

168877

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME
KİRİŞLERİN BURULMA DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Serkan ENGİN

Anabilim Dalı – İnşaat Mühendisliği

Danışman – Yrd. Doç. Dr. Fuad OKAY

TEMMUZ 2005

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK LİF ile GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME
KİRİŞLERİN BURULMA DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Serkan ENGİN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Mayıs 2005

Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Temmuz 2005

Tez Danışmanı

Yrd.Doç.Dr.Fuad OKAY

(.....)



Üye

Yrd.Doç.Dr.Şevket ÖZDEN

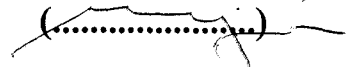
(.....)



Üye

Yrd. Doç. Dr.Cem YALÇIN

(.....)



ÇELİK LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN BURULMA DAVRANIŞI

Serkan ENGİN

Anahtar Kelimeler: Burulma, Betonarme, Kiriş, Çelik Lif, Dönme Açısı, Çatlak Genişliği

ÖZET: Burulma momentinin etkidiği yapı elemanlarına, kesme kuvveti nedeniyle oluşan kayma gerilmesinden farklı olarak, burulma momenti sebebiyle de ilave kayma gerilmeleri etkir. Betonun kesme dayanımı basınç dayanımına göre daha küçüktür. Ancak çekme dayanımı, kesme dayanımına göre çok daha düşük olduğu için, basit kesme durumunda bile, çatlak oluşumu kesme gerilmelerinin sebep olduğu, çekme gerilmeleri nedeniyle olmaktadır. Hiperstatik bir sistemde yapı elemanına etkiyen burulma momentinin malzemenin doğrusal elastik davrandığı varsayımına göre hesabı gerçekçi sonuçlar vermemektedir. Burulma nedeni ile çatlayan betonarme bir elemanın burulma rijitliği büyük ölçüde azaldığı için, sistemde yeni oluşan yük dağılımı ile, çatlama öncesi yük dağılımı arasında ihmal edilemeyecek oranda farklılıklar oluşmakta ve bu noktadan sonra malzemenin doğrusal elastik davrandığı varsayımı ile hesaplanan burulma momentleri, gerçekte oluşan değerlerinin çok üstünde çıkmaktadır.

Bu çalışma tasarım aşamasındaki betonarme kirişlerin, betonun çekme dayanımına olumlu etkisi olduğu bilinen çelik liflerin betona ilavesi ile burulma davranışının iyileştirilmesini hedeflemektedir. Deneysel çalışmada, iki farklı beton kalitesi, iki farklı boy donatı çapı kullanılmış, dört farklı lif tipi, iki farklı yüzde ile betona ilave edilerek betonarme kirişler basit burulmaya maruz bırakılmış ve kirişlerin burulma kapasitesi, dönme açısı ve çatlak genişliğindeki değişimler incelenmiştir.

TORSIONAL BEHAVIOUR OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS

Serkan ENGİN

Keywords: Torsion, Reinforced Concrete, Beam, Steel Fibre, Angle of Twist, Crack Width

ABSTRACT: Additional shearing stresses due to the twisting moment effect the structural elements that are subjected to torsion, other than the shearing forces. Shear strength of concrete is much less than its compressive strength. However, because of this fact, crack formation occurs because of the tensile stresses due to the shear even in the simple shearing case. Torsion analysis based on the assumption that linear elastic behavior of the material does not give realistic results. Since the torsional rigidity of a reinforced concrete element which is cracked due to torsional loadings, is highly decreased; great differences that can not be ignored between the stress distributions before and after cracking occur and after this point the moments calculated based on the assumption that the linear elastic behavior of the material are found to be much greater than the real moments that are formed.

This study aims to improve the torsional behavior of the reinforced concrete beams by adding steel fibres of which its positive effect in tensile strength is known. Two different strength types of concrete, two different diameters of longitudinal reinforcement, four different types of steel fibre, two different volume percentage of steel fibres are used as variables of the experimental study. The reinforced concrete beams are then subjected to torsion and their torsional capacity angle of twist and variations in the crack width are investigated.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde çelik lif ilavesi ile burulma davranışının nasıl değiştiğini incelemek için yapılan bu çalışma, Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Fonu ve Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. kurumları tarafından sağlanan maddî destek ile gerçekleştirilmiştir. Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Fonu yetkililerine ve Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş teknik müdürü Sayın Mehmet YERLİKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tüm öğrenim hayatım boyunca, desteğini esirgemeyen aileme, yüksek lisans öğrenimim boyunca uygun çalışma ortamını sağlayan ve her konuda bana yol gösteren tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Fuad OKAY ve Yrd. Doç. Dr. Şevket ÖZDEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Deney numunelerinin üretilmesi ve deneylerin yürütülmesi sırasında, yardımlarını gördüğüm yapı ve yapı malzemeleri araştırma görevlilerine ve bazı inşaat mühendisliği lisans öğrencilerimize katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xv
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Basit Burulmanın Oluşum Mekanizması	4
2.2 Kesitlerin Burulma Dayanımı	11
2.3 Çelik Lif İlavesinin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi	21
2.4 Burulma Deneyleri	26
BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA	30
3.1 Malzemeler	30
3.1.1 Agregalar	30
3.1.2 Çimento	30
3.1.3 Süperakışkanlaştırıcı ve hiperakışkanlaştırıcı	32
3.1.4 Donatı Çeliği	32
3.1.5 Çelik Lif	34
3.2 Deney Değişkenleri ve Numunelerin Adlandırılması	35
3.2.1 Deney değişkenleri	36
3.2.2 Numunelerin adlandırılması	37
3.3 Beton Karışımları	38
3.4 Deney Numunelerinin Üretilmesi	39

3.5 Deney Aşaması	43
3.5.1 Beton deneyleri	43
3.5.2 Donatı çeliği çekme deneyi	46
3.5.3 Burulma deneyleri	46
BÖLÜM 4. DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER	49
4.1 Numunelerin Çatlak Dağılımları	49
4.2 Deneylerden Elde Edilen Veriler	50
4.2.1 Burulma momenti-birim dönme açısı ilişkileri	52
4.2.2 Burulma momenti-toplam çatlak genişliği ilişkileri	60
4.2.3 Birim boy uzaması-birim dönme açısı ilişkileri	64
BÖLÜM 5. DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	69
5.1 Numunelerin Çatlama Davranışlarının Değerlendirilmesi	69
5.2 Deneylerden Elde Edilen Grafiklerin Değerlendirilmesi	76
5.2.1 Burulma momenti-birim dönme açısı ilişkileri	76
5.2.2 Burulma momenti-toplam çatlak genişliği ve birim boy uzaması- birim dönme açısı ilişkileri	80
BÖLÜM 6. SONUÇ ve ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR	86
EKLER	88
Ek-A	88
Ek-B	91
Ek-C	126
ÖZGEÇMİŞ	136

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

A_c	: Kesitin alanı
A_e	: Burulma için çekirdek alan
A_0	: Kayma akısının takip ettiği yolun içinde kalan alan
A_{oh}	: Enine donatının merkezinden geçen eksenler arasında kalan alan
A_{sl}	: Kesitte, burulma için gerekli, toplam boyuna donatı alanı
$A_{sl,min}$: Burulma için gerekli minimum boyuna donatı alanı
A_t	: Enine donatının bir bacağına kesit alanı
b_w	: Dikdörtgen kesitin genişliği
d	: Çelik lifin çapı
d_b	: Boyuna donatı çapı
d_f	: Bond faktör, çelik lif lif tipi için katsayı
F	: Lif faktörü
f_{ck}	: Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{cd}	: Betonun hesap basınç dayanımı
f_{ctk}	: Betonun karakteristik çekme dayanımı
f_{ctd}	: Betonun hesap çekme dayanımı
f_{ctf}	: Betonun eğilme dayanımı
f_{ctt}	: Betonun yarma dayanımı
f_{cu}	: Betonun küp basınç dayanımı
f'_{sp}	: Betonun yarma dayanımı
f_{yk}	: Boyuna donatının karakteristik akma dayanımı
f_{yw}	: Enine donatının akma dayanımı
f_{yl}	: Boyuna donatının akma dayanımı
f_{ywk}	: Enine donatının karakteristik akma dayanımı
f_{ywd}	: Enine donatının hesap akma dayanımı
G_c	: Betonun kayma modülü
h	: Dikdörtgen kesitin yüksekliği

- k_2 : x_l, y_l ve m sayısına göre hesaplanan katsayı
 K : Elektronik komparatörlerden okunan, deformasyon değerleri
 l : Çelik lif boyu ya da önde ve arkada bulunan komparatörler arası mesafe
 L : Numune test bölgesi uzunluğu
 ΔL : Numune test bölgesi boy uzaması
 m : Kesit içi, donatı özelliklerine göre bulunan katsayı
 P_h : Enine donatının merkezlerinden geçen, eksenler arasında kalan alan
 s : Enine donatı aralığı
 R_0 : Çatlamamış kesitin burulma rijitliği
 R : Çatlamış kesitin burulma rijitliği
 T : Taşınan burulma momenti
 T_c : Kesitte betonun taşıdığı burulma momenti
 T_{cr} : Kesitin çatlama momenti
 T_e : Elastisite teorisinden hesaplanan, donatısız kesitin burulma kapasitesi
 T_f : Kesitte çelik lif katkısı ile taşınan burulma momenti
 T_{max} : Kesitin beton ezilmesi olmadan taşıyabileceği en büyük moment değeri
 T_{np} : Donatısız kesitin burulma taşıma kapasitesi
 T_p : Plastisite teorisinden hesaplanan, donatısız kesitin burulma kapasitesi
 T_n : Kesitin burulma kapasitesi
 T_s : Kesitte donatının taşıdığı burulma momenti
 T_u : Kesitin taşıdığı en büyük burulma momenti değeri
 U_c : Kesitin çevresi
 U_e : A_e alanının çevresi
 V_f : Betona ilave edilen çelik lif oranı
 x_b, x : Kesitin kısa kenarı
 x_l : Enine donatının merkezden merkeze kısa kenarı
 y_b, y : Kesitin uzun kenarı
 y_l : Enine donatının merkezden merkeze uzun kenarı
 α : St. Venant katsayısı
 α_p : Plastisite katsayısı
 β_i : y_i/x_i oranına bağlı katsayı
 σ_s : Boyuna donatıda oluşan gerilme
 σ_{sw} : Enine donatıda oluşan gerilme

- ε : Donatıda oluşan birim deformasyon
 Φ : Kesitin birim dönme açısı
 Φ_{cr} : Kesitin çatlama momentine karşı gelen, birim dönme açısı
 Φ_u : Kesitin taşıdığı en büyük momente karşı gelen, birim dönme açısı
 τ_t : Betonun kayma dayanımı
 θ : Basınç çubuklarının yatla yaptığı açı
 $\rho_{wt.min}$: Burulma için gerekli en az enine donatı oranı



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 İzostatik ve hiperstatik sistemlerde denge burulması.....	5
Şekil 2.2 Uygunluk burulması.....	5
Şekil 2.3 Basit burulma altındaki donatısız kirişin kırılması.....	6
Şekil 2.4 Basit burulma altındaki donatılı bir kirişte gözlenen çatlaklar.....	7
Şekil 2.5 Basit burulma altındaki betonarme kirişlerde burulma momenti-birim dönme açısı ilişkisi.....	8
Şekil 2.6 Enine ve boyuna donatılarda ölçülen birim uzamalar.....	10
Şekil 2.7 Elastisite ve plastisite göre kesitte burulma nedeni ile oluşan gerilme dağılımı.....	11
Şekil 2.8 Basit burulmada, plastisite teorisinden hesaplanan kayma gerilmelerinin, $\sqrt{f_{ck}}$ ile değişimi.....	12
Şekil 2.9 Dolu ve kutu kesitlerde taşınan burulma momenti-donatı oranı grafiği.....	15
Şekil 2.10 Dengeli kırılma durumunda burulma gerilmelerinin beton basınç dayanımı ile değişimi.....	20
Şekil 2.11 Çelik lif ilavesinin, yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımı üzerine etkisi.....	22
Şekil 2.12 Çelik lif ilavesinin, yüksek dayanımlı betonların yarma dayanımı üzerine etkisi.....	23
Şekil 2.13 Yüksek dayanımlı betonların gerilme- birim deformasyon.....	24
Şekil 2.14 Lif tipine göre yüksek dayanımlı hafif betonların basınç değişimi.....	25
Şekil 2.15 Çelik lifli, yüksek dayanımlı, hafif betonların yük-deplasman grafiği.....	25
Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan donatılar.....	33
Şekil 3.2 Deneylerde kullanılan çelik lifler.....	34
Şekil 3.3 Kullanılan çelik lifin geometrisi.....	34
Şekil 3.4 Deney değişkenlerinin şematik olarak gösterimi.....	36
Şekil 3.5 Deney numunesinin boyutları.....	40
Şekil 3.6 Hazırlanan numune kalıpları.....	40

Şekil 3.7 Deney numunesine donatı yerleşimi	41
Şekil 3.8 Test bölgesi dışı etriye sıkılaştırılması	42
Şekil 3.9 Eğilme numunesi kalıpları	43
Şekil 3.10 Beton basınç dayanımı deneyi	44
Şekil 3.11 Brezilya yarma deneyi	44
Şekil 3.12 Beton eğilme deneyi	45
Şekil 3.13 Elastisite modülü deneyi	45
Şekil 3.14 Çelik çekme deneyi	46
Şekil 3.15 Burulma deneyi düzeneği	47
Şekil 4.1 Deney numunesi üzerine komparatörlerin yerleşimi	50
Şekil 4.2 $l/d = 40$ olan lif tipinde lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi	54
Şekil 4.3 $l/d = 55$ olan lif tipinde lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi	54
Şekil 4.4 $l/d = 67$ olan lif tipinde lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi	55
Şekil 4.5 $l/d = 80$ olan lif tipinde lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi	55
Şekil 4.6 $V_f = \%0.3$ lif içeriğine sahip numunelerin, lif tipine göre $T - \Phi$ değişimi	56
Şekil 4.7 $V_f = \%0.6$ lif içeriğine sahip numunelerin, lif tipine göre $T - \Phi$ değişimi	56
Şekil 4.8 $d_b = 12$ mm boy donatı, $V_f = \% 0.3$ lif içeriğine sahip numunelerin, lif tipine göre $T - \Phi$ değişimi	57
Şekil 4.9 $f_{ck} = 60$ MPa ve $l/d = 40$ olan numunelerin lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi	57
Şekil 4.10 $f_{ck} = 60$ MPa ve $l/d = 55$ olan numunelerin lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi	58
Şekil 4.11 $l/d = 40$ ve $f_{ck} = 60$ MPa - $f_{ck} = 30$ MPa olan numunelerin, lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi	58
Şekil 4.12 $l/d = 55$ ve $f_{ck} = 60$ MPa - $f_{ck} = 30$ MPa olan numunelerin, lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi	59
Şekil 4.13 Boyuna donatısı $d_b = 8-12$ mm, $l/d = 40$ olan numunelerin, $T - \Phi$ ilişkisi	59
Şekil 4.14 Boyuna donatısı $d_b = 8-12$ mm, $l/d = 55$ olan numunelerin, $T - \Phi$ ilişkisi	60
Şekil 4.15 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d = 40$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği	61
Şekil 4.16 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d = 55$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği	61

Şekil 4.17 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=67$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği.....	62
Şekil 4.18 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=80$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği.....	62
Şekil 4.19 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $d_b=12$ çapında boy donatı içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği.....	63
Şekil 4.20 Yüksek dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=40$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği.....	63
Şekil 4.21 Yüksek dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=55$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği.....	64
Şekil 4.22 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=40$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği.....	65
Şekil 4.23 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=55$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği.....	65
Şekil 4.24 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=67$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği.....	66
Şekil 4.25 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=80$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği.....	66
Şekil 4.26 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $d_b=12$ çapında boy donatı içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği.....	67
Şekil 4.27 Yüksek dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=40$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği.....	67
Şekil 4.28 Yüksek dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=55$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği.....	68
Şekil 5.1 C1L1V0 numunesi test bölgesi çatlak dağılımı.....	70
Şekil 5.1 C1L1V0 numunesi test bölgesi çatlak dağılımı (devamı).....	71
Şekil 5.2 C1L1F2V1 numunesinde gözlenen basınç ezilmeleri.....	72
Şekil 5.3. C1L1F4V2 numunesi test bölgesi çatlak dağılımı.....	73
Şekil 5.3. C1L1F4V2 numunesi test bölgesi çatlak dağılımı (devamı).....	74
Şekil 5.4 C2L1V0 numunesinde oluşan aşırı çatlak genişlemesi.....	75
Şekil 5.5 C2L1F1V1 numunesinde oluşan aşırı çatlak genişlemesi.....	76
Şekil 5.6 $d_b=8$ mm çapında boyuna donatıya sahip, normal dayanımlı betonarme kirişlerde çelik lif ilavesinin burulma kapasitesine etkisi.....	79

Şekil 5.7 $d_b=12$ mm çapında boyuna donatıya sahip, normal dayanımlı betonarme kirişlerde çelik lif ilavesinin burulma kapasitesine etkisi.....	79
Şekil 5.8 $d_b=8$ mm boyuna donatıya sahip yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde çelik lif ilavesinin burulma kapasitesine etkisi.....	80
Şekil 5.9 Tüm numunelerin ortalama çatlak genişliği grafiği.....	82
Şekil A.1 Deneylerde kullanılan donatılara ait gerilme-birim deformasyon grafiği ($d_b=8$ mm).....	88
Şekil A.2 Deneylerde kullanılan donatılara ait gerilme-birim deformasyon grafiği ($d_b=12$ mm).....	89
Şekil B.1. C1L1V0 numunesi çatlak dağılımı.....	91
Şekil B.1. C1L1V0 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	92
Şekil B.2. C1L1F1V1 numunesi çatlak dağılımı.....	93
Şekil B.2. C1L1F1V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	94
Şekil B.3. C1L1F1V2 numunesi çatlak dağılımı.....	95
Şekil B.3. C1L1F1V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	96
Şekil B.4. C1L1F2V1 numunesi çatlak dağılımı.....	97
Şekil B.4. C1L1F2V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	98
Şekil B.5. C1L1F2V2 numunesi çatlak dağılımı.....	99
Şekil B.5. C1L1F2V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	100
Şekil B.6. C1L1F3V1 numunesi çatlak dağılımı.....	101
Şekil B.6. C1L1F3V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	102
Şekil B.7. C1L1F3V2 numunesi çatlak dağılımı.....	103
Şekil B.7. C1L1F3V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	104
Şekil B.8. C1L1F4V1 numunesi çatlak dağılımı.....	105
Şekil B.8. C1L1F4V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	106
Şekil B.9. C1L1F4V2 numunesi çatlak dağılımı.....	107
Şekil B.9. C1L1F4V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	108
Şekil B.10. C1L2V0 numunesi çatlak dağılımı.....	109
Şekil B.10. C1L2V0 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	110
Şekil B.11. C1L2F1V1 numunesi çatlak dağılımı.....	111
Şekil B.11. C1L2F1V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	112
Şekil B.12. C1L2F4V1 numunesi çatlak dağılımı.....	113
Şekil B.12. C1L2F4V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	114

Şekil B.13. C2L1V0 numunesi çatlak dağılımı	115
Şekil B.13. C2L1V0 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	116
Şekil B.14. C2L1F1V1 numunesi çatlak dağılımı.....	117
Şekil B.14. C2L1F1V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	118
Şekil B.15. C2L1F1V2 numunesi çatlak dağılımı.....	119
Şekil B.15. C2L1F1V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	120
Şekil B.16. C2L1F2V1 numunesi çatlak dağılımı.....	121
Şekil B.16. C2L1F2V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	122
Şekil B.17. C2L1F2V2 numunesi çatlak dağılımı.....	123
Şekil B.17. C2L1F2V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı).....	124
Şekil C.1 C1L1V0 numunesi çatlak grafiği.....	126
Şekil C.2 C1L1F1V1 numunesi çatlak grafiği.....	126
Şekil C.3 C1L1F1V2 numunesi çatlak grafiği.....	127
Şekil C.4 C1L1F2V1 numunesi çatlak grafiği.....	127
Şekil C.5 C1L1F2V2 numunesi çatlak grafiği.....	128
Şekil C.6 C1L1F3V1 numunesi çatlak grafiği.....	128
Şekil C.7 C1L1F3V2 numunesi çatlak genişliği.....	129
Şekil C.8 C1L1F4V1 numunesi çatlak grafiği.....	129
Şekil C.9 C1L1F4V2 numunesi çatlak grafiği.....	130
Şekil C.10 C1L2V0 numunesi çatlak grafiği.....	130
Şekil C.11 C1L2F1V1 numunesi çatlak grafiği.....	131
Şekil C.12 C1L2F4V1 numunesi çatlak grafiği.....	131
Şekil C.13 C2L1V0 numunesi çatlak grafiği.....	132
Şekil C.14 C2L1F1V1 numunesi çatlak grafiği.....	132
Şekil C.15 C2L1F1V2 numunesi çatlak grafiği.....	133
Şekil C.16 C2L1F2V1 numunesi çatlak grafiği.....	133
Şekil C.17 C2L1F2V2 numunesi çatlak grafiği.....	134

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Burulma için St.Venant katsayıları	13
Tablo 3.1 Kullanılan Agravaların Özellikleri	31
Tablo 3.2 Kullanılan Çimentonun Kimyasal Özellikleri	31
Tablo 3.3 Kullanılan Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	32
Tablo 3.4 Kullanılan Süperakışkanlaştırıcının Özellikleri	33
Tablo 3.5 Kullanılan Hiperakışkanlaştırıcının Özellikleri	33
Tablo 3.6 Kullanılan Çelik Liflerin Kimyasal Özellikleri	35
Tablo 3.7 Kullanılan Çelik Liflerin Geometrik Özellikleri	35
Tablo 3.8 Kullanılan Çelik Liflerin Mekanik Özellikleri	35
Tablo 3.9 Deney Numunelerinin Adlandırılması ve Özellikleri	38
Tablo 3.10 Deneylerde Kullanılan Beton Karışımları (1 m ³ için)	39
Tablo 4.1 Deney Verileri ve Elde Edilen Hesap Sonuçları	53

1. GİRİŞ

İnsanlığın doğuşu ile birlikte, doğanın olumsuz etkilerinden ve doğada yaşayan diğer canlıların zararlarından korunmak için insanoğlu barınma ihtiyacı duymuştur. Eski çağlarda oluşturulan barınaklar, ilkel yollarla oluşturulmuş basit yapılar olmuş ancak sonraları deneme yanılma yönteminin sonucu olan daha düzenli sayılabilecek yapılar yapılma yoluna gidilmiştir. İlerleyen zamanlarda fen bilimlerinde gerçekleşen ilerlemeler ışığında yeni yapı sistemleri uygulanmaya başlanmış ve 19. yüzyılda bağlayıcı olarak çimentonun bulunması ile beton yapı sistemleri oluşturulma yoluna gidilmiş ancak betonun basınç altında yük taşıma özelliğinin iyi olmasına rağmen, çekmedeki zafiyetinin anlaşılmasından sonra çekme yüklerini taşıyabilmesi için betonun içine çelik çubuklar yerleştirilerek betonarme adı verilen yapı sistemleri oluşturulmaya başlanmıştır. Betonarmede, beton ve çeliğin birlikte çalışması hedeflenmektedir, beton ve çeliğin ısı genleşme katsayılarının hemen hemen aynı olması, betonarmede ilave iç kuvvetlerin oluşmaması yani bu hedefin gerçekleşmesi yolunda hoş bir rastlantı olmuştur.

Betonarme yapı sistemleri, kendi ağırlığının fazla olması, kalıp ve kalıp işçiliğinin maliyetinin yüksek olması gibi olumsuz özelliklerine rağmen, diğer yapı sistemlerine göre daha ekonomik olması, mimari açıdan istenilen formun verilebilmesi, yangına karşı dayanıklılığı ve üretiminin kolay olması gibi avantajları sebebiyle, keşfedilmesinden günümüze kadar yaygın olarak kullanılmış ve daha uzun yıllar kullanılacağı öngörülen sistemlerdir.

Betonarme yapı sistemlerinde, sistemi oluşturan her yapı elemanı için yük yaşama durumuna göre deneysel veriler ışığında hesap yöntemleri geliştirilmiş ve elemanın kullanım ömrü boyunca karşılaşılabileceği olası yüklere karşı dizaynı sağlanabilmiştir. Yapı elemanları sistemde bulunduğu konuma göre kolon, kiriş, döşeme gibi isimler almakta ve eğilme, kesme, aksenal yük, burulma gibi zorlamaların birine ya da birkaçına birden maruz kalmaktadır.

Betonarme yapı sistemlerinin birdöküm özelliği nedeni ile yapı elemanlarının bazılarında eğilme, kesme gibi etkilere ilave olarak burulma momenti de etkimektedir. Burulma momenti sistemin geometrisinden ve simetrik olmayan yük uygulamalarından kaynaklanabilmektedir. Burulma genelde diğer etkilere oranla ihmal edilebilecek düzeydedir. Ancak burulma nedeniyle çatlayan bir kesitin burulma rijitliği önemli ölçüde azaldığı için, çatlama sonucunda sistemde, çatlama olmamış duruma göre ihmal edilemeyecek çapta farklılıklar oluşmakta ve bu aşamadan sonra malzemenin doğrusal elastik varsayımı gerçekçi sonuçlar vermemektedir.

Basit burulma pratikte, tek başına rastlanan bir yükleme değildir. Ancak kolonlardaki aksel yük durumu gibi bir sınır oluşturduğundan burulma ile beraber, birkaç yükün birden etkilediği haldeki davranışın bilinebilmesi için, yapı elemanına sadece basit burulma etkisinde oluşan davranışın bilinmesi gerekmektedir. Basit burulma etkisinde, eleman boyunca kayma gerilmeleri oluşmakta, ancak betonun kayma dayanımı, çekme dayanımına göre daha yüksek olduğu için basit kesme durumunda bile kırılma, kayma gerilmelerinin sebep olduğu asal çekme gerilmeleri nedeniyle olmaktadır.

Malzeme teknolojisinin gelişmesi ile her alanda olduğu gibi yapı sistemlerinde kullanılan malzemeler de gelişim gösterdi. Bu gelişim sonucu çelik lif, polipropilen lif gibi malzemelerin betona ilave edilmesi ile betonun, dolayısıyla betonarme yapı elemanlarının, zayıf olduğu bilinen çekme dayanımlarında gözle görülür iyileşmeler sağlanabilmiştir.

Betonun mekanik özelliklerinde elde edilen bu gelişmelerin yanı sıra, lif ilavesinin betonun gevrek davranışını bir miktar değiştirerek, betonarme yapı sistemlerinden beklenen sünek davranış açısından da olumlu etkileri meydana getirdiği bilinmektedir.

Betona ilave edilen liflerden biri olan çelik lifler, ısıya karşı dayanıklı olması, çekme dayanımlarının betona göre çok fazla olması, beton içine ankrajını sağlayan geometrik özelliklere sahip olması sonucu beton ile aderansını iyi sağlayarak

betonarme elemanlarda oluşabilecek çatlak genişliğini azaltması ve sünek bir davranışa olanak sağlaması gibi avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır. Ancak bu liflerin çok fazla ilavesinin, betonun kalıba yerleştirilmesinde oluşturacağı problemler göz ardı edilmemelidir. Çelik lif ilave edilmiş yapı elemanlarının eğilme, kesme gibi etkilere karşı daha iyi davranışlar sergilediği bilinmektedir. Asal çekme gerilmelerinin sebep olduğu burulma çatlamaının başlangıcı ve gelişiminin, dolayısıyla burulma kapasitesinin çelik lif ilavesi ile olumlu yönde değişiklik göstereceği bir gerçektir. Bu çalışmada betona çelik lif ilave edilerek üretilen betonarme kirişlerin burulma davranışının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde öncelikle burulmanın oluşumu anlatılmıştır. Daha sonra kesitlerin burulma davranışı, çelik lif katkısının betonun mekanik özelliklerine etkisi ve burulma deneyleri konularında yapılmış çalışmalar incelenmiştir.

2.1 Basit Burulmanın Oluşum Mekanizması

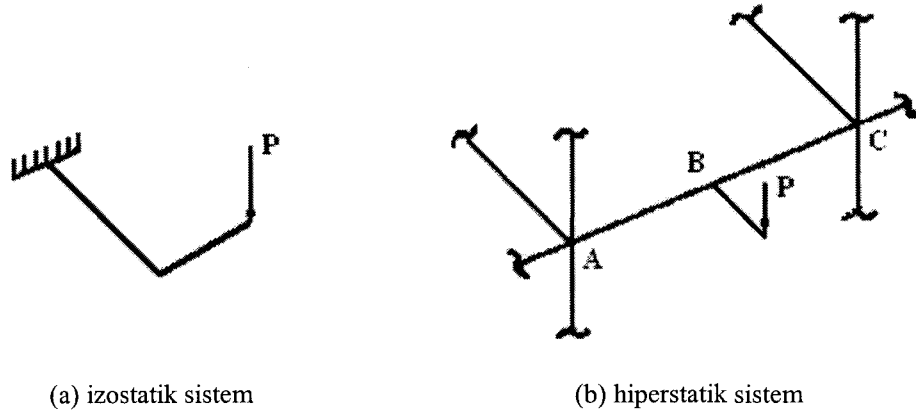
Betonarme yapı elemanlarına eğilme, kesme gibi etkilerin yanı sıra burulma momenti de etkir (Tuna 1992). Burulma etkisi betonarme yapıların monolitik özelliğe sahip olması nedeniyle taşıyıcı sistemin geometrisinden veya simetrik olmayan yük uygulamalarından kaynaklanabilir (Berktay 1995).

Yapı sistemlerinde meydana gelen burulma etkisi iki bölümde inceleyebilir.

Denge burulması: Statik bakımdan belirli burulma etkisi olarak da adlandırılan bu tür burulma etkisinde, burulma momenti dış kuvvetlerden denge denklemleri yardımıyla bulunabilir (Şekil 2.1).

Şekil 2.1'de verilen elemanlarda karşılanacak burulma momenti, elemanların rijitliklerinden bağımsız olarak denge denklemlerinden bulunabilir. Oluşan bu tür burulma momentinin taşınmaması durumunda, sistemde denge oluşmaz.

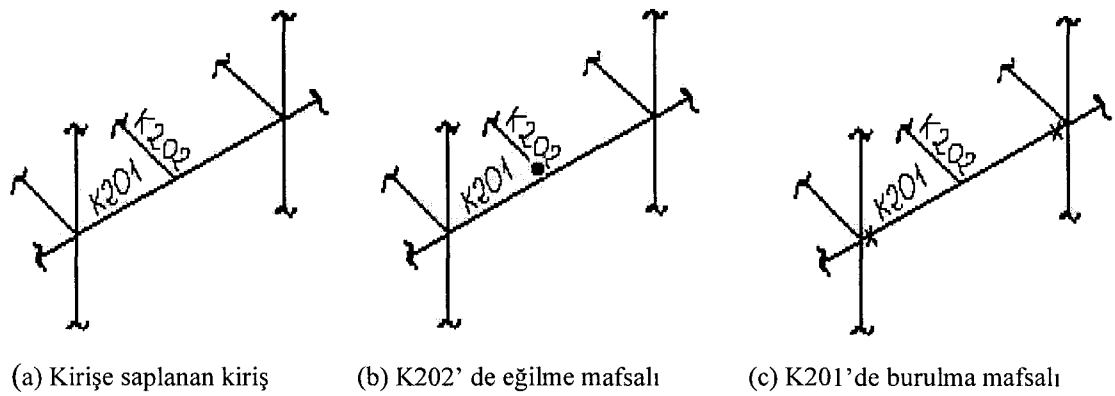
Uygunluk burulması: Sistemde oluşan burulma momentinin belirlenmesinde, denge denklemlerinin yeterli olmadığı burulma türüdür. Statik açıdan belirsiz burulma etkisi olarak da adlandırılır. Bu tür burulma momentinin ihmal edilmesi taşıyıcı sistemde çatlamalara ve etkilerin yeniden dağılarak dengenin tekrar oluşmasına sebep olur. Bu tür burulma oluşmasında ilgili elemanın burulma rijitliğinin diğer elemanların rijitliklerine olan oranı etkili olur (Celep ve Kumbasar 1998). Şekil 2.2'de uygunluk burulması oluşan bir sistem incelenmiştir.



Şekil 2.1 İzostatik ve hiperstatik sistemlerde denge burulması (Ersoy ve Özcebe 2001)

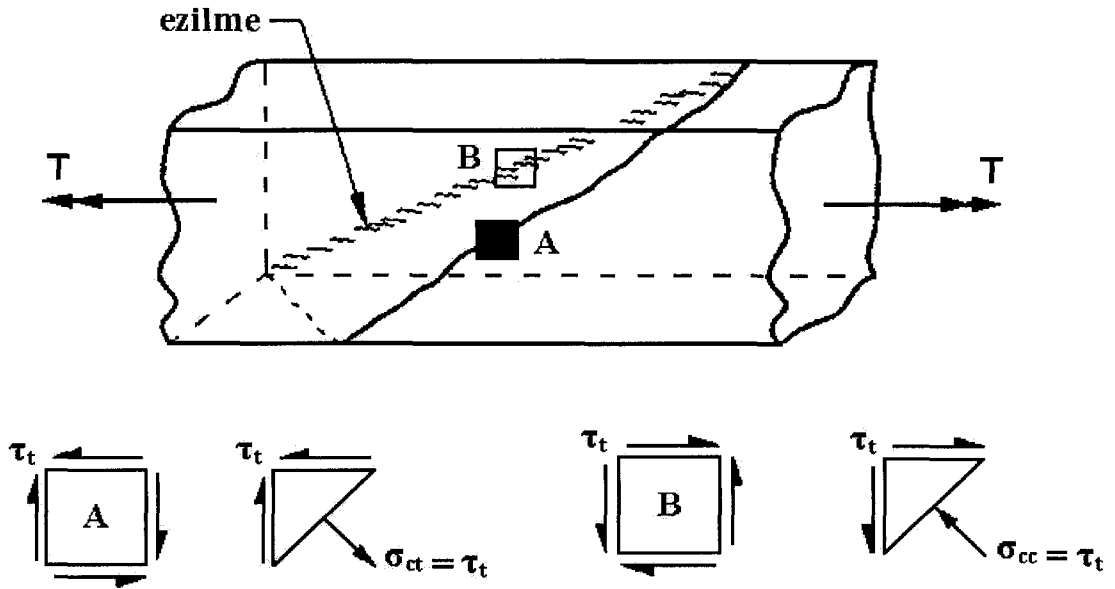
Şekil 2.2 a'da bulunan 201 kirişine, 202 kirişinin saplanması sonucu burulma momenti oluşur. Doğrusal elastik bir çözümleme ile, etkiye bu momentler saptanabilir. Ancak kirişlerin ucunda mafsallaşmaların olduğu Şekil 2.2 b ve Şekil 2.2 c aşamalarından sonra 202 kirişi, 201 kirişine burulma momenti aktaramaz. Şekil 2.2 b veya Şekil 2.2 c'deki mafsalların oluşması ile 202 kirişi, ucu mafsallı bir kiriş gibi davranmakta ve denge için burulma momentine gerek kalmamaktadır. Bu davranış 202 kirişinin açıklık momentinin artmasına sebep olmaktadır.

Hiperstatik bir sistemde, yapı elemanına etkiyeceği düşünülen burulma momentinin, malzemenin doğrusal elastik davrandığı varsayımına göre hesabının gerçekçi sonuçlar vermeyeceği yukarıda anlatılanlardan anlaşılmaktadır.



Şekil 2.2 Uygunluk burulması (Ersoy ve Özcebe 2001)

Çünkü burulma momenti nedeniyle çatlayan betonarme bir elemanın burulma rijitliği büyük ölçüde azaldığından; sistemde, çatlama öncesi ve sonrası arasında ihmal edilemeyecek düzeyde yük dağılım farklılıkları oluşmakta ve bu aşamadan sonra malzemenin doğrusal elastik davrandığı varsayımını temel alan yöntemlerle hesaplanan burulma momentleri, gerçekte yapı elemanının taşıyacağı burulma momentlerinin çok üstünde çıkmaktadır. Burulma momentleri, kesme kuvveti nedeniyle elemanda oluşan kayma gerilmelerinden farklı olarak, kayma gerilmeleri oluşturur. Eleman üzerinde sadece burulma momenti olması durumunda bile kayma gerilmeleri bulunur. Basit burulma durumuna pratikte pek rastlanmaz. Burulma genellikle eğilme ve kesme ile birlikte etkir. Ancak basit burulma, kolonlardaki aksenal yük hali gibi sınır bir durum oluşturduğundan, bileşik yükleme durumundaki davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için, basit burulmadaki davranışın bilinmesi gereklidir. Dikdörtgen kesitli, donatısız bir kiriş, basit burulmaya maruz kaldığında, ilk çatlamanın oluşması ile ani ve gevrek biçimde kırılır (Şekil 2.3). Burada kirişin ön yüzünden alınan noktasal bir *A* parçası üzerinde şekilde gösterildiği gibi kayma gerilmeleri oluşmakta ve bu kayma gerilmeleri, başka bir düzlemde asal çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan asal çekme gerilmeleri de çekme dayanımı çok düşük olan betonun çatlmasına sebep olmaktadır. Şekilden de görüleceği gibi çatlak, kirişin üç yüzünde asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşurken, dördüncü yüzde ezilme gözlenmektedir.



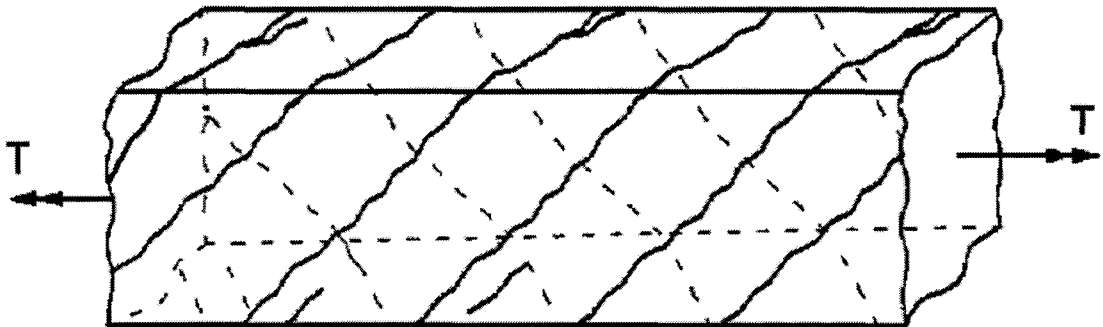
Şekil 2.3 Basit burulma altındaki donatısız kirişin kırılması (Ersoy ve Özcebe 2001)

Kirişin arka yüzünden alınan bir B noktasal parçası üzerinde oluşan kesme gerilmeleri de ezilmeye sebep olmaktadır. Donatısız beton kesitler, ilk çatlağın oluşmasıyla kapasitelerine ulaşmış kırılmaktadırlar (Ersoy ve Özcebe 2001).

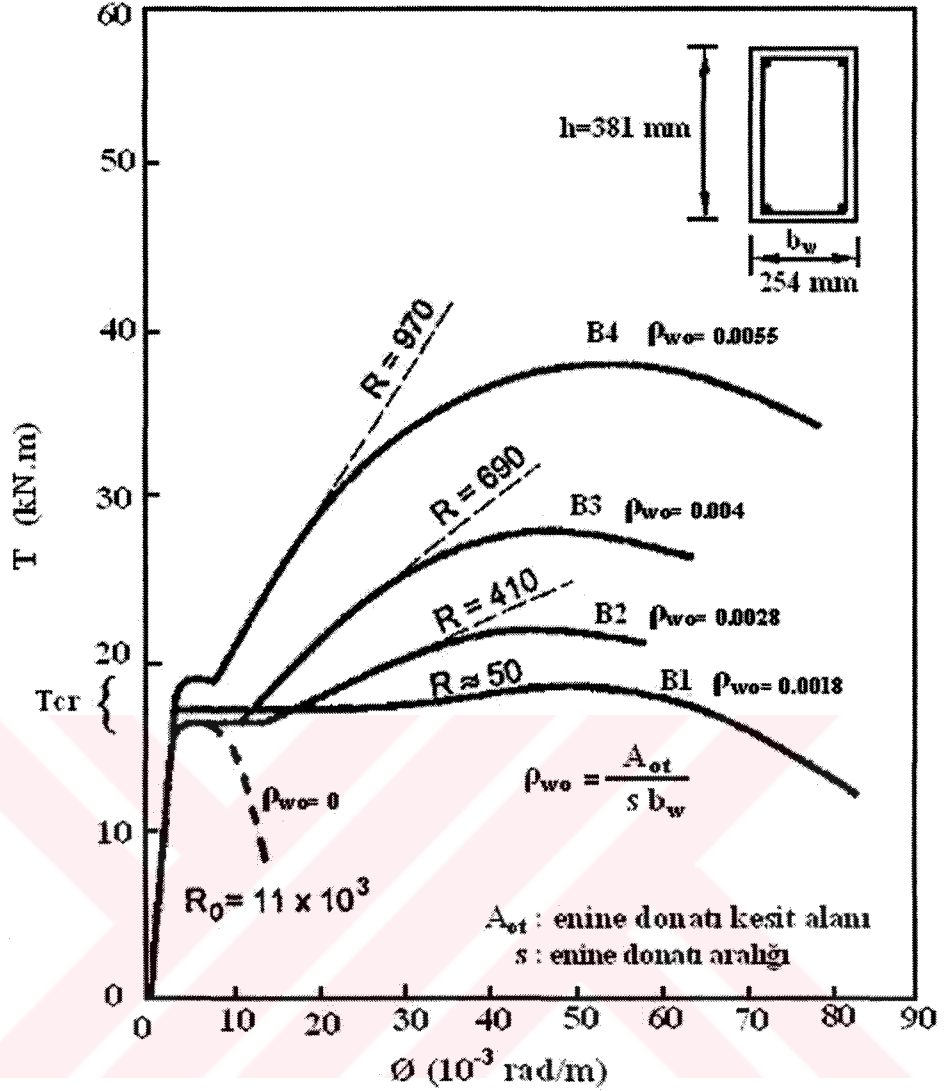
Kirişe yerleştirilen boyuna donatı, yukarıdaki davranışı değiştirmemekte, ancak boyuna donatı ile birlikte kullanılan enine donatı bahsedilen davranışı değiştirmektedir. Bu durumda, kırılma gerçekleşmeden çok sayıda çatlak oluşmaktadır (Şekil 2.4). Burulma çatlaklarının oluşması ile kirişin boyunun uzamaya başladığı ve uzamanın ihmal edilemeyecek düzeye ulaştığı, uzama miktarının ise boyuna donatıdaki uzamayla aynı olduğu yapılan deneylerden görülmüştür. Bu bulgular sonucunda boyuna donatıya neden ihtiyaç duyulduğu açıkça görülmüştür (Ersoy ve Özcebe 2001).

Hsu burulma etkisindeki betonarme kirişlerin deformasyon özelliklerini saptamak için bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Bu deney serisinde burulma donatısı dışındaki tüm özellikler sabit tutulmuştur. Seride yer alan kirişlerde farklı enine donatı oranları kullanılmış ve enine donatıya eşit hacimde boyuna donatı kullanılmıştır. Bu deneyler sonucunda kirişlere ait burulma momenti-birim dönme açısı ($T-\theta$) ilişkileri tespit edilmiştir. Elde edilen bu ilişki Şekil 2.5’de verilmiştir (Hsu 1968).

Burulma momenti-birim dönme açısı ($T-\theta$) ilişkisi eğrilerinin eğimi elemanların burulma rijitliğini göstermektedir.



Şekil 2.4 Basit burulma altındaki donatılı bir kirişte gözlenen çatlaklar (Ersoy ve Özcebe 2001)



Şekil 2.5 Basit burulma altındaki betonarme kirişlerde burulma momenti-birim dönme açısı ilişkisi (Hsu 1968)

Şekil 2.5’de verilen burulma momenti-birim dönme açısı ilişkisi grafiğinden de görüleceği gibi, burulma çatlamaının oluştuğu T_{cr} değerine kadar tüm numuneler için davranış doğrusaldır. Eğrinin bu doğrusal kısmı tüm deney numunelerinde aynı olduğu için burulma çatlamaının olduğu noktaya kadarki burulma rijitliğinin tüm numunelerde aynı olduğu söylenebilir. Bu bulgu çatlama olana kadarki burulma rijitliğinin donatıdan bağımsız olduğunu göstermektedir. Burulma momenti-birim dönme açısı ($T- \varnothing$) eğrisinin çatlamaaya kadar olan doğrusal kısmının eğimi olan burulma rijitliği elastisite teorisine göre aşağıda verilen;

$$R_0 = \frac{T_{cr}}{\varphi_{cr}} = G_c \sum \beta_i x_i^3 y_i \quad (2.1)$$

denklemini yardımıyla bulunabilir. Denklem 2.1’de verilen formülde yer alan T_{cr} yapı elemanın çatlama momentini, φ_{cr} bu çatlama momentine karşı gelen çatlama birim dönme açısını göstermektedir. G_c betonun kayma modülüdür ve betonun elastisite modülü değerinin % 40’ı kayma modülü olarak hesaplarda kullanılabilir. Aynı denklemden x_i, y_i dikdörtgen kesitlerde sırasıyla kısa ve uzun kenarı ifade etmektedir. Eğer kesit, tablalı kesit ise, dikdörtgenlere ayrılarak hesaplar yapılabilir. β_i ise y_i/x_i oranına bağlı bir katsayıdır ve betonarme için yaklaşık 1/3 alınabilir (Ersoy ve Özcebe 2001).

Çatlama sonrası burulma rijitliği ise;

$$R = \frac{T_u - T_{cr}}{\varphi_u - \varphi_{cr}} \quad (2.2)$$

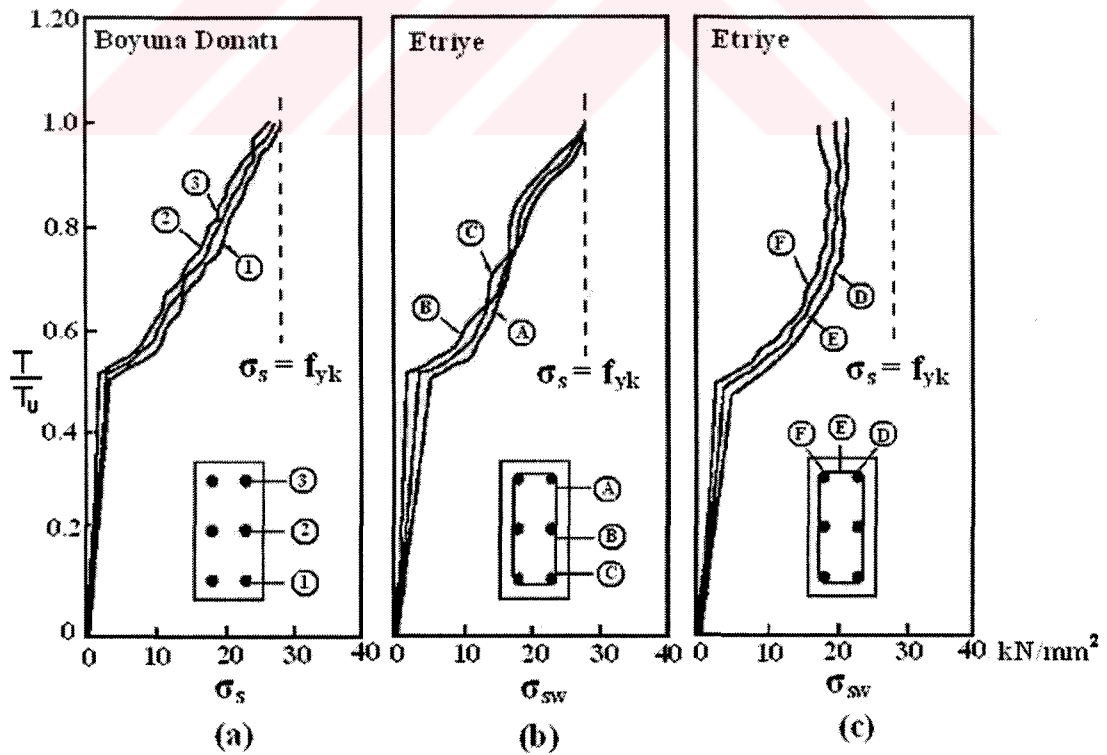
denklemini yardımıyla bulunabilir. Denklem 2.2’deki T_u , elemanın taşıdığı en büyük burulma momenti, φ_u bu en büyük momentin oluştuğu birim dönme açısı değeridir (Fang and Shiau 2004).

Deneysel olarak yapılan ölçümler burulmanın etkisi altında çatlama oluncaya kadar enine ve boyuna donatıdaki birim deformasyonların ihmal edilebilecek kadar az olduğunu ancak burulma çatlama oluşması ile birlikte, burulma rijitliğinin ani olarak düştüğünü ve donatının etkili olmaya başladığını göstermektedir. Burulma rijitliği $R_0=11000 \text{ kN.m}^2$ iken burulma çatlama oluşması ile donatı oranına bağlı olarak $R=50-970 \text{ kN.m}^2$ arasında bir değere düşmektedir. Bu da çatlama sonrasındaki burulma rijitliğinin çatlama öncesi duruma göre 1/100-1/10’ u arasına düştüğü anlamına gelmektedir. Uygulamada karşımıza çıkan elemanların, şekil 2.5’de gösterilen B1 ve B2 numunelerinin taşıdığı oranda enine donatı içerdiği düşünülürse, burulma çatlama ile burulma rijitliğinin sıfıra yakın değerlere düştüğü görülebilir. Burulma rijitliğindeki bu düzeyde bir azalma sonucunda kesitin neredeyse sabit kalan bir burulma momenti altında serbestçe dönerek zorlamaları diğer yapı elemanlarına

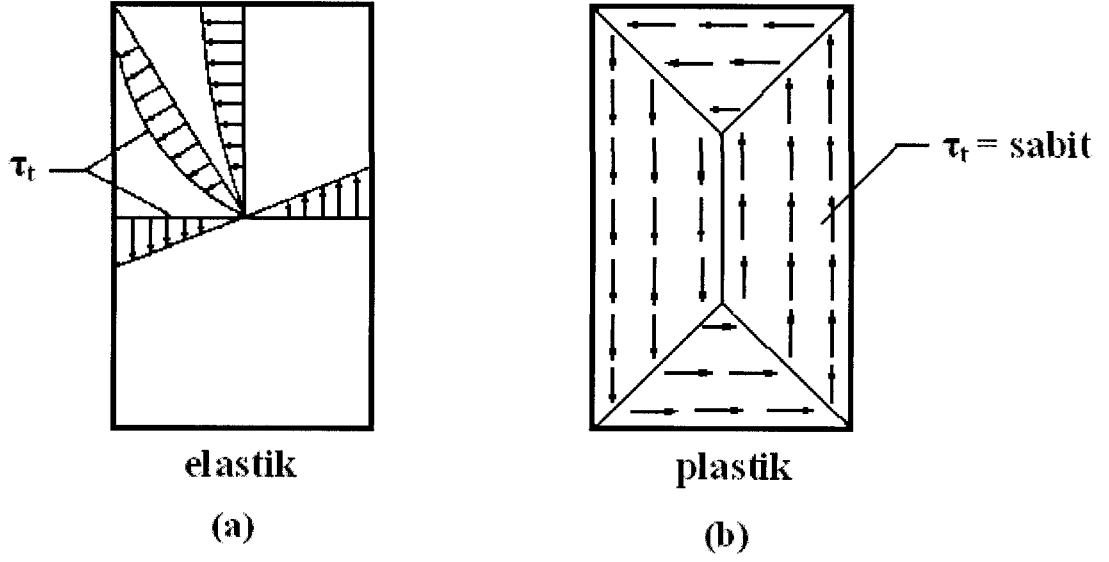
aktaracağı çok açıktır. Bu durumda yapı sisteminde oluşacak çatlama sonrasındaki yük dağılımı değişimi ihmal edilemeyecek düzeylere ulaşır (Ersoy ve Özcebe 2001).

Dr. Hsu yaptığı deneylerde kesitin çeşitli düzeylerinde bulunan enine ve boyuna donatılardaki birim uzamaları dikkate alarak donatılarda oluşan gerilme değerlerini tespit etmiştir (Şekil 2.6).

Yakın zamana kadar burulma momenti etkisindeki betonarme elemanlarda oluşan kayma gerilmeleri şekil 2.7a' da, gerilme dağılımı gösterilen, elastisite teorisine göre hesaplanıyordu. Ancak Hsu'nun yaptığı deneylerden elde ettiği sonuçlar Şekil 2.7 b'de verilen ve plastisite teorisinden elde edilen gerilme dağılımının, Şekil 2.7 a'da verilen ve elastisite teorisinden elde edilen dağılıma göre gerçeğe daha yakın olduğunu göstermiştir. Kesitteki kayma gerilmelerinin sabit kalması, burulma altındaki betonarme elemanlarda elastisite teorisi yerine, plastisite teorisinin daha sağlıklı sonuçlar verebileceğini göstermektedir (Hsu 1968).



Şekil 2.6 Enine ve boyuna donatılarda ölçülen birim uzamalar



Şekil 2.7 Elastisite ve plastisite göre kesitte burulma nedeni ile oluşan gerilme dağılımı

2.2 Kesitlerin Burulma Dayanımı

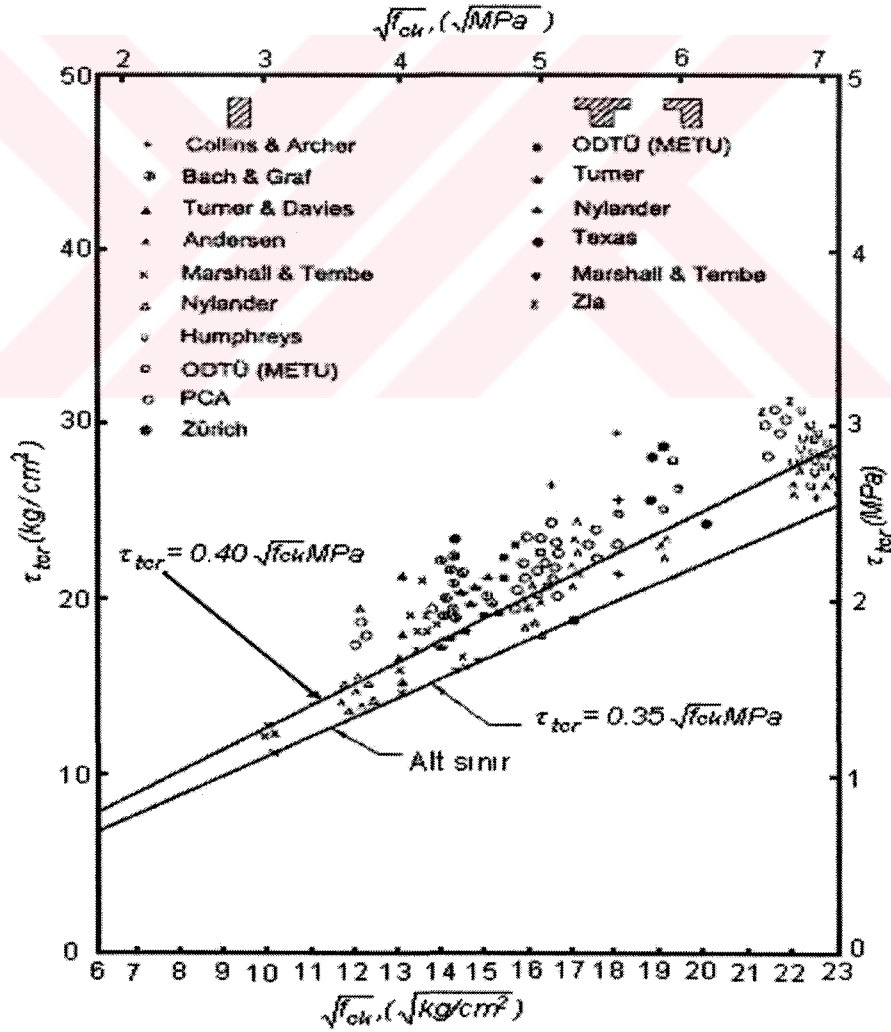
Burulma rijitliğinde çok önemli değişimlere neden olan burulma çatlama momentinin hangi değerde olacağını doğru olarak hesaplanması, yapı elemanlarının burulma davranışı açısından çok önemlidir. Ersoy ve Özcebe ilk çatlama momentinin oluşacağı burulma momentini T_{cr} için plastisite teorisi denklemlerini, kum tümseği analogisinden aşağıdaki şekilde elde etmişlerdir.

$$T_{cr} = \frac{1}{2} \sum x_i^2 \left(y_i - \frac{x_i}{3} \right) \tau_t \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'de verilen x_i ve y_i dikdörtgen kesitlerde kısa ve uzun kenarı belirtmektedir. Kesitin dikdörtgen olması durumunda denklem 2.3'de kullanılan toplam işaretine gerek kalmamaktadır. T_{cr} için verilen yukarıda verilen denklem tablalı kesitlerde de kullanılabilir. Bu durumda tablalı kesit uygun şekilde dikdörtgen kesitlere bölünerek her bir dikdörtgen için yukarıdaki denklem kullanılıp sonuçlar toplanarak tablalı kesitler için de çatlama momentini T_{cr} bulunabilir. Bu durumda x_i ve y_i dikdörtgenlerin sırasıyla kısa ve uzun kenarıdır. T_{cr} için verilen

yukarıdaki denklemde yer alan betonun kayma gerilmesinin şiddeti τ_i , basit burulma durumunda betonun çekme dayanımına eşittir. Ersoy ve Özcebe yaptıkları çalışmalar sonucunda betonun çekme dayanımının $0.4\sqrt{f_{ck}}$ MPa alınmasını önermişlerdir. Ancak τ_{icr} betonun tek eksenli çekme altındaki dayanımına eşitlendiğinde Şekil 2.8'de gösterilen $\tau_{icr} = 0.35\sqrt{f_{ck}}$ MPa önermesi, $0.4\sqrt{f_{ck}}$ değeri için bir alt sınır oluşturmaktadır. Bu alt sınır temel alınarak $\tau_{icr} = 0.35\sqrt{f_{ck}}$ yerine f_{ctk} kullanılırsa burulma çatlama için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$T_{cr} = \frac{1}{2} \sum x_i^2 \left(y_i - \frac{x_i}{3} \right) f_{ctk} \quad (2.4)$$



Şekil 2.8 Basit burulmada, plastisite teorisinden hesaplanan kayma gerilmelerinin, $\sqrt{f_{ck}}$ ile değişimi (Ersoy ve Özcebe 2001)

Burada kesitin dikdörtgen olması durumunda x_i yerine b_w , y_i yerine de h yazılmak suretiyle, T_{cr} bulunabilir. Eğer kesitin hesap dayanımı bulunuyor ise karakteristik çekme dayanımı f_{ctk} yerine, hesap dayanımı f_{ctd} alınmalıdır (Ersoy ve Özcebe 2001). Donatısız beton kesitlerin kapasitesinin elastik teoriye göre de hesaplanabileceği bilinmektedir. Bu teoriden elde edilen;

$$T_e = \alpha x^2 y f_{ctk} \quad (2.5)$$

Denklemleri yardımıyla kapasite hesaplaması yapılabilmektedir. Denklem 2.5’de yer alan x ve y sırasıyla, dikdörtgen kesitin SI birim sistemi cinsinden kısa ve uzun kenarını belirtmektedir. α St.Venant katsayısıdır ve y/x oranına bağlı olarak 0.208-0.333 arasında değişen bir değer alabilir (Atef et al 1990). St.Venant katsayısı α ’nın y/x oranına bağlı değişimi Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Burulma için St.Venant katsayıları (Beer and Johnston 1992)

y/x	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	10.0	∞
α	0.208	0.219	0.231	0.246	0.258	0.267	0.282	0.291	0.312	0.333

Plastik teoriye göre donatısız beton elemanın taşıyabileceği burulma momenti değeri;

$$T_p = \alpha_p x^2 y f_{ctk} \quad (2.6)$$

denklemleriyle bulunabilir. Denklemlerde yer alan α_p plastisite katsayısı olarak adlandırılmaktadır ve y/x oranına bağlı olarak 0.333-0.5 arasında bir değer almaktadır. Denklem 2.5 ve denklem 2.6’da yer alan f_{ctk} , betonun MPa cinsinden çekme dayanımıdır. (Atef et al 1990) Plastisite katsayısı $\alpha_p = 0.5 - \frac{x}{6y}$ denklemi yardımıyla bulunabilir (Roa and Seshu 2003).

Eğik eğilme teorisine göre burulma değeri ise;

$$T_{np} = \frac{x^2 y}{3} (0.85 f_{cf}) \quad (2.7)$$

denkleminde bulunabilir. Burada f_{cf} , betonun eğilme çekme dayanımıdır (Atef et.al. 1991). Bu denklem daha sonra Hsu tarafından beton basınç dayanımına göre yeniden düzenlenerek aşağıdaki ampirik denklem elde edilmiştir.

$$T_{np} = 6(x^2 + 10)y \sqrt[3]{f_{ck}} \quad (2.8)$$

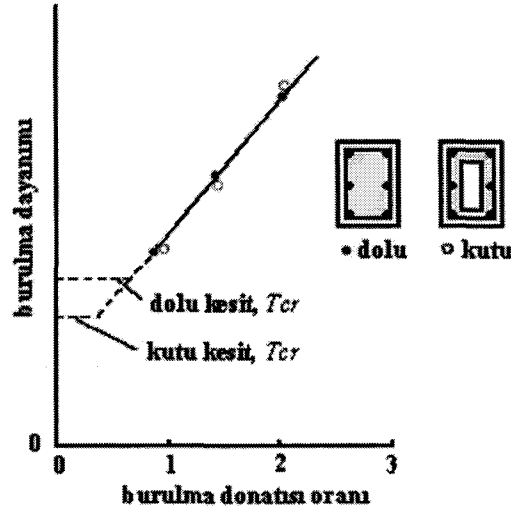
Bu denklemde yer alan f_{ck} psi birimi cinsinden beton basınç dayanımı olarak kullanılmaktadır. Bu denklemde kullanılan x ve y USCU birim sistemi cinsinden sırasıyla kesitin kısa ve uzun kenarını ifade etmektedir (Hsu 1984).

Hsu tarafından düzenlenen denklem betonun yarma çekme dayanımına göre tekrar düzenlenerek aşağıdaki şekle getirilmiştir.

$$T_{np} = \frac{x^2 y}{3} f'_{sp} \quad (2.9)$$

Bu denklemlerde yer alan f'_{sp} betonun MPa birim sistemi cinsinden yarma çekme dayanımı olarak kullanılmaktadır (Hasnat and Akhtaruzzaman 1983).

Kesitte burulma nedeniyle oluşan kuvvetlerin bulunabilmesi için tüp analogisi geliştirilmiştir (Leet and Bernal 1997). Bu analogide Şekil 2.7 b' de verilen dikdörtgen kesitin iç kısmında yer alan kayma gerilmelerinin moment kollarının küçük olması dolayısıyla, ihmal edilmesi çok fazla hataya sebep olmayacaktır. Dikdörtgen dolu kesit duvar kalınlığı t olan bir kutu kesite dönüştürülerek hesaplamalar yapılabilir (Ersoy ve Özcebe 2001).



