

175857

**ÇELİK TEL DONATILI BETONLARIN MEKANİK
DAVRANIŞI VE OPTİMUM TASARIMI**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Fuat KÖKSAL
(501992002)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 Haziran 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 4 Ağustos 2004**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR (İ.T.Ü.) *MTaşdemir*
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Saim AKYÜZ (İ.T.Ü.) *Saim Akyüz*
Prof.Dr. Mehmet UYAN (İ.T.Ü.) *M. Uyan*
Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü.) *T. Özturan*
Prof.Dr. Halit Yaşa ERSOY (M.S.Ü.) *H. Ersoy*

AĞUSTOS 2004

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın temel amacı farklı su/çimento oranlarında betona ilave edilen farklı tipteki çelik tellerin narinliklerin ve tel içeriklerinin betonun mekanik özelliklerine etkisinin, özellikle betonların tokluğuna etkisinin araştırılmasını ve betonların sünekliğine maksimum yapacak uygun çözümlerin optimizasyon yöntemiyle belirlenmesini içermektedir.

Deneysel çalışmalar İTÜ İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi ve Deprem Laboratuvarında yapılmıştır.

Çalışmalarım boyuncaengin bilgi ve tecrübesi ile bana her konuda yardımcı olan çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR 'e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Ayrıca deneylerimde yardımcı olan Deprem Laboratuvarı sorumlusu sayın Yrd.Doç.Dr. Alper İLKİ' ye ve çok değerli arkadaşım Dr.Fikret BAYRAMOV' a yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Deneyleirim süresince bana yakınlık gösteren ve çok rahat bir ortamda çalışmamı sağlayan başta Sayın Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR olmak üzere tüm Yapı Malzemesi Anabilim Dalı Öğretim Üyesi hocalarıma ve çalışmalarımnda her türlü yardım ve samimi davranışları ile bana destek olan Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca deneysel çalışmalarım sırasında emeği geçen tüm Yapı Malzemesi ve Deprem Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımnda kullanılan çimentoyu temin eden Lafarge-Aslan San. A.Ş.' ye, çelik telleri ve kalıbı temin eden BEKSA Çelik Kord Sanayi Teknik Müdürü Sayın İnş. Müh. Mehmet YERLİKAYA'ya ve kimyasal katkıları temin eden YKS firmasına da ayrıca teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım süresince kendisine ayırdığım sınırlı zamana rağmen bana her konuda destek olan ve sevgisini esirgemeyen sevgili eşim Meltem KÖKSAL'a ve değerli ailesine; tüm eğitimim boyunca her zaman her konuda büyük desteklerini gördüğüm sevgili babama, anneme ve kardeşlerime de çok teşekkür ederim.

Ağustos 2004

Fuat KÖKSAL

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ÇELİK TEL DONATILI BETONLAR-LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
2.1. Genel	4
2.2. Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller	4
2.3. Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları	7
2.4. Çelik Tel Donatılı Beton Karışımı	9
2.5. Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı	12
2.6. Çelik Tel Donatılı Betonların Özellikleri	19
2.6.1. Basınç Dayanımı	19
2.6.2. Direkt Çekme Dayanımı	21
2.6.3. Yarma Çekme Dayanımı	23
2.6.4. Eğilme Dayanımı	24
2.6.5. Elastisite Modülü	27
2.6.6. Darbe ve Yorulma Dayanımı	30
2.6.7. Tokluk	31
2.6.8. Korozyon	33
2.6.9. Sünme ve Büzülme	33
2.6.10. Aşınma, Erozyon ve Kavitasyon Direnci	35
2.6.11. Donma-Çözülme	36
2.7. Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Betonlar (SIFCON)	37
2.8. Çelik Tel Donatılı Püskürtme Betonlar (ÇTDPB)	38
2.9. Çelik Tel Donatılı Betonlar ile Hasır Donatılı Betonların Karşılaştırılması	42
2.10. Tokluk Ölçme Deney Yöntemleri ve Yönetmelikler	43
2.10.1. ASTM Yöntemi	44
2.10.2. JSCE SF-4 Yöntemi	47
2.10.3. RILEM Yöntemi	48

2.10.4. EFNARC Deney Yöntemi	52
2.10.5. Tokluk Deney Yöntemlerinin Değerlendirilmesi	53
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	54
3.1. Kullanılan Malzemeler	54
3.1.1. Çimento	54
3.1.2. Agrega	54
3.1.3. Çelik Tel	54
3.1.4. Hiperakışkanlaştırıcı	54
3.2. Beton Karışımları	57
3.3. Üretilen Betonların Özellikleri	57
3.4. Beton Deneyleri	60
3.4.1. Taze Beton Deneyleri	60
3.4.1.1. Birim Ağırlık Deneyi	60
3.4.1.2. İşlenebilme Deneyi	61
3.4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri	61
3.4.2.1. Basınç Dayanımı Tayini	61
3.4.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı Tayini	61
3.4.2.3. Elastisite Modülü Tayini	63
3.4.2.4. Gevreklik İndeksi Tayini	63
3.4.2.5. Tokluk	65
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	67
4.1. Basınç Dayanımı	67
4.2. Yarmada Çekme Dayanımı	69
4.3. Elastisite Modülü	71
4.4. Gevreklik İndeksi	72
4.5. Tokluk	74
5. DENEY SONUÇLARININ OPTİMİZASYONU	81
5.1. Optimizasyonun Amacı ve Kapsamı	81
5.2. Tepki Yüzeyi Metodu (TYM)	81
5.2.1. Tam Faktöriyel Tasarım	86
5.2.2. Merkezi Birleşik Tasarım	89
5.3. Optimum Karışım Tasarımı	96
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	102
KAYNAKLAR	107
EKLER	116
ÖZGEÇMİŞ	173

KISALTMALAR

YPB	: Yüksek Performanslı Beton
RPB	: Reaktif Pudra Betonu
ÇTDB	: Çelik Tel Donatılı Beton
TS	: Türk Standartları
ACI	: American Concrete Institute
YDÇTDB	: Yüksek Dayanımlı Çelik Tel Donatılı Beton
ASTM	: American Society of Testing Materials
JSCE	: Japan Society of Civil Engineering
RILEM	: The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures
EFNARC	: European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures
SIFCON	: Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Betonlar
ÇTDPB	: Çelik Tel Donatılı Püskürtme Betonlar
YKS	: Yapı Kimyasalları Sanayi
TYY	: Tepki Yüzeyi Yöntemi
MBT	: Merkezi Birleşik Tasarım
ANOVA	: Varyans Analizi (Analysis of Variance)

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. ÇTDB'ların normal betonları kıyasla genel özellikleri	14
Tablo 2.2. ÇTDB'ların kalıcı dayanım faktörlerine göre sınıflandırılması	47
Tablo 2.3. EFNARC' a göre çelik tel donatılı beton plaklarda tokluk sınıfları.....	52
Tablo 3.1. Portland Çimentosunun (PÇ42.5) özellikleri.....	55
Tablo 3.2. Agregaların fiziksel özellikleri.....	55
Tablo 3.3. Silis Unu 1 ve Silis Unu 2'nin kimyasal Özellikleri.....	56
Tablo 3.4. Silis Unu 1 ve Silis Unu 2'nin tane dağılımı.....	56
Tablo 3.5. Çelik tellerin özellikleri.....	57
Tablo 3.6. Agrega karışım oranları (hacimce).....	57
Tablo 3.7. Taze beton özellikleri.....	59
Tablo 3.8. Kontrol numunelerine ait 28 günlük ve plak deneylerinin yapıldığı gün küp basınç dayanımı sonuçları.....	61
Tablo 3.9. Basınç dayanımı deney sonuçları.....	62
Tablo 3.10. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.....	62
Tablo 3.11. Elastik modülü deney sonuçları.....	63
Tablo 3.12. Gevreklik indeksi deney sonuçları.....	64
Tablo 3.13. Plak numunelere ait tokluk değerleri.....	66
Tablo 3.14. Plakların ilk çatlak yükü ve ilk çatlak genişliği.....	66
Tablo 5.1. İki Seviyeli-(2n) Tam Faktöriyel tasarım için gerekli deney sayısı.....	87
Tablo 5.2. Üç seviyeli (3n) Tam Faktöriyel tasarım için gerekli deney sayısı	88
Tablo 5.3. Su/çimento 0,45 için modelde kullanılan deney (tasarım) noktaları.....	91
Tablo 5.4. Su/çimento 0,70 için modelde kullanılan deney (tasarım) noktaları.....	92
Tablo 5.5. Modellere ait korelasyon katsayıları.....	92
Tablo 5.6. ÇTDB'ların yarmada çekme dayanımı ve tokluk için elde edilen deneysel sonuçları ile modelle bulunan değerlerin karşılaştırılması.....	93
Tablo 5.7. Tasarım değişkenleri ve mekanik özelliklerin alt ve üst sınırları (su/çimento=0,45).....	98
Tablo 5.8. Tasarım değişkenleri ve mekanik özelliklerin alt ve üst sınırları(su/çimento=0,70).....	98
Tablo 5.9. Maksimum tokluk ve maksimum yarmada çekme dayanımı ile minimum tel içeriği için optimum çözümler (su/çimento= 0,45)..	101
Tablo 5.10. Maksimum tokluk ve maksimum yarmada çekme dayanımı ile minimum tel içeriği için optimum çözümler (su/çimento= 0,70)..	101

