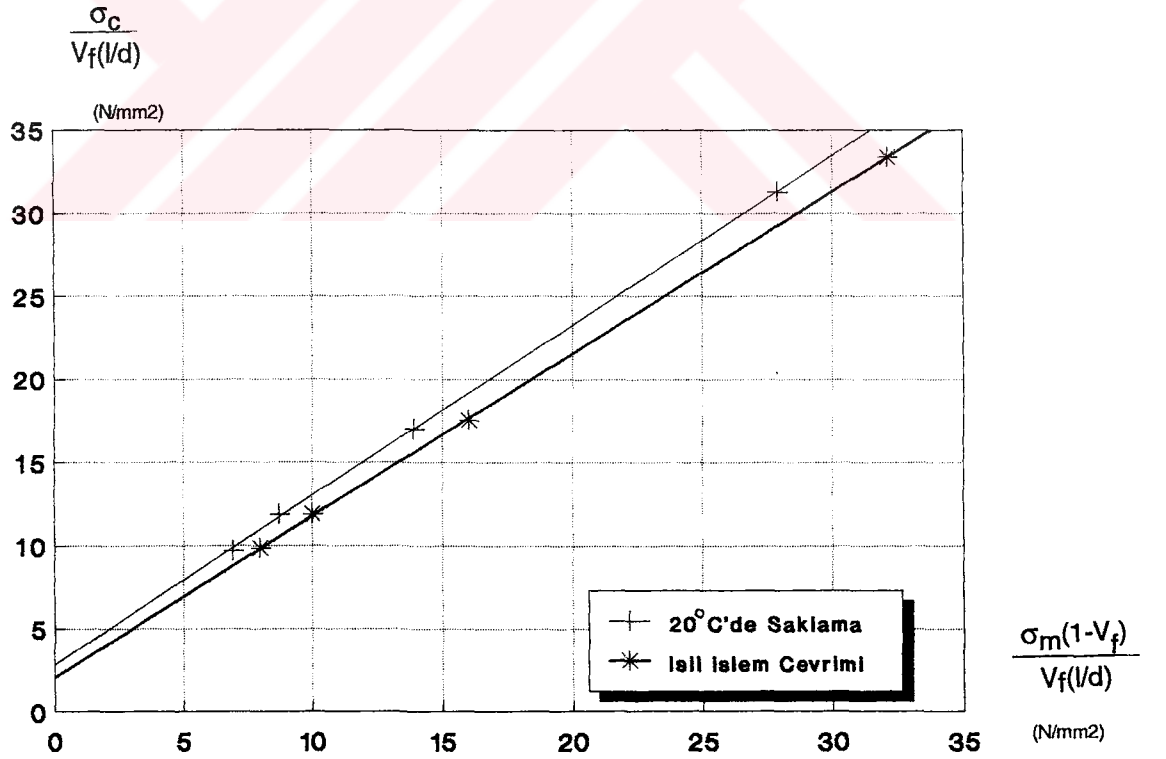
BETON TÜRÜ		σ_c (N/mm ²)	σ_m (N/mm ²)	$\frac{\sigma_m(1-V_f)}{V_f(l/d)}$ (N/mm ²)	$\frac{\sigma_c}{V_f(l/d)}$ (N/mm ²)
KÜR	V_f dm ³ /m ³				
20°C'de Saklama	0	4.2	4.2		
	2.5	4.7	4.2	27.9	31.3
	5	5.1	4.2	13.9	17
	8	5.7	4.2	8.68	11.9
	10	5.8	4.2	6.9	9.7
Isıl İşlem Çevrimi	0	4.83	4.83		
	2.5	5.01	4.83	32.1	33.56
	5	5.56	4.83	16	18.6
	8	5.71	4.83	10	12
	10	5.90	4.83	8	9.84

Tablo 4.3 90 Günlük Eğilme Dayanımı Sonuçlarının (4.2)
Bağıntısına Uygulanması İçin Yardımcı Hesaplar

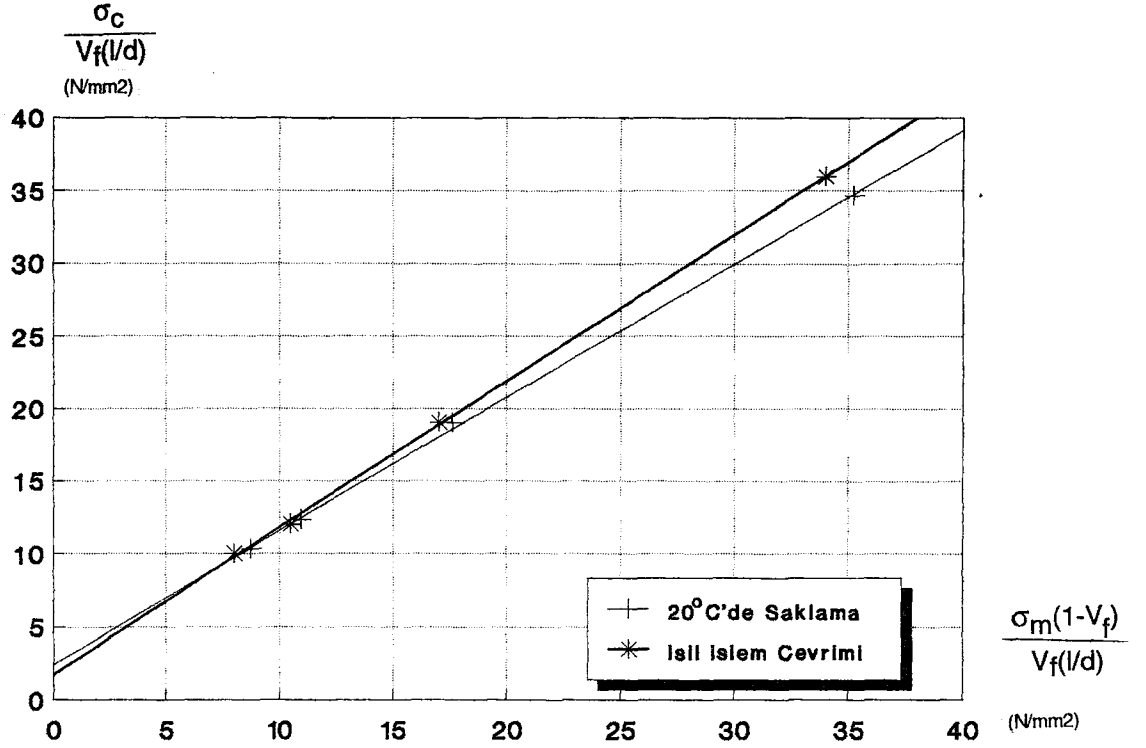
BETON TÜRÜ		σ_c (N/mm ²)	σ_m (N/mm ²)	$\frac{\sigma_m(1-V_f)}{V_f(l/d)}$ (N/mm ²)	$\frac{\sigma_c}{V_f(l/d)}$ (N/mm ²)
KÜR	V_f dm ³ /m ³				
20°C'de Saklama	0	5.3	5.3		
	2.5	5.5	5.3	35.3	34.7
	5	5.8	5.3	17.6	19.3
	8	5.9	5.3	11	12.3
	10	6.2	5.3	8.7	10.3
Isıl İşlem Çevrimi	0	5.1	5.1		
	2.5	5.4	5.1	34	36
	5	5.6	5.1	17	19
	8	5.7	5.1	10.5	12
	10	5.8	5.1	8	10



Şekil 4.5 1 Günlük Eğilme Deneyi Sonuçlarına (4.2) Bağıntısının uygulanması



Şekil 4.6. 28 Günlük Eğilme Deneyi Sonuçlarına (4.2) Bağıntısının uygulanması



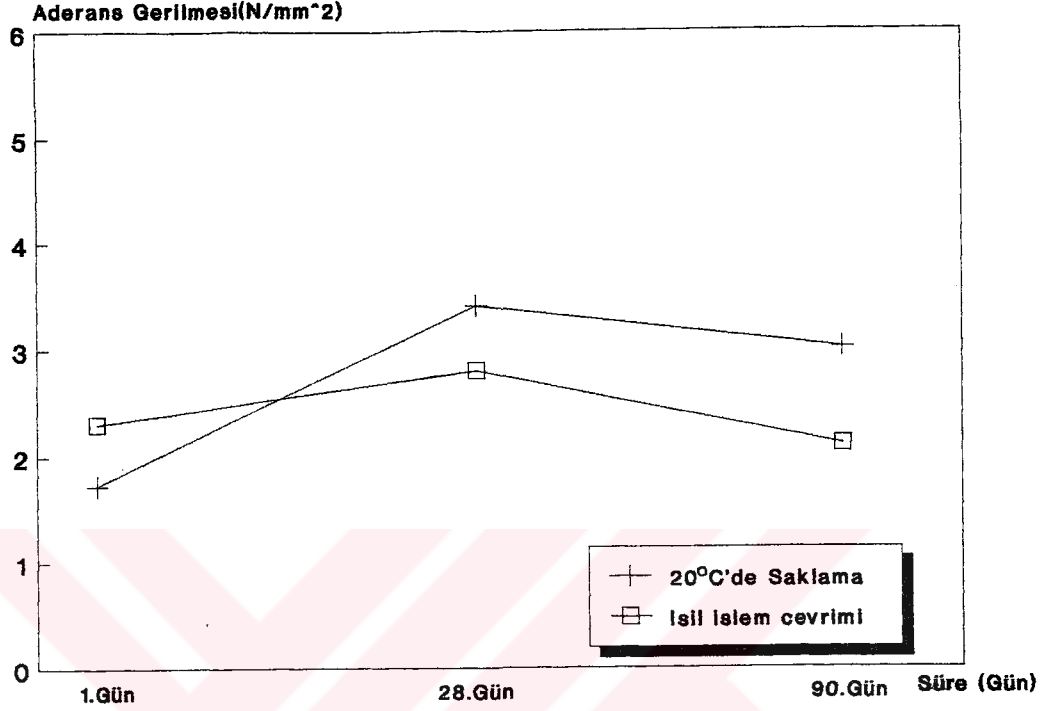
Şekil 4.7 90 Günlük Eğilme Deneyi Sonuçlarına (4.2) Bağıntısının Uygulanması

Yapılan hesaplamalarda ısıtılmış numunelerde 50°C, 65°C ve 80°C sıcaklıklara ait her lif yüzdesindeki eğilme dayanımı sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu sonuçlara uygulanan regrasyon analizine göre bulunan katsayılar ve τ aderans gerilmesi Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4 Eğilme Dayanımı Sonuçlarının (4.2) Bağıntısına Uygulanması ile Bulunan Katsayılar ve Ortalama Aderans Dayanımı Değerleri

		(4.2) Bağıntısına Göre Bulunan Katsayılar ($y=a+bx$)			0.82 $\tau=-----$ a (N/mm ²)
Süre	Kür	a	b	Ko. Kats. r	
1 GÜN	20°de Saklama	1.42	0.993	0.987	1.73
	Isıl İşlem Çev.	1.88	0.981	0.998	2.29
28 GÜN	20°de Saklama	2.80	1.02	0.999	3.40
	Isıl İşlem Çev.	2.31	0.979	0.999	2.82
90 GÜN	20°de Saklama	2.48	0.918	0.999	3.03
	Isıl İşlem Çev.	1.73	1.00	0.999	2.11

Hesaplanan ortalama aderans dayanımlarının ısıtılma ve 20°C lik sıcaklıkta zamana göre değişimi şekil 4.8'de gösterilmiştir. Bu şeklin incelenmesinden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.



Şekil 4.8 Lifli Betonlarda Isıl İşlemin Aderans Gelişimine Etkisi

1) Isıl işlem görmüş ve 20°C'de saklanmış numunelerin aderans dayanımlarının benzer şekilde değiştiği görülmektedir (Şekil 4.8). Dolayısıyla 1. gün ile 28. gün arasında aderans dayanımı artarken, 28. günden itibaren azalmaya başlamaktadır.

2) Şekil 4.8'de 1 günlük numunelere ait aderans dayanımı değişimi incelendiğinde; ısıtılma işlem görmüş numunelerin aderans dayanımları 20°C'ye göre daha yüksektir. Örneğin; ısıtılma işlem 1. günde aderans dayanımını 20°C'ye göre %32 oranında artırmıştır. Diğer taraftan ısıtılma işleminin, 1 günlük numuneleri eğilme dayanımlarını ise en fazla şahit numunelerde (lifli beton) artırdığı (%100) görülmüştür. Lifli betonlardaki artış oranı ise daha azdır. Bu bulgu, ısıtılma işleminin betonun erken yaşlardaki dayanım kazanma hızını artırdığı sonucuyla uyumludur. Dolayısıyla 1. günde ısıtılma işleminin 20°C'ye göre aderans dayanımını daha fazla artırması, ısıtılma işleminde matris dayanımı gelişme hızının kompozit dayanımına göre daha yüksek olmasına bağlanabilir.

3) 28 günlük numunelerde aderans dayanımı 1 günlük numunelere göre artış göstermektedir (Şekil 4.8). Bu artış hızı 20°C de saklanan numunelerde daha yüksektir. Bunun nedeni de 20°C lik normal kür şartlarındaki betonun matriks dayanımı gelişme hızının ısıtılma göre daha hızlı olmasındandır. Isıl işlemde aderans dayanımının daha az olmasında, matriks fazında artan kusurların ısıtılmanın olumsuz etkisiyle dahada artarak dayanım kaybına sebep olmasına bağlanabilir. Dolayısıyla normal şartlardaki betonun aderansı daha yüksek çıkmaktadır.

4) 20°C ve ısıtılma 90 günlük aderans dayanımları 28. günden itibaren azalmaktadır (Şekil 4.8). Ancak bu azalma erken yaşlarda görülen artış hızına kıyasla çok azdır. Aynı durum eğilme dayanımı sonuçlarında da görülmektedir.

Aderans dayanımının 90. günde azalması çelişkili gözükse de, azalmanın sebebi, hem 20°C de hem de ısıtılma matriks dayanımı gelişme hızının kompozit dayanımı gelişme hızına göre daha yüksek olmasına bağlanabilir. Bilhassa, ısıtılma görmüş numunelerde, ileriki yaşlardaki dayanım kayıpları genellikle matriks fazındaki kusurların artmasına bağlanmaktadır[7].

Özetle, kompozit malzeme olan lifli betonun eğilme dayanımı sonuçlarının teorik bir modele göre çıkarılan (4.2) bağıntısına uyarlanmasıyla hesaplanan aderans dayanımına göre, ısıtılmanın erken yaşlarda dayanımı artırıcı etkisinin olduğu vurgulanmaktadır. İleriki yaşlarda ise, özellikle 90. günde, betona katılan liflerden dolayı artan kusurlar ısıtılma kendini daha belirgin göstermekte ve buda ileriki yaşlardaki dayanımın azalmasına neden olmaktadır. Böylece aderans gelişimi de ileriki yaşlarda zayıflamaktadır. Nitekim 90. günde kompozitin dayanımının matriksin dayanımına oranının küçülmekte olduğu deney sonuçlarından da görülmektedir. Halbuki bu oran 1.ve 28. günlerde daha büyük olmaktadır.

Öte yandan 20°C'de ve ısıtılma 28 günlük numunelerin ortalama aderans dayanımı değerlerinin (2.82-3.40 N/mm²) daha önce yapılan lifli betonların mekanik özelliklerini inceleyen çalışmalarda [5], [8], [35] aynı bağıntıya dayanarak, 20 °C'lik normal kür şartlarında, bulunan 2.44 ile 4.15 N/mm² aralığında kalan değerlere uyum göstermektedir.

4.2.2 Eğilme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Gelişen teknoloji koşullarında yapı dalında üretim talebi hızla artmakta ve bu artışa ekonomik ve teknik yönden bir çözüm bulabilmek amacıyla seri üretime gidilmektedir. Bu üretimde son zamanlarda sağladığı teknik avantajlar bakımından lifli betonun kullanılması artmaktadır. Kompozit malzeme grubuna giren lifli betonun prefabrike yapı elamanları üretiminde kullanılması ile beton içerisinde oluşan çatlakların ilerlemesi lifler sayesinde önlenilmekte ve bu da dayanımı artırmaktadır.

Bu bakımdan, genellikle, eğilme dayanımının önemli olduğu yapı elamanları üretiminde kullanılan lifli betonlara ısıtma işlemi uygulanması ile eğilme dayanımının ne şekilde değiştiğini incelemek bu çalışmanın esas amacını oluşturmaktadır.

Bu deneysel çalışmada lif yüzdeleri 0.0, 0.25, 0.50, 0.80 ve 1.0 olan betonların 1., 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları üzerine ısıtma işlemi uygulamasının etkisi 20° C de şahit 28 günlük dayanımın yüzdesi cinsinden, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 de; lif yüzdesinin etkisi ise Şekil 4.12 , Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 de gösterilmiştir. Bu şekillerin incelenmesinden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

1) Şahit ve lifli beton numunelerin 1 günlük eğilme dayanımları, uygulanan ısıtma işlemlerde, 20°C 'lik normal kür şartlarına göre, artmaktadır (Şekil 4.9).

2)Şahit ve lifli beton numunelerde, 1 günlük dayanımlar, sıcaklığa bağlı olarak sürekli artmakta ve 80° C'de maksimum değerlerine ulaşmaktadır (şekil 4.9). Örneğin; tablo 3.2'deki sonuçlara göre , 20° C'lik normal kür şartlarında bağıl eğilme dayanımı % 45 değerinde iken 50° C , 65° C ve 80° C ' lik sıcaklıklarda sırasıyla % 75 , % 83 ve % 90 değerlerini almaktadır. Aynı şekilde lifli betonlarda da benzer bir artış görülmektedir. Örneğin; lif yüzdesi 1.0 olan numunelerin 1 günlük bağıl eğilme dayanımları 20° C de %76 değerinde iken 50° C , 65° C ve 80° C sıcaklıklarda sırasıyla %99 , %100 ve %109 değerlerine yükselmektedir. Bu değerlere göre, ısıtma işlemi görmüş lifli betonların 1 günlük dayanımları, 20° C'de şahit numunenin (lifsiz) 28 günlük dayanımına

ulaşmaktadır. Bu sonuç, 1 günlük lifli betonların eğilme dayanımlarının artmasında ısıtılmanın olumlu etkisini göstermektedir.

Isıl işlemin, normal betonlarda, harç fazını etkileyerek 1.gündeki dayanımı daha yüksek oranlarda artırdığı bilinmektedir [7],[36],[41]. Ayrıca uygulanan ısıtılma işlem sıcaklığı arttıkça, betonun olgunluk derecesi de arttığından 1.günde en yüksek dayanım, sert çevrim uygulanan betonlarda elde edilmiştir.

Bölüm 1.1.4 'de ayrıntılı olarak incelendiği üzere, kompozit bir malzeme olan lifli betonda; matrix sürekli fazı, lifler dağılılı fazı oluşturmaktadır. Bu durumda kompozitin dayanımı; matriksin özelliklerine, lifin özelliklerine ve lif ile matriks arasında oluşan aderansa bağlı olarak değişmektedir.

Öte yandan şekil 4.9 'da görüldüğü gibi , şahit ve lifli betonların 1 günlük dayanımları, ısıtılma işleminden benzer şekilde etkilenmektedir. Dolayısıyla, ısıtılmanın lifli betonlarda kompozitin dayanımını etkileyen faktörler içinde esas olarak, matriksin özelliklerini etkilediği söylenebilir. Bu durumda, ısıtılmanın lifli betonların erken yaşlardaki dayanımını matriks fazını etkileyerek artırdığı ileri sürülebilir.

3) Şahit ve lifli betonların 1 günlük eğilme dayanımlarında artış hızı 50°C 'den itibaren azalmaya başlamaktadır (Şekil 4.9). Artış hızındaki bu azalmanın sebebi, ileride daha ayrıntılı açıklanacağı üzere, şahit betonlarda sıcaklık yükselmesinden dolayı matriks fazında oluşan yapısal kusurlara (hidratasyon ürünlerinin heterojen dağılımı, artan kristalleşme ve porozite gibi) ve fiziksel kusurlara bağlanabilir.

4) Isıl işlem uygulamasının, 1 günlük numunelerde, dayanımı artırıcı etkisinin lif yüzdesi arttıkça azaldığı görülmektedir (Şekil 4.9). Örneğin; 80°C'lik ısıtılma işlem sıcaklığı, 20°C 'deki şahit numunenin 1 günlük dayanımını %44.8 den %89.8 değerine kadar yükselterek, %100 'lük bir artış sağlamıştır. Aynı şartlarda lif yüzdesi 1.0 olan numunenin eğilme dayanımı %76.2 den %108.5 değerine yükselmesine rağmen dayanımdaki artış oranı %42 olmuştur (Tablo 3.2 deki 1 günlük sonuçlara göre).

Özetle, ısıtım işlem uygulamasının etkinliği 1.günde lif yüzdesi artışına bağlı olarak azalmaktadır. Bu azalmanın sebepleri aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

Bölüm 4.1 'de incelenen ve şekil 4.4 'de değişimi görüldüğü üzere,betona katılan lif miktarı arttıkça betonun boşluk oranının artmakta olduğu gözlenmiştir.

Dolayısıyla, lif miktarının artmasıyla matriks fazında artan kusurlu yapı ısıtım işlemin etkisiyle daha da artmaktadır. Böylece, ısıtım işlemin iç yapıda oluşturduğu olumsuz etkiler lifli betonlardaki 1 günlük dayanımın daha az artmasına sebep olmaktadır.

Öte yandan, lif ve matriksin farklı genleşme katsayıları da dikkate alınırsa, ısıtım işleminden dolayı iç yapıda meydana gelebilecek ısıtım gerilmelerin oluşturaçağı çatlakların da dayanımın azalmasında ayrı bir rol oynadığı söylenebilir.

5) ısıtım işlem görmüş ve ısıtım işlem görmemiş 1 günlük numunelere ait eğilme dayanımlarının lif yüzdesi artışına bağlı olarak değişimi şekil 4.12 'de verilmektedir.

Bu şekile göre lif yüzdesi arttıkça dayanımlar da artmaktadır. Ancak lif yüzdesinin etkinliği ısıtım işlem görmüş numunelerde daha az olmaktadır. Örneğin; 20° C sıcaklıkta, 1 günlük bağıl eğilme dayanımları, şahit numunede %44.8 iken, lif yüzdesi 1.0 olan numunede %76.2 değerini almaktadır. Bu durumda, 20° C' lik sıcaklıkta 1 günlük dayanım %1 lif katılmasıyla %70 civarında artmıştır. Aynı şekilde, 50°C, 65°C ve 80°C'lik sıcaklıklarda lif yüzdesi 1.0 olan betonların şahit numuneye göre 1 günlük dayanım artışları ancak sırasıyla %31, %20 ve %21 oranlarında olmaktadır.

Bu sonuçlara bakıldığında; 1 günlük numunelerdeki dayanımların artmasında liflerin etkinliği, ısıtım işlem görmüş numunelerde, daha az olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Lifli betonların mekanik özellikleri teorik modeller yardımıyla açıklanabilmektedir. Bölüm 1.1.4 'de açıklandığı gibi, bu teorik modellere bağlı olarak çıkarılan bağıntılardan yararlanarak, matriks ile lif arasındaki aderans dayanımı hesaplanabilmektedir. Buna göre bu çalışmada; kompozitte lif-matriks aderans gelişiminin incelendiği (4.2) bağıntısına göre ısıtım işlem görmüş ve ısıtım işlem görmemiş numuneler için aderans dayanımı hesaplanmıştır.

Bulunan sonuçlar, ısıtım işlem görmüş numunelerde ilk yaşlardaki aderans dayanımı gelişme hızının 20°C' ye göre daha yüksek olduğunu göstermektedir (Şekil 4.8).

Isıtım işlem görmüş 1 günlük numunelerde aderans dayanımı daha yüksek olmasına rağmen lif yüzdesi arttıkça dayanımların 20°C ye göre daha az artması ısıtım işlemin matriks fazında oluşturduğu kusurlara bağlanabilir. Oluşan kusurlar lif miktarı arttıkça daha çok arttığından ısıtım işlemlerin olumsuz etkisi de daha belirgin olarak gözükmemekte ve sonuçta lif yüzdesinin artışıyla dayanımla sağlanan yarar ısıtım işlemin olumsuz etkisiyle dengelenmektedir. Nitekim lif miktarının artmasıyla betonun boşluk oranının değişmekte olduğu bölüm 4.1 de belirtilmektedir(Şekil 4.4).

Özetle , lif miktarı arttıkça iç yapıda artan kusurlar ısıtım işlemde kendini daha fazla göstermekte ve bu da dayanımdaki daha az artışın nedeni olmaktadır.

6) Yukarıdaki değerlendirmelerin diğer bir göstergesi de şekil 4.12 de görüldüğü gibi, 80° C 'lik ısıtım işlem sıcaklığında lif yüzdesi 0.5 den itibaren ilk günlerdeki dayanım artışının sabit kalmış olmasıdır. Bu da yüksek sıcaklıklarda belirli bir orandan sonra lif miktarı artışının dayanım yükselmesine önemli bir yarar sağlamadığını göstermektedir.

7) Şahit ve lifli beton numunelerin 28 günlük eğilme dayanımlarının ısıtım uygulamasına göre değişimi şekil 4.10 'da görüldüğü üzere, ısıtım işlem sıcaklığı arttıkça eğilme dayanımları, 20° C'lik normal kür şartlarına göre ,28. günde de artmaktadır. Ancak burada görülen artış oranı ilk yaşlardaki dayanım artış oranından daha azdır. Örneğin; 1günlük şahit numunenin 80°C sıcaklıktaki dayanım artış oranı, 20°C'ye göre, %100 iken 28 günlük numunede bu oran %10 mertebesinde gerçekleşmiştir. Aynı şartlarda lif yüzdesi 1.0 olan numunenin 1.gündeki artış oranı %42 iken 28. günde bu oran %4 mertebesine düşmüştür.