Şekil 2.9 Dolu ve kutu kesitlerde taşınan burulma momenti-donatı oranı grafiği (Leet and Bernal 1997)

Kesitin dolu ve kutu olması durumundaki, taşınan burulma momenti, burulma donatısı oranı grafiği Şekil 2.9'da verilmiştir. Şekil 2.7' den de anlaşılacağı üzere dolu ve kutu kesitlerin çatlama momentleri çok az farklılıklar gösterirken, her iki kesitin taşıma gücü hemen hemen birbirine eşittir (Leet and Bernal 1997).

Kutu kesit analojisinden hareketle hesaplanan çatlama momenti değeri;

$$T_{cr} = \frac{\sqrt{f_{ck}} A_c^2}{3U_c} \quad (2.10)$$

denklemleri ile bulunabilir. Denklemlerde yer alan değişkenler SI birim sistemi cinsinden kullanılmıştır. Denklem 2.10'da A_c tüm kesitin alanını, U_c ise tüm kesitin çevresini ifade etmektedir. f_{ck} kesitte kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımıdır (ACI 318-95).

Enine ve boyuna donatısı bulunan bir betonarme elemanın kapasitesini hesaplamak için bir çok matematiksel model önerilmiştir. Bu modellerden bir tanesi uzay kafes kiriş modelidir. Bu modelde, donatı çekme elemanlarını asal basınç yönündeki, beton ise basınç elemanlarını oluşturmaktadır. Uzay kafes kiriş modeli iki önemli varsayım içermektedir. Bunlardan birincisi, beton katkısı ihmal edilmiştir. İkincisi ise çatlak

eğimi, dolayısıyla beton basınç çubuklarının eğimi 45° alınmıştır. Bugün gelinen bu noktada bu iki varsayımın da tam olarak doğru olmadığı bilinmektedir. (Ersoy ve Özcebe 2001)

Kesitte burulma çatlaması olduktan sonra sargılanmamış betonlar dökülecektir. Dolayısıyla çatlamadan sonra sargılanmamış betonların yük taşımadığı varsayılır. Tüm kesit alanı yerine sargılanmış kesit alanı (etkili alan) kullanılarak, uzay kafes giriş modelinden enine ve boyuna donatı miktarı için kullanılacak denklemler aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$A_{st} = \frac{TU_e}{2A_e\sigma_s} \quad (2.11)$$

$$A_t = \frac{Ts}{2A_e\sigma_{sw}} \quad (2.12)$$

Bu denklemlerde yer alan değişkenler ise;

A_{st} Kesitte burulma için gerekli toplam boyuna donatı alanı

A_t Enine donatı kesit alanı

T Uygulanan burulma momenti

s Enine donatı aralığı

σ_{sw} Enine donatıdaki gerilme (Bu gerilme değeri kesitin taşıma gücü bulunuyorsa $\sigma_{sw}=f_{ywk}$ alınır.)

σ_s boyuna donatıdaki gerilme (Bu gerilme değeri kesitin taşıma gücü bulunuyorsa $\sigma_s=f_{yk}$ alınır.)

A_e Burulma için çekirdek alan (Bu çekirdek alan için yapılan araştırmalar sonucunda enine donatının dört köşesine yerleştirilen boyuna donatıların merkezleri arasında kalan ya da enine donatı eksenleri arasında kalan alanı kullanmanın uygun olacağı öngörülmüştür.)

U_e A_e alanının çevresi

Denklem 2.11 ve 2.12 enine ve boyuna donatının eşit hacimde olduğu yani $A_{st}s=A_tU_e$ olduğu varsayımı ile çıkartılmıştır.

Betonarme bir kesitin burulmadaki taşıma gücü uzay kafes kiriş modelinden çıkartılan yukarıdaki denklemlerden burulma momentinin çekilmesi ile elde edilebilir. Eğer bu işlem yapılırsa ;

$$T = \frac{A_t 2A_e f_{ywd}}{s} \quad (2.13)$$

olarak betonarme kesitin taşıma gücünü veren denklem bulunmuş olur. Eğer Denklem 2.13'den kesitin hesap dayanımı bulunuyorsa, enine donatının karakteristik akma dayanımı f_{ywk} yerine, hesap dayanımı f_{ywd} alınmalıdır.

Elemanda burulma momentleri etkisi ile oluşan asal çekme ve asal basınç gerilmeleri, önlem alınmaması durumunda gevrek kırılmaya neden olurlar. Burulmada asal çekme gerilmeleri nedeni ile oluşacak gevrek kırılmayı önlemek için gerekli donatı alanı, donatısız bir elemanın burulma dayanımına eşitlenerek bulunabilir. Denklem 2.13'de verilen donatılı elemanın taşıma gücü, denklem 2.8'de verilen ve plastisite teorisinden elde edilen donatısız kirişin taşıma gücüne eşitlenirse;

$$\frac{2A_e f_{ywd} A_t}{s} = \frac{1}{2} b_w^2 \left(h - \frac{1}{3} b_w \right) f_{ctd} \quad (2.14)$$

elde edilir. Eğer bu eşitlikte sargılanmış beton alanı $A_e = 0.60 b_w h$, $\frac{h}{b_w} = 3$ alınır ve enine donatıya eşit hacimde boyuna donatı olacağı varsayılırsa, ($A_{st} s = A_t U_e$) yukarıdaki eşitlikten minimum donatı oranları aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\rho_{wt \min} = \frac{A_t}{s b_w} = 0.38 \frac{f_{ctd}}{f_{ywd}} \quad (2.15)$$

$$A_{st \min} = 0.38 \frac{f_{ctd}}{f_{ywd}} U_e b_w \quad (2.16)$$

Yapılan çalışmalarda yukarıda belirtilen minimum donatı miktarının sünek davranışı sağlamak için yeterli olduğu tespit edilmiştir. (Ersoy ve Özcebe 2001)

Yukarıdaki denklemlerde yer alan etkili alan için Leet and Bernal;

$$A_e = \frac{2A_c}{3} \quad (2.17)$$

denkleminin, dolu kesitlerin kutu kesit gibi çözümlenmesi için geliştirilen tüp analogisinde, kutu kesitin duvar kalınlığı için ise;

$$t = \frac{3A_c}{4U_c} \quad (2.18)$$

denkleminin kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Bu denklemlerde yer alan A_c tüm kesit alanını, U_c ise tüm kesitin çevresini ifade etmektedir. (Leet and Bernal 1997)

ACI 318-95' de en az enine ve boyuna donatı miktarı için denklemler verilmiştir.

$$2A_{t,\min} = \frac{50b_w s}{f_{yw}} \quad (2.19)$$

denkleminin en az enine donatı alanını bulmak için kullanılabilceği belirtilmiştir. Bu denklemde;

$A_{t,\min}$ kullanılan enine donatının bir bacağının minimum alanı, inç²

b_w dikdörtgen kesitin genişliği ya da dairesel kesitin çapı, inç

s enine donatı aralığı, inç

f_{yw} enine donatı akma dayanımı, psi

olarak kullanılmaktadır. Boyuna donatı için ise;

$$A_{t,\min} = \frac{5\sqrt{f_{ck}} A_c}{f_{yl}} \frac{A_t}{s} P_h \frac{f_{yw}}{f_{yl}} \quad (2.20)$$

denklemini önerilmiştir. Bu denklemde;

$A_{l,min}$ en az, boyuna burulma donatısı alanı (boyuna donatıların tamamı için), inç²

A_c kesitin tüm alanı, inç²

f_{ck} beton basınç dayanımı, psi

P_h enine donatının, merkezlerinden geçen kesitin çevresi, inç

birimleri ile verilmiştir. ACI 318-95' e göre kesitin burulma kapasitesi;

$$T_n = \frac{2 A_o A_t f_{yw}}{s} \cot \theta \quad (2.21)$$

denklemini ile bulunabilir.

A_t kesitteki burulma donatısı (enine donatı) alanı, inç²

f_{yw} enine donatı akama dayanımı, psi

s enine donatı aralığı, inç

θ 30° - 60° arasında bir değer, θ öngerilmemiş elemanlar için 45° alınabilir

A_o kayma akısının takip ettiği yolun içinde kalan alan, inç²

A_o değerinin $0.85A_{oh}$ kabul edilmesi durumu haricindeki durumlarda, A_o hesapla bulunacaktır. A_{oh} ise enine donatının merkezinden geçen eksenler arasındaki alanı ifade eder.

ACI 318-89 ve daha önce yayınlanan ACI yönetmeliklerde, kesitin taşıma gücüne hem donatının hem de betonun katkısı olduğu kabul ediliyordu. Bu kabule göre bir kesitin burulma dayanımı;

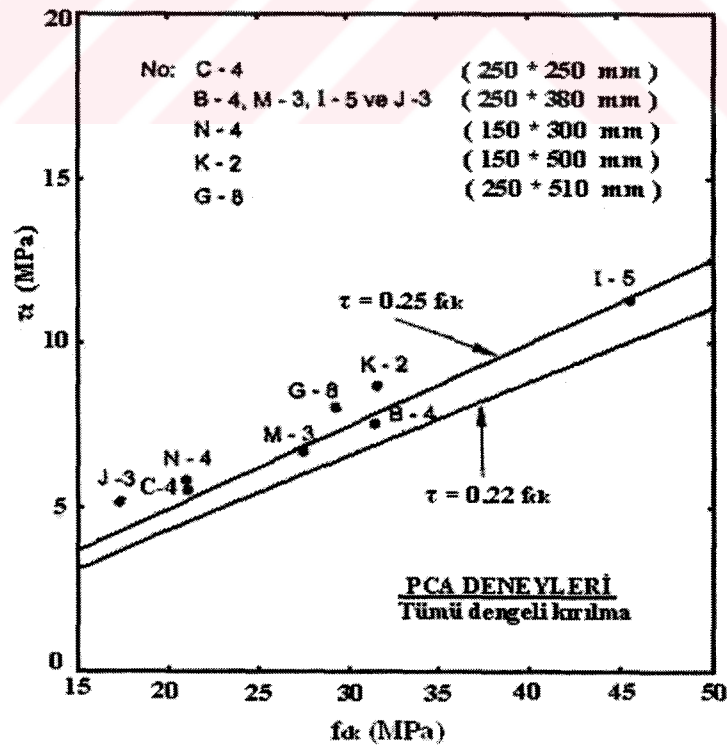
$$T_n = T_c + T_s \quad (2.22)$$

denkleminde, donatının ve betonun taşıdığı momentlerin toplamı olarak bulunmaktaydı. ACI 318-95 yönetmeliğinde betonun taşıdığı burulma momenti ihmal edilmiştir (Bhatti and Almughrabi 1996, El-Niema 1993, Fang and Shiau 2004).

Burulma momenti etkisiyle elemanın gövdesinde oluşacak ve gevrek kırılmaya sebep olabilecek ezilmeyi önlemek için burulma momentine bir üst sınır konulması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Hsu tarafından daha önce denenen numunelerde, enine donatımı artması ile gövdedeki ezilmenin aynı anda olduğu dengeli kırılma gösteren numuneler seçilmiş, seçilen bu kirişlerin kırılma anındaki burulma momentleri plastisite teorisine göre hesaplanmış, bulunan bu burulma momentleri esas alınarak kesme gerilmeleri tespit edilerek, kırılmaya karşı gelen bu gerilmelerin beton dayanımına göre değişimi çıkartılmıştır (Şekil 2.10).

Şekil 2.10'dan da anlaşılacağı üzere, $\tau_t = 0.25 f_{ck}$ ile gösterilen doğru, incelenen numunelerden elde edilen sonuçlarla uyuşmaktadır. Betonarme kesitin beton ezilmesi oluşmadan taşıyabileceği en büyük burulma momenti değeri için denklem 2.10'da $\tau_t = 0.25 f_{ck}$ kullanmak uygun olacaktır. Bu durumda ezilme kırılması olmadan taşınabilecek en büyük moment değeri;

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \sum x_i^2 \left(y_i - \frac{x_i}{3} \right) f_{ck} \quad (2.22)$$



Şekil 2.10 Dengeli kırılma durumunda burulma gerilmelerinin beton basınç dayanımı ile değişimi

denklemlerle bulunabilir. TS 500-2000 güvenli bölgede kalmak için $\tau_t = 0.22 f_{ck}$ alınmasının uygun olacağını öngörmüştür. Ancak bu üst sınır, hesaplarda kullanılırken f_{ck} yerine f_{cd} alınarak;

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \sum x_i^2 \left(y_i - \frac{x_i}{3} \right) f_{cd} \quad (2.23)$$

denklemlerle bir kesitin betonda ezilme olmadan taşıyabileceği en büyük burulma momenti değeri bulunabilir (Ersoy ve Özcebe 2001).

2.3 Çelik Lif İlavesinin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi

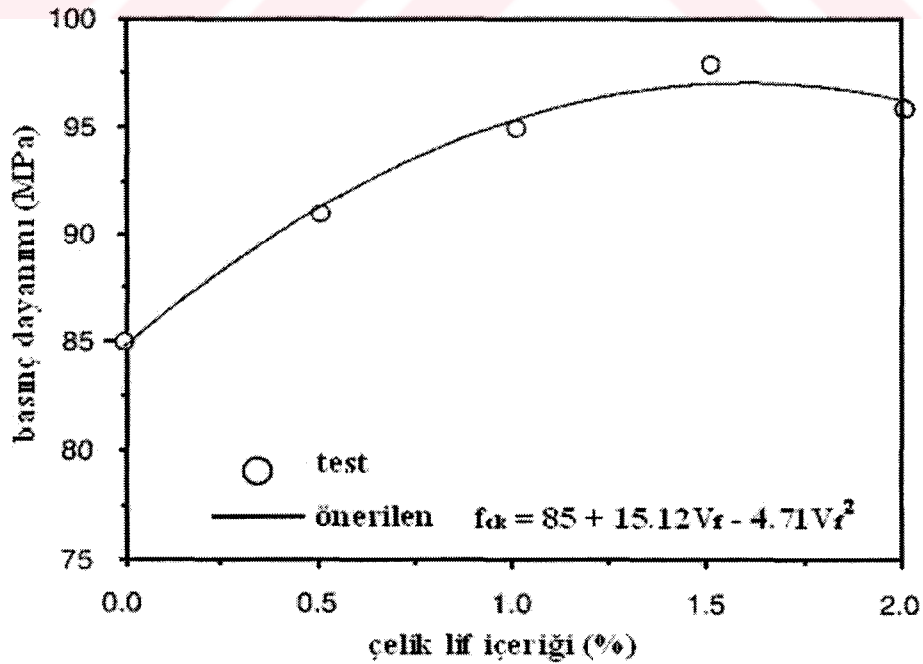
Yapılan araştırmalar incelendiğinde çelik lif ilavesinin betonun mekanik özelliklerinde değişikliklere sebep olduğu anlaşılmaktadır.

Normal dayanımlı betona çelik lif ilave edilerek yapılan basınç testlerinde, şahit numuneler ile çelik lif katkılı beton ile üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük dayanımları arasında, çok fazla farklılık tespit edilememiştir. 90 günlük basınç dayanımı testleri betona çelik lif ilavesinin, basınç dayanımı çok az da olsa artırdığını göstermiştir. Ancak betona ilave edilen çelik lif oranı % 1 olduğu zaman, 90 günlük dayanımda düşüşler gözlenmiştir. Normal dayanımlı betona ilave edilen çelik lifler, betonun eğilme dayanımının önemli oranda artmasına sebep olmuşlardır (Yıldırım 2002).

El- Niema, normal dayanımlı lifli betonlar ile yaptığı basınç deneylerinde, genel olarak lif ilavesinin, % 3-10 arasında basınç dayanımı azalmasına sebep olduğunu tespit etmiştir. Sınırlı sayıda numunede de basınç dayanımı yükselişi görülmüştür. Silindirik yarma dayanımı deneyleri sonucunda ise, çelik lif ilavesinin yarma dayanımının % 35' e varan oranlarda da artış gösterdiğini belirlemiştir (El-Niema 1993).

Betona farklı ebatlarda ve farklı oranlarda çelik lif ilave edilerek üretilen, numunelerin test edilmesi sonucunda, 0.5 mm çapında, 30 mm uzunluğundaki çelik lif tipi ilave edilen numunelerde çelik lifin miktarının artması ile basınç dayanımı 40 MPa'dan, 30 MPa'a kadar düşmüştür. 0.5 mm çapında, 50 mm uzunluğundaki çelik liflerin ilave edilmesi sonucunda ise, beton basınç dayanımının 50 MPa'a çıktığı tespit edilmiştir. Tüm deney numunelerine ait gerilme birim deformasyon eğrileri oluşturulmuştur. Lif içeriği oranı arttıkça gerilme birim deformasyon, eğrisi yataya daha da yaklaşmıştır. Yani kırılma anına kadar yaptığı birim deformasyon, lif içeriği ile doğru orantılı olarak artmıştır. Bu davranış da çelik lif ilave edilen betonların daha sünek bir davranış sergilediğinin göstergesidir (Craig et. al. 1986).

Yüksek dayanımlı betonlara çelik lif ilave edilmesi sonucunda, çelik lif ilavesi yüzdesinin artışı ile birlikte basınç dayanımında da artışlar gözlenmiştir. Ancak çelik lif ilavesinin % 2'nin üzerinde olması durumunda basınç dayanımındaki artış azalmaya başlamıştır (Şekil 2.11). Yüksek dayanımlı betonların yarma dayanımı ise çelik lif ilavesi arttıkça artmaktadır. Şekil 2.12'den de anlaşılacağı gibi lifsiz betonun yarma dayanımı 6 MPa dolaylarında iken, çelik lif ilavesinin % 2'ye çıkması ile yarma dayanımı 11 MPa' a çıkmıştır. Çelik lif ilavesi, yüksek dayanımlı betonların eğilme dayanımları üzerinde de olumlu gelişimlere sebep olmuştur.



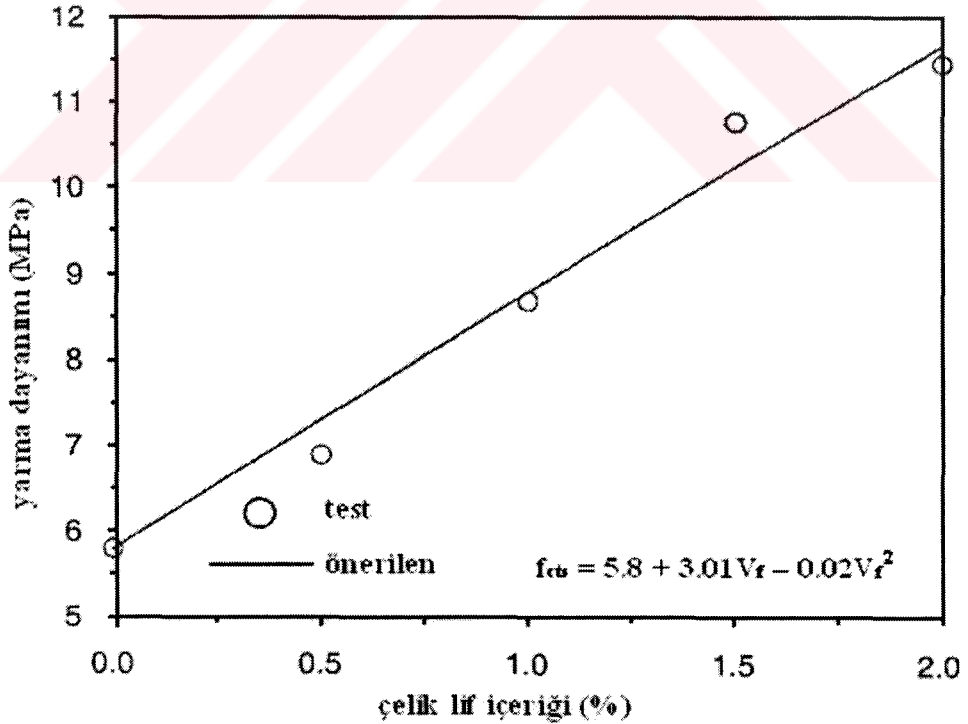
Şekil 2.11 Çelik lif ilavesinin, yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımı üzerine etkisi (Song and Hwang 2004)

Song and Hwang yüksek dayanımlı betonların lif ilavesi ile değişen, eğilme dayanımları için;

$$f_{ctf} = 6.4 + 3.43 V_f + 0.32 V_f^2 \quad (2.24)$$

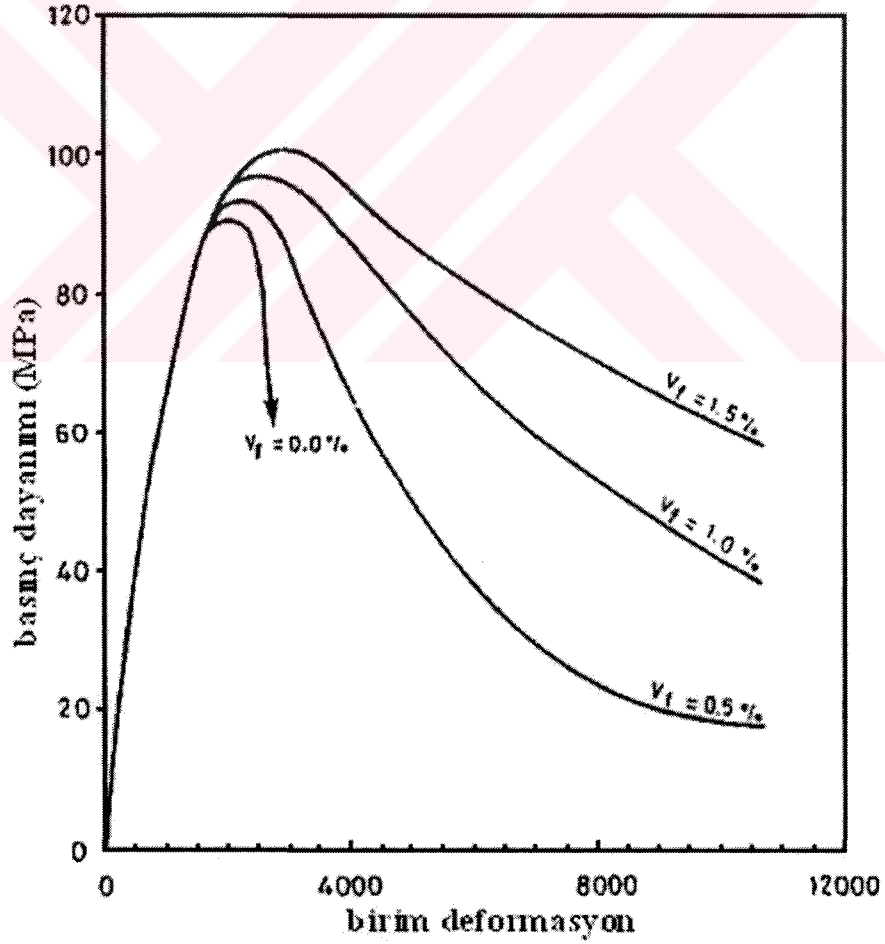
denklemini kullanmanın uygun olacağını belirtmişlerdir. Bu denklemde yer alan V_f betona ilave edilen hacimsel lif oranını simgelemektedir (Song and Hwang 2004).

Yüksek dayanımlı, çelik lif ilaveli betonların gerilme birim deformasyon eğrileri oluşturularak enerji yutma kapasiteleri incelenmiştir (Şekil 2.13). Şekil 2.13'den de görüldüğü gibi çelik lif ilavesi arttıkça, yüksek dayanımlı betonların birim deformasyonu artmaktadır. Bu davranış da gevrek kırılma özelliği bilinen yüksek dayanımlı betonların sünek davranış sergilemesi açısından önemlidir (Wafa and Ashour 1992).

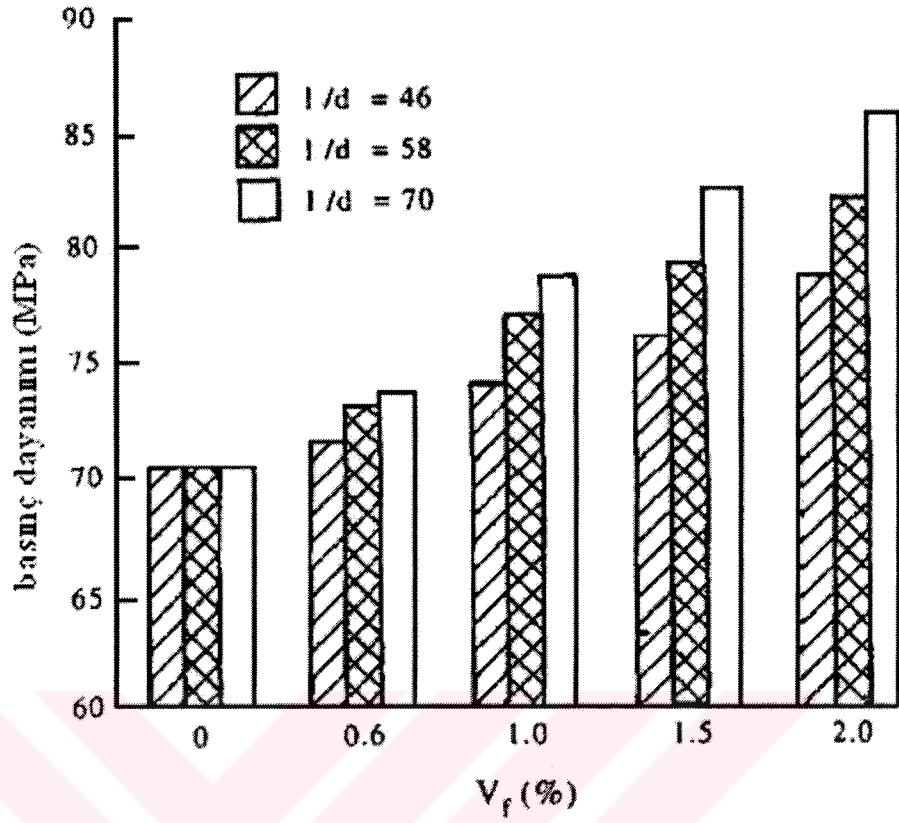


Şekil 2.12 Çelik lif ilavesinin yüksek dayanımlı betonların yarma dayanımı üzerine etkisi (Song and Hwang 2004)

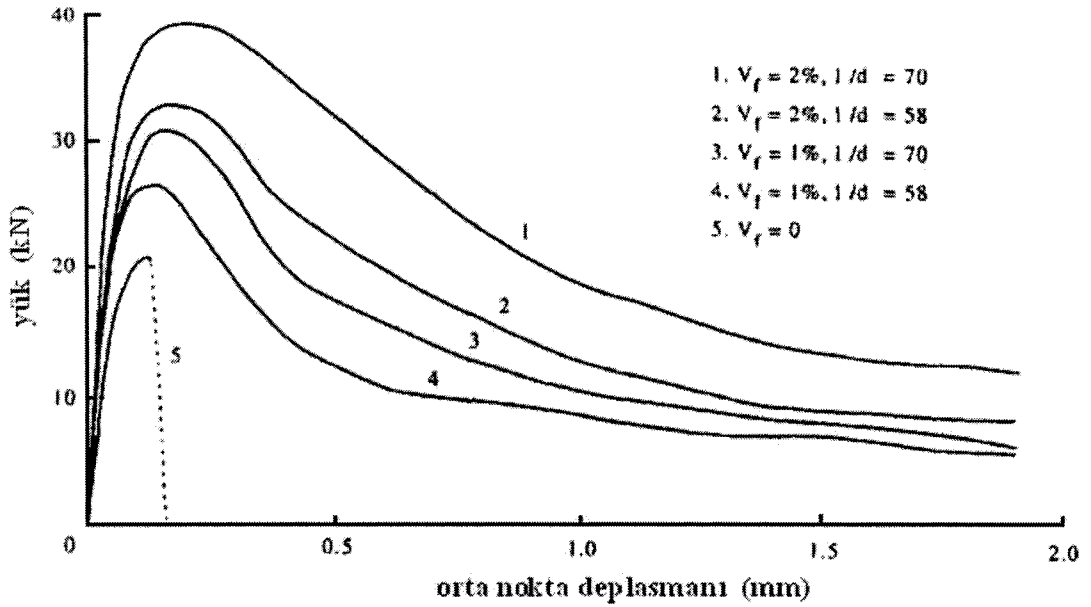
Çelik lifin boyutlarının değişmesi, betonun mekanik özellikleri üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır. Yüksek dayanımlı hafif betonlarla yapılan deneylerde lif boy/çap oranı arttıkça basınç dayanımında artış olmuştur (Şekil 2.14). Grafikten de anlaşıldığı gibi lifin boy/çap oranı 46'dan 70'e doğru artarken basınç dayanımı da artmaktadır. Lif boy/çap oranını yanında lif oranı da basınç dayanımını arttıran bir başka nedendir. Lif oranı %2' ye doğru arttıkça basınç dayanımı da artmaktadır. Ayrıca lif tipi ve içeriği farklı numuneler için oluşturulan yük orta nokta deplasmanı grafikleri de farklılıklar göstermiştir (Şekil 2.15). Betona ilave edilen lifin boy/çap oranı arttıkça eğilmedeki enerji yutma kapasitesi artmaktadır. Lif miktarının artması da kirişin eğilmede enerji yutma kapasitesini arttırdığı için en iyi eğilme davranışı 1 numaralı numunede gözlenmiştir (Jianming et. al. 1997).



Şekil 2.13 Yüksek dayanımlı betonların gerilme- birim deformasyon grafiği (Wafa and Ashour 1992)



Şekil 2.14 Lif tipine göre yüksek dayanımlı hafif betonların basınç değişimi (Jianming et.al. 1997)



Şekil 2.15 Çelik lifli, yüksek dayanımlı, hafif betonların yük-deplasman grafiği (Jianming et.al. 1997)

2.4 Burulma Deneyleri

Basınç dayanımı 40-90 MPa arasında değişen yüksek dayanımlı betonlarla üretilen numuneler üzerinde basit burulma deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler yapılırken burulma momentini oluşturan yük yavaş yavaş artırılarak burulma momenti ve dönme açısı değerleri kaydedilmiştir. Kirişler, donatı kullanılmamasından dolayı ilk çatlak oluşması ile kapasitesine ulaşarak kırılmışlardır. Bu deneyler sonucunda 2.4-2.10 arasındaki denklemlerden de anlaşılacağı üzere, burulma kapasitesi artmış ancak kırılmanın daha ani ve gevrek olduğu tespit edilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler elastik teori, plastik teori ve eğik eğilme teorisinden elde edilen denklemlerden bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda betonun yarma çekme dayanımını baz alan denklem 2.9' un, deney sonuçları ile çok uyumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Atef et.al. 1991).

Normal ve yüksek dayanımlı donatılı kirişlerin burulma davranışını tespit etmek için yapılan deneylerde, beton basınç dayanımına bağlı olarak numunelerin çatlama dayanımları farklılıklar göstermiştir. Fakat çatlama dayanımındaki bu farklılıklara değişen enine ve boyuna donatı miktarlarının çok fazla etkisi olmamıştır. Ancak çatlama sonrası numuneler için oluşturulmuş burulma momenti-birim dönme açısı grafiklerinin izlediği yollar farklılıklar gözlenmiştir. Üretilen numunelerde enine ve boyuna donatının hacimsel oranı % 0.6 ile % 2.0 arasında değişiklikler göstermiştir. Bazı numunelerde enine ve boyuna donatının oranı eşit tutulurken, bazı numunelerde boyuna donatı oranı enine donatı oranından fazla, bazı numunelerde ise, enine donatı oranı, boyuna donatı oranından daha fazla olacak şekilde numuneler üretilmiştir. Üretilen bu numuneler basit burulmaya tabi tutulmuştur. Burulma deneyleri sonucunda normal dayanımlı beton ile üretilen, % 1.2 enine donatı oranı, % 1.6 boyuna donatı oranı içeren numune ve eşit % 2.0 oranında enine ve boyuna donatı içeren numuneler dışındaki tüm numunelerde, enine ve boyuna donatılarda akma gözlenmiştir. Yukarıda %1.2 enine, %1.6 boyuna donatı içeren numunenin ise sadece boyuna donatısında akma görülmemiş, enine donatısı ise akmıştır. Yüksek dayanımlı betonlarla üretilen numunelerde de eşit, %2.0 oranında enine ve boyuna donatı içeren numune dışındaki tüm numunelerin enine ve boyuna donatılarında akma gözlenmiştir. Donatı miktarları çatlama momenti üzerinde fazla belirgin etki

göstermemişlerdir. Enine ve boyuna donatı oranını artması elemanların burulma kapasitelerini önemli miktarda arttırmışlardır (Fang and Shiau 2004).

Yapı tasarımı ile ilgili yönetmeliklerde, boyuna donatının burulma kapasitesi üzerinde etkisi olmadığı kabul edilse de, enine donatı ile beraber kullanılan boyuna donatı oranının artması burulma kapasitesini arttırmaktadır.

Donatısız ve çelik lif katkılı normal dayanımlı betonlar ile üretilmiş numuneler üzerinde yapılan basit burulma deneylerinden, çelik lifin, elemanların burulma davranışı tespit edilebilmiştir. Çelik lif içermeyen şahit numuneler, birim dönme açısı 0.002-0.003 rad/m aralığına ulaştığı an kapasitelerine ulaşırken, çelik lif oranı arttıkça, elemanların burulma kapasiteleri artmıştır. % 1.2 hacimsel çelik lif ilavesi elemanların burulma kapasitesini yaklaşık % 30 oranında yukarı taşımıştır. Lif katkılı numunelerin birim dönme açıları da, kapasitelerine ulaşana kadar 0.045 rad/m değerine kadar çıkmışlardır (Rao and Seshu 2003).

Çelik lifli betonarme kirişlerin burulma davranışı yapılan çalışmalarla irdelenmiştir. Lif ilave edilen betonarme kirişlerin çatlak dağılımları, lif ilave edilmeyen numunelere göre farklılıklar göstermişlerdir. Çelik lif ilavesi oranı arttıkça numunelerde gözlenen çatlak sayısı artmış, çatlak genişlikleri ise azalmıştır. (Narayanan and Karem-Palanjian 1986, El-Niema 1993)

Çelik lif katkılı betonarme kirişlerin burulma kapasitesi;

$$T_n = T_c + T_s + T_f \quad (2.25)$$

denklemleri ile bulunabilecektir. Bu denklemlerdeki T_c betonun katkısını, T_s donatının katkısını, T_f ise çelik lifin katkısını ifade etmektedir. Burada donatı, beton ve çelik lifin katkısını ayrıntılı olarak irdelenirse,

$$T_c = 0.13 x^2 y \sqrt{f_{cu}} \quad (2.26)$$

betonun kapasiteye olan katkısıdır.. Denklem 2.25’de x ve y sırasıyla mm cinsinden kesitin kısa ve uzun kenarını belirtmektedir. f_{cu} , Mpa birimi cinsinden beton küp basınç dayanımını simgelemektedir.

$$T_s = k_2 \frac{x_1 y_1}{s} A_t f_{yw} \quad (2.27)$$

Denklem 2.27’ de verilen değişkenler aşağıda verilmiştir.

T_s donatının taşıdığı burulma momenti,

x_1, y_1 sırasıyla enine donatının, merkezden merkeze kısa ve uzun kenarı,

s enine donatı aralığı,

A_t enine donatının bir bacağının kesit alanı,

f_{yw} enine donatının akma dayanımıdır.

Burada verilen değişkenlerin tamamında SI birim sistemi kullanılmalıdır. Denklem 2.27’ de yer alan k_2 sabiti ise aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$k_2 = 0.2m + \sqrt{m} \left(\frac{0.45 y_1}{x_1} \frac{s}{x_1 + y_1} \right) \quad (2.28)$$

$$m = \frac{\rho_l f_{yl}}{\rho_s f_{yw}} \quad (2.29)$$

2.29 denklemindeki, ρ_l boyuna donatı oranı, ρ_s enine donatı oranı, f_{yl} boyuna donatı akma dayanım, f_{yw} enine donatı akma dayanımıdır. Akma dayanımları N/mm^2 olarak alınmalıdır. Çelik lifin katkısı;

$$T_f = 0.22 \frac{x_1 y_1}{x_1 + y_1} x y F \sqrt{f_{cu}} \quad (2.30)$$

denklemleriyle bulunabilir.

Denklem 2.30' da yer alan F lif faktörüdür. Lif faktörü aşağıdaki denklemle bulunur.

$$F = \frac{l}{d} V_f d_f \quad (2.31)$$

Denklem 2.31'de yer alan l , lif boyunu, d , lif çapını, V_f betona ilave edilen hacimsel lif oranını simgelemektedir. d_f ise, lif aderans faktörüdür ve lifin geometrisine göre 0.5 ile 1 arasında değer alır.

Yukarıda yer alan denklem 2.30 ve denklem 2.31 kullanılarak lif ilavesinin kesitin taşıma gücüne katkısı bulunabilir (Narayanan and Palanjian 1986).



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzemeler, deney değişkenlerinin atlandırılması, beton karışımlarının hazırlanması, deney numunelerinin üretilmesi ve deney aşamaları anlatılarak okuyucunun yapılan çalışma hakkında daha ayrıntılı bilgi sahibi olması hedeflenmiştir.

3.1. Malzemeler

Beton üretiminde kullanılan agregaların, çimentonun, suyun ve diğer katkıların özellikleri, betonun mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Betonarme eleman üretilmesi için gerekli olan donatı çeliğinin özellikleri de betonun mekanik özellikleri yanında betonarme kesitin yük taşıma kapasitesi üzerinde etkili olan bir faktördür. Dolayısıyla betonarme eleman üretiminde kullanılan malzemelerin niteliklerinin bilinmesi son derece önemlidir. Aşağıda bu deneysel çalışmada kullanılan malzemeler hakkında kısaca bilgiler verilmiştir.

3.1.1. Agregalar

Deney elemanlarının üretiminde kullanılan beton karışımlarında, iri malzeme olarak kırmataş No I, ince malzeme olarak ise doğal kum kullanılmıştır. Kırmataş No I Kocaeli, Hereke kırmataş ocağından, doğal kum ise Sakaryadan temin edilmiştir. Kullanılan agregalara ait özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir.

3.1.2. Çimento

Bu çalışma için üretilen beton karışımlarında Nuh Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilen PÇ 42,5 (CEM I 42,5 R) portland çimentosu kullanılmıştır. Üretici firma tarafından elde edilmiş ve tarafımıza verilen PÇ 42.5 portland çimentosuna ait kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Kullanılan Agravaların Özellikleri

Elek Analizi Sonuçları		
Elek Boyutu (mm)	Elek Altına Geçen Malzeme (%)	
	Doğal Kum	Kırmataş No I
31,5	100	100
16	100	100
8	100	62
4	95	8
2	87	4
1	72	3
0,5	43	1
0,25	12	1
İncelik Modülü	1.91	5.21
Fiziksel Özellikler		
Su Emme Oranı (%)	1.40	0.45
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2.65	2.70

Tablo 3.2 Kullanılan Çimentonun Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Özellikler	
İncelenen Maddeler	Elde Edilen Değerler (%)
SiO ₂	20.34
Al ₂ O ₃	4.24
Fe ₂ O ₃	3.89
CaO	63.97
MgO	1.17
SO ₃	2.57
Çözünmeyen Kalıntı	0.71
Kızdırma Kaybı	1.95
Serbest Kireç	0.96
Toplam Alkali (Na ₂ O+0.658 K ₂ O)	-
Klorür	0.0089

Tablo 3.3 Kullanılan Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Fiziksel Özellikler	
İncelenen Özellikler	Elde Edilen Değerler
Priz Başlangıcı (saat : dakika)	03:01
Priz Sonu (saat : dakika)	04:21
Hacim Sabitliği (mm)	2
Özgül Yüzey (cm ² / gr)	3504
Özgül Ağırlık (gr / cm ³)	3.17
Mekanik Özellikler	
Basınç Dayanımları (MPa) (50x50x50mm küp numunelerde)	
2 Günlük	26.9
7 Günlük	47.0
28 Günlük	59.9

3.1.3. Süperakışkanlaştırıcı ve hiperakışkanlaştırıcı

Bu çalışmadaki $f_{ck}=30$ MPa basınç dayanımına sahip beton numunelerinin hazırlanmasında Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'den sağlanan Sika-FFN süperakışkanlaştırıcı, $f_{ck}=60$ MPa basınç dayanımına sahip beton numunelerinin hazırlanmasında ise yine aynı firmadan temin edilen Sikament 300 hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan süperakışkanlaştırıcı Sika-FFN' e ait özellikler Tablo 3.4'de, hiperakışkanlaştırıcı Sikament 300' e ait özellikler ise Tablo 3.5'de verilmiştir.

3.1.4. Donatı çeliği

Burulma deneyi betonarme elemanlarının oluşturulmasında, enine donatı olarak $d_b=8$ mm çapında, boyuna donatı olarak ise $d_b=8$ mm ve $d_b=12$ mm çaplarında BÇ-IIIa kalitesinde nervürlü çelikler kullanılmıştır. Deney numunelerinde enine ve boyuna donatı olarak kullanılan $d_b=8$ mm ve $d_b=12$ mm çaplarındaki nervürlü çelikler Şekil 3.1' de gösterilmiştir.



$$d_b = 12 \text{ mm}$$

$$d_b = 8 \text{ mm}$$

Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan donatılar

Tablo 3.4 Kullanılan Süperakışkanlaştırıcının Özellikleri

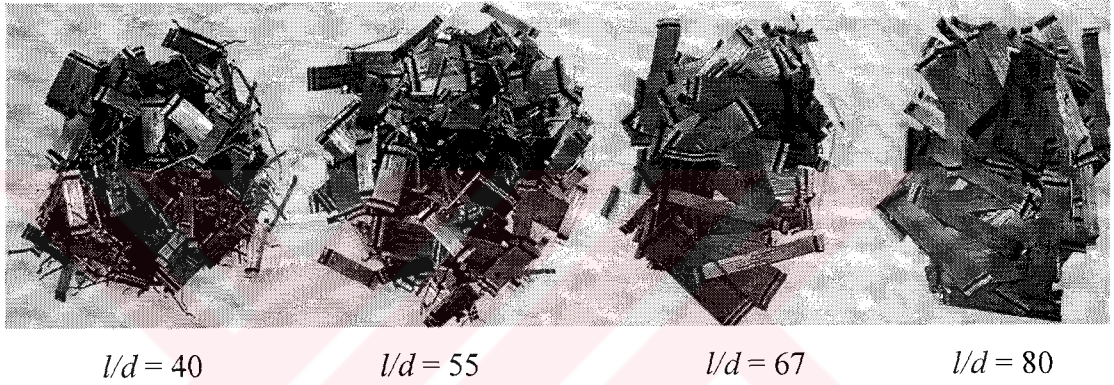
Ticari İsmi	Sika-FFN
Tanım	Yüksek oranda su azaltıcı ve erken/nihai yüksek dayanımlar sağlayan süperakışkanlaştırıcı beton katkısı
Tip	Melamin sülfonat polimeri esaslı sıvı
Görünüş	Kahverengi, akışkan sıvı
Özgül Ağırlık (20 °C)	1.21 ± 0.02 kg/lt
Klorür Miktarı	Yok
Kullanım Oranı	Çimento ağırlığının % 0.8-3.0
Uygunluk	ASTM C 494-81 Tip F ve TS EN 934-2 Standartlarına uygundur

Tablo 3.5 Kullanılan Hiperakışkanlaştırıcının Özellikleri

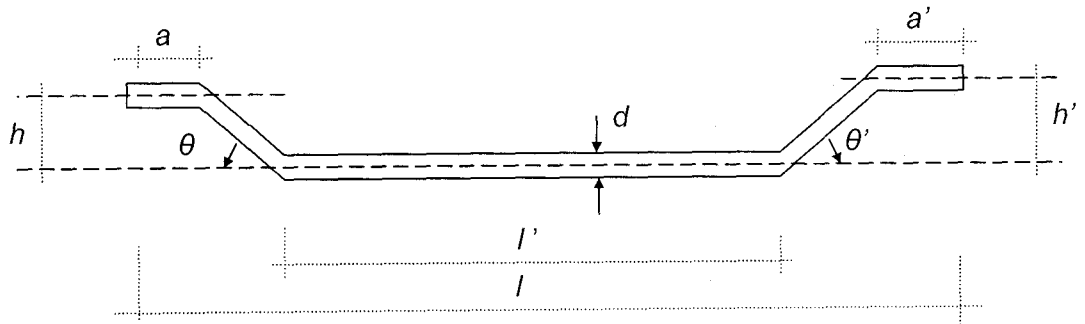
Ticari İsmi	Sikament 300
Tanım	Yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcı ve sertleşme hızlandırıcı beton katkısı
Tip	Özel tip melamin sülfonat polimeri
Görünüş	Kahverengi, akışkan sıvı
Özgül Ağırlık (20 °C)	1.23 ± 0.02 kg/lt
Klorür Miktarı	Yok
Kullanım Oranı	Erken dayanımlı betonlar için çimento ağırlığının % 1.2-3.0'si, akıcı betonlar için %0.8-1.2'si, plastik betonlar için %0.8-1.2'si, yoğun betonlar için min.% 0.5'i oranında
Uygunluk	TS EN 934-2 Standartlarına uygundur

3.1.5. Çelik lif

Bu çalışmada boy/çap oranı 40 (30/0.75), 55 (30/0.55), 67 (60/0.90) ve 80 (60/0.75) olmak üzere 4 farklı ebatta ucu kancalı çelik lif kullanılmıştır. Kullanılan demetler halindeki çelik lifler Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Çelik liflerin geometrisi de Şekil 3.3'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan çelik lifler Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilmiştir. Üretici firma tarafından elde edilmiş ve tarafımıza verilen, çelik liflere ait özellikler Tablo 3.6, 3.7 ve 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Deneylerde kullanılan çelik lifler



Şekil 3.3 Kullanılan çelik lifin geometrisi

Tablo 3.6 Kullanılan Çelik Liflerin Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Özellikler	
İncelenen Maddeler	Elde Edilen Değerler (%)
C	≤ 0.10
Si	≤ 0.30
Mn	≤ 0.60
P	≤ 0.035
S	≤ 0.035

Tablo 3.7 Kullanılan Çelik Liflerin Geometrik Özellikleri

Geometrik Özellikler		
	Alabileceği Değerler	Tolerans (mm)
Çap (mm)	$0.25 \leq d \leq 1.05$	± 0.02
Uzunluk (mm)	$20 \leq l \leq 60$	± 3
Kanca uzunluğu (mm)	$1.5 \leq a \leq 4.0$	
Kanca Yüksekliği (mm)	$h \geq 0.75$	
Kanca açısı	$\theta \geq 20^\circ$	

Tablo 3.8 Kullanılan Çelik Liflerin Mekanik Özellikleri

Mekanik Özellikler	
Çap (mm)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
0.55	$1135 \leq R_m \leq 1535$
0.75	$1085 \leq R_m \leq 1465$
0.90	$1030 \leq R_m \leq 1370$
Uygunluk	ASTM A820 ve TS 10513 standartlarına uygun

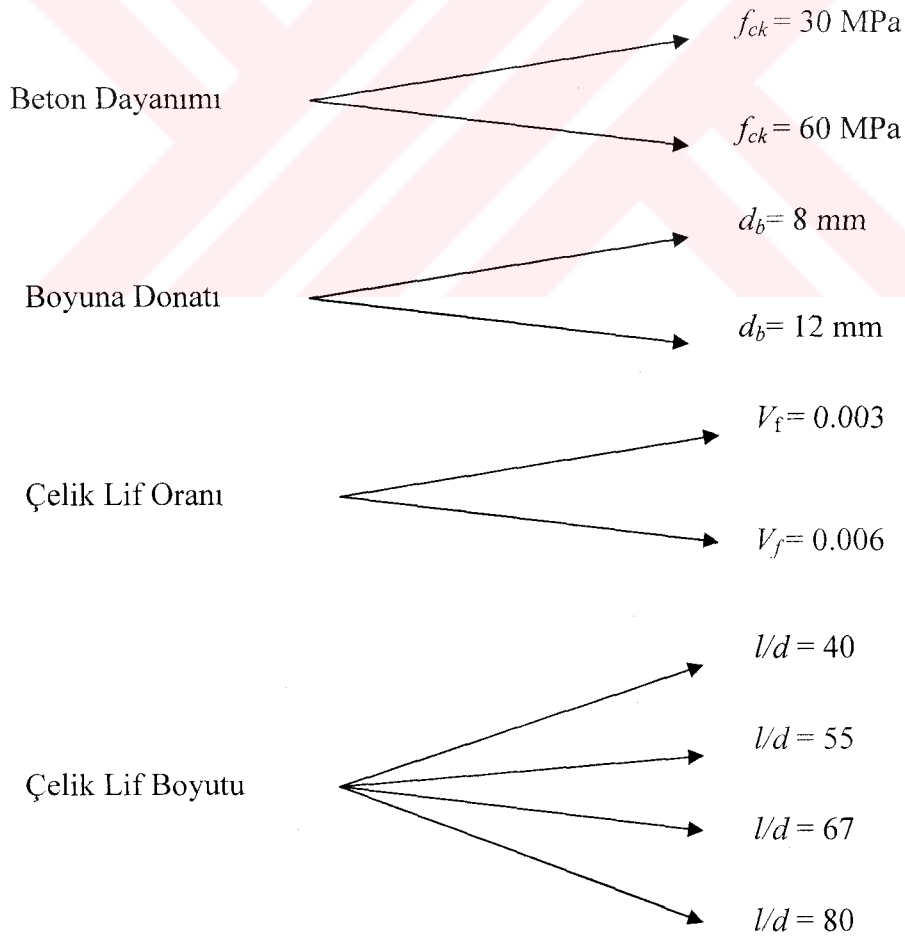
3.2. Dency Değişkenleri ve Numunelerin adlandırılması

Bu bölümde, öncelikle çalışma sırasında kullanılan deney değişkenleri anlatılmış daha sonra da numunelerin ne şekilde adlandırıldığı ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.2.1. Deney değişkenleri

Deney değişkeni olarak $f_{ck}=30$ MPa ve $f_{ck}=60$ MPa olmak üzere iki farklı beton dayanımı hedeflenmiştir. Bu iki dayanımın seçilmesindeki amaç normal ve yüksek dayanımlı betonlarda çelik lif ilavesinin etkisini görebilmektir. Diğer bir değişken olarak numunelere yerleştirilen boyuna donatı miktarı belirlenmiştir. Üretilen numunelerde $4\Phi 8$ mm ve $4\Phi 12$ mm olmak üzere iki farklı donatı miktarı seçilmiştir.

Deney numunelerinin üretilmesi sırasında boy/çap oranı 40, 55, 67, 80 olmak üzere dört farklı boyutta ucu kancalı çelik lif kullanılmıştır. Bu çelik lifler beton hacminin 0.003 ve 0.006'sı oranlarında betona ilave edilmiştir. Lifi betonla bu oranlarla ilave edilmesi ile, lif hacminin artışının davranışa etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Üst sınır olan 0.006 oranı ise deneme betonları dökülerek, betonun yerleşme durumuna göre tespit edilmiştir.



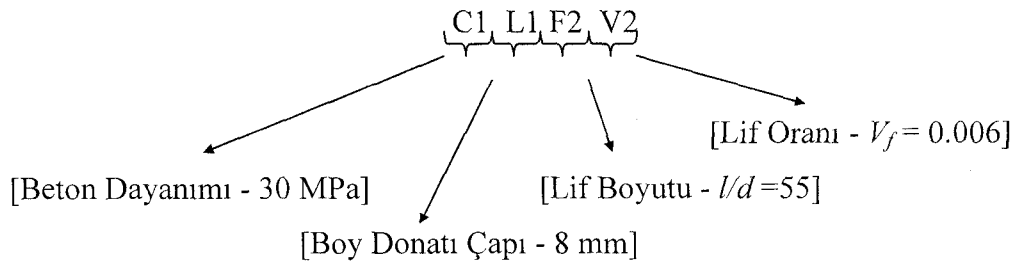
Şekil 3.4 Deney değişkenlerinin şematik olarak gösterimi

Tüm deney elemanlarında, pas payı 5 mm, enine donatı çapı $d_b=8\text{mm}$ ve enine donatı aralığı merkezden merkeze 200 mm olacak şekilde dizayn yapılmıştır. Şekil 3.4’de deney değişkenleri şematik olarak gösterilmiştir.

3.2.2. Numunelerin adlandırılması

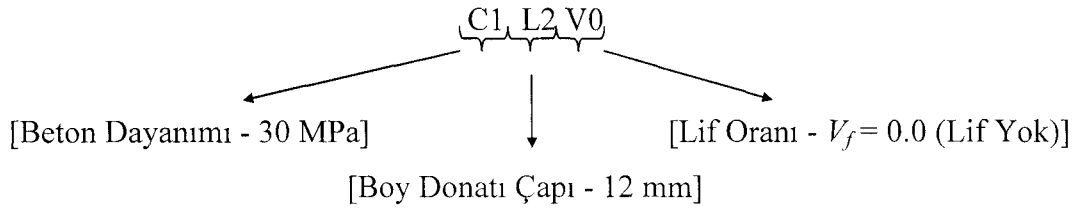
Deney numunelerinin adlandırılmasında yukarıda Bölüm 3.2.1’ de sözü edilen değişkenler kullanılmıştır. Numune adlandırılmada kullanılan ilk karakter olan C bloğu beton dayanımını belirtmektedir. C1 adlandırması $f_{ck}=30$ MPa, C2 adlandırılması $f_{ck}=60$ MPa hedef basınç dayanımındaki betonu ifade etmektedir. Numune adlandırılmasında kullanılan L karakter bloğu boyuna donatı özelliğini belirtmektedir. L1 ifadesi $d_b=8$ mm, L2 ise $d_b=12$ mm çapındaki boyuna donatıyı ifade etmektedir. F bloğu lif boyutlarını belirtmektedir. F1, F2, F3, F4 sırasıyla 40, 55, 67, 80 boy/çap oranına sahip lifler için kullanılmıştır. Adlandırılmada kullanılan V bloğu betona ilave edilen lif hacmini göstermektedir. V1 betona hacminin 0.003 oranında, V2 ise 0.006 oranında lif ilave edildiğini anlatmaktadır. Şahit numunelerin adlandırılmasında lif kullanılmadığı için F bloğuna yer verilmemiş, ve lif yüzdesini ifade eden V ise 0 olarak alınmıştır.

Aşağıda $f_{ck}=30$ MPa beton basınç dayanımına sahip, boyuna donatı çapı $d_b=8$ mm, boy/çap oranı ve 0.006 lif katkısı olan numune ile beton basınç dayanımı $f_{ck}=30$ MPa, boyuna donatı çapı $d_b=12$ mm ve lif içermeyen şahit numune adlandırma örnekleri verilmiştir. Tüm numunelerin adlandırılması ve diğer özellikleri Tablo 3.9’da gösterilmiştir.



Tablo 3.9 Deney Numunelerinin Adlandırılması ve Özellikleri

Numune Adı	Beton Dayanımı (MPa-Hedef)	Boy Donatı Çapı (d_b) (mm)	Etriye çapı/aralığı (mm/mm)	Lif Boyutu (l/d)	Hacimsel Lif Oranı
C1L1V0	30	8	8/20	-	-
C1L1F1V1	30	8	8/20	40	0.003
C1L1F1V2	30	8	8/20	40	0.006
C1L1F2V1	30	8	8/20	55	0.003
C1L1F2V2	30	8	8/20	55	0.006
C1L1F3V1	30	8	8/20	67	0.003
C1L1F3V2	30	8	8/20	67	0.006
C1L1F4V1	30	8	8/20	80	0.003
C1L1F4V2	30	8	8/20	80	0.006
C1L2V0	30	12	8/20	-	-
C1L2F1V1	30	12	8/20	40	0.003
C1L2F4V1	30	12	8/20	80	0.003
C2L1V0	60	8	8/20	-	-
C2L1F1V1	60	8	8/20	40	0.003
C2L1F1V2	60	8	8/20	40	0.006
C2L1F2V1	60	8	8/20	55	0.003
C2L1F2V2	60	8	8/20	55	0.006



3.3. Beton Karışımları

Bu çalışmada kullanılan beton karışımları, lif katılmamış durum için $f_{ck}=30$ MPa ve $f_{ck}=60$ MPa beton basınç dayanımları hedeflenerek hazırlanmıştır. Numune üretiminde kullanılacak beton dayanımlarını elde etmek amacıyla her iki beton

dayanımı için çeşitli beton karışımları tasarlanmış ve bu tasarlanan betonlardan alınan numuneler denenmiştir. Betona çelik lif ilavesi yapılması betonun slump değerini düşüreceği, dolayısıyla lifli betonun kalıba yerleşmesini zorlaştıracağı için beton tasarımı yapılırken slump değerinin yüksek olmasına dikkat edilmiştir. Slump değeri yüksek, yerleşebilirliği iyi beton elde edebilmek için $f_{ck}=30$ MPa basınç dayanımındaki betonlar için süperakışkanlaştırıcı, $f_{ck}=60$ MPa basınç dayanımındaki betonlar için hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda en uygun olduğu düşünülen ve numune üretiminde kullanılan beton karışımları Tablo 3.10'de verilmiştir.

3.4. Dene Numunelerinin Üretilmesi

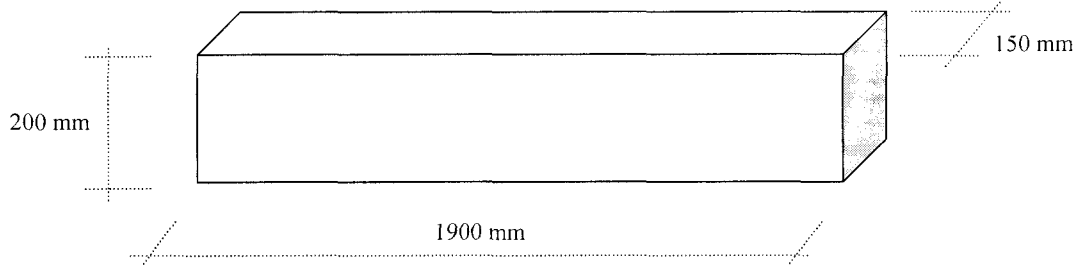
Dene numunesi boyutları, uygulamada karşımıza çıkan boyutlara yakın alınmaya çalışılmış, laboratuvar imkanları da göz önünde bulunarak 150*200*1900 mm ebatlarında numunelerin üretilmesine karar verilmiştir (Şekil 3.5). Üretilen numunelerin kalıplarının yan yüzeyleri 10*200*2000 mm boyutlarındaki çelik plakalardan, uç kısımları da bu plakalar arasında kaydırılabilen 50*150*200 mm ebatlarındaki ahşap bloklardan oluşmaktadır.

Tablo 3.10 Deneylerde Kullanılan Beton Karışımları (1 m³ için)

Beton Bileşenleri	Hedef Dayanım	
	30 MPa	60 MPa
Su / Çimento	0.65	0.37
Su (kg/m ³)	208	203.5
Çimento (kg/m ³)	320	550
Kırmataş No I (kg/m ³)	1091	982
Kum (kg/m ³)	714	642
Süperakışkanlaştırıcı (kg/m ³) *	3.2	-
Hiperakışkanlaştırıcı (kg/m ³) **	-	8.8
Çökme (Slump) (cm)	24	20

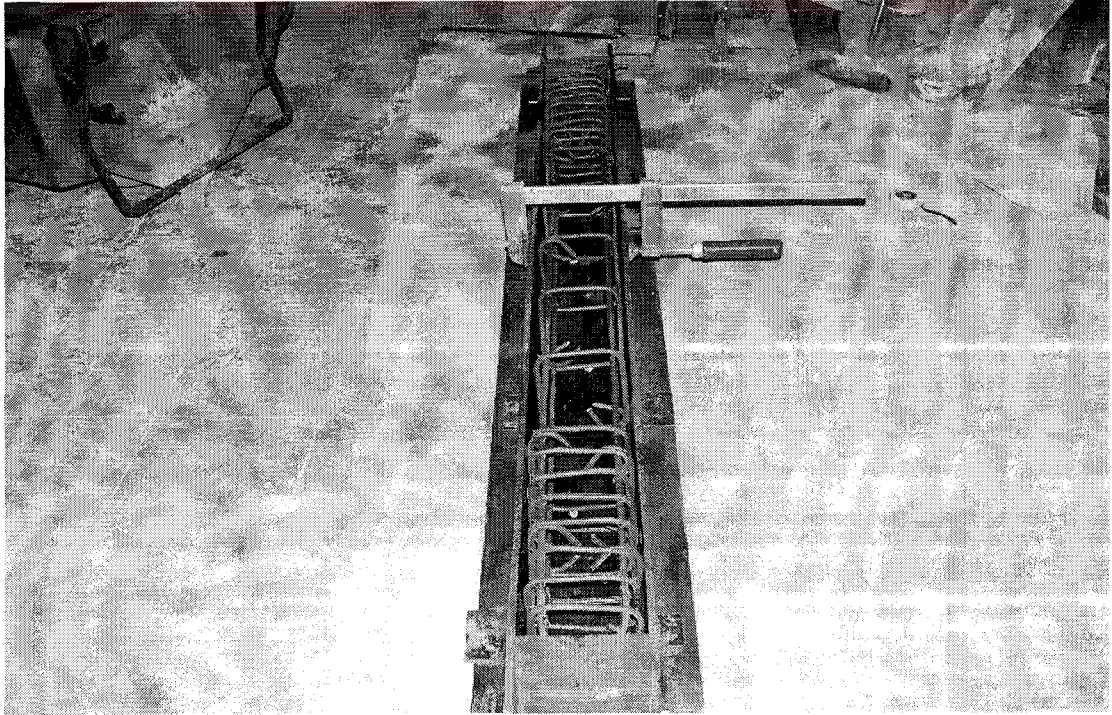
* Süperakışkanlaştırıcı çimento ağırlığının % 1' i kadar kullanılmıştır.