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Düz, pürüzsüz yüzeyli tel..... 5
Şekil 2.2.	Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller..... 6
Şekil 2.3.	Bir ucu veya iki ucu kancalı tel..... 6
Şekil 2.4.	Çelik tellerin taze beton içerisindeki dağılımı..... 10
Şekil 2.5.	Farklı lif boyutlarının çatlak köprüleme etkisi..... 13
Şekil 2.6.	Çelik tel donatılı beton kirişlerin tipik yük-sehim eğrileri..... 15
Şekil 2.7.	Çelik tel içeriğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisine etkisi..... 20
Şekil 2.8.	Çelik tel narinliğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisine etkisi..... 20
Şekil 2.9.	ÇTDB'ların tipik çekme gerilmesi-çekme şekil değiştirme eğrisi..... 22
Şekil 2.10.	ÇTDB kirişler için tipik yük-sehim eğrisi..... 26
Şekil 2.11.	Hasarsız eğilme rijitliğindeki artış-çelik tel içeriği ilişkisi..... 29
Şekil 2.12.	Farklı tel hacimlerinde çatlak genişliği-zaman ilişkisi..... 34
Şekil 2.13.	Ortalama çatlak genişliği-çelik tel hacmi ilişkisi..... 35
Şekil 2.14.	SIFCON' un çekme altında tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi..... 37
Şekil 2.15.	SIFCON ve çelik tel donatılı harcın gerilme-uzama eğrilerinin karşılaştırılması..... 38
Şekil 2.16.	Çelik tel ve hasır çelik donatılı püskürtme betonların yük-sehim eğrilerinin karşılaştırılması..... 41
Şekil 2.17.	Hasır ve çelik tel donatılı püskürtme betonlarda kaplama kalınlığının karşılaştırılması..... 43
Şekil 2.18.	ASTM C 1018' e göre ÇTDB kirişler için eğilme deney düzeneği.... 44
Şekil 2.19.	ASTM C 1018' e göre tipik yük-sehim eğrisi ve önemli noktaları.... 45
Şekil 2.20.	Tam elasto-plastik malzemenin yük-sehim eğrisi..... 46
Şekil 2.21.	JSCE SF-4' e göre tipik yük-sehim eğrisi ve önemli noktaları..... 48
Şekil 2.22.	RILEM yöntemi deney düzeneği..... 49
Şekil 2.23.	RILEM yönteminde verilen tipik yük-sehim eğrileri ve önemli noktaları..... 50
Şekil 2.24.	EFNARC plak deney düzeneği..... 52
Şekil 3.1.	Karışım agregası tane dağılımı eğrisi..... 58
Şekil 3.2.	Yükleme-boşaltma için tipik gerilme -şekil değiştirme eğrisi..... 64
Şekil 3.3.	Plak deney düzeneği..... 65
Şekil 4.1.	Su/çimento=0,45 için çelik tel içeriği ve narinliğe bağlı basınç dayanımı..... 68
Şekil 4.2.	Su/çimento=0,70 için çelik tel içeriği ve narinliğe bağlı basınç dayanımı..... 68
Şekil 4.3.	Su/çimento=0,45 için tel içeriği ve narinliğine bağlı yarma dayanımı..... 70
Şekil 4.4.	Su/çimento=0,70 için tel içeriği ve narinliğe bağlı yarma dayanımı..... 70

Şekil 4.5.	Su/çimento=0,45 için çelik tel içeriği ve narinliğe bağlı elastisite modülü.....	71
Şekil 4.6.	Su/çimento=0,70 için çelik tel içeriği ve narinliğe bağlı elastisite modülü.....	72
Şekil 4.7.	Su/çimento=0,45 için tel içeriği ve narinliğine bağlı gevreklik indisi.....	73
Şekil 4.8.	Su/çimento=0,70 için tel içeriği ve narinliğine bağlı gevreklik indisi.....	73
Şekil 4.9.	$V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri (su/çimento=0,70).....	75
Şekil 4.10.	$L/d = 80$ için yük-sehim eğrileri (su/çimento=0,70).....	75
Şekil 4.11.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$).....	76
Şekil 4.12.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve $L/d = 80$).....	76
Şekil 4.13.	Su/çimento=0,45 için tel içeriği ve narinliğin ilk çatlak yüküne etkisi.....	78
Şekil 4.14.	Su/çimento=0,70 için tel içeriği ve narinliğin ilk çatlak yüküne etkisi.....	78
Şekil 4.15.	Su/çimento=0,45 için tel içeriği ve narinliğinin ilk çatlak tokluğa etkisi.....	79
Şekil 4.16.	Su/çimento=0,45 için tel içeriği ve narinliğinin ilk çatlak yüküne etkisi.....	79
Şekil 5.1.	Tepki yüzeyinin tipik gösterimleri.....	83
Şekil 5.2.	a) İki Faktörlü-İki Seviyeli Tam Faktöriyel tasarım şeması b) Üç faktörlü-İki seviyeli Tam Faktöriyel tasarım şeması.....	86
Şekil 5.3.	a) İki Faktörlü-Üç Seviyeli Tam Faktöriyel tasarım şeması b) Üç Faktörlü-Üç Seviyeli Tam Faktöriyel tasarım şeması.....	87
Şekil 5.4.	Üçte-bir Kısmi Faktöriyel tasarımının şematik gösterimi.....	88
Şekil 5.5.	İki seviyeli-üç faktörlü bir problemin MKT ile şematik gösterimi.....	89
Şekil 5.6.	Deneysel tasarım şeması.....	90
Şekil 5.7.	Yarmada çekme dayanımı (f_{st}) tepki yüzeyi modeli (su/çimento=0,45).....	94
Şekil 5.8.	Yarmada çekme dayanımı (f_{st}) tepki yüzeyi modeli (su/çimento=0,70).....	94
Şekil 5.9.	Tokluk (T) için tepki yüzeyi modeli (su/çimento=0,45).....	95
Şekil 5.10.	Tokluk (T) için tepki yüzeyi modeli (su/çimento=0,70).....	95
Şekil 5.11.	Tokluk (T) ve yarma-çekme dayanımının (f_{st}) nin maksimum, V_f' in ise aynı anda minimum yapılması halinde çoklu amacın (D), L/d ve V_f ile değişimini gösteren tepki yüzeyi (su/çimento=0,45).....	99
Şekil 5.12.	Tokluk (T) ve yarma-çekme dayanımının (f_{st}) nin maksimum, V_f' in ise aynı anda minimum yapılması halinde çoklu amacın (D), L/d ve V_f ile değişimini gösteren tepki yüzeyi izdüşümü (su/çimento=0,45).....	99
Şekil 5.13.	Tokluk (T) ve yarma-çekme dayanımının (f_{st}) nin maksimum, V_f' in ise aynı anda minimum yapılması halinde çoklu amacın (D), L/d ve V_f ile değişimini gösteren tepki yüzeyi (su/çimento=0,70).....	100
Şekil 5.14.	Tokluk (T) ve yarma-çekme dayanımının (f_{st}) nin maksimum, V_f' in ise aynı anda minimum yapılması halinde çoklu amacın (D), L/d ve V_f ile değişimini gösteren tepki yüzeyi izdüşümü (su/çimento=0,70).....	100
Şekil A.1	Dramix ZP305' in özellikleri.....	116
Şekil A.2.	Dramix RC 65/60 BN' in özellikleri.....	117

Şekil A.3.	Dramix RC 80/60 BN' in özellikleri.....	118
Şekil B.1.	Su/çimento=0,45 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.....	119
Şekil B.2.	Su/çimento=0,45 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.....	119
Şekil B.3.	Su/çimento=0,45 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.....	120
Şekil B.4.	Su/çimento=0,70 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.	120
Şekil B.5.	Su/çimento=0,70 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.	121
Şekil B.6.	Su/çimento=0,70 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.	121
Şekil B.7.	Su/çimento=0,45 ve L/d=55 için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.	122
Şekil B.8.	Su/çimento=0,45 ve L/d=65 için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.	122
Şekil B.9.	Su/çimento=0,45 ve L/d=80 için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.	123
Şekil B.10.	Su/çimento=0,70 ve L/d=55 için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.	123
Şekil B.11.	Su/çimento=0,70 ve L/d=65 için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.	124
Şekil B.12.	Su/çimento=0,70 ve L/d=80 için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.	124
Şekil B.13.	Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	125
Şekil B.14.	Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	126
Şekil B.15.	Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	127
Şekil B.16.	Su/çimento=0,45, L/d=67 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	128
Şekil B.17.	Su/çimento=0,45, L/d=67 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	129
Şekil B.18.	Su/çimento=0,45, L/d=67 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	130
Şekil B.19.	Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	131
Şekil B.20.	Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	132
Şekil B.21.	Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	133
Şekil B.22.	Su/çimento=0,70, L/d=55 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	134
Şekil B.23.	Su/çimento=0,70, L/d=55 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	135
Şekil B.24.	Su/çimento=0,70, L/d=55 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	136
Şekil B.25.	Su/çimento=0,70, L/d=65 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	137
Şekil B.26.	Su/çimento=0,70, L/d=65 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri	138
Şekil B.27.	Su/çimento=0,70, L/d=65 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	139
Şekil B.28.	Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	140
Şekil B.29.	Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	141
Şekil B.30.	Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri..	142
Şekil B.31.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve L/d=55).....	143
Şekil B.32.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve L/d=65).....	143
Şekil B.33.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve L/d=80).....	144
Şekil B.34.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve L/d=55)	144
Şekil B.35.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve L/d=65)	145
Şekil B.36.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$)	145
Şekil B.37.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$).....	146

Şekil B.38.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$).....	146
Şekil B.39.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$).....	147
Şekil B.40.	Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$).....	147
Şekil B.41.	Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.....	148
Şekil B.42.	Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.....	149
Şekil B.43.	Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.....	150
Şekil B.44.	Su/çimento=0,45, L/d=65 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	151
Şekil B.45.	Su/çimento=0,45, L/d=65 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrisi.	152
Şekil B.46.	Su/çimento=0,45, L/d=65 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	153
Şekil B.47.	Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	154
Şekil B.48.	Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	155
Şekil B.49.	Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	156
Şekil B.50.	Su/çimento=0,70, L/d=55 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	157
Şekil B.51.	Su/çimento=0,70, L/d=55 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	158
Şekil B.52.	Su/çimento=0,70, L/d=55 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	159
Şekil B.53.	Su/çimento=0,70, L/d=65 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	160
Şekil B.54.	Su/çimento=0,70, L/d=65 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	161
Şekil B.55.	Su/çimento=0,70, L/d=65 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	162
Şekil B.56.	Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	163
Şekil B.57.	Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	164
Şekil B.58.	Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.	165
Şekil C.1.	Su/çimento=0,45 olan kontrol grubu plak numunelerinin kırılma şekilleri.....	166
Şekil C.2.	Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.	166
Şekil C.3.	Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.	166
Şekil C.4.	Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.	167
Şekil C.5.	Su/çimento=0,45, L/d=65 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.	167
Şekil C.6.	Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	167