Dolayısıyla ısıtım işlem uygulaması,28 günlük numunelerde de 20°C ye oranla belirli bir dayanım artışı sağlamaktadır. Bu durum Uyan [36] 'ın yaptığı çalışmada ayrıntılı olarak belirtildiği gibi,ısıtım işlem görmüş numunelerin uzun sürede de 20°C

ye oranla dayanım artışı göstermelerinin nedeni, numunelerin saklandığı ortam şartlarına bağlı olduğu söylenebilir. Araştırmada numuneler su içinde tutulmayıp, rutubeti $65 \pm 5^\circ$ ve sıcaklığı $20 \pm 2^\circ\text{C}$ olan ortam şartlarında havada saklanılmıştır. Nitekim literatür [44]'de belirtildiği gibi uygulamada genellikle betonların rutubet kütüne pek az maruz kalmalarından dolayı, buhar kütünün avantajının, daha düşük sıcaklıklarda sürekli rutubet kütüne tabi tutulmuş betonlara göre değerlendirilen avantajından önemli derecede daha büyük olabileceği belirtilmiştir. Buna göre, araştırmada numunelerin su içinde tutulmayıp havada saklanmaları, ısı işlem görmüş numunelerin 28 günlük dayanımlarının hala yüksek kalmasının nedeni olmaktadır.

8) 28 günlük lifli beton numunelerin dayanım artışında ısı işlemin etkisi lif yüzdesi arttıkça azalmaktadır (Şekil 4.10). Özellikle lif yüzdesi 1.0 olan numunenin 80°C deki dayanımı 20°C ye göre fazla değişmemektedir. Bu durum, 1 günlük numunelerde olduğu gibi, lif yüzdesi artışının oluşturduğu kusurlu yapının ısı işlem sıcaklığının etkisi ile daha da belirgin olarak artmasına bağlanabilir. Böylece ısı işlem nedeni ile artan kusurların, 28 günlük eğilme dayanımını olumsuz etkilediği söylenebilir.

9) 28 günlük numunelerin eğilme dayanımlarının lif yüzdesine göre değişimi Şekil 4.13 de incelendiğinde; ısı işlem uygulanan ve 20°C de saklanan numunelerde lif miktarı arttıkça dayanımların artmakta olduğu görülmektedir. Ancak, 20°C sıcaklıkta, lif yüzdesinin artmasıyla 28 günlük dayanım artışı, %37 iken 50°C , 65°C ve 80°C 'lik sıcaklıklarda sırasıyla %24, %15 ve %28 oranlarında dayanımlar artmıştır. Bu sonuçların değerlendirilmesi yapılırsa, 1 günlük numunelerde olduğu gibi 28. günde de lif yüzdesinin etkinliği ısı işlem görmüş numunelerde, 20°C 'lik normal küt şartlarına göre daha az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, 1 günlük numunelerde açıklandığı gibi, ısı işlemin matris fazında oluşturduğu kusurlara bağlanabilir. Nitekim, ileride ayrıntılı olarak açıklanacağı üzere, lif miktarının artması ile oluşan kusurlu yapının ısı işlemde kendini daha fazla göstermekte olduğu Şekil 4.29 den de anlaşılmaktadır. Yani, 28 günlük numuneler üzerinde yapılan su emme deneylerine göre ısı işlem görmüş numunelerde lif miktarı arttıkça görünen porozite değerleri 20°C ye oranla artmaktadır.

Dolayısıyla lif yüzdesinin artışıyla sağlanan dayanım artışı ısıtma işlemin olumsuz etkisiyle azalmakta olduğu görülmektedir.

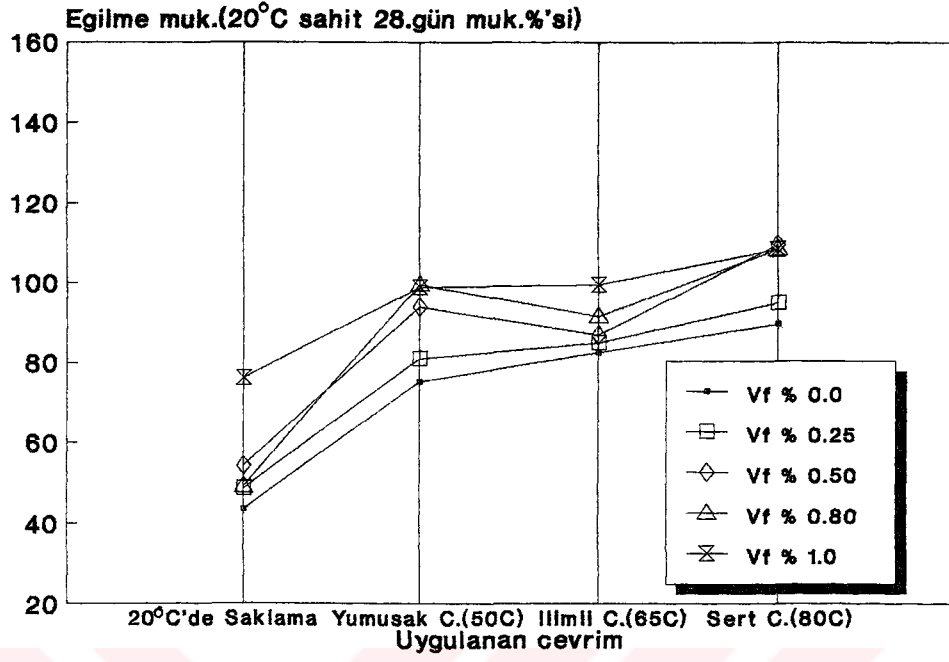
Normal kür şartlarında (20°C) 28 günlük eğilme dayanımının lif yüzdesine göre arttığı sonucu diğer çalışmalarda uyusmaktadır. Örneğin; lif miktarının eğilme dayanımı üzerine etkisinin incelendiği çalışmalarda da [18],[19],[21], eğilme dayanımının lif miktarına bağlı olarak arttığı belirtilmektedir.

10) Şahit ve lifli beton numunelerin 90 günlük eğilme dayanımları, şekil 4.11 de görüldüğü üzere, ısıtma işlem sıcaklığı arttıkça 20°C ye göre azalmaktadır. Literatürden de bilindiği gibi ısıtma işlem, erken yaşlardaki dayanımı, 20°C lik normal kür şartlarında elde edilen dayanıma oranla düşürmektedir [7],[36],[41].

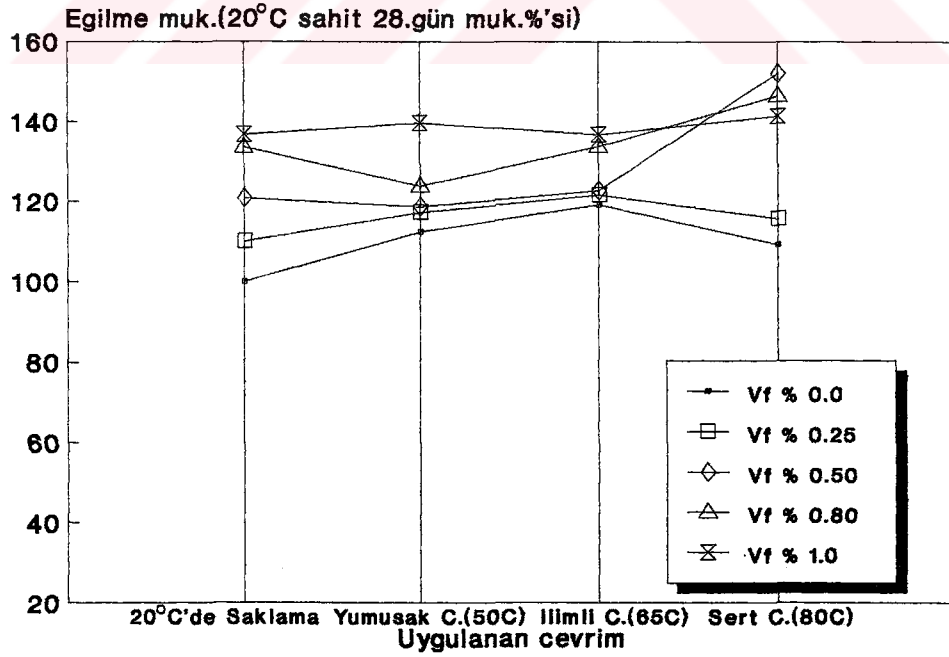
Bu çalışmada da ısıtma işlem uygulanan numunelerin eğilme dayanımdaki azalma 28. günde olmayıp 90. günde ortaya çıkmaktadır. Azalmanın uzun sürede meydana gelmesi numunelerin havada saklanmalarına bağlanabilir. Nitekim Uyan [36] bu konuda yaptığı araştırmada bunun doğruluğunu ortaya çıkarmıştır.

Şekil 4.11 de ısıtma işlem görmüş şahit numune ile lif yüzdesi 1.0 olan betonların eğilme dayanımlarında görülen azalma birbirine benzemektedir. Yani, 20°C de şahit numunenin eğilme dayanımı %125 iken, 80°C lik sıcaklıkta %118 lik değerine düşerken dayanımda %5 oranında azalma görülmektedir. Aynı şekilde lif yüzdesi 1.0 olan numunenin 20°C deki dayanımı %146 iken, 80°C de %138 değerinde olup %6 oranında azalma olmaktadır. Dolayısıyla hem şahit numune hemde lifli betonlar 90. günde ısıtma işleminden benzer şekilde etkilenmektedir. Bu da ısıtma işlemin ileriki yaşlardaki olumsuz etkisinin liflerin olumlu etkisinden daha fazla olmasıyla dengelenmektedir.

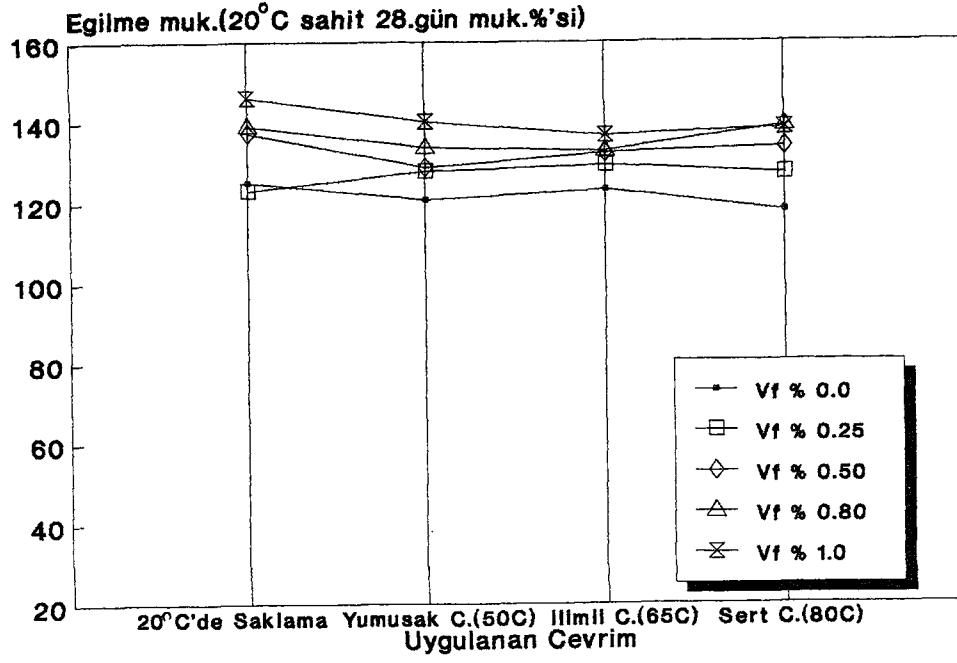
11) Şekil 4.14 de görüldüğü gibi, 20°C de ve ısıtma işlem görmüş numunelerde 90 günlük eğilme dayanımları lif yüzdesi artışlarına bağlı olarak artmaktadır. Burada ilginç olan durum, lif yüzdesinin dayanımı artırıcı etkisi 20°C de ve ısıtma işlemde birbirine yakın olmasıdır. Örneğin, tablo 3.2 de verilen 90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre, 20°C lik normal kür şartlarında lif yüzdesi 1.0 olan numunenin dayanımı şahit numunenin dayanımına göre %17



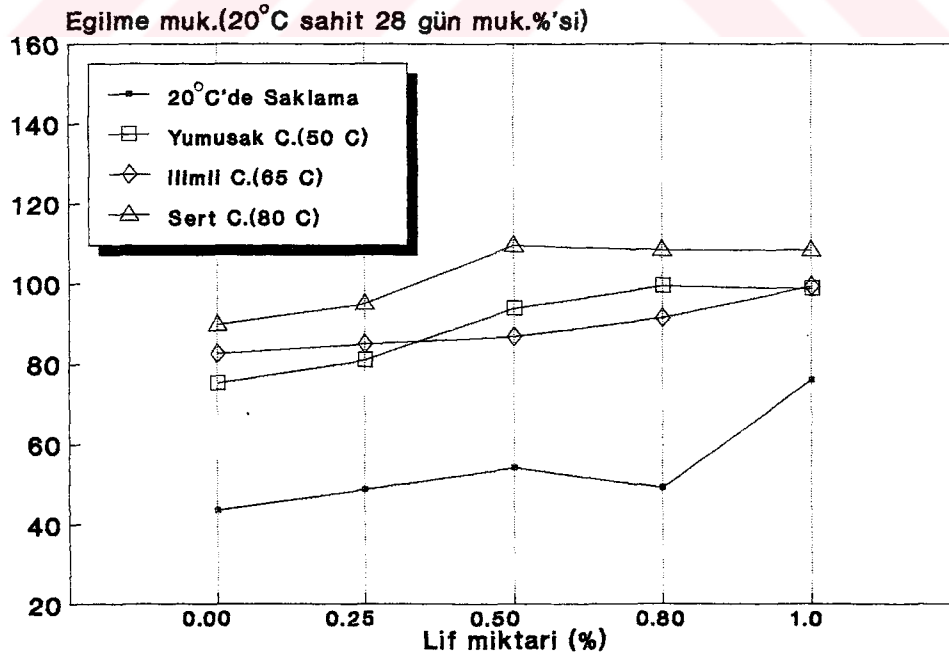
Şekil 4.9 1 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi



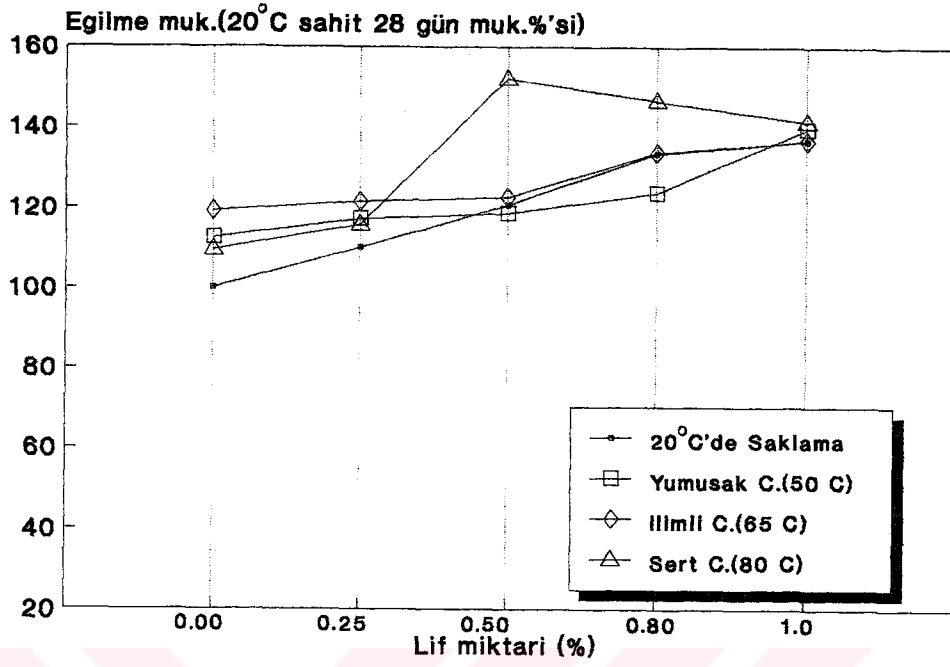
Şekil 4.10 28 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi



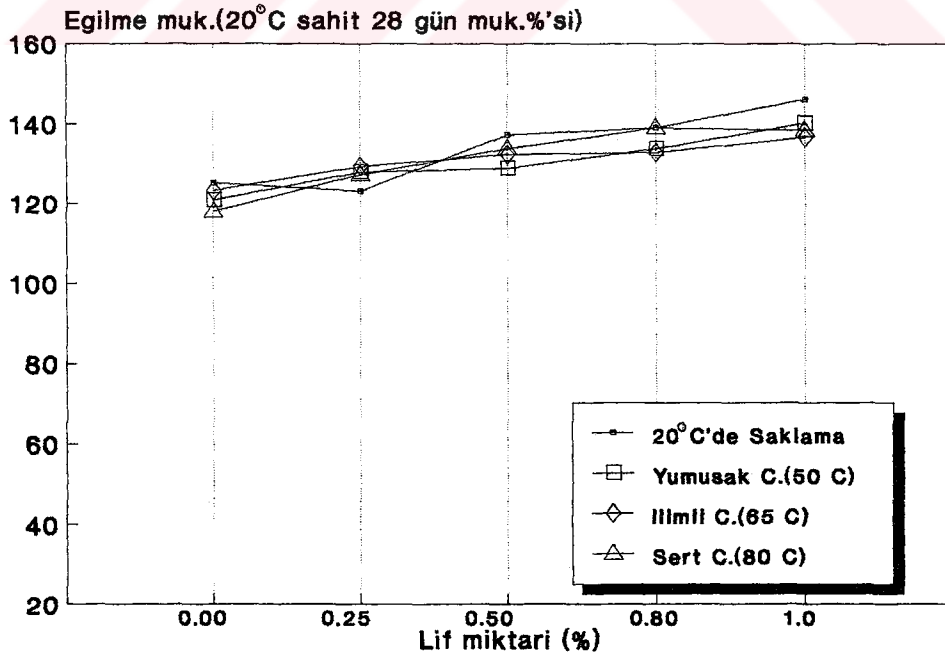
Şekil 4.11 90 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi



Şekil 4.12 1 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi



Şekil 4.13 28 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi



Şekil 4.14 90 Günlük Numunelerin Eğilme Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi

mertebeğinde artmaktadır. Aynı numunenin 80°C sıcaklıktaki artış oranında %17 mertebesinde olmaktadır.

Bu duruma göre, 1. günde liflerin dayanımı artırıcı etkisi en fazla 20°C normal kûr şartlarında elde edilmesine karşın, bu etki 90 günlük eğilme dayanımı artışında hem 20°C de hemde ısıtılma işlem görmüş numunelerde aynı mertebede kalmaktadır.

Öte yandan Şekil 4.12., Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 de görülen ortak özellikte 1., 28 ve 90 günlük numunelerin eğilme dayanımlarının lif yüzdesi artışına bağlı olarak hem 20°C de hemde ısıtılma işlem görmüş numunelerde artmasıdır. Ancak burada farklı olan durum, lif yüzdesi artışına göre elde edilen dayanım artış oranları 1. günden 90. güne doğru gidildikçe düşmektedir. Yani betonun yaşı ilerledikçe liflerin dayanım artışına etkisi azalmaktadır. Bu azalmanın nedeni aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

Kompozit malzeme olan lifli betonlarda dayanımın zamanla gelişmesi, matrix dayanımı ve lif-matrix aderans dayanımlarının değişik hızdaki gelişmeleri ile belirlenebilir. Yapılan bu çalışmada elde edilen eğilme dayanımı sonuçlarına (Tablo 3.2) dayanarak 1., 28 ve 90 günlük dayanımlar üzerine liflerin etkisinin zamanla nasıl değiştiğini belirlemek amacıyla her bir sıcaklık için (σ_{cu}/σ_m) oranları hesaplanmıştır. Burada; (σ_{cu}) kompozitin eğilme dayanımı (Lif yüzdesi 1.0 olan numunenin), (σ_m) matrix'in (Şahit numune) eğilme dayanımını göstermektedir. Hesaplanan değerler Tablo 4.5 de verilmektedir.

Tablo 4.5 (σ_{cu}/σ_m) Oranlarının Isıl İşlem ve Zamana Göre Değişimleri. (Eğilme)

Sıcaklık Yaş	20°C	50°C	65°C	80°C
1. GÜN	1.7	1.3	1.2	1.2
28. GÜN	1.4	1.2	1.1	1.28
90. GÜN	1.2	1.1	1.1	1.2

Yukarıda tabloda verilen sonuçlar incelendiğinde, hem 20°C hemde ısıtma işlemlerinde (σ_{cu}/σ_m) oranlarının zamanla azalmakta olduğu görülmektedir. Bu azalma ise 20°C normal kuru şartlarında daha fazla olmasına karşın ısıtma işlemlerinde daha az olmaktadır. Örneğin, 20°C normal kuru şartlarında 1 günlük numunelere ait (σ_{cu}/σ_m) oranları 1.7 iken 90. günde bu oran 1.2'ye düşmüştür. Aynı şekilde ısıtma işlemlerinde (σ_{cu}/σ_m) oranları sırasıyla 50°C de 1.3'den 1.1'e 65°C den 1.2 den 1.1 'e düşerken 80°C bu oran 1.2 değerinde sabit kalmıştır. Bu sonuçlara göre liflerin dayanımı artırıcı etkisinin zamanla en fazla 20°C de düşmekte olduğu görülmüştür. Dolayısıyla 20°C normal kuru şartlarında matrix dayanımının zamanla gelişme hızı lif-matrix aderans dayanımı gelişme hızına göre daha fazla artması sonucu, özellikle lif yüzdesi 1.0 olan numunelerde, "Kompozitin dayanımı/matrixin dayanımı" oranı ileriki yaşlarda küçülmekte ve bu da liflerin dayanımı artırıcı etkisinin zamanla azaldığını göstermektedir.

Öte yandan ısıtma işlem görmüş numunelerde ise "Kompozitin dayanımı/matrixin dayanımı" oranları zamanla daha küçük mertebelerde azalmaktadır. Ancak bu oran ısıtma işlem sıcaklığının artması sonucu 80°C de sabit kalmaktadır. Ayrıca ısıtma işlemleri, matrix dayanımını lif-matrix aderans dayanımına göre 1. günde daha hızlı artırması sonucu, 20°C normal kuru şartlarına göre "Kompozitin dayanımı/matrixin dayanımı" oranını düşürmektedir. Benzer durum 28 günlük numunelerde de görülmesine karşın 90 günlük numunelerde "Kompozitin dayanımı/matrixin dayanımı" oranları, hem 20°C de hemde ısıtma işlemlerinde aynı mertebede kalmaktadır. Sonuç olarak 20°C ve ısıtma işlem görmüş numunelerde liflerin dayanımı artırıcı etkisinin zamanla azalması matrix dayanımı gelişme hızının lif-matrix aderans dayanımı gelişme hızına göre daha fazla olmasına bağlanabilir.

4.2.3. Basınç Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Üretilen betonların 1., 28. ve 90 günlük basınç dayanımlarının ısıtma işlem uygulamasına göre değişimleri 20°C-şahit 28 günlük dayanımın yüzdesi cinsinden, Şekil 4.15., Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 de; lif yüzdelere göre değişimleri ise Şekil 4.18., Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 de gösterilmektedir. Bu şekillerin incelenmesinden aşağıdaki sonuçlar elde edilebilir.

1) Şekil 4.15 da görülebileceği üzere, ısıtma işlem uygulaması şahit ve lifli betonların 1 günlük basınç dayanımlarını 20°C lik normal kür şartlarına göre artırmaktadır. Bu artış, eğilme dayanımında olduğu gibi, sıcaklığa bağlı olarak artmakta ve 80°C de maksimum dayanımına ulaşılmaktadır. Örneğin; tablo 3.3 deki sonuçlara göre şahit numunelerin 1 günlük basınç dayanımları 20°C lik normal kür şartlarında %29.7 değerinde iken, 50°C; 65°C ve 80°C sıcaklıklarda sırasıyla %49.8, %54.3 ve %64.2 değerlerini almaktadır. Aynı şekilde lifli betonlardada benzer bir artış görülmektedir. Örneğin; lif yüzdesi 1.0 olan numunenin 1 günlük basınç dayanımları 20°C de %42.7 değerinde iken 50°C, 65°C ve 80°C sıcaklıklarda sırasıyla %53.5, %55.1 ve %63.5 değerlerine yükselmektedir. Bu değerlere bakıldığında, lifli betonların 1 günlük basınç dayanımlarına ısıtma işlemlerin olumlu etkisinin olduğu görülmektedir.

Öte yandan, ısıtma işlem uygulamasının 1 günlük numunelerin eğilme ve basınç dayanımları üzerine artırıcı etkisi benzer şekilde gelişmektedir. Örneğin; 80°C'lik sert çevrim uygulaması, şahit numunenin 20°C'lik normal kür şartlarındaki 1 günlük basınç dayanımları %116 oranında artırırken, 1 günlük eğilme dayanımlarını da %100 oranında artırmıştır. Aynı şartlarda lif yüzdesi 1.0 olan numunenin 1 günlük basınç dayanımlarındaki artış oranı %49 değerinde iken, 1 günlük eğilme dayanımlarında %42 oranında artış sağlanmıştır.

Yukarıda verilen artış oranlarına göre belirtilmesi gereken önemli bir husus , ısıtma işlem sıcaklığı 80°C olan numunelerin 1 günlük basınç dayanımları üzerine eğilme dayanımına oranla daha fazla etkinlik sağlamak ve dolayısıyla 1.gün sonunda 20°C ye oranla elde edilen dayanım artışları, eğilme dayanımına göre daha fazla olmaktadır. Yani 80°C'lik ısıtma işlemin basınç dayanımında daha etkin olduğu görülmektedir.

Bunun sebebi aşağıdaki şekilde açıklanabilir. Isıtma işlem sıcaklığının artması çimento bileşenlerinin çözünmesini ve dolayısıyla hidratasyon olayının gelişmesini hızlandırmaktadır. Sıcaklığın hidratasyon üzerindeki bu etkinliği, betonun daha kısa sürede sertleşerek yüksek dayanıma erişmesine neden olmaktadır [7], [36].

Ancak, kısa sürede sertleşen betonun bünyesinde ısıtma işlem sıcaklığının etkisiyle aşırı genleşme, ısıtma gerilmeler ve su kaybı sonucu oluşan kaçınılmaz fiziksel kusurlar meydana gelmektedir. Isıtma işlemlerin betonda oluşturduğu kusurlar bölüm 1.1.5.5. de Öztekin [7]'nin çalışmasına dayanarak ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Bunlardan bilhassa yüksek sıcaklıklarda sertleşen betonun bünyesinde oluşan mikro çatlakların artması dayanımı büyük ölçüde etkilemektedir. Betonda oluşan mikro çatlak miktarının artması ise 1. günde basınç dayanımından çok eğilme dayanımını etkilemekte olduğu belirtilmektedir [59]. Dolayısıyla 80°C lik sert çevrim uygulamasında eğilme dayanımındaki artış oranının basınç dayanımına göre daha az olması, yukarıda açıklanan mikro çatlak oluşumunun erken yaşlarda eğilme dayanımında daha etkili olmasına bağlanabilir.