** Hiperakışkanlaştırıcı çimento ağırlığının % 1.6' sı kadar kullanılmıştır.



Şekil 3.5 Deney numunesinin boyutları

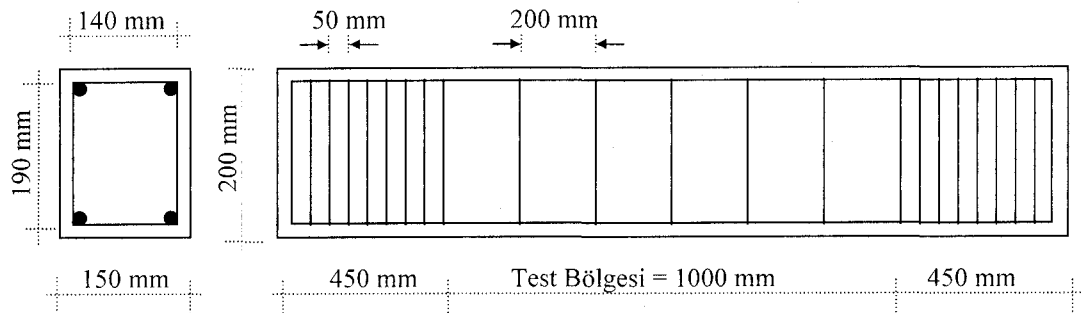
İki ucuna arzulanan numune boyutlarını sağlayacak şekilde ahşap bloklar yerleştirilmiş plakalar, uçlarında altta ve üstte bulunan deliklerden somunlar geçirilmek suretiyle sabitlenmiştir. Pürüzsüz bir numune tabanı elde edebilmek amacıyla, yan plakalar, ahşap bloklar ve somunlardan oluşan sistem 30*300*3000 mm ebatlarındaki ahşap plaka üzerine yerleştirilmiştir. Numunenin boyunun uzun olması dolayısıyla, orta bölgesinin açılmasını önleyip, planlanan numune genişliğini sağlamak için ahşap plaka üzerine belirli aralıklarla çelikten yapılmış L şeklinde kulaklar monte edilmiştir. Monte edilen bu kulaklar, çelik plakaların beton ile doldurulması sonucu oluşacak dışı açılmayı önleyerek, 200 mm numune genişliğinin tüm numune boyunca sabit olmasını sağlamıştır. Hazırlanan numune kalıpları Şekil 3.6' da gösterilmiştir.



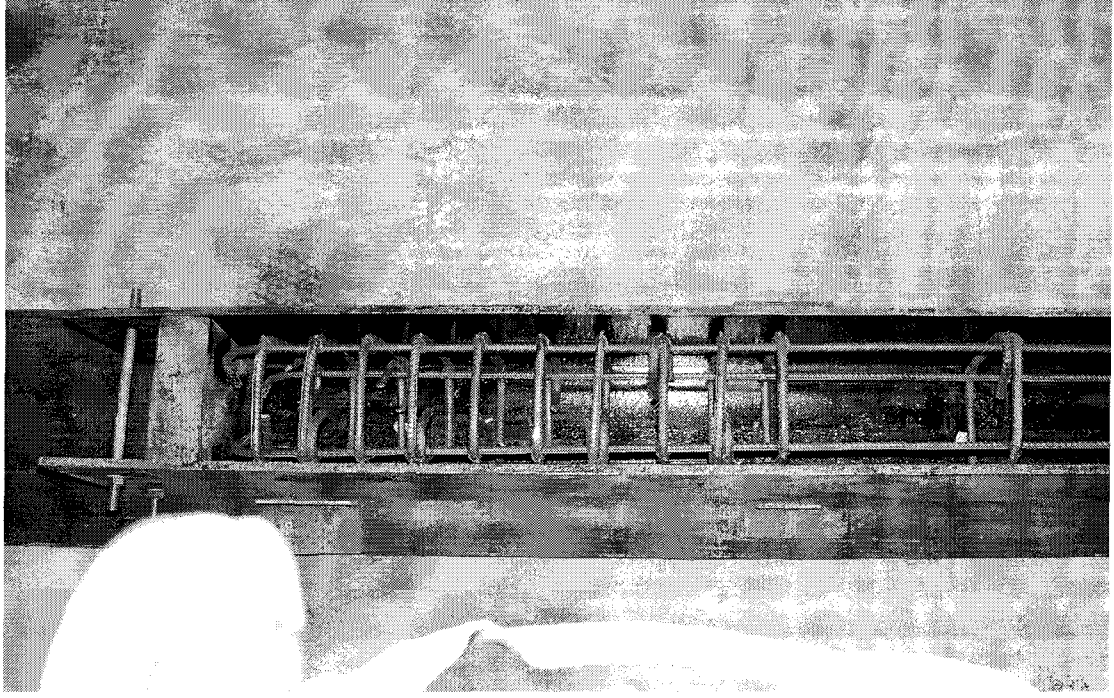
Şekil 3.6 Hazırlanan numune kalıpları

Deney numuneleri için kalıplar hazırlanırken dört köşede bulunan her bir boyuna donatının ucu 90° açıyla kıvrılarak 50 mm uzunluğunda kancalar oluşturulmuştur. Bu kancaların oluşturulmasıyla boyuna donatıların beton içinden sıyrılmasının önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Enine donatıların uçları TS 500-2000’ de belirtildiği üzere 135° açıyla kıvrılarak 50 mm uzunluğunda kancalar oluşturulmuştur. 1900 mm uzunluğundaki deney numunesinin ortada kalan 1000 mm uzunlukta olan kısmı test bölgesi olacağı için donatı bağlanması sırasında bu bölgedeki enine donatılar merkezden merkeze 200 mm olacak şekilde dizayn edilmiştir. Test bölgesi dışında kalan her iki uçtaki 450 mm uzunluğunda olan bölgelerde Şekil 3.8’ de gösterildiği gibi enine donatılar merkezden merkeze 50 mm aralıkla kullanılarak numunenin test bölgesi dışında kalan kısımlarının daha rijit olması sağlanmıştır. Deney numunesine donatı yerleşimi Şekil 3.7’ de verilmiştir.

Beton dökümünden önce, hazırlanan kalıpların iç yüzleri kalıp yağı ile yağlanarak üretilen numune yüzeylerinin pürüzsüz olması sağlanmıştır. Hazırlanan donatılar, tel fırça yardımıyla toz, pas ve kirden arındırılarak, yağlanan kalıplar içine yağ bulaşmayacak şekilde dikkatlice yerleştirilmiştir. Donatıların toz, pas, kirden arındırılması ya da yağ olmaması donatının betonla aderansını sağlaması açısından önem arz etmektedir. Donatı ile kalıp yüzeyleri arasındaki pas payları donatı ile kalıp yüzeyleri arasına iri agrega sıkıştırmak suretiyle sağlanmıştır. Her bir numune için beton basınç ve çekme dayanımlarının takibini yapmak üzere 150 mm çapında, 300 mm yüksekliğinde çelik silindir kalıplar ve 100*100*500 mm ebatlarında çelik prizma kalıplar kullanılarak elemanlar üretilmiştir. Pürüzsüz yüzey sağlamak amacıyla bu kalıplar da kalıp yağı ile yağlanarak kullanılmıştır (Şekil 3.9).



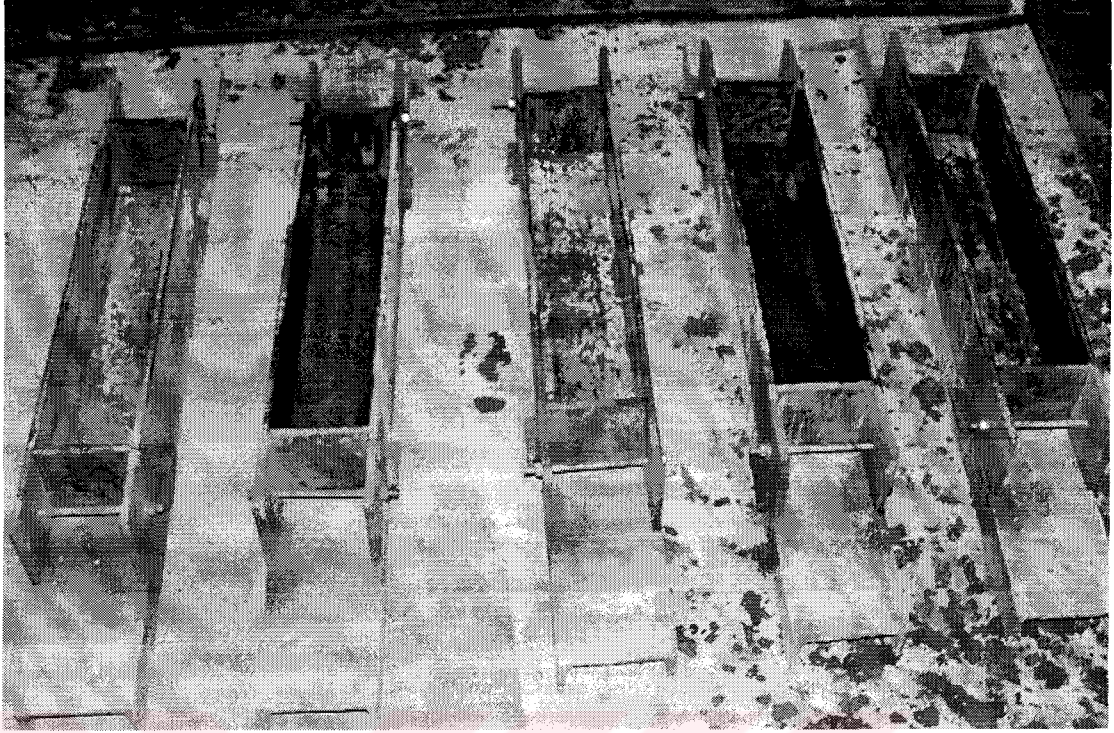
Şekil 3.7 Deney numunesine donatı yerleşimi



Şekil 3.8 Test bölgesi dışı etriye sıkılaştırılması

Deney numuneleri için kullanılan beton üretimi, 56 dm^3 kapasiteli düşey eksenli cebri karıştırıcılı betoniyer ile 30 dm^3 miktarlar halinde yapılmıştır. 12 adet silindir, 5 adet prizma ve 1 adet betonarme kirişten oluşan 1 deney seti için gerekli 150 dm^3 beton 5 parti halinde dökülmüştür. Bir önceki partide dökülen betonun prizinin oluşmadan, bir sonrakinin dökülebilmesi için her bir döküm arasında mümkün olan en az süre harcanmaya özen gösterilmiştir.

Beton dökümü sırasında betoniyere doğal kum, çimento ve kırma taş No I sırayla konulduktan sonra betoniyer çalıştırılmış bu üç malzemenin çok kısa süre karıştırılmasından sonra, bu malzemelere içine akışkanlaştırıcı katılmış su ilave edilmiştir. Betoniyerdeki malzemelerin tam karışımı sağlandıktan sonra karışıma demetler halindeki çelik lifler azar azar ilave edilmiştir. Bu işlem bittikten sonra betoniyer ortalama hızla 5 dakika süreyle çalıştırılmıştır. Bu süre sonunda homojen hale gelen beton, kürek yardımıyla kalıplar içine aktarılmış, yerleşmenin tam olarak sağlanması için şişleme ve tokmaktama yöntemi uygulanmıştır. Şahit numunelerde çelik lif kullanılmadığı için, şahit numunelerin betonunun üretilmesi sırasında çelik lifin ilave edilmesi dışındaki adımlar aynen tekrar edilmiştir.



Şekil 3.9 Eğilme numunesi kalıpları

Deney numuneleri dökümden sonra 4 gün süre ile kalıplar içinde bırakılmış, bu sürenin sonunda kalıptan çıkartılan numunelere, 3 gün boyunca ıslak keten parçaları örtülerek kür işlemi uygulanmıştır. Bu üç günlük kürleme işleminden sonra test tarihine kadar numuneler laboratuvar ortamında bırakılmıştır. Beton dökümü ve test tarihini bekleme süresince laboratuvardaki sıcaklık değerleri 13-23° C, bağıl nem değerleri ise %65-75 aralığında tespit edilmiştir.

3.5. Deney Aşaması

Bu bölümde betonun ve donatı çeliğinin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deneyler ile burulma deneylerinin yapıldığı düzenek tanıtıldıktan sonra burulma deneylerinin nasıl yapıldığına dair ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

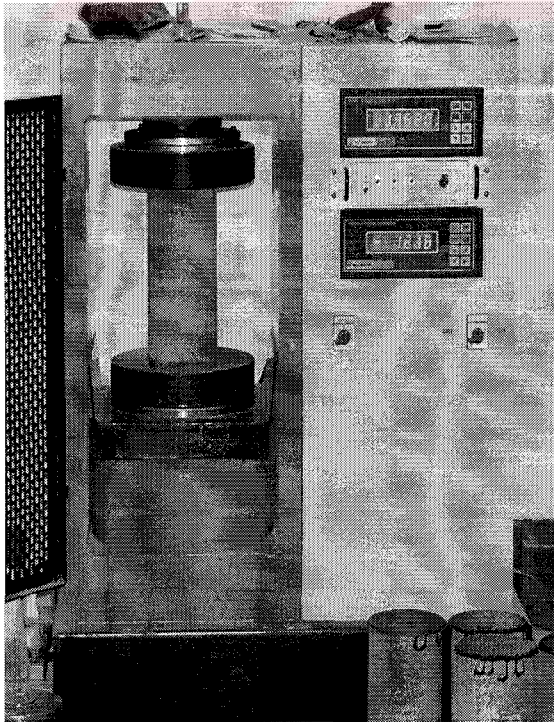
3.5.1. Beton deneyleri

Deney numunelerinin üretimi sırasında beton basınç dayanımlarının takip edilebilmesi amacıyla her bir deney elemanı için 150 mm çapında, 300 mm

yüksekliğindeki silindir numunelerden 12 adet alınmıştır. Alınan bu silindir numuneler belirli aralıklarla kükürt başlık yapılmak suretiyle 3000 kN kapasiteli beton basınç deney aletinde denenmiş ve üretilen numunenin basınç dayanımı takip edilmiştir. Numunelere ait beton basınç dayanımları, hedeflenen düzeye ulaştığında burulma deneyleri yapılmıştır. Burulma deneylerinin yapıldığı gün, basınç dayanımını tespit için alınan diğer silindir numuneler basınç deneylerine tabi tutularak ortalaması alınmış ve daha güvenilir basınç dayanımı elde edilmiştir (Şekil 3.10).

Aynı deney setine ait olan silindir numuneler üzerinde Brezilya Yarma deneyleri yapılmış ve yapılan yarma deneylerinin ortalaması alınarak yarma çekme dayanımı bulunmuştur (Şekil 3.11).

Her bir set için üretilen betonlardan alınan 100*100*500 mm boyutlarındaki prizmatik eğilme kirişleri de burulma deneyinin yapıldığı gün üç noktadan eşit yük vermek suretiyle eğilme deneyine tabi tutulmuş ve üretilen betonun eğilmedeki çekme dayanımı, yapılan eğilme deneyi testlerinin ortalaması alınarak tespit edilmiştir (Şekil 3.12).

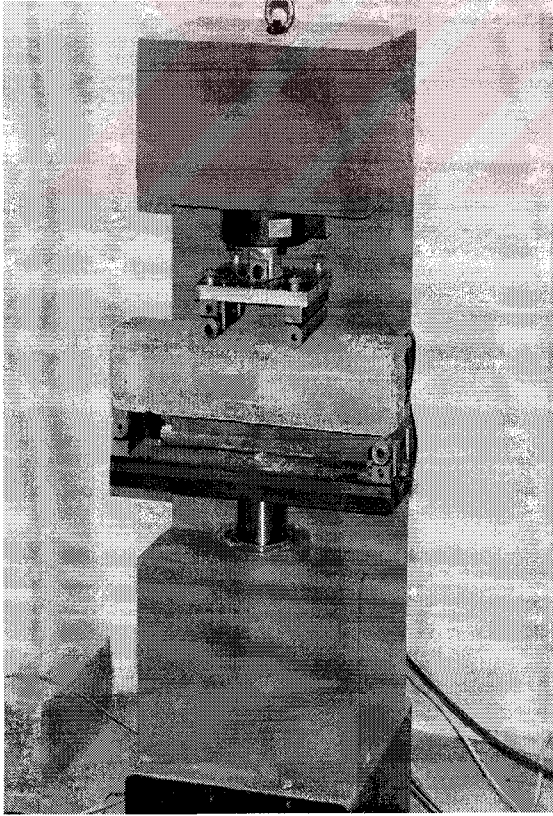


Şekil 3.10 Beton basınç dayanımı deneyi



Şekil 3.11 Brezilya yarma deneyi

Beton basınç dayanımı testi ile dayanımı tespit edilen, aynı deney setine ait olan silindir numunelerin üçer adeti ile TS 3052' ye uygun olarak elastisite modülü deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler için başlangıç yükü 50 kN alınmış ve beton basınç dayanımının % 40'ı olan sınır yükü seçilmiştir. 50 kN olan başlangıç yükü ile sınır yükü arası 10 eşit parçaya bölünerek deformasyon okuma, yük değerleri tespit edilmiştir. Yüklemeye başladıktan sonra elastisite modülü çerçevesi üzerinde bulunan saat yardımıyla numunede meydana gelen kısaltmalar tespit edilmiştir. İlk deformasyon okuması 50 kN' da yapılmış, daha sonra sınır değere kadar tespit edilen her yük seviyesinde deformasyonlar okunmuştur. Okunan bu deformasyonlardan birim deformasyonlar hesaplanarak, numunenin gerilme birim deformasyon grafiği oluşturulmuştur. Numuneye ait gerilme birim deformasyon grafiğinden de üretilen betonlara ait statik elastisite modülü tespit edilmiştir. Bu işlem 3 adet silindir numunede yapıp ortalaması alınarak da daha güvenilir elastisite modülü hesaplanabilmiştir. Elastisite modülü deneyi Şekil 3.13' de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Beton eğilme deneyi



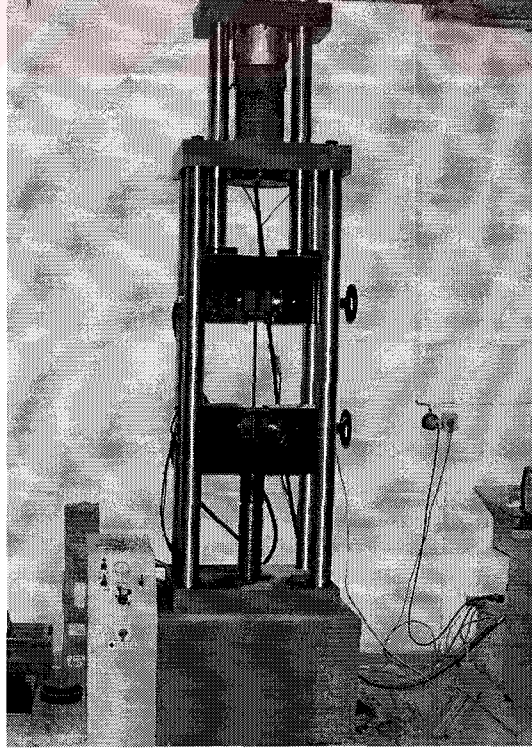
Şekil 3.13 Elastisite modülü deneyi

3.5.2. Donatı çeliği çekme deneyi

Burulma deneyi numuneleri döküme hazırlanırken her numune için alınan donatı parçaları 600 kN kapasiteli çelik çekme deneyi aletinde teste tabi tutulmuştur.(Şekil 3.14) Donatı çekme deneyleri sonucunda her bir kirişte kullanılan donatı için akma ve kopma dayanımı ile akma ve kopma birim deformasyonları elde edilmiştir. $d_b=8$ mm ve $d_b=12$ mm çaplarındaki donatılar için elde edilmiş ortalama gerilme-birim deformasyon grafikleri Ek A' da Şekil Ek A.1 ve Şekil Ek A.2' de verilmiştir.

3.5.3. Burulma deneyleri

Üretilen 150*200*1900 mm boyutlarındaki burulma deneyi numuneleri Şekil 3.15' de gösterilen düzenek kullanılarak basit burulma testlerine tabi tutulmuş ve deney süresince numunede meydana gelen dönme değerleri ile boy uzamaları kaydedilmiştir.

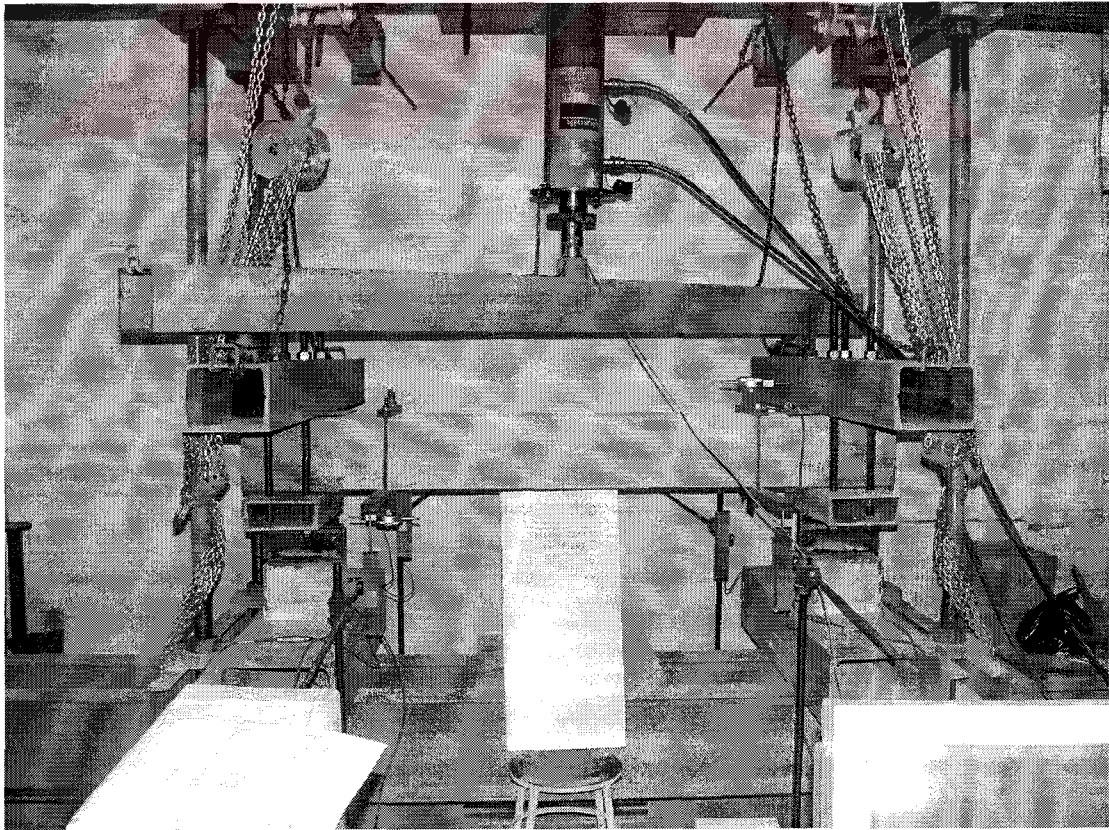


Şekil 3.14 Çelik çekme deneyi

Deney düzeneği hazırlanırken numunenin serbestçe dönmesini ve uzamasını sağlamak için her iki ucuna kayıcı mesnetler yerleştirilmiştir. Bu kayıcı mesnetler üzerine sabitlenen plakalar ile üst kollar arasına somunlar yardımıyla bağlanan numunelere, üste yerleştirilen dağıtıcı kirişin ortasına yük uygulamak suretiyle burulma momenti verilmiştir. 300 kN kapasiteli hidrolik silindir pompa seti ile dağıtıcı kiriş ortasına yükün değişimi 100 kN kapasiteli elektronik yük hücreleri yardımıyla takip edilmiştir.

Numunede oluşan birim dönme değeri de 1 m uzunluğundaki test bölgesinin başlangıcı ile sonuna bağlanan ve öne arkaya çıkartılan kolların ucuna oturtulmuş 100 mm kapasiteli 0.02 mm hassasiyetli elektronik komparatörlerden okunan deformasyonların kullanılmasıyla oluşturulan denklem yardımıyla tespit edilmiştir.

Oluşan boy uzamaları ise test bölgesi başlangıcı ve sonundaki kollar üzerine alttan ve üstten bağlanan elektronik komparatörlerin ucuna bağlanmış elastisite modülü yüksek



Şekil 3.15 Burulma deneyi düzeneği

çok ince tellerin karşı tarafta bulunan kollara bağlanması ile okunan deformasyonların ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

Deney verileri, elektronik veri toplama sistemi ile bilgisayara kaydedilmiş ve deney esnasında bilgisayar ekranında, burulma momenti- birim dönme açısı ilişkisi grafiği oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafikten burulma momenti-birim dönme açısı değerleri, deney süresince takip edilmiş ilk çatlak oluştuğu moment ve birim dönme açısı değeri kaydedilmiştir. İlk çatlak oluşmasından sonra birim dönme açısı değeri 0.01 rad/m değerine ulaştığı anda yükleme çok kısa süre ile durdurulmuş bu seviyedeki burulma momenti ve oluşan çatlakların genişlikleri okunarak numunenin fotoğrafı çekilmiştir. Bu işlemlerin ardından yükleme devam edilmiş her 0.01 rad/m birim dönme açısı artışında bu işlemler tekrarlanmış, toplam birim dönme değeri 0.12 rad/m' ye ulaştığı an yük uygulaması durdurulmuş, moment, çatlak genişliği okumaları yapıp fotoğraf çekme işlemi tamamlandıktan sonra uygulanan yük yavaş yavaş tamamen kaldırılmış ve tekrar çatlak genişliği okumaları, birim dönme açısı okuması yapıp, deney numunesinin fotoğrafı çekilerek deneye son verilmiştir.

4. DENEYLERDEN ELDE EDİLEN VERİLER

Bu çalışmada, Bölüm 3’de malzeme ve kesit özellikleri verilen 17 adet betonarme kiriş basit burulma altında denenmiştir. Bu bölümde denenilen numunelerin öncelikle çatlama davranışları, elde edilen veriler ve bu verilerin elde edilmesi sırasında kullanılan yöntemler ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Daha sonra elde edilen veriler yardımıyla çeşitli grafikler ve tablolar oluşturulmuştur.

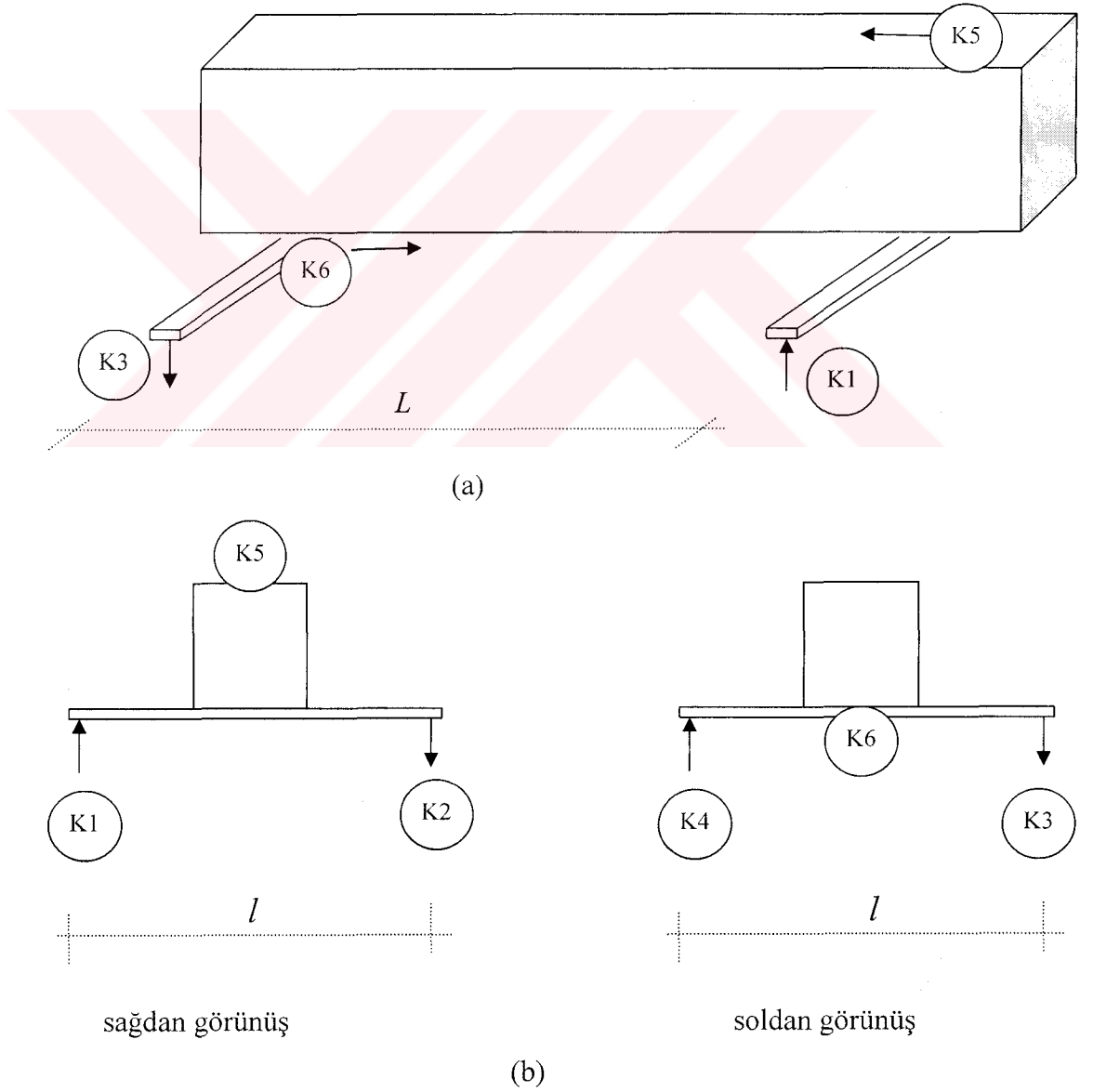
4.1 Numunelerin Çatlak Dağılımları

Deneye hazırlanan numunenin, yük uygulanmaya başlanmadan önce fotoğrafı çekilmiş, fotoğraf çekme işleminden sonra hidrolik silindir yardımıyla yük uygulanmaya başlanmış, ilk çatlağın oluşması ile birlikte yük sabit seviyede tutularak, çatlak işaretlenmiş, veri toplamak için kullanılan bilgisayar ekranında oluşturulan grafik üzerinde okunan çatlama momentine karşı gelen, birim dönme açısı ve burulma momenti değeri deney numunesi önündeki tabelaya yazıldıktan sonra numunenin fotoğrafı çekilmiştir. Oluşan çatlağın en çok açılan noktadaki genişliği çatlak metresi yardımıyla ölçülerek kaydedilmiştir. Daha sonra yük arttırılmaya devam edilmiş birim dönme açısı değeri $\theta=0.01$ rad/m’ ye ulaştığı an yük tekrar sabit seviyede tutularak, burulma momenti ve birim dönme açısı değeri tabelaya yazılarak bu seviye için fotoğraf çekme işleminden sonra çatlak genişliği okumaları yapılmıştır. Bu işlemler birim dönme açısı değeri $\theta=0.12$ rad/m değerine ulaşana kadar tekrarlanmıştır. $\theta=0.12$ rad/m değerindeki okumalardan sonra numuneye uygulanan yük tamamen kaldırılarak çatlak genişliği okumaları yapılmıştır.

4.2. Deneylerden Elde Edilen Veriler

Burulma deneylerinin yapıldığı gün, burulma deneyi numunesinin üretildiği betonun mekanik özelliklerini tespit için üretilen silindir numuneler ve eğilme kirişleri de test edilmiştir. Bu deneylerden betonun basınç, silindir yarma, eğilme dayanımları ile elastisite modülü tespit edilmiştir.

Burulma deneyleri sırasında, burulma momenti oluşturan yük, birim dönme açısı ve numune boy uzaması değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 4.1 Deney numunesi üzerine komparatörlerin yerleşimi

Numunede oluşan birim dönme ve boy uzaması değerleri Şekil 4.1’de gösterilen komparatörlerden okunan değerler yardımıyla bulunmuştur. Deney numunesine burulma momenti, Şekil 3.15’de gösterilen düzeneğe yardımıyla uygulanmıştır. Üstteki dağıtıcı kirişe hidrolik silindir ile yük uygulanmış ve bu yükün takibi yük hücresiyle yapılmıştır. Yük hücresinden okunan değer, uçlarda bulunan iki kol üzerine eşit geldiği için, okunan değer yarısı yan kolların uzunluğu ile çarpılarak numuneye uygulanan burulma momentinin değeri tespit edilmiştir.

Numunenin boy uzaması ;

$$\Delta L = \frac{K5 + K6}{2} \quad (4.1)$$

denklemini ile bulunmuştur. Burada K5 ve K6, kirişin test bölgesi uçlarına karşılıklı olarak bağlanan alttaki ve üstteki komparatörlerden okunan deformasyon değerlerini göstermektedir. ΔL ise numunenin test bölgesinde oluşan boy uzamasını ifade etmektedir.

Birim dönme açısı, deney numunesi üzerine yerleştirilen K1, K2, K3 ve K4 komparatörlerinden okunan değerler kullanılarak;

$$\varphi = \frac{(|K1| + |K2| + |K3| + |K4|)/l}{L} \quad (4.2)$$

denklemini yardımıyla bulunmuştur. Denklem 4.2’ de kullanılan l , Şekil 4.1 (b)’de gösterilen, önde ve arkada bulunan komparatörler arasındaki mesafeyi, L ise Şekil 4.1 (a)’da gösterilen deney numunesinin test bölgesinin uzunluğunu göstermektedir. Denklemde payında yer alan ifade dönme açısını belirtmekte, bu değer numune test bölgesi uzunluğuna bölünmesi ile de birim dönme açısı φ elde edilmektedir. Denklemde komparatörlerden okunan değerlerin mutlak değeri içine alınmasının sebebi Şekil 4.1 (b)’de gösterilen K1 ve K4 komparatörlerinin ucunun dışarı doğru çıkmasından dolayı pozitif, K2 ve K3 komparatörlerinin ise içeri doğru girmesi sebebiyle negatif değerler vermesidir.

Malzeme deneyleri sonucunda, tüm numuneler için elde edilen beton basınç, yarma çekme, eğilme çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri, ayrıca veri toplama sisteminden elde edilen değerlerin analiz edilmesi ile elde edilen çatlama momenti T_{cr} , bu çatlama momentine karşı gelen birim dönme açısı Φ_{cr} , burulma deneyi numunesinin taşıyabildiği en büyük burulma momenti T_u , en büyük moment olan T_u' ya karşı gelen Φ_u , deney numunesinin çatlama öncesi burulma rijitliği R_0 ve çatlama sonrası burulma rijitliği R Tablo 4.1' de verilmiştir.

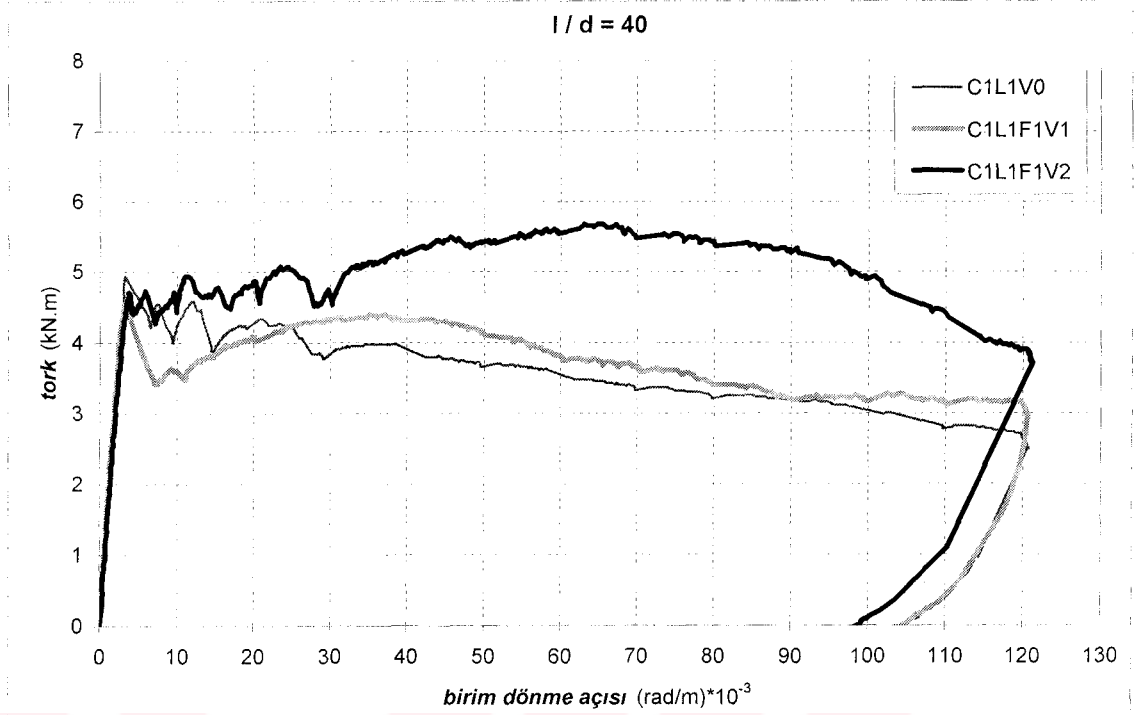
Deney numunesinin çatlama öncesi buruma rijitliği R_0 , denklem 2.1 kullanılarak, çatlama sonrası burulma rijitliği R ise denklem 2.2 kullanılarak bulunmuştur. Genel olarak tüm numunelerde çatlama öncesi burulma rijitliği 1000 kN.m^2 düzeyinde iken çatlama sonrasında burulma rijitliği lif içermeyen ve 0.003 çelik lif içeren numunelerde çatlama sonrası burulma rijitliğinden söz edilemezken, lif içeriği 0.006 olan numunelerde ise burulma rijitliği $15-20 \text{ kN.m}^2$ aralığında hesaplanmıştır.

4.2.1. Burulma momenti-birim dönme açısı ilişkileri

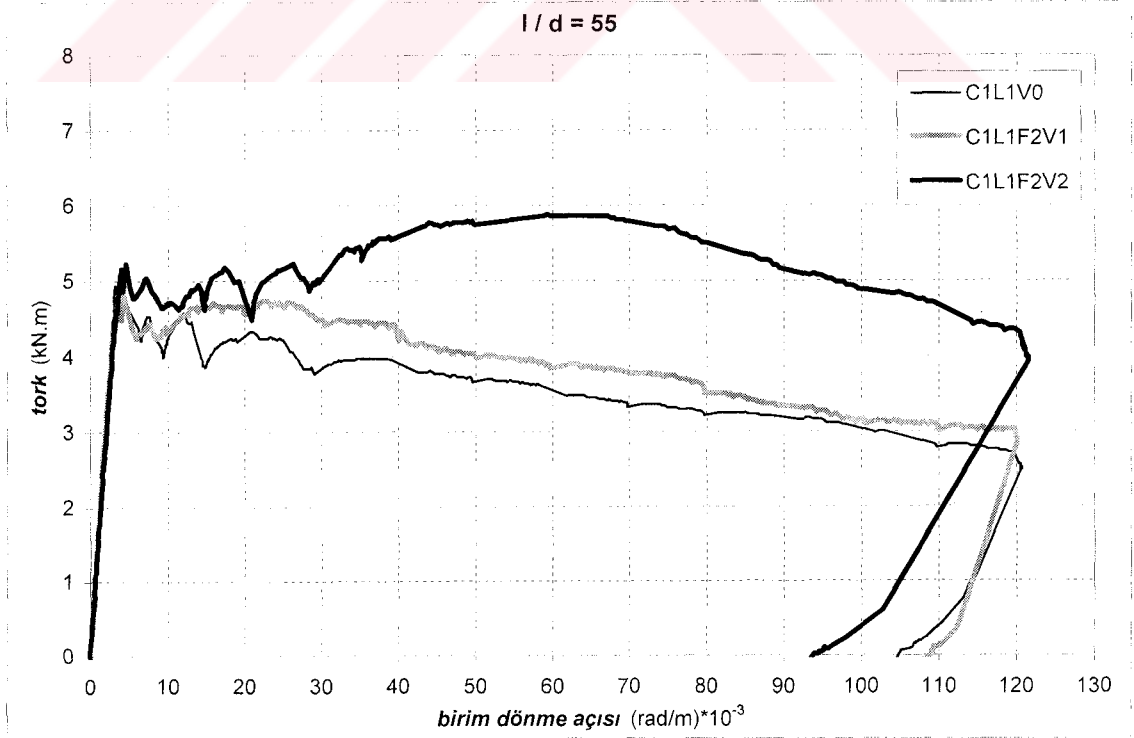
Aşağıda her deney numunesi için elde edilmiş burulma momenti-birim dönme açısı ilişkisi grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Burulma momenti-birim dönme açısı grafiği, elemanın burulma kapasitesini, enerji yutma miktarını ve burulma rijitliğini, tespit etmek amacıyla oluşturulmuştur. Bu amaçla oluşturulan burulma momenti-birim dönme açısı grafikleri Şekil 4.2 ve Şekil 4.14 arasında verilmiştir.

Tablo 4.1 Deney Verileri ve Elde Edilen Hesap Sonuçları

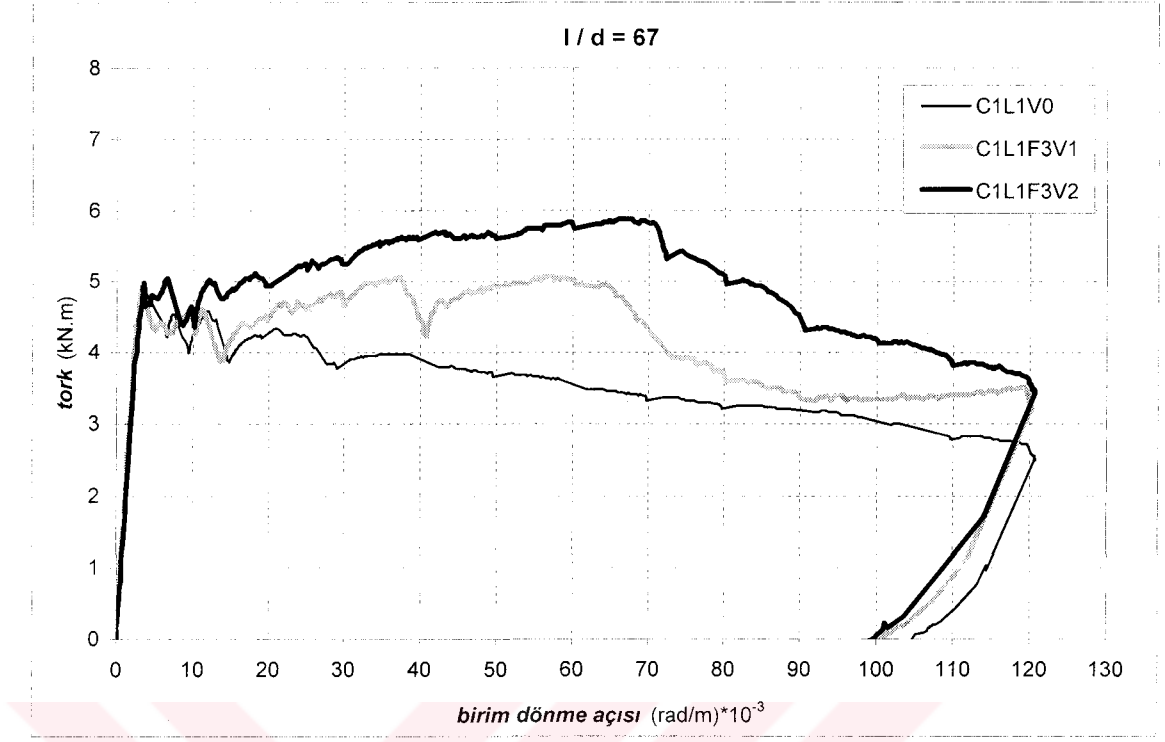
Numune Adı	f_{ck} (MPa)	f_{ctx} (MPa)	f_{ctf} (MPa)	E (MPa)	T_{cr} (kN.m)	Φ_{cr} (rad/m)	T_u (kN.m)	Φ_u (rad/m)	R_0 (kN.m ²)	R (kN.m ²)
C1L1V0	34,8	3,51	4,54	31407	4,93	0,0032	4,93	0,0032	1541	0
C1L1F1V1	33,4	3,55	4,96	30060	4,58	0,0032	4,58	0,0032	1431	0
C1L1F1V2	31,3	3,35	5,02	29931	4,62	0,0039	5,68	0,0630	1185	18
C1L1F2V1	31,0	3,08	4,82	27924	4,93	0,0038	4,93	0,0038	1297	0
C1L1F2V2	30,9	3,41	4,57	29940	5,14	0,0042	5,88	0,0590	1224	14
C1L1F3V1	32,7	3,42	4,39	31198	4,85	0,0034	5,07	0,0563	1426	4
C1L1F3V2	29,5	3,08	4,39	28518	4,96	0,0036	5,88	0,0659	1378	15
C1L1F4V1	31,9	3,46	4,56	27882	4,80	0,0041	4,80	0,0041	1171	0
C1L1F4V2	30,0	2,95	4,82	28715	4,51	0,0038	5,54	0,0464	1187	24
C1L2V0	34,8	3,51	4,54	31407	4,45	0,0049	5,07	0,0346	908	21
C1L2F1V1	31,7	3,58	4,46	29623	4,53	0,0039	6,01	0,0800	1162	19
C1L2F4V1	31,6	3,56	4,87	27545	4,17	0,0038	6,15	0,0940	1097	22
C2L1V0	59,0	4,65	6,08	36251	4,52	0,0039	4,63	0,0226	1159	6
C2L1F1V1	58,6	4,84	6,23	36552	5,23	0,0035	5,23	0,0035	1494	0
C2L1F1V2	59,8	4,80	6,75	36112	6,22	0,0035	6,65	0,0327	1787	2
C2L1F2V1	60,8	4,86	5,95	36445	5,05	0,0035	5,83	0,0418	1443	20
C2L1F2V2	62,7	5,46	6,63	36022	5,95	0,0041	7,51	0,0459	1451	37



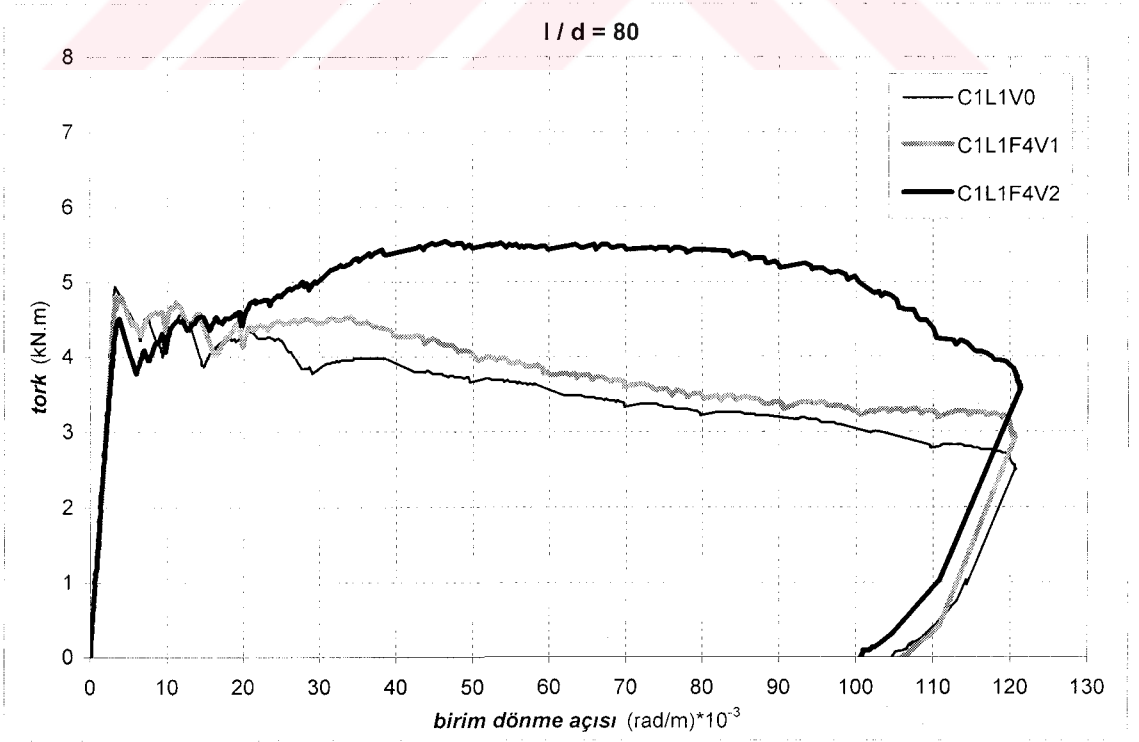
Şekil 4.2 $l/d = 40$ olan lif tipinde lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi



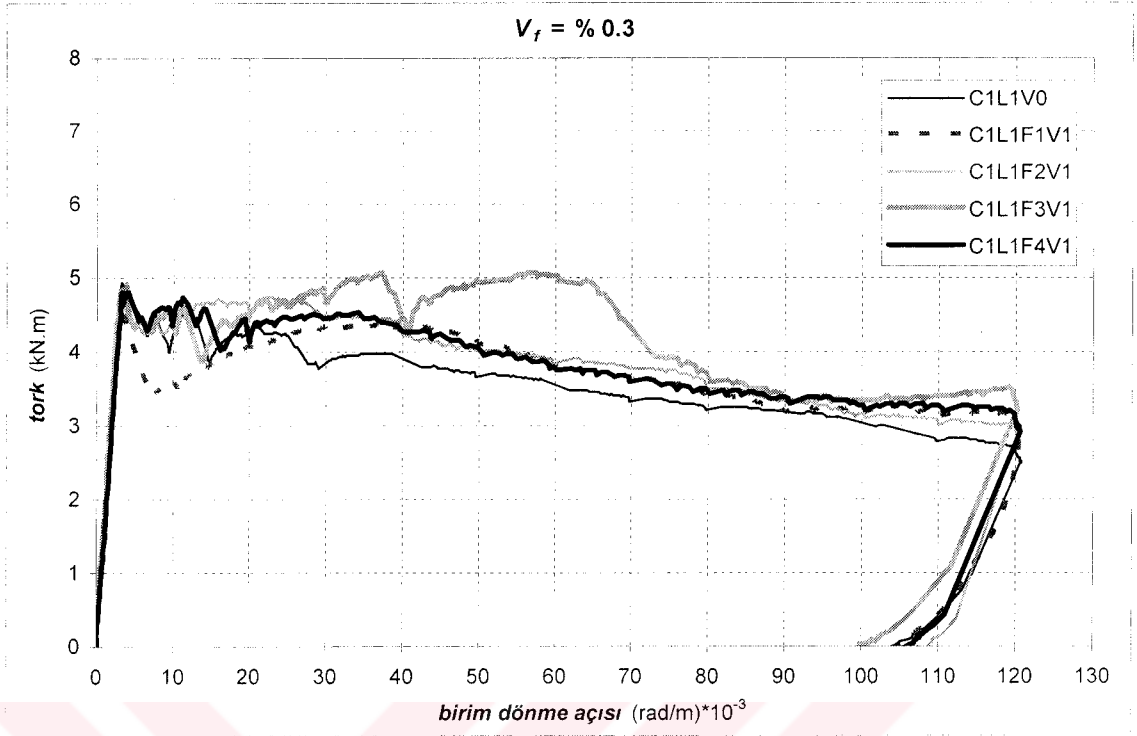
Şekil 4.3 $l/d = 55$ olan lif tipinde lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi



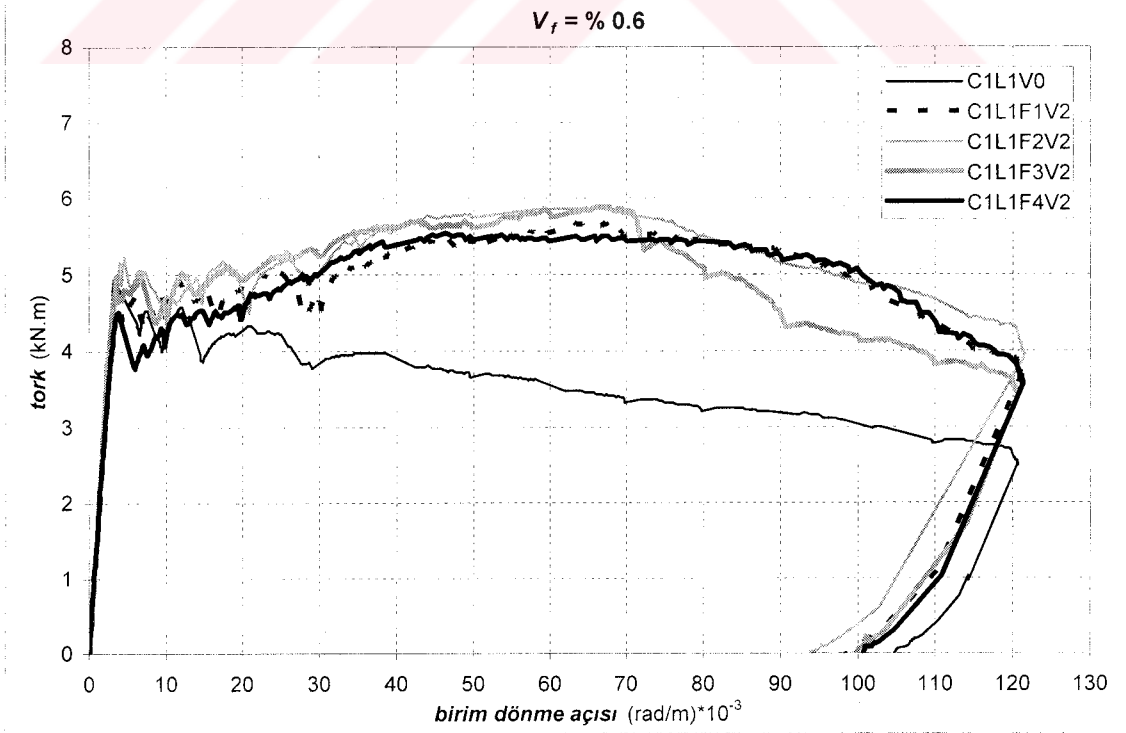
Şekil 4.4 $l/d = 67$ olan lif tipinde lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi



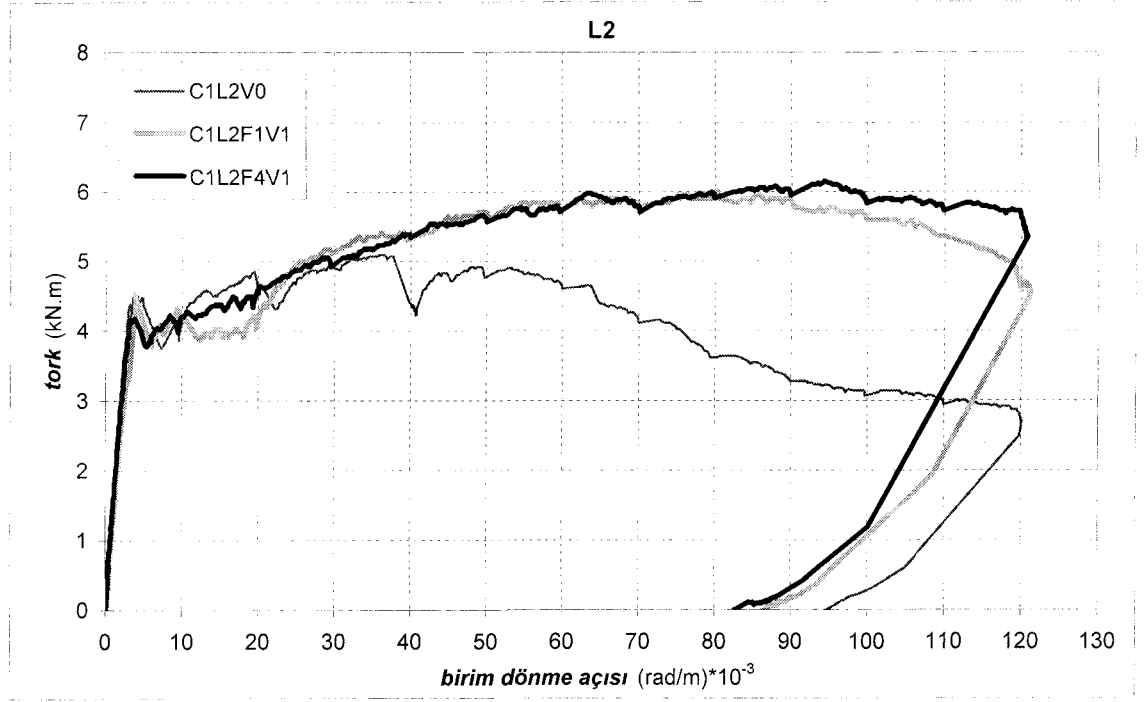
Şekil 4.5 $l/d = 80$ olan lif tipinde lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi



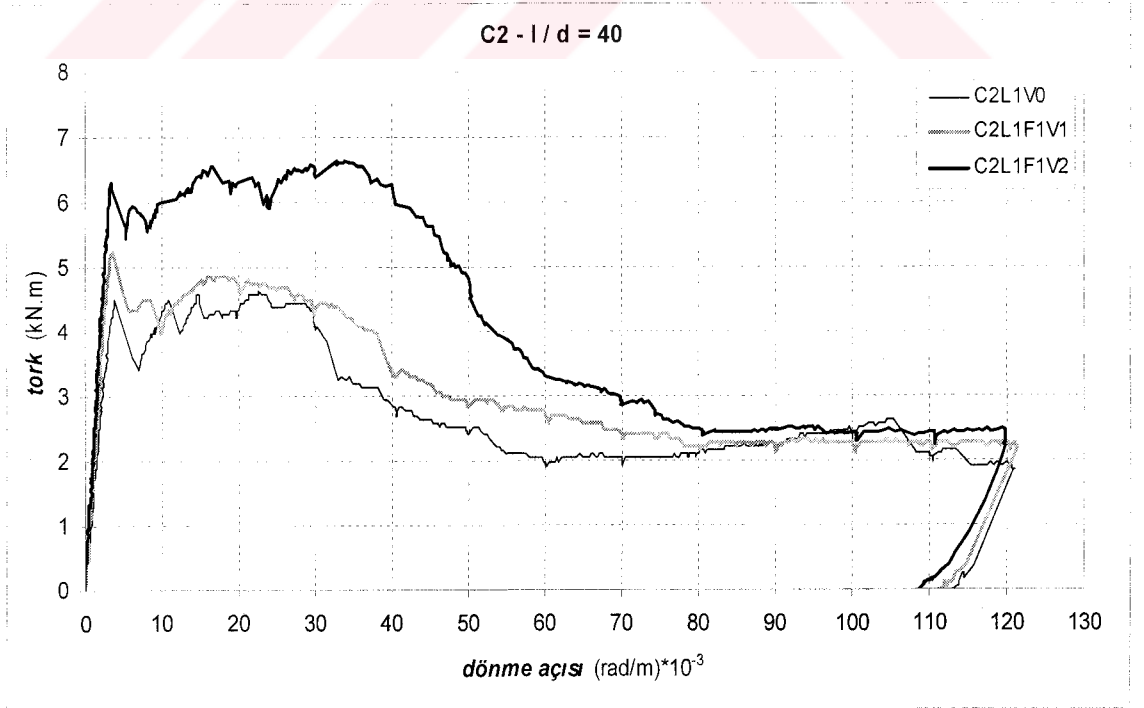
Şekil 4.6 $V_f = \% 0.3$ lif içeriğine sahip numunelerin, lif tipine göre $T - \Phi$ değişimi



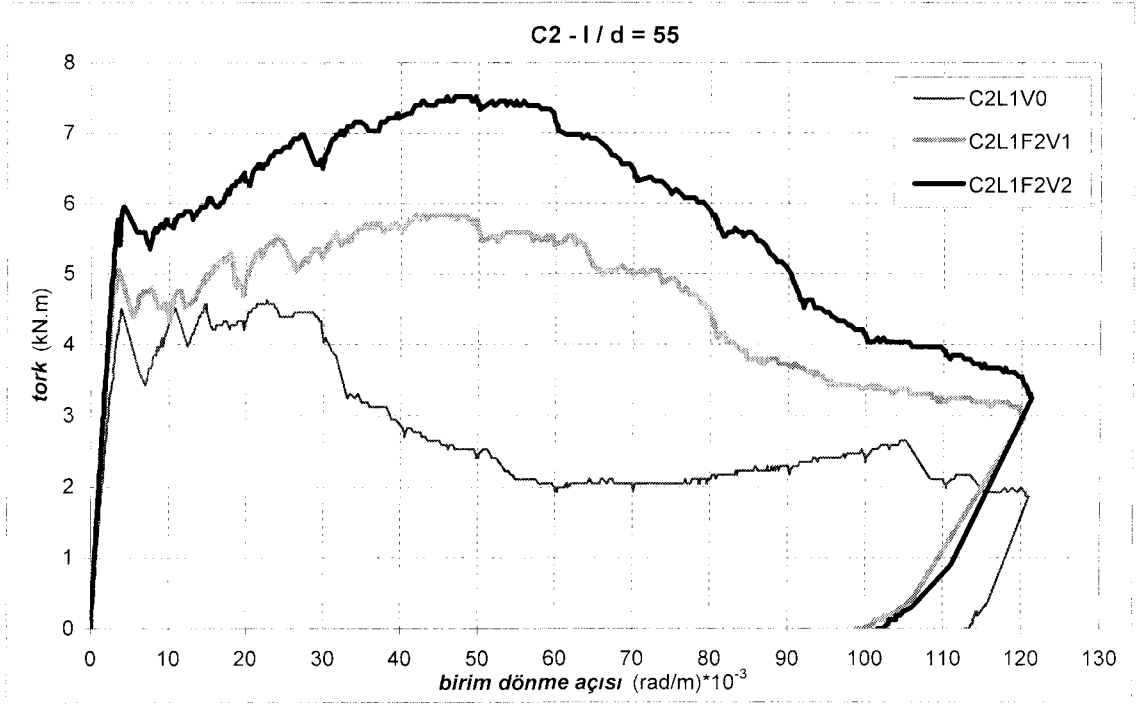
Şekil 4.7 $V_f = \% 0.6$ lif içeriğine sahip numunelerin, lif tipine göre $T - \Phi$ değişimi



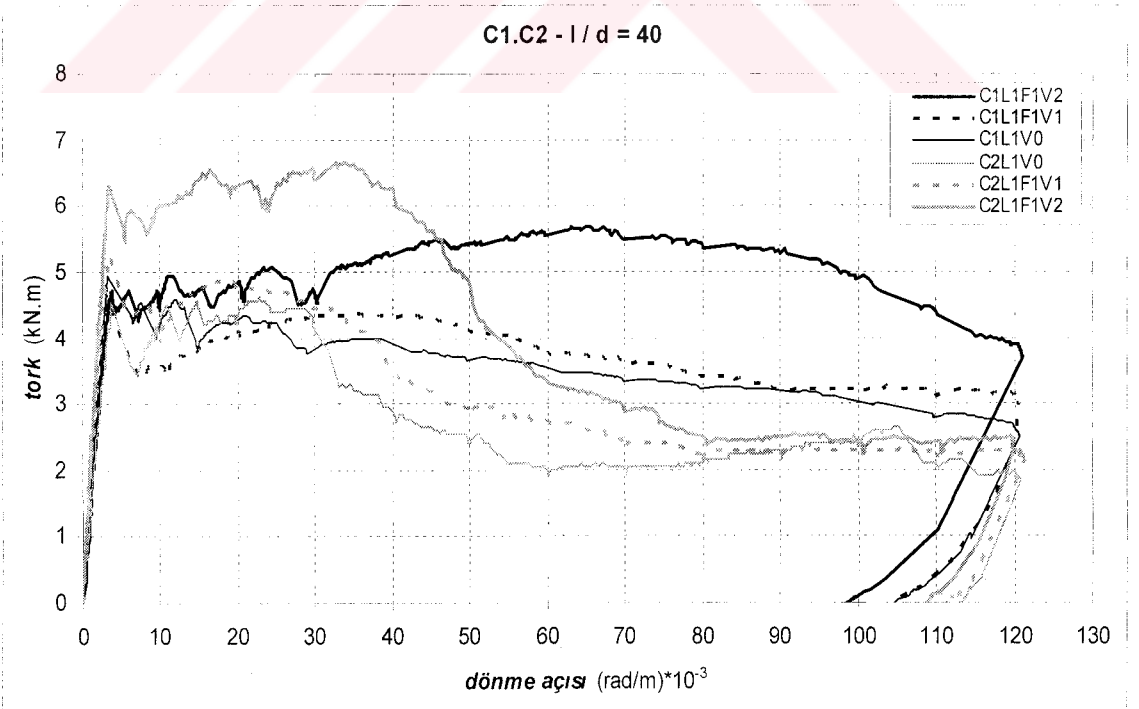
Şekil 4.8 $d_b=12$ mm boy donatı, $V_f = \% 0.3$ lif içeriğine sahip numunelerin, lif tipine göre $T - \Phi$ değişimi