Şekil C.7.	Su/çimento=0,45, L/d=65 ve $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	168
Şekil C.8.	Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f = 20 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	168
Şekil C.9.	Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	168
Şekil C.10.	Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	169
Şekil C.11.	Su/çimento=0,70 olan kontrol grubu plak numunelerinin kırılma şekilleri.....	169
Şekil C.12.	Su/çimento=0,70, L/d=55 ve $V_f = 20 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	169
Şekil C.13.	Su/çimento=0,70, L/d=55 ve $V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	170
Şekil C.14.	Su/çimento=0,70, L/d=55 ve $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	170
Şekil C.15.	Su/çimento=0,70, L/d=65 ve $V_f = 20 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	170
Şekil C.16.	Su/çimento=0,70, L/d=65 ve $V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	171
Şekil C.17.	Su/çimento=0,70, L/d=65 ve $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	171
Şekil C.18.	Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f = 20 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	171
Şekil C.19.	Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	172
Şekil C.20.	Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.....	172

SEMBOL LİSTESİ

J	: Joule
d	: Çap
d_e	: Eşdeğer çap
l	: Kiriş açıklığı
L	: Çelik tel boyu
P	: Yük
V_f	: Çelik tel hacmi
μ	: Mikron
s	: Saniye
σ_{cc}	: Kompozitin çekme dayanımı
σ_{mu}	: Donatısız matrisin çekme dayanımını
f_m	: Yalın betonun maksimum eğilme dayanımını
f_{cc}	: Nihai eğilme dayanımını
E	: Elastisite modülü
E_{cL}	: Kompozitin uzun doğrultudaki elastisite modülü
E_{cT}	: Kompozitin enine doğrultudaki elastisite modülü
E_f	: Çelik telin elastisite modülü
E_m	: Beton matrisinin elastisite modülü
E_c	: Betonun elastisite modülü
δ	: Sehim
f_u	: Eğilmede kopma dayanımı
P_u	: Maksimum yük
T_b	: Kirişin numunesinin tokluğu
M_u	: Maksimum moment
f_{ct,fl}	: Eğilmede çekme gerilmesi
h_{sp}	: Çentikli kirişlerde çentik ucu ile numunenin üst kısmı arasındaki mesafe
S/Ç	: Su/çimento oranı
T	: Plak numunesinin tokluğu
V_f	: Çelik tel miktarı, kg/m ³
e	: İstatistiksel hata
x	: Değişken
y	: Tepki
cov	: Kovaryans
SS_E	: Hataların karelerinin toplamı
N	: Deney sayısı
f_c	: Silindir basınç dayanımı
f_{st}	: Yarmada çekme dayanımı

ÇELİK TEL DONATILI BETONLARIN MEKANİK DAVRANIŞI VE OPTİMUM TASARIMI

ÖZET

Çelik Tel Donatılı Betonlar (ÇTDB) kısa çelik teller ile takviye edilmiş çimento esaslı malzemelerdir. Matris içerisinde rastgele dağılı olarak bulunan çelik teller çatlak tutma davranışı gösterirler. Çelik tellerin gerçek avantajı matris çatlamasından sonra görülür. Göçmeyi önlemek için büyük enerji yutma kapasitesi gerektiğinde bu tür malzemeler yararlı olur. ÇTDB'lar ayrıca, yapı elemanlarının karmaşık seklinden dolayı geleneksel donatının yerleştirilemediği durumlarda olduğu gibi, yüksek çekme dayanımı ve çatlamasının az olmasının istendiği zamanlarda kullanılır. ÇTDB'ların geniş kullanım alanları vardır. Bu alanlar; kaplamalar, endüstriyel zeminler, prekast elemanların üretimi, hidrolik ve deniz yapıları, betonarme yapıların takviye ve onarımını, tünel kaplama ve şevlerin stabilizasyonu işleri olarak sıralanabilir.

ÇTDB'ların kırılma enerjilerini etkileyen etkenler tel boyu, tel çapı, tel içeriği, tellerin matris içerisindeki yönelmesi ve matrisin özellikleridir. ÇTDB'ların mekanik özellikleri üzerinde yapılan çalışmalarda, narinliği artmasıyla kırılma enerjilerinin arttığı ve iki ucu kancalı çelik tellerin düz olanlara kıyasla daha yüksek sıyrılma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Yukarıda belirtilen etkenlerin ÇTDB'ların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin anlaşılması için daha fazla araştırmalar yapılması gerekir.

Bu çalışma, yalın betonlara kıyasla belirgin olarak daha sünek davranış sergileyen çelik tel donatılı betonların (ÇTDB) optimum tasarımı için deneysel bir araştırmayı içermektedir. Optimum tasarım için, EFNARC deney yöntemi ile belirlenen ÇTDB'ların toklukları ve yarma-çekme dayanımlarının maksimum ve çelik tel içeriğin (maliyetin) ise minimum olması amaçlanmıştır. Deneysel tasarım için iki-faktörlü üç-seviyeli tam faktöriyel tasarım ve Tepki Yüzeyi Yöntemi (TTY), optimum tasarım için ise çok amaçlı optimizasyon teknikleri kullanıldı.

Deneysel çalışma, su/çimento oranı 0,45 ve 0,70 olan iki seri beton üzerinde yapıldı. Her bir su/çimento oranında çelik tel içeriği ve narinliği değişken olarak alındı. Kullanılan çelik tellerin narinlikleri sırasıyla 55, 65 ve 80, ve betona katılma oranları ise sırasıyla, 20 kg/m³, 40 kg/m³ and 60 kg/m³'tür. Her bir seri için biri normal dokuzu ÇTDB olmak üzere 10 karışım üretildi. Her bir seride su, çimento, ince agrega ve kaba agrega oranları sabit tutuldu. Çalışmada kullanılan çimento PÇ42.5 cinsi Portland çimentosu ve yoğunluğu 3.16 g/cm³'tür. Çimento miktarları ise su/çimento oranı 0,45 ve 0,70 için sırasıyla, 300 kg/m³ ve 400 kg/m³'tür. İnce agrega olarak kullanılan silis kumu (0-0,25 mm) ve kalker kökenli kırmakumun (0-4 mm) yoğunlukları sırasıyla, 2,65 g/cm³ ve 2,51 g/cm³'tür. Kaba agrega olarak yoğunlukları sırasıyla, 2,66 g/cm³ ve 2,71 g/cm³ olan kalker kökenli kırmataşlar (4-10 mm ve 8-20 mm) kullanıldı. Su/çimento oranı 0,45 olan beton karışımlarında işlenbilirliği 120±20 mm çökme değerinde sabit tutmak için çimento ağırlığının

%1,3-%2'si oranında yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanıldı. Çelik teller, beton içerisinde homojen dağılımının sağlanması amacıyla karışıma dikkatli bir şekilde ilave edildi. Numeler çelik kalıplara konulduktan sonra vibrasyon tablasında sıkıştırıldı. 24 saat sonra kalıptan alınan numuneler 20°C' de 28 gün boyunca ıslak çuval altında, daha sonra 160. güne kadar laboratuvar ortamında saklandı.

Tokluk deneyleri için 600x600x100 mm boyutlarında plak numuneler, basınç dayanımı ve elastisite modülü deneyleri için 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde standart silindir numuneler, yarma-çekme dayanımı deneyleri için ise 150 mm çapında ve 60 mm kalınlığında disk numuneler hazırlandı. Deneyler her bir yükleme durumu için her seriden en az üç adet numune üzerinde yapıldı. Standart dayanım deneyleri Avrupa Standartlarına (EN 206 ve EN 12390) uygun yapıldı. Plakların tokluklarını belirlemek için ise EFNARC deney yöntemi kullanıldı. Plaklara orta noktadan, 100x100 mm temas yüzeylerinden yükleme yapıldı. Plakların orta noktasındaki sehim, iki transduser yardımıyla hassas bir şekilde kaydedildi. Plak deneyi 250 kN kapasiteli MTS marka strok kontrollü cihazda ve 1 mm/dk yükleme cihazında yapıldı. Plakların alt orta noktasında kaydedilen sehimlerin ortalaması alınarak yük-sehim eğrileri elde edildi.

Deney sonuçlarına bağlı olarak, çelik tel içeriği ve narinliğin ÇTDB'ların basınç dayanımını ve elastisite modülüne etkisi olmadığı, çelik tel içeriği arttıkça belirgin bir değişiklik olmadığı görüldü. Buna karşılık, çelik tellerin betona eklenmesi ÇTDB'ların basınç dayanımından çok basınç tokluğunu iyileştirebilmektedir. Çelik tellerin çapı ve olası yönlenmesi basınç da etkili olabilir. Buna karşılık çelik tellerin betona katılması betonun basınç dayanımından çok basınç göçmesindeki sünekliğinin artırılmasında etkili olabilir. Su/çimento oranı 0,45 olan betonlarda, yarmada çekme dayanımı çelik tel içeriğinin artmasıyla arttı. Su/çimento oranı 0,45 ve 65 narinlik için tel içeriği 0' dan 40 kg/m³' e çıkarılmasıyla %25 artış görüldü. Benzer şekilde 55 ve 80 narinlik için bu artışlar sırasıyla %21 ve %15 elde edildi. Su/çimento oranı 0,70 olan betonların yarmada çekme dayanımlarına çelik tel içeriğinin önemli bir etkisi olmadı. Sonuç olarak, ÇTDB'ların yarmada çekme dayanımındaki iyileşme 65 narinliği sahip çelik tellerde ve düşük su/çimento oranında (su/çimento=0,45) elde edildi.

Kırılma düzlemi boyunca çatlak açılması ve yayılması çelik teller tarafından engellendi. Çatlak ilerlemesi sırasında bazı çelik teller kopma eğilimi gösterirken, bazıları matristen sıyrılma eğilimi sergiledi. Yarma-çekme deneyi sonunda incelenen kırılma yüzeylerinde, çoğu zaman 65 narinliğe sahip çelik tellerin kopmadan sıyrıldığı, buna karşılık 80 narinliğe sahip çelik tellerin ikiye ayrıldığı belirlendi. Buradan, aynı boydaki çelik tellerden (burada narinliği 65 ve 80 olan çelik tellerin boyları 60 mm, çapları ise sırasıyla 0,92 mm ve 0,75 mm) çapı büyük olanın daha etkili olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu davranışta ayrıca 80 narinlikteki çelik teller ile beton matrisi arasındaki uyumsuzluğun etkili olduğu düşünülebilir. Bu çalışmada çekme dayanımları 1100 MPa olan çelik teller kullanıldı.