Bu sonucun genelde lifsiz betonlar için bugüne kadar yapılan çalışmaların bir bölümüne uygun olduğu görülmektedir. Yani Nurse [60], Hanson [61] ve Saeman [62] gibi araştırmacılar, ısıtma işlem uygulamasının, eğilme dayanımı gelişimine basınç dayanımına oranla daha az katkıda bulunduğunu belirtmektedirler. Diğer taraftan bu bulgu bazı araştırmacıların yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri sonuçlara ters düşmektedir [10], [47].

2) Şahit ve lifli beton numunelerin 1 günlük basınç dayanımlarında görülen artış hızı, eğilme dayanımına benzer şekilde, genel olarak 50°C den itibaren azalmaktadır (Şekil 4.15). Artış hızındaki bu azalmanın nedeni, bir önceki maddede belirtildiği gibi, fiziksel kusurlara bağlanabilir.

3) Isıtma işlem uygulamasının, 1 günlük numunelerde dayanımı artırıcı etkisi lif hacim oranı artıktıkça azalmakta olduğu Şekil 4.15'da görülmektedir. Benzer şekilde eğilme dayanımında da görülen bu durum özellikle lif yüzdesi 1.0 olan numunelerde daha belirgin olmaktadır. Örneğin; 80°C lik sert çevrim uygulaması, şahit numunenin 20°C lik normal kür şartlarındaki basınç dayanımını %29.7 den %64.2 değerine yükselterek, dayanımın %116 oranında artmasını sağlamıştır. Aynı şartlarda lif yüzdesi 1.0 olan numunenin dayanımı %42.7 den %63.5 değerine yükselmesiyle de %49 oranında dayanım artışı olmuştur. Bu sonuç, eğilme

dayanımında olduğu gibi, 1 günlük numunelerin basınç dayanımında da ısıt işlemlerin lifli beton numunelerde daha az etkin olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni, betona katılan liflerin hacim oranlarının artması sonucu iç yapıda artan kusurların ısıt işlemde kendini daha belirgin olarak göstermelerine bağlanabilir. Nitekim bu durum ultrases hızı ölçümlerinde daha açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.21). Yani, 1 günlük numuneler üzerinde ölçülen ultrases hızları, şahit numunelerde ısıt işlem sıcaklığına bağlı olarak artış gösterirken, lifli betonlarda artış oranı azalmaktadır. Özellikle lif yüzdesi 1.0 olan numunenin ultrases hızı, ısıt işlem sıcaklığı yükseldikçe, belirgin bir şekilde azalarak 80°C de şahit numunenin altına düşmektedir. Bu da lif yüzdesi 1.0 olan numunenin ısıt işleminden olumsuz etkilenecek daha boşluklu bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Böylece boşluklu bir yapının dayanımın azalmasında önemli rol oynadığı söylenebilir.

4) Isıt işlem görmüş 1 günlük numunelerin dayanımları hem basınçta hemde eğilmede artmaktadır (Şekil 4.9 ve Şekil 4.15). Ancak burada belirtilmesi gereken husus lif yüzdesi 1.0 olan numune ile şahit numunenin dayanımlarının ısıt işlem sıcaklığına göre artış eğimlerinin basınçta ve eğilmede farklı olmasıdır. Yani, basınç dayanımında lif yüzdesi 1.0 olan numune ile şahit numunenin dayanım değerleri arasındaki fark ısıt işlem sıcaklığı arttıkça daha hızlı azalmakta ve 80°C ise aynı noktada çakışmaktadır (Şekil 4.15). Buna karşılık eğilme dayanımında ise lif yüzdesi 1.0 olan numuneyle şahit numunenin dayanım değerleri hemen hemen birbirine paralel olarak artmakta ve 80°C de lif yüzdesi 1.0 olan betonlarda en yüksek dayanım sağlanmaktadır (Şekil 4.9). Yani, eğilmede hem şahit numunede hemde lifli betonlarda ısıt işlemin 1 günlük dayanımı artırıcı etkisi birbirine yakın mertebede olmaktadır.

Özetle, ısıt işlemlerin, 1 günlük numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarını etkileme şekilleri birbirinden farklı olduğu söylenebilir. Bu da, eğilme dayanımı sonuçlarının değerlendirilmesinde açıklandığı gibi, lifli betonlarda matrix fazında artan kusurlu yapı, ısıt işlem sıcaklığı yükseldikçe daha belirginleşmekte ve budurum basınç dayanımında kendini daha fazla göstermektedir. Dolayısıyla, basınçta ısıt işlemin dayanımında artırıcı etkisi, bilhassa, lif yüzdesi 1.0 olan numunelerde, daha az olmaktadır.

5) Isıl işlem görmüş ve 20°C de saklanan 1 günlük numunelerin lif miktarına göre değişimi (Şekil 4.18) de görülmektedir. Bu şeklin incelenmesinden görüleceği üzere, Isıl işlem görmüş ve 20°C de saklanan numunelerin 1 günlük dayanımları, lif hacim oranı arttıkça, şahit numunenin dayanımına göre artmaktadır. Bu artış 20°C de normal kür şartlarında ve 50°C lik yumuşak çevrim uygulamasında sürekli olmaktadır. 65°C lik ılımlı çevrim ile 80°C lik sert çevrim uygulanmış numunelerde ise dayanımlar lif yüzdesi 0.25 den itibaren azalmaya başlamakta ve özellikle 80°C lik sert çevrimde lif yüzdesi 0.8 den sonra azalma dahada belirginleşmektedir.

Isıl işlem görmüş numunelerde (65°C ve 80°C) lif yüzdesinin basınç dayanımlarını artırıcı etkisinin azalmasının nedeni, daha önce belirtildiği gibi ısıl işlemin iç yapıda oluşan kusurları artırmasına bağlanabilir. Yani lif yüzdesi artışından kaynaklanan boşluklu yapı ısıl işlem sıcaklığı yükseldikçe daha belirginleşmektedir. Bu da dayanım artışının yüksek ısıl işlem sıcaklıklarında lif miktarı arttıkça azalmasına neden olmaktadır.

6) Betona katılan lif yüzdesi artışı 1 günlük numunelerin eğilme dayanımlarını artırdığı gibi basınç dayanımlarını da artırmaktadır (Şekil 4.18). Ancak basınç dayanımı üzerine lif yüzdesinin artırıcı etkisi eğilme dayanımına göre daha az olmaktadır. Bu sonuç, liflerin varlığının esas olarak eğilmede çekme gerilmelerini alacak şekilde fonksiyon görmüş olmasına bağlanabilir. Örneğin; lifli beton numunelerin basınç dayanımında betona katılan lif yüzdesi 0.25 den 1.0 a kadar yükselmesiyle şahit numunenin dayanımına göre 20°C de sırasıyla %6, %15, %17 ve %44 oranlarında sürekli bir artış sağlanmaktadır. Aynı şekilde 50°C lik yumuşak çevrimlerde ise sırasıyla %2, %11. %11.4 ve %7.4 oranlarında artışlar elde edilmektedir 65°C ılımlı çevrimlerde ise lif yüzdesi artışı dayanım artış oranlarını %12 den %1.4 e ve 80°C lik sert çevrimde ise %17 den %1 e kadar azalmaktadır. Buna karşılık 1 günlük numunelerin eğilme dayanımlarında lif yüzdesinin dayanımı artırıcı etkisi 20°C de %8 ile %70, 50°C %8 ile %32, 65°C de %3 ile %21 ve 80°C de %6 ile %21 arasında.

Yine, yukarıdaki sonuçlara bakıldığında görüleceği üzere, eğilme dayanımında olduğu gibi, 1 günlük numunelerin basınç dayanımları üzerine lif yüzdesinin etkisi

en fazla 20°C de saklanan numunelerde sağlanmaktadır. Bunun nedeni, eğilme dayanımı sonuçlarının değerlendirilmesinde yapılan açıklamaların basıncda da geçerli olmasına bağlanabilir.

Özetle, 1. günde hem 20°C de hem de ısıtıl işlem görmüş numunelerde liflerin basınç dayanımını artırıcı etkisi eğilme dayanımına göre daha az olmaktadır. Örneğin; liflerin etkisi özellikle 20°C de 1 günlük eğilme dayanımını %70 dolayında artırırken basınç dayanımını %44 oranında artırmaktadır. Literatür sonuçları da betona lif katılmasıyla basınç dayanımının eğilme dayanımına göre 20°C lik normal kür şartlarında daha az arttığını göstermektedir [2], [6], [17], [18].

Buraya kadar yapılan incelemelere dayanarak çıkarılan ortak sonuç, ısıtıl işlem görmüş 1 günlük numunelerde, lif yüzdesi arttıkça ve ısıtıl işlemin sertlik derecesi yükseldikçe dayanımlarda azalma görülmektedir.

28 ve 90 günlük şahit ve lifli betonlarda basınç dayanımının ısıtıl işlem çevrimlerine göre değişimleri Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1) Şahit numunelerde, ısıtıl işlem sıcaklığı arttıkça 28 ve 90 günlük basınç dayanımları genel olarak sabit kalmaktadır. Yani, ısıtıl işlem in 1 günlük şahit numunelerin basınç dayanımlarını artırıcı etkisi 28 ve 90. günlerde olmamaktadır. Bunun nedeni de numunelerin havada saklanmalarına bağlanabilir. Nitekim, daha önce de belirtildiği gibi Uyan[36]'ın yaptığı çalışmada bu yönde bulgular elde edilmiştir.

Isıtıl işlem uygulamasının en büyük dezavantajı, betonun ileriki yaşlardaki dayanımlarını, ısıtıl işlem uygulanmamış betonların dayanımına göre düşürüyor olmasıdır [7],[36],[41].

2) Lifli betonlarda ise, ısıtıl işlem sıcaklığı arttıkça 28 ve 90. günlerdeki basınç dayanımları 20°C deki dayanımlara oranla azalmaktadır. Bu azalma lif yüzdesi artışına bağlı olarak daha da belirginleşmektedir.

Bu sonuçlara göre şahit numunelerin tersine olarak ısıtıl işlem görmüş lifli betonlarda dayanımın azalmasının nedeni aşağıdaki şekilde açıklanabilir. Betona lif katılması halinde lif miktarına bağlı olarak betonun boşluk yapısı değişmekte ve daha boşluklu bir yapı oluşmaktadır [2]. Bu yapıda artan kusurlar ısıtıl işlemin olumsuz etkisiyle ileriki yaşlarda kendini göstermektedir. Bu da ileriki yaşlardaki dayanımın azalmasına sebep olmaktadır.

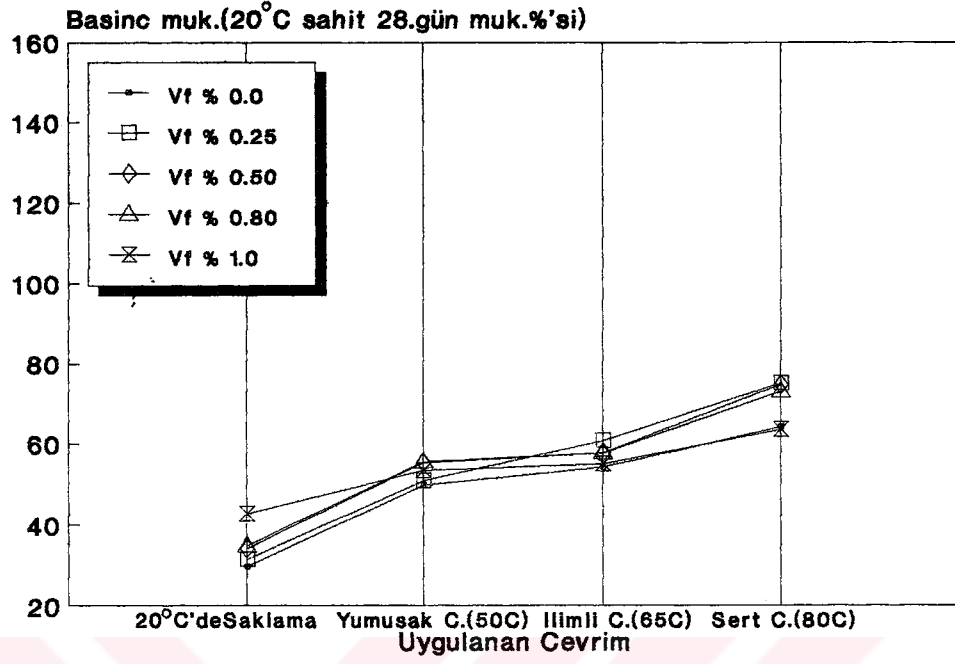
Lif miktarının artması halinde, betonun boşluk oranının 20°C de ve ısıtıl işlem uygulamasında ne şekilde değiştiğini araştırmak amacıyla 28 günlük numuneler üzerinde kılcallık ve su emme deneyleri yapılmıştır. Buradan görünen porozite (boşluk oranı) değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerlere göre ısıtıl işlem görmüş numunelerde boşluk oranı, lif miktarı artışına bağlı olarak artmaktadır (Şekil 4.30). Aynı zamanda boşluk oranı ısıtıl işlem sıcaklığı yükseldikçe artmaktadır. Boşluk oranının artması betonun dayanımını azaltmaktadır. Bu sonuç, yapılan çalışmada ısıtıl işlem görmüş numunelerde dayanımların ileriki yaşlarda azalmasını göstermektedir.

Isıtıl işlem uygulanmış ve uygulanmamış betonların 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının lif miktarına göre değişimleri şekil 4.19 ve şekil 4.20 de incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

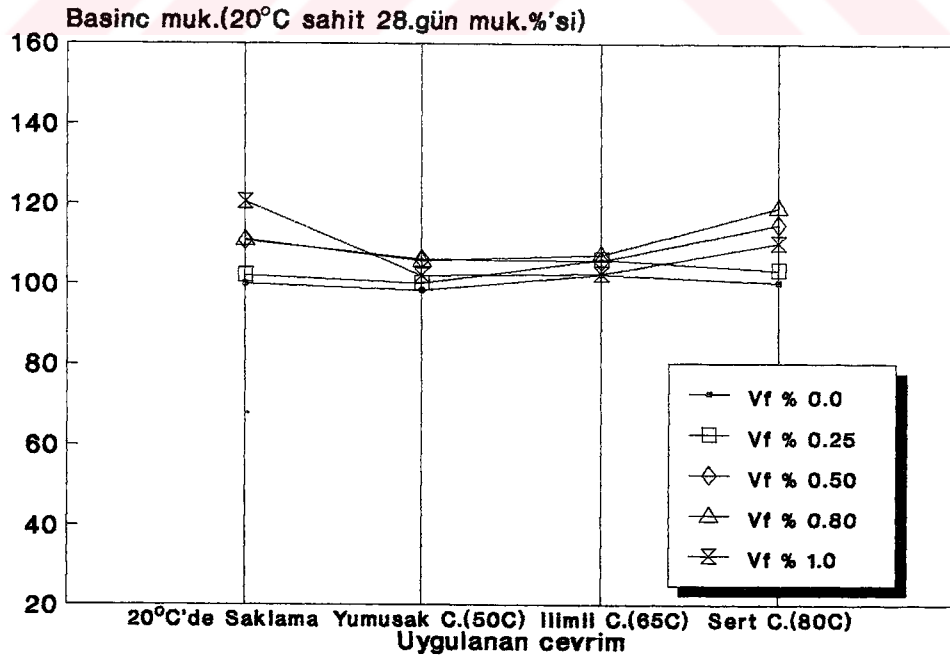
1) 20°C'lik normal kür şartlarında 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımları lif miktarı artışına bağlı olarak sürekli artmaktadır. Örneğin; lif yüzdesi 0.5 ve 1.0 olan numunelerin basınç dayanımları, şahit numunenin dayanımına göre 28. günde sırasıyla, %11,%21 oranlarında, 90. günde ise sırasıyla %11 ve %20 oranlarında artmaktadır. Bu sonuçlara göre 28 ve 90 günlük lifli betonlarda dayanım artışı, lif yüzdesi 1.0 için, %20 oranında aynı mertebede olmaktadır.

Lifli betonların mekanik özelliklerini araştıran Balaguru ve Shah yaptıkları çalışmada [63], çelik liflerin kullanılmasıyla basınç dayanımındaki artışın 20°C lik normal kür şartlarında %25 mertebesinde olduğunu belirtmektedir.

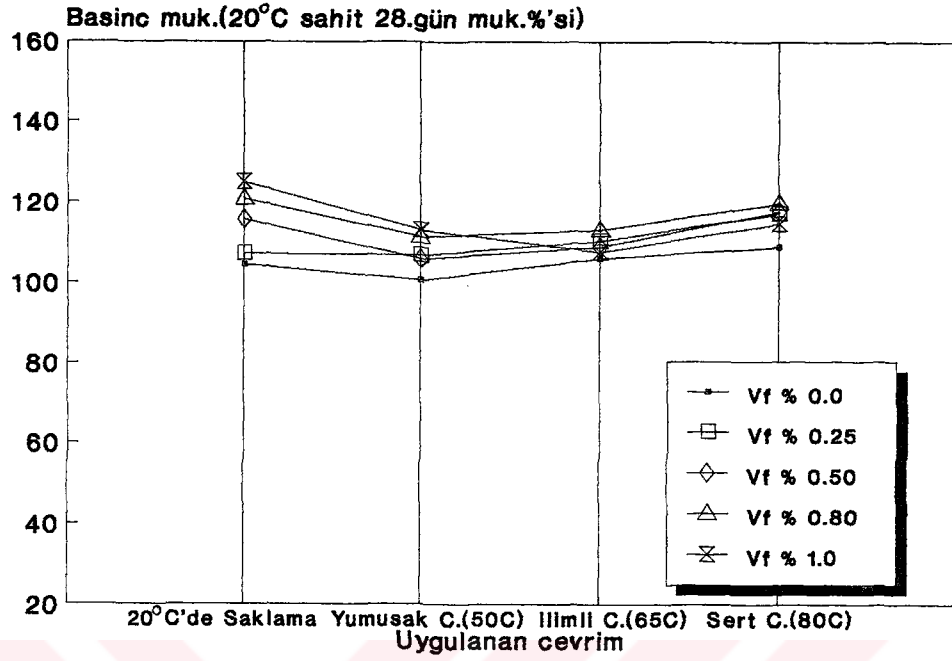
Yapılan çalışmada 20°C de 28 günlük numunelerde liflerin dayanıma etkisi %20 mertebesinde olup literatür sonuçlarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir.



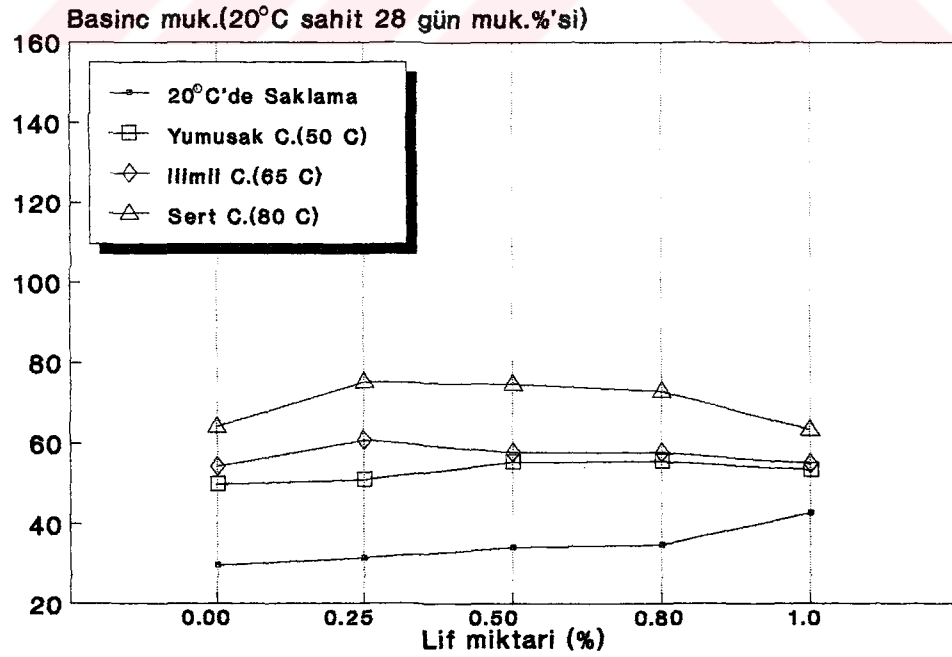
Şekil 4.15 1 Günlük Numunelerin Basınc Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi



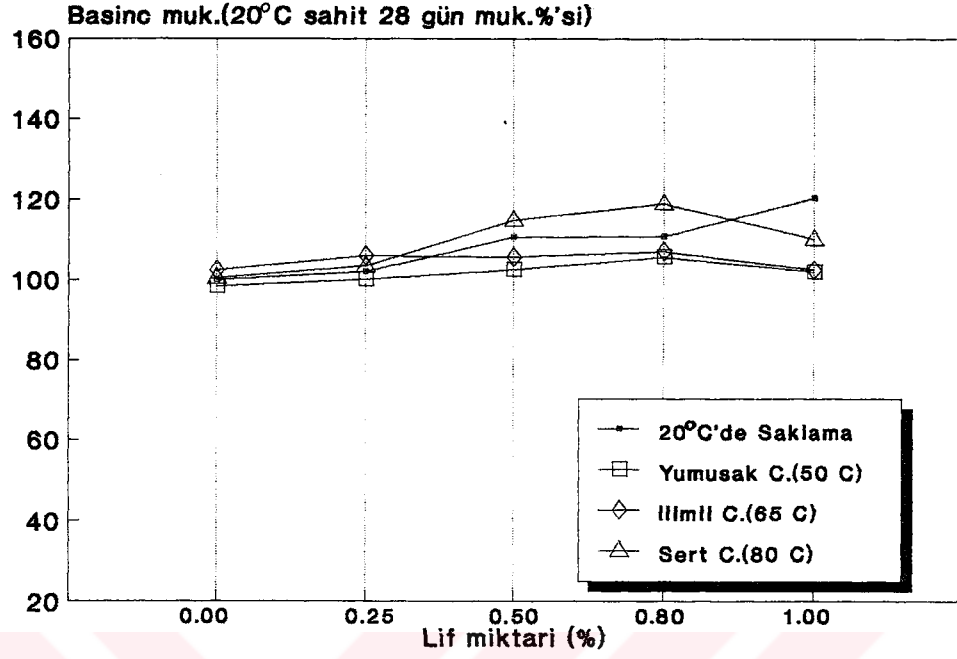
Şekil 4.16 28 Günlük Numunelerin Basınc Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi



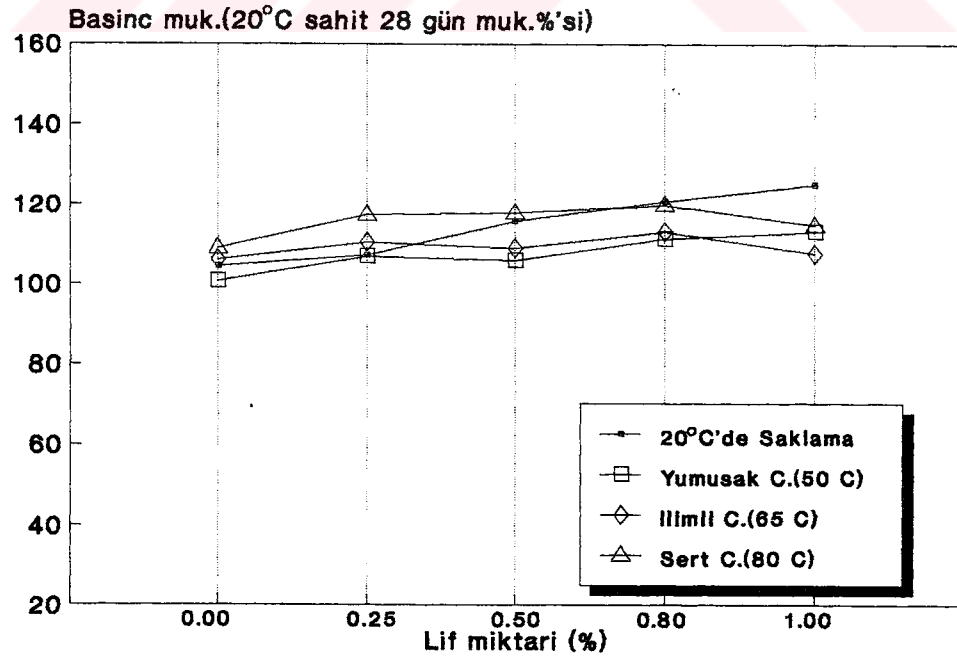
Şekil 4.17 90 Günlük Numunelerin Basınc Mukavemetlerinin Uygulanan Çevrim İle Değişimi



Şekil 4.18 1 Günlük Numunelerin Basınc Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi



Şekil 4.19 28 Günlük Numunelerin Basınc Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi



Şekil 4.20 90 Günlük Numunelerin Basınc Mukavemetlerinin Lif Miktarına Göre Değişimi

Ayrıca betonun basınç dayanımı üzerine liflerin etkisini araştıran Gököz [34] ve Williamson [20]'in sonuçlarıylada uyushmaktadır.

2) Isıl işlem görmüş numunelerde ise 28 ve 90. günlerde basınç dayanımları lif yüzdesi 0.8'e kadar artmaktadır. Ancak lif yüzdesi 0.8 den sonra dayanımda belirgin bir azalma görölmektedir. Bu azalmanın nedeni, daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi, lif miktarı artışına bağlı olarak artan kusurların ısıt işlem sıcaklığı arttıkça daha fazla olmasına bağlanabilir.

3) Liflerin dayanımı artırıcı etkisi, 1. günde olduğu gibi, ileriki yaşlarda da hem 20°C de hemde ısıt işlem görmüş numunelerde devam etmektedir. Ancak bu etki ısıt işlemlerde 20°C lik normal kür şartlarına göre daha az olmaktadır. Bu da ısıt işlemin ileriki yaşlardaki dayanımlar üzerine olumlu etkisinin olmadığını göstermektedir.