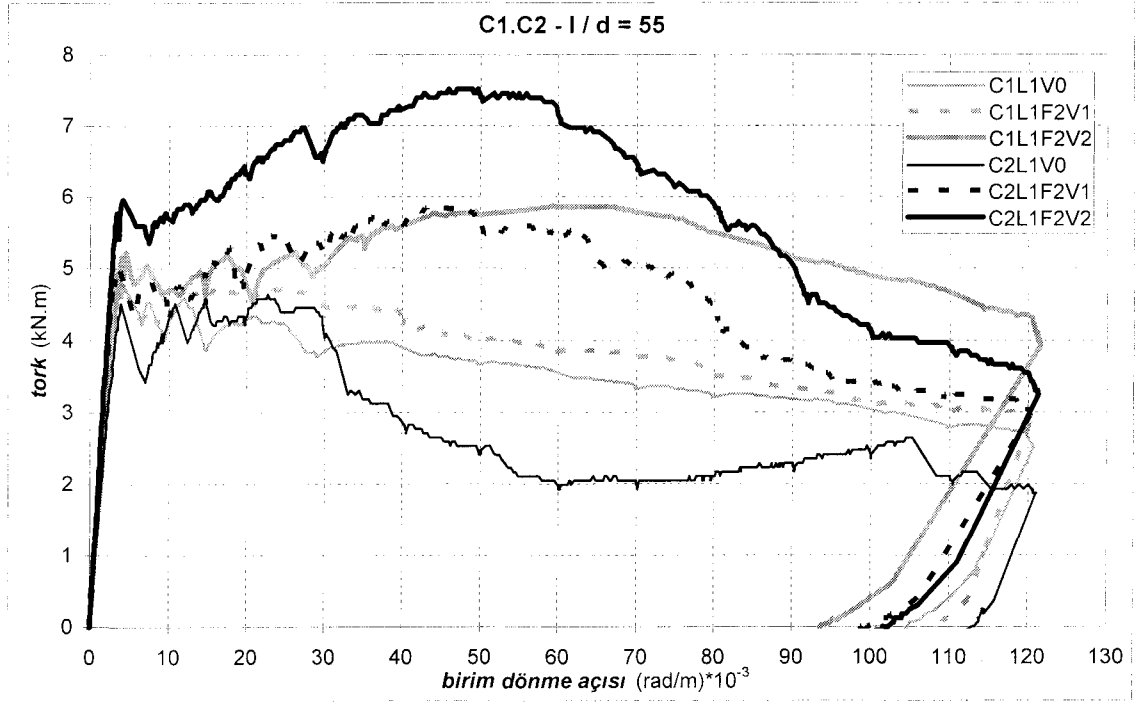
Şekil 4.9 $f_{ck}=60$ MPa ve $l/d=40$ olan numunelerin lif hacminin artışı ile $T - \Phi$ değişimi



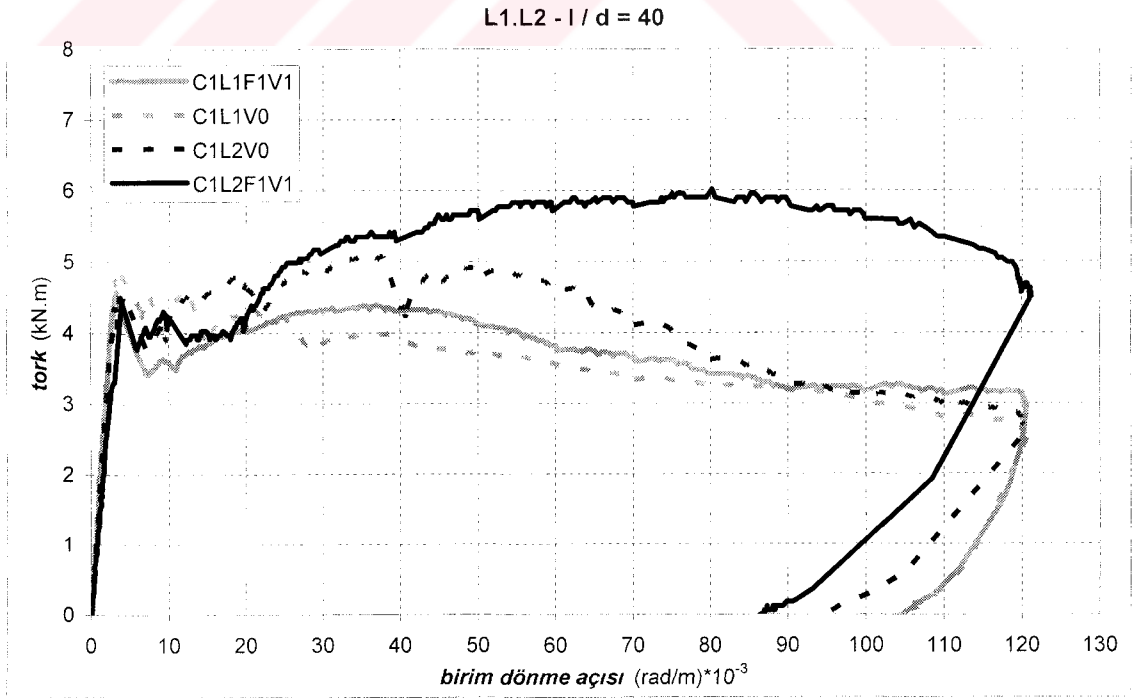
Şekil 4.10 $f_{ck}=60$ MPa ve $l/d=55$ olan numunelerin lif hacminin artışı ile $T-\Phi$ değişimi



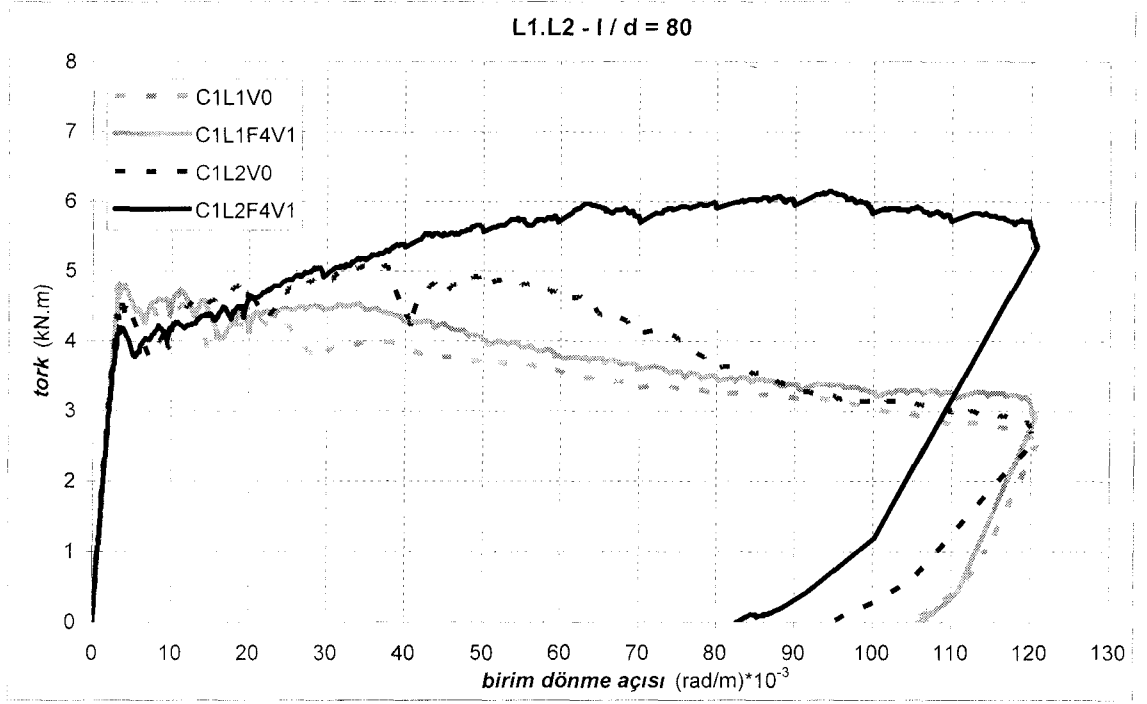
Şekil 4.11 $l/d=40$ ve $f_{ck}=60$ MPa - $f_{ck}=30$ MPa olan numunelerin, lif hacminin artışı ile $T-\Phi$ değişimi



Şekil 4.12 $l/d=55$ ve $f_{ck}=60$ MPa - $f_{ck}=30$ MPa olan numunelerin, lif hacminin artışı ile $T-\Phi$ değişimi



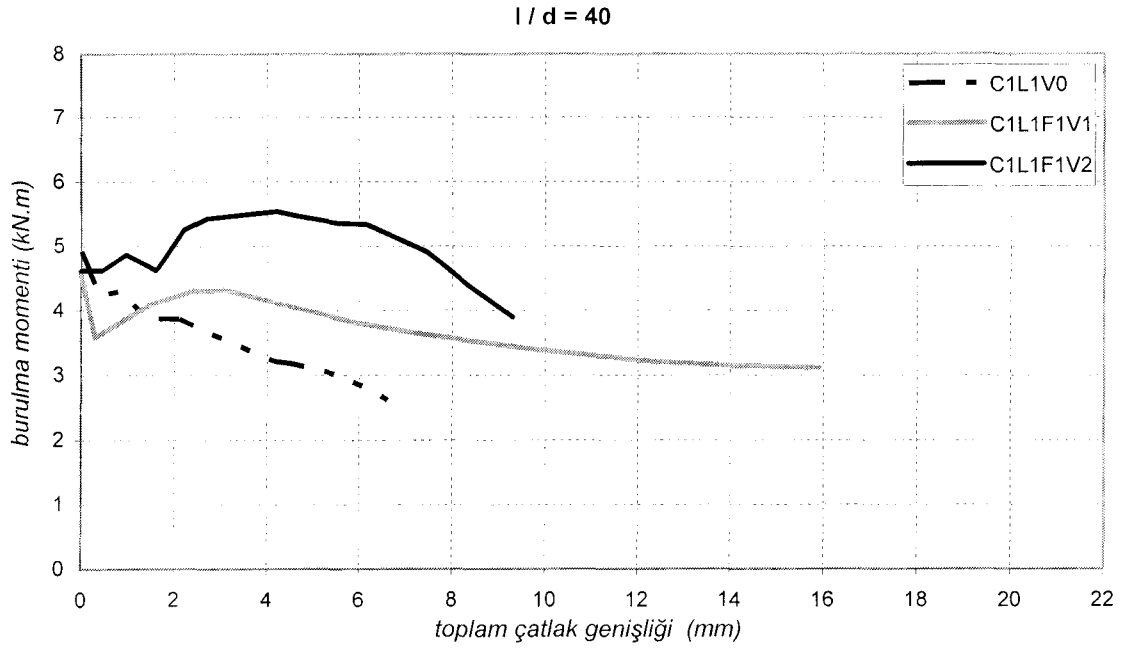
Şekil 4.13 Boyuna donatısı $d_b=8-12$ mm, $l/d=40$ olan numunelerin, $T-\Phi$ ilişkisi



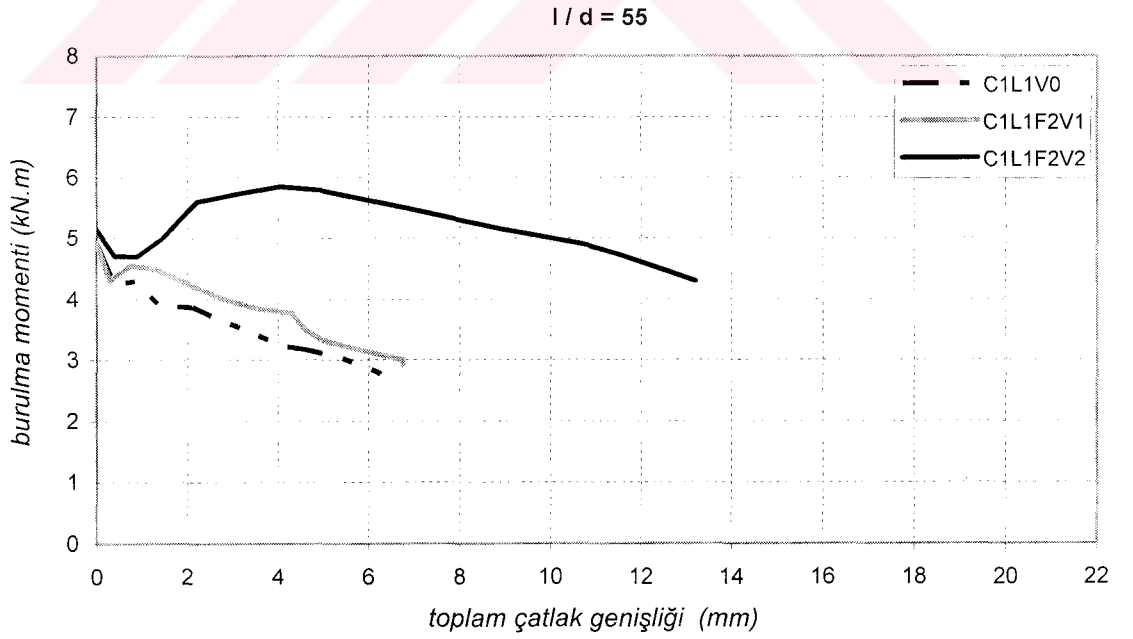
Şekil 4.14 Boyuna donatısı $d_b=8-12$ mm, $l/d=55$ olan numunelerin, $T-\Phi$ ilişkisi

4.2.2 Burulma momenti-toplam çatlak genişliği ilişkileri

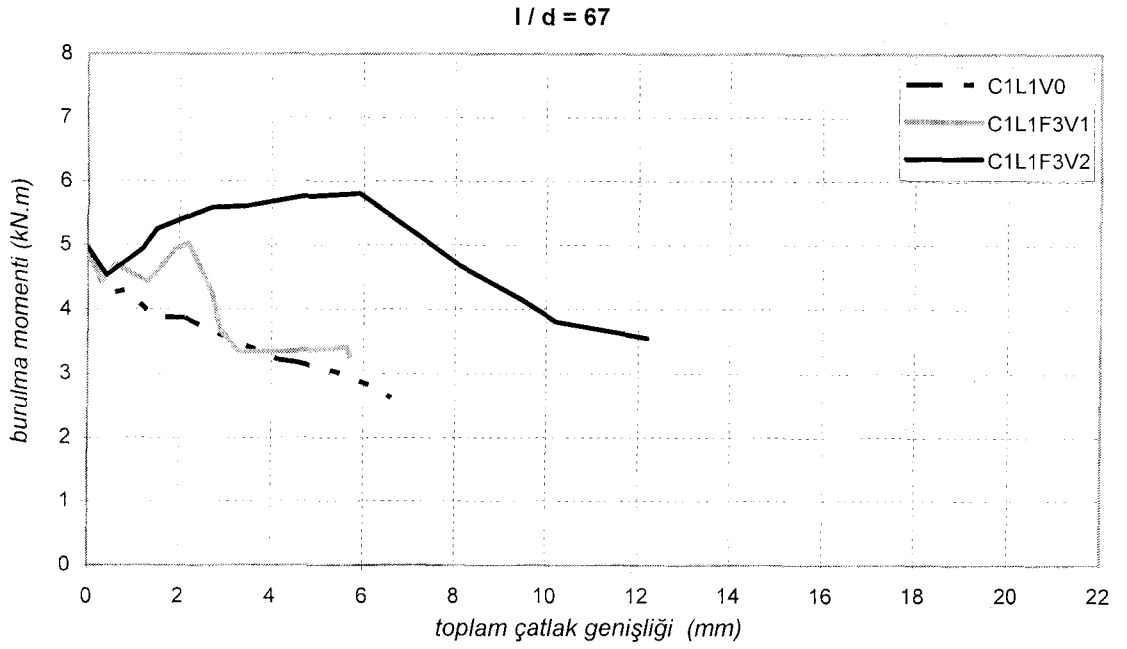
Deney sırasında her numune için okunan çatlak genişlikleri kullanılarak, burulma momenti-toplam çatlak genişliği grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.15 ve Şekil 4.21 aralığındaki grafikler deney numunelerinin burulma momenti-toplam çatlak genişliği ilişkisini göstermektedir. Bu grafiklerden, çatlak genişliğinin artışı ile taşınan burulma momentinin değişimi elde edilmiştir.



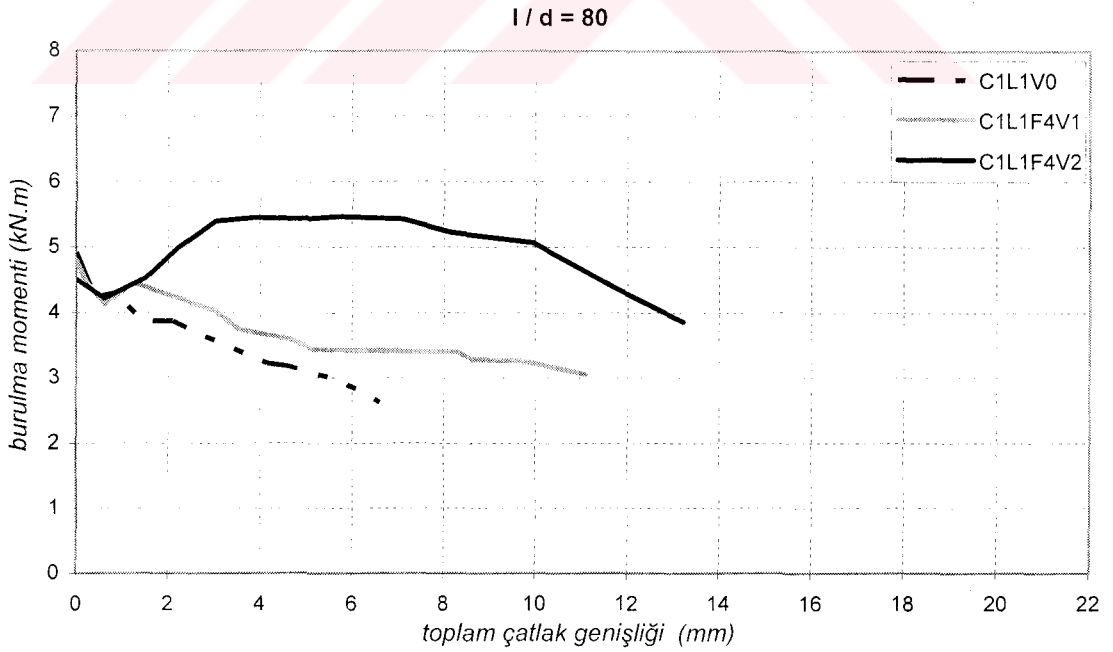
Şekil 4.15 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=40$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği



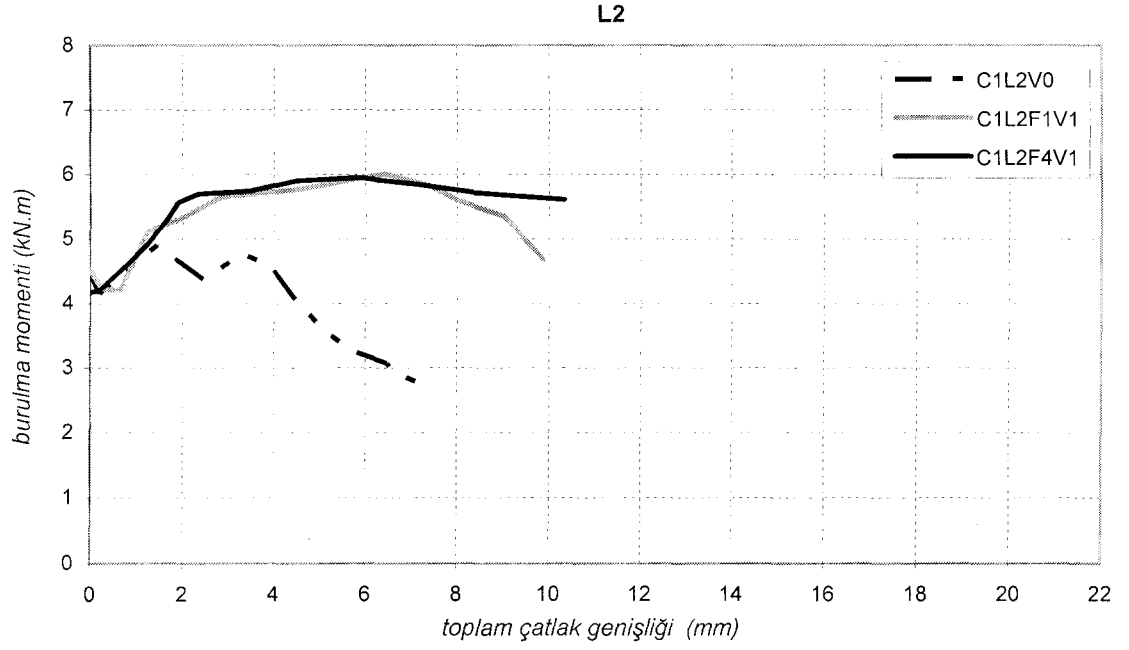
Şekil 4.16 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=55$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği



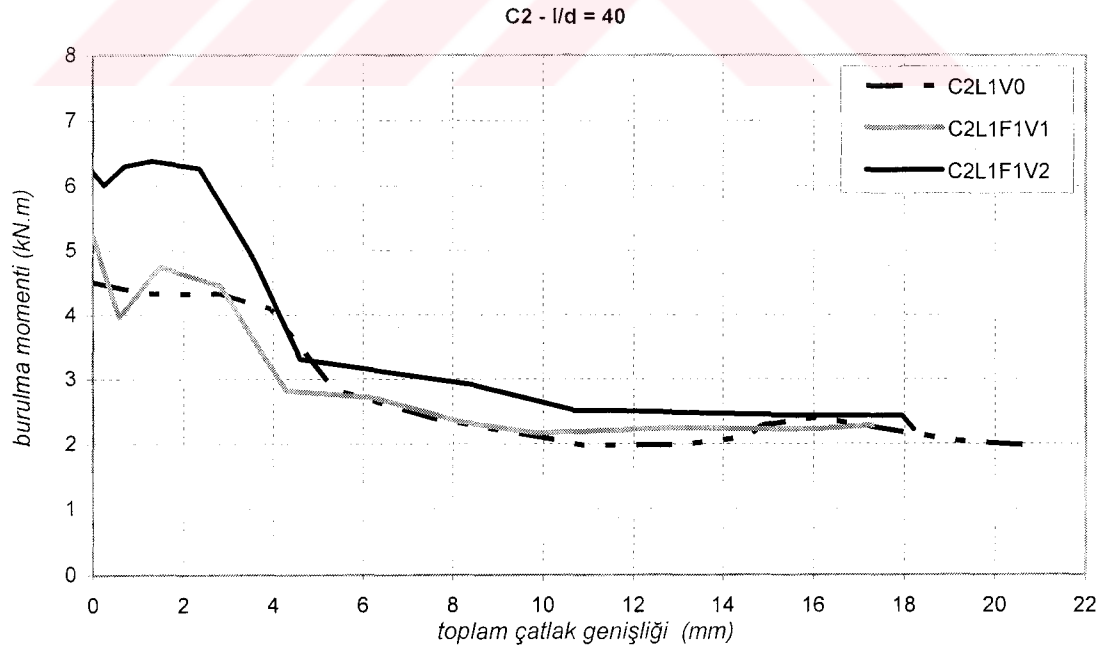
Şekil 4.17 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=67$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği



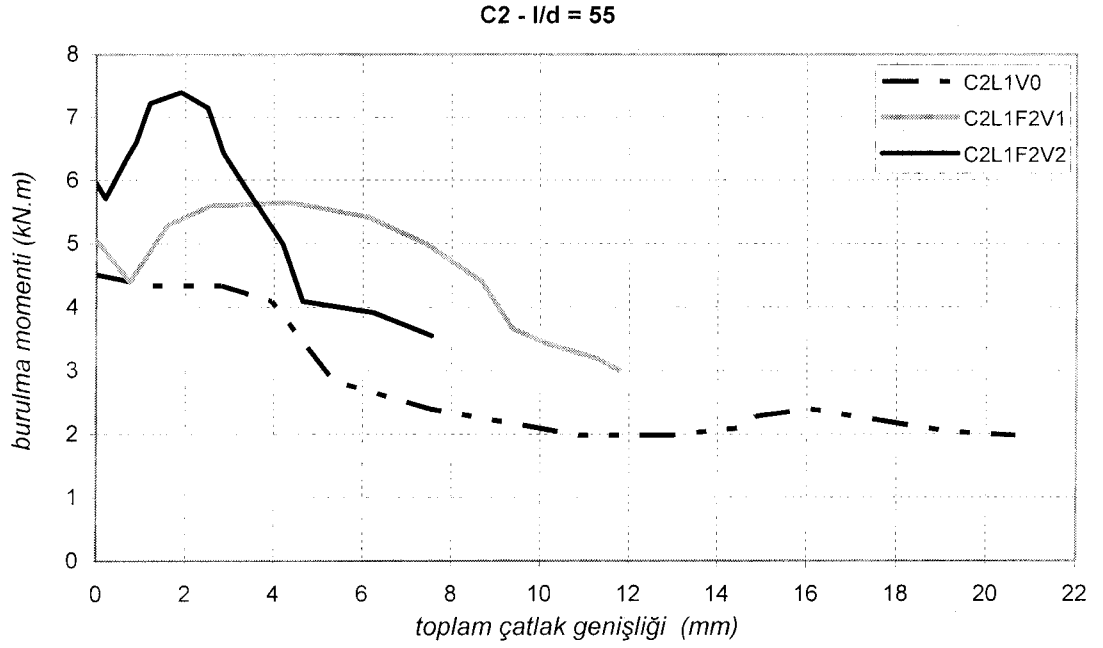
Şekil 4.18 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=80$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği



Şekil 4.19 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $d_b=12$ çapında boy donatı içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği



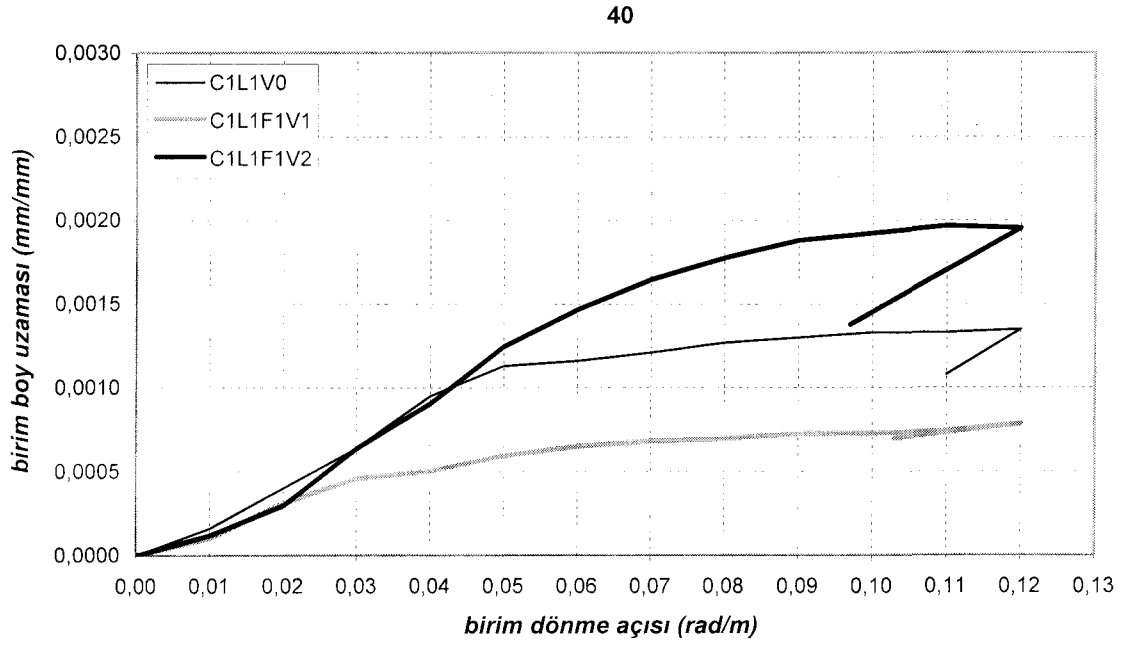
Şekil 4.20 Yüksek dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=40$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği



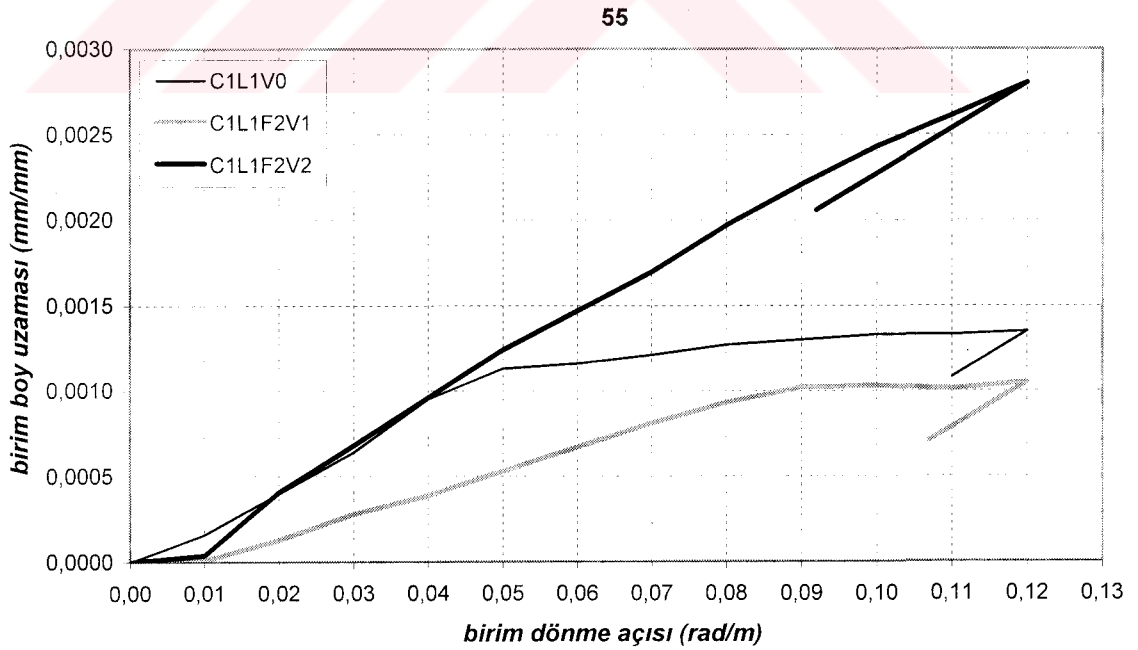
Şekil 4.21 Yüksek dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=55$ lif tipi içeren numunelerin toplam çatlak genişliği-burulma momenti grafiği

4.2.3. Birim boy uzaması-birim dönme açısı ilişkileri

Literatür araştırmasında anlatıldığı üzere, basit burulma sırasında numune boyunda oluşan uzama, donatıdaki boy uzamasına eşittir. Deney sırasında veri toplama sistemi tarafından kaydedilen, numune boy uzaması değerleri kullanılarak, aşağıda Şekil 4.22-Şekil 4.28 arasında verilen birim boy uzaması-birim dönme açısı grafikleri oluşturulmuştur. Numunede oluşan birim boy uzaması, boyuna donatıda oluşan birim boy uzamasına eşit sayılabileceği için, bu grafikler boyuna donatıda akma oluşup oluşmadığı hakkında fikir vermektedir. Ancak, deney sırasında numuneler için kaydedilen boy uzaması değerleri incelendiğinde, bazı numunelerde bir aşamadan sonra, oluşan boy uzamasının azaldığı ya da boy uzamasındaki artışın daha az olduğu dikkat çekmektedir. Bu davranış çatlakların aşırı genişlemesinin gerçekleştiği birim dönme açılarından sonra gerçekleşmiştir.

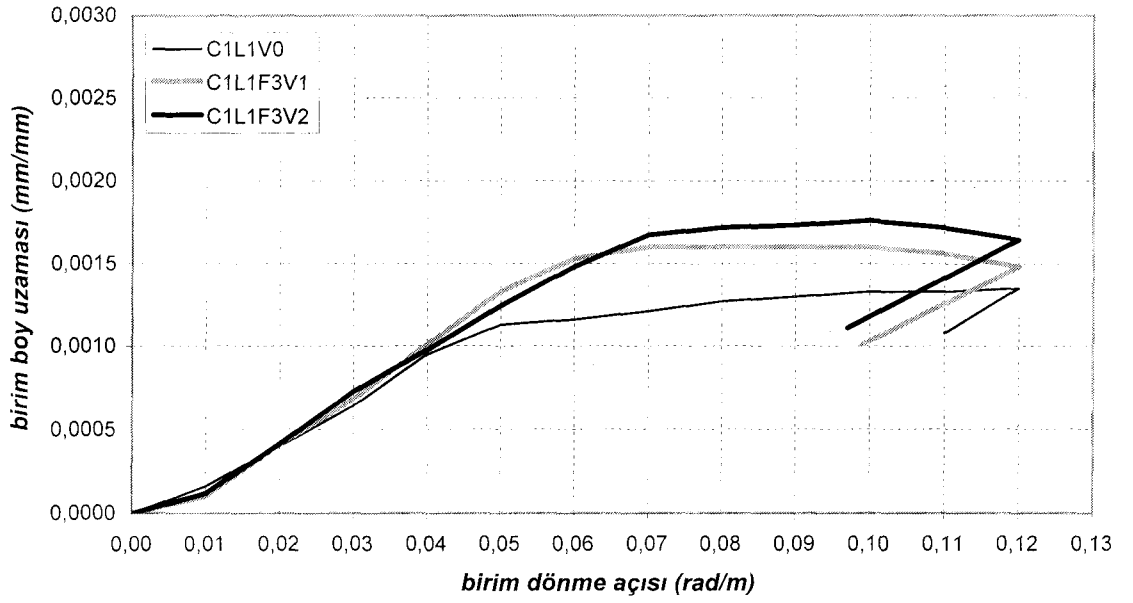


Şekil 4.22 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=40$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği



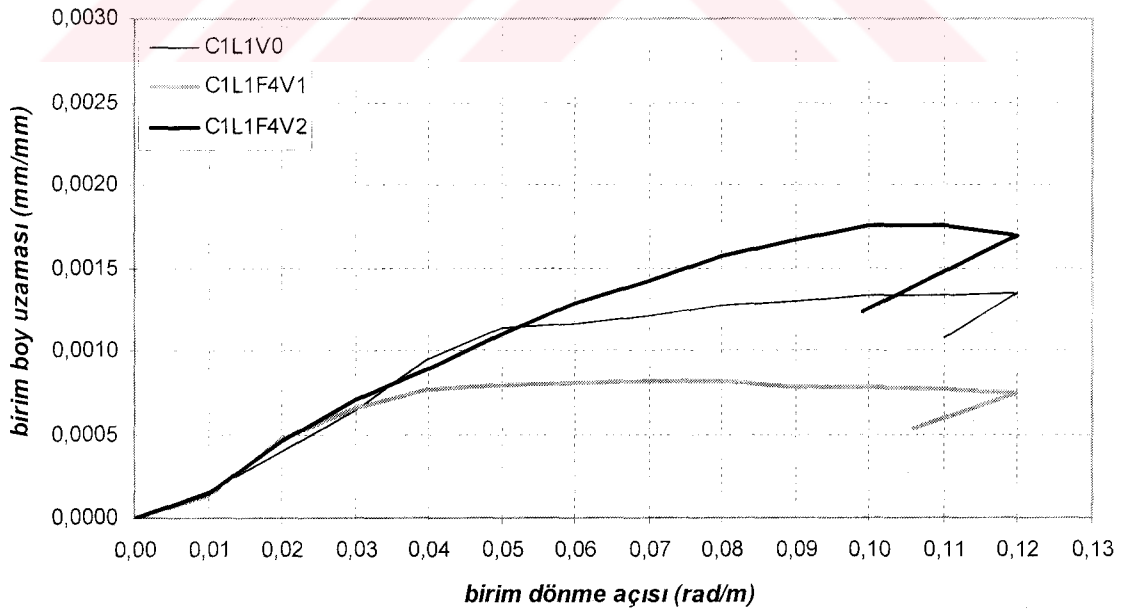
Şekil 4.23 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=55$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği

67

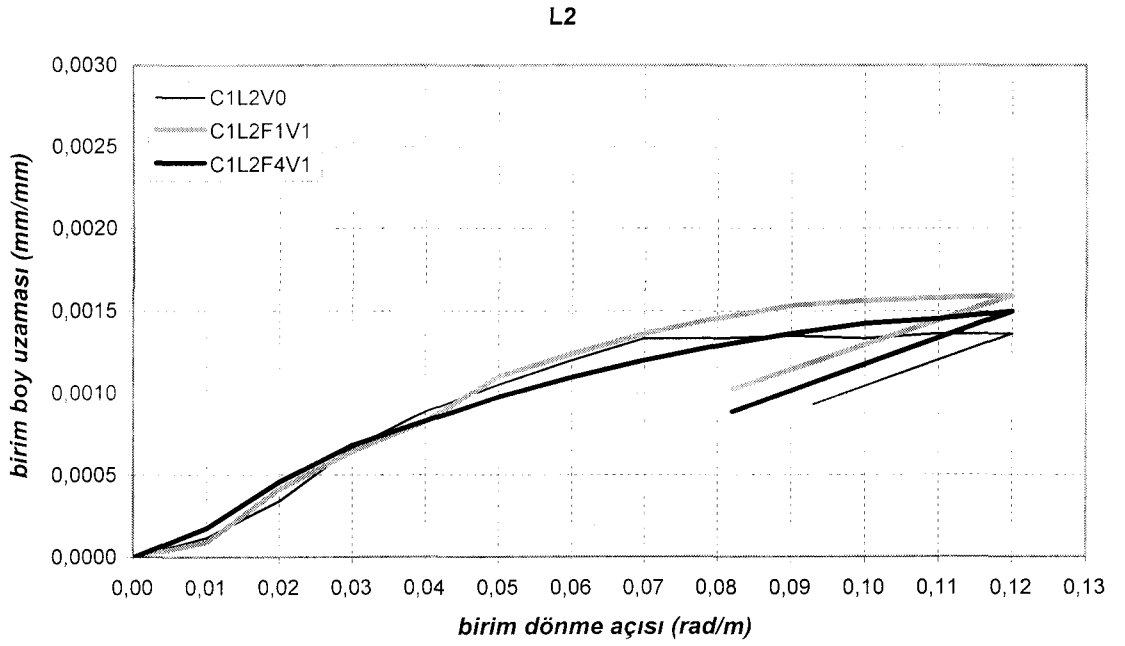


Şekil 4.24 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=67$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği

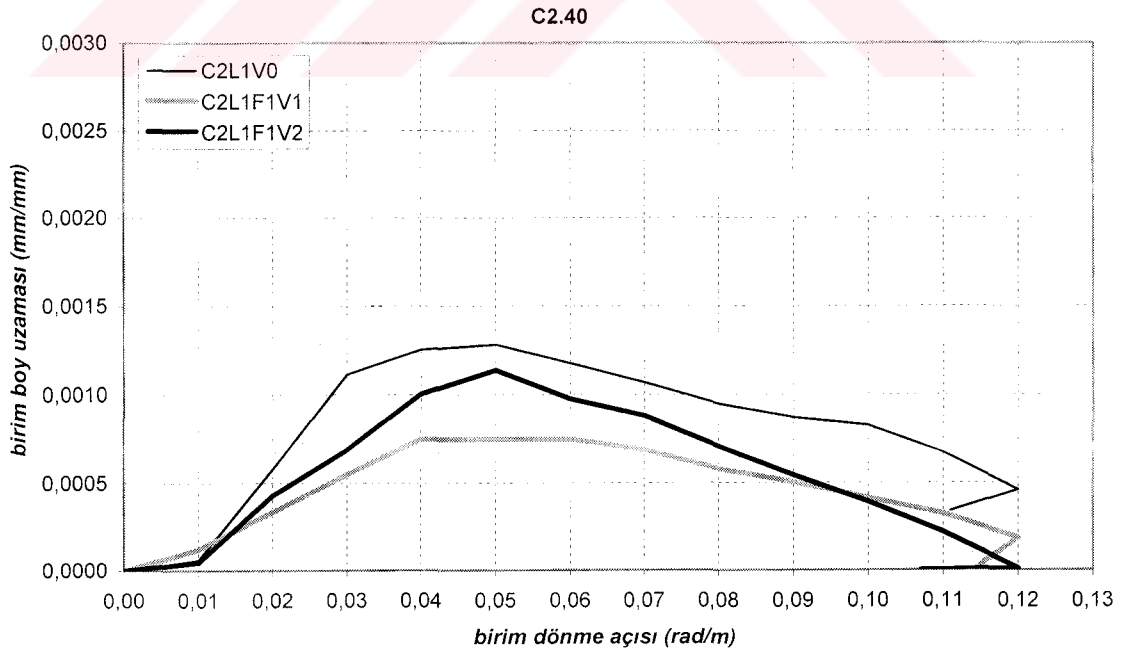
80



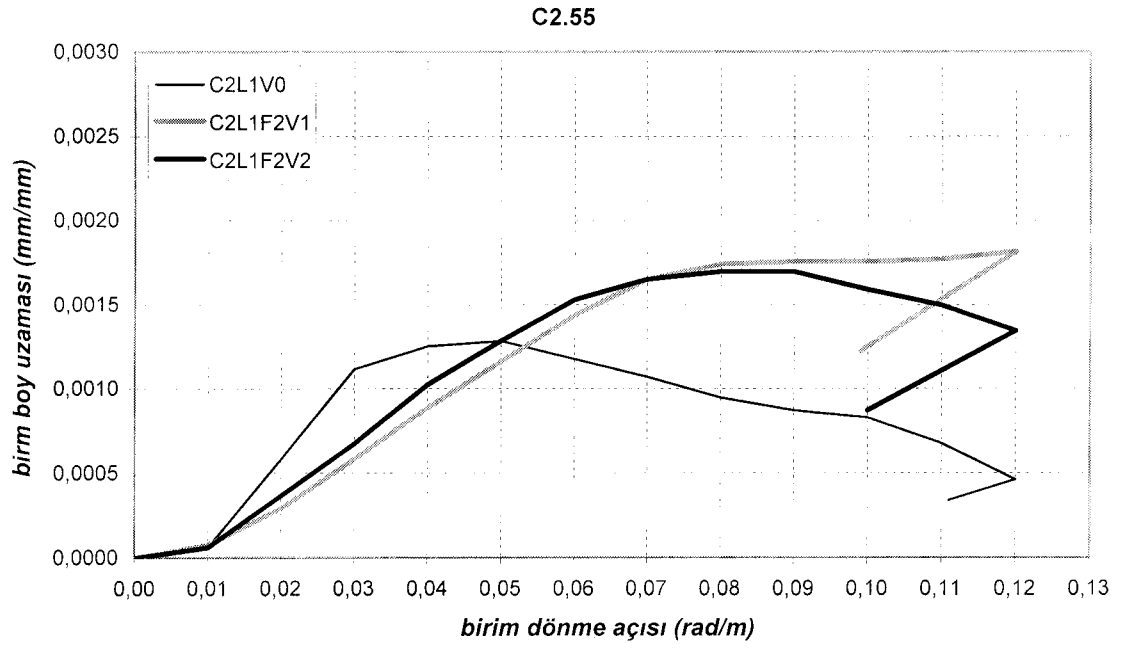
Şekil 4.25 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=80$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği



Şekil 4.26 Normal dayanımlı beton ile üretilmiş, $d_b=12$ çapında boy donatı içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği



Şekil 4.27 Yüksek dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=40$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği



Şekil 4.28 Yüksek dayanımlı beton ile üretilmiş, $l/d=55$ lif tipi içeren numunelerin birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği

5. DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

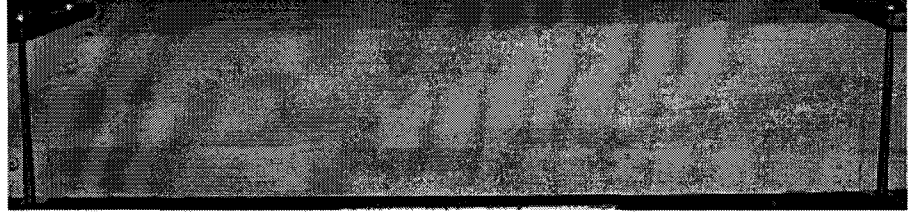
Bu bölümde, Bölüm 4' de elde edilmesi anlatılan verilerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Öncelikle numunelerin çatlama davranışları değerlendirilmiş, daha sonra da elde edilen grafikler yardımıyla numunelerin burulma davranışındaki değişimler irdelenmiştir.

5.1. Numunelerin Çatlama Davranışlarının Değerlendirilmesi

Bölüm 4.1' de açıklandığı şekilde fotoğrafları çekilen numunelerde, oluşan çatlakların ve burulma momenti değerlerinin daha kolay takip edilebilmesi için her seviye için, çekilen fotoğrafların sadece numunenin test edilen bölgesine ait olan kısımları alt alta konularak bu seviyedeki birim dönme açısı ve burulma momenti değerleri, ilgili seviye fotoğrafının yan tarafına yazılmıştır. Bu fotoğrafların yan tarafına yazılan birim dönme açısı değeri rad/m, burulma momenti değeri de kN.m birimi cinsinden verilmiştir. Aşağıda Şekil 5.1'de lif içermeyen $f_{ck}=30$ MPa hedef basınç dayanımına sahip C1L1V0 numunesinin çatlak dağılımı verilmiştir. Bu numunede $\theta=0.12$ rad/m değerine ulaşana kadar dört adet çatlak oluşmuş ve göçme, oluşan çatlaklardan bir tanesinin aşırı genişlemesiyle gerçekleşmiştir. Birim dönme açısı değeri $\theta=0.06$ rad/m değerine ulaştıktan sonra şekil üzerinde siyah gösterilen noktalarda, çatlaklara dik doğrultuda beton ezilmeleri gözlenmeye başlanmış ve bu ezilme birim dönme açısı $\theta=0.12$ rad/m değerine ulaşana kadar giderek artmıştır. $f_{ck}=30$ MPa hedef basınç dayanımına sahip betonlarla üretilen ve boyuna donatısı $d_b=8$ mm, lif içeriği $V_f=0.003$ olan numuneler, genel olarak C1L1V0 şahit numunesinin göçme davranışına benzer şekilde dört ya da beş çatlağın oluşması ve bu çatlaklardan bir tanesinin aşırı genişlemesi ile göçme gerçekleşmiştir. Yine C1L1V0 şahit numunesine benzer şekilde, bu numunelerde de basınç ezilmesi birim dönme açısının $\theta=0.06-0.07$ rad/m değerinde başlamış ve numuneye yük uygulamasına son verildiği $\theta=0.12$ rad/m birim dönme açısı değerine ulaşana kadar artarak devam etmiştir. (Şekil 5.2)

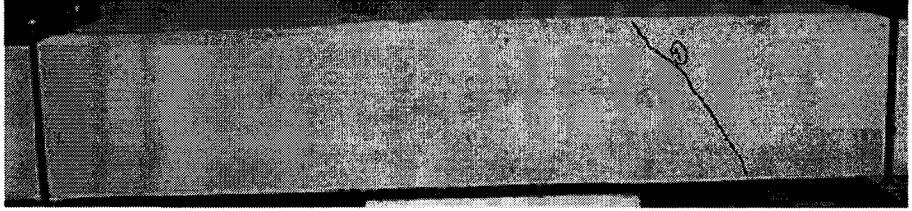
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



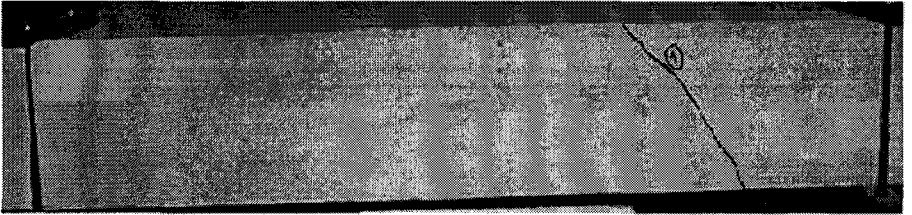
$T_{cr} = 4.93$

$\theta_{cr} = 0.003$



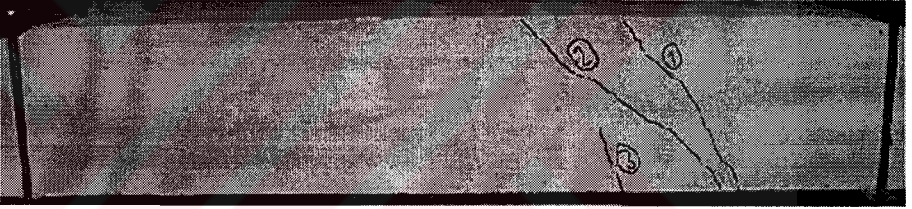
$T = 4.24$

$\theta = 0.01$



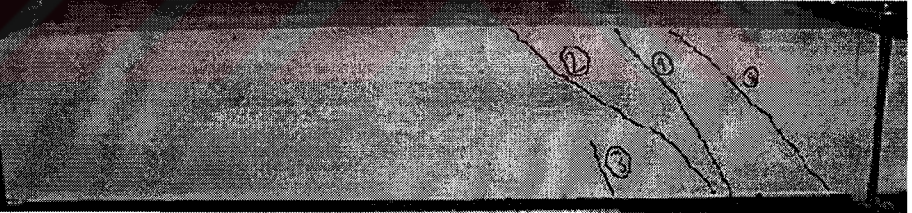
$T = 4.30$

$\theta = 0.02$



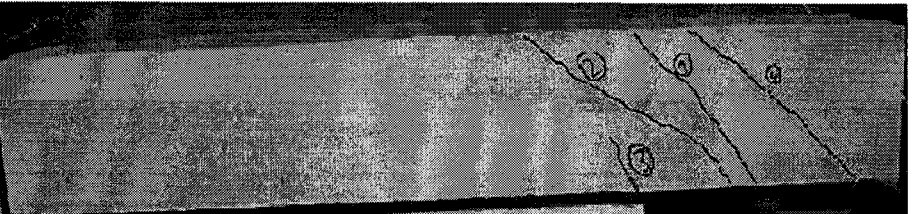
$T = 3.88$

$\theta = 0.03$



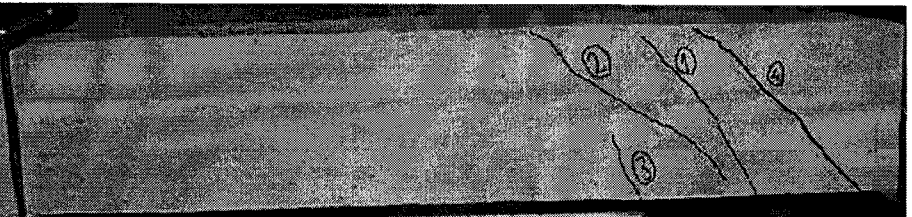
$T = 3.87$

$\theta = 0.04$



$T = 3.68$

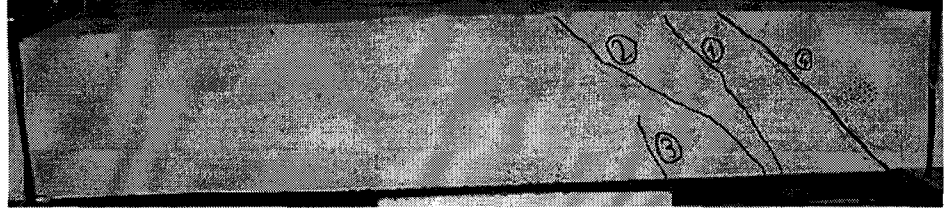
$\theta = 0.05$



Şekil 5.1 C1L1V0 numunesi test bölgesi çatlak dağılımı

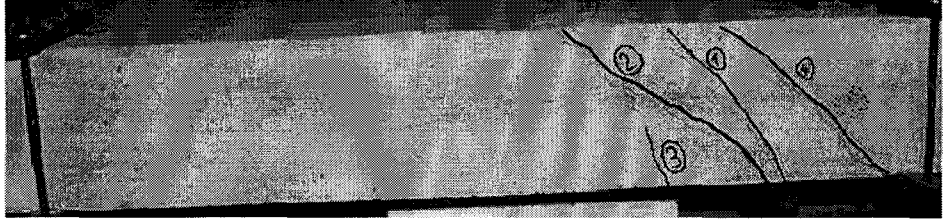
$T = 3.55$

$\theta = 0.06$



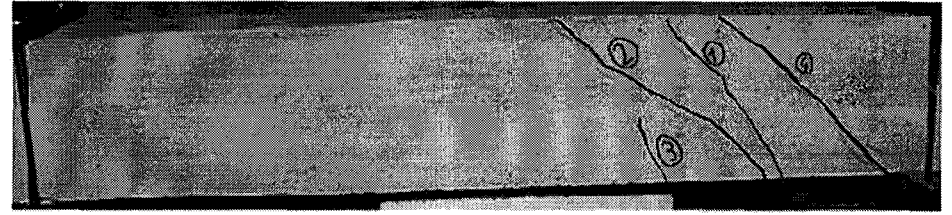
$T = 3.34$

$\theta = 0.07$



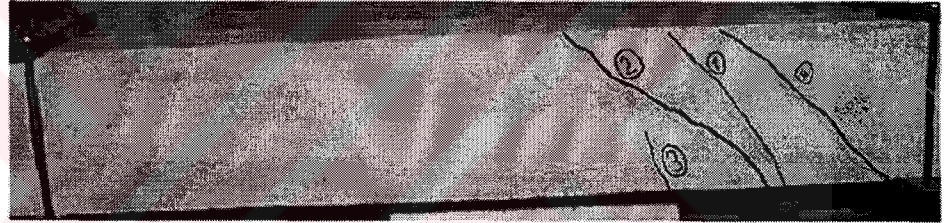
$T = 3.22$

$\theta = 0.08$



$T = 3.18$

$\theta = 0.09$



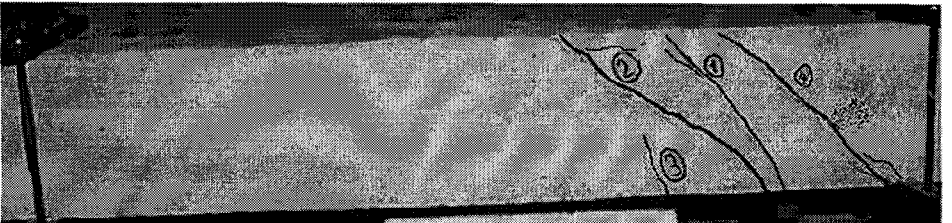
$T = 3.03$

$\theta = 0.10$



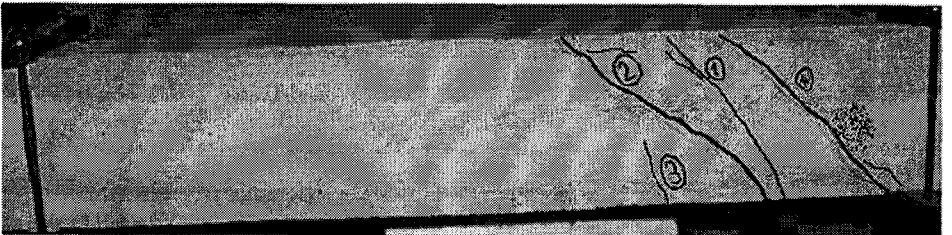
$T = 2.80$

$\theta = 0.11$



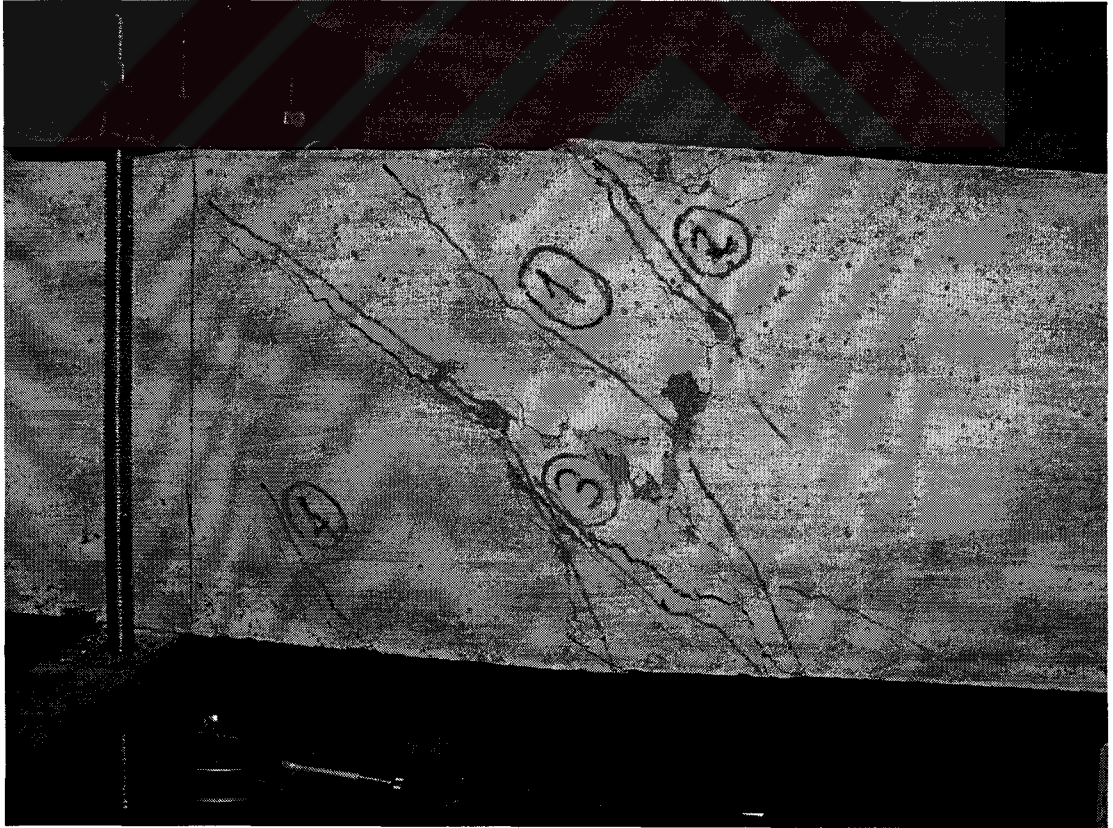
$T = 2.62$

$\theta = 0.12$



Şekil 5.1 C1L1V0 numunesi test bölgesi çatlak dağılımı (devamı)

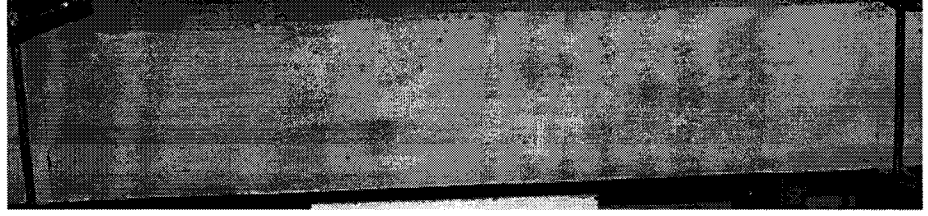
$f_{ck}=30$ MPa hedef basınç dayanımına sahip betonlarla üretilen ve boyuna donatısı $d_b=8$ mm, lif içeriği $V_f=0.006$ olan numunelerde , şahit numune ve lif içeriği $V_f=0.003$ olan numunelerden farklı olarak, çok daha fazla sayıda, genişliği daha az olan ve daha kısa çatlakların oluşması ile deneyin sonlandırıldığı birim dönme açısı değerine ulaşmışlardır (Şekil 5.3). Bu numunelerde basınç ezilmeleri $\theta=0.09$ rad/m değerinden sonra gözlenmeye başlanmış, şahit ve $V_f =0.003$ lif içeriğine sahip numunelere göre daha az beton ezilmesi gerçekleşmiştir. Hedef beton basınç dayanımı $f_{ck}=30$ MPa olan ve boyuna donatısı $d_b=12$ mm olan C1L2V0 şahit numunesinde, boy donatısı $d_b=8$ mm olan şahit numuneye göre çok fazla sayıda çatlak oluşmuştur. Ancak beton ezilmeleri her iki numunede de benzer şekilde 0.06-0.07 rad/m birim dönme açısı değerine ulaşıldığında başlamıştır. 12 mm boyuna donatı ve $V_f =0.003$ lif içeriğine sahip C1L2F1V1, C1L2F4V1 numuneleri ise aynı normal dayanımlı beton ile üretilen 0.006 lif içeriğine sahip numunelerde olduğu gibi çok sayıda, genişliği ve uzunluğu az olan çatlaklar oluşmuştur. Bu numunelerde beton basınç ezilmeleri 0.10 rad/m birim dönme açısı değerinden sonra başlamış ve çok sınırlı miktarda kalmıştır.