Çelik tel içeriği arttıkça tokluğun arttığı açıkça görüldü. Çelik tel içeriği ve narinliğe bağlı olarak su/çimento oranı 0,45 olan ÇTDB'ların tokluğu ve ilk çatlak yükü, yüksek sünekliğin bir sonucu olarak belirgin biçimde arttığı görüldü. Tokluktaki bu artış liflerin matristen sıyrılma ve kırılma sırasında lif-matris bağının ayrılması için yüksek enerji gereksiminin sonucu olarak değerlendirilebilir. Çelik tel içeriğinin

artması ile tokluktaki artış ise çok sayıdaki çelik telin çatlak köprüleme etkisinin fazla olması olarak açıklanabilir. Çelik teller matris çatlamasından sonra tel-matris arayüzeyinde çatlak oluşumuna kadar yük taşırlar, bu da çelik tellerin yarı-gevrek olan betonun nasıl sünek bir yapıya dönüştürdüğünün kanıtı olmaktadır.

Plakların ilk çatlak yükü değerlerinin çelik tel içeriği ve narinliğinin artmasıyla arttığı görüldü. Su/çimento oran 0,45 ve 0,70 için ilk çatlak yükündeki en büyük artışlar 65 narinliğe sahip ve 60 kg/m³ çelik tel içeren betonlarda sırasıyla %45 ve %25 olarak elde edildi.

Su/çimento oranı 0.45 ve 55 narinliğe sahip betonların 20 kg/m³, 40 kg/m³ ve 60 kg/m³ tel içeriklerindeki tokluk değerleri sırasıyla 756 , 832 ve 1245 Joule elde edildi. Bu değerler 65 narinlik için sırasıyla 832, 1357 ve 1849 Joule olurken, 80 narinlik için ise sırasıyla 989 Joule, 1032 Joule ve 1412 Joule olarak belirlendi. Benzer şekilde su/çimento oranı 0.70 ve 55 narinliğe sahip betonların 20 kg/m³, 40 kg/m³ ve 60 kg/m³ tel içeriklerindeki tokluk değerleri sırasıyla 426, 642 ve 908 Joule elde edildi. Bu değerler 65 narinlik için sırasıyla 771 Joule, 1069 Joule ve 1500 Joule olurken, 80 narinlik için ise sırasıyla 741 Joule, 1239 Joule ve 1618 Joule olarak belirlendi.

İki değişkenli ve üç seviyeli tam faktoriyel tasarım 3²=9 karışımından oluşmaktadır. Her bir seride ÇTDB'ların her bir tepkisi için dokuz deneysel veri varyan analizi (ANOVA) kullanılarak polinom türü matematiksel modele uyduruldu. Karışım tasarım değişkenleri arasında ilişkiyi ifade eden regresyon modelleri kurulduktan sonra amaç fonksiyonunu optimize etmek için tüm bağımsız değişkenler ayrı ayrı ve aynı anda değiştirildi.

Daha yüksek sünek bir beton elde etmek için, yüksek tokluk ve yüksek yarmada çekme dayanımı elde edilmelidir. Uygulama dikkate alındığında, kompozitlerin üretiminde kullanılan çelik tellerin fiyatı da önemli olmaktadır. Bu nedenle ekonomik karışım için çelik tel içeriğinin minimum yapılması gerekir. Bundan dolayı tokluk ve yarmada çekme dayanımı maksimize edilirken aynı anda çelit tel içeriğinin minimize edilmesi gerekir. Bu çalışmada regresyon model ve optimizasyon ticari olarak mevcut olan paket program (Design-Expert) kullanarak yapıldı. Sonuçlar polinom türü regresyon modelin yeterli olduğunu gösterdi. Çelik tellerin betona eklenmesiyle betonların tokluğu önemli ölçüde iyileştirildi. Uzun çelik teller kısa olanlara kıyasla dah yüksek süneklik sağladı. Tokluk, çelik tel içeriği ve narinliğe bağlı olmaktadır.

Elde edilen deney sonuçlarına bağlı olarak her bir su/çimento oranı için (S/Ç=0,45 ve 0,70) Tepki Yüzeyi Yöntemiyle, iki-faktörlü (çelik tel içeriği ve narinlik) üç-seviyeli (L/d=55, 65 ve 80); çelik tel içeriği (V_f = 20 kg/m³, 40 kg/m³ ve 60 kg/m³) tam faktöriyel tasarım yapıldı. ÇTDB'ların tokluklarının ve yarma-çekme dayanımlarının maksimum olduğu minimum tel içeriklerinin belirlenmesi için yapılan optimizasyon sonucunda; su/çimento oranı 0,45 için en uygun çözüm 65 narinlikte, tel içeriği 38,8 kg/m³ olarak elde edildi. Bu tel içeriğinde yarma-çekme dayanımı ve tokluk değerleri sırasıyla 6,1 MPa ve 1324 Joule olarak elde edildi. Ayrıca, narinliğin 55 ve 80 değerlerinde ise optimum tel içerikleri sırasıyla, 44,4 ve 42,4 kg/m³ olarak belirlendi. Bu optimum değerlere karşı gelen tokluklar sırasıyla, 1072 ve 1176 Joule, yarma-çekme dayanımları ise, sırasıyla, 6,1 MPa ve 5,6 MPa'dır. Benzer biçimde,

su/imento oranı 0,70 için ise en uygun çözüm 80 narinlikte, 37,7 kg/m³ tel içeriğinde elde edildi, bu optimum tel içeriğinde yarma-çekme dayanımı ve tokluk değerleri ise sırasıyla, 4,0 MPa ve 1132 Joule olarak belirlendi. Ayrıca, 55 ve 65 narinlik için optimum tel içerikleri sırasıyla, 42,3 ve 37,0 kg/m³ olarak belirlendi. Bu optimum değerlere karşı gelen tokluklar sırasıyla, 670 ve 1018 Joule, yarmada çekme dayanımları ise, sırasıyla, 3,9 MPa ve 4,1 MPa'dır.



MECHANICAL BEHAVIOR AND OPTIMUM DESIGN OF STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE

SUMMARY

Steel Fibre Reinforced Concretes (SFRCs) are cementitious materials reinforced with short steel fibers. Randomly distributed steel fibers in the matrix act as crack arresters. The real advantage of using of fibers in concrete can be seen after matrix cracking. These types of materials are useful if a large amount of energy absorption capacity is required to prevent failure. SFRCs can also be used when high tensile strength and reduced cracking are required, as well as the cases, when conventional reinforcement can not be placed because of the complex shape of the structural member. SFRC has a wide-range of applications such as; pavements and overlays, industrial floors, precast products, hydraulic and marine structures, repairing and retrofitting of reinforced concrete structures, tunnel linings and slope stabilization works.

There are many factors affecting the fracture energy of SFRC such as; fibre length, fibre diameter, fibre content, orientation of fibers in matrix and matrix properties. Investigations on mechanical properties of SFRC indicate that an increase in the aspect ratio also increases the fracture energy and hooked end fibres give higher pull-out loads than those of straight ones. On the other hand, the strength of the matrix also affects load carrying capacity and fracture energy. In order to obtain the influences of such factors mentioned above on the mechanical behavior of conventional SFRC; much further research is needed.

This research consist of the experimental design to optimize the the toughness of Steel Fibre Reinforced Concretes (SFRC) having a significantly more ductile behavior than that of plain concrete. In the optimum design, the aim was to maximize the toughness of SFRC, determined by EFNARC test method, and the splitting tensile strength while minimizing the steel fibre content (cost). For experimental design, two-factor, three-level full factorial and Response Surface Methods (RSM), and for optimum design, a multi-objective simultaneous optimization technique were used.

In experimental work, two series of concrete with water/cement ratios of 0.45 and 0.70 were produced. For each water/cement ratio, the fibre content and aspect ratio were taken as variables. Fibre contents of steel fibers were 20 kg/m³, 40 kg/m³ and 60 kg/m³, and aspect ratios of fibers were 55, 65, and 80. For each series a total of ten batches consisting of one normal concrete and nine SFRC were produced. In each series, the volume fractions of cement, siliceous sand, limestone fines, crushed limestone, and water were kept constant. Cement used was ordinary Portland cement with a density of 3.16 g/cm³. Cement contents in the mixtures with “water/cement” ratios of 0.70 and 0.45 were 300 kg/m³ and 400 kg/m³, respectively. Siliceous sand (0-0.25 mm) and limestone fines (0-4 mm) were used as a fine aggregates, and their

densities were 2.65 and 2.51 g/cm³, respectively. As coarse aggregate, two different sizes of aggregate (4 to 10 mm and 8 to 20 mm) were used, and their densities were 2.66 and 2.71 g/cm³. For the mixtures with water-cement ratio of 0.45, the amount of high range water reducing admixture varied between 1.3 % and 2.0 % by weight of cement for different concrete mixtures to maintain approximately the nominal slump from 100 to 130 mm. In mixing, cement, siliceous sand, limestone fines and crushed limestone were blended first and then, high-range water reducing admixture and water were added to the mixture. Steel fibers were scattered on the mixture and carefully mixed to achieve a uniform distribution of the fibers in the concrete. The specimens were cast in steel moulds and compacted on a vibration table. All the specimens were demoulded after about 24 hours, stored under wet burlap, at 20°C until 28 days of age and then laboratory air-cured until testing days at 160 days.

For the toughness tests, plates with dimensions of 600x600x100 mm, for compressive and modulus of elasticity tests, three cylinders of 150 mm diameter and 300 mm height, and for the splitting test, six disc specimens of 150 mm diameter and 60 mm height were prepared. A minimum of three specimens of each concrete mixture were tested under each type of loading condition. Standard strength tests were conducted in accordance with European Standards (EN 206 and EN 12390). The test for the determination of the toughness of SFRC plates was performed according to EFNARC test technique. A center point load was applied through a contact surface of 100x100 mm. The deflection at the center of plate was measured simultaneously by using two linear variable displacement transducers (LVDTs). The load was applied by an MTS actuator of 250 kN capacity and loading rate was 1 mm/min. The load versus center deflection curve for each plate was obtained by recording the average of two deflection measurements taken at the bottom.