4) Liflerin basınç dayanımı üzerine artırıcı etkisinin 1., 28 ve 90. günlerde nasıl değiştiğini belirlemek için eğilme dayanımında yapılan hesaplara benzer şekilde basınç dayanımında da "Kompozitin dayanımı/matrixin dayanımı" oranları hesaplanarak Tablo 4.6 da verilmektedir. Burada eğilme dayanımında olduğu gibi, kompozitin dayanımı olarak lif yüzdesi 1.0 olan numunenin dayanımı esas olarak alınmıştır. Buna göre liflerin basınç dayanımını artırıcı etkisi değerlendirilmektedir.

Tablo 4.6 (σ_{cu}/σ_m) Oranlarının Isıl İşlem ve Zamana Göre Değişimleri. (Basınç)

Sıcaklık Yaş	20°C	50°C	65°C	80°C
1. GÜN	1.44	1.07	1.01	0.98
28. GÜN	1.21	1.04	1.0	1.1
90. GÜN	1.20	1.12	1.02	1.05

Yukarıda tabloda verilen sonuçlara göre liflerin dayanımı artırıcı etkisi en fazla 20°C normal kür şartlarında olmaktadır. Bu etki betonun yaşı ilerledikçe azalmaktadır. Örneğin; 20°C 1 günlük numunelerin "Kompozitin dayanımı/matrixin dayanımı" oranı 1.44 iken 28. günde bu oran 1.21'e ve 90. günde ise 1.20'ye düşmektedir. Buna karşılık ısıt işlemlerde liflerin etkisi, eğilmede olduğu gibi, ileriki yaşlarda ilk güne oranla fazla değişmemektedir.

Öte yandan liflerin dayanımı artırıcı etkisi, 1 günlük numunelerde olduğu, gibi 28 ve 90 günlerde de eğilme dayanımına göre basınç dayanımında daha az olmaktadır. Bu sonuç hem 20°C de hemde ısıt işlem uygulanmış numuneler için geçerlidir. Bunun nedeni matrix fazının etkisinin basınçta daha etkili olmasına bağlanabilir. Normal kür şartlarında betonun dayanımına lif miktarının etkisi üzerine yapılan çalışmalarda basınç dayanımındaki artışın eğilme dayanımındaki kadar büyük olmadığı belirtilmektedir [16], [17]. Buraya kadar çıkarılan sonuçlardan, ısıt işlem uygulamasının lifli betonların basınç dayanımına yaptığı etki ile eğilme dayanımına yaptığı etki karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1) Isıt işlem uygulaması, Şahit ve lif yüzdesi 1.0 olan numunelerin 1 günlük basınç dayanımları üzerine daha fazla etkili olmaktadır.

2) Liflerin dayanımı artıcı etkisi, 20°C de ve ısıt işlem uygulanmış numunelerde, eğilme dayanımı üzerine daha fazla olmaktadır.

3) Eğilme ve basınç dayanımları üzerine lif miktarının dayanımı artırıcı etkisi en çok 20°C de saklanan numunelerde sağlanmaktadır.

4) 20°C de liflerin dayanımı artıcı etkisi eğilme dayanımında betonun yaşı ilerledikçe azalmasına rağmen basınç dayanımında 28. günden sonra sabit kalmıştır.

5) Isıt işlem uygulanmış numunelerde liflerin etkisi 1. günde basınçta ve eğilmede azalırken ileriki yaşlarda basınçta azalmakta eğilmede ise sabit kalmaktadır.

6) Isıt işlem uygulanan 1 günlük numunelerde en yüksek dayanımlar, genel olarak lif yüzdesi 0.5 ve 0.8 olan numunelerde elde edilmiştir.

7) 28 ve 90 günlük numunelerde, 20°C de lif yüzdesi 1.0 olan betonlar, ısıt işlem uygulanan numunelerde ise lif yüzdesi 0.8 olan betonlarda basınç dayanımı maksimum olmaktadır. Eğilme dayanımında ise lif yüzdesi 1.0 olan numunelerde maksimum dayanımlar elde edilmiştir.

4.2.4. Özet Tablo

Çalışmada ısıtma işlem uygulamasının lifli betonların basınç ve eğilme mukavemetleri üzerine etkisi, 20°C de saklanmış 28 günlük şahit betonun dayanımına göre belirlenerek Tablo 4.7'de gösterilmiştir. Burada şahit numuneye göre yüksek değerler (+) işareti ile ,düşük değerler (-) işaretiyle gösterilmiştir. Eğer numunenin dayanımı şahit numunenin dayanımıyla aynı ise bu durumda (o) işareti ile ifade edilmiştir. Bu tablonun hazırlanmasıyla, lif miktarı artışının ısıtma işlem uygulanan numunelerdeki etkisi basit bir şekilde açıklanılmaya çalışılabilir.

Tablo 4.7 Lif Miktarının Sıcaklığa Bağlı Olarak Basınç ve Eğilme dayanımlarına Etkisinin Özeti. (*)

Lif Yüzdesi	Uygulanan Kür	Basınç Mukavemeti			Eğilme Mukavemeti		
		1. G.	28. G.	90. G.	1. G.	28. G.	90. G.
0.0	20°C Saklama	(-)	Şahit	(+)	(-)	Şahit	(+)
	Yumuşak Çevrim	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Ilımlı Çevrim	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Sert Çevrim	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
0.25	20°C Saklama	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Yumuşak Çevrim	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Ilımlı Çevrim	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Sert Çevrim	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
0.50	20°C Saklama	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Yumuşak Çevrim	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Ilımlı Çevrim	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Sert Çevrim	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
0.80	20°C Saklama	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Yumuşak Çevrim	(-)	(+)	(+)	0	(+)	(+)
	Ilımlı Çevrim	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Sert Çevrim	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
1.0	20°C Saklama	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Yumuşak Çevrim	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)
	Ilımlı Çevrim	(-)	(+)	(+)	0	(+)	(+)
	Sert Çevrim	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)

(*) Bu tabloda, Şahit değerlere göre yüksek değerler (+), düşük değerler (-), şahit ile aynı değerler 0 ile gösterilmiştir.

4.2.5. Ultrases Hızı Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Bu bölümde; lifli betonlarda ultrases hızına ısıtma işlem uygulamasının ne şekilde etkilediği incelenmiştir. Genel olarak normal betonun basınç dayanımı ile ultrases hızı arasında bir ilişkinin olduğu bilinmektedir [60]. Ultrases hızı betonun boşluk yapısıyla ilgilidir. Betonda boşluk miktarı arttıkça ultrases geçiş süresi (T') artmakta, dolayısıyla betonun basınç dayanımı azalmaktadır. Lifli betonların boşluk yapısını değerlendirebilmek amacıyla ultrases hızının ısıtma işlem çevrimi ve lif miktarına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.21 ile Şekil 4.26 arasında gösterilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde göze çarpan hususlar aşağıda verilmektedir.

1) 1 günlük şahit ve lifli beton numunelerin ultrases hızına ısıtma işlem sıcaklığının etkisi Şekil 4.21 de görüleceği üzere, basınç dayanımındaki artışa benzer olarak, ısıtma işlem sıcaklığı arttıkça 1 günlük ultrases hızlarında artmaktadır. Bu artış ısıtma işlem sıcaklığı 50°C den itibaren azalmaya başlamaktadır. Burada belirtilmesi gereken husus, lif yüzdesi 1.0 olan numunenin ultrases hızında görülen azalma, basınç dayanımındaki azalmaya göre ısıtma işlem sıcaklığı arttıkça daha belirgin olmakta ve 80°C sert çevrimde şahit numunenin altına düşmektedir. Halbuki basınç dayanımında lif yüzdesi 1.0 olan numunenin değeri ile şahit numunenin değeri 80°C lik sıcaklıkta hemen hemen çakışmaktadır (Şekil 4.15). Dolayısıyla betona katılan lif miktarının artması, özellikle lif yüzdesi 1.0 olan betonlarda, boşluk yapısını belirgin bir şekilde etkilemektedir. Böylece lif miktarının artması sonucu iç yapıda artan kusurlar ısıtma işlem sıcaklığının etkisiyle daha fazla artmakta ve bu da, basınç dayanımında olduğu gibi, ultrases hızının azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum ultrases hızı ile basınç dayanımı arasında birebir bir ilişkinin olabileceğini göstermektedir. Buradan da ultrases hızı ölçümlerinin betonun dayanımı hakkında daha anlamlı sonuçlar verebileceği anlaşılmaktadır.

2) 1 günlük numunelerin ultrases hızlarının lif miktarına bağlı olarak değişimi Şekil 4.24 da görüldüğü üzere, 20°C de saklanan numunelerde artış yönünde olurken, ısıtma işlemlerde lif miktarı arttıkça ultrases hızları azalmaktadır. Azalma olmasına rağmen ultrases hızı değerleri 20°C ye göre daha yüksektir. 20°C'de saklanan numunelerde lif miktarının artması 1 günlük numunelerde basınç dayanımlarının artışına paralel olarak ultrases hızlarında artmaktadır. Bu durum basınç dayanımında olduğu gibi lifli betonlarda matrix fazının yapısına bağlıdır.

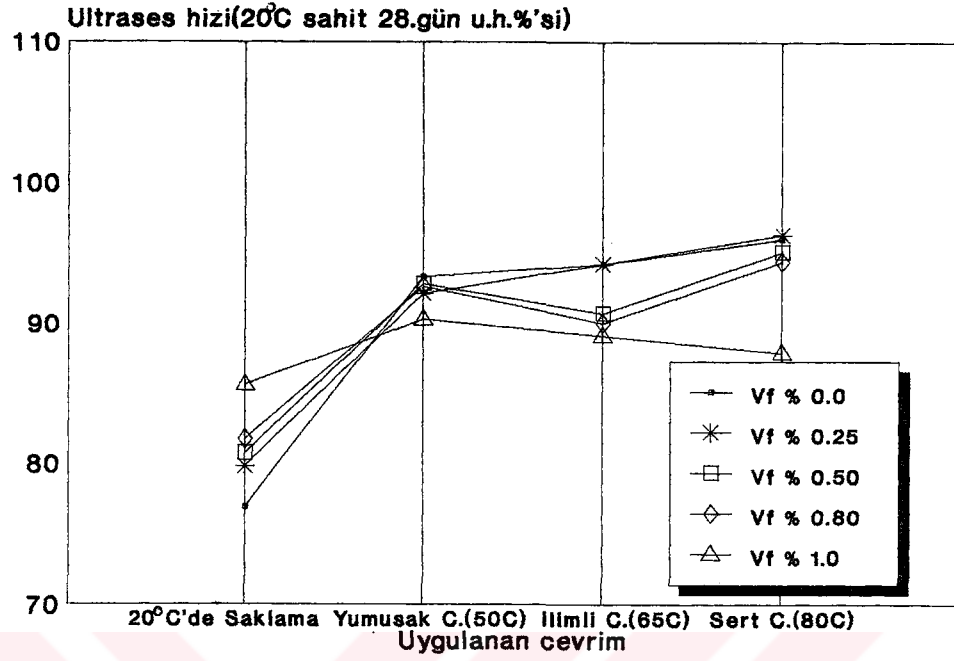
3) 1 günlük numunelerin ultrases hızlarının lif miktarına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.24'de görülmektedir. Bu şekile göre, 20°C de saklanan numunelerin ultrases hızları lifmiktarı artışına bağlı olarak %11 mertebesinde bir artış gösterirken, ısıtıl işlem uygulanmış numunelerde lif miktarı arttıkça ultrases hızları sırasıyla 50°C de %3, 65°C de %6 ve 80°C %10 oranında azalmaktadır (Lif yüzdesi 1.0 olan numun ile şahit numunenin değerlerine göre bulunan sonuç). 1 günlük numunelerin basınç dayanımlarında benzer davranışın görülmesi ultrases hızıyla .basınç dayanımı arasında bir ilişkinin olabileceğini göstermektedir. Bu ilişkiye göre lif miktarı arttıkça ısıtıl işlem görmüş 1 günlük numunelerde basınç dayanımına paralel olarak ultraseshızının azalmasının nedenide daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi iç yapıda artan kusurların ısıtıl işlemde daha fazla görülmesine bağlanabilir.

Sonuç olarak, ısıtıl işlem uygulaması, 1 günlük lifli betonlarda olumsuz etki yaparak kusurların etkisini ortaya çıkarmaktadır. Bu durumda, eğilme ve basınç dayanımı gelişiminde olduğu gibi, ultraseshızında da bu kusurlar kendini göstermektedir.

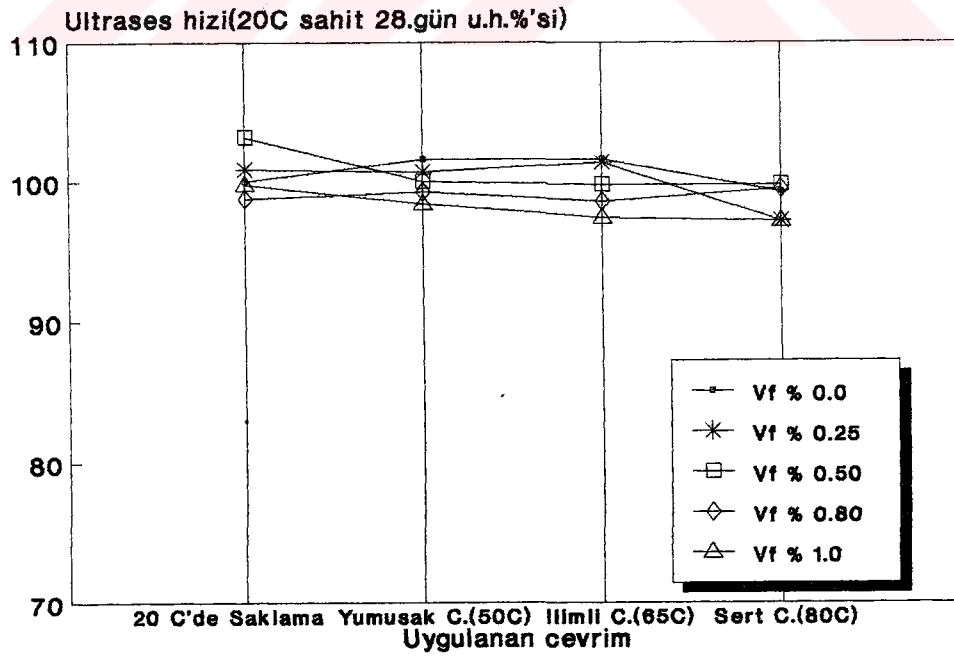
Şahit ve lifli beton numunelerin 28. ve 90. günlerdeki ultrases hızlarını ısıtıl işlem sıcaklığına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 da verilmektedir. Bu şekillerin incelenmesinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1) Şahit numunelerin 28 ve 90 günlük ultrases hızları ısıtıl işlem sıcaklığı arttıkça, basınç dayanımında olduğu gibi, 20°C de sabit kalmaktadır. Bu da ısıtıl işlem sıcaklığının ultrases hızını etkileme şeklini basınç dayanımını etkileme şekline benzediğini göstermektedir. Yani işlem sıcaklığı yüksek ısıtıl işlemler uygulamak betonun ilk yaşlardaki ultrases hızını artırmakla beraber ileriki yaşlarda 20°C ye göre pek değişmemiştir. Bu sonuç betonun basınç dayanımı ile paralellik gösterdiğinden, üretilen şahit betonların ultrases hızı ile basınç dayanımları arasında bir ilişkinin olduğu söylenebilir.

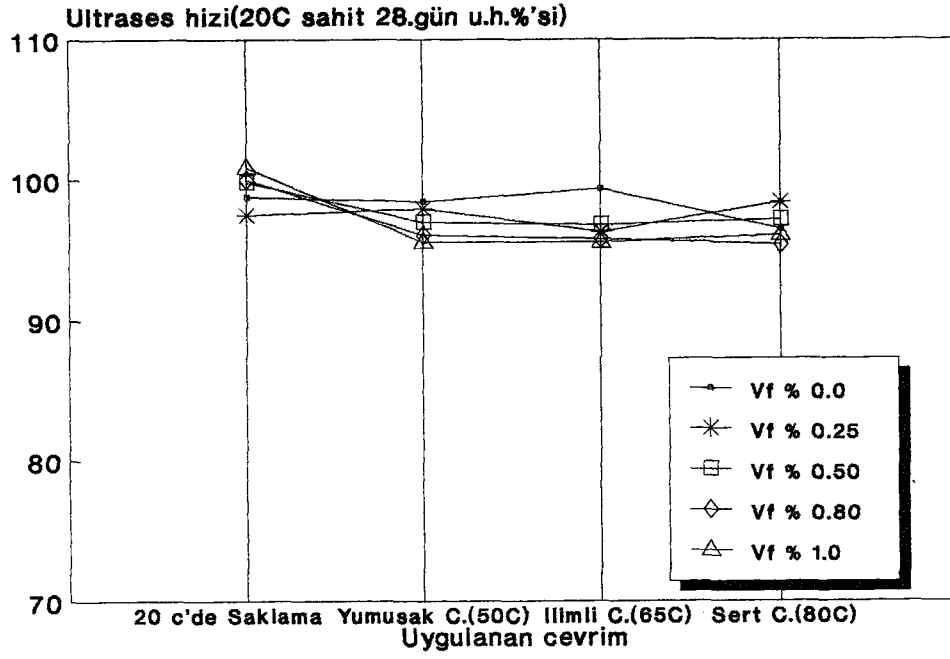
2) Lifli betonlarda ise ısıtıl işlem sıcaklığı yükseldikçe 28 ve 90. günlerdeki ultrases hızları basınç dayanımlarında olduğu gibi, 20°C ye oranla azalmaktadır. Bunun nedeni daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi, lif miktarı artışı betonun boşluk yapısını değiştirmekte ve bu da ileriki yaşlarda ısıtıl işlem görmüş numunelerde daha fazla olumsuz etki yapmaktadır. Lif yüzdesi 0.25 den 1.0 a kadar değişen betonların ultrases hızlarının ısıtıl işlem sıcaklığı arttıkça azalması şekil 4.29 da görüldüğü gibi boşluk oranlarının



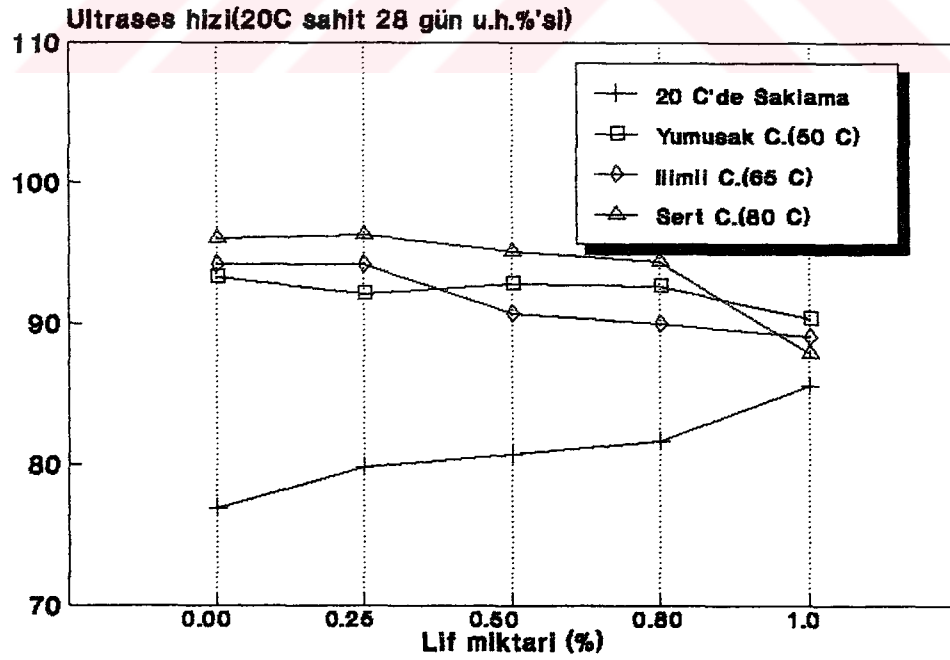
Şekil 4.21 1 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Uygulanan Çevrim İle Değişimi



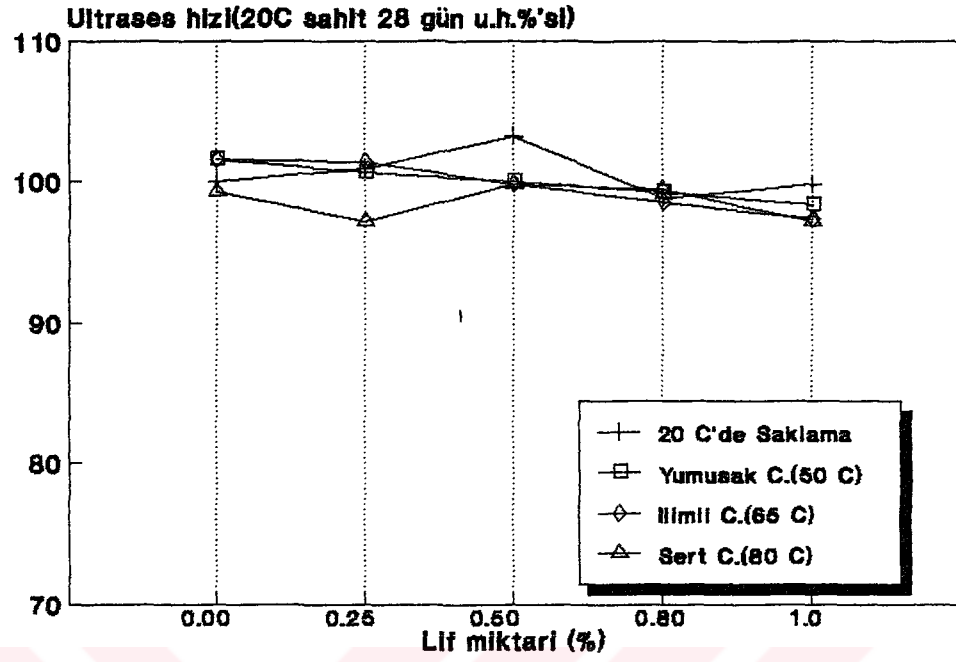
Şekil 4.22 28 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Uygulanan Çevrim İle Değişimi



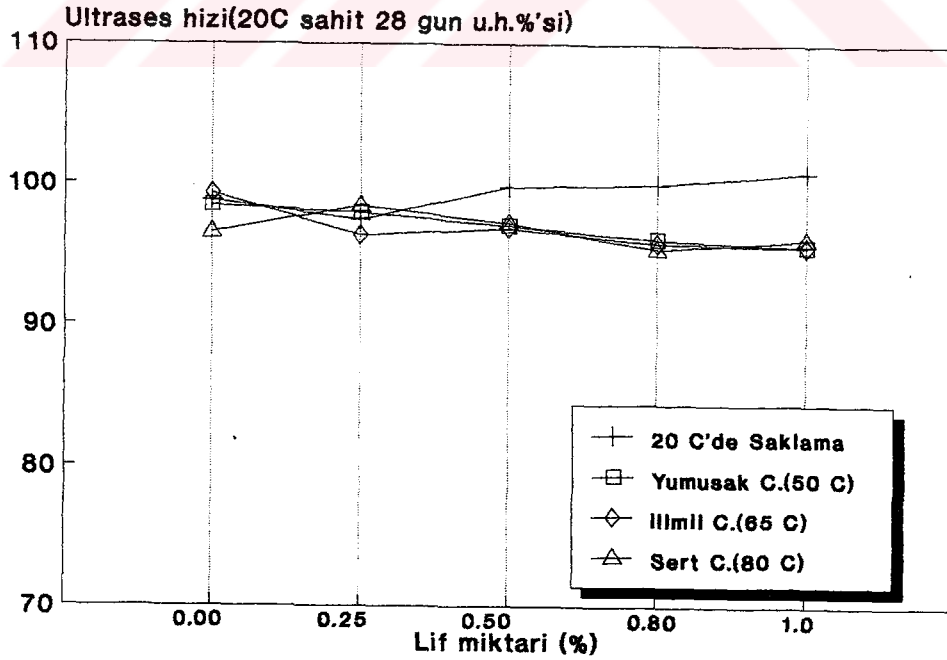
Şekil 4.23 90 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Uygulanan Çevrim ile Değişimi



Şekil 4.24 1 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Lif Miktarına Göre Değişimi



Şekil 4.25 28 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Lıf Miktarına Göre Değişimi



Şekil 4.26 90 Günlük Numunelerin Ultrases Hızlarının Lıf Miktarına Göre Değişimi

artmasına bağlanabilir. Ancak 28 günlük numunelerin boşluk oranlarının artmasında liflerin olumsuzluğu ısıtma işlemi göre daha fazla olmaktadır.

28 ve 90 günlük numunelerin ultrases hızlarının lif miktarına göre değişimleri incelendiğinde genel olarak, lif miktarı arttıkça ultrases hızı azalmaktadır (Şekil 4.25 ve Şekil 4.26). Yalnız 20°C de saklanan numunelerde 90 günlük ultrases hızları lif miktarına bağlı olarak artış göstermektedir. Dolayısıyla ısıtma işlemi görmüş ve 20°C de saklanan numunelerde lif miktarının ultrases hızını etkileme şekli basınç dayanımlarını etkileme şekline göre farklı olması, ultrases hızı ile basınç dayanımı arasında her zaman birebir bir ilişkinin olmadığını göstermektedir.

Sonuç olarak şahit ve lifli betonlarda ısıtma işlemi uygulamasına göre ultrases hızı değişimlerinin basınç dayanımı sonuçlarıyla genellikle uyumlu olması dayanımların belirlenmesinde ultrases hızı ölçümlerinin anlamlı olabileceğini göstermektedir.