Şekil 5.2 C1L1F2V1 numunesinde gözlenen basınç ezilmeleri

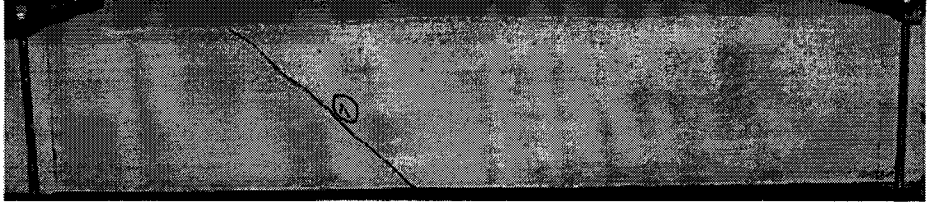
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



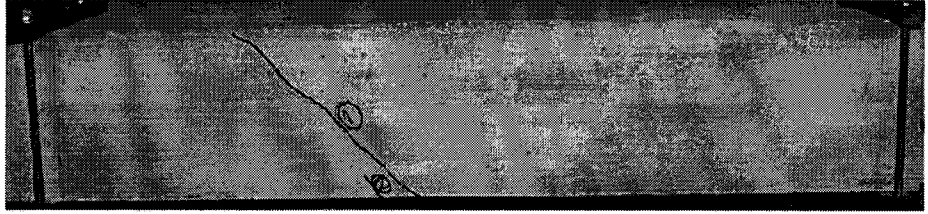
$T_{cr} = 4.51$

$\theta_{cr} = 0.004$



$T = 4.22$

$\theta = 0.01$



$T = 4.53$

$\theta = 0.02$



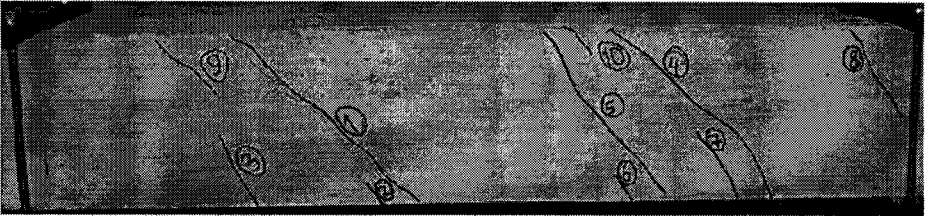
$T = 4.98$

$\theta = 0.03$



$T = 5.40$

$\theta = 0.04$



$T = 5.45$

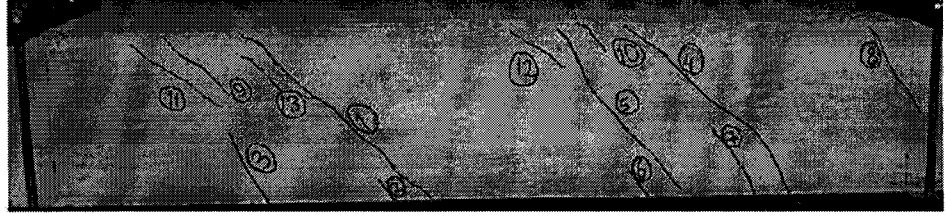
$\theta = 0.05$



Şekil 5.3. C1L1F4V2 numunesi test bölgesi çatlak dağılımı

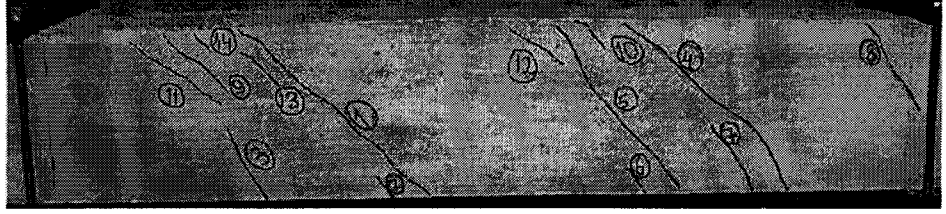
$T = 5.43$

$\theta = 0.06$



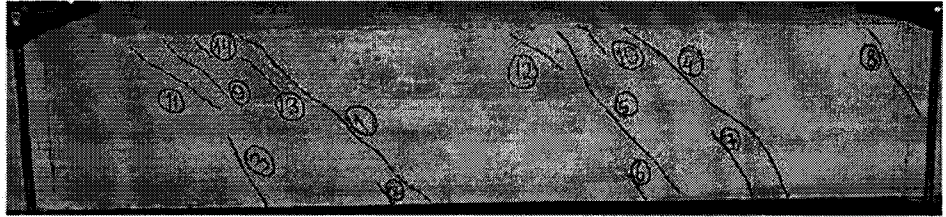
$T = 5.47$

$\theta = 0.07$



$T = 5.43$

$\theta = 0.08$



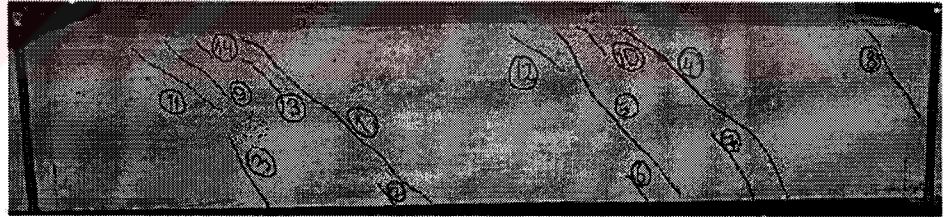
$T = 5.23$

$\theta = 0.09$



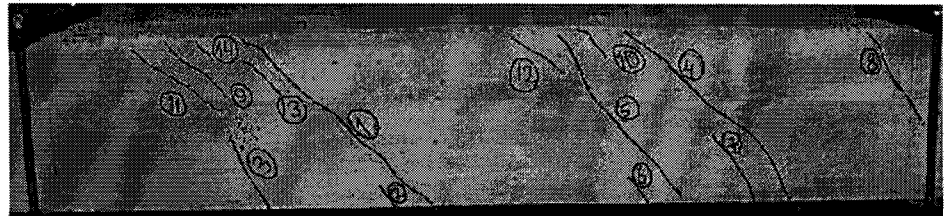
$T = 5.07$

$\theta = 0.10$



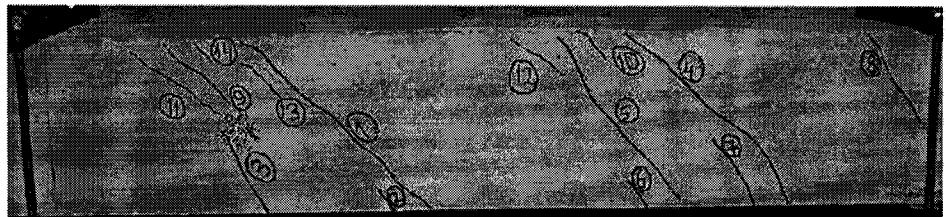
$T = 4.37$

$\theta = 0.11$



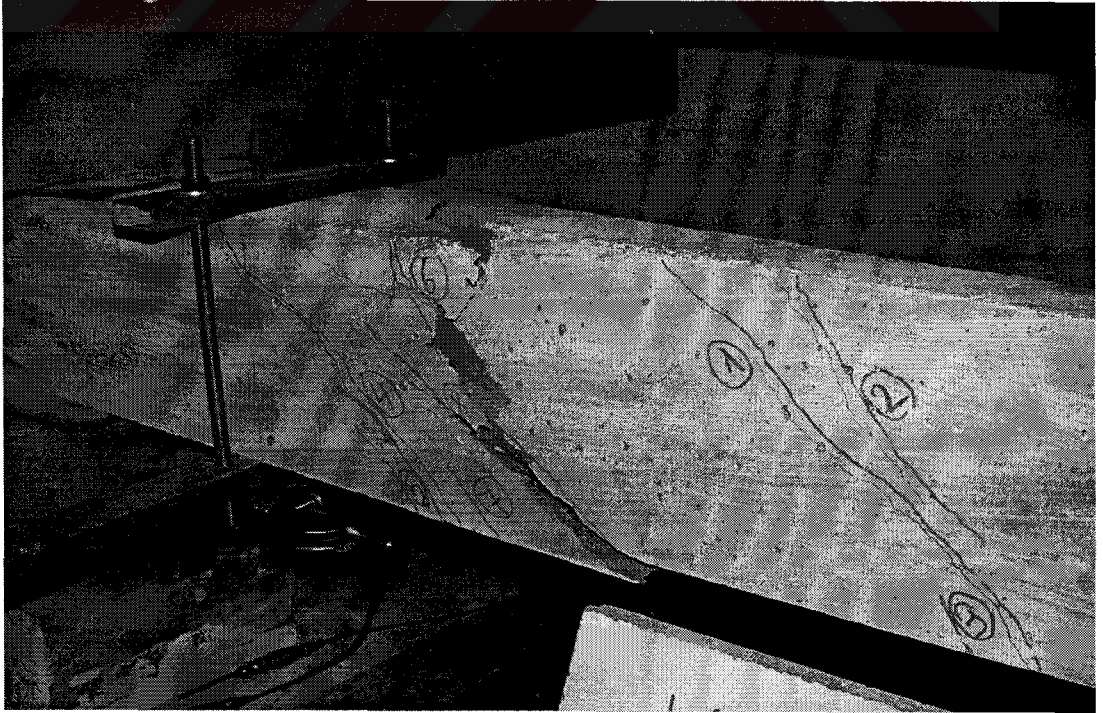
$T = 3.86$

$\theta = 0.12$

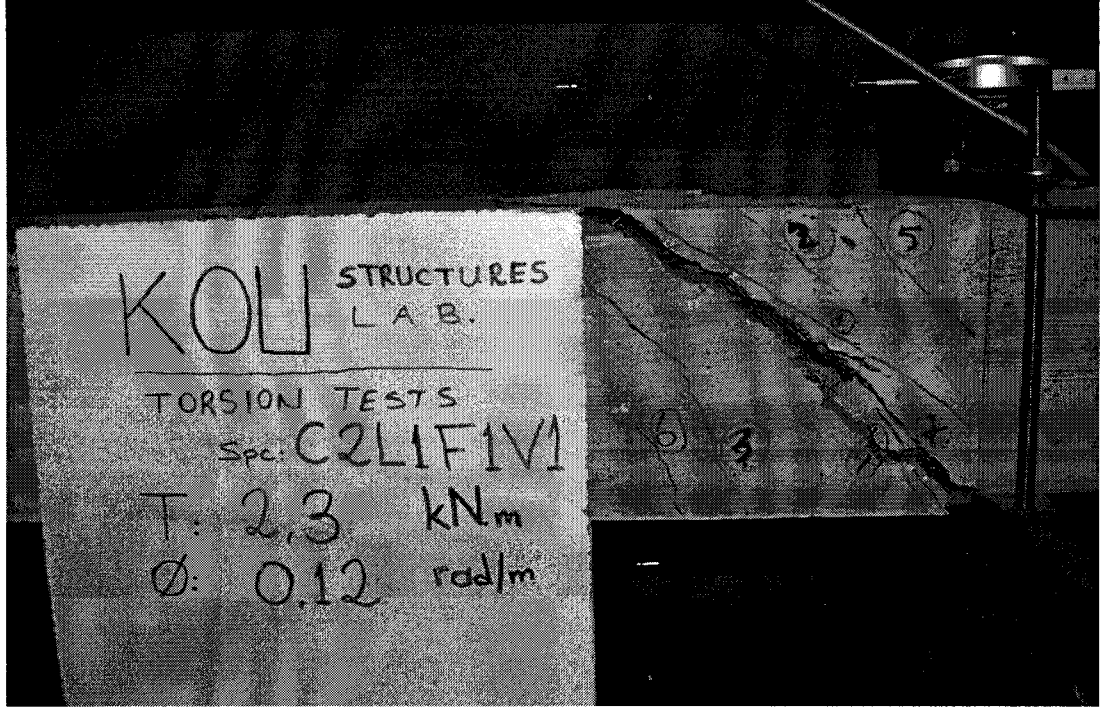


Şekil 5.3. C1L1F4V2 numunesi test bölgesi çatlak dağılımı (devamı)

$f_{ck}=60$ MPa hedef basınç dayanımına sahip, şahit numune ve lif içeriği $V_f=0.003$ olan numuneler ilk birkaç çatlak oluşması ve bu çatlaklardan bir tanesinin çok ani genişlemesi ile çok hızlı bir şekilde 0.12 rad/m dönme açısına ulaşmışlardır. Yüksek dayanımlı betonla üretilen bazı numunelerde oluşan, aşırı çatlak genişlemeleri örnek olarak Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de verilmiştir. Bu numunelerde beton ezilmeleri oluşmamıştır. Ancak $V_f=0.006$ lif içeriğine sahip, yüksek dayanımlı betonla üretilen numunelerde çok sayıda çatlak oluşmuş ve çatlak genişlikleri ve uzunlukları çok sınırlı kalmıştır. Bu numunelerde beton ezilmeleri 0.10 rad/m birim dönme açısı değerinden sonra başlamış ve çok az miktarda ezilme gerçekleşmiştir. Bazı numunelerde, tek bir çatlak aşırı genişlemesi sonucu, aşırı genişleyen çatlak hemen yakınında bulunan çatlaklarda daralmalar gözlenmiştir. Ayrıca yüksek lif içeriğine sahip bazı numunelerde oluşan çok dar çatlakların bir kısmı da deney sonunda yükün kaldırılması ile tamamen kapanmışlardır. Yapılan tüm çatlak okumaları çatlakın en çok açıldığı bölgesinden yapılmıştır. Tüm numuneler için oluşturulan çatlak dağılımı şekilleri, Tablo 3.9’ da verilen numune sıralamasına uygun olarak Ek B’ de verilmiştir.



Şekil 5.4 C2L1V0 numunesinde oluşan aşırı çatlak genişlemesi



Şekil 5.5 C2L1F1V1 numunesinde oluşan aşırı çatlak genişlemesi

Ek C' de ise tüm numuneler için oluşturulmuş, çatlak sayısı-çatlak genişliği toplamı-birim dönme açısı grafikleri verilmiştir.

5.2. Deneylerden Elde Edilen Grafiklerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, Bölüm 4.2' de elde edilmiş olan grafiklerin değerlendirilmesi yapılmıştır.

5.2.1. Burulma momenti-birim dönme açısı ilişkileri

Tablo 4.1'de verilen tüm numunelere ait deney sonuçları incelendiğinde çelik lif içermeyen numunelerin kapasiteleri çatlama momentine eşit olmakta, çatlamadan sonra kesitin taşıdığı burulma momenti birim dönme açısı arttıkça azalmaktadır. Çelik lif ilavesi olan numunelerde çatlamadan sonra kesitin taşıdığı moment artmakta ve belli bir dönme açısından sonra kesitin taşıdığı burulma momenti azalmaya başlamaktadır. Bu davranış çelik lif ilavesi $V_f = 0.006$ olan numunelerde, $V_f = 0.003$ olanlara oranla daha belirgin olarak gözlenmiştir.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de boy/çap oranı 40 ve 55 olan normal dayanımlı betonla üretilmiş, boy donatı çapı $d_b=8$ mm olan numunelere ilişkin grafikler verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere lif içermeyen C1L1V0 şahit numunesi ilk çatlamanın oluşması ile burulma momenti, herhangi bir artış göstermeden birim dönme açısının artmasıyla birlikte azalmaya başlamıştır. 0.003 lif içeren C1L1F1V1 ve C1L1F2V1 numunelerinde ise çatlama sonrası taşınan burulma momentinde çok az artışlar gözlemlendikten sonra tekrar azalmaya başlamıştır. 0.006 çelik lif içeriğine sahip C1L1F1V2 ve C1L1F2V2 numunelerinde ise çatlama sonrası numunenin taşıdığı burulma momenti, birim dönme açısı artmasına rağmen artmaya devam etmiştir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de boy/çap oranı 67 ve 80 olan liflerle üretilmiş numunelere ilişkin verilmiş grafiklerden de yukarıda anlatılan duruma çok benzer davranışların olduğu anlaşılmaktadır.

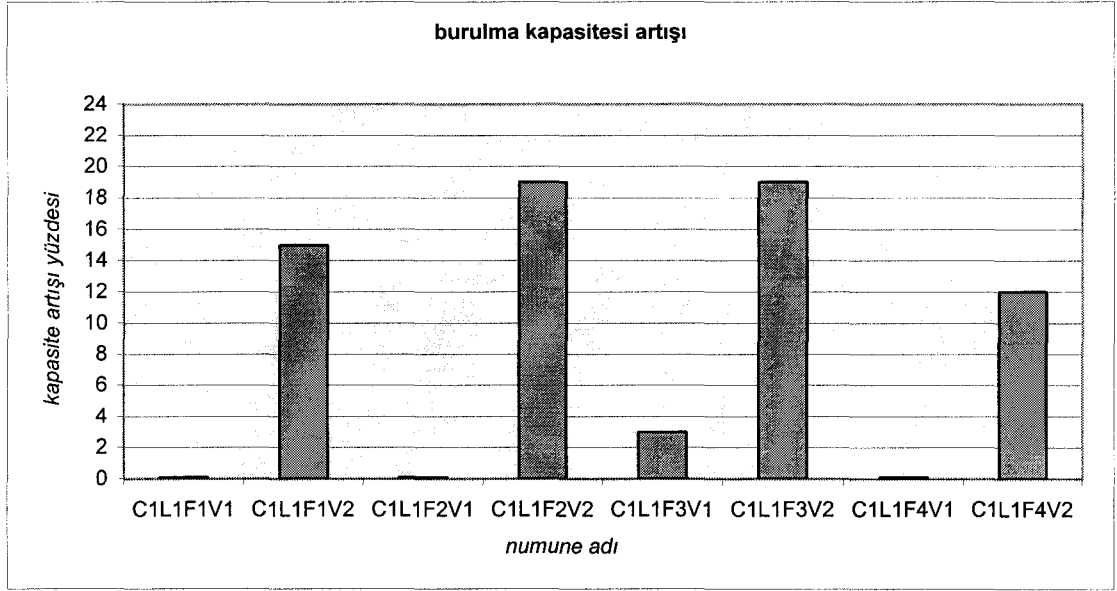
Normal dayanımlı betonla üretilmiş 0.003 çelik lif içeren ve lif boyutları 40, 55, 67 ve 80 olan numunelerin, $T-\Phi$ ilişkilerinin karşılaştırmaları Şekil 4.6’da verilmiştir. Bu şekilde, farklı lif tipleri ile üretilmiş numunelerin yaklaşık aynı davranışı sergilediği görülmüştür. C1L1F3V1 numunesinin davranışı diğer 0.003 lif içeriğine sahip numunelere göre daha farklı olmuştur. Bu davranış deneysel hatalara bağlanmıştır. Şekil 4.7’de verilen 0.006 lif içeriğine sahip, lif tipi farklı numunelerin davranışı da birbirine benzer olmuştur.

Burulma momenti-birim dönme açısı grafiğinin altında kalan alan elemanın, yuttuğu enerji miktarını vermektedir. Şekil 4.2, 4.3, 4.4, 4.5’de verilen grafiklerde 0.003 lif içeren numunelere ait grafikler ile şahit numuneye ait grafik arasında kalan alan 0.003 lif ilavesinin etkisi ile yutulan enerji miktarını, 0.006 lif içeren numunelere ait grafikler ile şahit numune arasında kalan alan ise 0.006 lif ilavesinin etkisi ile yutulan enerji miktarını göstermektedir. 0.006 lif içeriğine sahip numunelerin yuttuğu enerji miktarı, şahit numune ve 0.003 lif içeriğine sahip numunelere göre yaklaşık % 20 civarında daha fazladır. Yukarıda verilen, lif içeren numunelerde oluşan çatlaklar, burulma momenti tamamen kaldırıldıktan sonra, şahit numuneye göre daha fazla kapanmışlardır.

Şekil 4.8’ de $f_{ck} = 30$ MPa beton basınç dayanımı, $d_b = 12$ mm boyuna donatı çapı ve 0.003 lif içeriğine sahip boy/çap oranı 40 ve 80 olan numunelerin test sonuçları kullanılarak oluşturulmuş grafik verilmiştir. Şekil 4.6’da verilen grafiklerde çelik lif ilavesi 0.003 olması durumunda numunelerin kapasitelerinde ve enerji yutma miktarında belirgin artış gözlenmezken, boy donatısı $d_b = 12$ mm olan numunelerde numunenin kapasitesinde ve enerji yutma miktarında gözle görülebilir artışlar elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.8’de verilen numunelerde numunenin burulma taşıma miktarındaki azalma, birim dönme açısı 0.10 rad/m’ ye geldiği anda başlamıştır.

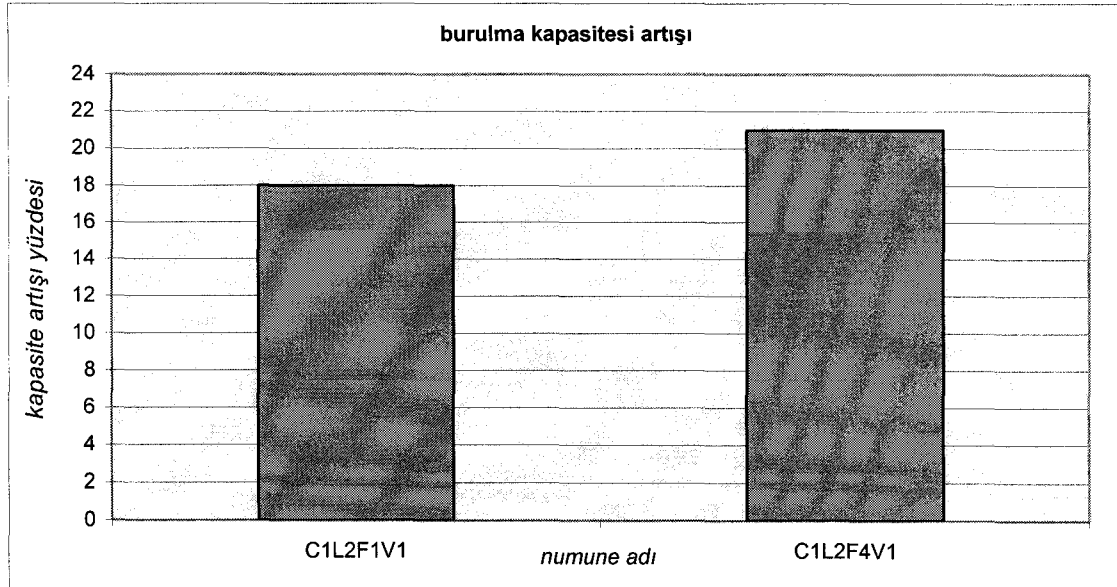
Yüksek dayanımlı betonlarla üretilmiş deney numunelerine ait burulma momenti birim dönme açısı ilişkileri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmiştir. Yüksek dayanımlı betonların şahit numunesinde burulma momentleri birim dönme açısının 0.03 rad/m değerinden sonra ani düşüşler göstermiştir. Bu düşüş, oluşan çatlakların bir tanesinin aşırı genişlemesi ile gerçekleşmiştir. Bu çatlak genişlemesinden sonra kesitte sadece donatı taşıma gücüne katkıda bulunmuştur. Donatının pekleşmesi ile şahit numunenin taşıma gücünde bir miktar artış gerçekleşmiştir. Yüksek dayanımlı beton ile üretilen şahit numune ve 0.003 lif içeriğine sahip numunelerde, betonda basınç ezilmeleri gerçekleşmemiştir. 0.006 lif içeriğine sahip yüksek dayanımlı betonlarla üretilmiş numunelerde ise basınç ezilmeleri birim dönme açısı 0.10 rad/m’ ye ulaştıktan sonra tespit edilmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de boyuna donatısı farklı olan, şahit numuneler ile 0.003 çelik lif içeriğine sahip numunelerin sonuçları karşılaştırılarak boyuna donatının ve çelik lifin burulma momenti taşıma gücü üzerine etkileri verilmeye çalışılmıştır.

Yukarıda anlatılan tüm bilgiler ışığında, çelik lif içeren tüm numunelerin burulma kapasitelerinde oluşan artış yüzdeleri için grafikler oluşturulmuştur. $d_b = 8$ mm ve $d_b = 12$ mm çapında boyuna donatıya sahip, normal dayanımlı betonarme kirişlerin çelik lif ilavesi ile gerçekleşen burulma kapasitesi artışı yüzdesi Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’ de, $d_b = 8$ mm boyuna donatı çapına sahip, yüksek dayanımlı yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde oluşan kapasite artışı da Şekil 5.8’ de verilmiştir. 8 mm boyuna donatıya sahip, normal dayanımlı betonarme kirişlerde 0.003 çelik lif ilavesi kayda değer bir kapasite artışı gerçekleştirmezken, 0.006 çelik lif ilavesi olan kirişlerde,

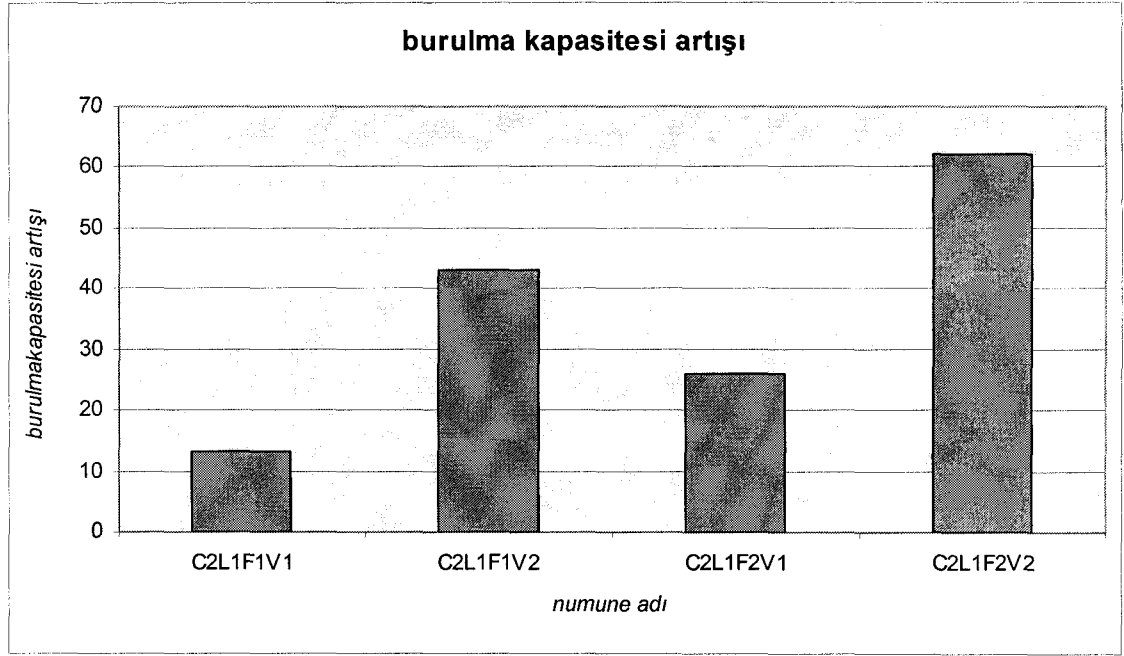


Şekil 5.6 $d_b=8$ mm çapında boyuna donatıya sahip, normal dayanımlı betonarme kirişlerde çelik lif ilavesinin burulma kapasitesine etkisi

şahit numuneye göre, lif boyutlarından bağımsız olarak ortalama % 15-16 oranında burulma kapasitesi artışı gerçekleşmiştir. 12 mm boyuna donatıya sahip, normal dayanımlı betonarme kirişlerde 0.003 çelik lif ilavesi ise ortalama % 20 oranında burulma kapasitesi artışı gerçekleştirmiştir.



Şekil 5.7 $d_b=12$ mm çapında boyuna donatıya sahip, normal dayanımlı betonarme kirişlerde çelik lif ilavesinin burulma kapasitesine etkisi



Şekil 5.8 $d_b=8$ mm boyuna donatıya sahip yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde çelik lif ilavesinin burulma kapasitesine etkisi

Şekil 5.8’de verilen 8 mm boyuna donatıya sahip, yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde 0.003 çelik lif ilavesi, $l/d=40$ olan lif tipinde % 13 artış gerçekleştirirken, $l/d=80$ olan kirişlerde % 26 oranında kapasite artışı gerçekleştirmişlerdir. 0.006 çelik lif ilavesi ise, $l/d=40$ olan numunelerde % 43, $l/d=55$ olan numunelerde % 62 oranında kapasite artışı gerçekleştirmiştir.

5.2.2. Burulma momenti-toplam çatlak genişliği ve birim boy uzaması-birim dönme açısı ilişkileri

Burulma momenti-toplam çatlak genişliği grafikleri, çatlak oluşumu ile moment taşıma miktarının değişiminin nasıl olduğunu açıklamaktadır. Normal dayanımlı beton ile üretilen 8 mm boyuna donatıya sahip şahit ve % 0.3 lif içeriğine sahip tüm numunelerde toplam çatlak genişliği arttıkça, taşınan burulma momenti azalmıştır. Ancak çelik lif ilavesi % 0.6 olan numunelerde toplam çatlak genişliği artmasına rağmen, numunenin taşıdığı burulma momenti değerinde artış olmuştur. 12 mm boyuna donatıya sahip normal dayanımlı beton ile üretilen numunelerde % 0.3 lif

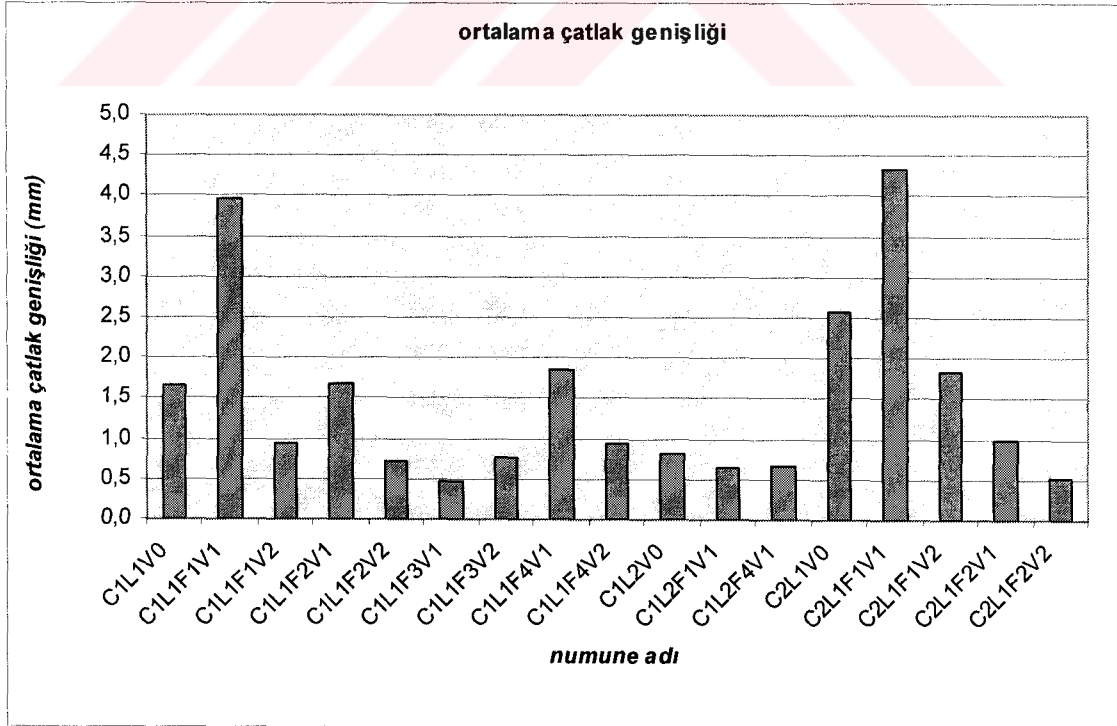
içermesine rağmen, boyuna donatısı 8 mm olan % 0.6 lif içeren numuneler gibi davranmışlardır. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’ de verilen yüksek dayanımlı betonların toplam çatlak genişliği burulma momenti grafiklerinden de anlaşılacağı üzere, normal dayanımlı beton ile üretilen numunelerin aksine deney sonuna kadar en fazla çatlak toplamı şahit numunelerde oluşmuştur.

Basit burulma altında numune boyunda oluşan uzama, donatıdaki boy uzamasına eşit sayılabileceği için, birim dönme açısı-birim boy uzaması grafiği ise kullanılan boyuna donatının akıp akmadığını kontrol edebilmek amacıyla oluşturulmuştur. Ancak, deney sırasında numuneler için kaydedilen boy uzaması değerleri incelendiğinde, bazı numunelerde bir aşamadan sonra, oluşan boy uzamasının azaldığı ya da boy uzamasındaki artışın daha az olduğu dikkat çekmektedir. Bu davranış çatlakların aşırı genişlemesinin gerçekleştiği birim dönme açılarından sonra gerçekleşmiştir. Çatlakların genişliği artarken, boy uzamasının azalması, normal bir durum olmadığı için boy uzamasında oluşan azalma, numune uçlarına boy uzamasını ölçmek için bağlanan komparatörlerin, numunede aşırı çatlak genişlemesi olmasından dolayı simetrisinin kaybolarak sağlıklı veri alamamasına bağlanmıştır. Eğer birim boy uzaması-birim dönme açısı grafiğinin lineerliğinin bozulduğu dönme açısına kadar olan grafik eğimi korunabilseydi, yani boy uzamasını ölçen komparatörlerin simetrisi bozulmasaydı numune boyuna donatılarında oluşan akmalar daha sağlıklı tespit edilebilecekti.

Normal dayanımlı beton ile üretilmiş $d_b=8$ mm boyuna donatıya sahip, numuneler için oluşturulmuş grafikler incelendiğinde sadece, 0.006 lif içeriği olan C1L1F1V2 ve C1L1F2V2 numunelerinin boyuna donatılarının aktığı söylenebilir. Yüksek dayanımlı betonlarla üretilen numuneler için oluşturulmuş Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de yer alan C2L1V0, C2L1F1V1 numunelerinde ise sağlıklı veri alınamaması dolayısıyla, boy uzamasından, donatının durumu hakkında herhangi bir sonuca ulaşılamamaktadır.

Betona çelik lif ilavesi çatlak sayısını arttırmış, çatlak genişliğini ise azaltmıştır. Tüm numuneler için, $\theta=0.12$ rad/m dönme açısı sonunda oluşan, çatlak genişliği toplamının, çatlak sayısına bölümü ile ortalama çatlak genişlikleri hesaplanmıştır. Bu

hesaplar sonucunda ortalama çatlak genişliği grafiği oluşturulmuştur (Şekil 5.9). Şekil 5.9'da verilen grafikten de anlaşılacağı üzere, normal dayanımlı betonlarda şahit ve 0.003 çelik lif içeriğine sahip numuneler arasında ortalama çatlak genişliği açısından fazla fark görülememiştir. Ancak C1L1F1V1 numunesindeki çatlak genişliği ortalaması, şahit ve 0.003 lif içerikli numunelere göre çok daha fazla olmuştur. Yüksek dayanımlı betonlarla üretilen, şahit ve C2L1F1V1 numunesinde oluşan çatlak genişliği ortalamaları, diğer yüksek dayanımlı betonlara göre daha fazla olmuştur. 0.003 lif içeriğine sahip C1L1F3V1 numunesinde, aynı lif içeriğine sahip 8 mm boyuna donatıya sahip, normal ve yüksek dayanımlı betonlarla üretilen numunelere göre, çatlak genişliği ortalaması çok küçük olmuştur. Bu sonuç bu numunede deneysel bir hata yapıldığı fikrini ortaya çıkarmaktadır. 0.006 lif ilavesi olan numunelerde çatlak genişliği ortalaması, şahit numunelere göre oldukça azalmıştır. Boyuna donatının artırılması çatlak genişliğinin azaltılması ve yük taşıma kapasitesinin artırılması açısından etkili olmuştur. Yönetmeliklerde boyuna donatının yük taşımadığı varsayılsa da, özellikle uygun çelik lif miktarı ile kullanılan daha fazla boyuna donatı, kesitin burulma karakteristiklerini olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 5.9 Tüm numunelerin ortalama çatlak genişliği grafiği

Bu bölümde verilen tüm grafikler incelenerek, yeterli miktarda kullanılan çelik lif katkısının, çatlak dağılımını, burulma kapasitesini, burulma altındaki enerji yutma miktarını değiştirerek, kirişlerin burulma altındaki davranışını iyileştirdiği söylenebilir.



6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Çelik lif katkılı betonarme kirişlerin burulma davranışındaki değişimlerin incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Sınırlı sayıda numunenin test edilmesi ile elde edilen bu sonuçların, daha güvenilir olabilmesi için çok daha fazla sayıda numunenin deney sonuçları ile desteklenmesi gerekliliği göz ardı edilmemelidir.

- Normal ve yüksek dayanımlı betonlara çelik lif ilave edilerek üretilen kirişlerin, burulma davranışının olumlu yönde değiştiği tespit edilmiştir. Ancak % 0.3 hacimsel çelik lif ilavesinin burulma davranışında yeteri miktarda etkisinin olmadığı belirlenmiştir.
- Normal dayanımlı betonlarda çelik lif ilavesi olmasa ya da yetersiz olsa bile, yüksek dayanımlı çelik lif içermeyen veya yetersiz lif içeren numunelere göre daha sünek bir davranış sergilemişlerdir.
- % 0.6 hacimsel çelik lif ilavesi, betonarme kirişlerin burulmadaki taşıma kapasitesinde % 12 ila % 62 arasında artış sağlamıştır. % 0.6 hacimsel çelik lif ilavesinin betonarme kirişlerin burulma kapasitesini arttırmak için uygun miktar olduğu, ancak daha fazla kapasite artışı sağlayabilmek için betonun kalıba yerleşme sorunu yaratmayacağı düzeye kadar lif ilavesinin arttırılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Kullanılan çelik lifin boy/çap oranının burulma kapasitesini çok fazla etkilemediği belirlenmiştir.
- Boyuna donatı miktarını arttırarak, % 0.3 hacimsel çelik lif katkısının betonarme kirişlerin, burulma kapasitesi üzerine etkisinin arttırılabileceği tespit edilmiştir.

- Yeterli miktarda elik lif ilavesi ile kirişlerde oluşan çatlak genişliklerinde azalma, çatlak sayısında ise artış sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda; bu çalışmada kullanılan elik lif tiplerinden farklı lif tipleri kullanılması, tersinir-tekrarlı yikleme altında numunelerin denenmesi, daha fazla hacimsel elik lif içeren numunelerin üretilerek deneye tabi tutulması ile elik lif katkılı betonarme kirişlerin, burulma davranışının bilinmeyenlerinin azaltılabileceği düşnlmektedir.



KAYNAKLAR

1. Tuna, M.E.,1992. Çözümlü Örneklerle Betonarme, 2. Baskı, Tuna Eğitim ve Kültür Vakfı, Ankara
2. Berktaş, İ., 1995. Betonarme I-Taşıma Gücü ve Kesit Hesapları, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul
3. Celep, Z., ve Kumbasar N., 1998. Betonarme Yapılar, 2.Baskı, Sema Matbaacılık, İstanbul
4. Ersoy, U., ve Özcebe, G., 2001. Betonarme, Geliştirilmiş Yeni Baskı, Evrim Yayınevi ve Bilg. San. Tic. Ltd. Şti., İstanbul
5. Hsu,T., 1968. Torsion of Structural Concrete-Behaviour of R.C. Rectangular Members, ACI Symposium Volume on Torsion, ACI SP-18
6. Fang, I-K., and Shiau, J-K., 2004. Torsional Behavior of Normal- and High-Strength Concrete Beams, ACI Structural Journal, Title No 101-S31, pp. 304-313, May-June.
7. Atef, H.B., Faisal, F.W., and Ali, A.A., 1990. Torsional Behavior of Plain high-Strength Concrete Beams, ACI Structural Journal, Title No 87-S59, pp. 583-588, September-October
8. Beer, F.P., and Johnston, E.R, 1992. Mechanics of Materials, Second Edition in SI Units, McGraw-Hill Book Company, London
9. Rao, T.D.G., and Seshu, D.R., 2003. Torsion of Steel Fiber Reinforced Concrete Members, Cement and Concrete Research 33, pp. 1783-1788
10. Hsu, T.T.C., 1984. Torsion of Reinforced Concrete, Van Nostrand Reinhold Co., Inc. New York
11. Hasnat, A., and Akhtaruzzaman, A.A., 1983. An Experimentel Investigation to Determine the Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams Containing an Opening under Bending and Torsion, Research Report No. 01-21, College of Engineering, King Abdulaziz University, Jeddah
12. Leet, K., and Bernal, D. 1997. Reinforced Concrete Design, Third Edition, A Division of The McGraw-Hill Companies, New York
13. ACI Committe 318, 1995. Building Code Requirements for Structural Concrete (318-95) and Commentary (318-95), American Concrete Institute, Michigan
14. Bhatti, M.A., and Almughrabi, A., 1996. Refined Model to Estimate Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, Title No 93-S58, pp. 614-622, September-October

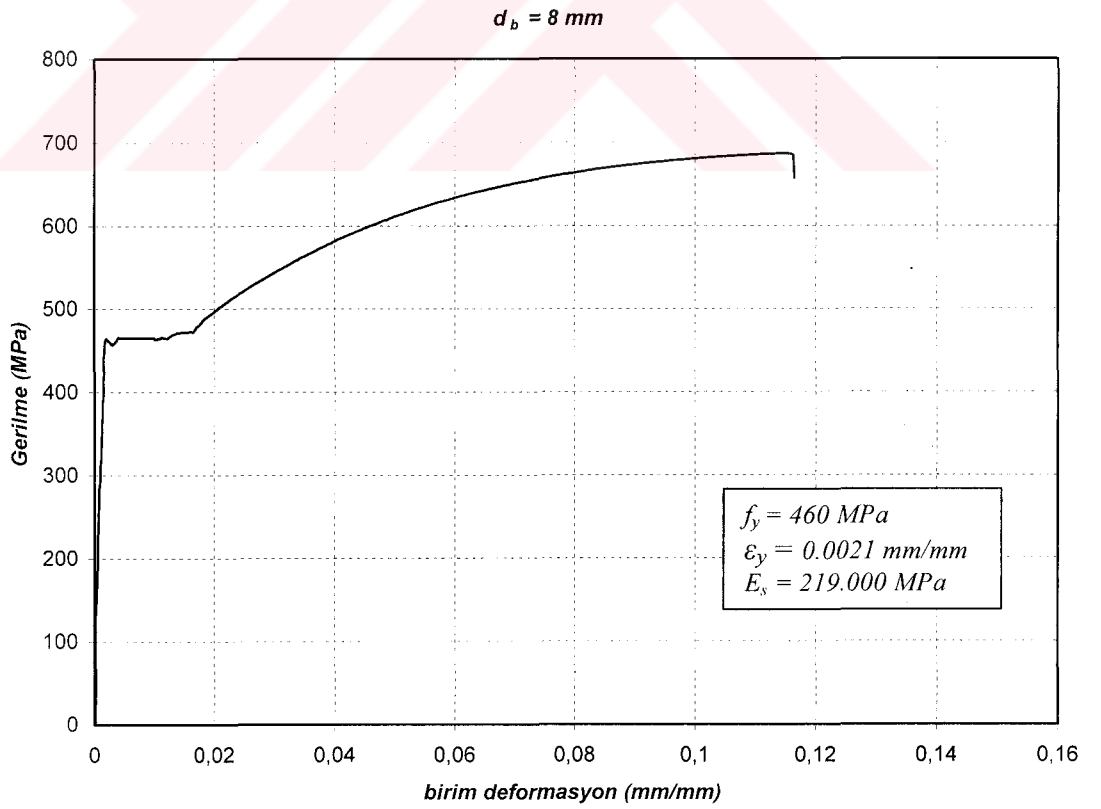
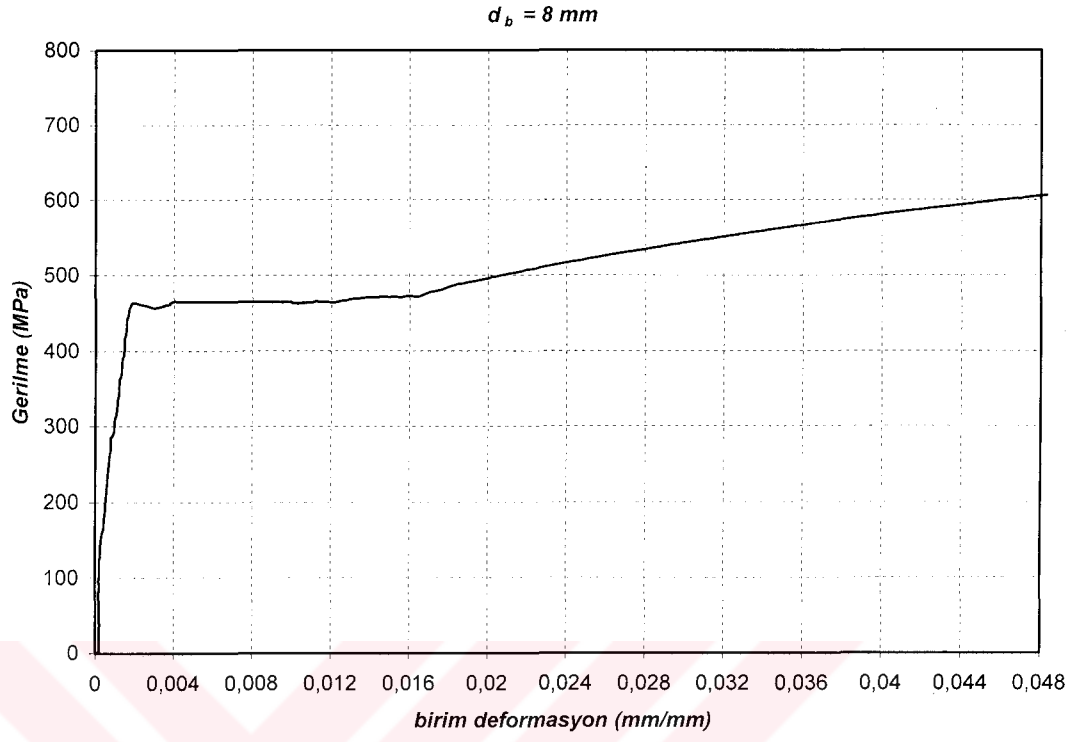
15. El-Niema, E.I., 1993. Fiber Reinforced Beams under Torsion, ACI Structural Journal, Title No 90-S50, pp.489-495, September-October
16. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), 2000. TS-500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Birinci Baskı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
17. Yıldırım, S.T., 2002. Lif Takviyeli Betonların Performans Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ
18. Craig, R.J., James, A.P., Germain, E., Mosquera, V., and Kamilaris, S., 1986. Fiber Reinforced Beams in Torsion, ACI Structural Journal, Title No 83-81, pp. 934-942, November-December
19. Song, P.S., and Hwang, S., 2004. Mechanical Properties of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete, Construction and Building Materials 18, pp. 669-673
20. Faisal, F.W., and Samir, A.A., 1992. Mechanical Properties of High-Strength Fiber Reinforced Concrete, ACI Material Journal, Title No 89-M48, pp. 449-455, September-October
21. Jianming, G., Wei, S., and Keiji, M., 1997. Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced, High-Strength, Lightweight Concrete, Cement and Concrete Composites 19, pp. 307-313
22. Narayanan, R., and Karem-Palanjian, A.S., 1986. Torsion in Beams Reinforced with Bars and Fibers, Journal of Structural Engineering, Vol. 112, No. 4, pp.53-66

EKLER

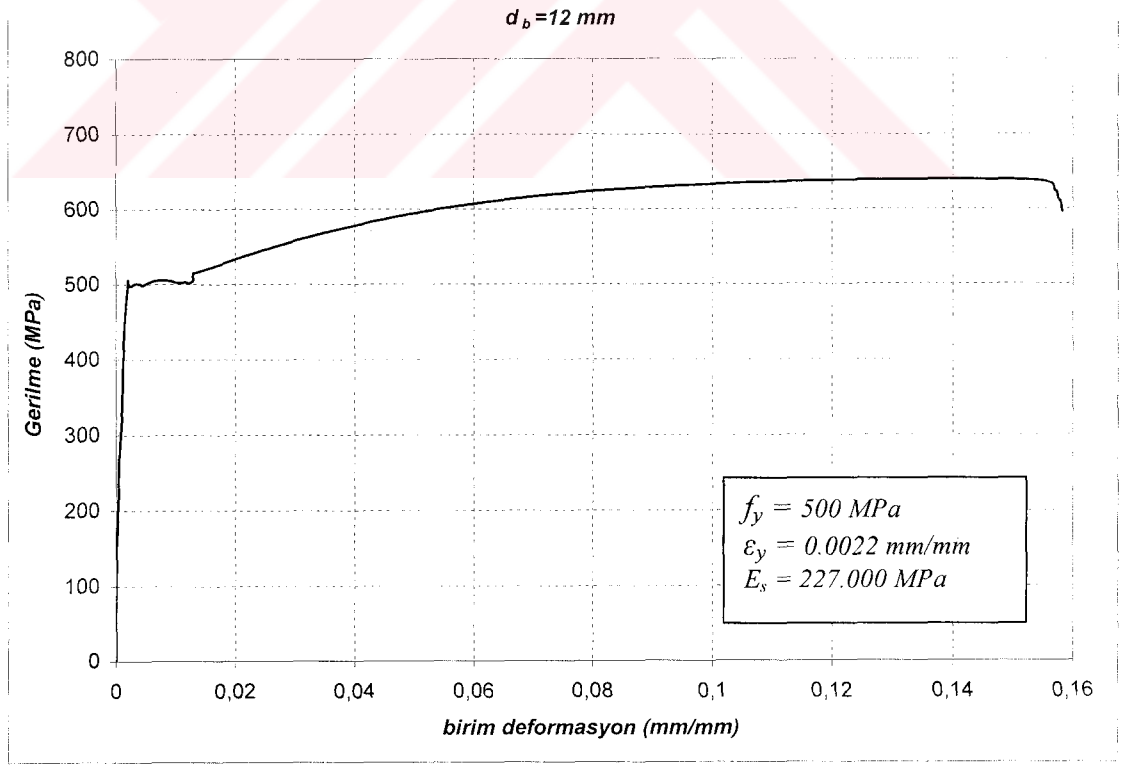
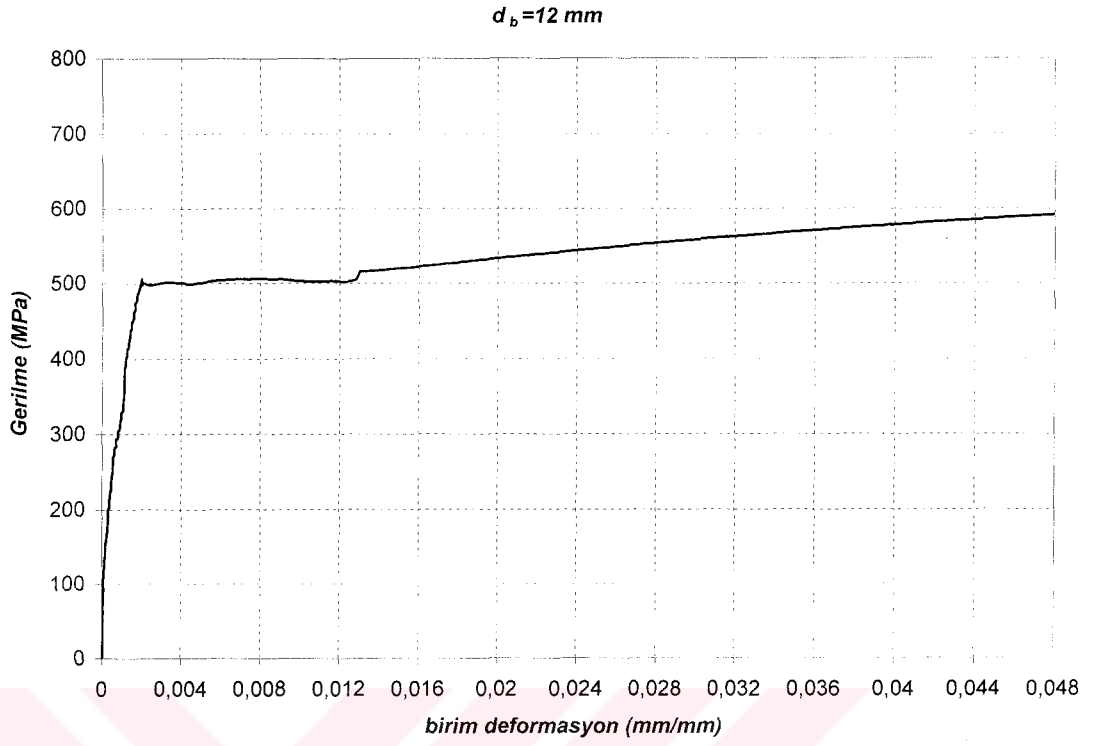
Ek A

Ek A' da deney numunelerinin üretilmesi sırasında kullanılmış olan $d_b=8$ mm ve $d_b=12$ mm çapındaki donatılar için elde edilmiş gerilme-birim deformasyon eğrileri verilmiştir. Her donatı çapı için, birden fazla yapılan çelik çekme deneylerinin ortalaması alınıp, her donatı için bir adet gerilme birim deformasyon grafiği oluşturularak karışıklık oluşması engellenmeye çalışılmıştır. Donatı akma bölgesinin daha anlaşılır olabilmesi için üstte gerilme-birim deformasyon grafiğinin dar bir aralığı verilmiştir. Altta ise gerilme-birim deformasyon grafiğinin tamamı verilmiştir.





Şekil A.1 Deneilerde kullanılan donatılara ait gerilme-birim deformasyon grafiği ($d_b=8 \text{ mm}$)



Şekil A.2 Deneylerde kullanılan donatılara ait gerilme-birim deformasyon grafiği ($d_b = 12 \text{ mm}$)

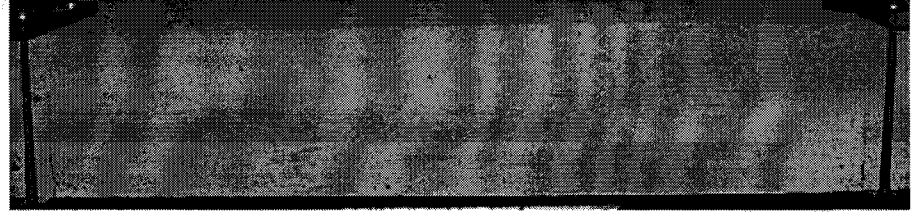
Ek B

Ek B' de deney sırasında her bir numunenin çatlamamış, çatlama anındaki ve çatladıktan sonra $\phi=0.00-0.12$ rad/m aralığındaki her bir 0.01 rad/m' lik birim dönme açısı değeri için çekilen numune fotoğraflarının sadece test bölgesine ait kısımları alt alta yerleştirilerek oluşturulmuş şekiller verilmiştir. Bu şekillerde her birim dönme açısına ait fotoğrafın yanına o andaki burulma momenti değeri de yazılarak çatlakların oluşumu ile birlikte taşınan burulma momentinin değişiminin takip edilebilmesi amaçlanmıştır. Numunelerin yanına yazılan birim dönme açısı rad/m, burulma momenti değeri de kN.m birimi cinsinden değerlerdir. Numuneler için oluşturulan şekiller ve çatlak tabloları Tablo 3.9' da ki sıralamaya uygun olarak verilmiştir.