Based on the test results, it was found that the fiber volume fraction and the fiber aspect ratio has no effect on the compressive strength and modulus of elasticity and no significant change occurs when the fiber volume fraction is increased. On the other hand, the addition of steel fibres into concrete may improve its toughness rather than its compressive strength. The diameter of the steel fibers and possibly their orientation may play a role in compression. On the other hand, the addition of steel fibers into concrete may have an effect of increasing the ductility in the compressive failure rather than the compressive strength itself. In concretes with water/cement ratios of 0.45, it was shown that the splitting tensile strength increases with increasing steel fiber volume fraction. In concretes with water/cement ratios of 0.45, for the aspect ratio of 65, an increase of the fiber content from 0 (i.e. normal concrete) to 40 kg/m³ has resulted in an increase of 25 % in corresponding splitting tensile strength, for the aspect ratios of 55 and 80, this increase was 21 % and 15 %, respectively. In concretes with water/cement ratio of 0.70, there is no significant effect of the fiber volume fraction on the splitting tensile strength. It can be also concluded that more significant enhancements in the splitting tensile strengths can be found in SFRCs with the fiber aspect ratio of 65, particularly for the lower water cement ratios (i.e., w/c=0.45).

Along the fracture plane, the opening and propagation of the crack are controlled by the steel fibers. During the crack propagation some fibers are broken but some of them are pulled-out of the matrix. After completion of the splitting tests the fracture surfaces were examined. In most cases, the fibers with the aspect ratio of 65 (L/d=

65) were not broken, but were pulled out of the matrix. However, the fibers with the aspect ratio of 80 ($L/d=80$) were broken into two parts. The results obtained for the fibers with $L/d=65$ (with a length of 60 mm and a diameter of 0.92 mm) might be due to their larger cross section compared to that of fibers with $L/d=80$ (with a length of 60 mm and a diameter of 0.75 mm). The mechanical mismatch between steel fibers with $L/d=80$ and concrete matrix may have also played a role in this behavior. In this study, tensile strength of steel fibers used was 1100 MPa.

It was clearly seen that as the fiber volume fraction increases, toughness increases. Depending on their aspect ratios and volume fractions of fibers used, toughness and first crack loads of SFRC plates with the water-cement ratio of 0.45 increased as a result a high ductility. The increase in the toughness is because of the high energy of fiber pull-out and fiber debonding in the fracture process. The reason for the increase in toughness with increasing fiber volume fraction and its aspect ratio stems from a great number of fibers forming a bridge in the tortuous crack propagation. Steel fibres carry loads starting from the matrix cracking until the crack formation in fibre-matrix interfacial zone occurs which is the evidence of how steel fibres convert concrete from quasi-brittle material into a ductile form.

First crack load of SFRC plates increased as the fibre aspect ratio and fibre content increased. Maximum amounts of increase in first crack load, which were 45% and 25%, were obtained at the aspect ratio of 65 and the fibre content of 60 kg/m³ for water/cement ratios 0.45 and 0.70, respectively.

For water/cement ratio of 0.45 and aspect ratio of 55, the fracture energies of SFRC plates of fibre content 20, 40 and 60 kg/m³ are determined as 756, 1037 and 1245 Joule, respectively. Similarly, for aspect ratio of 65, those values are obtained as 832, 1357 and 1849 Joule respectively, and for aspect ratio of 80, those values are obtained as 989, 1032 and 1412 Joule, respectively. For water/cement ratio of 0.70 and aspect ratio of 55, the fracture energies of SFRC plates of fibre content 20, 40 and 60 kg/m³ are determined as 426, 642 and 908 Joule, respectively. Similarly, for aspect ratio of 65, those values are obtained 771 Joule, 1069 Joule and 1500 Joule, respectively, and aspect ratio of 80, 741 Joule, 1239 Joule and 1618 Joule for respectively

The full factorial design for two independent variables consists of $3^2=9$ mixtures. In each series, nine experimental data for each response of SFRCs, were fitted to a polynomial type of mathematical model by using analysis of variance (ANOVA). After building the regression model and establishing relationships between mix design variables, all independent variables are varied simultaneously and independently in order to optimize the objective functions. A numerical optimization technique using desirability functions which are defined for each response can be used to optimize the responses simultaneously.

To attain a more ductile concrete, a concrete with the highest toughness (T) and the highest splitting tensile strength (f_{st}) is to be obtained. The cost of the steel fibers used in the production of composites is also important when the application is of concern. Therefore, the volume fraction of steel fiber must be minimized to get an economical mixture. So it is necessary to maximize toughness and splitting tensile strength, and minimize fibre content, simultaneously. In this work, for building the

regression model and optimization, a commercially available (Design-Expert) software package was used. The results show that the predictive power of the polynomial regression model is satisfactory. The addition of steel fiber into concrete improves toughness of concrete significantly. The longer steel fibers provide higher toughness results than the shorter ones. The toughness of SFRC depends on both the fiber volume fraction and the fiber aspect ratio.

Depending on the experimental results, for each water /cement ratio ($w/c=0.45$ and 0.70), a three-level ($L/d=55, 65$, and 80) full factorial experimental design with two variables; aspect ratio (L/d) and fibre content ($V_f=20 \text{ kg/m}^3, 40 \text{ kg/m}^3, 60 \text{ kg/m}^3$), was made by using RSM. As a result of optimization made for maximizing toughness and splitting tensile strength and minimizing fibre content, optimum fibre content was determined to be 38.8 kg/m^3 at aspect ratio of 65 for water/cement ratio of 0.45 . Splitting tensile strength and toughness values obtained at this fibre content were 6.1 MPa ve 1324 Joule , respectively. Besides, optimum values of fibre content at aspect ratios of 55 and 80 were 44.4 ve 42.4 kg/m^3 . The toughness and splitting tensile strength values corresponding to these optimum values were 1072 and 1176 Joule , and 6.1 MPa and 5.6 MPa , respectively. Similarly, optimum fibre content was determined to be 37.7 kg/m^3 at aspect ratio of 80 for water/cement ratio of 0.70 . Splitting tensile strength and toughness values obtained at this fibre content were 4.0 MPa ve 1132 Joule , respectively. Optimum values of fibre content at aspect ratios of 55 and 65 were 42.3 ve 37.0 kg/m^3 . The toughness and splitting tensile strength values corresponding to these optimum values were 670 and 1018 Joule , and 3.9 MPa and 4.1 MPa , respectively.

1. GİRİŞ

Beton günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesi olma özelliğini korumaktadır. Betonun ekonomik ve dayanımlı olması yanında uzun süreli performansa sahip olması da istenir. Uzun açıklıklı köprülerin, yüksek binaların, yer altı yapılarının ve diğer alt yapıların inşa edilebilmesi, özellikle dayanımı, rijitliği, tokluğu, sünekliği ve dayanıklılığı iyileştirilmiş yapı malzemelerinin kullanılmasıyla mümkün olmaktadır. Bu özelliklere sahip malzemelerin son yıllarda geliştirilmesi ile bu tür malzemeleri geleneksel taşıyıcı yapı malzemelerinden ayrılarak dayanıklılığı arttırılmış olan “ yüksek performanslı malzemeler ” adı altında toplanmıştır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında bu tür malzemelere ihtiyaç giderek artmakta bazen süneklikte performansın bir ölçüsü olarak kabul edilmektedir.

Son yıllarda beton teknolojisinde büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Buna bağlı olarak günümüzde küp basınç dayanımları 200-800 MPa, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında değişen ve kırılma enerjileri 30000 J/m²’ yi aşan yüksek performanslı betonlar üretilmektedir. Bu tür betonlar Reaktif Pudra Betonu (RPC) olarak adlandırılmakta, süneklikleri normal betonlarınkine kıyasla 300 kat daha fazla olabilmekte ve SIFCON’ da ise (matrisi; ince kum, silis dumanı, su ve çimentodan oluşan hacmen %20’ ye kadar çelik tel içeren beton) kırılma enerjisi normal betonunkinin 1350 katına kadar çıkmaktadır [1]. Reaktif Pudra Betonların en zayıf faz olan çimento hamuru-agrega arayüzeyinin iyileştirilmesi ve boşlukların azaltılması için ultra incelikteki silis dumanı (mikrosilis) kullanılmakta ve yüksek dayanımlara ulaşabilmek için su/bağlayıcı oranları düşük tutulmaktadır. Bu betonların sünekliğini artırmak için de kısa kesilmiş çelik teller kullanılmakta ve bazen taze halde sertleşme süresinin başlangıcında basınç altında ısıtılma işlemi uygulanmaktadır [2].

Yüksek Dayanımlı Betonların (YDB) en büyük sakıncası normal betonlara göre daha gevrek olmaları ve enerji yutma kapasitelerinin daha düşük olmasıdır, dır, yani gevrekliğin artmasıdır. Bundan dolayı YDB’ların kullanım alanları sınırlı

kalmaktadır. Deney tekniklerinde ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak beton gibi yarı-gevrek malzemelerin davranışlarının araştırılması konusunda önemli ilerlemeler olmuştur. Yüksek dayanımlı betonların sünekliklerinin artırılması, deney tekniği ve yöntemlerinin geliştirilmesi konularındaki çalışmalar ise günümüzde halen güncelliğini korumaktadır.

Çimento hamuru, agrega ve bu iki malzeme arasında kalan arayüzeylerden oluşan üç fazlı kompozit malzemenin genel olarak yorulma, aşınma ve çekme dayanımı ile çatlama sırasında enerji yutma ve çekme şekil değiştirme kapasitesi açısından olumsuzluklar sergiler. Yüksek dayanımlı betonların normal betonlara kıyasla gevrek bir yapıya ve daha az şekil değiştirme yeteneğine sahip oldukları bilinmektedir. Diğer yapı malzemelerine göre daha ekonomik olan betonun belirtilen bu zayıf özelliklerinin iyileştirilmesi uygulama alanlarının artırılması açısından önemlidir. Liflerin betona katılmasıyla betonların enerji yutma kapasitelerinde diğer bir deyişle sünekliklerinde belirgin iyileştirmeler elde edilmektedir.

Bilinen en eski lif takviyesi kerpiç duvarların sıvasında kullanılan saman takviyeli kildir.

20. yüzyılın son çeyreğinde lifli betonlar üzerinde birçok çalışma yapılmış ve bu konuda önemli mesafeler kaydedilmiştir. Öncü çalışmalar 1963 yıllarında betonda cam lifi kullanımudur. Daha sonraki çalışmalarda ise farklı lif tiplerinin ve içeriklerinin etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda beton içerisinde süreksiz bir şekilde dağılı olarak bulunan çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımı arttırdığı görülmüştür [1,3-11]. Ayrıca gevrek davranışa sahip ultra yüksek dayanımlı betonların sünekliği çelik tel kullanılmasıyla arttırılmıştır [2].