4.2.6. Kılcallık Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Atmosfer şartlarına maruz kalacak yapı elemanlarında betonun kılcallık yolu ile su emme özelliği, özellikle yapı elemanlarının dayanıklılığı açısından önem kazanır. Daha önce yapılan çalışmalara göre, betona lif katılması betondaki boşlukların dağılımını değiştirmekte genellikle boşluk miktarını artırıcı yönde etki göstermekte ve bu durumun dayanımın azalmasına ve geçirimsizliğin artmasına neden olduğu belirtilmektedir [2]. Ancak lifli betonların kılcallık özelliği üzerine belirgin bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Öte yandan Uyan'ın [36] yaptığı çalışmada ısıtma işlemlerin normal betonun kılcallılık özelliğine etkisi incelenmiş ve ısıtma işlemlerin kılcallığı azalttığı vurgulanmıştır. Bu bakımdan, yapılan araştırmada üretilen betonların kılcallık özelliklerine lif miktarı ile beraber ısıtma işlemi uygulamasının etkisinin ne şekilde olduğu araştırılmıştır.

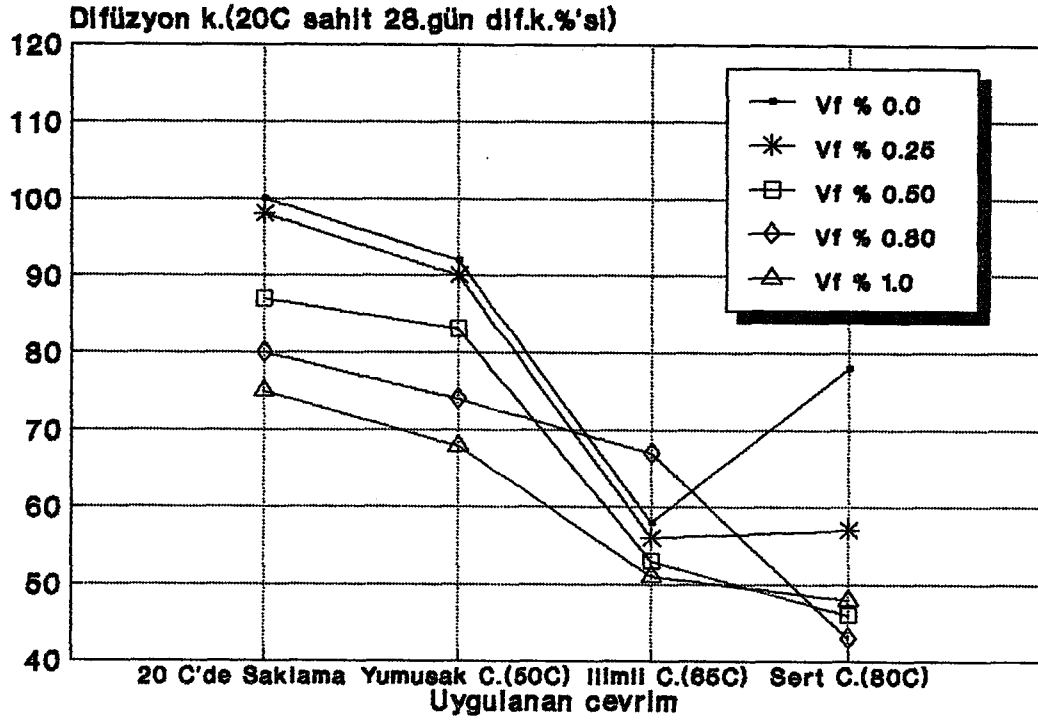
Difüzyon katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 4.27 de; lif miktarlarına değişimi de Şekil 4.28 da gösterilmiştir. Şekillerin incelenmesinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1) Hem şahit, hem de lifli beton numunelerin difüzyon katsayıları ısıtma işlemi sıcaklığı arttıkça 20°C ye göre azalmaktadır. Örneğin; şahit numunelerde 20°C lik kür halinde

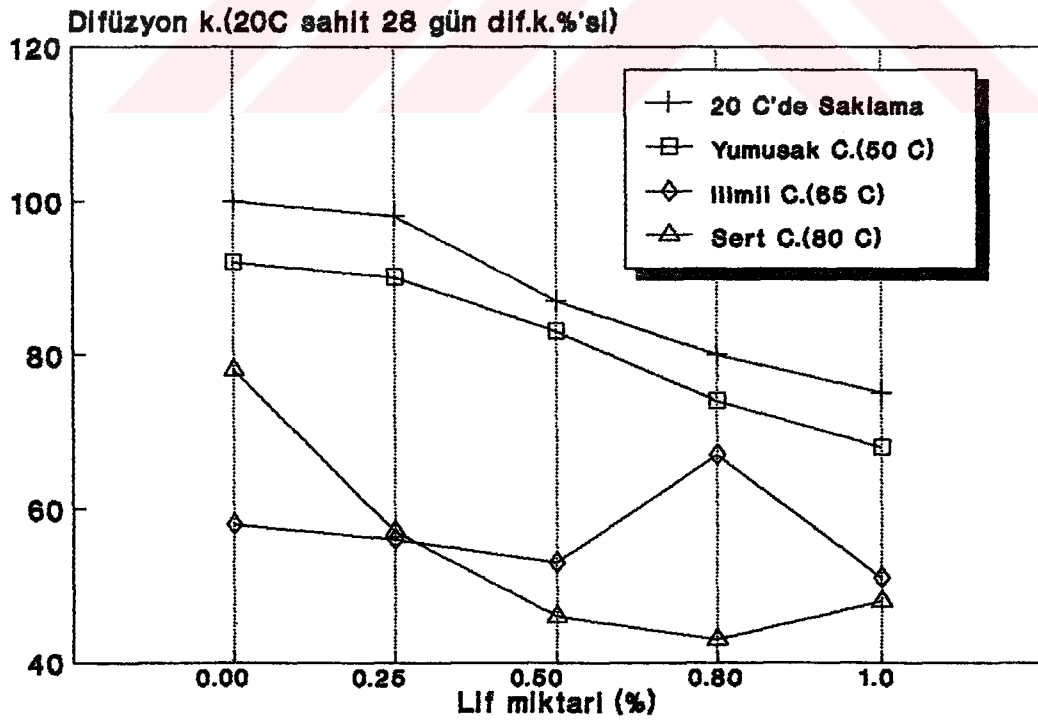
difüzyon katsayısı %100 iken 50°C, 65°C ve 80°C lik çevrimlerde difüzyon katsayısı sırasıyla %92, %58 ve %78 değerlerine kadar azalmaktadır. Aynı şekilde lif yüzdesi 1 olan betonun 20°C deki difüzyon katsayısı %75 iken diğer çevrimlerde sırasıyla %68, %51 ve %48'e kadar düşmektedir. Bu sonuçlardan görüleceği üzere ısıtma işlemleri kılcallığın azalmasına neden olmaktadır. Bu bulgu Uyan'ın [36] yaptığı çalışmada elde edilen sonuçlardaki uyumaktadır. Bu durum ısıtma işlem uygulamasının betonun kılcal boşluk boyutlarını büyütmesine bağlanabilir. Nitekim, yapılan çalışmada hem şahit hemde lifli beton numunelerine ait görünen porozitenin ısıtma işlem sıcaklığına bağlı olarak arttığı görülmektedir (Şekil 4.29). Porozitenin artmasına rağmen ısıtma işlemde kılcallığın azalmasını kılcal boşluk boyutlarının büyüdüğü düşüncesini kuvvetlendirmektedir. Kılcal boşluk boyutlarının büyümesi, betonun kılcal su emme kuvvetini küçülteceğinden, ısıtma işlem görmüş numunelerde 20°C ye oranla kılcallığın azaldığı söylenebilir.

2) 28 günlük numunelerde difüzyon katsayılarının lif miktarına göre değişimlerinin incelenmesinden görülebileceği üzere, hem 20°C de saklanan hemde ısıtma işlem görmüş numunelerde lif miktarı arttıkça kılcallık azalmaktadır. Bu azalmanın nedeni şöyle açıklanabilir. Daha önce yapılan çalışmalardan bilindiği gibi, betona lif katılması boşlukların dağılımını değiştirmekte ve genellikle boşluk miktarını artırmaktadır [2]. Bu çalışmada da bölüm 4.1.'de açıklandığı gibi taze betonda lif miktarı arttıkça boşluk oranının artmakta olduğu vurgulanmıştır (Şekil 4.4). Öte yandan sertleşmiş betonda da lif miktarı arttıkça hem 20°C de hem de ısıtma işlemde görünen porozitenin artması yukarıdaki açıklamanın doğruluğunu göstermektedir (Şekil 4.30). Ancak hem 20°C de hem de ısıtma işlem görmüş numunelerde görünen porozitenin artmasına rağmen kılcallığın azalması, betona katılan liflerin betondaki kılcal boşluklarının sürekliliklerini bozmasına bağlı olduğu şeklinde açıklanabilir.

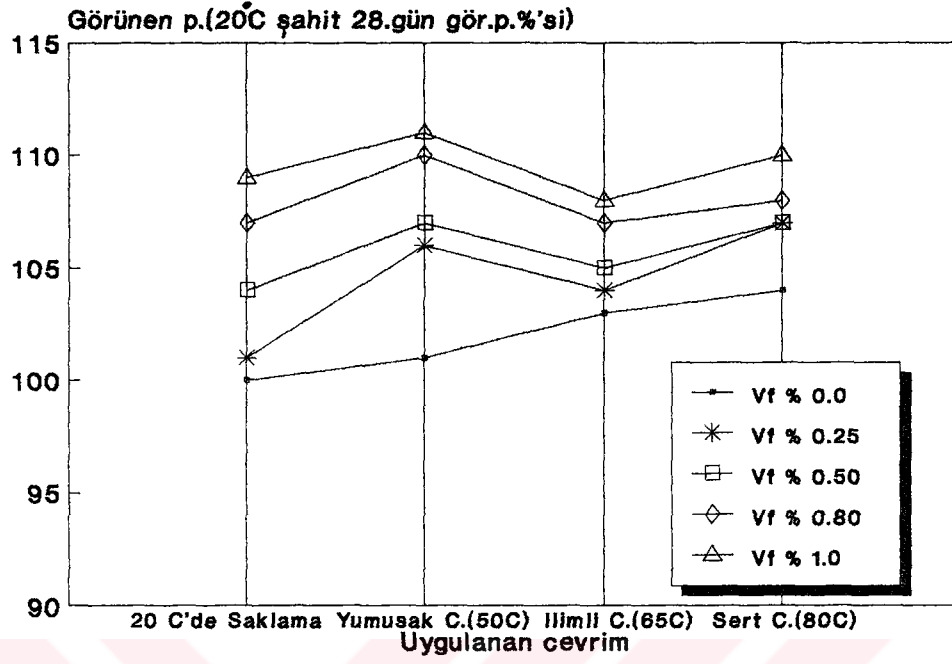
3) Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 de görünen diğer bir sonuç da, ısıtma işlem sıcaklığı arttıkça kılcallığın azalması lifli betonlarda şahit numuneye göre daha az olmasıdır. Bu azalmanın sebebi şöyle açıklanabilir. Betona lif katılması halinde, betonun boşluk yapısının değiştiği, daha boşluklu ve daha kusurlu bir yapının oluştuğu daha önceki bölümlerde de belirtilmiştir. Öte yandan yukarıda değinildiği gibi, lifler betondaki kılcal boşlukların sürekliliğini azaltmaktadır. Sonuçta böyle bir yapıda ısıtma işleminin kılcallığı azaltıcı yönündeki etkisi, şahit numuneye göre lifli betonlarda daha az olmaktadır.



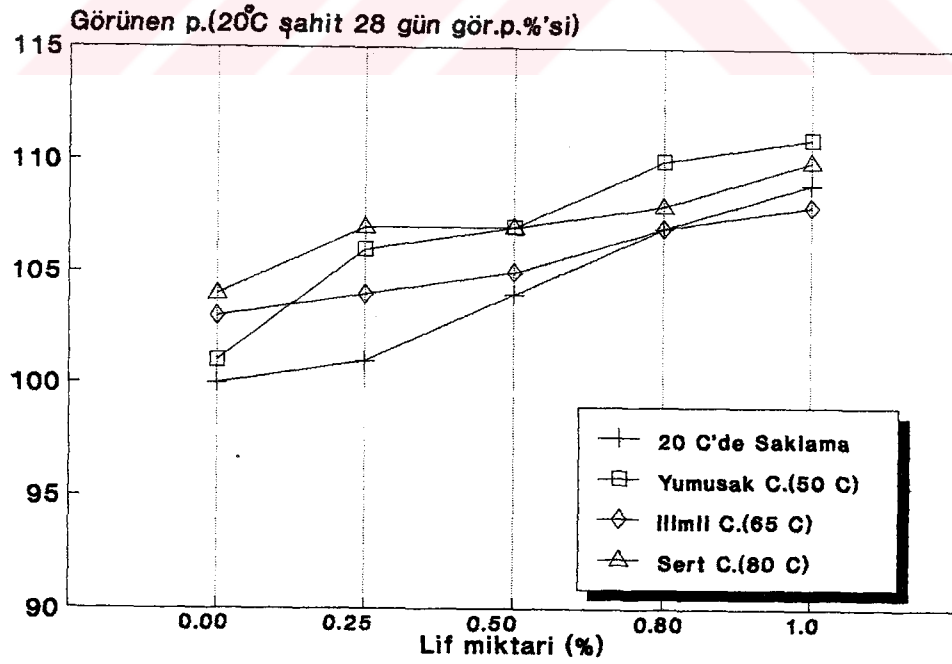
Şekil 4.27 28 Günlük Numunelerin Difüzyon Katsayısının Uygulanan Çevrim İle Değişimi



Şekil 4.28 28 Günlük Numunelerin Difüzyon Katsayısının Lif Miktarına Göre Değişimi



Şekil 4.29 28 Günlük Numunelerde Görünen Porozitenin Uygulanan Çevrim ile Değişimi



Şekil 4.30 28 Günlük Numunelerde Görünen Porozitenin Lif Miktarına Göre Değişimi

4) Betonun sürekli (açık) boşluk miktarını ifade eden görünen porozitenin uygulanan ısıtma işlem sıcaklığına göre değişimi Şekil 4.29 da, lif miktarına göre değişimi de Şekil 4.30 da verilmektedir bu şekillerin incelenmesinden görüleceği üzere, şahit ve lifli betonlarda ısıtma işlem sıcaklığı yükseldikçe görünen porozite artmaktadır. Diğer taraftan hem 20°C de saklanan, hem de ısıtma işlem görmüş numunelerde de lif miktarı artıka görünen porozite artmaktadır. Bu da daha önce açıklandığı gibi, betona katılan liflerin betonun boşluk yapısını etkilemesine ve bunun sonucunda da daha boluklu bir yapının oluşmasına bağlanabilir. Diğer taraftan ısıtma işlem uygulamasının etkisiyle de görünen porozitenin artması ısıtma işlem sonucunda kılcal boşluk boyutlarının büyümesiyle açıklanabilir. Bu varsayım ısıtma işlemlerin yapıyı daha kusurlu bir hale getirmesi bulguları ile de uygunluk sağladığı görülmüştür.

4.2.7 Betonun Kısa Süreli Basınç Altındaki Davranışı ile İlgili Sonuçların Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Betonun kısa süreli basınç altındaki davranışı inelastiktir. Bunun nedeni, agrega-harç fazı arasındaki bağ çatlakları olduğu şeklinde genel bir kabul olmakla birlikte, harç fazının davranışına veya çimento hamurunun yapısına bağlı olduğu şeklinde görüşler de vardır [64], [65].

Bu çalışmada ısıtma işlem görmüş ve 20 °C'de saklanan şahit ve lifli betonların kısa süreli basınç altındaki davranışının incelenmesine de yer verilmiştir. Böylece kompozit malzeme olan lifli betonların elastiklik modülüne ve elastik olmayan özelliklerine, yani süreksizlik sınırı ve çözülme sınırındaki gerilme değerlerine, basınç dayanımındaki birim kısalmaya, süreksizlik sınırı / basınç dayanımı oranına ve kırılma şekil değiştirme işine ısıtma işlem uygulamasının etkisi araştırılmıştır. Elastik olmayan özellikler arasında yer alan basınç dayanımı daha önce Bölüm 4.2.3. de ayrıltılı olarak ele alınmıştır. Üretilen betonların 28 ve 90 günlük kısa süreli basınç altındaki davranışlarının ısıtma işlem çevrimlerine ve lif yüzdesine bağlı olarak değişimleri incelenecek olursa aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkarılabilir.

1) 28 günlük numunelerde süreksizlik sınırının ısıtma işlem çevrimlerine göre değişimi şekil 4.31 de incelendiğinde, hem şahit hem de lifli betonlarda ısıtma işlem sıcaklığı yükseldikçe süreksizlik sınırının azaldığı anlaşılmaktadır.

2) Isıl işlem çevrimlerinin hem basınç dayanımına hem de süreksizlik sınırına olan etkileri bir arada değerlendirildiğinde de, basınç dayanımındaki yüzdeler, süreksizlik sınırındaki yüzdelerden genel olarak daha büyüktür. Yani ısıtma işlemleri şahit ve lifli betonların süreksizlik sınırının basınç dayanımına oranla daha fazla azaltmaktadır. Bu azalmanın nedeni de, ısıtma işleminin oluşturduğu kusurların lif-matrix ara yüzeylerini daha fazla etkilemesine bağlanabilir.

3) 90 günlük numunelerde ise ısıtma işlem sıcaklığı arttıkça süreksizlik sınırında genel olarak azalma eğilimi devam etmektedir (Şekil 4.32).

4) 20°C de saklanan ve ısıtma işlem görmüş 28 ve 90 günlük numunelerde süreksizlik sınırı, genel eğilim olarak lif yüzdesi arttıkça azalmaktadır (Şekil 4.33, Şekil 4.34). Bu azalma 20°C de ve 80 °C lik sert çevrim uygulamasında genel olarak birbirine paralel bir davranış göstermektedir. Isıtma işlem görmüş ve 20°C de saklanan numunelerde süreksizlik sınırının lif miktarı artışına bağlı olarak azalmasının nedeni aşağıdaki şekilde açıklanabilir. Bölüm 4.2.6 da açıklandığı gibi, betona lif katılması betonun boşluk yapısını değiştirmekte ve kusurlu bir yapı oluşturmaktadır. Ayrıca betona katılan lif miktarının artmasıyla yeni lif-matrix ara yüzeylerinin ortaya çıkması ve bu ara yüzeylerinde oluşan mikro çatlaklar kusur etkisi yaparak ilk çatlak dayanımını azaltmakta olduğu söylenebilir. Nitekim, Gököz [34] yaptığı çalışmada normal kür şartlarında betona katılan kısa tel parçalarının kendilerini saran çimento hamuru yapısında değişikliklere neden olarak, özellikleri etkilemekte ve bu etkinin tel-hamur arayüzeylerindeki kusurlardan ileri geldiğini söylemektedir. Öte yandan bu etkinin şekli de ısıtma işlem görmüş numunelerde de değişmemektedir.

5) 28 ve 90 günlük numunelerde lif miktarının hem süreksizlik sınırına hem de basınç dayanımına olan etkileri beraber değerlendirildiğinde, liflerin süreksizlik sınırını basınç dayanımına göre daha fazla azalttığı anlaşılmaktadır. Bunun sebebi de, betona katılan liflerin ilk çatlak dayanımından sonraki bölgede, çatlakların büyümesini geciktirmesi sonucu, iyileştirici yönde fonksiyon göstermesine bağlanabilir.

Sonuç olarak, hem ısıtma işlemlerin hem de lif miktarı artışının betonun iç yapısında oluşturduğu kusurlar süreksizlik sınırını basınç dayanımına göre daha fazla etkilediği ortaya çıkmaktadır.

6) 28 ve 90 günlük süreksizlik sınırı / basınç dayanımı oranının ısı işlem çevrimine göre değişimi Şekil 4.35 ve Şekil 4.36 da; lif miktarına göre değişimi Şekil 4.37 ve Şekil 4.38 de verilmektedir. Bu şekiller toplu olarak incelendiğinde, süreksizlik sınırı / basınç dayanımı oranına ait değişimlerin süreksizlik sınırı mutlak değerlerinin değişimlerine benzediği görülmektedir. Bu sonuç da, süreksizlik sınırı / basınç dayanımı oranının süreksizlik sınırına benzer şekilde değişmesi, hem ısı işlemlerde hemde lif miktarı artışında, yukarıda belirttiğimiz süreksizlik sınırının basınç dayanımından daha fazla azaldığının diğer bir göstergesi olmaktadır.

7) Şahit ve lifli beton numunelerin çözülme sınırındaki gerilme değerinin ısı işlem çevrimlerine göre değişimleri Şekil 4.39 ve Şekil 4.40 da; lif miktarına göre değişimleri ise Şekil 4.41 ve Şekil 4.42 de verilmektedir. Bu şekillerin incelenmesinden ortaya çıkan sonuç, şahit ve lifli betonlarda çözülme sınırının basınç dayanımına benzer şekilde değişmesi, ısı işlem uygulamasının ve lif miktarı artışının çözülme sınırını aynı yönde etkilediğini göstermiştir.

Isıl işlem görmüş ve 20°C saklanan numunelerin, 28 ve 90. günlerdeki çözülme sınırı üzerine liflerin olumlu etkisi görülmektedir (Şekil 4.41 ve Şekil 4.42). Bilhassa bu etki lif yüzdesi 0.8'e kadar olan bölgede 90. günde daha fazla olmaktadır. Yani basınç dayanımında olduğu gibi, lif miktarı 0.8 den büyük olan numunelerde kusur etkisinin daha çok olduğu söylenebilir. Dolayısıyla betona katılan lifler, ilk çatlak dayanımını azaltmasına rağmen yükleme devam ettikçe matrix fazında ilerlemek isteyen çatlaklar, lifler tarafından yavaşlatılmakta olduğundan, ilk çatlak dayanımından sonraki bölgede, liflerin fonksiyonu iyileştirici yönde olmaktadır. Böylece betona katılan lifler, ilk çatlaktan sonraki davranışı etkilemekte olduğu söylenebilir. Bu sonuç literatür bulgularıyla uyum sağlamaktadır [1], [3], [20].

8) 28 ve 90 günlük şahit ve lifli betonların basınç dayanımındaki şekil değiştirme oranlarının ısı işlem sıcaklığına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.43 ve Şekil 4.44 de; lif miktarına göre değişimleri Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'de incelenecek olursa, genel olarak basınç dayanımındaki şekil değiştirme oranları ısı işlem görmüş numunelerde artma veya azalma yönünde bir değişme göstermemiştir. Buna karşılık Şekil 4.45 ve Şekil 4.46 dan görülebileceği gibi hem 20°C hem de ısı işlemlerde lif miktarı arttıkça şekil değiştirme oranlarının arttığı ortaya çıkmaktadır. Betona katılan lifler genellikle ilk çatlak

dayanımını azaltmasına karşın, gerilme seviyesi yükselince, matrix fazında ilerlemek isteyen çatlaklar lifler tarafından bağlandığı için basınç dayanıma ulaşmak ötelenmektedir. Böylece liflerin katılması, süreksizlik sınırı / basınç dayanımı oranının azalmasına neden olmakta, ancak, süreksizlik sınırından sonraki davranışı etkilemekte ve kırılmaya kadar büyük şekil değiştirme olanağı sağlamaktadır. Bu durum betonun sünekleşmesi olarak nitelenebilir. Bu suretle hem basınç dayanımı hemde bu noktadaki şekil değiştirme daha büyük değerler alabilmektedir. Nitekim, liflerin etkisinin esas olarak çatlamadan sonra daha belirgin olduğunu diğer araştırmacılar da söylemektedir [1], [3], [18]. Bu yapılan çalışmada da bu bulgunun, diğer çalışmalarda sonuçlarla, ısıtılmış uygulanmış numuneler içinde geçerli olduğu ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, liflerle donatılı betonların normal betona kıyasla üstünlüklerinden bir tanesinde kırılmadan büyük şekil değiştirme yapabilme özelliğidir. Yapılan bu çalışmada, ısıtılmış işlem görmüş numunelerde de, 20°C deki gibi liflerin iyileştirici etkisinin devam ettiği ortaya çıkmıştır (Şekil 4.45 ve Şekil 4.46).

9) Şahit ve lifli betonların 28 ve 90. günlerdeki elastisite modüllerinin ısıtılmış işlem sıcaklığına bağlı olarak değişimleri Şekil 4.47 ve Şekil 4.48 de verilmiştir. Bu şekillerin incelenmesinden elastisite modülünün, genel eğilim olarak lifli betonlarda ısıtılmış işlem sıcaklığının artması ile 20°C ye göre azaldığı söylenebilir. Özellikle 28 günlük numunelerde ısıtılmış işlem sıcaklığı 50°C den sonra lifli betonlarda belirgin bir azalmanın olduğu, 90. günde ise şahit ve lif yüzdesi 0.5 olan numunelerde aynı etkinin görüldüğü söylenebilir. Bu durum ısıtılmış işlemin oluşturduğu kusurlara bağlanabilir. 90 günlük numunelerde lif yüzdesi 0.8 ve 1.0 da her hangi bir değişim görülmemektedir.

Öte yandan 20°C de saklanan ve ısıtılmış işlem görmüş numunelerin elastisite modüllerinin lif miktarlarına göre değişimi incelenecek olursa, lif miktarı arttıkça elastisite modülünün azalmakta olduğu söylenebilir (Şekil 4.49, Şekil 4.50). Özellikle 20°C deki azalma 80°C lik sert çevrime göre daha belirgin olmaktadır. Bu azalmanın nedeni ise lif miktarının artmasından meydana gelen boşluklu yapının beton iç yapısını zayıflatmasına bağlanabilir [65]. Bu boşluklar şekil değiştirmelerin artmasına neden olarak elastisite modülünü azaltmaktadır. Bu sonuç bilinenlerle uygunluk halindedir [8], [16], [34], [35], [66].

Bu konuda yapılan bir araştırmada [34], Krenchel tarafından verilen ve uzayda rastgele dağılılı süreksiz tel parçaları ile donatılı kompozit malzeme için elastisite modülü ile tel yüzdesi arasındaki ilişki teorik olarak incelenilmiştir. Buna göre, elastisite modülünün tel yüzdesiyle lineer olarak değiştiğini ve tel yüzdesi arttıkça lineer olarak azaldığını söylemektedir. Nitekim Williamson [20] da bu yönde bulgular elde etmiştir.

Sonuç olarak, betona katılan lif miktarının artmasına bağlı olarak çatlakların oluşması, elastisite modülünü azaltması şeklinde de etkisini göstermektedir. Ancak liflerin bu etkisi ısıtma işlemi görmüş numunelerde de devam ettiği bu çalışmada da görülmektedir.