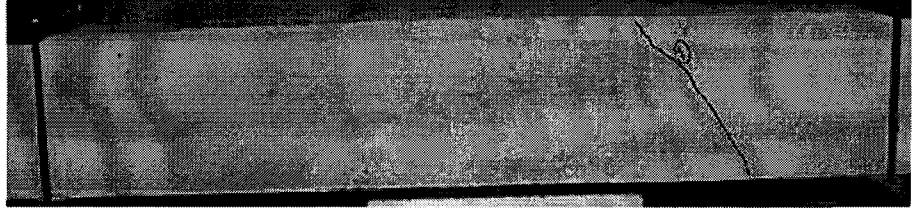
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



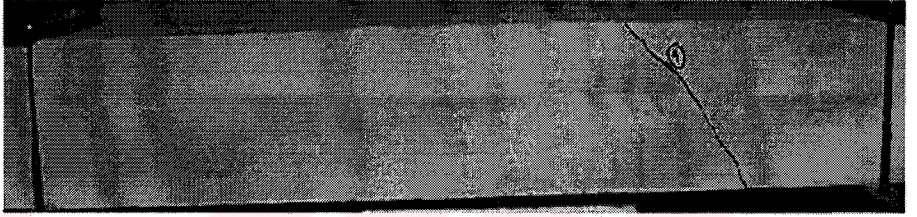
$T_{cr} = 4.93$

$\theta_{cr} = 0.003$



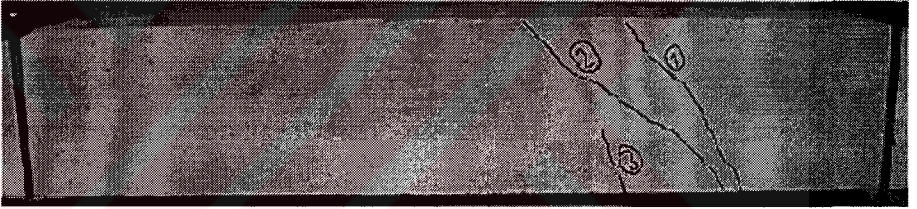
$T = 4.24$

$\theta = 0.01$



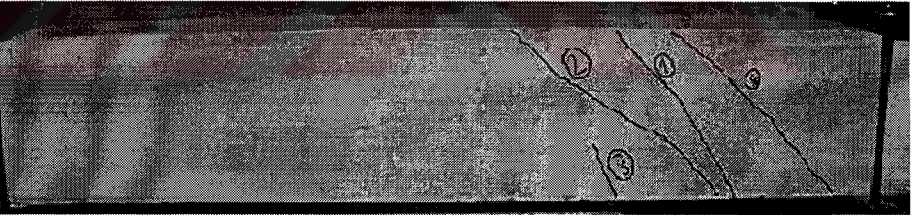
$T = 4.30$

$\theta = 0.02$



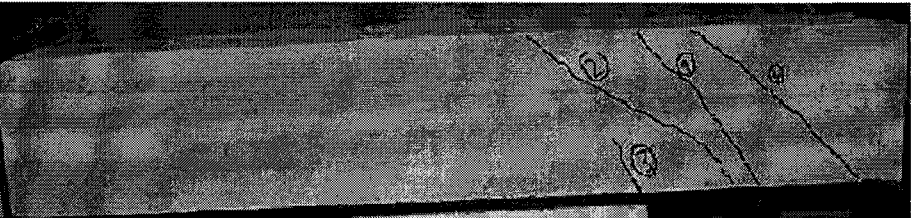
$T = 3.88$

$\theta = 0.03$



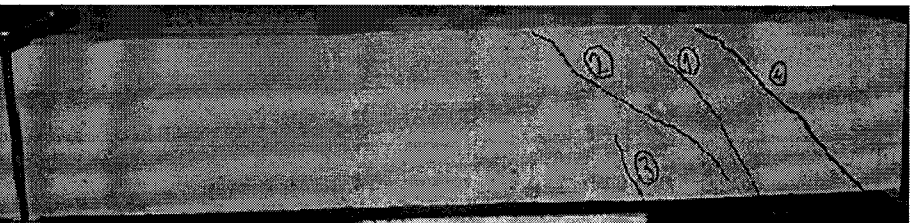
$T = 3.87$

$\theta = 0.04$



$T = 3.68$

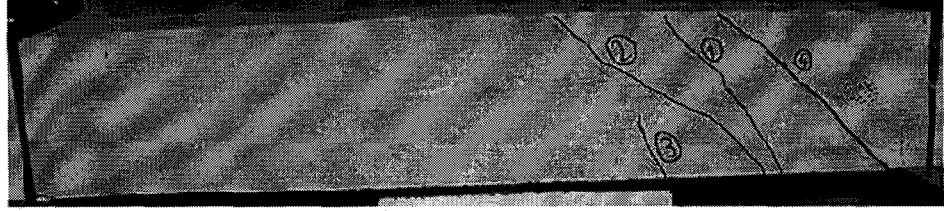
$\theta = 0.05$



Şekil B.1. C1L1V0 numunesi çatlak dağılımı

$T = 3.55$

$\theta = 0.06$



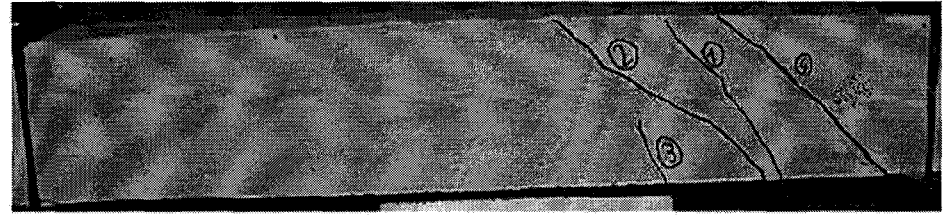
$T = 3.34$

$\theta = 0.07$



$T = 3.22$

$\theta = 0.08$



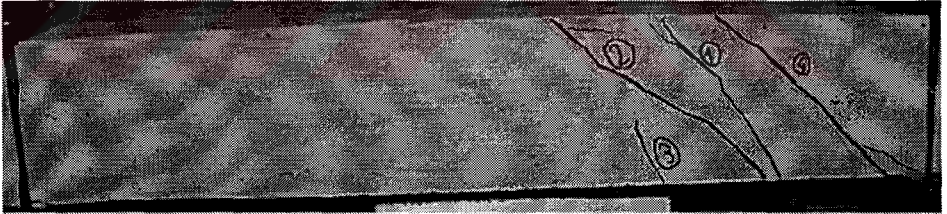
$T = 3.18$

$\theta = 0.09$



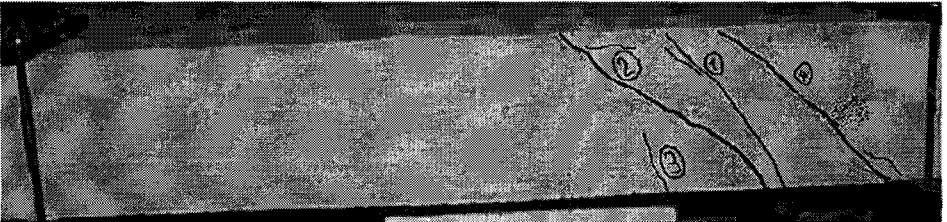
$T = 3.03$

$\theta = 0.10$



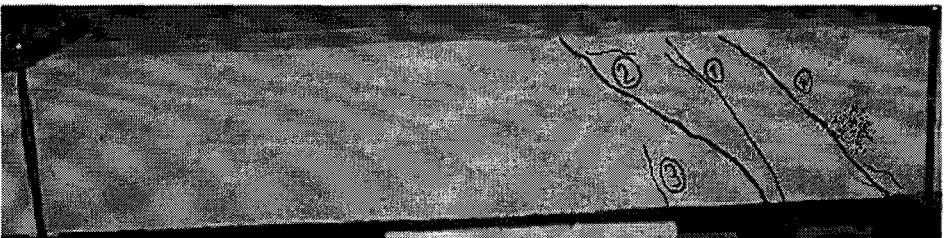
$T = 2.80$

$\theta = 0.11$



$T = 2.62$

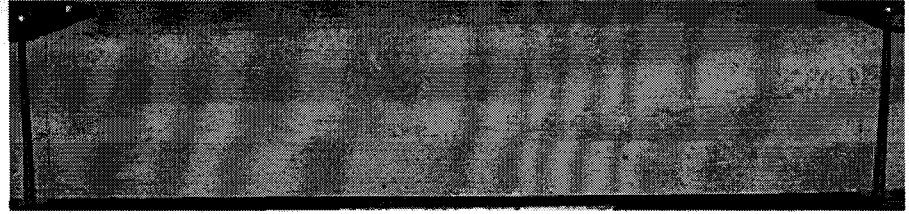
$\theta = 0.12$



Şekil B.1. C1L1V0 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

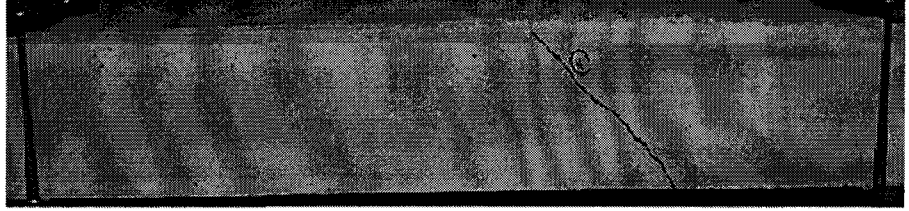
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



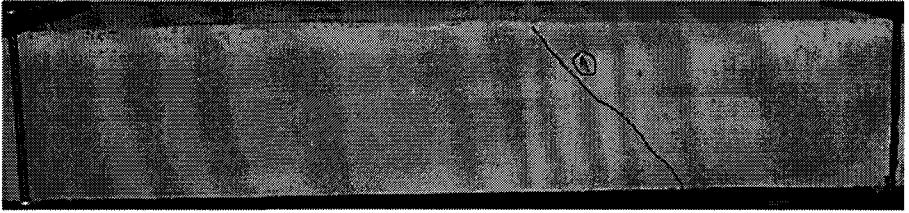
$T_{cr} = 4.58$

$\theta_{cr} = 0.003$



$T = 3.59$

$\theta = 0.01$



$T = 4.08$

$\theta = 0.02$



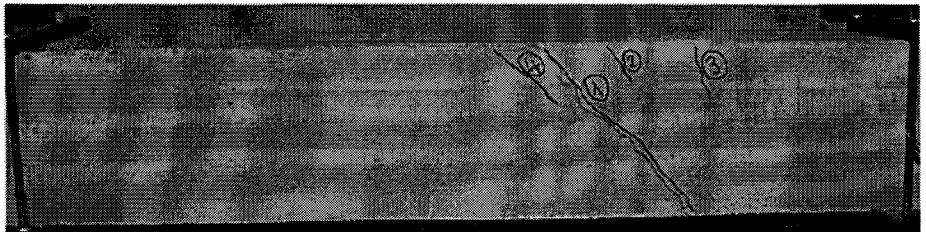
$T = 4.30$

$\theta = 0.03$



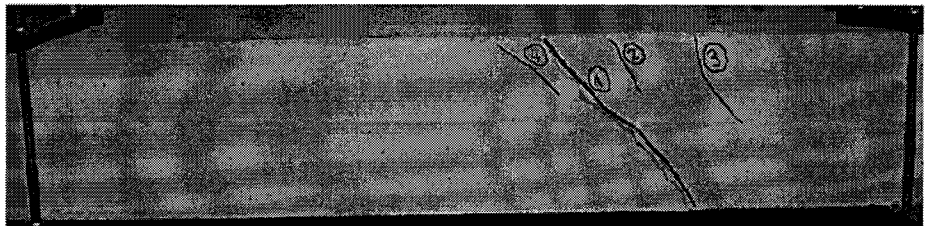
$T = 4.32$

$\theta = 0.04$



$T = 4.10$

$\theta = 0.05$



Şekil B.2. C1L1F1V1 numunesi çatlak dağılımı

$T = 3.81$

$\theta = 0.06$



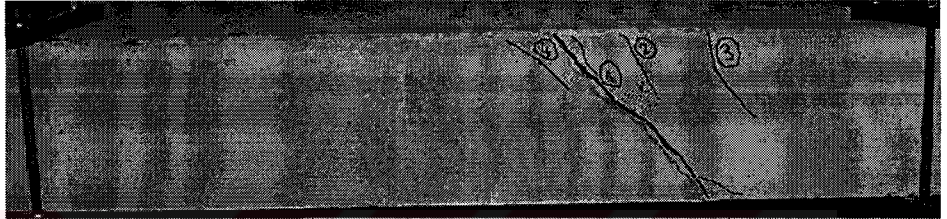
$T = 3.65$

$\theta = 0.07$



$T = 3.41$

$\theta = 0.08$



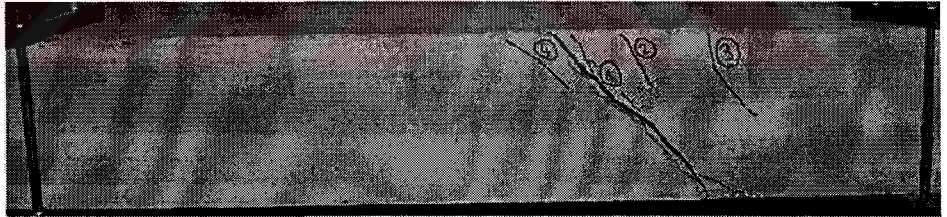
$T = 3.21$

$\theta = 0.09$



$T = 3.16$

$\theta = 0.10$



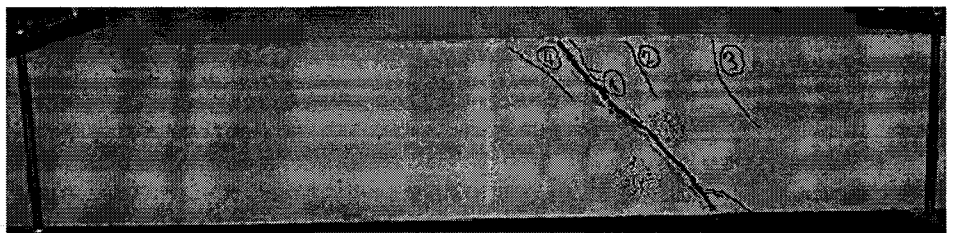
$T = 3.12$

$\theta = 0.11$



$T = 3.12$

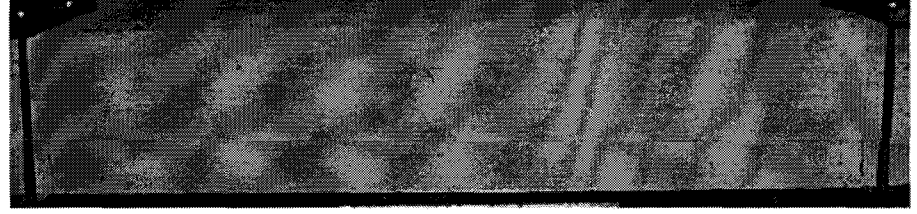
$\theta = 0.12$



Şekil B.2. C1L1F1V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

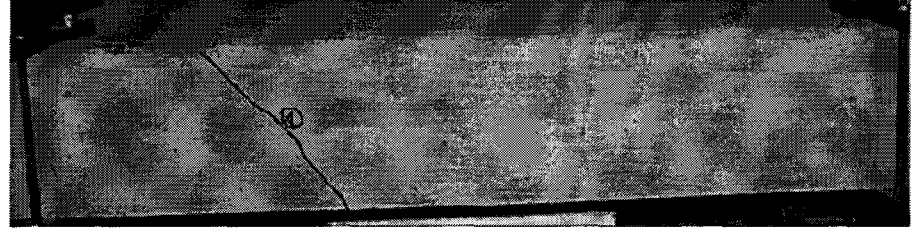
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



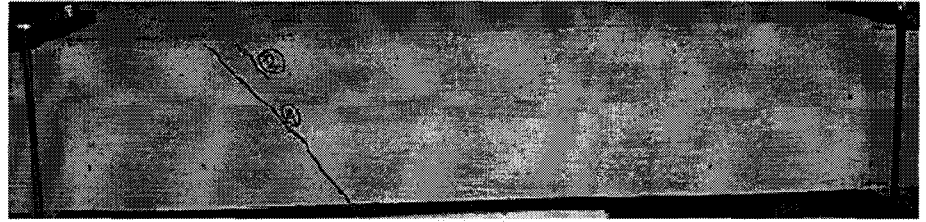
$T_{cr} = 4.62$

$\theta_{cr} = 0.004$



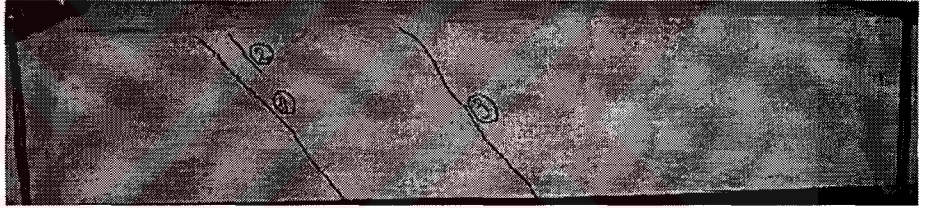
$T = 4.62$

$\theta = 0.01$



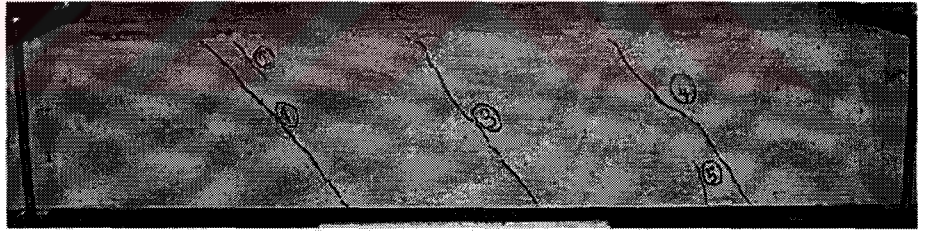
$T = 4.87$

$\theta = 0.02$



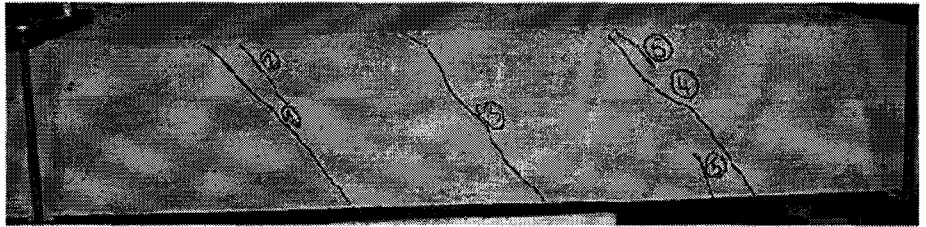
$T = 4.62$

$\theta = 0.03$



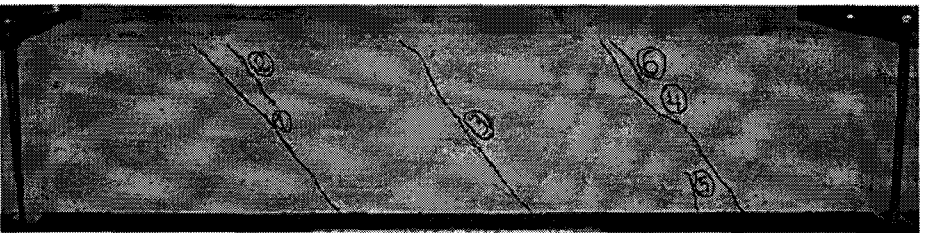
$T = 5.25$

$\theta = 0.04$



$T = 5.43$

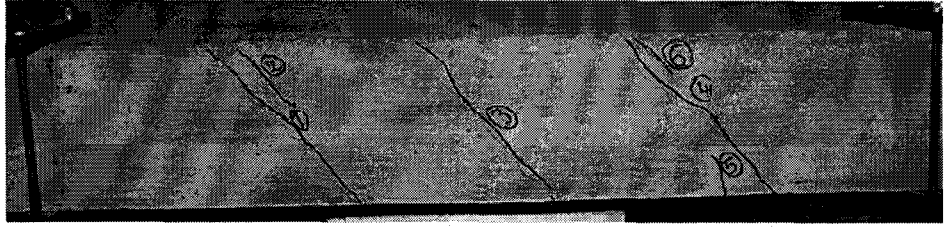
$\theta = 0.05$



Şekil B.3. C1L1F1V2 numunesi çatlak dağılımı

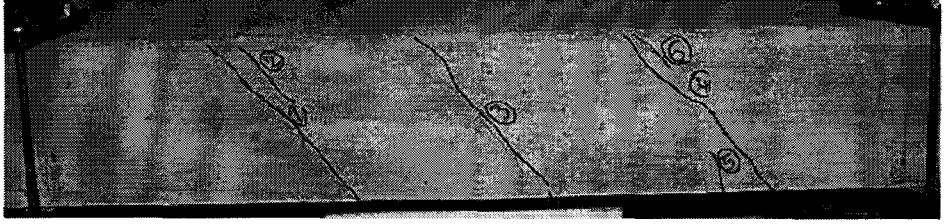
$T = 5.54$

$\theta = 0.06$



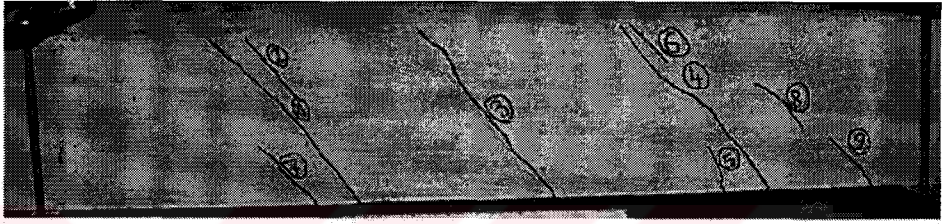
$T = 5.47$

$\theta = 0.07$



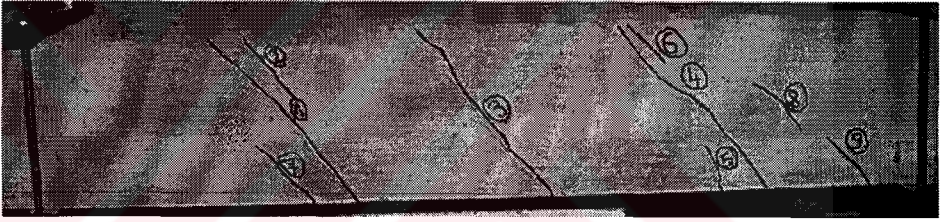
$T = 5.36$

$\theta = 0.08$



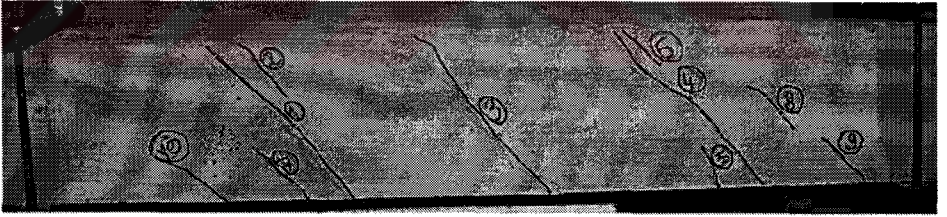
$T = 5.34$

$\theta = 0.09$



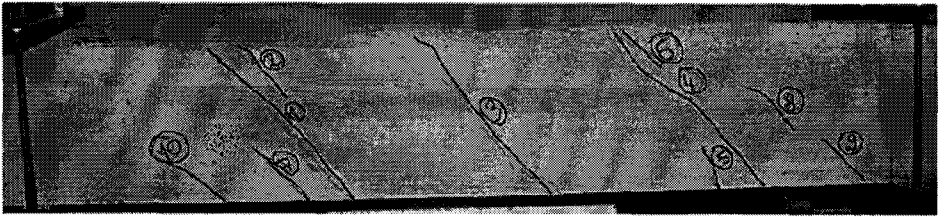
$T = 4.91$

$\theta = 0.10$



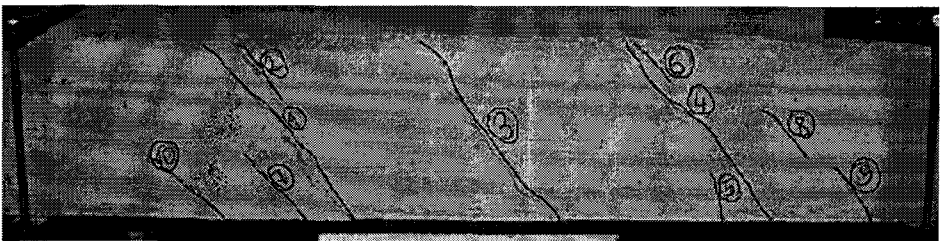
$T = 4.39$

$\theta = 0.11$

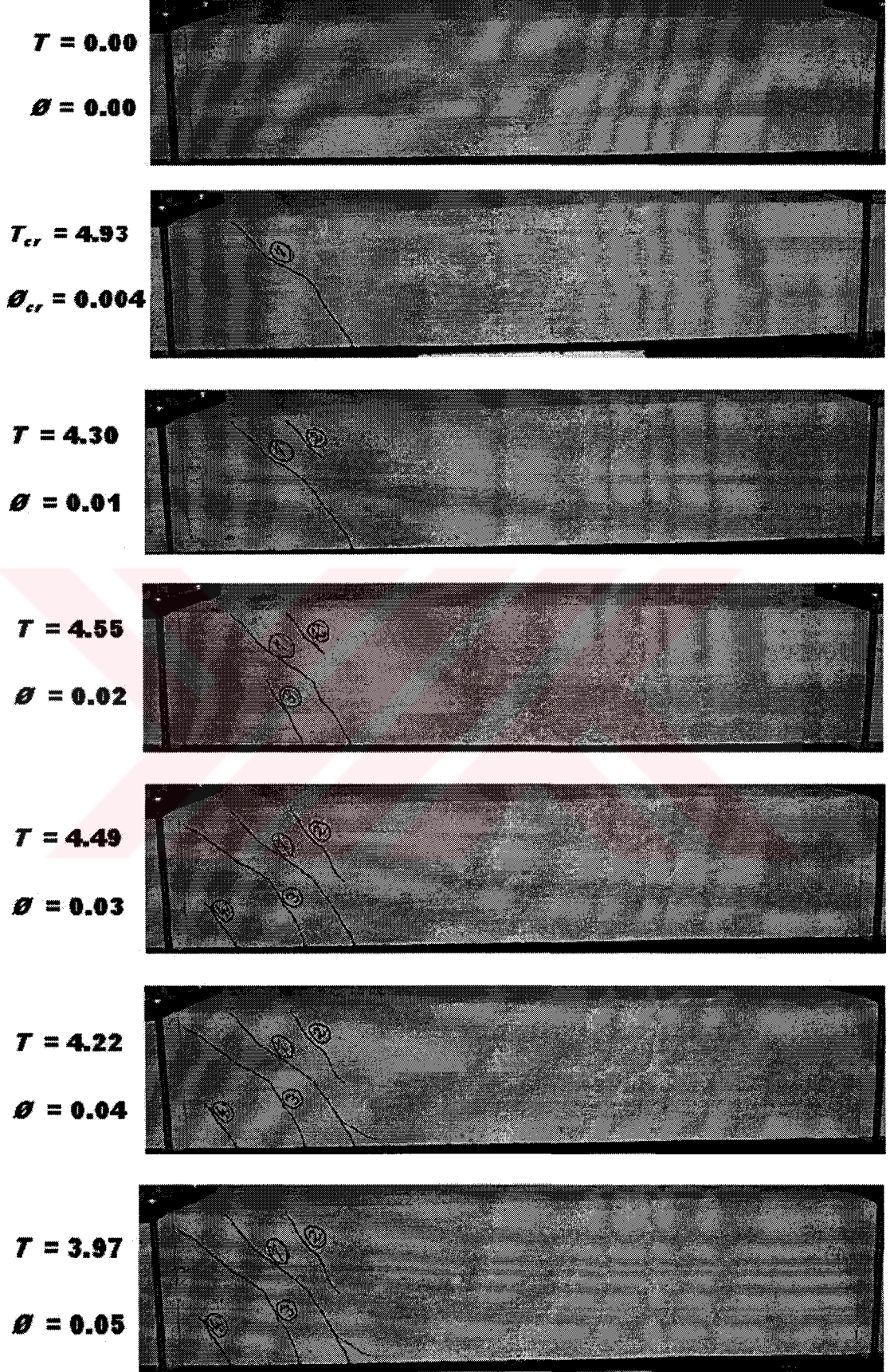


$T = 3.90$

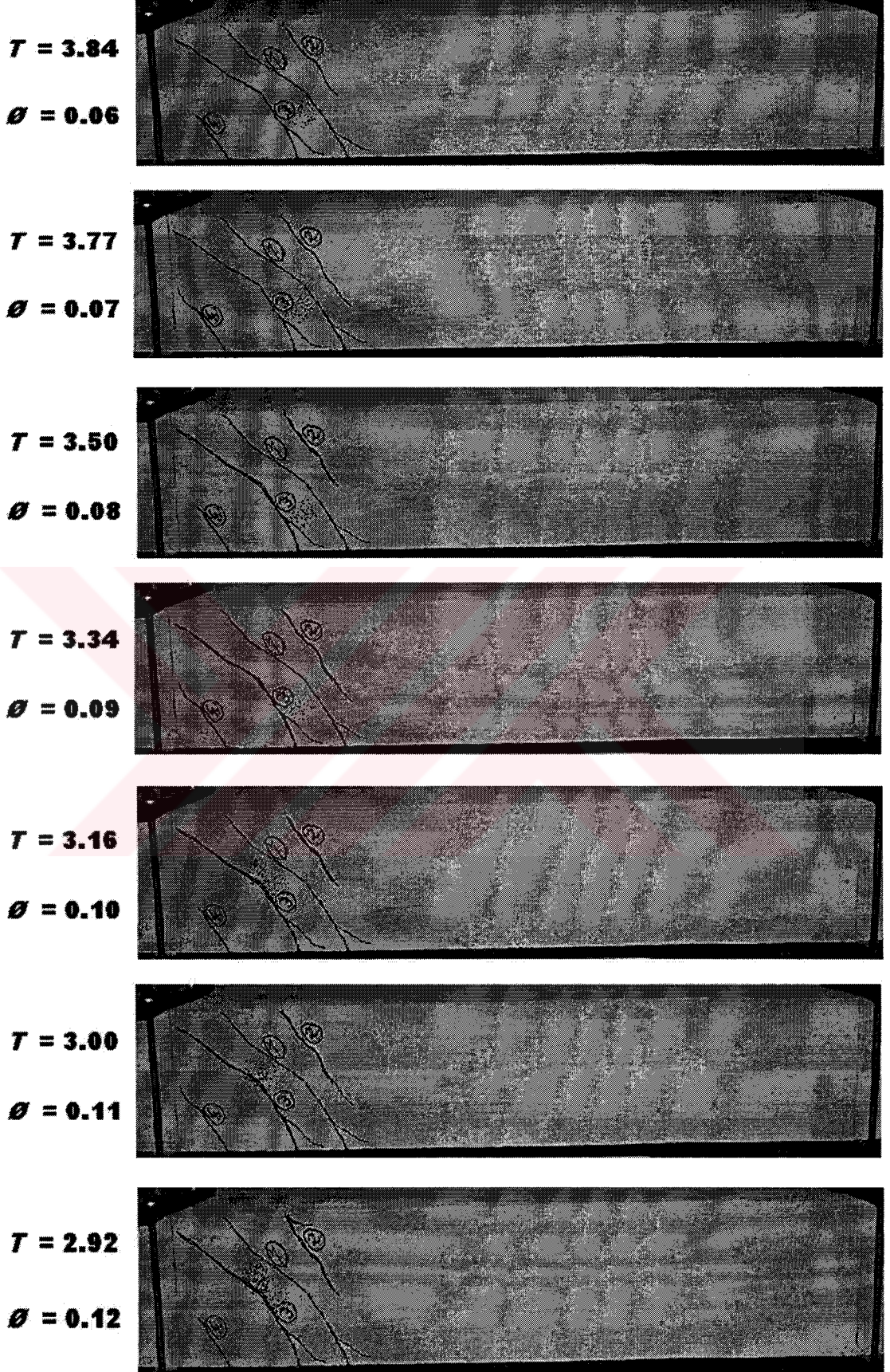
$\theta = 0.12$



Şekil B.3. C1L1F1V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı)



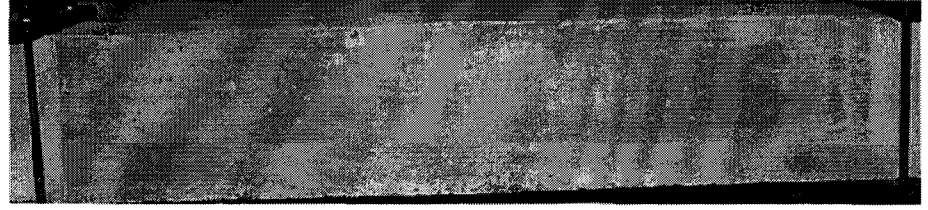
Şekil B.4. C1L1F2V1 numunesi çatlak dağılımı



Şekil B.4. C1L1F2V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

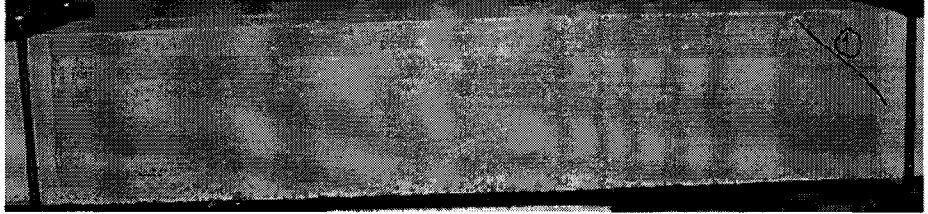
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



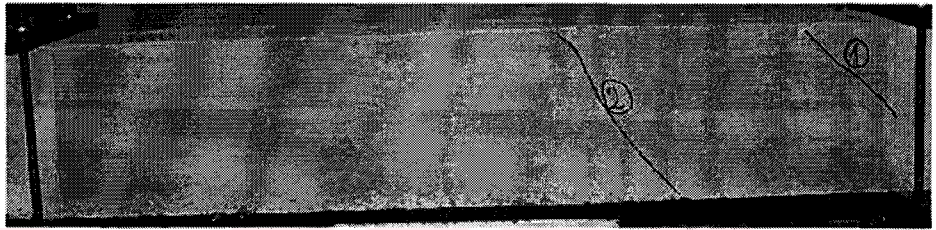
$T_{cr} = 4.96$

$\theta_{cr} = 0.004$



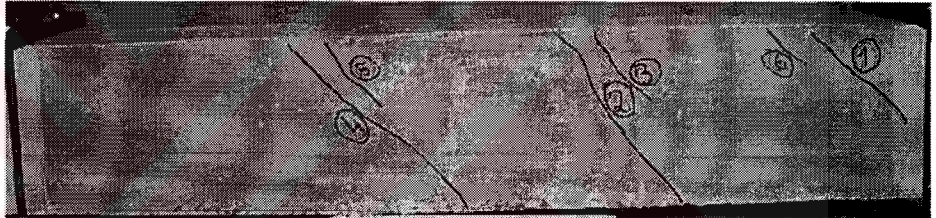
$T = 4.71$

$\theta = 0.01$



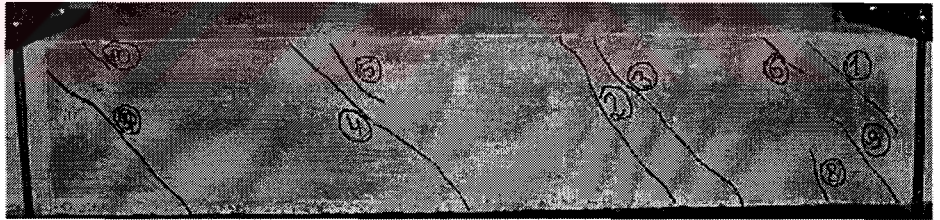
$T = 4.70$

$\theta = 0.02$



$T = 4.98$

$\theta = 0.03$



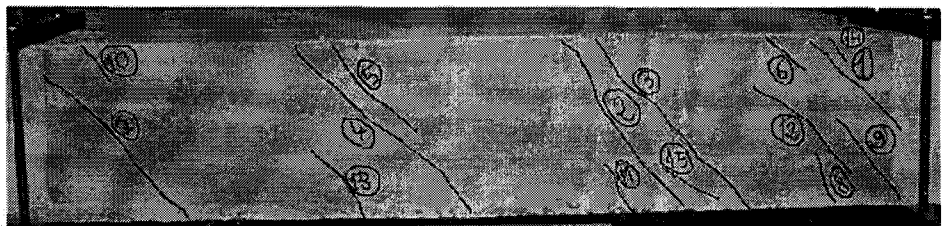
$T = 5.60$

$\theta = 0.04$



$T = 5.74$

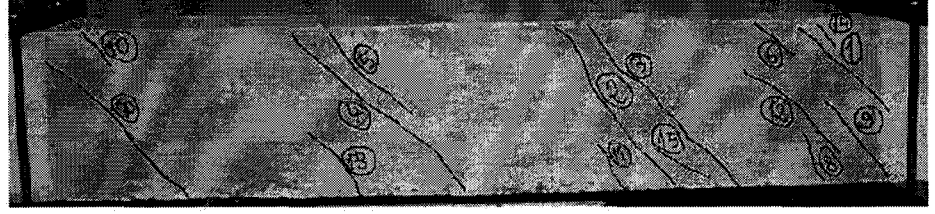
$\theta = 0.05$



Şekil B.5. C1L1F2V2 numunesi çatlak dağılımı

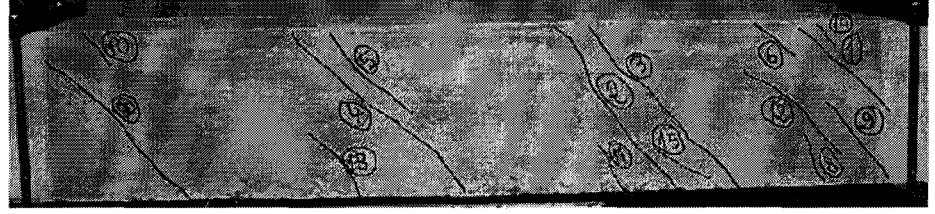
$T = 5.85$

$\theta = 0.06$



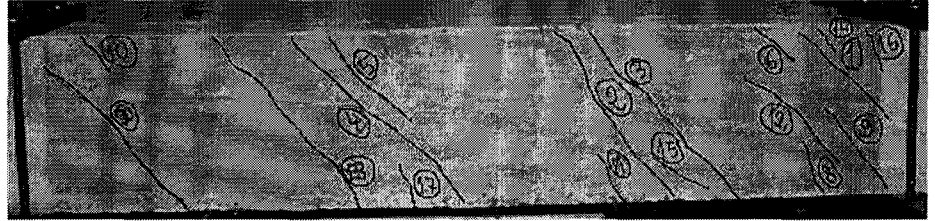
$T = 5.79$

$\theta = 0.07$



$T = 5.49$

$\theta = 0.08$



$T = 5.16$

$\theta = 0.09$



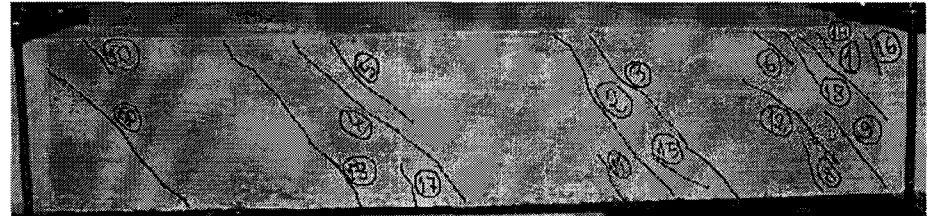
$T = 4.89$

$\theta = 0.10$



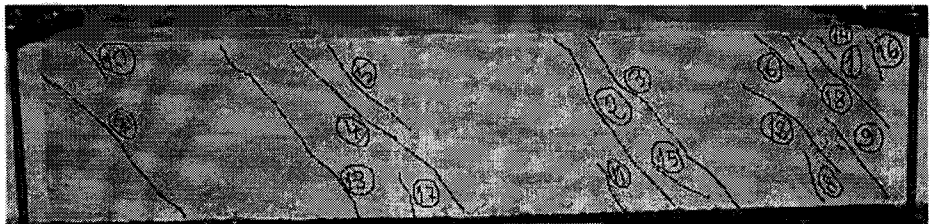
$T = 4.71$

$\theta = 0.11$

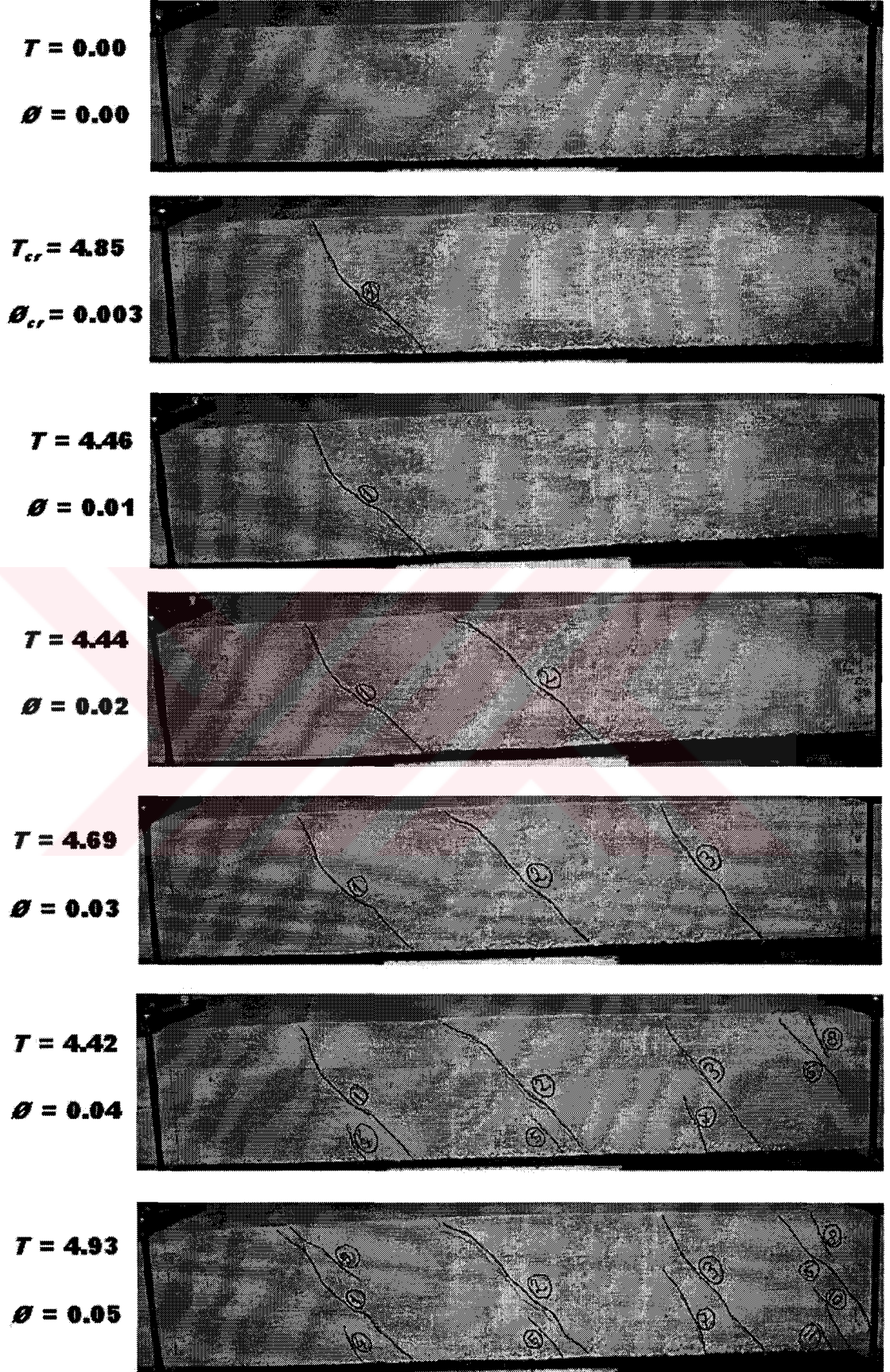


$T = 4.30$

$\theta = 0.12$



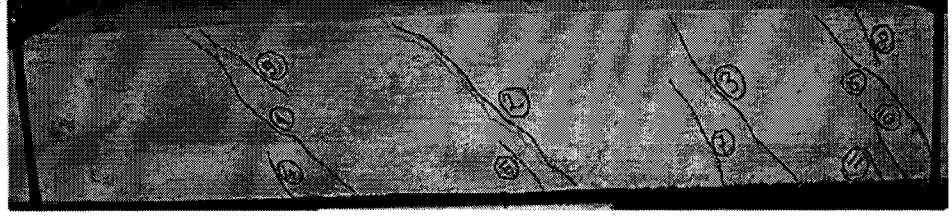
Şekil B.5. C1L1F2V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı)



Şekil B.6. C1L1F3V1 numunesi çatlak dağılımı

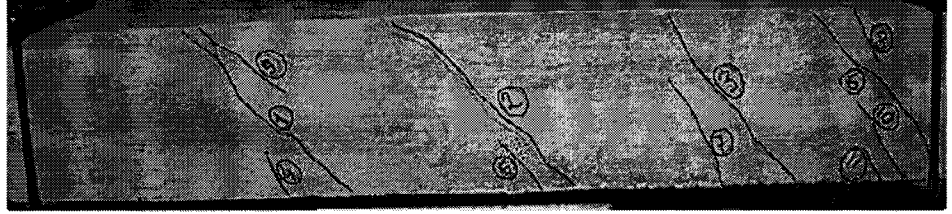
$T = 5.03$

$\theta = 0.06$



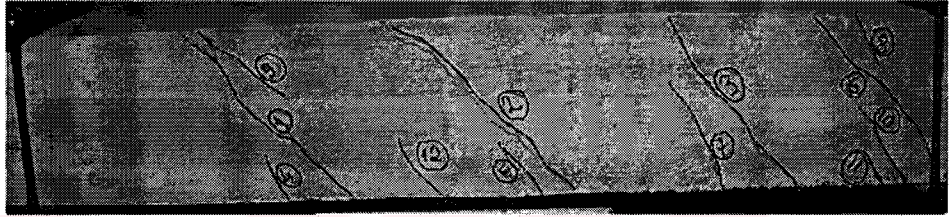
$T = 4.26$

$\theta = 0.07$



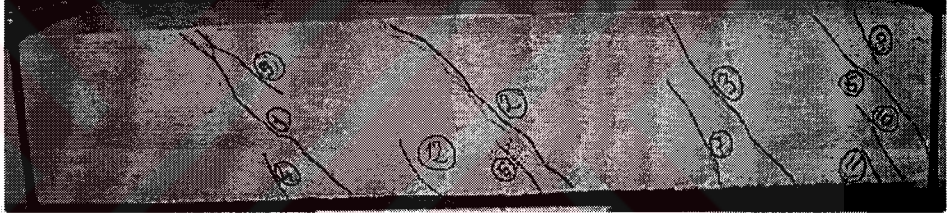
$T = 3.68$

$\theta = 0.08$



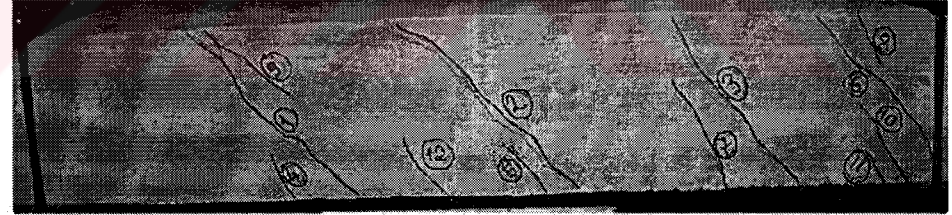
$T = 3.34$

$\theta = 0.09$



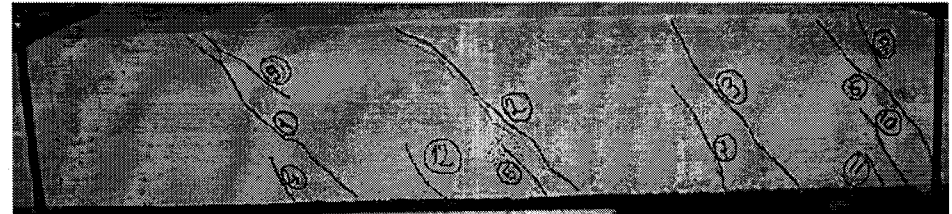
$T = 3.34$

$\theta = 0.10$



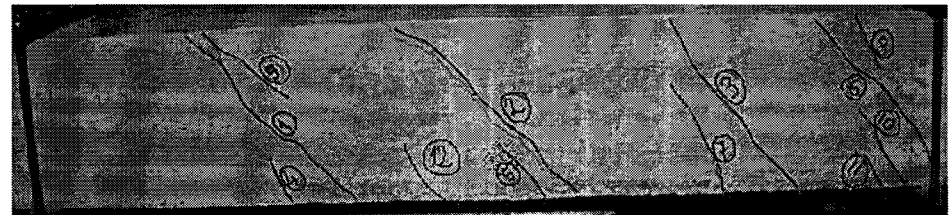
$T = 3.41$

$\theta = 0.11$



$T = 3.27$

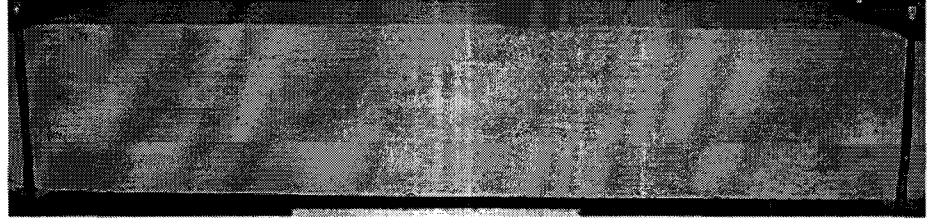
$\theta = 0.12$



Şekil B.6. C1L1F3V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

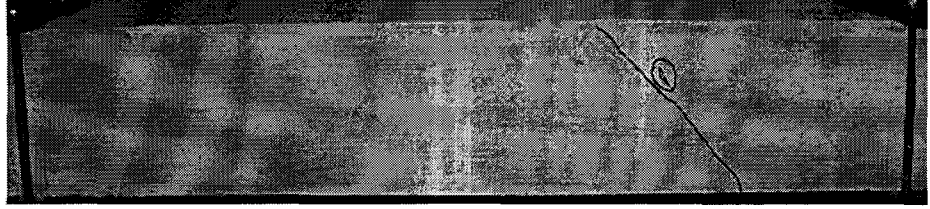
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



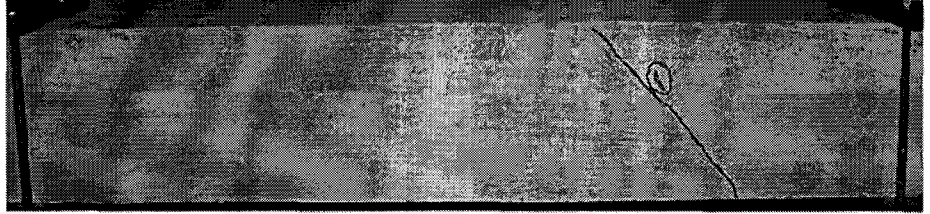
$T_{cr} = 4.96$

$\theta_{cr} = 0.004$



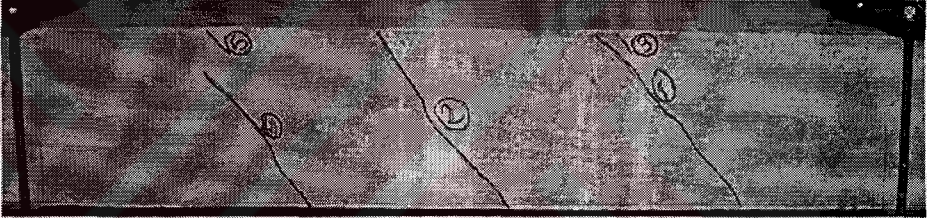
$T = 4.53$

$\theta = 0.01$



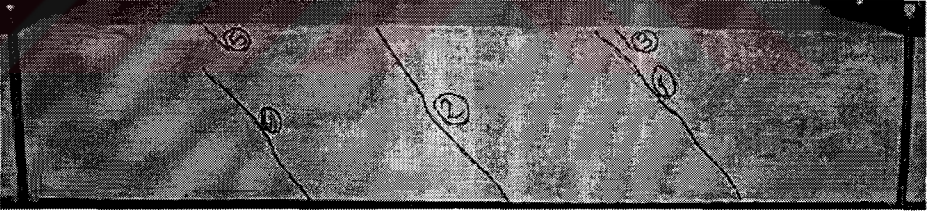
$T = 4.94$

$\theta = 0.02$



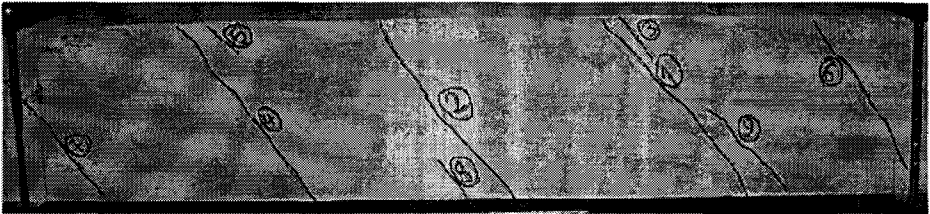
$T = 5.25$

$\theta = 0.03$



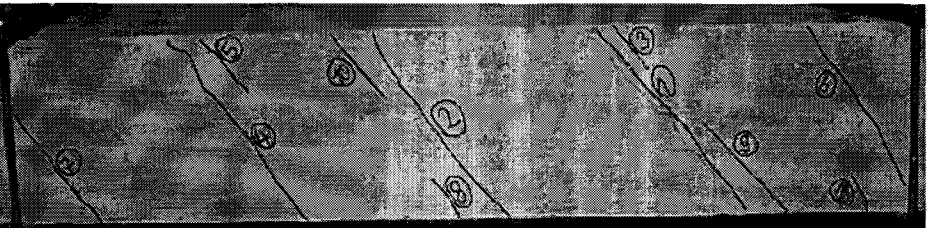
$T = 5.59$

$\theta = 0.04$



$T = 5.61$

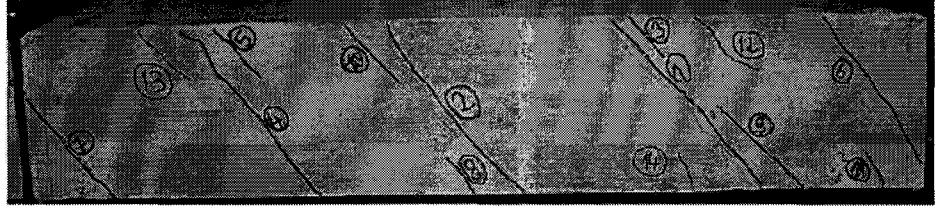
$\theta = 0.05$



Şekil B.7. C1L1F3V2 numunesi çatlak dağılımı

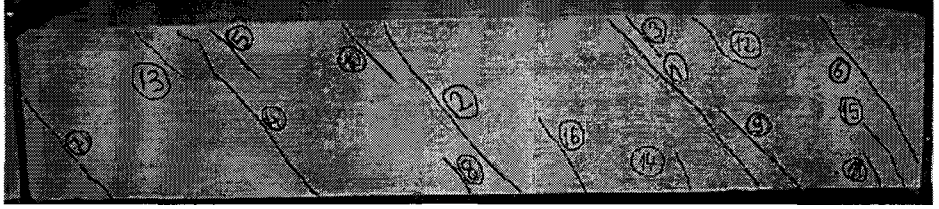
$T = 5.76$

$\theta = 0.06$



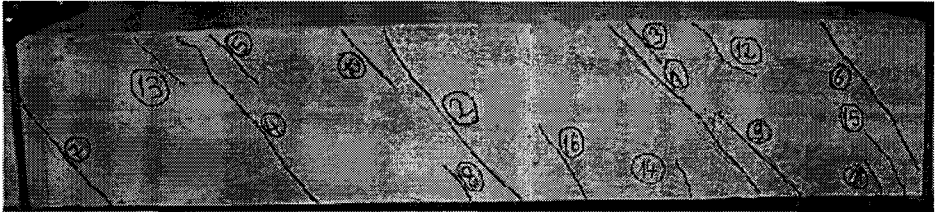
$T = 5.81$

$\theta = 0.07$



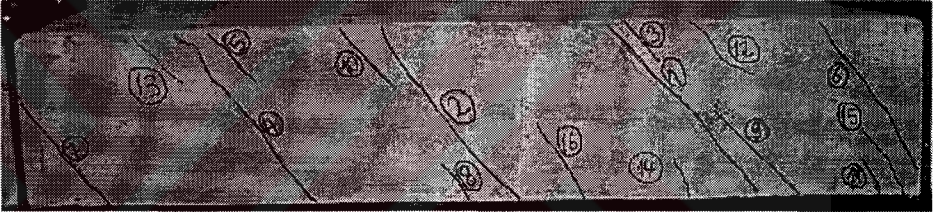
$T = 5.07$

$\theta = 0.08$



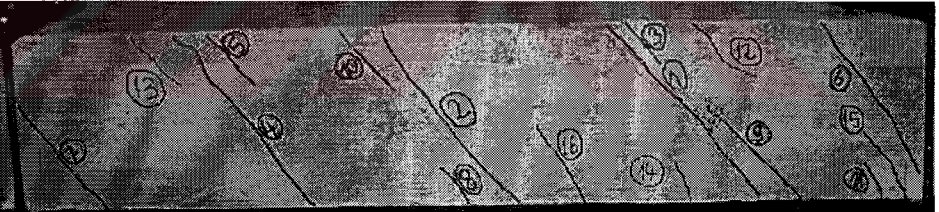
$T = 4.68$

$\theta = 0.09$



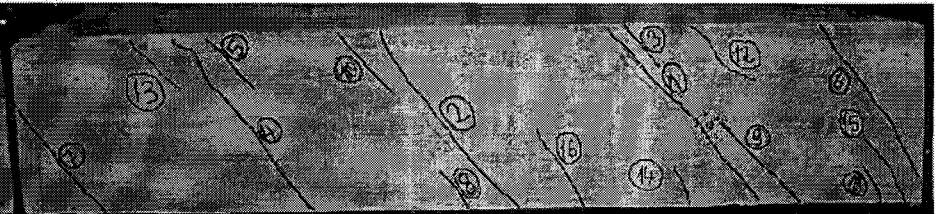
$T = 4.15$

$\theta = 0.10$



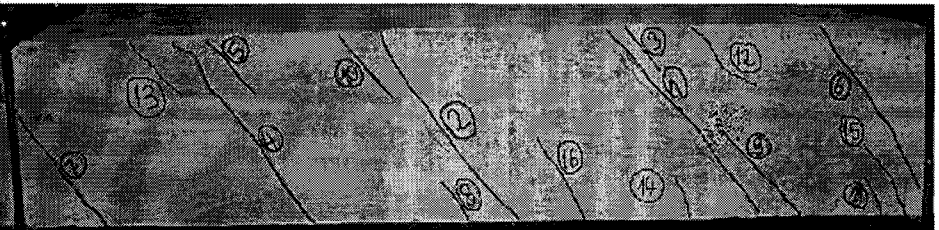
$T = 3.81$

$\theta = 0.11$

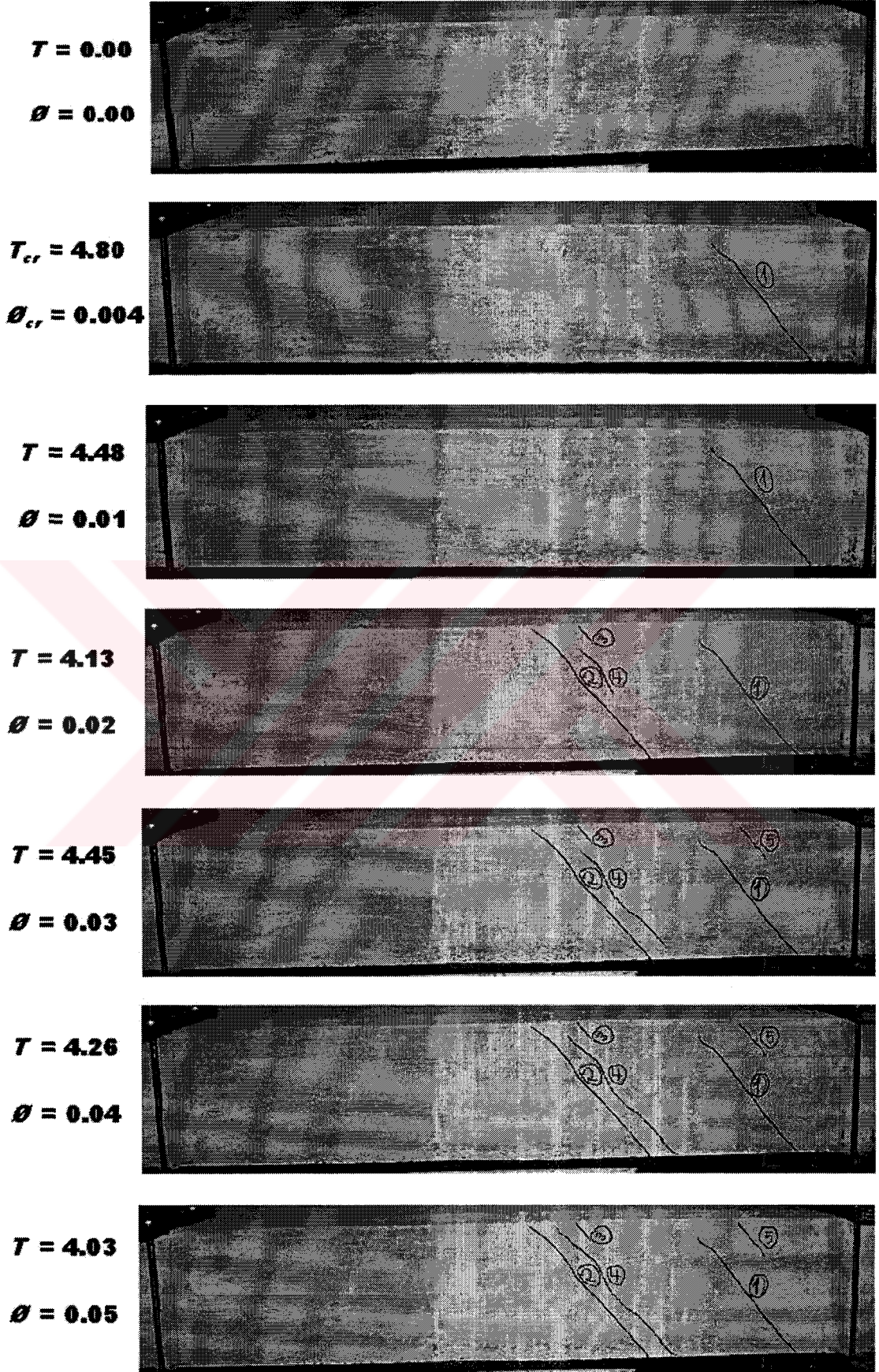


$T = 3.55$

$\theta = 0.12$



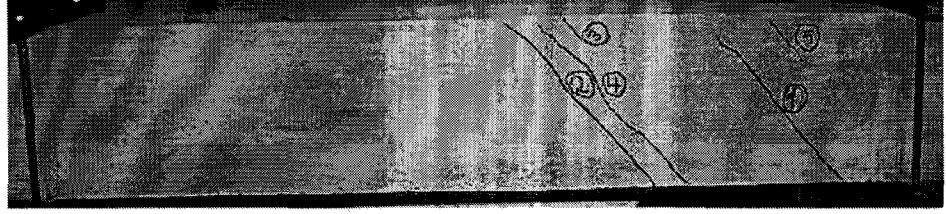
Şekil B.7. C1L1F3V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı)



Şekil B.8. C1L1F4V1 numunesi çatlak dağılımı

$T = 3.74$

$\theta = 0.06$



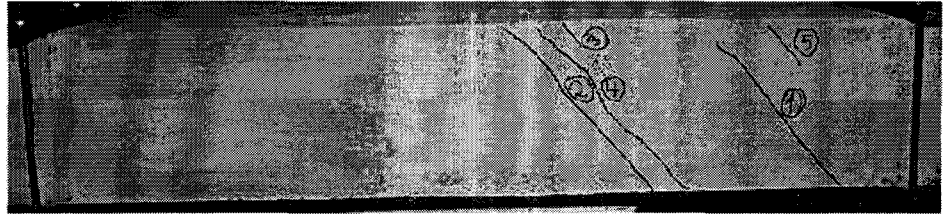
$T = 3.59$

$\theta = 0.07$



$T = 3.43$

$\theta = 0.08$



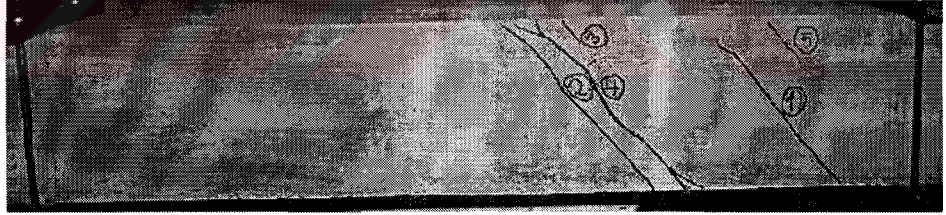
$T = 3.39$

$\theta = 0.09$



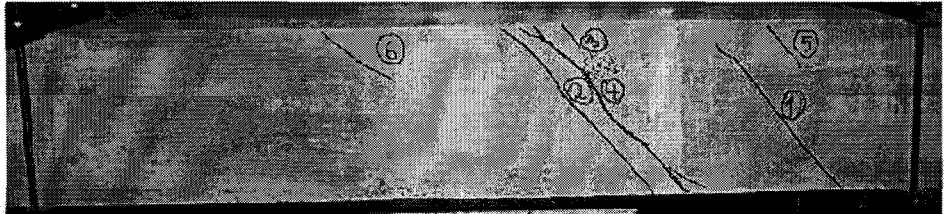
$T = 3.28$

$\theta = 0.10$



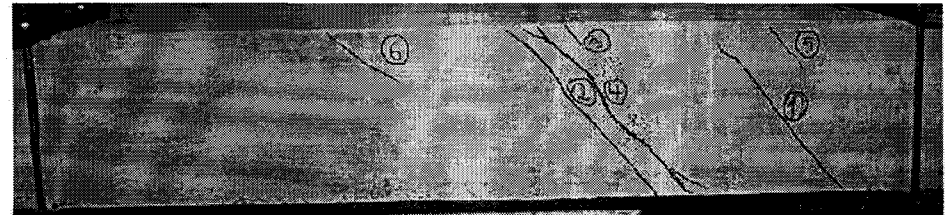
$T = 3.25$

$\theta = 0.11$



$T = 3.05$

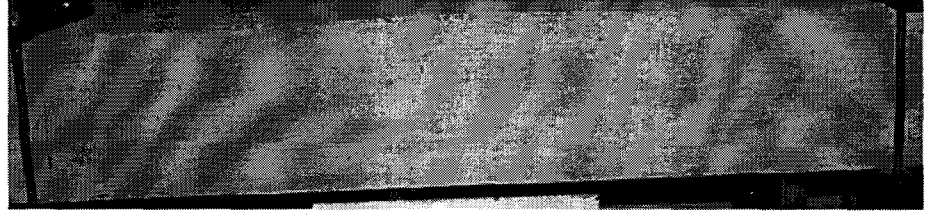
$\theta = 0.12$



Şekil B.8. C1L1F4V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

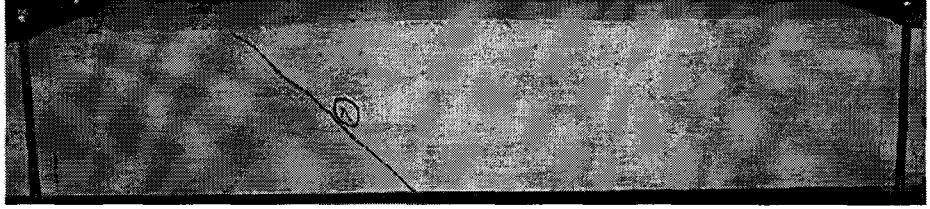
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