Çelik Tel Donatılı Beton (ÇTDB)'ları normal betonlardan ayıran en belirgin özeliği süneklik ve enerji yutma kapasitesindeki farklılıklardır. Çelik tellerin betona katılmasıyla sağlanan başlıca yararlar şöyle sıralanabilir; a) Yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton üretimi olanak sağlaması, b) Donatı korozyonun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi, c) Etkin çatlak kontrolü, d) Dayanıklılığın arttırılması, e) Donatı işçiliğinde kaydedilen azalma [1].

Çelik tel kullanımının betonlar üzerindeki asıl yararı matris çatlamasından sonra görülmektedir. Ani göçmeyi önlemek için büyük enerji yutma kapasitesine sahip betonların elde edilmesinde çelik tel kullanımı önemli bir yere sahiptir [4, 12]. Ayrıca ÇTDB'lar endüstriyel zemin betonları, tünel kaplamaları ve beton borular gibi zemine oturan elemanların üretiminde de geleneksel donatı betonların yerine tercih edilebilir [13]. Çelik tellerin betonların sünekliği yani enerji yutma kapasitesinde yaptığı iyileştirmeler özellikle deprem kuşağında olan ülkemiz için ayrı bir önem taşımaktadır. Bundan dolayı stratejik yapılarda klasik donatı ile birlikte de kullanılabilirler.

Çelik tel donatılı betonlar (ÇTDB), normal betonlara oranla sağladıkları üstünlüklerden dolayı kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Betonda çelik tel kullanımının betonun mekanik davranışı ve diğer özellikleri üzerine etkileri, ayrıca bu tür betonların tasarım ilkeleri konusundaki çalışmalar bilgisayar teknolojisindeki ve yeni deney tekniklerindeki gelişmelere bağlı olarak sürmektedir.

Bu çalışma farklı su/çimento oranlarında çelik tel narinliğinin ve içeriğinin betonların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasını ve çelik tel donatılı betonların enerji yutma kapasitelerine bağlı olarak maksimum sünekliği (minimum gevrekliği) ve maksimum yarmada çekme dayanımını sağlayacak minimum tel içeriklerinin (minimum maliyet) elde edilmesini içermektedir. Deney sonuçların modellenmesi ve optimum tel içeriklerinin belirlenmesi matematiksel ve istatistiksel yaklaşımların ortak kullanılması esasına dayanan Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYY) ile yapılmıştır.

2. ÇELİK TEL DONATILI BETONLAR-LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Genel

Çelik tel donatılı beton, agrega, çimento ve su gibi temel beton bileşenlerine, mineral ve/veya kimyasal katkıların yanı sıra çelik tel katılmasıyla elde edilen bir kompozit malzemedir. Çelik teller yalın betonların ve betonarme elemanların performanslarının iyileştirilmesi için kullanılır.

Bilindiği gibi geleneksel betonlar gevrek malzemelerdir ve sünek olmayan bir davranış gösterirler. Çekme gerilmesi altında donatısız betonlar çatlar. 1800’li yılların başında bu sorun çekme yükünü alacak donatı çubuklarının kullanılmasıyla aşılmıştır.

Gevrek bir malzeme olan geleneksel betonlar, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı ve çatlak dayanımı sonrası yük taşıma kapasiteleri bakımından zayıf özelliklere sahiptirler. Çelik tellerin betona katılmasıyla betonların bu özelliklerinde belirgin iyileştirmeler elde edilmiştir. Çelik teller gevrek olan betonun çekme şekil değiştirmesini artırarak betona yarı-sünek davranış özeliği kazandırır. Bundan dolayı betonun çatlama dayanımı ve tokluk özellikleri iyileşme gösterir.

Çelik tellerin betona katılmasındaki amaç, çatlak kontrolünü sağlamak ve tepe yükü sonrası çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı koymaktır. Genel olarak ÇTDB’ların davranışını şu iki özellik belirler; eğilme dayanımı ve eğilmedeki tokluğu. Çelik telin narinliği ve kullanılan tel miktarı ÇTDB’ların özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerdir.

2.2. Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller

Betonun zayıf özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılan çelik telin tanımı tel boyunun eşdeğer tel çapına bölünmesiyle elde edilen boy/çap oranı olarak kabul edilmektedir [14]. Bu oran aynı zamanda telin narinliğini ifade etmektedir. Betonun lifle donatılmasında genellikle daire kesitli çelik lifler kullanılmaktadır, bunun yanı

sıra dikdörtgen kesitli çelik teller de vardır. Boyları 30-60 mm., çapları ise 0,5-1,0 mm. arasında değişen çelik tellerin çekme dayanımlarını 345 N/mm^2 - 2000 N/mm^2 arasında değişmektedir [1] Uçları kancalı üretilen çelik tellerin sıyrılma dayanımları düz olanlara oranla daha yüksek olmaktadır [4,15].

Düşük karbonlu çelikten üretilen teller genellikle

1. Soğukta çekilen tellerin kesilmesiyle,
2. Çelik plakaların kesilmesiyle,
3. Erimiş haldeki çelik potasından çıkarılarak

olmak üzere üç farklı şekilde elde edilmektedir. TS 10153'e göre çelik tel sınıfları ve tipleri şu şekilde verilmektedir [16].

Çelik Sınıfları ve Tipleri;

A Sınıfı: Düz, pürüzsüz yüzeyli teller (Şekil 2.1.)

B Sınıfı: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller

Tip 1: Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış teller (Şekil 2.2.a)

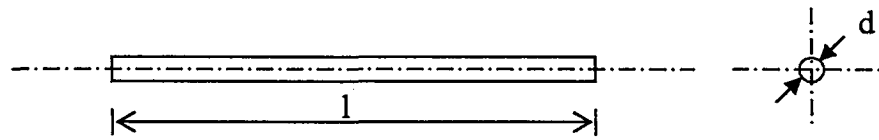
Tip 2: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller (Şekil 2.2.b)

Tip 3: Ay biçimi dalgalı teller (Şekil 2.2.c)

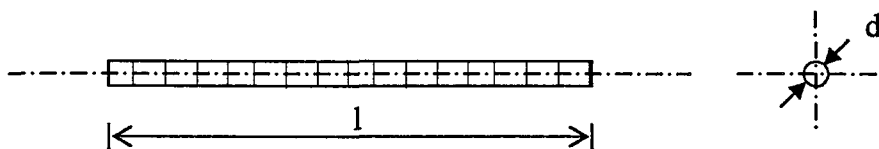
C Sınıfı: Sonu kancalı teller

Tip 1: İki ucu kancalı teller (Şekil 2.3.a)

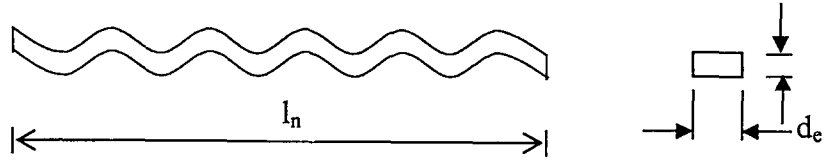
Tip 2: Tek ucu kancalı teller (Şekil 2.3..b)



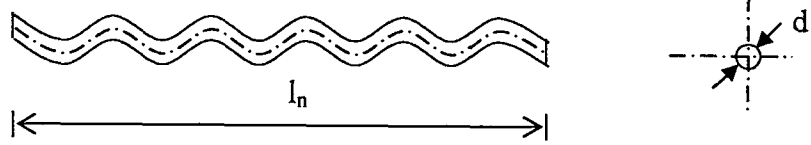
Şekil 2.1. Düz, pürüzsüz yüzeyli tel



a) Üzerinde girintiler ve çıkıntılar oluşturulmuş tel

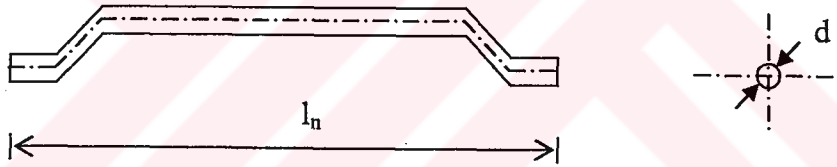


b) Uzunluğu boyunca dalgalı teller

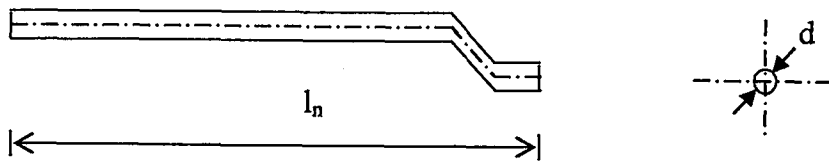


c) Ay biçimi teller

Şekil 2.2. Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller



a) İki ucu kancalı tel



b) Bir ucu kancalı tel

Şekil 2.3. Bir ucu veya iki ucu kancalı tel

2.3. Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları

Çelik tel içeren betonlar normal betonlara oranla sağladıkları belirgin üstünlüklerinden dolayı oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler. Bu kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir.

a) Püskürtme beton uygulamaları; Çekme donatısı kullanılmadan yüksek dayanımlı beton elde edilir. Kaplama kalınlığı, düz ve hasırlı olan beton kaplama kalınlıklarına oranla daha az olmaktadır. Ayrıca kırılmaya karşı yüksek enerji yutma kapasitesinden dolayı daha büyük bir süneklik sağlanır. Kazıların ve temellerin desteklenmesi, kanal kaplamaları, köprü mesnetlerinin korunması, bozulan deniz yapılarının ve köprülerinin onarımı, bazı sığınakların kaplamaları gibi uygulama alanları vardır. Ayrıca yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olmasından dolayı kaya ve toprak zeminlerin şev stabilizasyonu veya istinat duvarı yapımında da kullanılmaktadır

b) Yol kaplamaları; Beton yol kaplamalarında ve geleneksel yolların temel döşemesinde yükleri alt temele aktaran eleman olarak kullanılmaktadır. Genellikle yol temellerinde zayıf beton veya bitümlü malzeme kullanılır. Bu tür kaplamalar yüksek trafik yoğunluğu olan yerlerde büyük ölçüde yüzey düzensizliğine neden olurlar. Bunu karşılık çelik teller, oluşan çekme gerilmelerinin bir kısmını taşır ve çatlamaya karşı koyar. Ayrıca yüksek trafik yoğunluğuna sahip yollarda büyük önem taşıyan, kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı yüksek beton elde edilmesini sağlar. Bunun yanında, yol yapımında daha uzun bağlantı mesafelerinin uygulanmasına imkan verir. Yol kaplamalarında kullanılan ÇTDB'ların en belirgin avantajı normal betonlara kıyasla daha yüksek süneklığe sahip olmalarıdır. Ayrıca yüksek kırılma enerjileri ile bağlantı boyunca çatlakları ve yüzeylerin pullanma ile dökülmelerini büyük ölçüde azaltır ve önler. Beton yollarda çelik tel kullanımı, geleneksel kaynaklı donatılı betonlara kıyasla daha ekonomiktir. Taşıma ve yerleştirme (işçilik dahil) maliyeti ÇTDB'lar da daha düşük olmaktadır. Ayrıca daha ince kaplamaya kalınlığına imkan vermesi ve donatının döşeme içine gelişigüzel yerleştirilmesi gibi sorunların olmaması da çelik tellerin diğer üstünlüklerini göstermektedir. Yüksek trafik yoğunluğuna sahip beton yollarda çelik tel kullanımının en belirgin üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir [17];