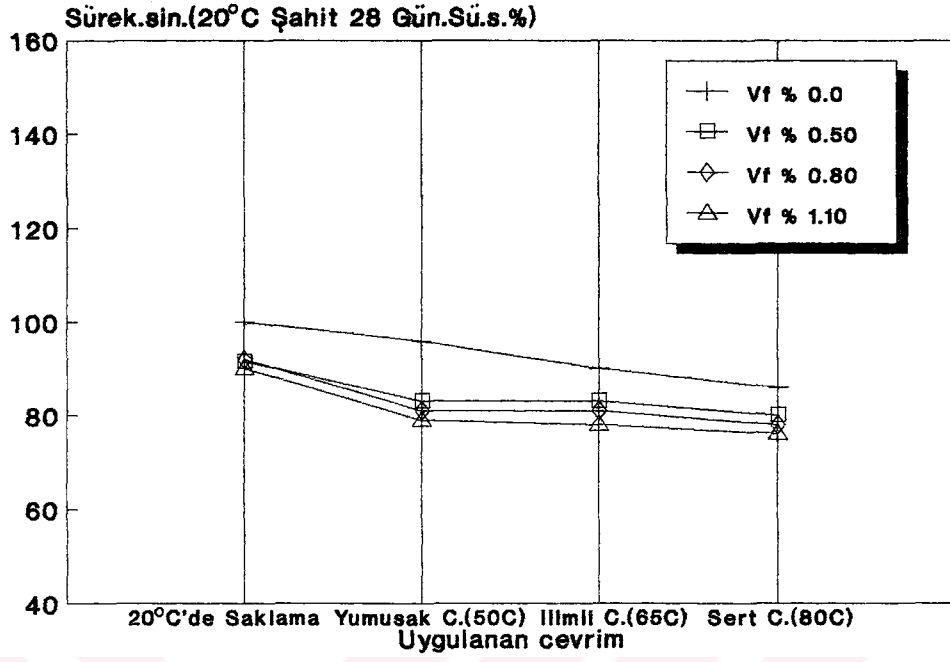
7) 28 ve 90 günlük numunelerin kırılma şekil değiştirme işine ısıtma işlemi uygulamasının etkisi incelendiğinde; şahit numunelerde ısıtma işlemi sıcaklığı arttıkça kırılma şekil değiştirme işi azalmakta, lifli betonlarda ise belirgin bir eğilim ortaya çıkmamıştır (Şekil 4.51, Şekil 4.52). Şahit numunelerde kırılma şekil değiştirme işinin ısıtma işlemi sıcaklığı arttıkça azalmasının nedeni iç yapıda artan kusurların ısıtma işlemi kendisini daha belirgin göstermesine bağlanabilir. Ancak lifli betonlarda ısıtma işleminden dolayı görülen artış 28. günde 20°C'ye göre daha az olmasına rağmen beton yaşı ilerledikçe ısıtma işlemi görmüş lifli betonların kırılma şekil değiştirme işi artmaktadır.

Kırılma şekil değiştirme işinin 20°C ve ısıtma işlemi görmüş lifli beton numunelerde değişimi incelenecek olursa, lif yüzdesi arttıkça hem 20°C'de hemde ısıtma işlemlerinde arttığı görülmektedir (Şekil 4.53, Şekil 4.54). Bu sonuç şu şekilde açıklanabilir. Yük eksenine dik olan lifler yanal deformasyonları, yüksek çekme dayanımları ve lif-matrix arayüzeylerinde sürtünme ile oluşan aderans nedeniyle azaltmakta olduğundan, sonuçta kırılma şekil değiştirme işinin arttığı söylenebilir. Liflerin başlıca rolünün betonda oluşan çatlakların matrix içerisinde ilerlemelerin yavaşlatılması olduğu daha önceki çalışmalarda belirtilmektedir [1], [3]. Bu suretle maksimum yükten sonra, lifli betonlarda, artan şekil değiştirme oranına karşı yükün azalma hızı normal betonlara göre daha yavaştır. Dolayısıyla liflerin matrixten ayrılmaları ve uzamaları nedeniyle emilen enerji lifli betonlarda oldukça fazladır. Ayrıca şahit ve lifli betonlara ait gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin alçalan kısımlarının eğimlerinin lifli betonlarda daha düşük olması, liflerin betonun sünekliğini artırdığı şeklinde açıklanabilir. Bu konuda yapılan çalışmalarda [22], [23], [29] beton içerisine katılan liflerin çatlak oluşumunu geçiktirerek enerji emme kapasitesini artırmakta olduğu ve oluşan çekme gerilmelerinin bir kısmının liflerin taşıdığını

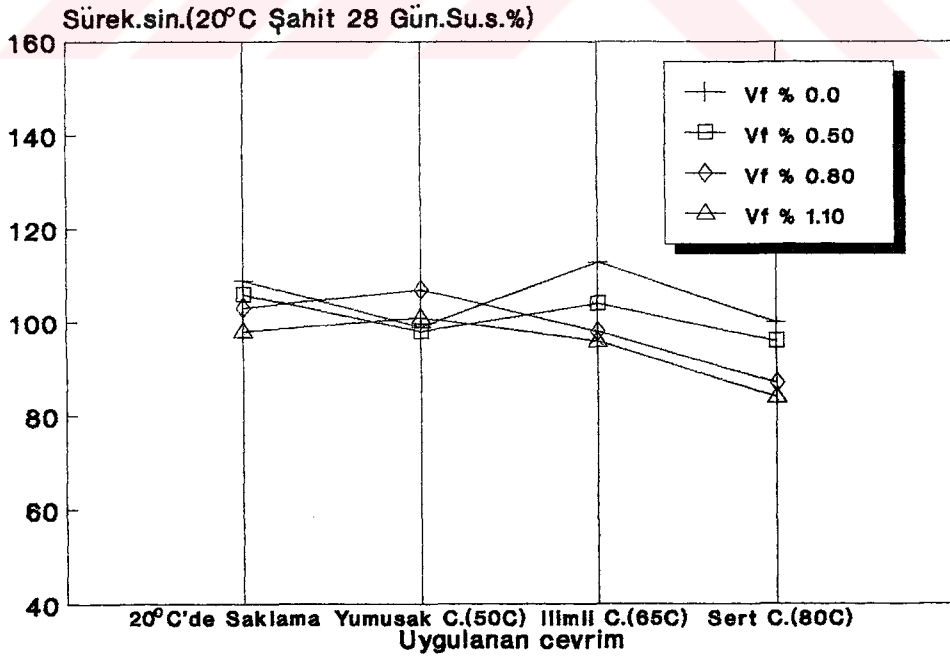
söylemektedirler. Bu çalışmada 20°C de elde edilen bu bulgunun ısıtma işlemi görmüş lifli beton üzerinde geçerli olduğu ortaya çıkmıştır.

Buraya kadar açıklanan 20°C de saklanan ve ısıtma işlemi görmüş numunelerin kısa süreli basınç altındaki davranışlarına ait sonuçlar özetlenirse, betona liflerin katılması ile elastisite modülü ve süreksizlik sınırının azalması, daha önce açıklandığı gibi liflerin elastik bölgedeki davranışta zayıflatıcı ve bozucu tesir yaptığını ortaya koymaktadır. Süreksizlik sınırı geçildikten sonra ise, iç yapıda hızla ilerleyen çatlak gelişimine lifler engel olduğu için, olumsuz etki tersine dönmekte ve bağlayıcı, birleştirici yönde etkiler maksimum gerilmeye ulaşılmasını geciktirmektedir. Bu suretle , hem basınç dayanımı hemde basınç dayanımındaki şekil değiştirme daha büyük değerler alabilmektedir. Lif miktarı ne kadar büyük olursa bu etki daha tesirli olmaktadır. Bu etkilerin 20°C deki gibi ısıtma işlemlerinde de devam ettiği görülmüştür.

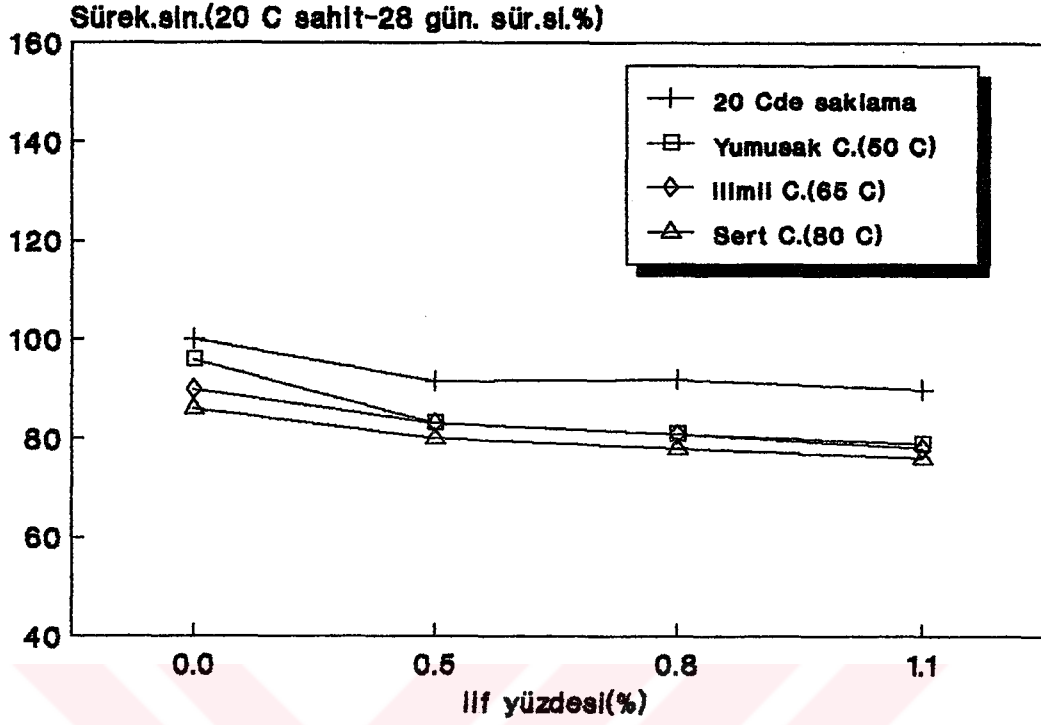




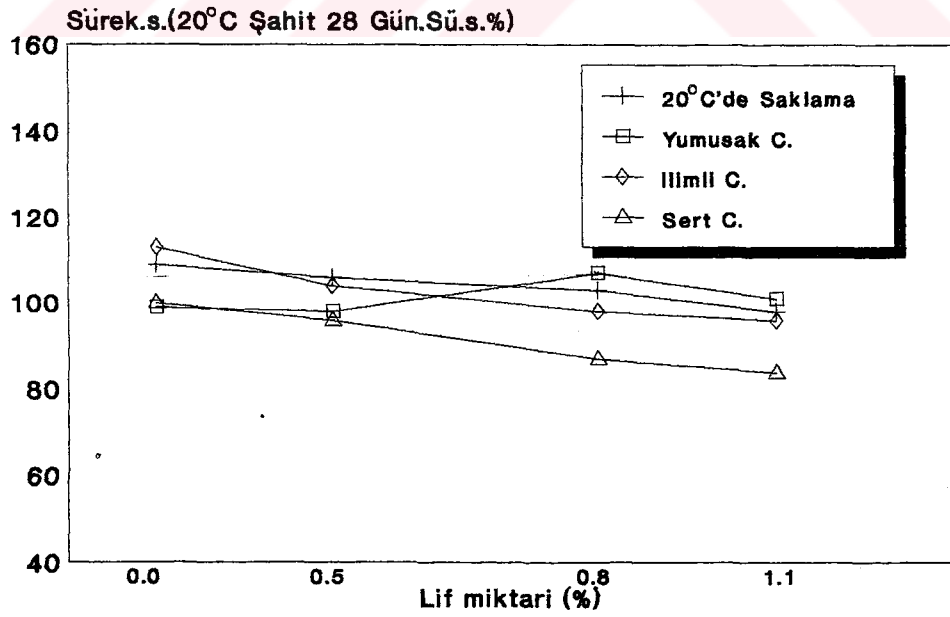
Şekil 4.31 28 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırının Uygulanan Çevrim ile Değişimi



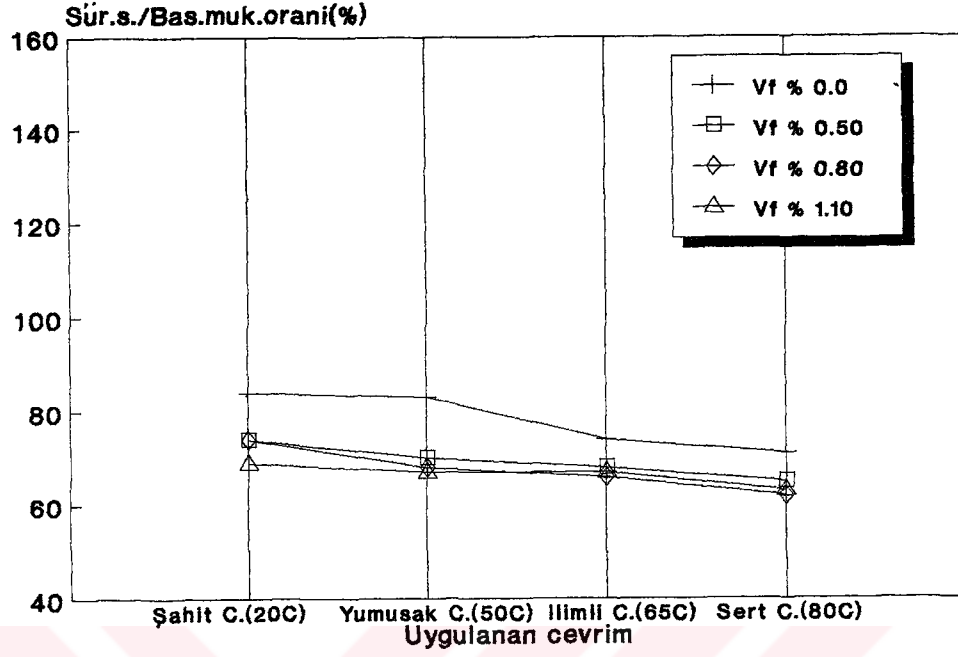
Şekil 4.32 90 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırının Uygulanan Çevrim ile Değişimi



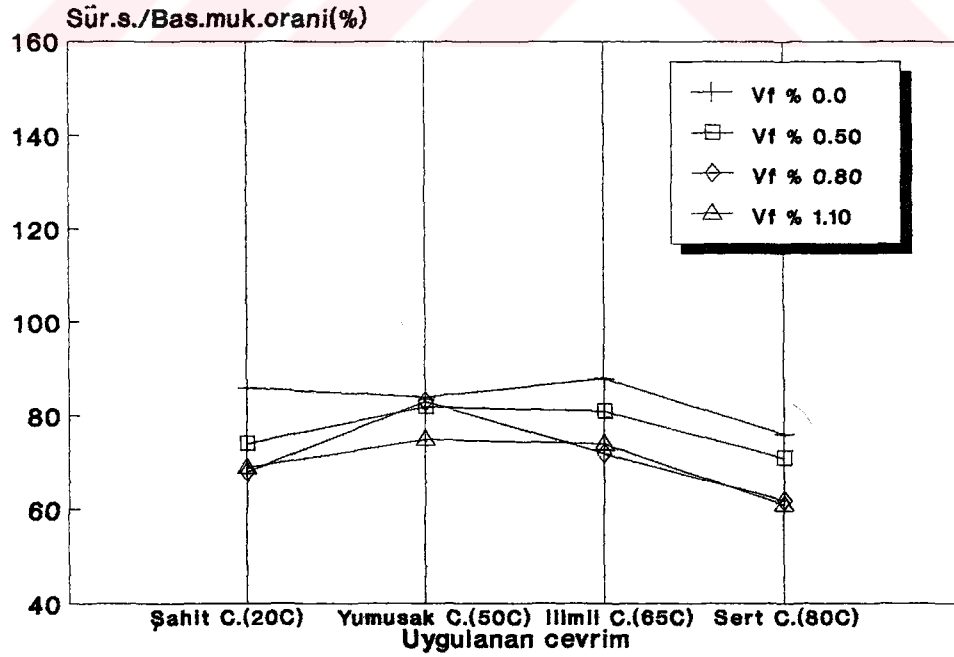
Şekil 4.33 28 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırının Lif Miktarına Göre Değişimi



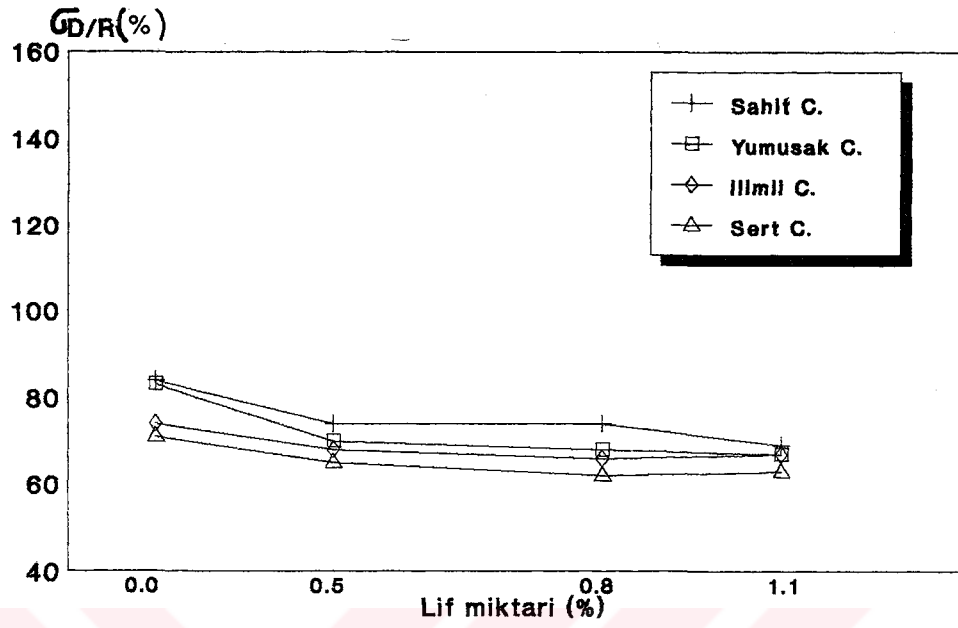
Şekil 4.34 90 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırının Lif Miktarına Göre Değişimi



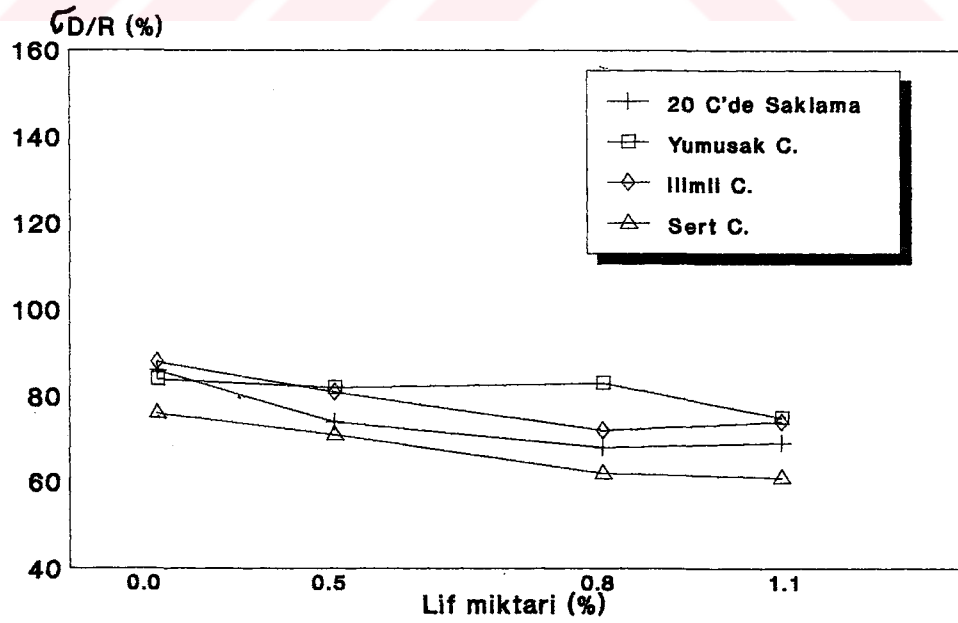
Şekil 4.35 28 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırı / Basınç Dayanımını Oranının Uygulanan Çevrim İle Değişimi



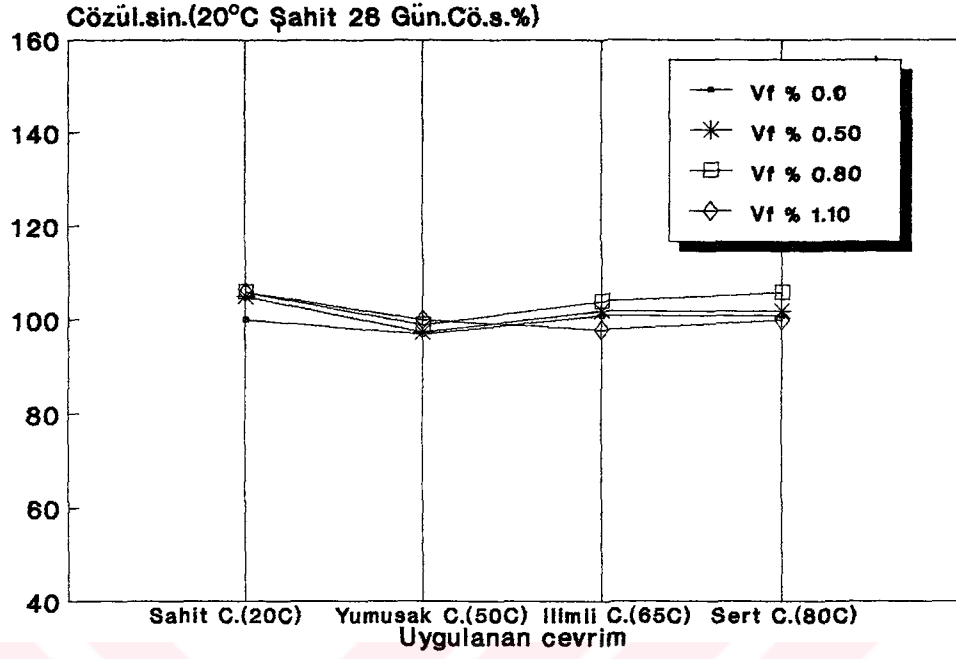
Şekil 4.36 90 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırı / Basınç Dayanımını Oranının Uygulanan Çevrim İle Değişimi



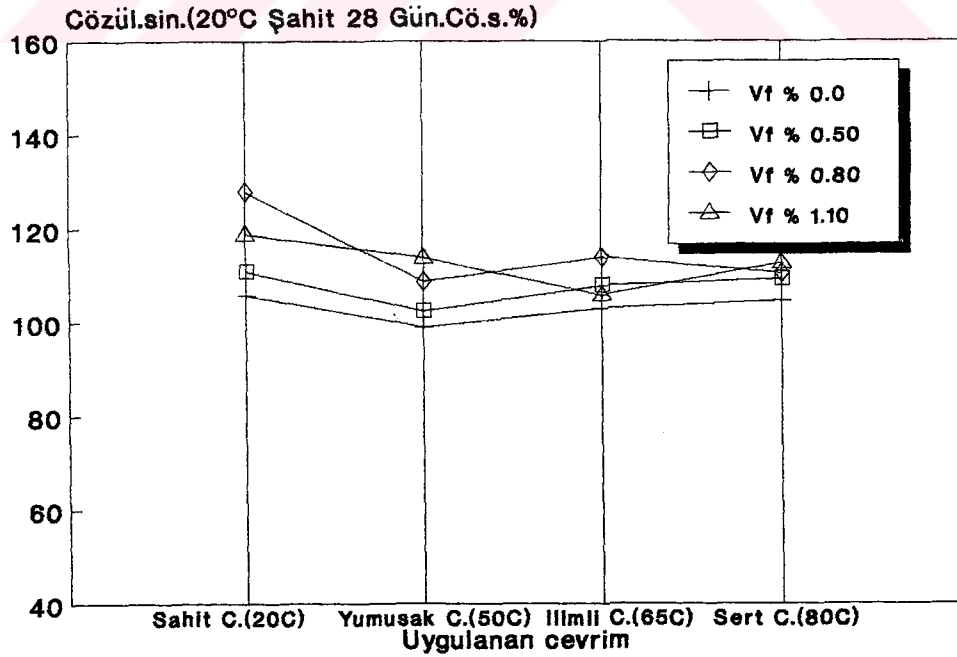
Şekil 4.37 28 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırı / Basınç Dayanımını Oranın Lif Miktarına Göre Değişimi



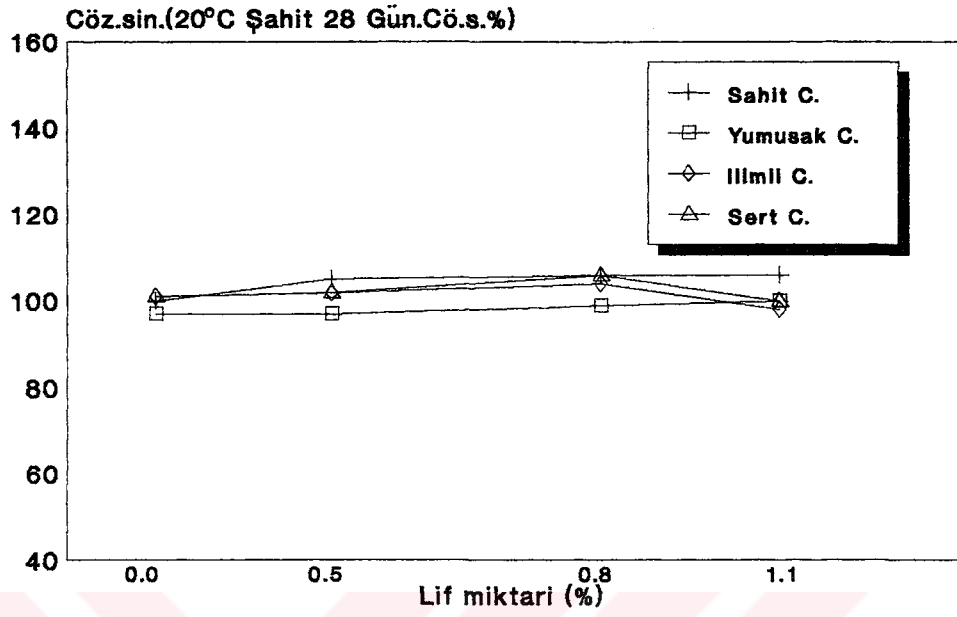
Şekil 4.38 90 Günlük Numunelerde Süreksizlik Sınırı / Basınç Dayanımını Oranın Lif Miktarına Göre Değişimi