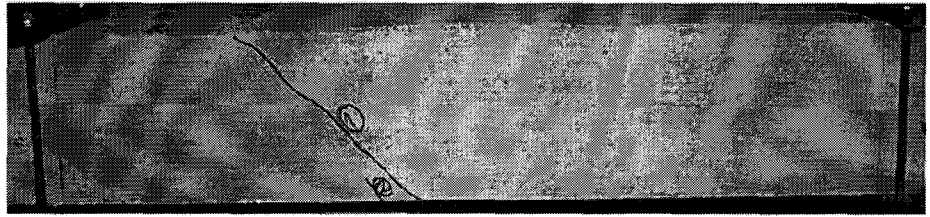
$T_{cr} = 4.51$

$\theta_{cr} = 0.004$



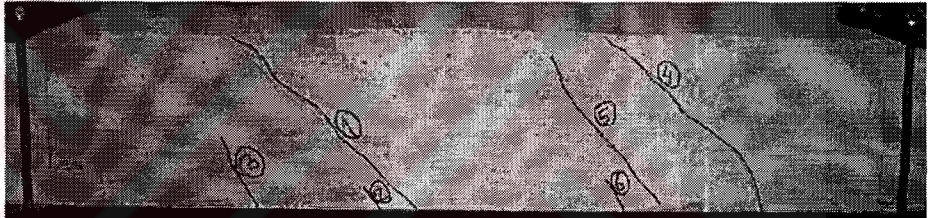
$T = 4.22$

$\theta = 0.01$



$T = 4.53$

$\theta = 0.02$



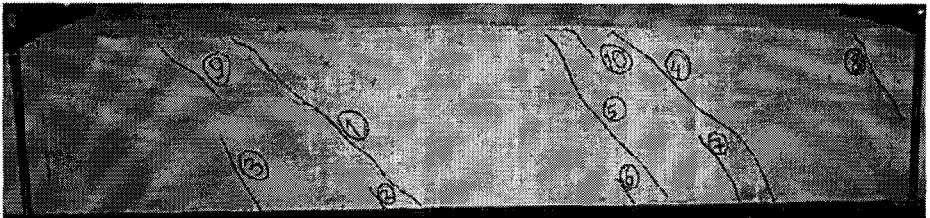
$T = 4.98$

$\theta = 0.03$



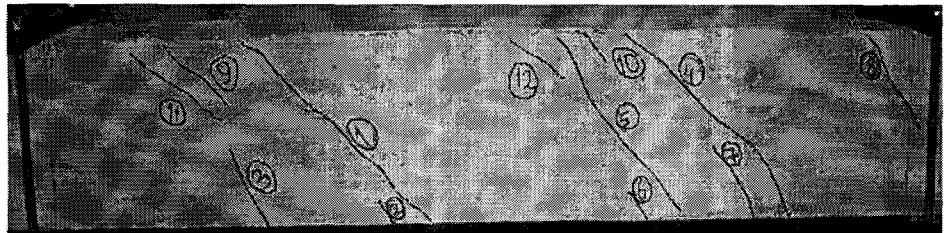
$T = 5.40$

$\theta = 0.04$



$T = 5.45$

$\theta = 0.05$



Şekil B.9. C1L1F4V2 numunesi çatlak dağılımı

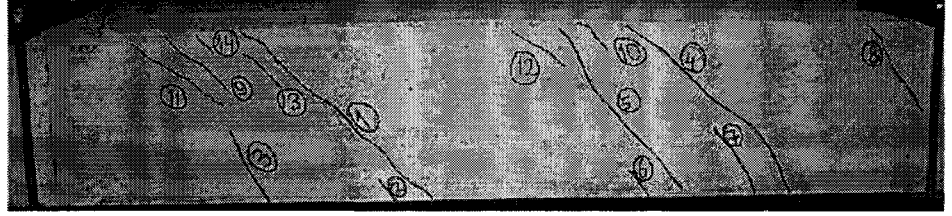
$T = 5.43$

$\theta = 0.06$



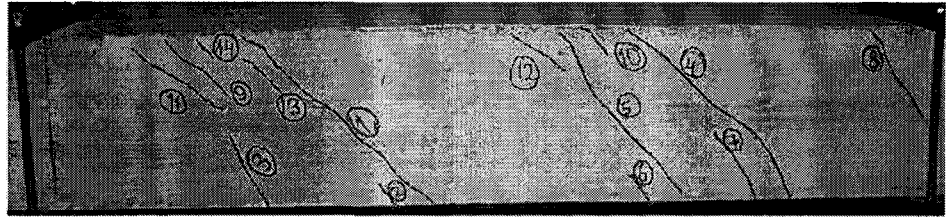
$T = 5.47$

$\theta = 0.07$



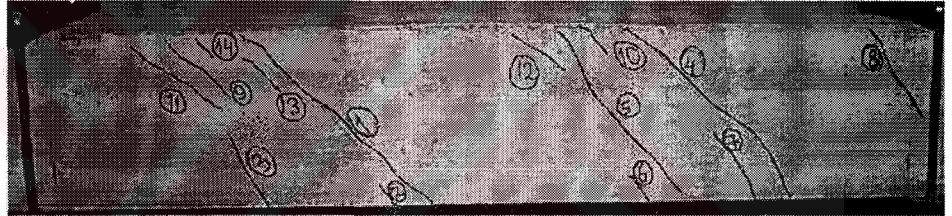
$T = 5.43$

$\theta = 0.08$



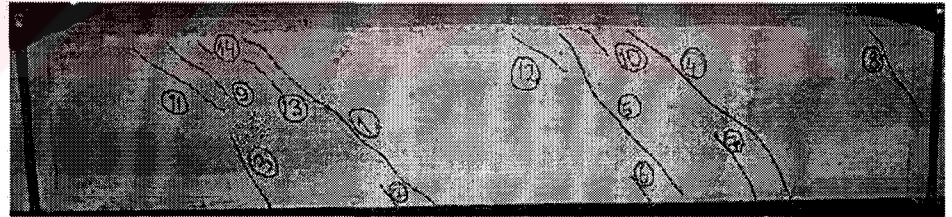
$T = 5.23$

$\theta = 0.09$



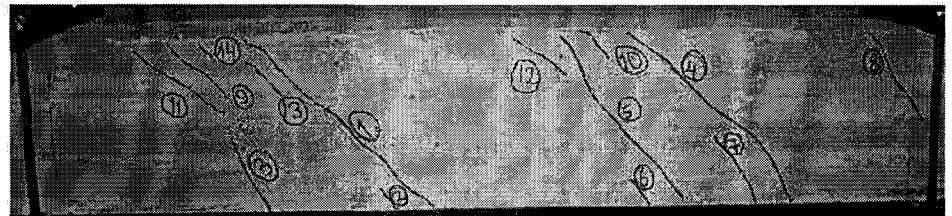
$T = 5.07$

$\theta = 0.10$



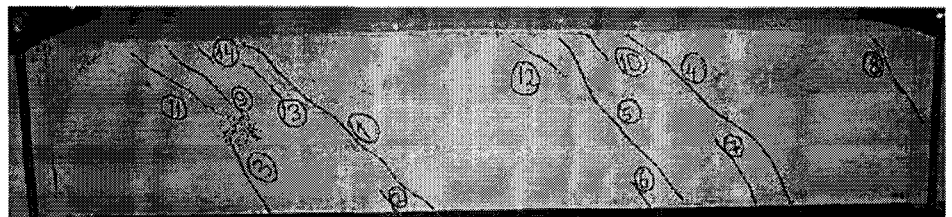
$T = 4.37$

$\theta = 0.11$



$T = 3.86$

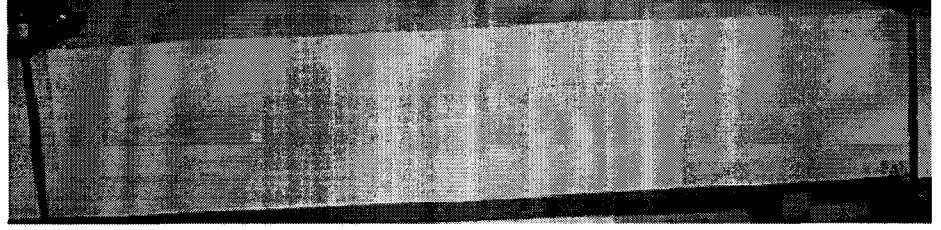
$\theta = 0.12$



Şekil B.9. C1L1F4V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

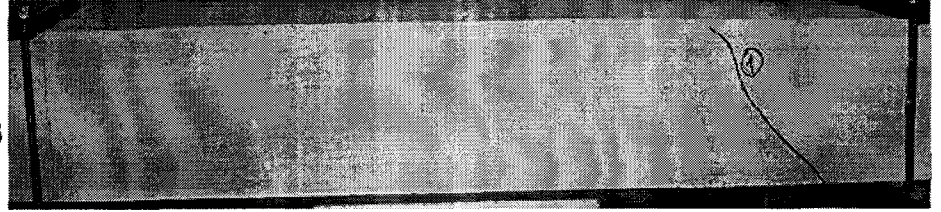
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



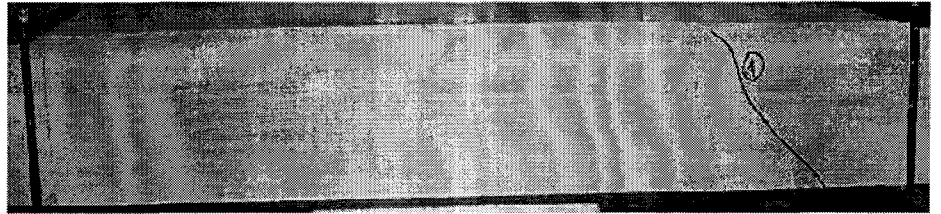
$T_{cr} = 4.45$

$\theta_{cr} = 0.005$



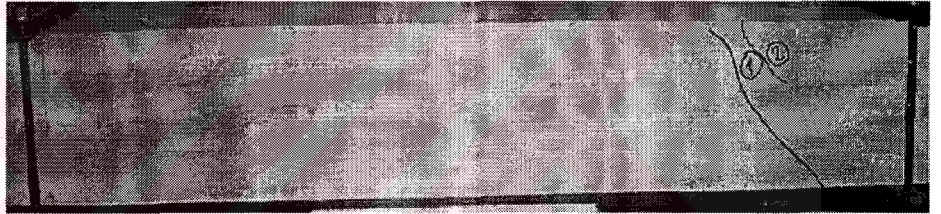
$T = 4.15$

$\theta = 0.01$



$T = 4.53$

$\theta = 0.02$



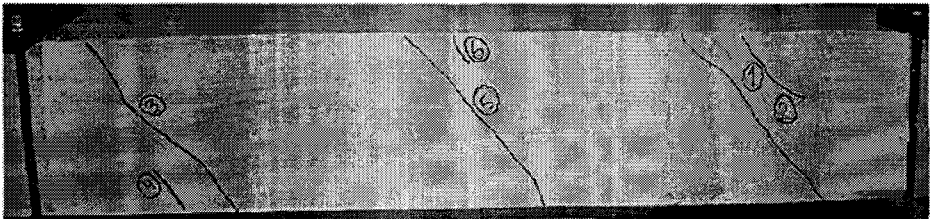
$T = 4.90$

$\theta = 0.03$



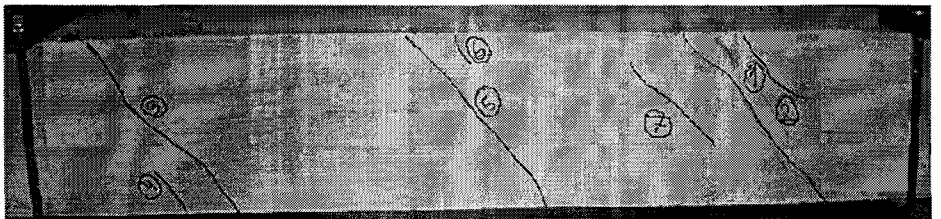
$T = 4.37$

$\theta = 0.04$

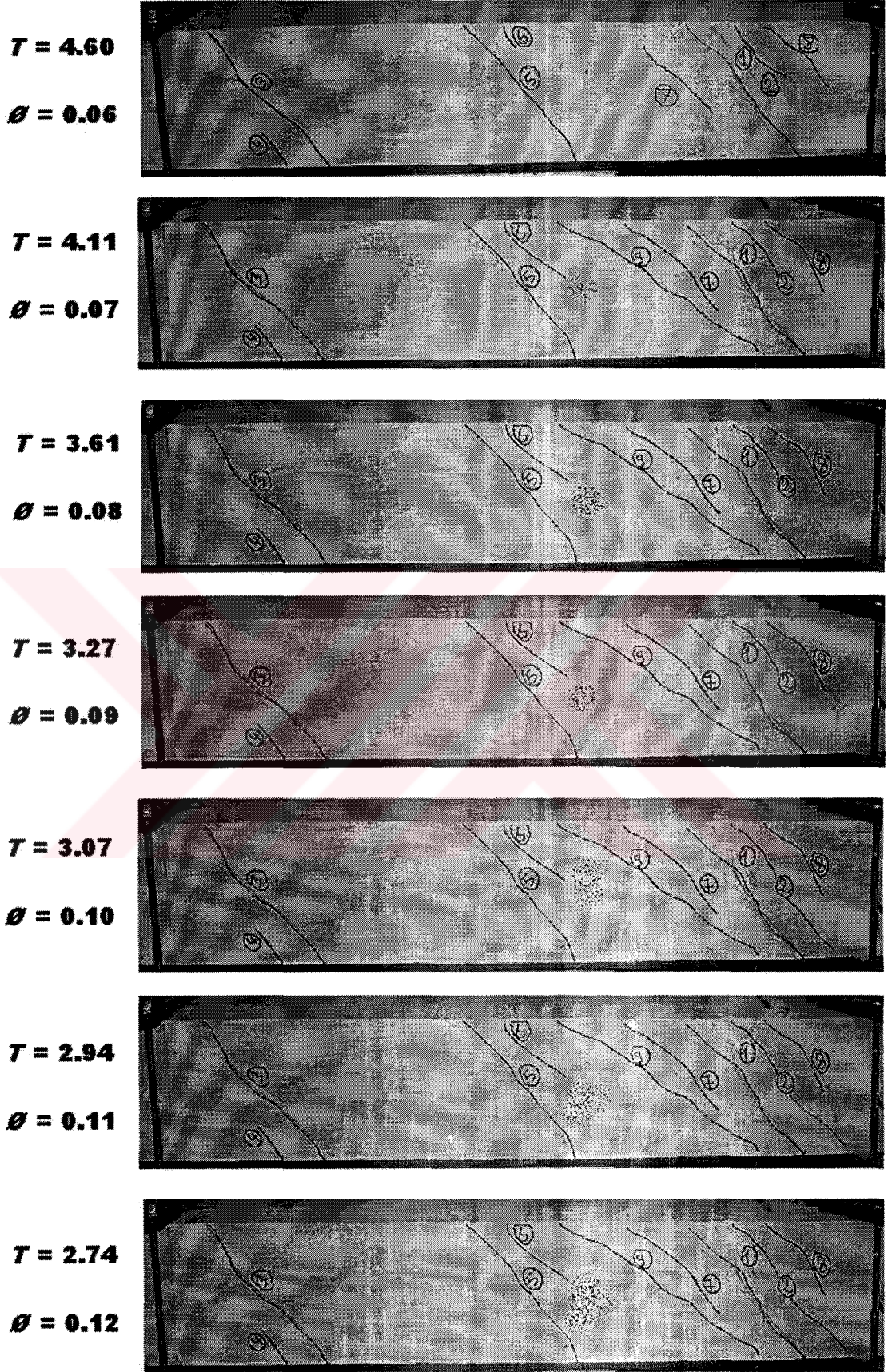


$T = 4.76$

$\theta = 0.05$



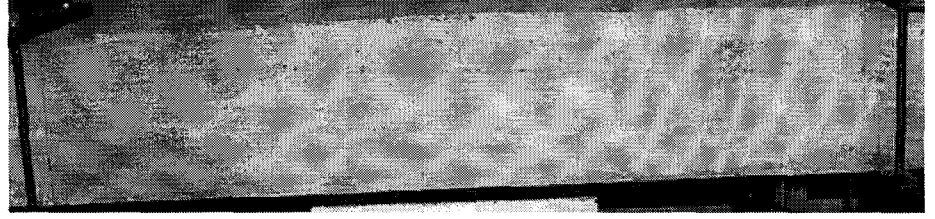
Şekil B.10. C1L2V0 numunesi çatlak dağılımı



Şekil B.10. C1L2V0 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

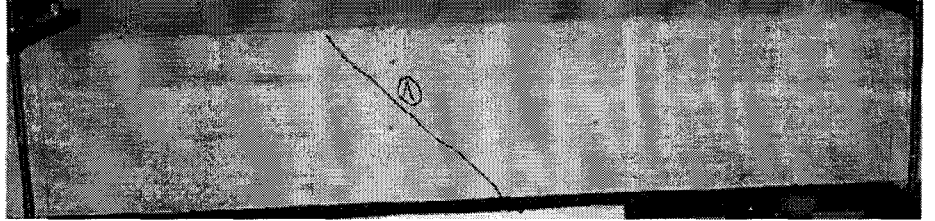
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



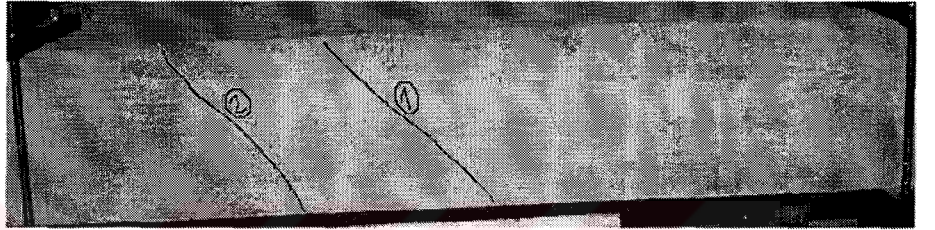
$T_{cr} = 4.53$

$\theta_{cr} = 0.004$



$T = 4.22$

$\theta = 0.01$



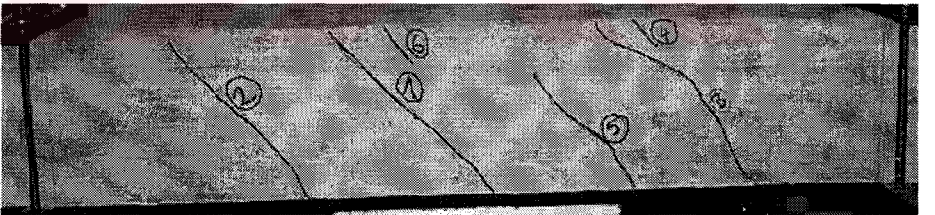
$T = 4.21$

$\theta = 0.02$



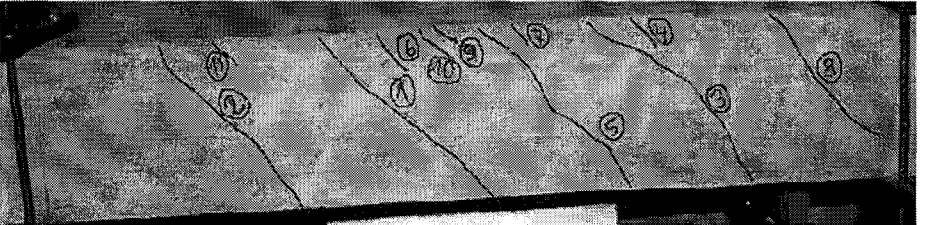
$T = 5.11$

$\theta = 0.03$



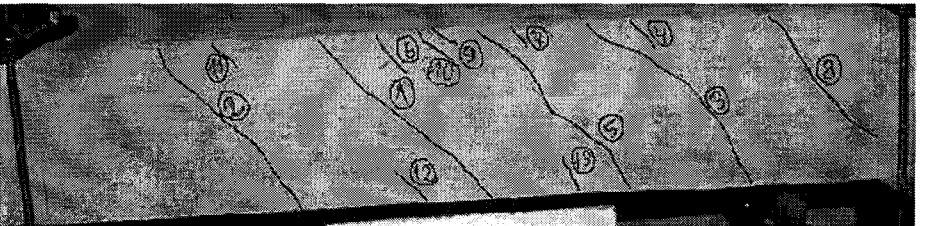
$T = 5.30$

$\theta = 0.04$



$T = 5.65$

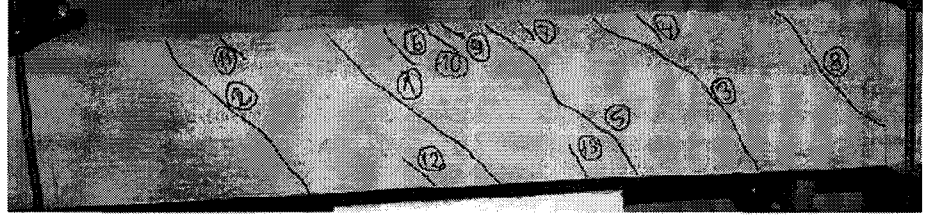
$\theta = 0.05$



Şekil B.11. C1L2F1V1 numunesi çatlak dağılımı

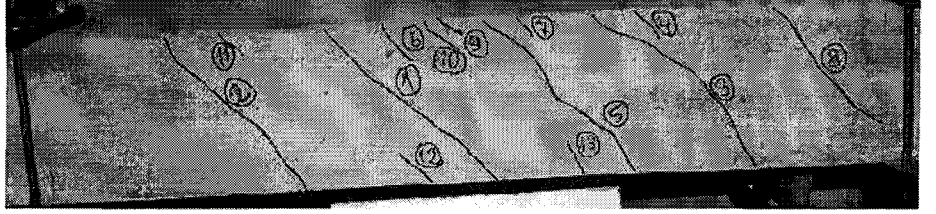
$T = 5.71$

$\theta = 0.06$



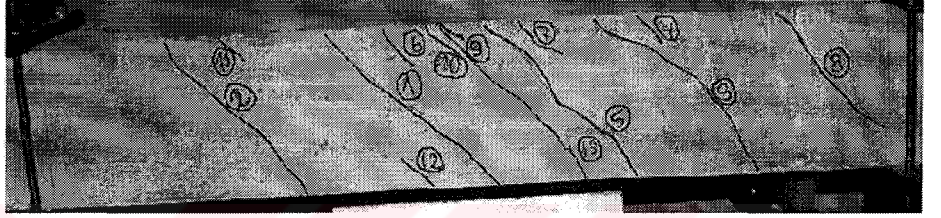
$T = 5.77$

$\theta = 0.07$



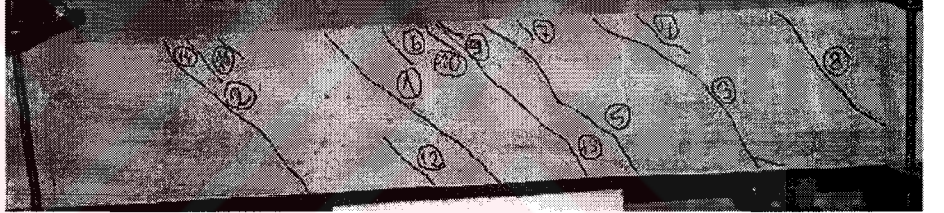
$T = 6.01$

$\theta = 0.08$



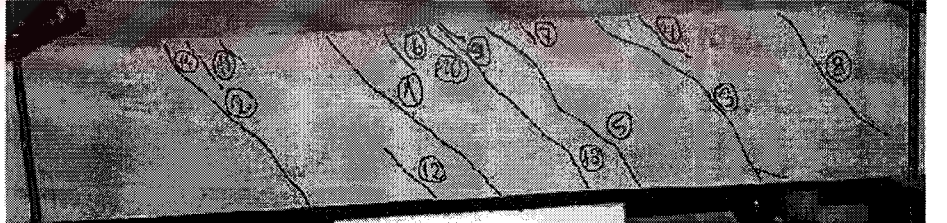
$T = 5.83$

$\theta = 0.09$



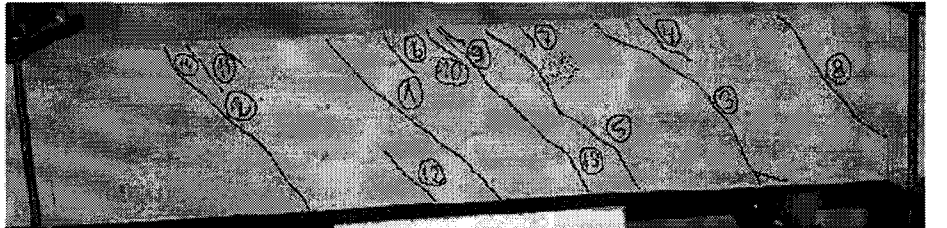
$T = 5.59$

$\theta = 0.10$



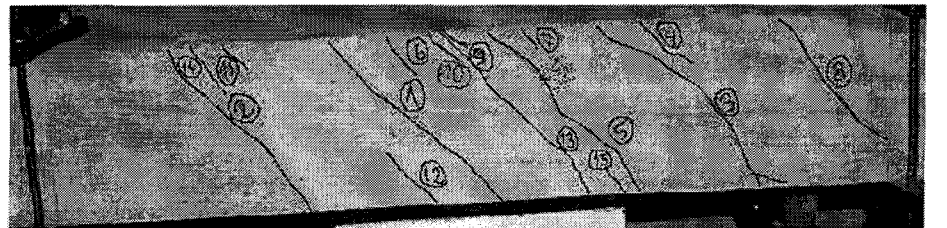
$T = 5.35$

$\theta = 0.11$



$T = 4.69$

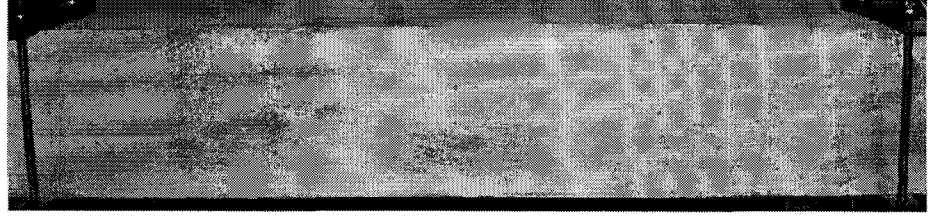
$\theta = 0.12$



Şekil B.11. C1L2F1V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

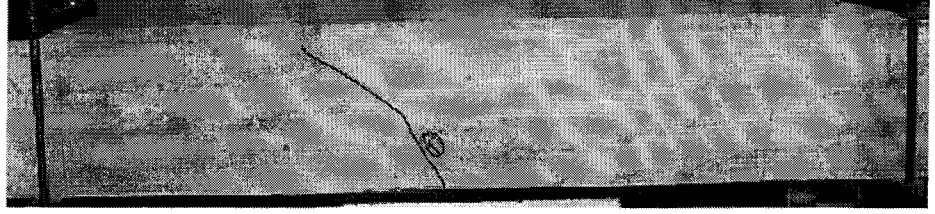
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



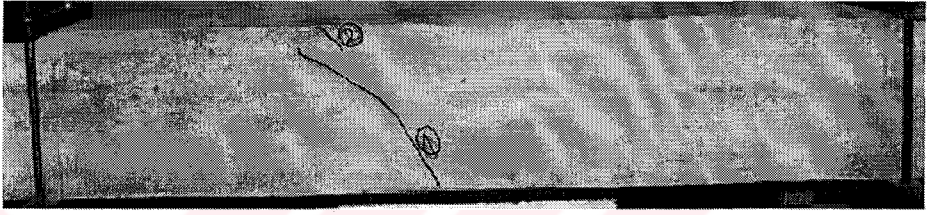
$T_{cr} = 4.17$

$\theta_{cr} = 0.004$



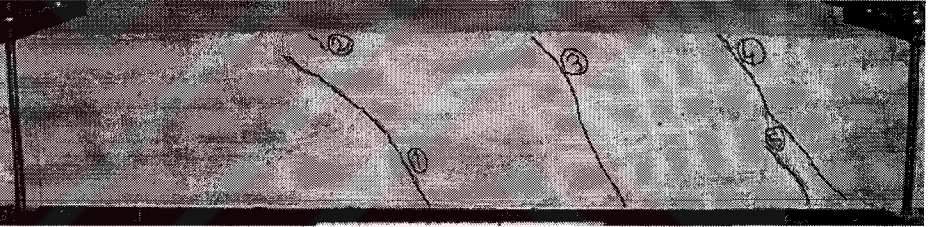
$T = 4.20$

$\theta = 0.01$



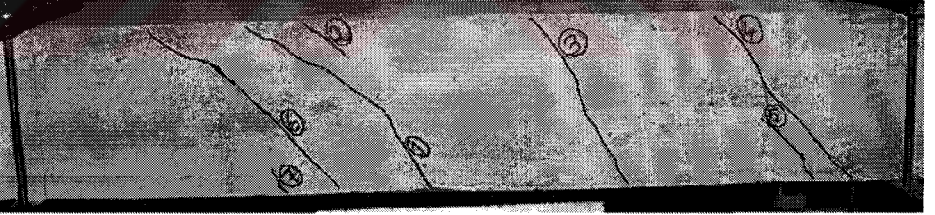
$T = 4.60$

$\theta = 0.02$



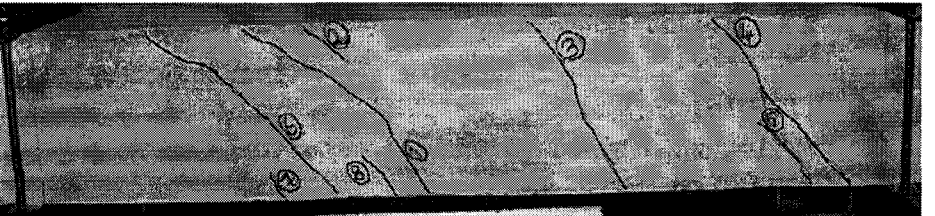
$T = 4.92$

$\theta = 0.03$



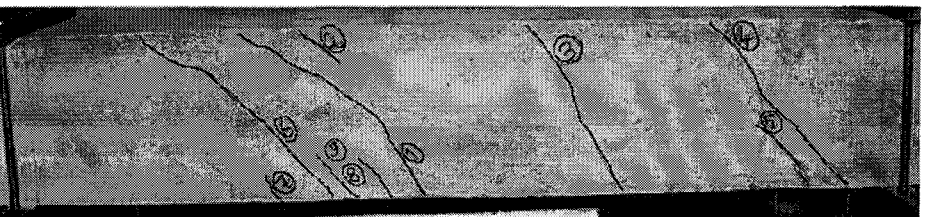
$T = 5.34$

$\theta = 0.04$



$T = 5.57$

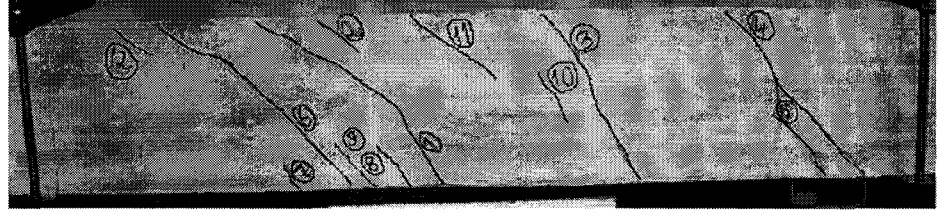
$\theta = 0.05$



Şekil B.12. C1L2F4V1 numunesi çatlak dağılımı

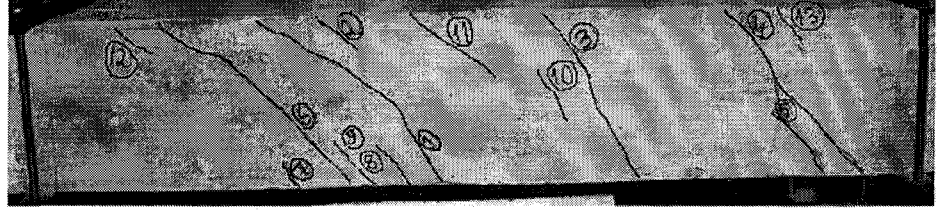
$T = 5.70$

$\theta = 0.06$



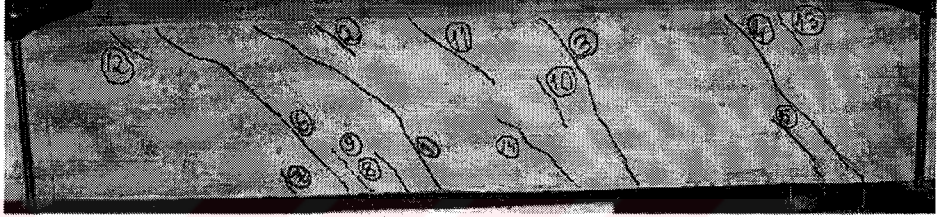
$T = 5.74$

$\theta = 0.07$



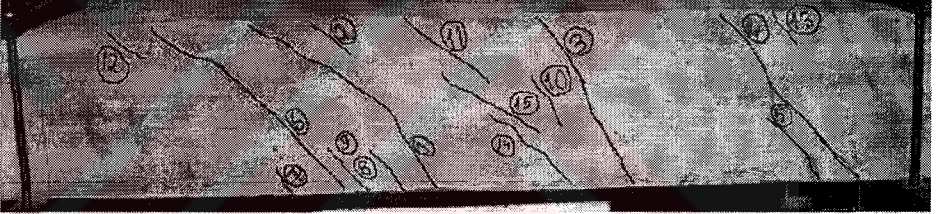
$T = 5.90$

$\theta = 0.08$



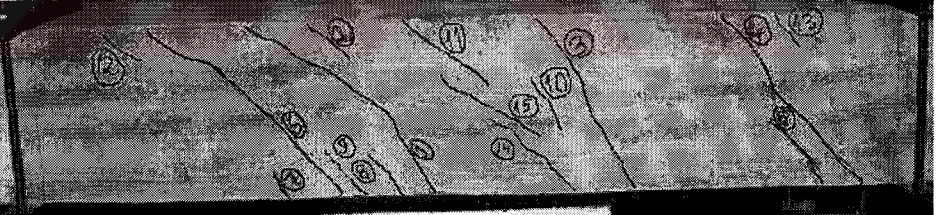
$T = 5.95$

$\theta = 0.09$



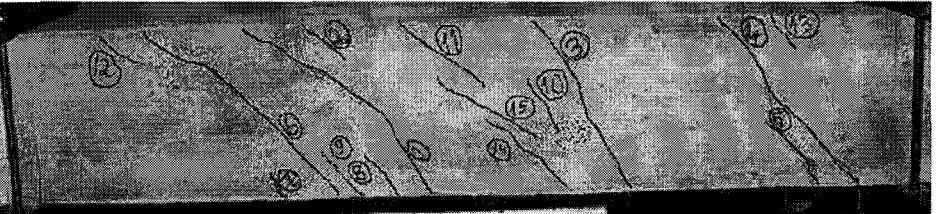
$T = 5.84$

$\theta = 0.10$



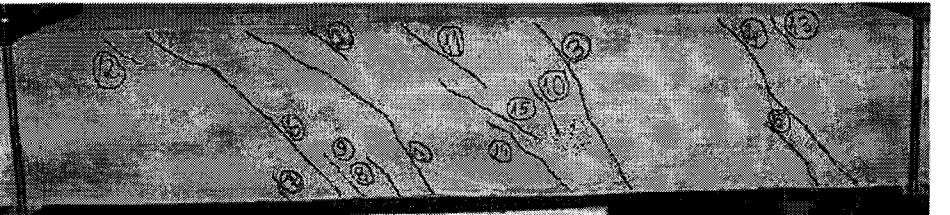
$T = 5.72$

$\theta = 0.11$



$T = 5.61$

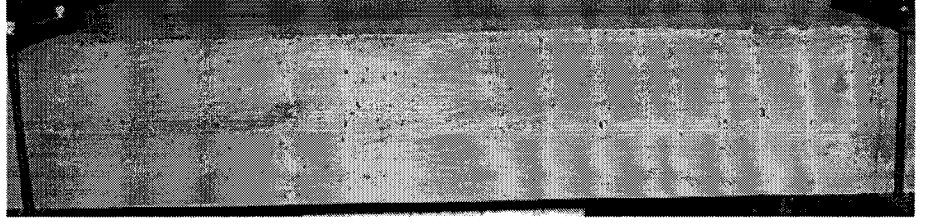
$\theta = 0.12$



Şekil B.12. C1L2F4V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

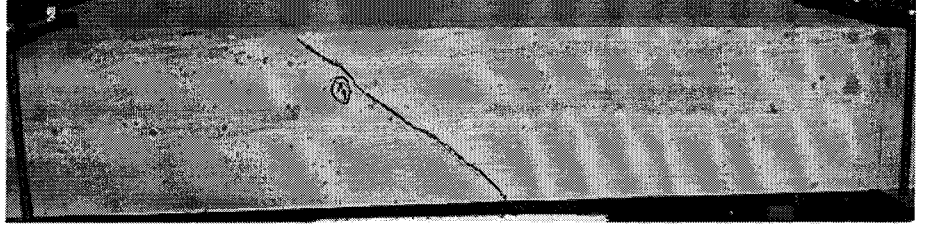
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



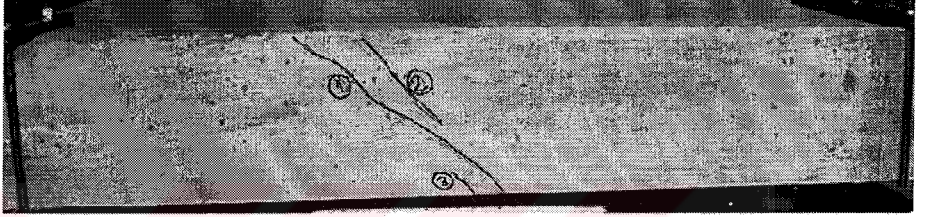
$T_{cr} = 4.51$

$\theta_{cr} = 0.004$



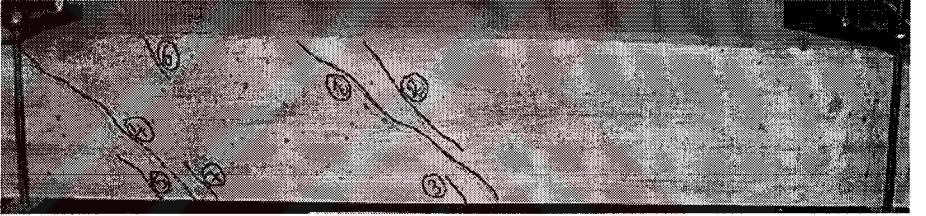
$T = 4.33$

$\theta = 0.01$



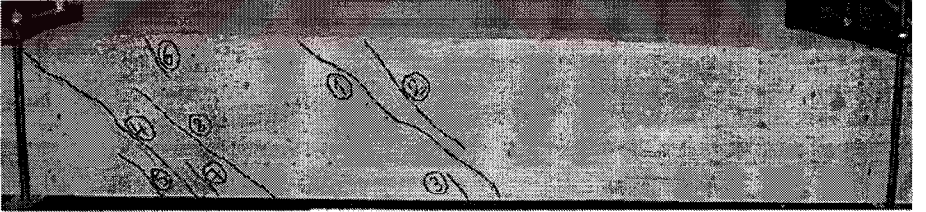
$T = 4.33$

$\theta = 0.02$



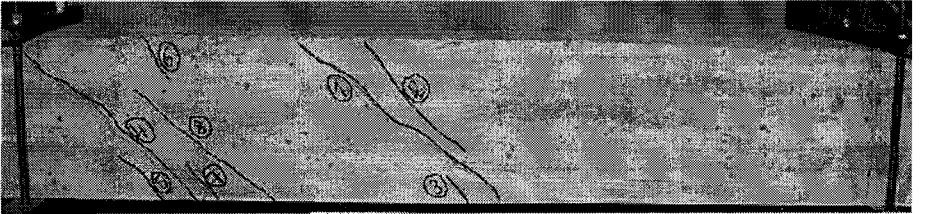
$T = 4.09$

$\theta = 0.03$



$T = 2.84$

$\theta = 0.04$



$T = 2.40$

$\theta = 0.05$



Şekil B.13. C2L1V0 numunesi çatlak dağılımı

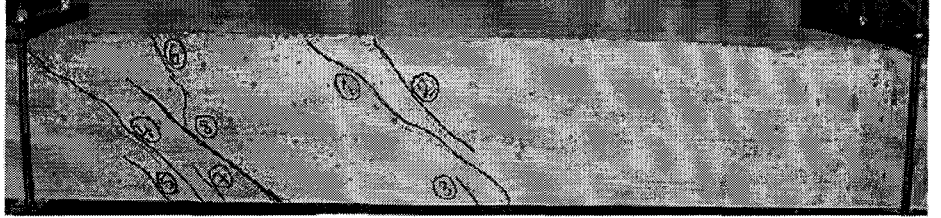
$T = 1.98$

$\theta = 0.06$



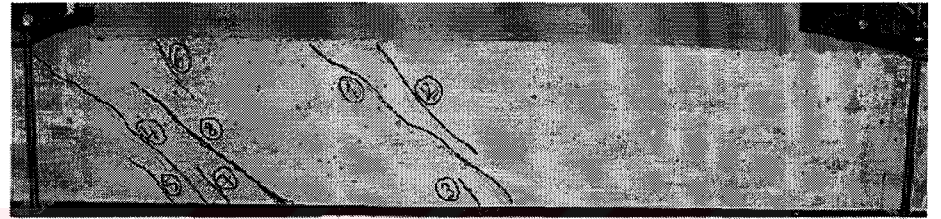
$T = 1.98$

$\theta = 0.07$



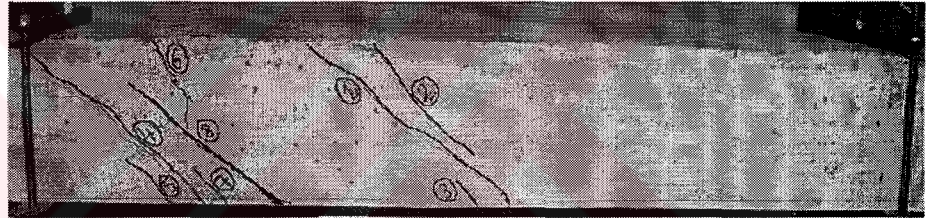
$T = 2.10$

$\theta = 0.08$



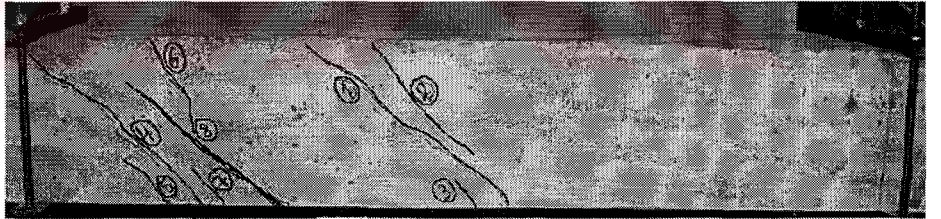
$T = 2.28$

$\theta = 0.09$



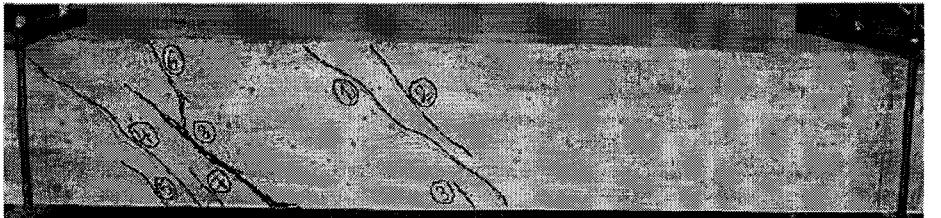
$T = 2.40$

$\theta = 0.10$



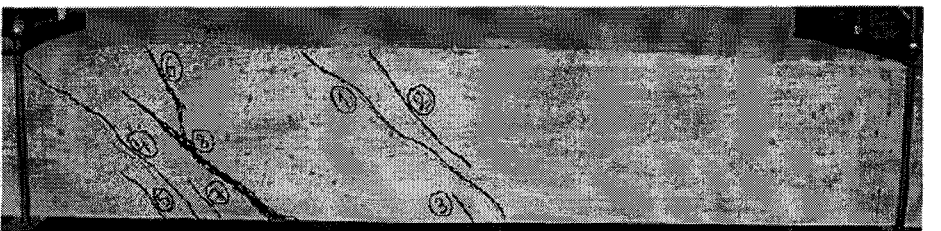
$T = 2.04$

$\theta = 0.11$



$T = 1.98$

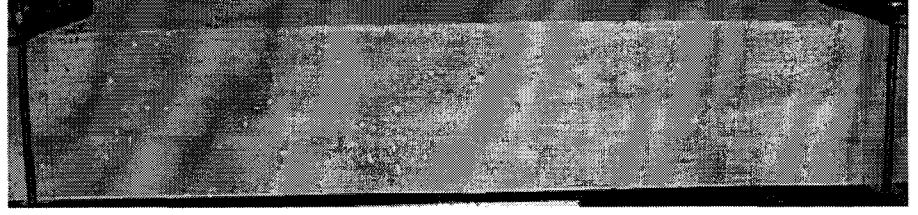
$\theta = 0.12$



Şekil B.13. C2LIV0 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

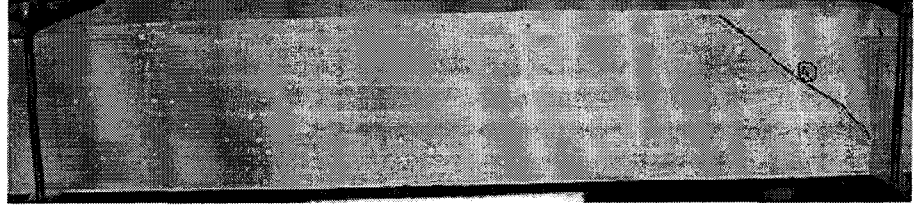
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



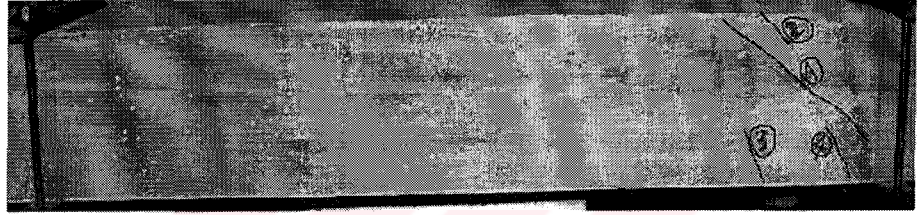
$T_{cr} = 5.23$

$\theta_{cr} = 0.003$



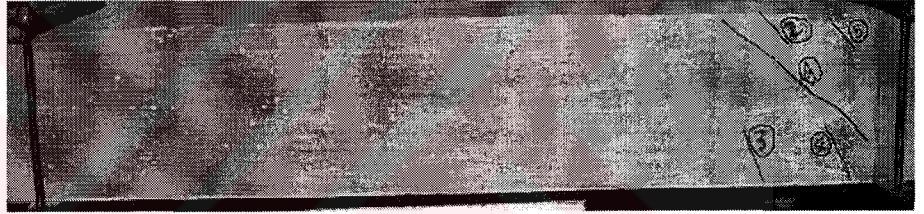
$T = 3.96$

$\theta = 0.01$



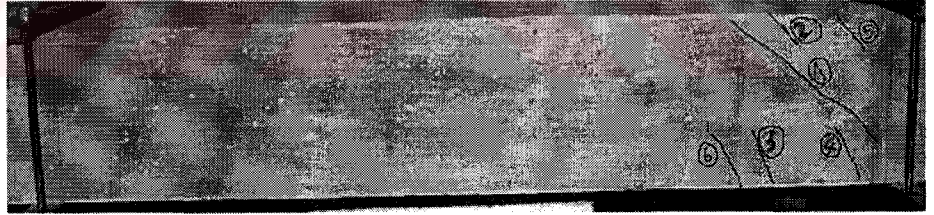
$T = 4.75$

$\theta = 0.02$



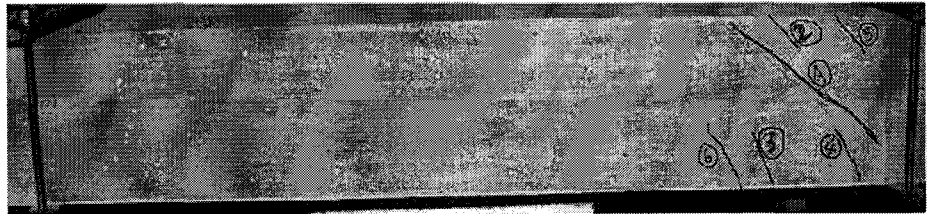
$T = 4.45$

$\theta = 0.03$



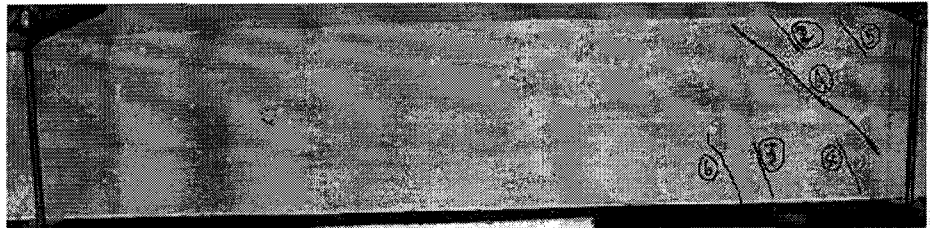
$T = 3.42$

$\theta = 0.04$



$T = 2.82$

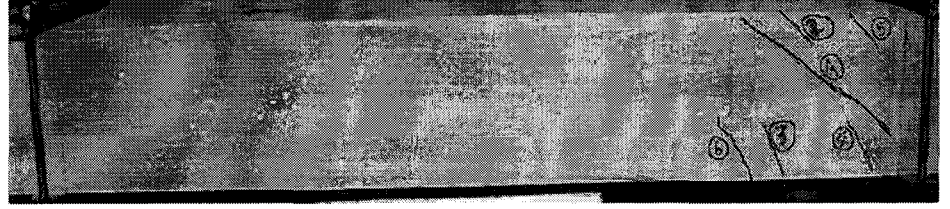
$\theta = 0.05$



Şekil B.14. C2L1F1V1 numunesi çatlak dağılımı

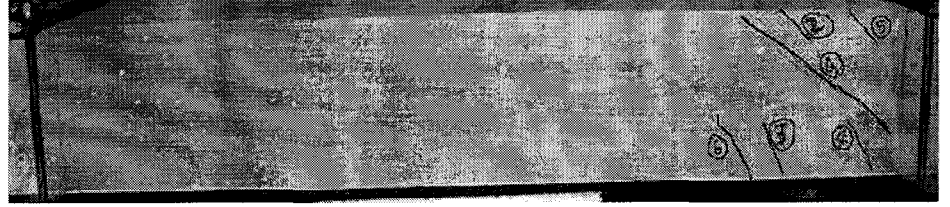
$T = 2.70$

$\theta = 0.06$



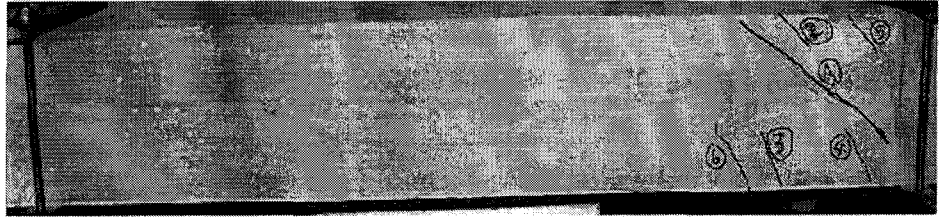
$T = 2.34$

$\theta = 0.07$



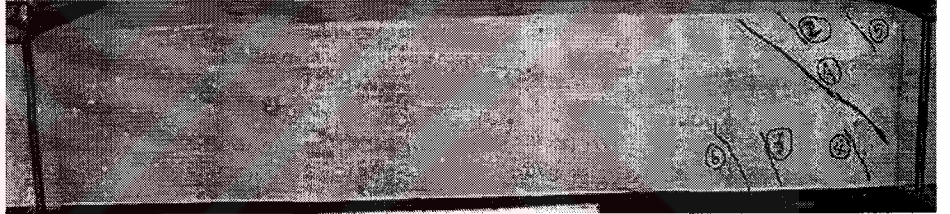
$T = 2.16$

$\theta = 0.08$



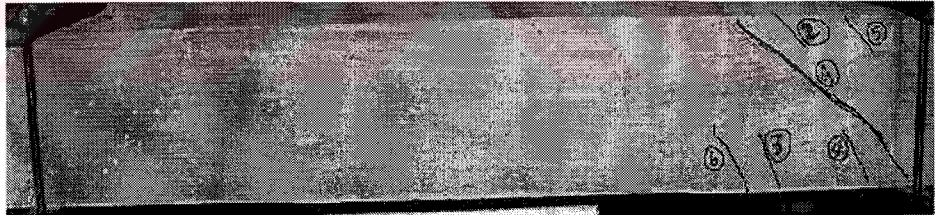
$T = 2.24$

$\theta = 0.09$



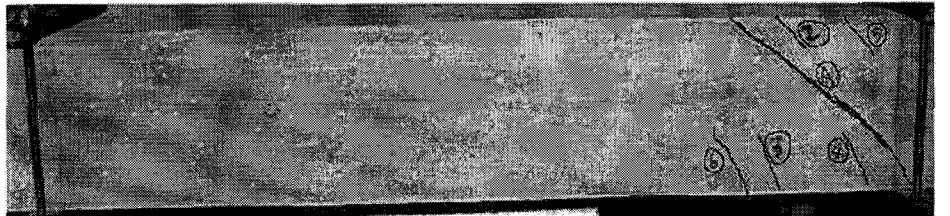
$T = 2.22$

$\theta = 0.10$



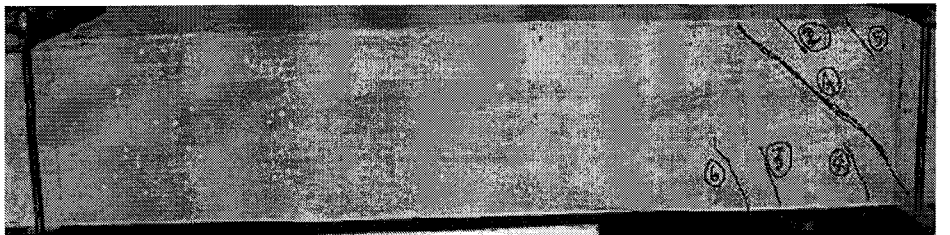
$T = 2.22$

$\theta = 0.11$



$T = 2.28$

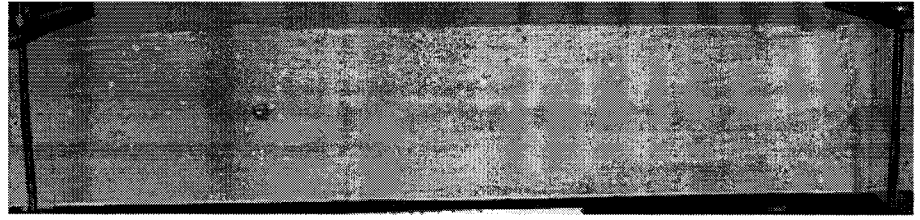
$\theta = 0.12$



Şekil B.14. C2L1F1V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

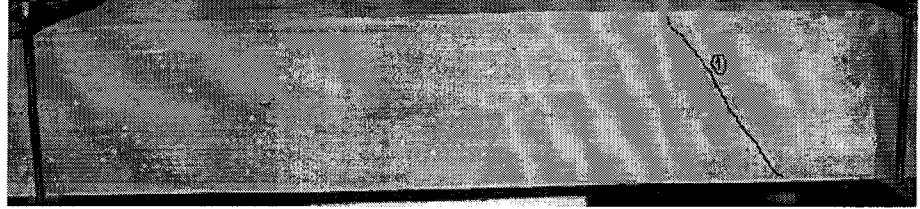
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



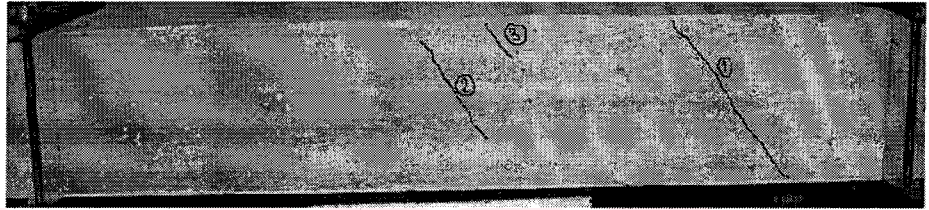
$T_{cr} = 6.22$

$\theta_{cr} = 0.003$



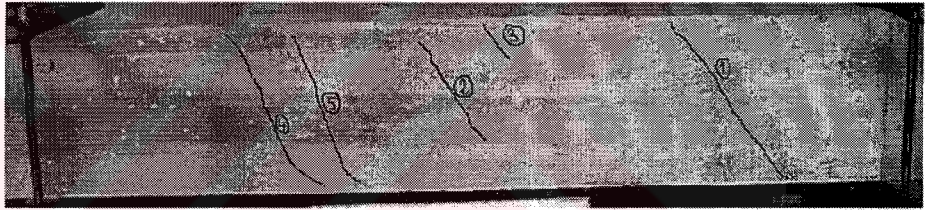
$T = 6.01$

$\theta = 0.01$



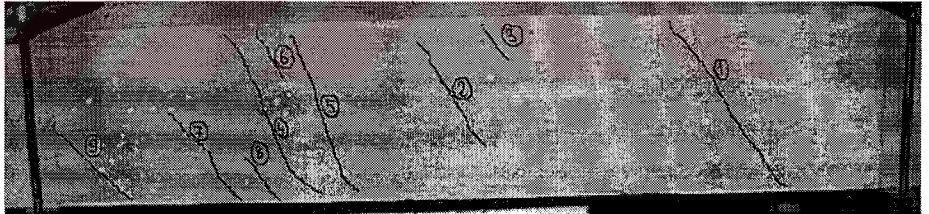
$T = 6.30$

$\theta = 0.02$



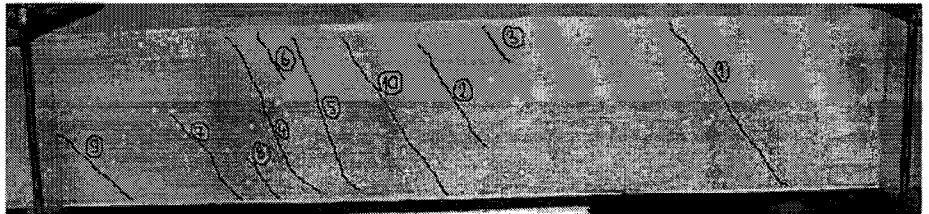
$T = 6.38$

$\theta = 0.03$



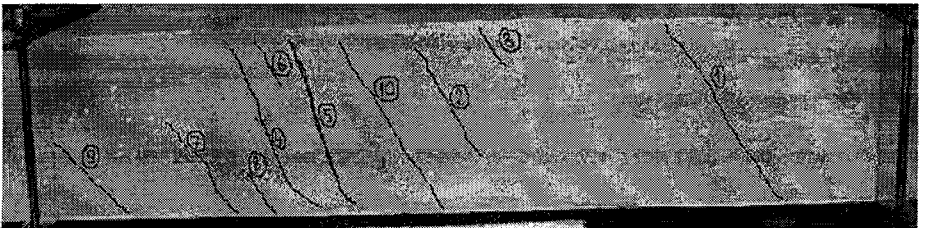
$T = 6.27$

$\theta = 0.04$



$T = 4.83$

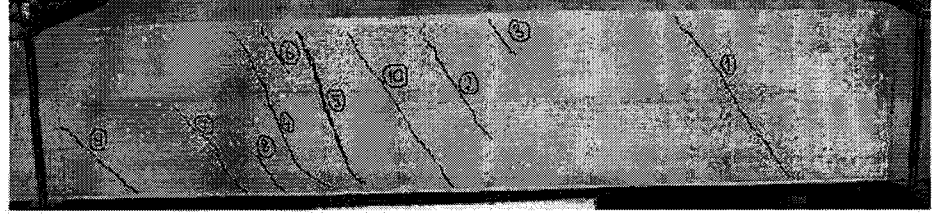
$\theta = 0.05$



Şekil B.15. C2L1F1V2 numunesi çatlak dağılımı

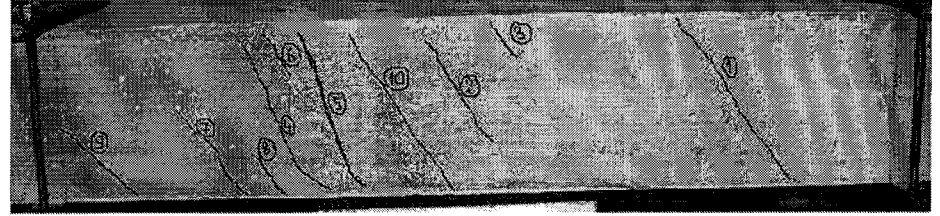
$T = 3.31$

$\theta = 0.06$



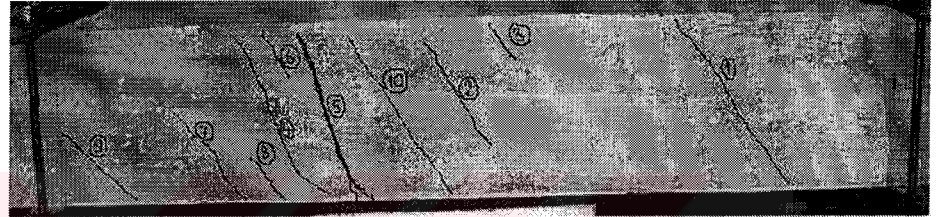
$T = 2.91$

$\theta = 0.07$



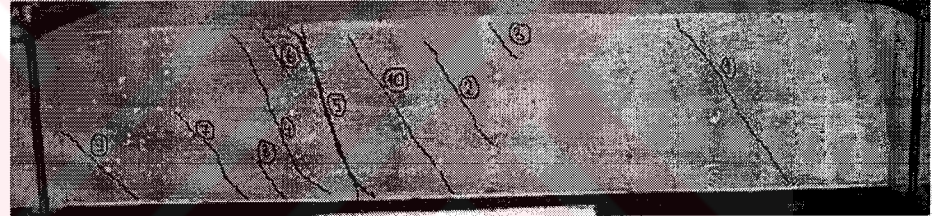
$T = 2.51$

$\theta = 0.08$



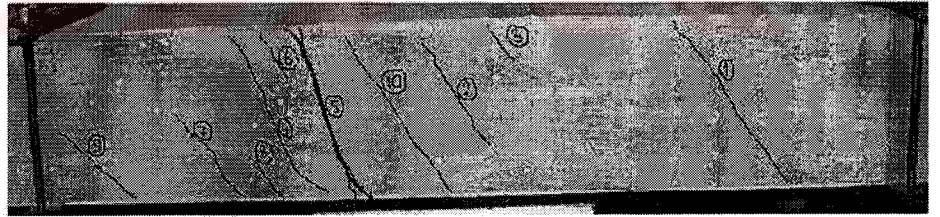
$T = 2.51$

$\theta = 0.09$



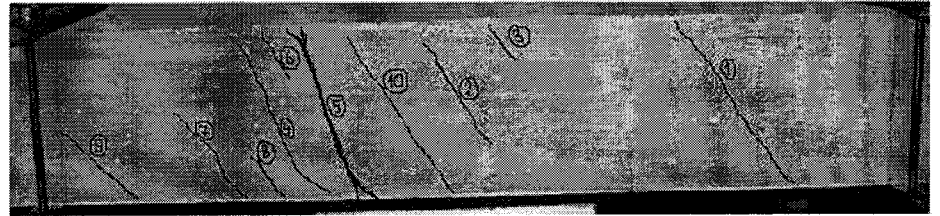
$T = 2.43$

$\theta = 0.10$



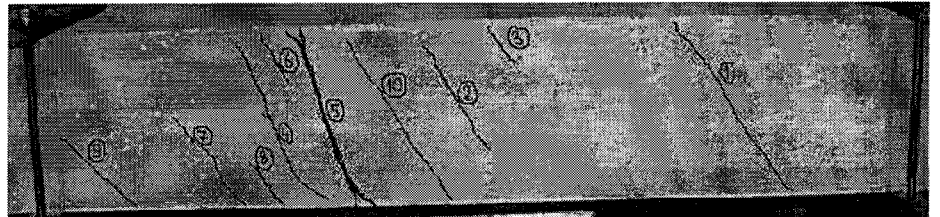
$T = 2.43$

$\theta = 0.11$



$T = 2.22$

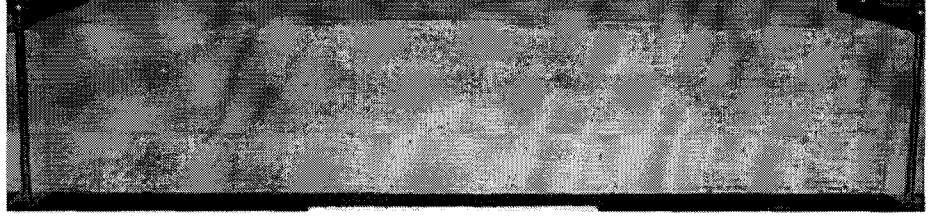
$\theta = 0.12$



Şekil B.15. C2L1F1V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

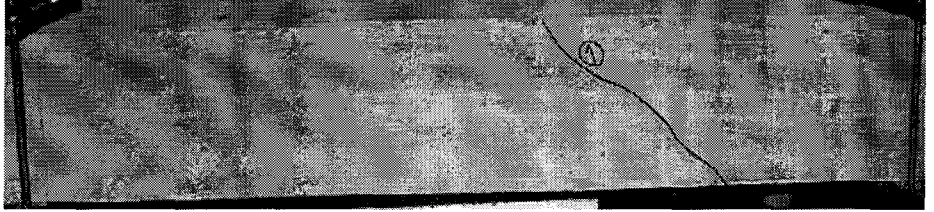
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