1. Yüksek sünekliği sahip olması,
2. Kaplama kenar ve köşelerin kırılmaya karşı dirençlerinin iyileştirilmesi,
3. Betonun rötresinde azalma,
4. Geleneksel donatı yerleştirilmesindeki hataların ortadan kalkması,
5. Geleneksel beton yollara kıyasla yapım süresinin kısa olması,
6. Bütün doğrultularda daha yüksek çekme şekil değiştirme kapasitesi,
7. Çatlak kontrolünün kolay olması ve matris kırılmasından sonra yüksek enerji yutma kapasitesi.

Beton yollarda genellikle 50-60 mm. uzunluğunda yüksek çekme dayanımı ve narinliğe sahip nervürlü çelik teller ile 20-25 mm. uzunluğunda yüksek sünekliğe ve düşük çekme dayanımına sahip dalgalı teller kullanılmaktadır. Daha kısa tel kullanımı çatlak yayılmasının kontrolü ve çekme dayanımı açısından uygun olmamaktadır [18].

c) Su ve deniz yapıları; Geleneksel betonlara kıyasla, yüksek sünekliği, aşınma ve darbeye karşı direnci, deniz ortamında bozunmaya karşı direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı su yapılarında kullanılmaktadır. Özellikle dalgakıran yapımında, dolu savak, savak yatağı ve savak kapakları, dinlendirme havuzu gibi su yapılarının tamir ve bakımında, açık kanal kaplamalarında, toprak dolgu barajların sızmazlığının azaltılması için yüzeylerinin ince kaplamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca aşınma direnci yüksek olduğundan kavitasyon hasarlarına karşı kaplama olarak kullanılabilir [13].

d) Zemin kaplamaları; Yük taşıma kapasitelerinin yüksek olması, çatlak kontrolü sağlaması, dinamik ve ani yüklemeler karşı yüksek direnç göstermesinden dolayı endüstri yapılarının zeminlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, ambar ve hangar zeminlerinde, iskele ve rıhtım kaplamaları gibi kullanım alanları bulunmaktadır.

e) Prefabrike elemanların üretimi; Yüksek dayanıma, sünekliğe ve dayanıklılığa sahip birçok prefabrike yapı elemanın üretiminde kullanılmaktadır. Bunlar, muayene bacaları, yağ ayırıcıları, transformatör kabinleri, yağmur suyu kolektörleri, atık su tankları, atık madde tankları, cephe ve bölme duvar elemanları, kanalizasyon boruları, tünel segmanları, monoblok garajlar, demiryolu sınır taşları, su drenaj blokları, atık depolama kutuları, ev mahzenleri, kablo kanalları, yalıtılmış duvar

panelleri, santral kabinleri, prekast banyo kabinleri, çatı elemanları, öngerilmeli çatı olukları, otobüs durakları, yiyecek kilerleri, tren tünellerindeki saklanma yerleri, baca elemanları, birleştirilmiş kanallar ve bakım yolu, demiryolu traversleri, demiryolu taban döşemesi, refrakter prekast elemanlar, istinat duvar elemanları, temel blokları, prekast banka kasaları ve kanaletlerdir [1]

f) Depreme dayanıklı stratejik yapılar; Sünekliliğin yüksek olması istenilen bu tür yapılarda kullanılabilir. Çelik tel donatılı betonların sünekliliği normal betonlara oranla yüksek olduğundan çarpma ve titreşim gibi dinamik yük etkilerine karşı daha dayanıklıdır. Bu nedenle depreme dayanıklı her türlü yapıda kullanılabilmektedir.

g) Kabuk yapılar ; Kesit kalınlıklarının azaltılmasına imkan verdiği için ince kabuk yapılarda, kubbelerde ve mimari açıdan kalınlığı sınırlı olan yapı elemanlarında kullanılmaktadır [19].

h) Güvenlik Yapılarında; Sığınaklar, sığınak kapıları ve güvenlik odalarının yapımında kullanılmaktadır.

2.4. Çelik Tel Donatılı Beton Karışımı

Çelik tellerin karışım içerisinde üniform bir şekilde dağılması oldukça önemlidir. Şekil 2.4' de çelik tellerin taze beton içerisindeki dağılımı görülmektedir. Çelik tellerin karışımında homojen olarak dağıtılması ve karışımından sonra da düzenli dağılımın korunmasının sağlanmasını çelik tellerin betonun özellikleri üzerinde yapacağı iyileştirmeyi doğrudan etkilemektedir. Bu işlem, harmanlama ve karıştırma işlemi sırasında yapılmalıdır. Katkı kullanılarak su azaltılması ile bu her zaman sağlanamamaktadır. Agregata karışımının optimizasyonu da iyi bir çözüm olmaktadır. Agregata karışımı maksimum yoğunluk elde edilecek şekilde seçilirse bunun için hamura daha az ihtiyaç kalır. Karışımın toplam rötresi, hamurun özelliklerine, çimento, su ve katkı miktarına, sıcaklık ve agregata tipine bağlıdır [20]. Düşük su içeriği daha az rötre demektir. Çimento hamuru-agregata bağına yakın bölgeleri etkileyen en önemli etkenin su/çimento olduğu söylenebilir. Düşük su/çimento oranlarında ara yüzeyde düşük-yoğunlukta bir bölge elde edilmesine karşılık, ara yüzeyin bölgesinin genişliği azalmaktadır.



Şekil 2.4. Çelik tellerin taze beton içerisindeki dağılımı.

Yapılan çalışmalarda dairesel kesitli düz ve kancalı çelik tellerin betonun özellikleri üzerinde en etkin iyileştirmeyi yaptığı gözlenmiştir [3,9,11,21]. Beton karışımında kullanılan bu tür tellerin narinlik oranı 20 ile 100 arasında ve katılma oranı ise hacimsel olarak %0,5 ile %2,5 arasında değişebilmektedir. Katılım oranı artıkça çelik telin karışım içerisinde topaklandığı ve homojen bir dağılım göstermediği, hatta basınç dayanımının normal betonun basınç dayanımına oranla düşük olduğu gözlenmiştir [22,23]. Yüksek oranda çelik tel kullanımı karışım içerisinde tellerin topaklaşmasına ve buna bağlı olarak matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına ve büyük hava boşluklarına neden olmaktadır. Bunun sonunca çelik tellerin betonların özellikleri üzerindeki beklenen iyileştirme düşük seviyelerde kalabilmektedir. Taze beton içerisinde topaklanmayı önlemek ve işlenebilirliği istenilen düzeyde ayarlayabilmek için kullanılan çelik tel miktarı ve narinliği için bir üst sınır konulmasında yarar vardır. Yapılan çalışmalarda genellikle bu sınır değerler tel hacmi için %2 ve narinlik için 100 olarak belirtilmektedir [17]. Ayrıca su azaltıcı katkılarla ÇTDB'ların işlenebilirliği istenilen şekilde ayarlanabilmektedir. Karışımında ince agrega kullanılması çelik tel miktarının artırılması ve işlenebilirliğin sağlanması için uygun bir çözüm olmaktadır.

Çelik tellerin betonun özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerin narinlik oranı ve kullanılan lif miktarıdır [6,17,19,24,25]. Narinlik oranı bir çelik telin geometrik özelliklerini tanımlamak için kullanılan sayısal bir parametredir. Bu oran, dairesel kesitli teller için tel boyunun tel çapına oranı ve dairesel kesitli olmayan teller için ise eşdeğer lif çapına oranıdır. Genellikle kullanılan çelik tellerin narinliği 20 ile 100 arasında ve boyları ise 6,4 mm ile 76 mm. arasında değişmektedir [14]. Narinlik azalırca çelik tel-matris bağı kritik olmaktadır. Buna karşılık narinlik artarsa

topaklanmaya ve homojen dağılımın elde edilememesine bağlı olarak karıştırma problemi artmaktadır [26]. Genel olarak yüksek tel narinliğinin betonlar üzerinde en önemli iyileştirmeler yapacağı beklense de tel narinliğinin, karıştırma, yerleştirme ve mastarlama işlemlerinde ortaya çıkan problemler nedeniyle sınırlanmasının gerekliliği ortaya konmuştur [17, 27].

Chang ve Chai [28] birim hacimdeki çelik tel yüzey alanı artıktıkça betonun işlenebilmesinin azaldığını ve çelik tellerin yeterli etki gösterebilmesi için su miktarının artırılması veya su azaltıcı katkı kullanılması gerektiğini ifade ettiler. Chenkui ve Guafon [29] çelik tel boyu/kaba agrega boyutu oranının dayanıma etkisi araştırdı ve bu oranın 1,5 ve 2 arasında değiştiğini belirttiler. Bu oranlar dışında çelik telin etkisinin daha az olduğunu ifade ettiler. Çelik tellerin kaba agrega-çimento hamuru ara yüzeyini iyileştirme eğilimi gösterdiği ve mikro çatlakların bu ara yüzeyde gelişmesinden dolayı çelik tel boyunun kısa olması durumunda çatlakları köprüleyemeyeceği ve çatlak genişlemesini durdurma etkisinin az olacağı belirtildi. Buna karşılık, çelik tel boyunun çok büyük olması durumunda işlenebilmenin kötü olacağını ve buna bağlı olarak betonun özelliklerinin olumsuz etkileneceğini ifade ettiler. Ayrıca, çelik tellerin sadece ince agrega içeren betonların takviyesinde değil, maksimum tane çapı 40 mm.'ye kadar olan betonların takviyesinde de kullanılabileceğini, ancak tel boyunun 35 mm. den küçük olmaması gerektiğini belirttiler.