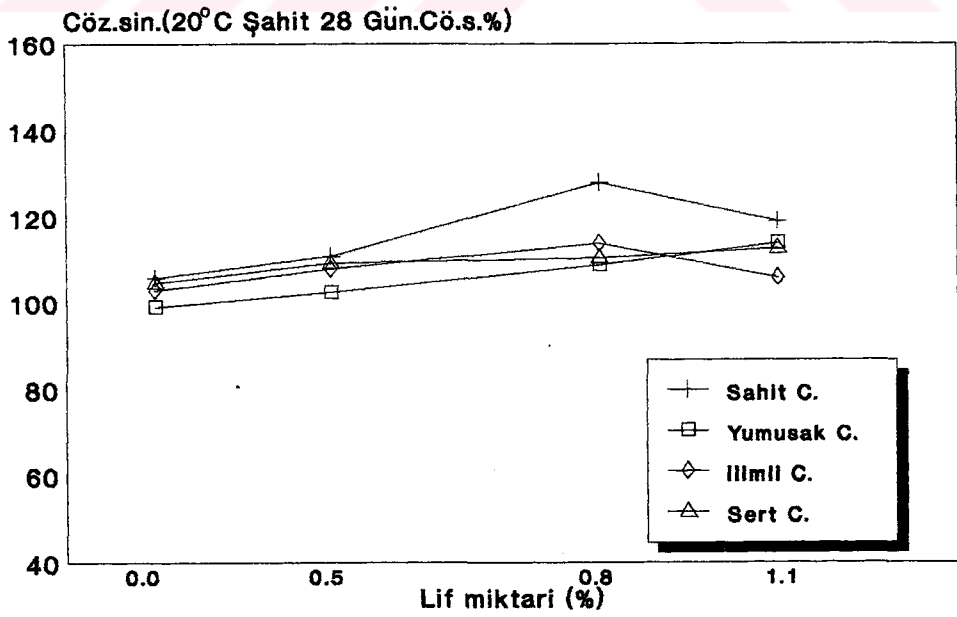
Şekil 4.39 28 Günlük Numunelerde Çözülme Sınırının Uygulanan Çevrim ile Değişimi



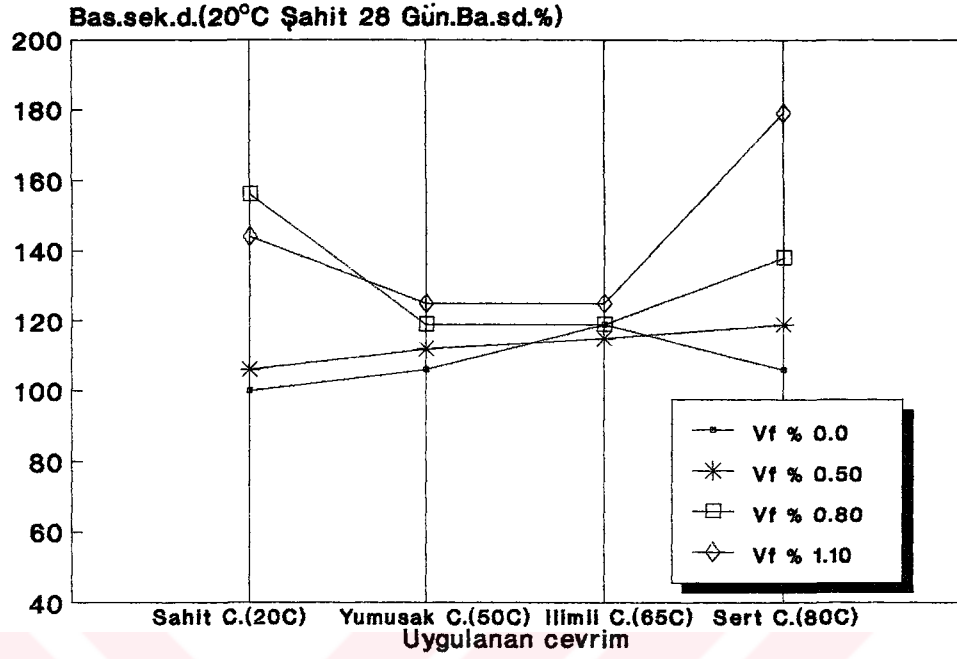
Şekil 4.40 90 Günlük Numunelerde Çözülme Sınırının Uygulanan Çevrim ile Değişimi



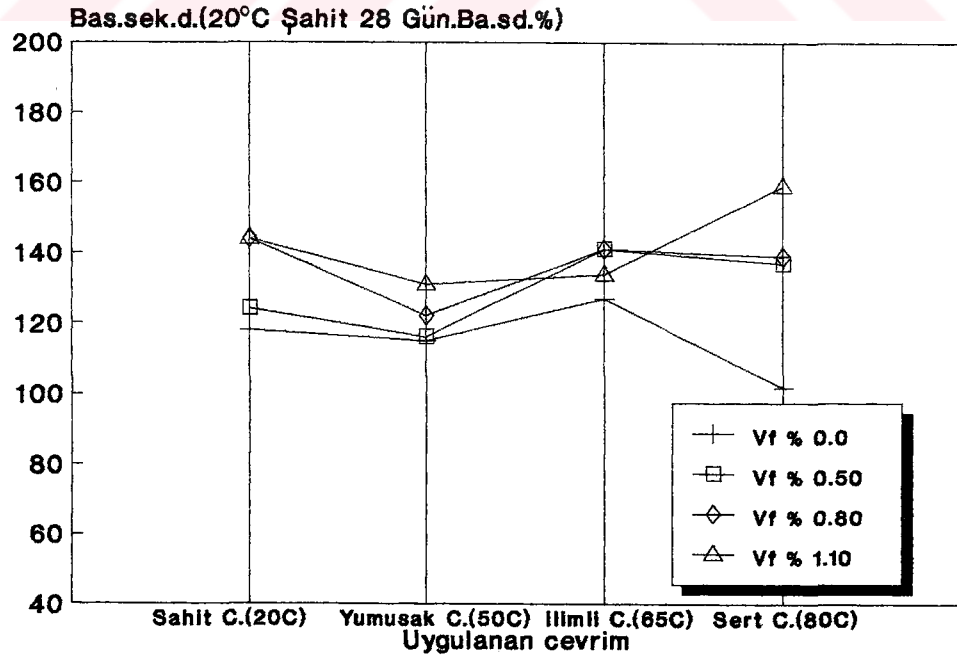
Şekil 4.41 28 Günlük Numunelerde Çözülme Sınırının Lif Miktarına Göre Değişimi



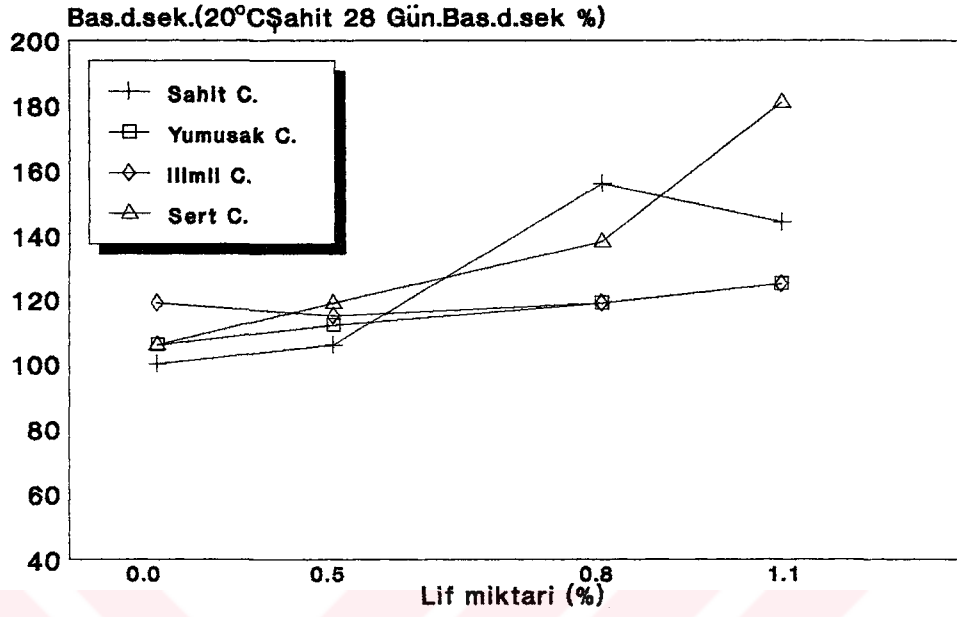
Şekil 4.42 90 Günlük Numunelerde Çözülme Sınırının Lif Miktarına Göre Değişimi



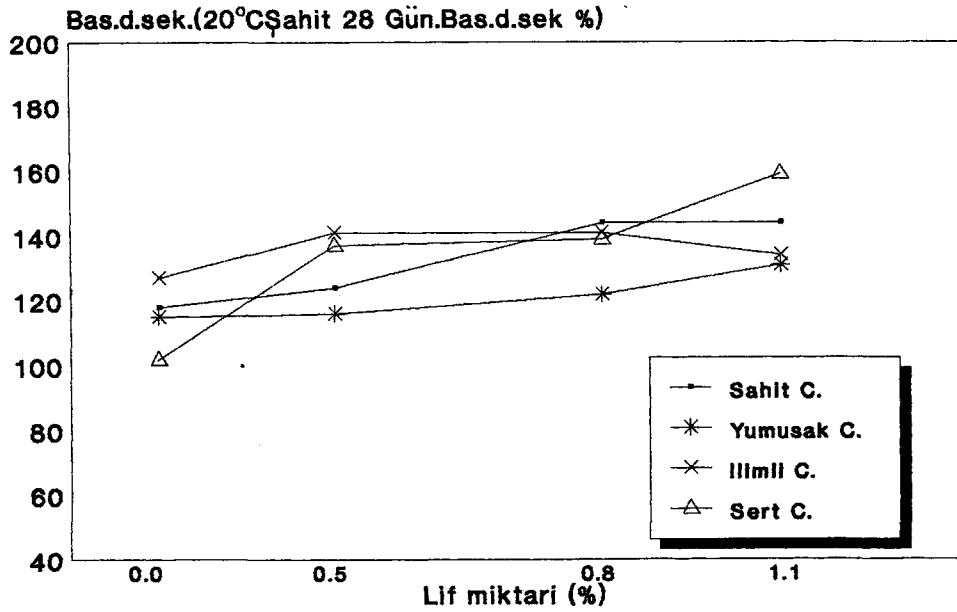
Şekil 4.43 28 Günlük Numunelerde Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Uygulanan Çevrim İle Değişimi



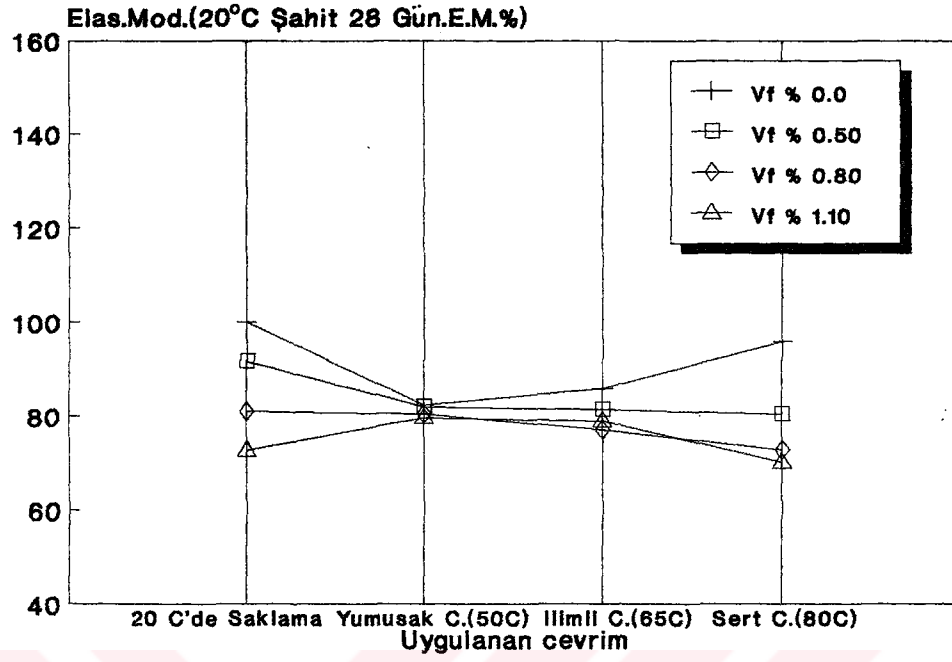
Şekil 4.44 90 Günlük Numunelerde Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Uygulanan Çevrim İle Değişimi



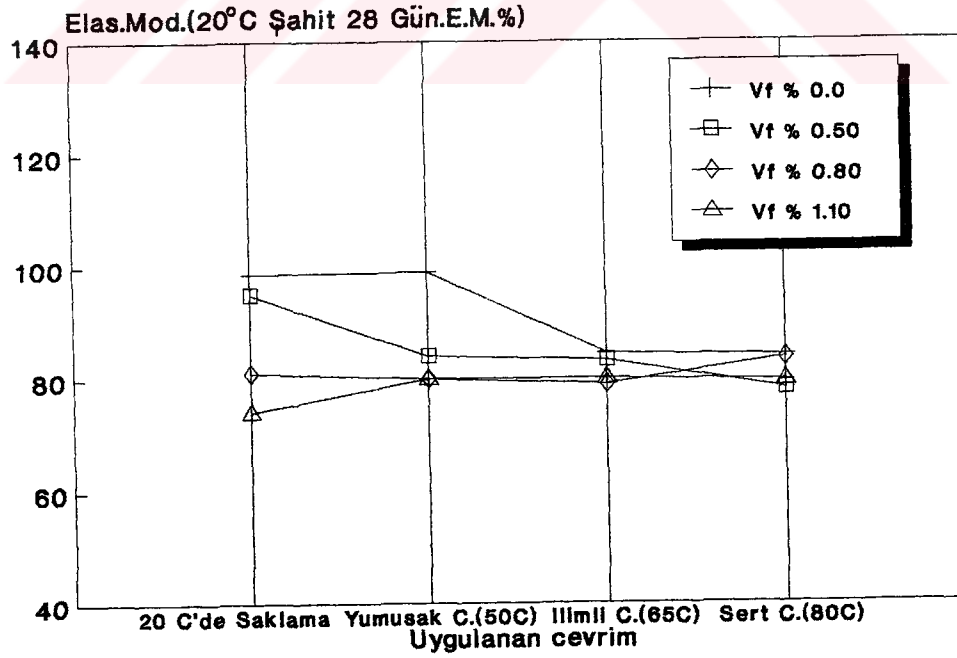
Şekil 4.45 28 Günlük Numunelerde Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Lif Miktarına Göre Değişimi



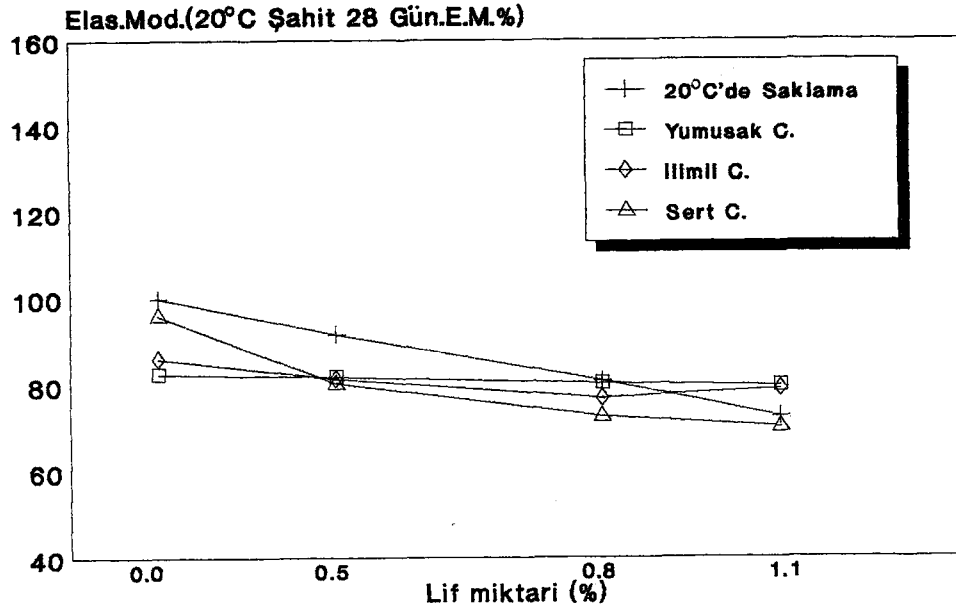
Şekil 4.46 90 Günlük Numunelerde Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Lif Miktarına Göre Değişimi



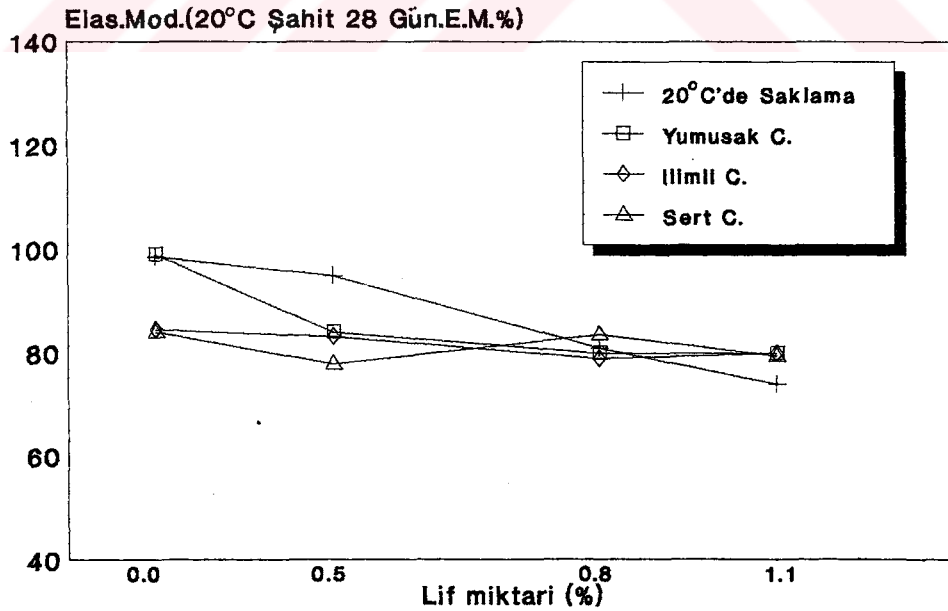
Şekil 4.47 28 Günlük Numunelerde Elastisite Modülünün Uygulanan Çevrim ile Değişimi



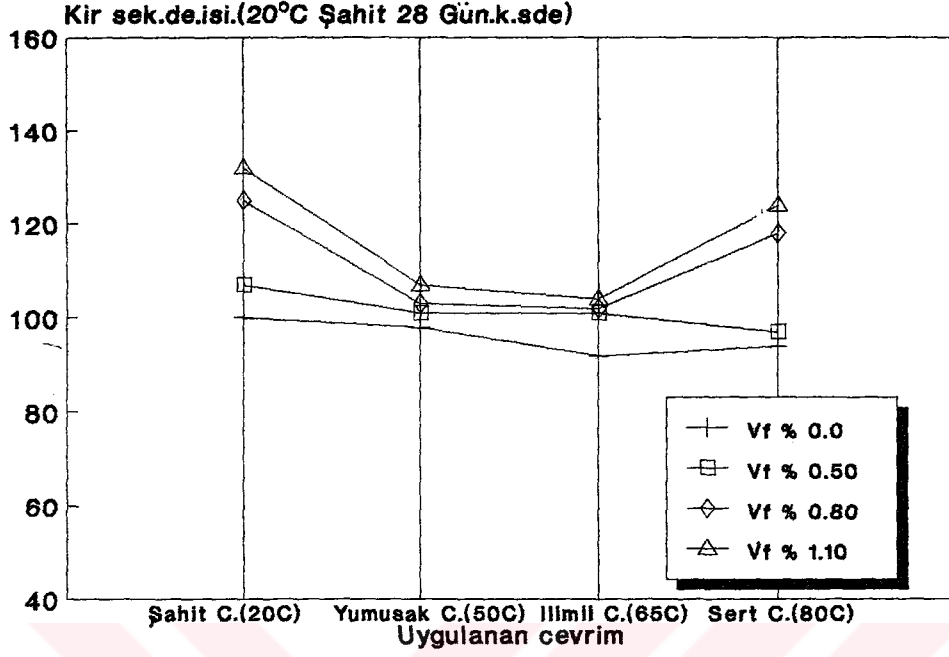
Şekil 4.48 90 Günlük Numunelerde Elastisite Modülünün Uygulanan Çevrim ile Değişimi



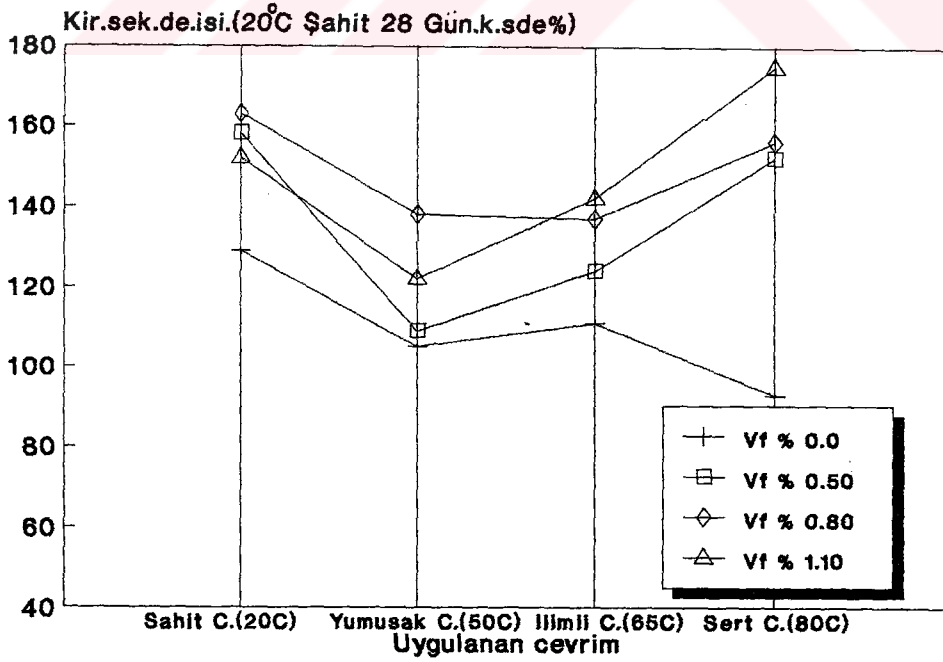
Şekil 4.49 28 Günlük Numunelerde Elastisite Modülünün Lif Miktarına Göre Değişimi



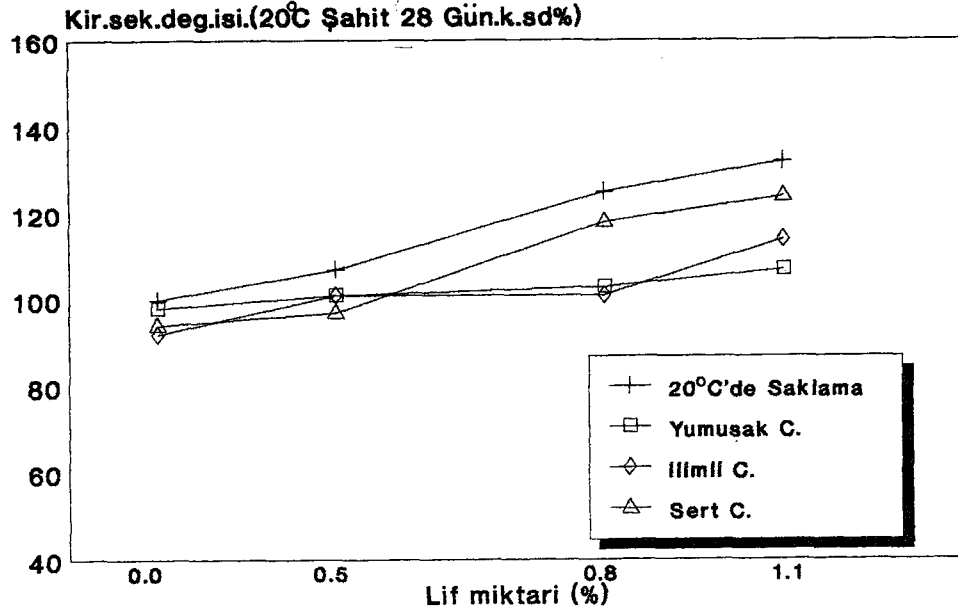
Şekil 4.50 90 Günlük Numunelerde Elastisite Modülünün Lif Miktarına Göre Değişimi



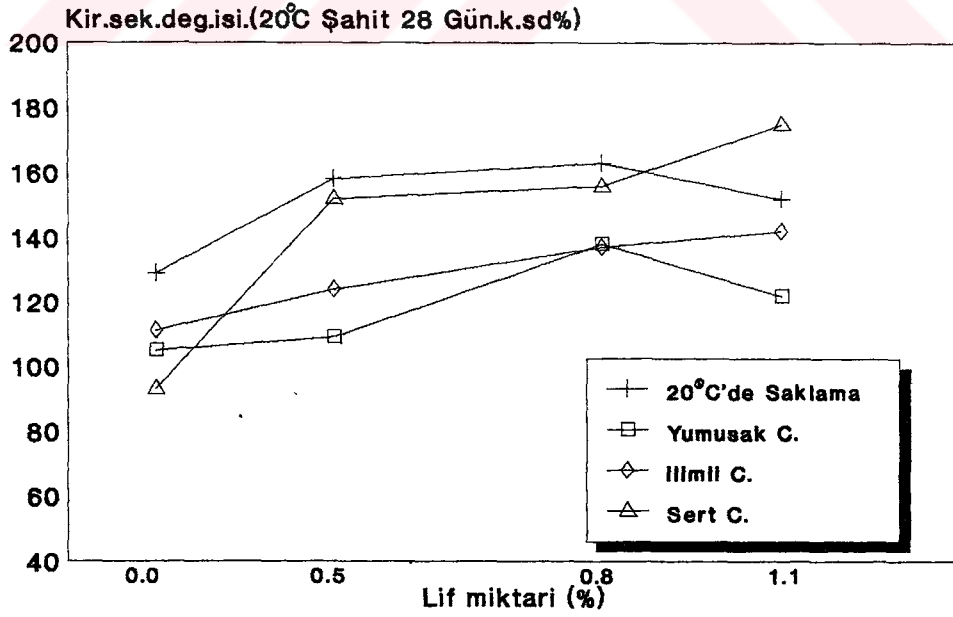
Şekil 4.51 28 Günlük Numunelerde Kırılma Şekil Değiştirme İşinin Uygulanan Çevrim ile Değişimi



Şekil 4.52 90 Günlük Numunelerde Kırılma Şekil Değiştirme İşinin Uygulanan Çevrim ile Değişimi



Şekil 4.53 28 Günlük Numunelerde Kırılma Şekil Değiştirme İşinin Lif Miktarına Göre Değişimi



Şekil 4.54 90 Günlük Numunelerde Kırılma Şekil Değiştirme İşinin Lif Miktarına Göre Değişimi

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

5.1 Taze Beton Özellikleri İle İlgili Sonuçlar

- 1) Betona katılan lifler, Karışımın Ve-Be ve Ters koni sürelerini artırmakta, çökme değerini azaltmaktadır.
- 2) Betona lif katılması boşlukların dağılımını değiştirmekte ve genellikle boşluk miktarını artırıcı yönde etki yapmaktadır.
- 3) Betona katılan lif miktarının artması taze betonun birim hacim ağırlığının artmasına neden olmaktadır.