$T_{cr} = 5.05$

$\theta_{cr} = 0.004$



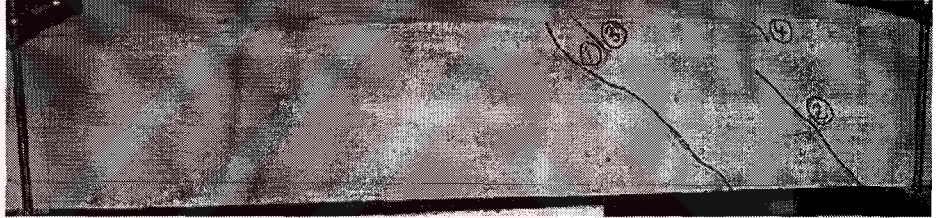
$T = 4.39$

$\theta = 0.01$



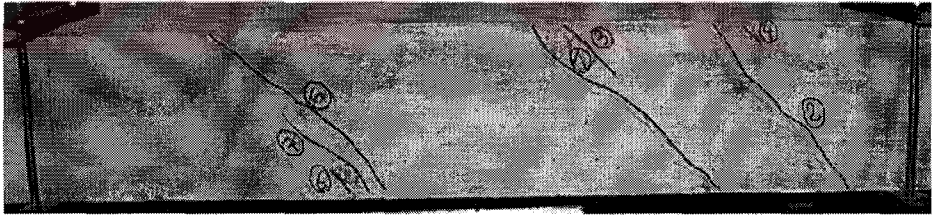
$T = 4.93$

$\theta = 0.02$



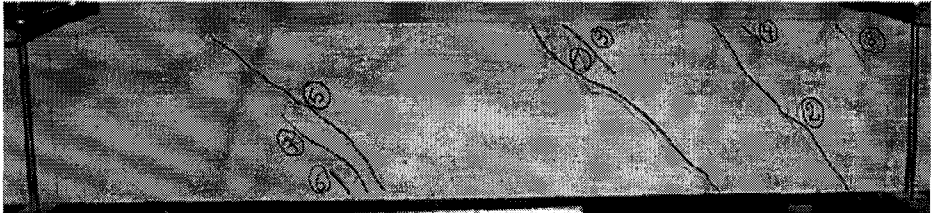
$T = 5.29$

$\theta = 0.03$



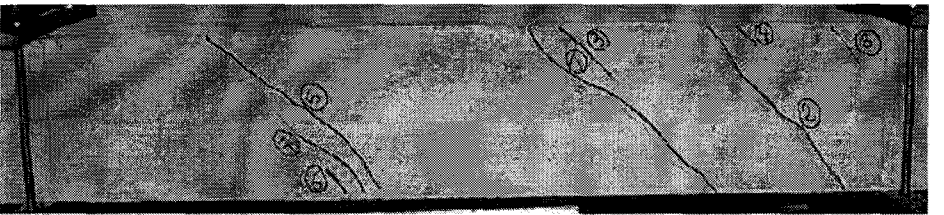
$T = 5.59$

$\theta = 0.04$



$T = 5.65$

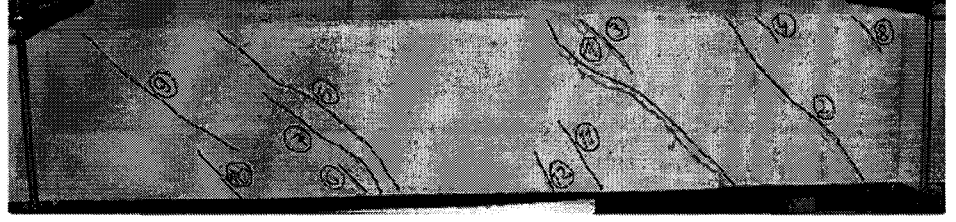
$\theta = 0.05$



Şekil B.16. C2L1F2V1 numunesi çatlak dağılımı

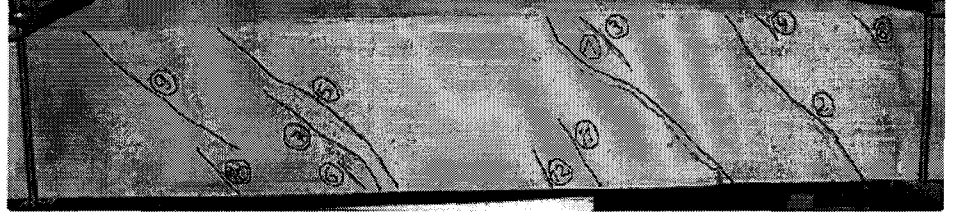
$T = 5.41$

$\theta = 0.06$



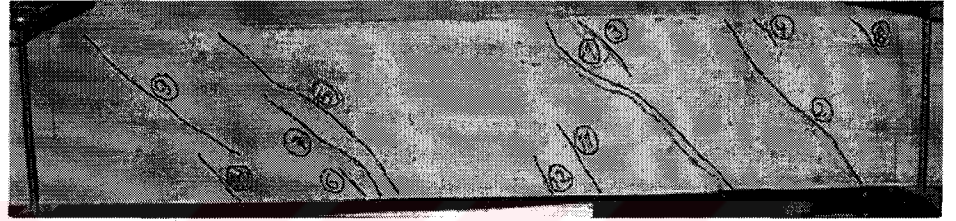
$T = 4.99$

$\theta = 0.07$



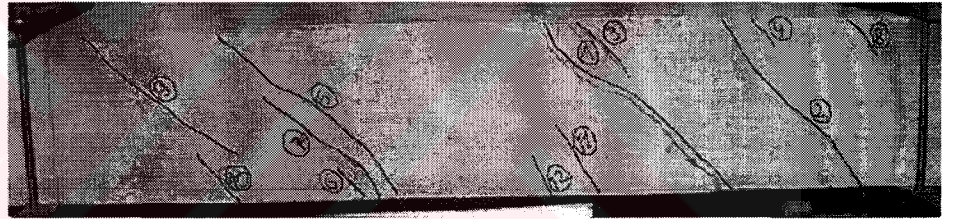
$T = 4.39$

$\theta = 0.08$



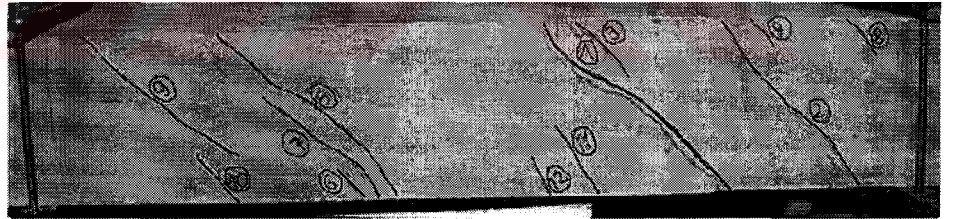
$T = 3.66$

$\theta = 0.09$



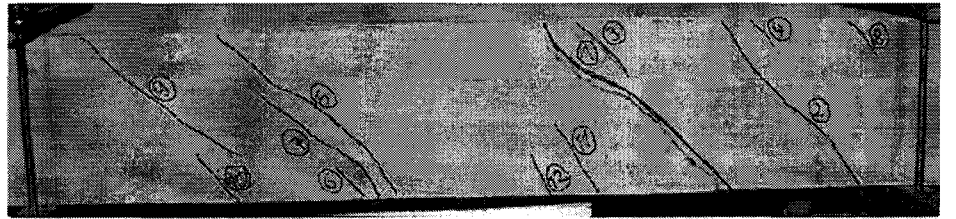
$T = 3.42$

$\theta = 0.10$



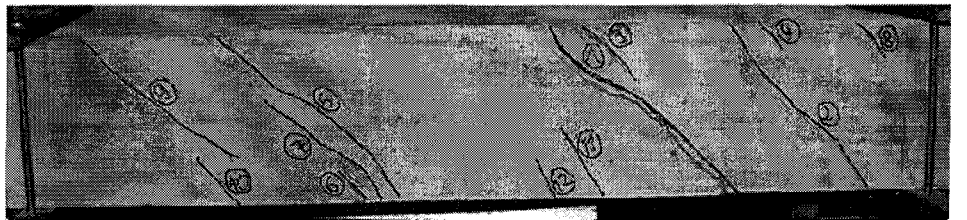
$T = 3.19$

$\theta = 0.11$



$T = 3.00$

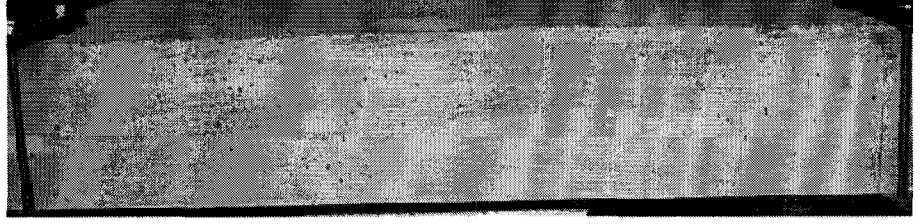
$\theta = 0.12$



Şekil B.16. C2L1F2V1 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

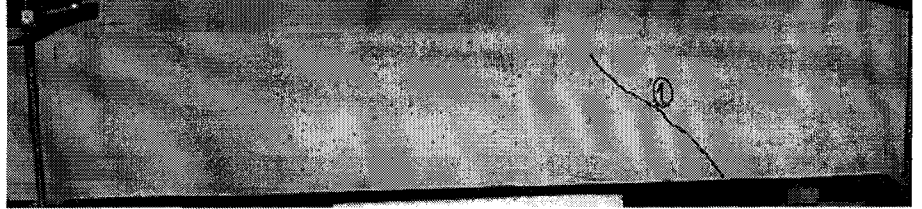
$T = 0.00$

$\theta = 0.00$



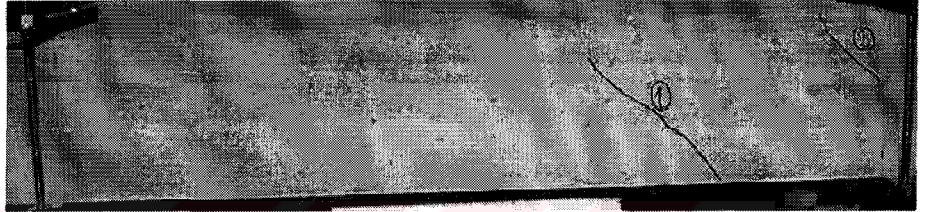
$T_{cr} = 5.95$

$\theta_{cr} = 0.004$



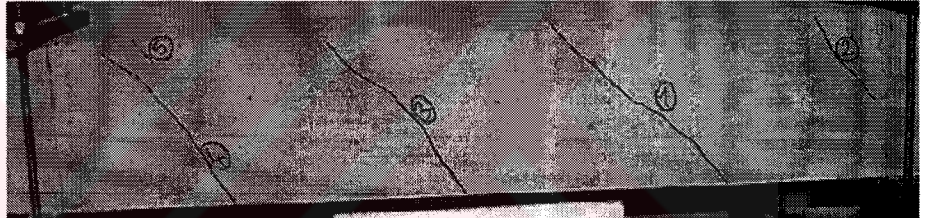
$T = 5.71$

$\theta = 0.01$



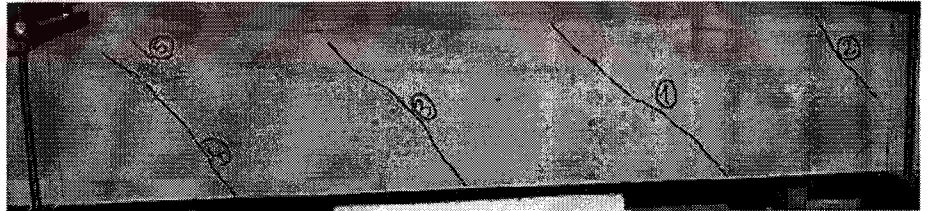
$T = 6.31$

$\theta = 0.02$



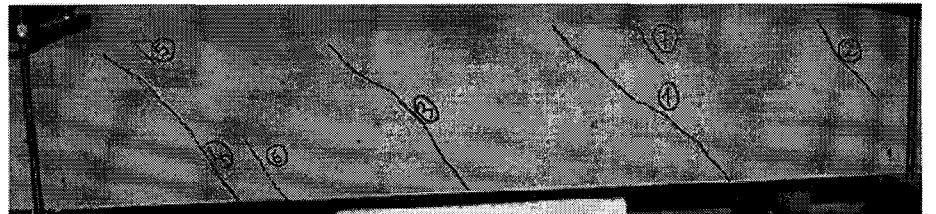
$T = 6.61$

$\theta = 0.03$



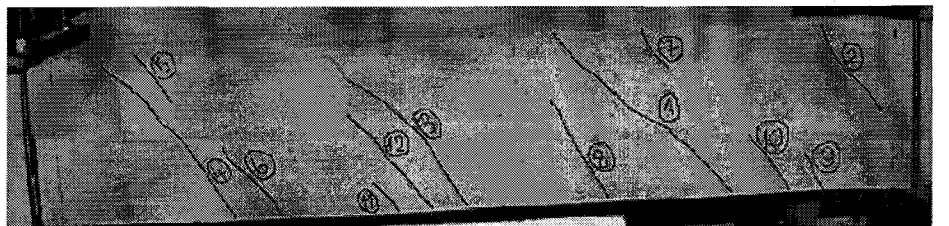
$T = 7.22$

$\theta = 0.04$



$T = 7.40$

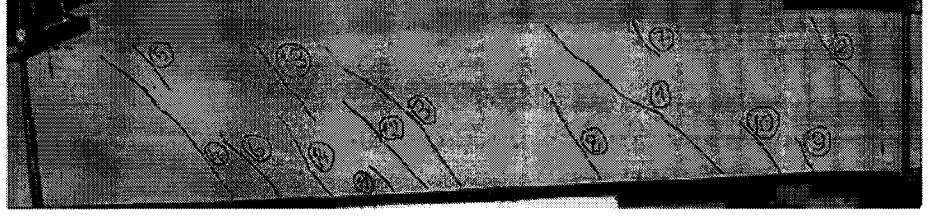
$\theta = 0.05$



Şekil B.17. C2L1F2V2 numunesi çatlak dağılımı

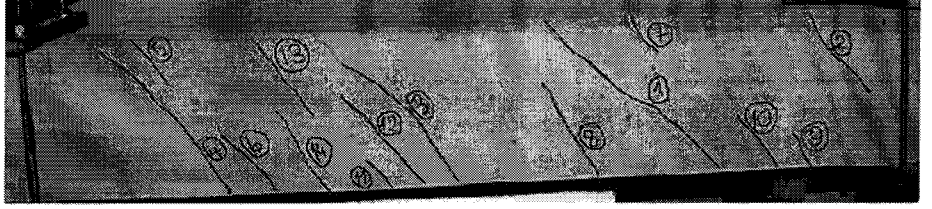
$T = 7.15$

$\theta = 0.06$



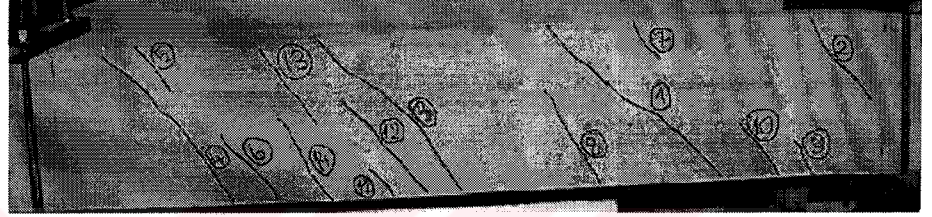
$T = 6.43$

$\theta = 0.07$



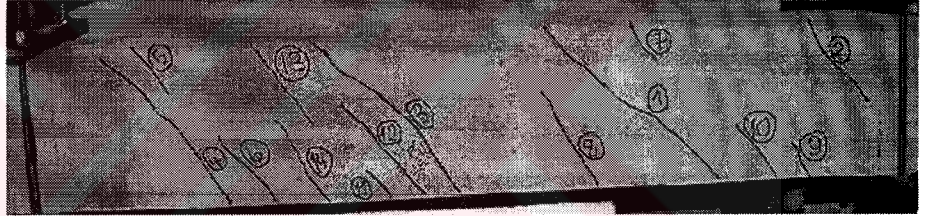
$T = 5.89$

$\theta = 0.08$



$T = 4.99$

$\theta = 0.09$



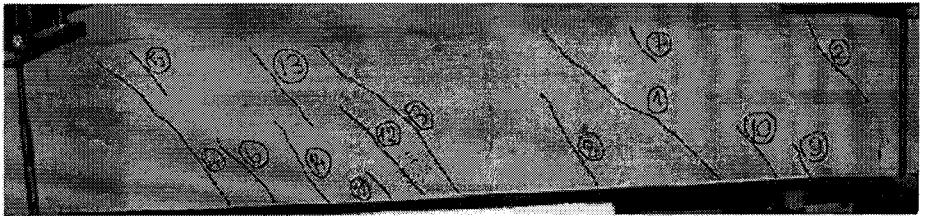
$T = 4.09$

$\theta = 0.10$



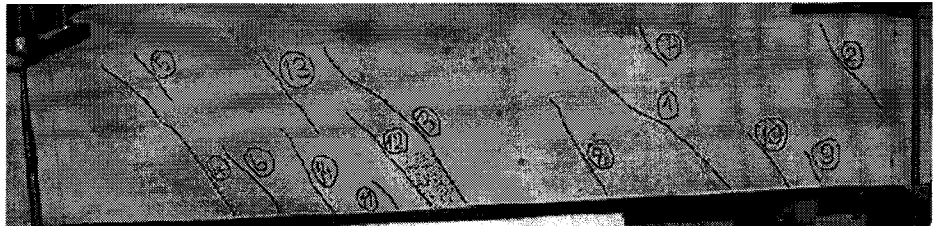
$T = 3.91$

$\theta = 0.11$



$T = 3.55$

$\theta = 0.12$

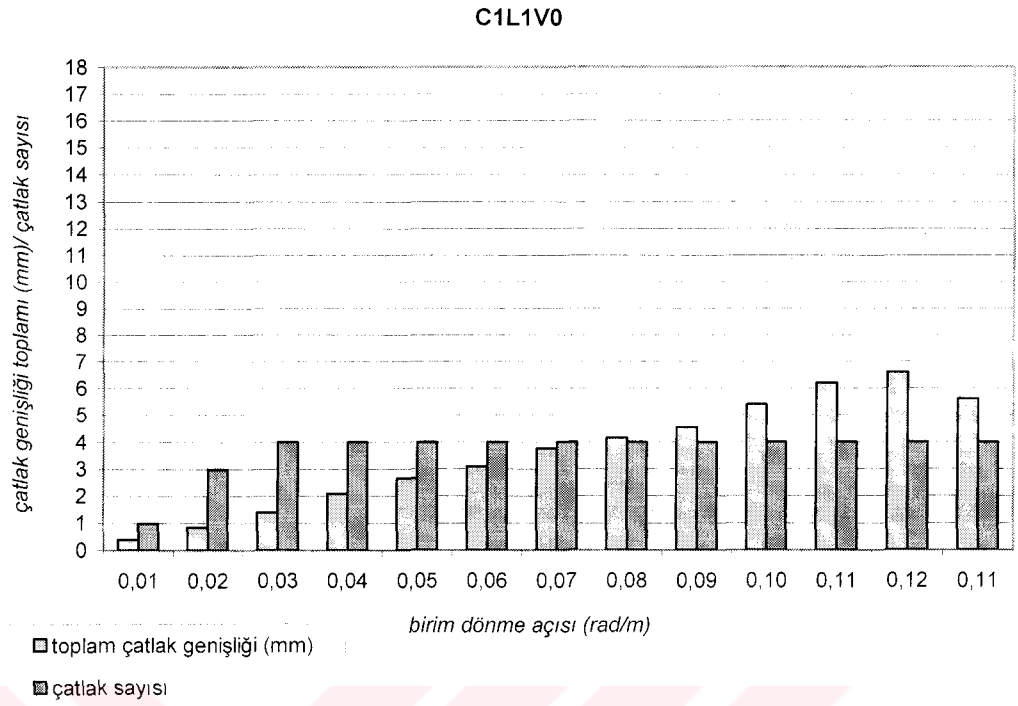


Şekil B.17. C2L1F2V2 numunesi çatlak dağılımı (devamı)

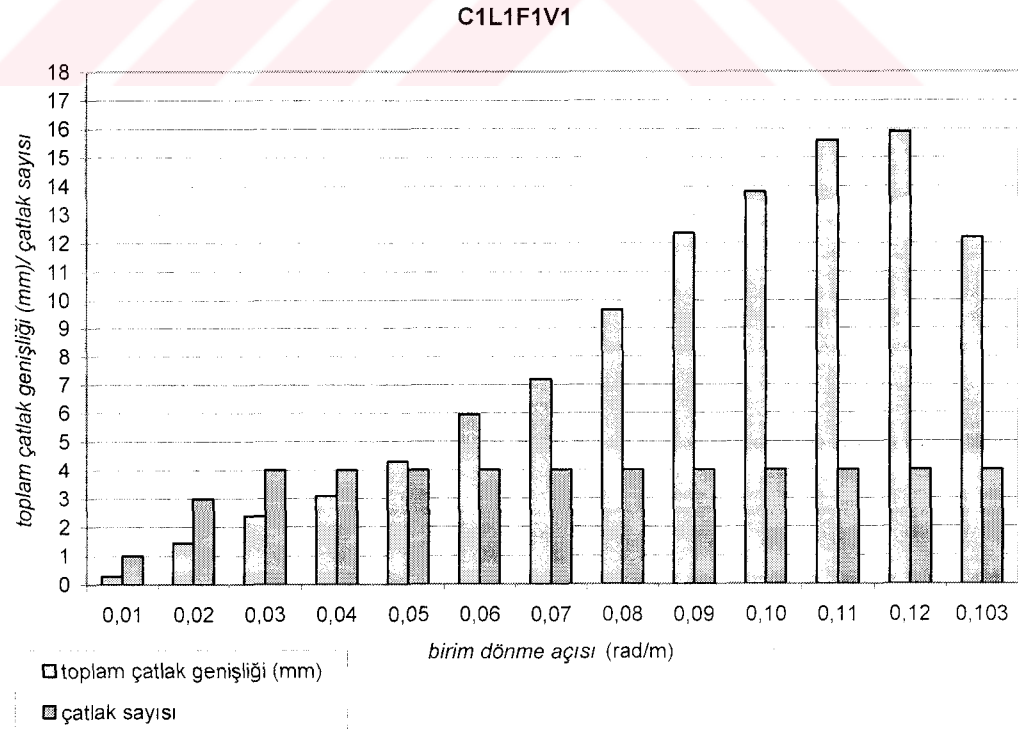
Ek C

Ek C' de deney sırasında numunenin, her birim dönme açısı değeri için okunan çatlak genişlikleri kullanılarak oluşturulan grafikler verilmiştir. Bu grafiklerde birim dönme açılarına karşı gelen, toplam çatlak genişliği ve çatlak sayısı verilerek okuyucunun, numunede oluşan çatlak sayısı ile çatlakların genişliği hakkında bilgi sahibi olması amaçlanmıştır. Ek C' de verilen grafikler Tablo 3.9' da verilen numune sıralamasına uygun olarak verilmiştir.

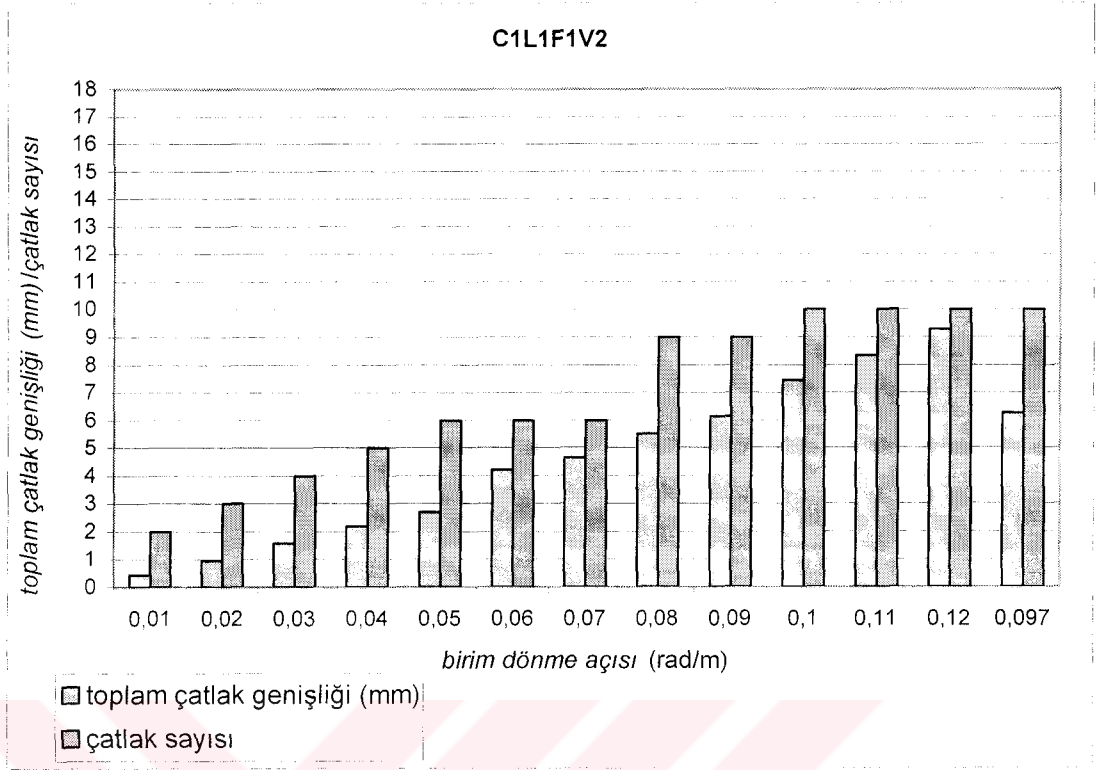




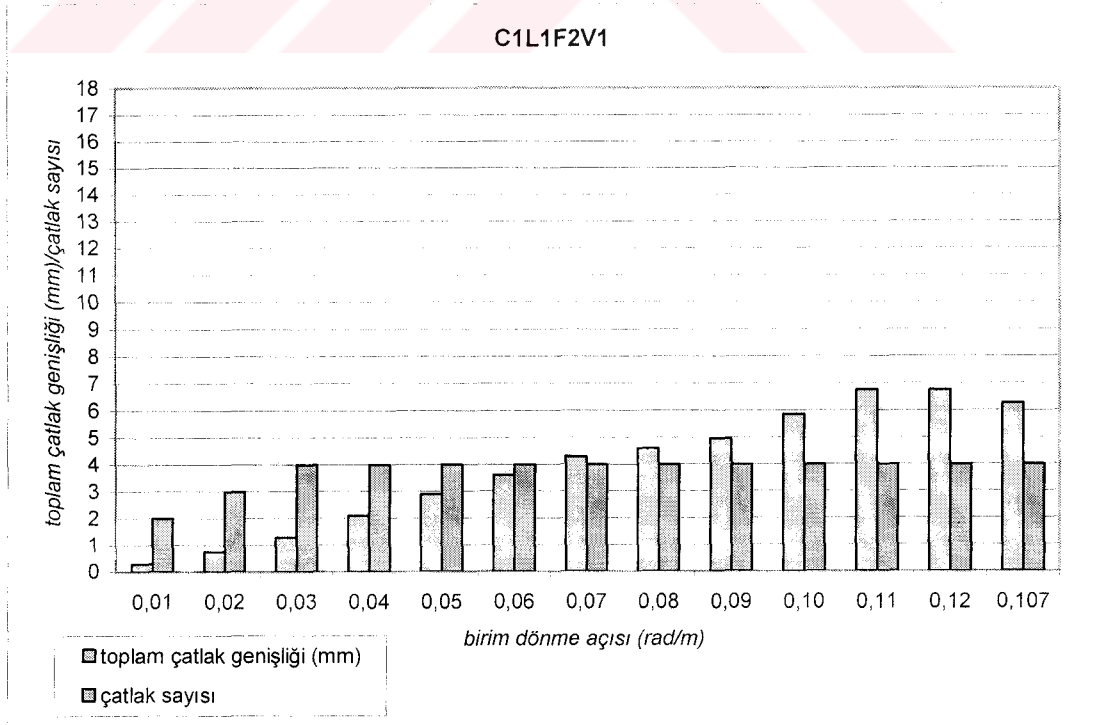
Şekil C.1 C1L1V0 numunesi çatlak grafiği



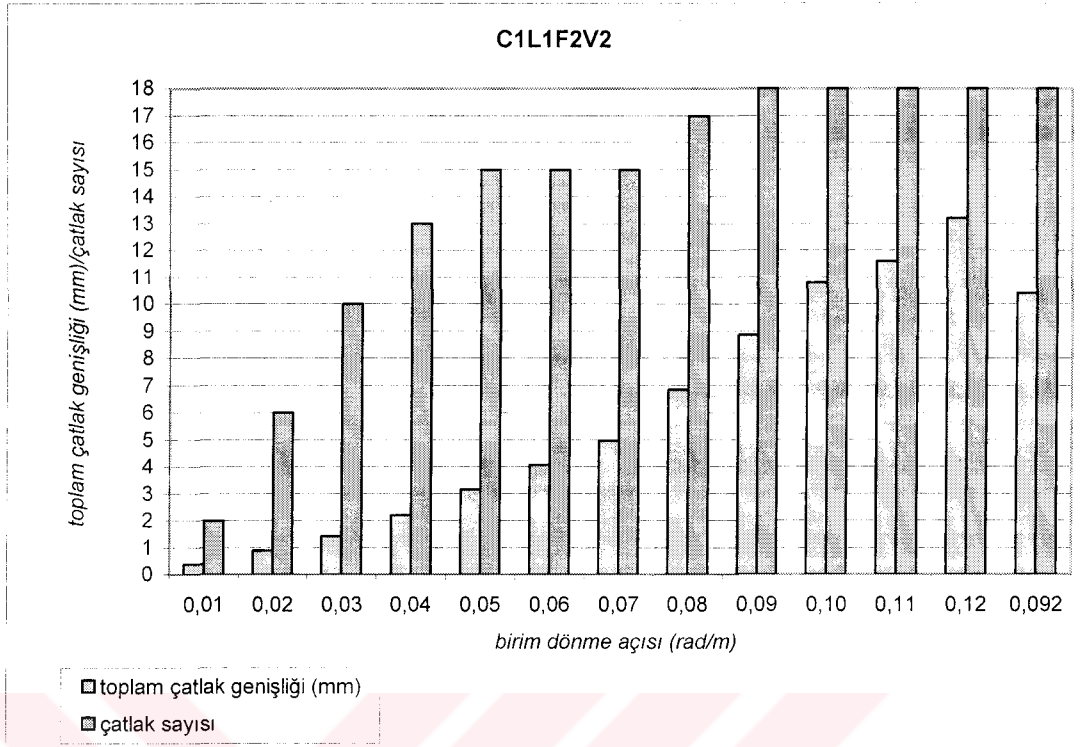
Şekil C.2 C1L1F1V1 numunesi çatlak grafiği



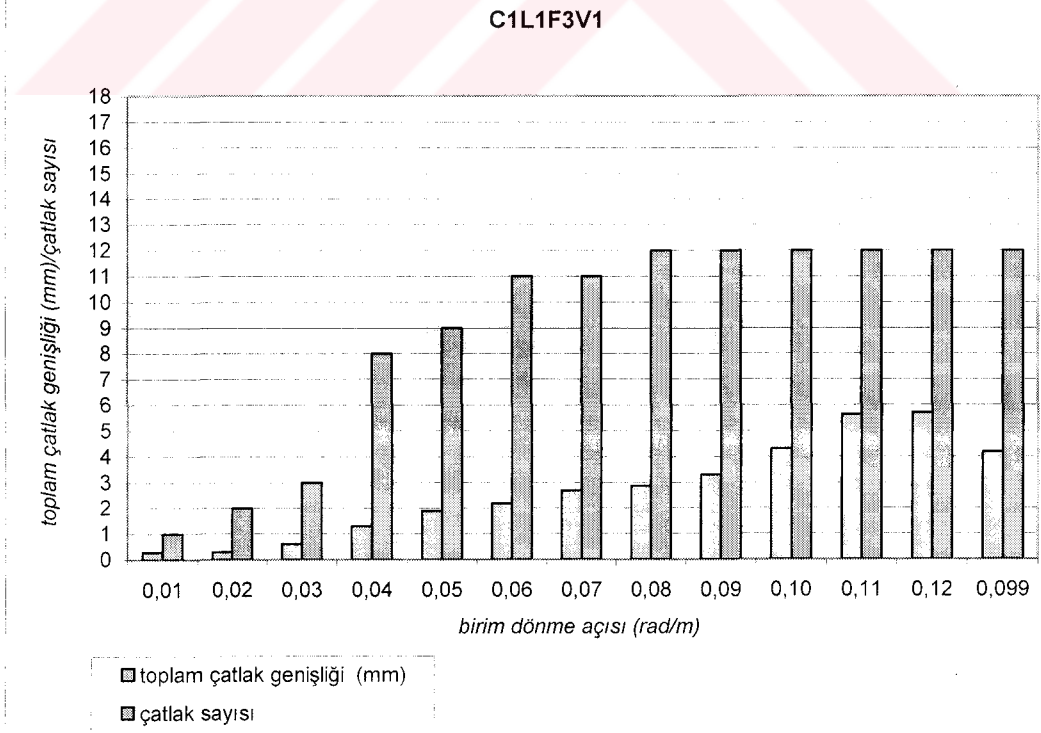
Şekil C.3 C1L1F1V2 numunesi çatlak grafiği



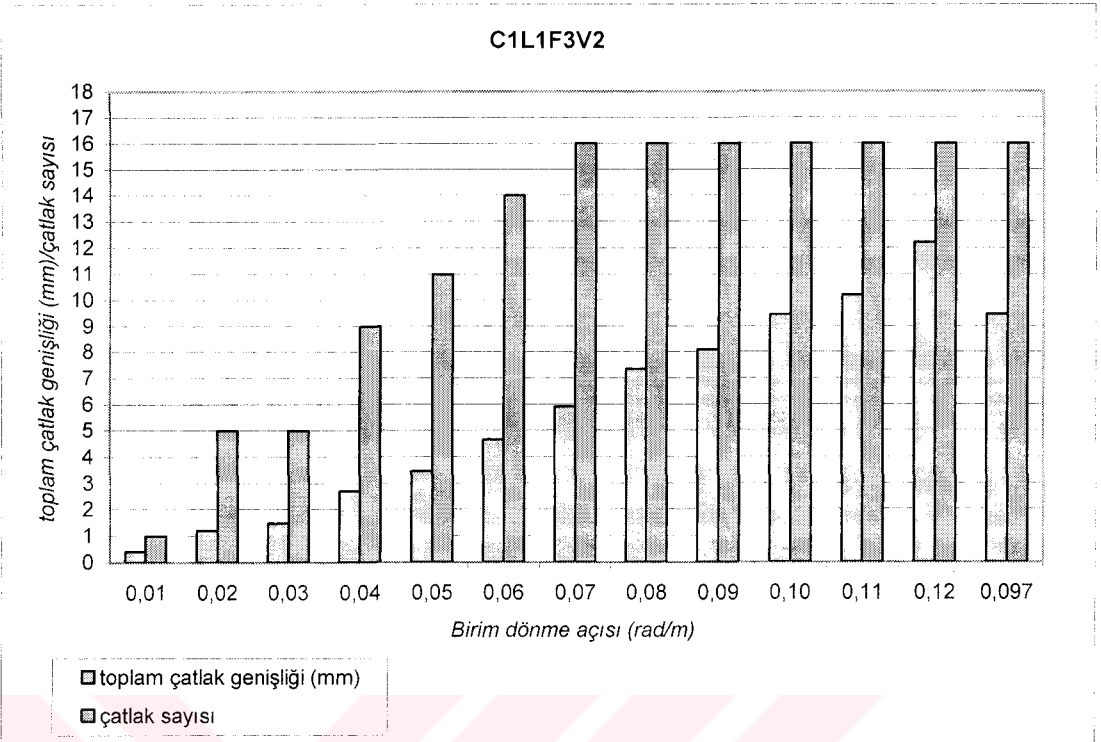
Şekil C.4 C1L1F2V1 numunesi çatlak grafiği



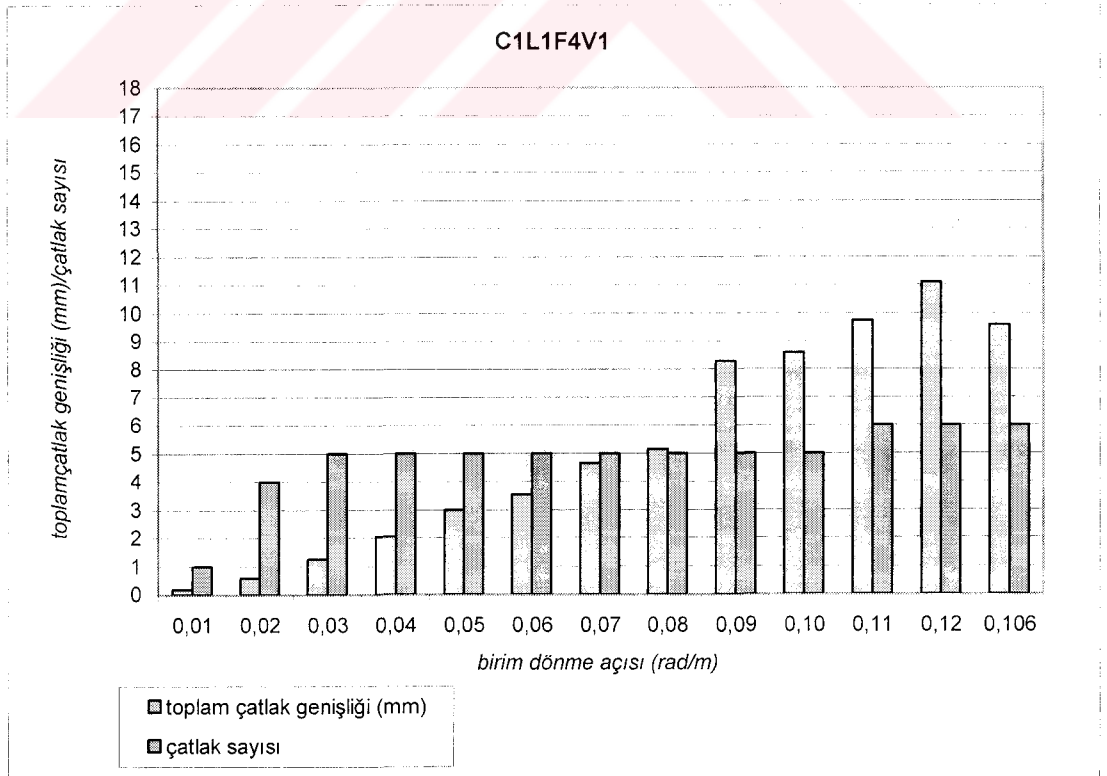
Şekil C.5 C1L1F2V2 numunesi çatlak grafiği



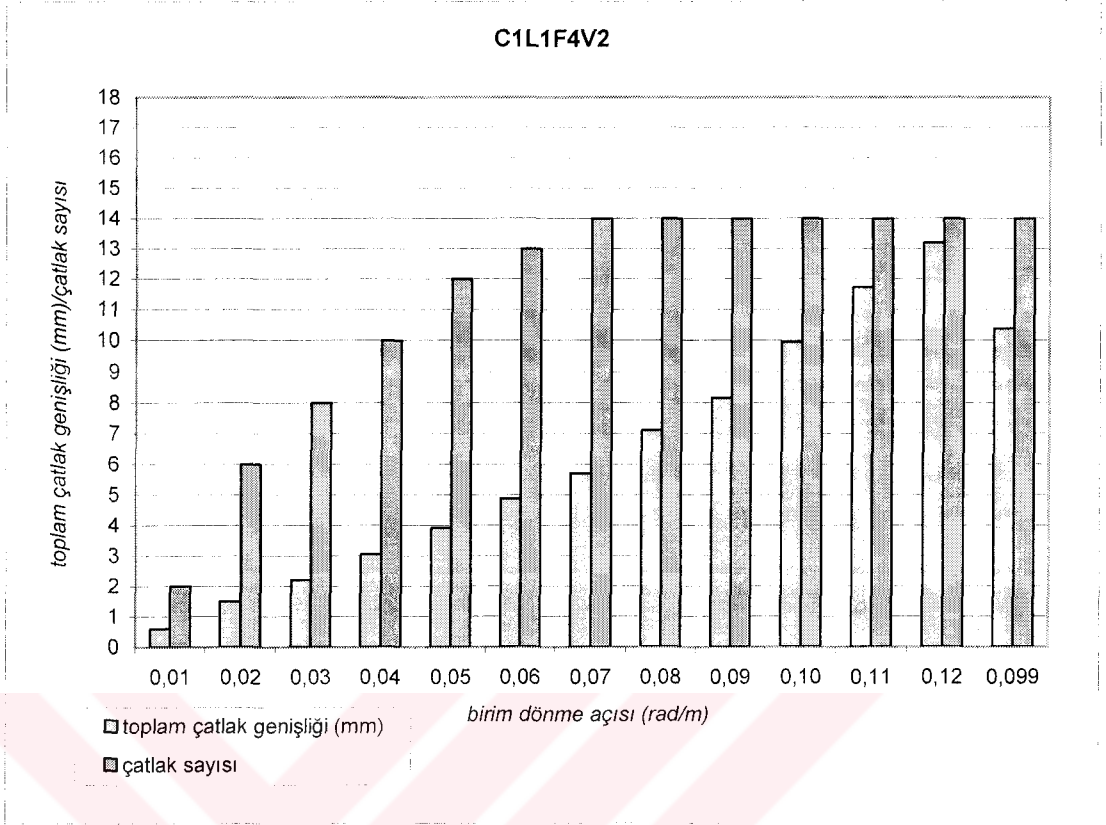
Şekil C.6 C1L1F3V1 numunesi çatlak grafiği



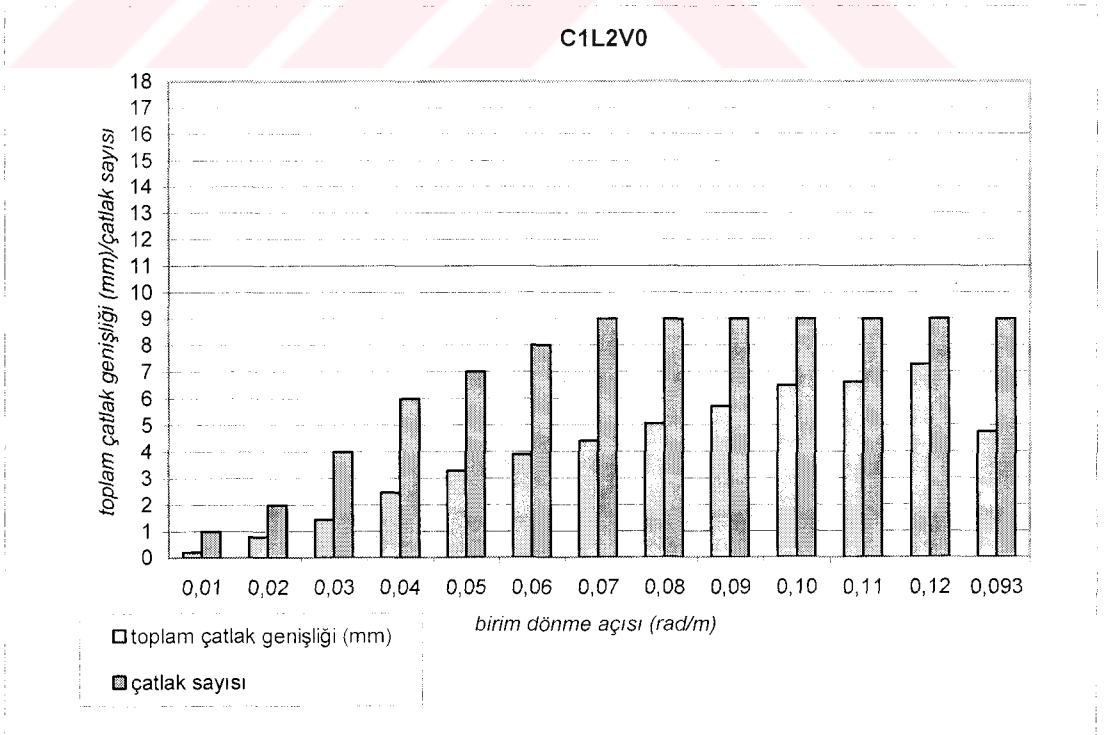
Şekil C.7 C1L1F3V2 numunesi çatlak genişliği



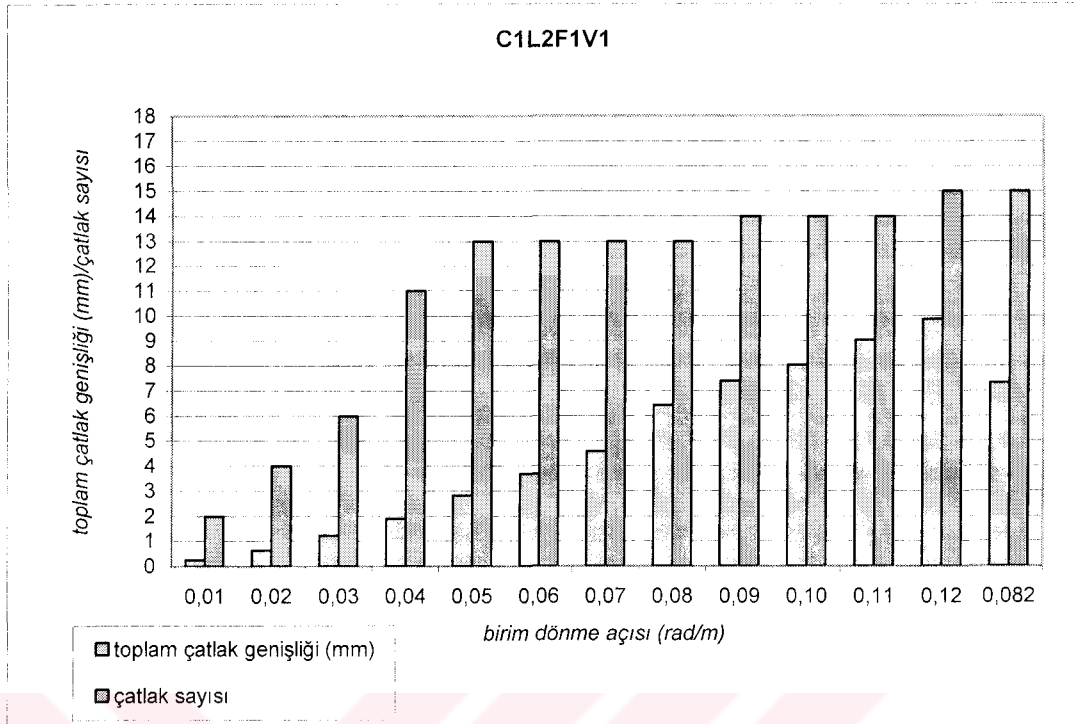
Şekil C.8 C1L1F4V1 numunesi çatlak grafiği



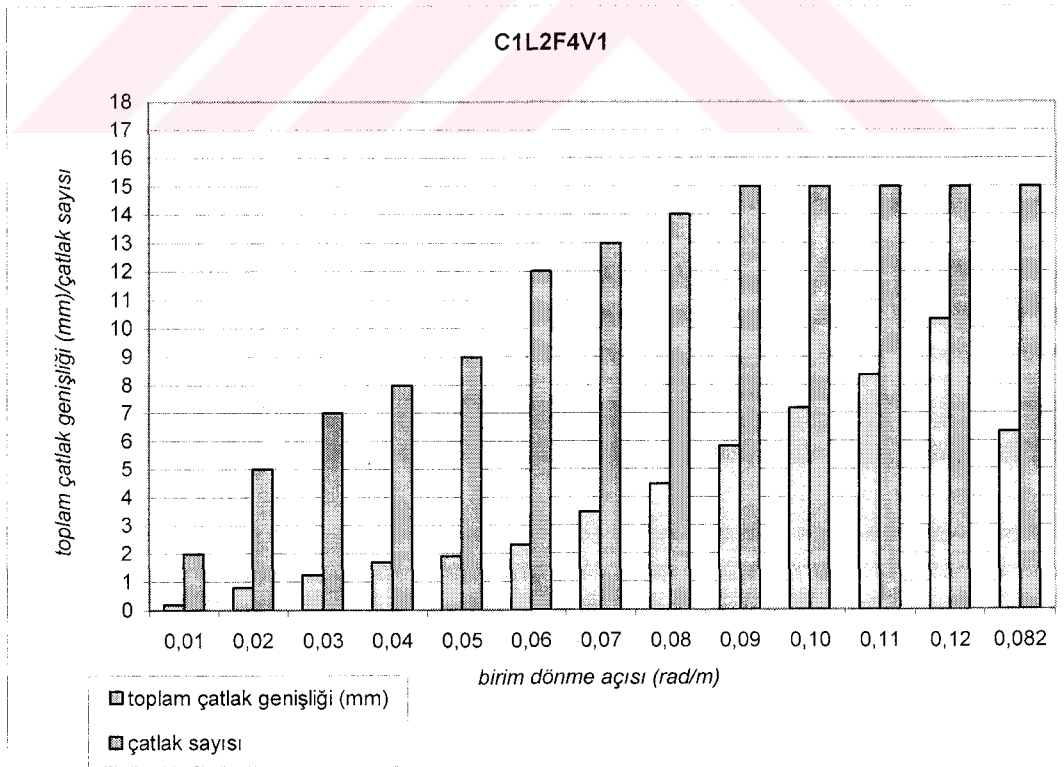
Şekil C.9 C1L1F4V2 numunesi çatlak grafiği



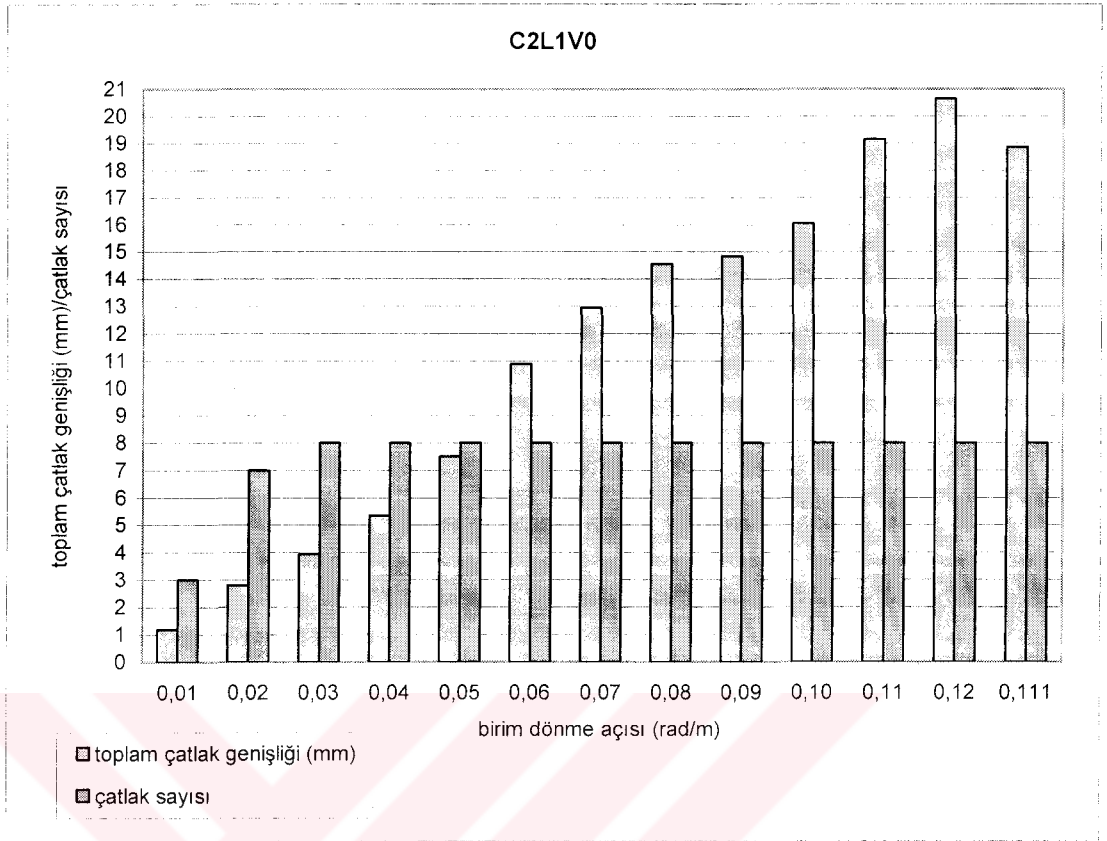
Şekil C.10 C1L2V0 numunesi çatlak grafiği



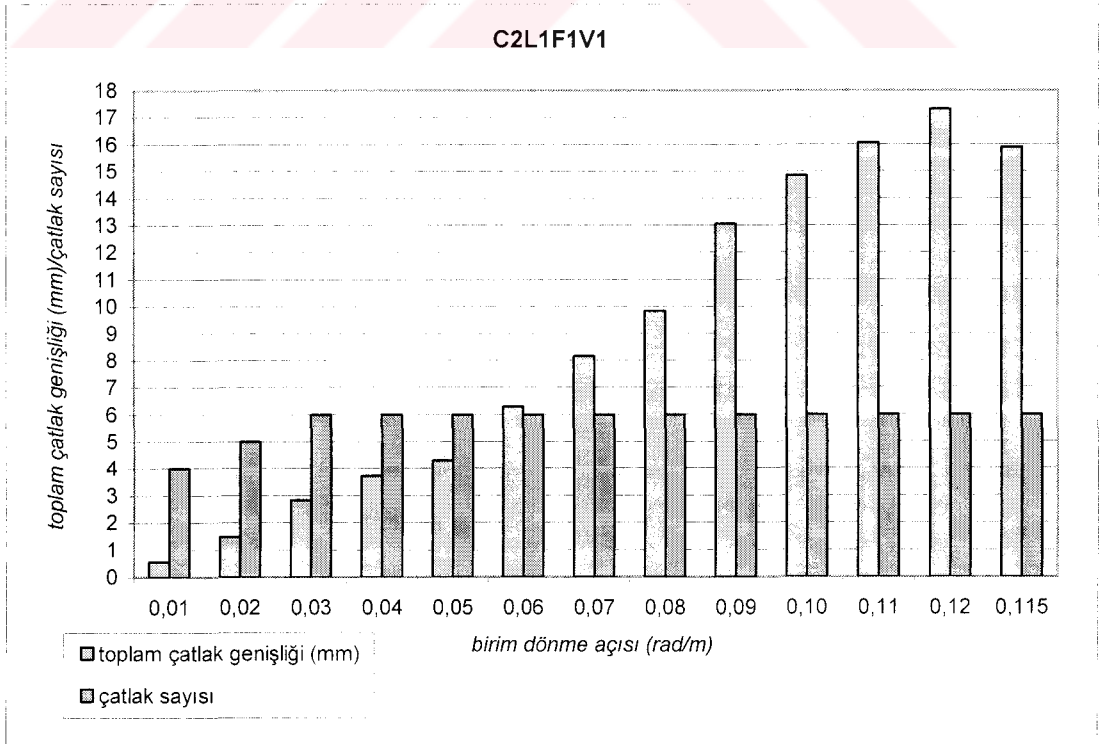
Şekil C.11 C1L2F1V1 numunesi çatlak grafiği



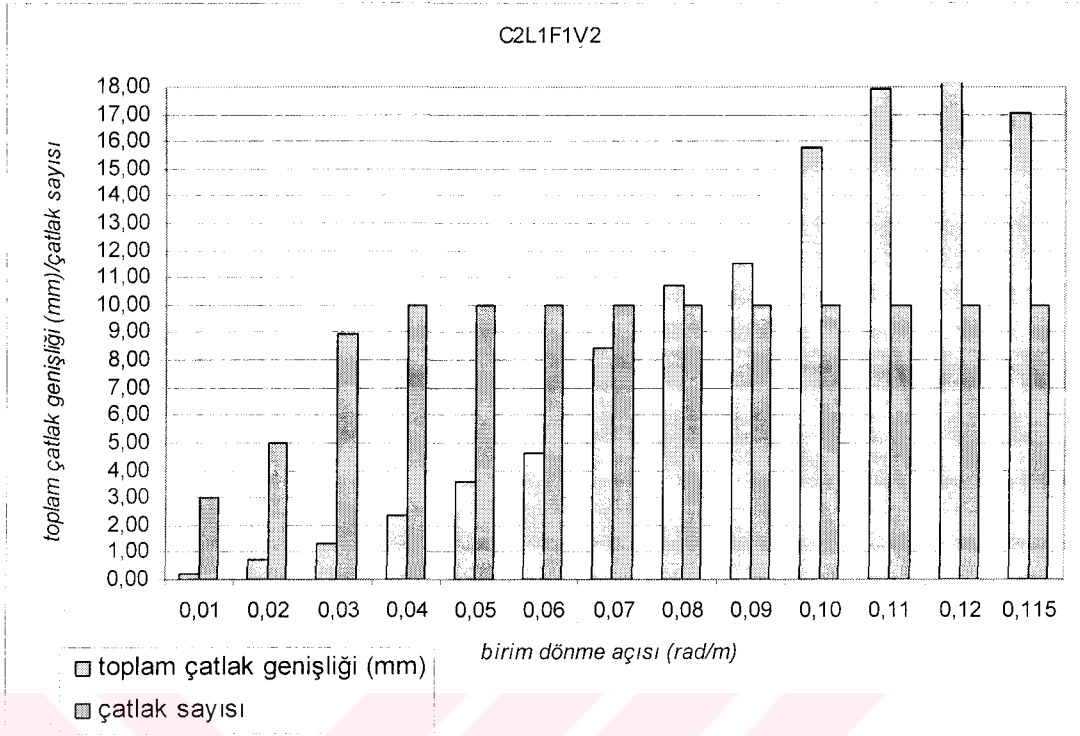
Şekil C.12 C1L2F4V1 numunesi çatlak grafiği



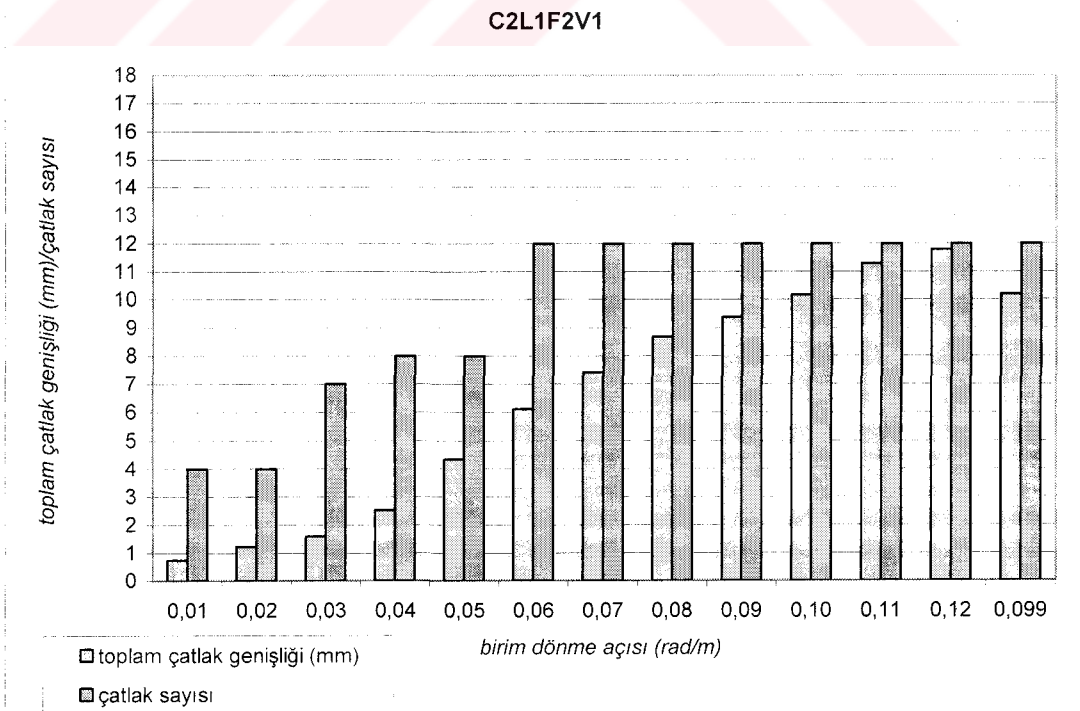
Şekil C.13 C2L1V0 numunesi çatlak grafiği



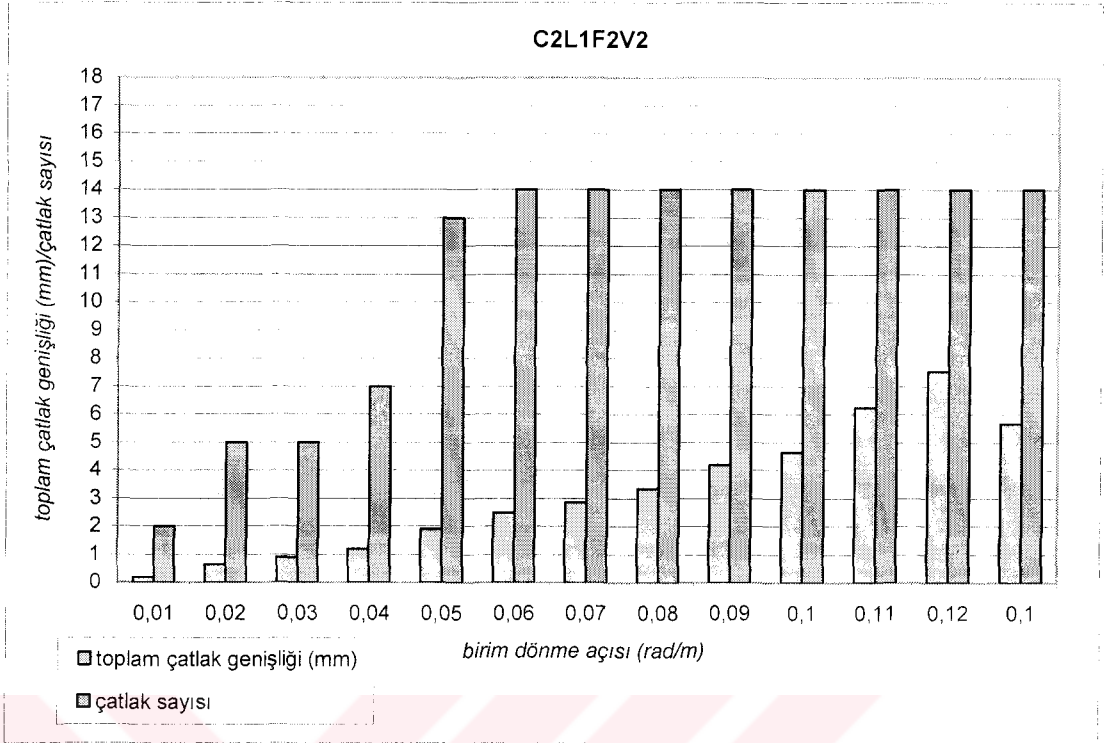
Şekil C.14 C2L1F1V1 numunesi çatlak grafiği



Şekil C.15 C2L1F2V2 numunesi çatlak grafiği



Şekil C.16 C2L1F2V1 numunesi çatlak grafiği



Şekil C.17 C2L1F2V2 numunesi çatlak grafiği

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Fethiye’ de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Fethiye’ de tamamladı. 1996 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ nden 2000 yılında mezun oldu. 2002 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’ nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2001 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