5.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri İle İlgili Sonuçlar

5.2.1 Kompozitte Lif-matrix Aderans Dayanımı İle İlgili Sonuçlar

- 1) Isıl işlemler, 1 günlük numunelerin aderans dayanımını 20°C ye göre daha fazla artırmaktadır. Bu sonuç ısıtma işlemi görmüş numunelerde matriks dayanımı gelişme hızının kompozit dayanımına göre daha yüksek olmasına bağlanabilir.
- 2) 28 ve 90 günlük numunelerde ise aderans dayanımı 20°C lik kür şartlarında daha yüksek çıkmaktadır. Yani ileriki yaşlarda betona katılan liflerden dolayı artan kusurlar ısıtma işlemi uygulamasıyla birlikte dahada etkili olduğu söylenebilir.

3) Aderans dayanımı gelişme hızı erken yaşlarda artarken 28. günden itibaren azalmaktadır.

5.2.2 Eğilme Mukavemeti İle İlgili Sonuçlar

1) Isıl işlem görmüş şahit ve lifli betonlarda 1. günde 20°C ye oranla sağlanan dayanım artışı 28. günde de devam edebilmektedir. 90 günlük numunelerde ise azalma görülmektedir. Azalmanın 90. günde ortaya çıkması numunelerin saklandığı ortam şartlarına bağlanabilir.

2) Şahit ve lifli betonların 1 günlük eğilme mukavemetlerinde görülen artış hızı ısıtma işlem sıcaklığı 50°C den itibaren azalmaktadır.

3) Isıl işlem uygulamasının 1 günlük numunelerdeki mukavemeti artırıcı etkisi, betona katılan lif miktarının artışına bağlı olarak azalmaktadır.

4) Isıl işlemlerin şahit ve lifli betonların 90. gündeki eğilme mukavemetleri üzerine yaptığı etki hemen hemen aynı olmaktadır.

5) Betona katılan lif miktarının artması, hem 20°C de hemde ısıtma işlem görmüş numunelerde erken ve ileriki yaşlardaki eğilme mukavemetini artırmaktadır. Ancak liflerin mukavemeti artırıcı etkisi, 20°C lik kür şartlarında daha fazla olmaktadır.

6) 1., 28 ve 90 günlük numunelerde eğilme mukavemetleri, lif yüzdesi artışına bağlı olarak artmakta, ancak betonun yaşı ilerledikçe liflerin eğilme mukavemeti artışına etkisi azalmaktadır.

5.2.3 Basınç mukavemeti ile ilgili sonuçlar

1) Isıl işlem uygulaması şahit, ve lifli betonların 1 günlük basınç mukavemetlerini, eğilme mukavemetinde olduğu gibi artırmaktadır.

2) Isıl işlem uygulamasının 1 günlük numuneler üzerindeki mukavemeti artırıcı etkisi eğilme dayanımına göre, basınç mukavemetinde daha fazla olmaktadır.

3) Şahit ve lifli betonların 1 günlük basınç mukavemetlerinde görülen mukavemet artış hızı, eğilme mukavemetine benzer şekilde ısıtma işlem sıcaklığı 50°C den itibaren azalmaktadır.

4) Isıtma işlem uygulamasının 1 günlük numunelerin basınç mukavemetlerini artırıcı etkisi betona katılan lif miktarına bağlı olarak azalmaktadır. Bunun nedeni betona katılan liflerden dolayı artan kusurlar yüksek ısıtma işlem sıcaklıklarında kendini daha belirgin göstermesine bağlanabilir.

5) Isıtma işlem görmüş ve 20°C de saklanan numunelerin basınç mukavemetleri, eğilme mukavemetindeki davranışa benzer biçimde betona katılan lif miktarı arttıkça artmaktadır. Ancak bu artış 20°C lik kuru şartlarında ve 50°C de sürekli olurken 65°C ve 80 °C lik sıcaklıklarda lif yüzdesi 0.25 den itibaren mukavemet artışı azalmaya başlamakta ve lif yüzdesi 0.8 den itibaren azalma daha belirginleşmektedir.

6) 20°C lik kuru şartlarında 1., 28 ve 90 günlük numunelerin basınç mukavemetleri lif miktarı artışına bağlı olarak artmaktadır.

7) Isıtma işlem uygulamasında ,şahit numunelerin 28 ve 90. günlerdeki basınç mukavemetleri 20°C ye oranla sabit kalmasına rağmen, lifli betonların mukavemetleri azalmaktadır.

8) Liflerin basınç mukavemetini artırıcı etkisi 1. günde olduğu gibi, 28 ve 90. günlerde hem 20°C lik kuru şartlarında hemde ısıtma işlem görmüş numunelerde artmaya devam etmektedir. Ancak bu etkinin 20°C de ısıtma işleme göre daha fazla olması, ısıtma işlemin ileriki yaşlardaki mukavemet artışı üzerine olumlu etkisinin lifli betonlarda azalmakta olduğunu göstermektedir.

9) Liflerin mukavemeti artırıcı etkisi ısıtma işlem sıcaklığı yükseldikçe 1. günde hem eğilmede hem basınçta azalmasına karşılık, ileriki yaşlarda eğilme mukavemetinde sabit kalırken basınç mukavemetinde azalma devam etmektedir.

10) 20°C ve ısıtma işlem uygulamasında maksimum eğilme mukavemeti lif yüzdesi 1.0 olan betonlarda sağlanırken, basınç mukavemeti için en olumlu sonuç lif yüzdesi 0.8

olan betonlara ısıtma işlemi uygulanmasıyla elde edilmektedir.

5.2.4 Ultrases hızı ile ilgili sonuçlar

1) Isıtma işlemi uygulaması şahit ve lifli betonların 1 günlük ultrases hızlarını 20°C ye oranla artırmaktadır. Ultrases hızındaki artış hızı ısıtma işlemi sıcaklığı 50°C den itibaren azalmaktadır.

2) Betona katılan lif miktarının artması, 1 günlük numunelerin ultrases hızlarını 20°C lik kuru şartlarında artırırken ısıtma işlemlerinde azaltmaktadır.

3) Isıtma işlemi uygulamasının lifli betonların 1 günlük ultrases hızlarına yaptığı etki, eğilme ve basınç mukavemetindeki etkiye benzer biçimde olmaktadır. Bu da ultrases hızı ile basınç mukavemeti arasında bir ilişkinin olabileceğini göstermektedir.

4) Isıtma işlemi uygulaması 28 ve 90. günlerde şahit numunelerin ultrases hızlarını 20°C ye göre değiştirmezken, lifli betonların ultrases hızlarını azaltmaktadır. Bu etkileme şeklinin genellikle basınç mukavemetini etkileme şekline yakın olması, mukavemetlerin belirlenmesinde ultrases hızı ölçümlerinin anlamlı sonuçlar vereceğini göstermektedir.

5) 28 ve 90. günlerde hem 20°C de hemde ısıtma işlemlerinde genel olarak lif miktarının artmasıyla ultrases hızları azalmaktadır. Ancak, 20°C de 90 günlük numunelerde basınç mukavemetinin tersine ultrases hızları lif miktarının artışına bağlı olarak artmaktadır.

5.2.5 Kılcallık ile ilgili sonuçlar

1) Hem şahit hemde lifli betonlarda ısıtma işlemi sıcaklığı yükseldikçe kılcallık azalmakta, görünen porozite artmaktadır. Bu durum ısıtma işlemi uygulamasının betonun kılcal boşluk boyutlarını büyütmesine bağlanabilir.

2) 20°C de saklanan ve ısıtma işlemi görmüş numunelerde lif miktarı arttıkça kılcallık azalmakta, görünen porozite artmaktadır. Bu sonuç betona katılan liflerin betondaki kılcal boşlukların sürekliliklerini bozmasına bağlı olduğunu göstermektedir.

3) Isıl işlem sıcaklığı yükseldikçe lifli betonlarda kılcallığın azalması, şahit numuneye göre daha az olmaktadır.

5.2.6 Betonun kısa süreli basınç altındaki davranışı ile ilgili sonuçlar

1) 28 ve 90 günlük şahit ve lifli betonlarda ısıtma işlem sıcaklığı yükseldikçe süreksizlik sınırlanmaktadır. Bu azalma basınç dayanımına oranla süreksizlik sınırında daha fazla olmaktadır. Bu durum ısıtma işlemin oluşturduğu kusurların lif-matrix ara yüzeylerini daha fazla etkilemesine bağlanabilir.

2) 20°C de saklanan ve ısıtma işlem görmüş numunelerde süreksizlik sınırı lif miktarı artışına bağlı olarak azalmaktadır. Betona katılan lif miktarının artmasıyla, yeni lif-matrix arayüzeylerinin ortaya çıkması, bu arayüzeylerinde oluşan mikro çatlaklar kusur etkisi yaparak ilk çatlak dayanımını azaltmasına neden olduğu söylenebilir.

3) Isıtma işlemlerinde olduğu gibi lif miktarı artışı süreksizlik sınırını basınç dayanımına oranla daha fazla azaltmaktadır. Bunun sebebi de liflerin ilk çatlak dayanımından sonraki bölgede çatlakların büyümesini geciktirmesi sonucu, iyileştirici yönde fonksiyon göstermesine bağlanabilir.

4) Hem ısıtma işlemler hemde lif miktarı artışının betonun iç yapısında oluşturduğu kusurlar süreksizlik sınırını basınç dayanımına göre daha fazla etkilediği ortaya çıkmaktadır.

5) 28 ve 90 günlük numunelere ait süreksizlik sınırı/basınç dayanımı oranları hem ısıtma işlemlerden hemde lif miktarı artışından süreksizlik sınırına benzer şekilde etkilenmiştir.

6) Isıtma işlemler ve lif miktarı artışı, şahit ve lifli betonların çözülme sınırını basınç dayanımına göre aynı yönde etkilediği görülmektedir.

7) 20°C ve ısıtma işlem görmüş numunelerin çözülme sınırı üzerine lif miktarı artışının olumlu etkisi görülmüştür. Bu da liflerin ilk çatlak dayanımından sonraki bölgede iyileştirici yönde fonksiyon göstermesine bağlanabilir.

8) Şahit ve lifli betonların basınç dayanımındaki şekil değiştirme oranlarına ısıtma işlemlerin önemli bir etkisi olmamıştır. Buna karşılık 20°C de ve ısıtma işlem görmüş numunelerde lif miktarı artkça basınç dayanımındaki şekil değiştirme oranları artmaktadır.

9)Şahit ve lifli betonların 28 ve 90. günlerdeki elastisite modülleri ısıtma işlem sıcaklığı yükseldikçe 20°C'ye oranla azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum ısıtma işlemin oluşturduğu kusurlara bağlanabilir.

10) 20°C de saklanan ve ısıtma işlem görmüş numunelerde elastisite modülleri lif miktarı artkça azalmaktadır. Bu azalmanın nedeni de lif miktarının artmasından meydana gelen boşluklu yapının beton iç yapısını zayıflatmasına bağlanabilir.

11) 28 ve 90 günlük şahit ve lifli beton numunelerin kırılma şekil değiştirme işi ısıtma işlem uygulamasında azalma eğilimi gösterirken, 20°C de ve ısıtma işlemlerde lif miktarının artması sonucu kırılma şekil değiştirme işi artmaktadır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçları göz önüne alarak ileride yapılabilecek araştırmalardan bir kaç aşağıda verilmektedir.

1) Bu çalışmada beton karışımlarına katılan lifin şekli, boyutu ve narinlik oranı sabit seçilmiştir. Dolayısıyla lif tipi ve miktarının değişmesi durumunda ısıtma işlem çevrimlerinin beton özelliklerini ne yönde etkilediği incelenmelidir.

2) Bu araştırmada saklama koşullarının ısıtma işlem görmüş numunelerin ilk ve ileriki yaşlardaki mukavemet gelişimlerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bu sebeple farklı saklama koşullarının ısıtma işlem uygulanmış beton özelliklerini nasıl etkilediği de araştırılmalıdır.

3) Lif miktarının mukavemeti artırıcı etkisinin ısıtma işlem görmüş betonlarda zamana göre nasıl değiştiği de daha kapsamlı ve sistematik olarak incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] ACI Committee 544., "State-of-The-Art Report on Fiber Reinforced Concrete", Concrete International, pp. 9-25, May (1982).
- [2] RILEM Teknik Committee 19-FRC. "Fiber Concrete Materials", RILEM, V. 10, No. 56, pp.103-120, (1977).
- [3] CİMLİ, T., "Lif Donatılı Betonlarda Matrix-Lif Aderansı", Türkiye İnşaat Müh. 7. Teknik Kongresi, Ankara (1978).
- [4] ROMUALDI, J.P., MANDEL, J.A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closed Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement", ACI. Proceedings 61, pp.667-670,(1964)
- [5] SWAMY, R.N., "Fiber Reinforcement of Cement and Concrete", RILEM, Materials and Structures, V. 8, No. 45, pp. 235-253, (1975).
- [6] BEKAERT., (Broşür) "Dramix Steel Fiber for Concrete Reinforced", June (1989).
- [7] ÖZTEKİN, E., "Beton Sertleşmesinin Hızlandırılmasında Kullanılan Isıl İşlemler. Eğilme Dayanımına Etkileri", Doç. Tezi, K.T.Ü, (1977).
- [8] SWAMY, R.N., MANGAT, P.S., "Influence of Fibre-Aggregate Interaction on Some Properties of SFRC", RILEM, Materials and Structures, V. 7, No.41, pp. 307-313 (1974).
- [9] SOROUSIAN, P., BAYASI, Z. "Fiber-Type Effects On The Performance of SFRC", ACI. Materials Journal, V.88, No.2, pp.129-136, (1991).
- [10] ACI Committee 517., "Recommended Practice For Atmospheric Pressure Steam Curing of Concrete", ACI Journal V.66, pp. 629-645 (1969).
- [11] HUGHES, B.P., FATTUHI, N.I. , " The Workability of SFRC", Magazine of Concrete Research, V.28, No. 96., pp.157-161, Sept. (1976).
- [12] SWAMY, R.N., "Fiber Reinforced Cement and Concrete", RILEM, Materiaux et. Cons., V.9, No.53, (1975).

- [13] CRAIG, J.R., "Structural Applications of FRC", Concrete International pp. 28-32, Dec. (1984).
- [14] MANGAT, P.S., AZARI, M.M., "Compression Creep Behaviour of SFR Composites", RILEM, V. 19, No.113, pp.361-370, (1986)
- [15] EZELDIN, A.S., LAVE., S.R., "Mechanical Properties SFRC Rapid-Set Materials", ACI Materials Journal, pp.384-389, (1991).
- [16] CHEN, W.I., CARSON, J.L., "Stress-Strain Properties of Random Wire Reinforced Concrete", ACI Journal, pp.933-936, Dec (1971).
- [17] SHAH, S.P., NAAMAN, A.E., "Mechanical Properties of Glass and Steel Reinforced Mortar", ACI Journal, pp.50-53, Jan (1976).
- [18] SHAH, S.P., RANGAN, B.V., "Fiber Reinforced Concrete Properties", ACI Journal, pp. 126-135, Feb(1971).
- [19] SNYDER, M.J., LANKART, D.R., "Factors Affecting the Flexural Strength of Steel Fibrous Concrete", ACI. Journal, pp. 96-100, Feb(1972).
- [20] WILLIAMSON, G.R., "The Effect of Steel Fiber On the Compressive Strength of Concrete", ACI. Publication SP-44/11, pp.195-207, (1974).
- [21] BEKAERT., (Broşür) "Steel Fiber Reinforced Concrete", I.B.B.C., Oct (1988).
- [22] HARRIS, B., WARLOW, J., ELLIS, C.D., "The Fracture Behaviour of FRC", Cement and Concrete Research, V.12, pp. 447-461, (1972).
- [23] TANIGAWA, Y., HATANAKA, S., "Stress-Strain Relations of SFRC Under Repeated Compressive Load", C.C.R., V.13, PP. 801-808. (1983).
- [24] TAYLOR. M.A., TAL, M.K., "Biaxial Compressive Behaviour of Fiber Reinforced Mortar", ACI Journal, pp. 496-501, Sept. (1975).
- [25] TRAINE, L.A., MANSOUR, J.A., "Biaxial Strength and Deformational Behaviour of plain and SFRC", ACI Journal, pp. 96-100, February (1972).
- [26] KÖRMELING, H.A, REINHARDT., "Strain Rate Effects On SFRC in Uniaxial Tension", The Int. Journal of Cem. Composites and Light Weight Concrete, V.9, No.4, pp.197-204.
- [27] PURKISS, J.A., "Steel Fibre Reinforced Concrete of Elevated Temperatures", Int. Journal of Cem. Composites and Lightweight Concrete, Vol. 6, No.3, pp.179-163, August (1984).

- [28] PURKISS, J.A., "Toughness Measurements on SFC at Elevated Temperatures", *Int. Journal of Cem. Composites and Lightweight Concrete*, vol.10, No.1, pp.39-47, February (1988).
- [29] FAIYADH, F.I. AUSI. M. A., "Effect of Elevated Temperature and Method of Recooling on The Compressive Strenght of Plain and FRC", *Fibre Reinforced Concrete*, September (1986).
- [30] HOLLIDAY, L., "Composite Materials" Elsevier Publishing Company, Amsterdam (1966).
- [31] NICHOLLS, R., "Composite Construction Materials Handbook", Prentice HALL International, Englewood Cliffs, Newjersay, (1976)
- [32] HANNANT, D.J., "Fiber Cements and Fibre Conceretes, Jahwiley and Sons, Chichester-Newyork, (1978).
- [33] KAMESWARA, RAO, C.V.S., "Effectiveness of Random Fibres in Composites", *Cement and Concrete Research*, V.1.9., No. 6, pp-685-693, (1979).
- [34] GÖKÖZ, N.Ü., "Önyorulmanın Yalın ve İnce Tellerle Donatılı Betonların Özelliklerine etkisi", Dr. Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, (1978).
- [35] SWAMY, R.N., MANGAT, P.S., "The Interfacial Bond Stress İn Steel Fiber Cement Composities", *Cement and Concrete Research*, Vol.6 No:6, pp.641-650, (1976).
- [36] UYAN, M., "Isıl İşlem Uygulaması ile Birlikte Katkı Kullanımının Beton Özelliklerine Etkileri", Doç. Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fak. Mart (1982).
- [37] KARAGÜLER, M.E., "Isıl İşlem Parametrelerinin Hafif Beton Özelliklerine Etkisi", Dr. Tezi, İ.T.Ü., İnşaat Fakültesi, Temmuz, (1988).
- [38] YILMAZ, K., "Isıl İşlem Görmüş Hafif Betonların Değişken Yükler Altında Zamana Bağlı Davranışları", Dr. Tezi, İ.T.Ü., İnşaat Fak. Mayıs (1988).
- [39] ÖZTEKİN, E., "Beton Sertleştirilmesinin Hızlandırılmasında Isıl İşlem Çevrimi ve Çimento Seçimi.," Türkiye İnşaat Müh. 7. Teknik Kongresi, Ankara, (1978).
- [40] ACI Committee 516., "High Pressure Steam Curing Modern Practice and properties of Autoclaved Products", *Journal of the ACI proceed.* V.62 pp. 869-907, Aug. (1965).
- [41] State-Of-The-Art- Report., "Heat Treatmend of Concrete", Befonwork+Fertigteil-Technic, Helf. 9, pp.610-617, (1985).

- [42] HURSE, R.W., "Steam Curing of Concrete", Magazine of Concrete Research, pp. 79-89, June (1949).
- [43] COPELAND, L.E. KANTRO, D.L. WERBECK. G., "Chemistry of Hydration of Portland Cement", Int. symp. on the Chemistry of cement, Washington, (1960).
- [44] T.S. 3948., "Ön Yapımlı Beton Elemanlara Atmosfer Basıncı Altında Buhar Kuru Uygulanması Kuralları", T.S.E., Ankara, Nisan (1984).
- [45] ACI Committee 517., "Low Pressure Steam Curing", Journal of The ACI. Proceedings, V.60, pp. 953-986 (1963).
- [46] UYAN, M., "Betona Isıl İşlem Uygulamasının Beton Özelliklerine Etkisi ve Beton Borular İçin Isıl İşlem Uygulama Esasları" Beton Semineri, D.S.I., Araştırma Sitesi, Ankara, pp. 139-150, Şubat, (1984).
- [47] ACI Committee 517., "Accelerated Curing of Concrete of Atmospheric Pressure", State of Art., Journal of The ACI proceeding, V.77., Decem. pp.428-449 (1980).
- [48] T.S. 3526., "Beton Agregalarında Özgürlük ve Su emme Oranı Tayini" T.S.E, Aralık, (1980).
- [49] T.S. 706, "Beton Agregaları" T.S.E. Aralık, (1988).
- [50] T.S 3527, "Beton Agregalarında İnce Madde Oranı Tayini", T.S.E, Aralık, (1980).
- [51] PAPADAKIS, M., BRESSON, J., "Contribution a l'Etude du Facteur de Maturité des Liants Hydrauliques Manufacture", Revue de Matériaux de Construction, No. 678, pp. 18-22, Mars (1973).
- [52] ASTM C 1018/85 Annual Book of ASTM Standarts., Vol. 04.02
- [53] T.S. 3624, "Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık Su emme ve Boşluk Oranı Tayini Metodu", T.S.E Aralık, (1980).
- [54] UYAN, M., "Beton ve Harçlarda Kılcalık olayı", Dr. Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, (1975).
- [55] OKTAR, O.N., "Bağlayıcı Hamurun Yapısına Betonun Kısa Süreli İnelastik Davranışındaki İşlevi", Dr. Tezi, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi., (1977).
- [56] POSTACIOĞLU. B., "Cisimlerin yapısı ve Özellikleri", Cilt 1, İ.T.Ü Kütüphanesi, sayı 1176. (1981).
- [57] TAŞDEMİR, M.A., "Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları", Doktora Tezi, İ.T.Ü İnşaat Fak. (1982).

- [58] HUGHES, B.P. ve FATTUHI, N.I., "Stress-Strain Curves for FRC in Compression", Cement and Concrete Research. V.7, S. 173-184 (1977).
- [59] AKMAN, M.S., "İri Agrega-Kum Oranının Betonun iç yapısı ve Özelliklerine Etkisi", Doçentlik Tezi, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, (1972).
- [60] NURSE, R.W., "Chemical Fundamentals and Methods of Accelerated Hardening of Concrete", RILEM, Moskova, (1964).
- [61] HANSON, J.A., "Optimum of Steam Curing Procedure In Precasting Plants", Journal of ACI, Proceeding, Vol. 60, January, pp.75-100, (1963).
- [62] SAEMAN, WARREN, WASHA, "The Effect of Curing on the Properties Effecting Shrinkage Cracking of Concrete Block", J.ACI, May., (1955).
- [63] BALAGURU, P., and SHAH., S.P., "Fiber Reinforced Cement Composites", (1992).
- [64] OKTAR, O. N., MORAL, H., AKYÜZ, S., "Beton ve Harçların Basınç Altındaki Kısa Süreli Davranışındaki Çimento Hamuru Yapısı ve Agrega Granülometrisinin Etkileri", İ.T.Ü., İnşaat Fak. Teknik Rapor No:44 (1984).
- [65] SHAH, S.P., CHANDRA, S., "Critical Stress, Volume Change and Microcracking of Concrete", Journal of ACI V.65, No:9, pp.770-781, September (1968).
- [66] TOKYAY, M., RAMYAR, K., TURANLI, L., "Polipropilen ve Çeliklifle Yüksek Dayanımlı Betonların Basınç ve Çekme Yükleri Altındaki Davranışları", II. Ulusal Beton Kongresi, (1991).
- [67] SWAMY., R.N., and MANGAT., P.S., "A Theory For the Flexural strength of steel Fiber Reinforced Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 4, pp.313-325, (1974).

ÖZGEÇMİŞ

Osman ÜNAL, 1961 yılında Afyon ili Dinar ilçesinde doğdu. İzmir ili Torbalı ilçesinde 1972 yılında ilkokul, 1975 yılında ortaokul ve 1978 yılında da Torbalı lisesinde öğrenimini tamamladı.

1979-1983 yılları arasında Lisans öğrenimini tamamlayarak Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başlıyarak Şubat 1986 yılında Yüksek İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. Nisan 1986 yılından sonra Yedek Subay olarak askerlik görevini tamamladı.

1984 yılında Isparta Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı'na Araştırma Görevlisi olarak girdi ve halen bu göreve devam etmektedir.