Eren ve Çelik [30] beton takviyesinde kullanılan çelik tel çapının artmasıyla betonun VeBe süresinin arttığını ve buna bağlı olarak işlenebilmenin azaldığını ifade ettiler. Benzer olarak, Yıldırım [31] ve Taylor ve diğ. [32] çelik tel kullanımının betonun çökme değerini düşürdüğünü ve VeBe işlenebilme süresini yükselttiğini belirttiler.

Bayramov ve diğ. [33] çelik tellerin taze betonun işlenebilirliğini azalttığını, özellikle uzun çelik tel kullanıldığında bu etkinin belirgin olarak görüldüğünü belirttiler. İşlenebilirliği etkileyen en önemli faktörlerin çelik tel narinliği ve tel hacmi olduğunu ifade ettiler. Ayrıca çelik tellerin taze betonun işlenebilirliğe etkisinin belirli bir seviyede tutmak ve betonun özellikleri üzerinde yapacağı iyileştirmenin korunması ve sağlanması için kullanılacak çelik tel hacminin ve narinliğinin sınırlandırılmasının gerekliliğini vurguladılar.

Soroushian ve Bayasi [11] elik tel tipinin taze betonun işlenebilmesini önemli ölçüde etkilediğini ifade ettiler. Farklı tel tipleri kullanılarak yaptıkları çalışmalarda elik tel içeren taze betonların işlenebilmesinin bütün elik tel tiplerinde normal betonlara kıyasla azaldığını, sadece kıvrımlı elik tel içeren taze betonların işlenebilmesinde daha çok değişiklik olduğunu ve elik tel narinliğinin belirli bir değerden fazla olmaması gerektiği sonucuna vardılar.

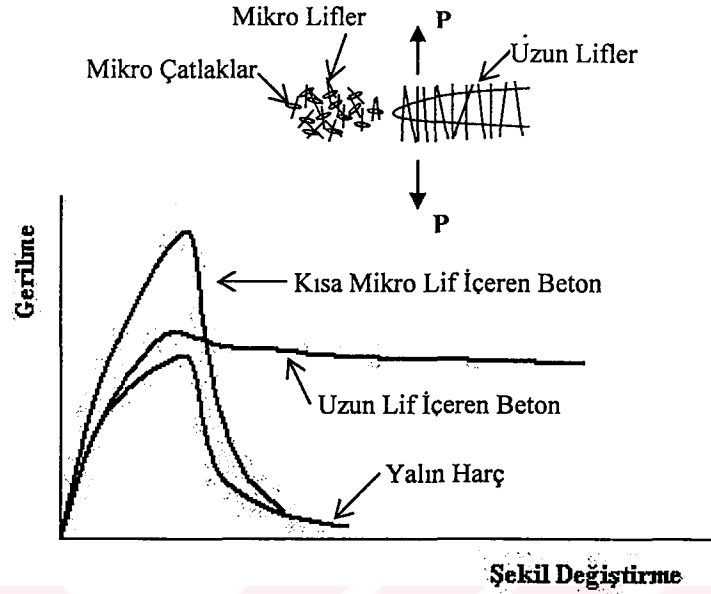
2.5. elik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı

elik Tel Donatılı Beton hidrolik bağlayıcı, agrega ve elik telin karışımı ile üretilen betondur. Betona ikamesiyle matriste süreksiz ve rastgele dağılı olarak bulunan elik teller, yükler ve çevresel değişiklikler altında betonda çatlak gelişimini köprüleme etkisi yapar. elik teller, yeteri kadar dayanıma sahip, elik tel-matris bağı yeterli ve uygun miktarda kullanılırsa çatlak genişliğini küçük düzeyde tutar ve betonun tepe yükü sonrası büyük şekil değişirme yaparak yk taşımasını sağlar. Böylece yüksek sünekliliğe sahip betonlar elde etmek mümkün olur.

elik tellerin genel olarak betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azaltmakta, betonun şekil değişirme kapasitesini, tokluğunu, darbe, yorulma ve çekme dayanımı arttırmaktadır [3,4,6,10,19,28,34,35]. elik teller kendi çekme mukavemetlerine ulaşıncaya kadar beton matrisinde basınç ve çekme yüklerinden dolayı meydana gelecek olan çok sayıdaki kılcal çatlak oluşumunu önlemektedir. Ayrıca, imento matrisi elik telleri bir arada tutarak elik teller vasıtasıyla gerilme transferi yapmakta ve bu şekilde kırılma birim uzamasını elik tellere oranla düşük olan imento hamurunda meydana gelebilecek kılcal çatlaklar önlenebilmektedir. Bunun yanısıra, elik teller mikro çatlak oluşumunu ve yayılmasını geiktirir, ayrıca çatlak köprüleme etkisi ve tutma başarısı ile ÇTDB'ların göçme modunda iyileştirme yapar [36]. Farklı lif boyutlarına sahip liflerin çatlak köprüleme etkisi şekil 2.5' de verildi [37].

elik tellerin betona katılmasıyla betonun sünekliliği ve çatlak direnci büyük ölçüde iyileştirilir. elik teller betonun çatlak oluşumundan sonra yk taşımasını sağlar. Ayrıca karışım içerisinde homojen bir şekilde dağılı bulunan elik teller, betonun sertleşmesi sırasında çekme gerilmeleri ile hamur içerisinde oluşan çok sayıda kk boşlukları ve çatlaklara karşı köprüleme etkisi yaparak rötre çatlaklarının oluşumunu

ve gelişimini büyük ölçüde azaltır [1,36]. ÇTDB'ların normal betonlara kıyasla genel özellikleri Tablo 2.1' de verilmektedir.



Şekil 2.5. Farklı lif boyutlarının çatlak köprüleme etkisi [37].

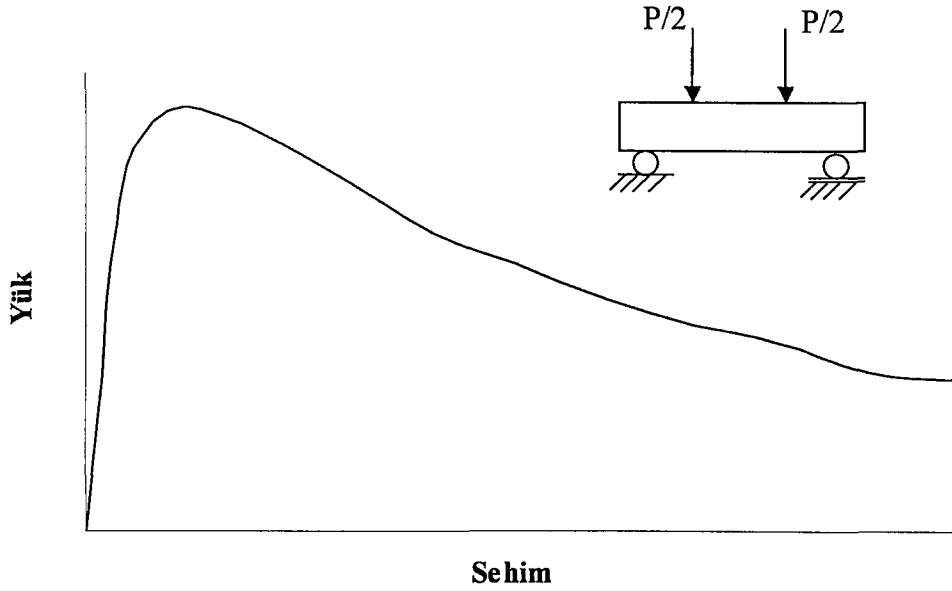
Beton elemanların kırılma davranışlarını daha iyi anlaşılması için çatlak sonrası davranışları büyük önem taşımaktadır. Gevrek matrislerde göçme çatlak, sonrası ani olarak görülmektedir, buna karşılık çelik tel içeren betonlarda sünek olan teller matrisin çatlak sonrası yük taşımasını sağlar, böylece yapının bütünlüğünü korur [17]. Çelik teller gevrek olan betonun çekme şekil değiştirmesini artırarak betona yarı-süneklik kazandırır. Bundan dolayı çelik tellerin betonun çatlama dayanımı ve tokluk özelliklerinde iyileşme sergilemesi beklenen bir sonuçtur.

Çelik tellerin betona ikamesi ile betonun çekme yükü taşıma kapasitesi artar, ayrıca taşıma gücüne erişmesine rağmen yük taşıma özeliği gösterirler. Yani ilk kırılma yükünden sonra yüksek bir süneklığe sahip olurlar, bu da kırılma enerjilerinin yüksek olmasını sağlar [24,38]. Şekil 2.6'da çelik tel donatılı bir kirişin tipik yük-sehim eğrisi görülmektedir. Çelik tel donatılı betonların maksimum yük taşıma kapasiteleri çelik tellerin beton matrisinden sıyrılma dirençlerine bağlıdır. Çünkü çelik teller yüksek akma dayanımına sahip ve çelik donatı çubukları gibi büyük şekil değiştirme yüzeylerine sahip değildir. Bu nedenle, çelik teller beton matrisinde bir noktaya kadar şekil değiştirme yaptıktan sonra matrsten sıyrılma eğilimi gösterirler [26].

Tablo 2.1. ÇTDB'ların normal betonları kıyasla genel özellikleri [17].

Özelik	Açıklama
Aşınma Direnci	Kısmi olarak darbe aşınmasının neden olduğu mikro-kırılma çatlaklarını kontrol eder.
Yorulma Direnci	Düşük tel içeriklerinde bile 1.25-2 kat iyileşme
Donma-Çözünme Direnci	Donma-çözünme çevrimlerinin neden olduğu hasarın azaltabilir. Hava sürükleyici katkıların kullanılması önerilir.
Darbe Dayanımı	2-20 kat iyileşme.
Kopma Modülü	20-50 kg/m ³ çelik tel içeriklerinde ilk çatlak yükünde küçük değişiklik.
Önleşmiş Rötire	Düşük çelik tel içeriklerinde bile daha iyi gerilme dağılımı ile çatlak genişliklerinde %70' lere ulaşan azalma.
Kayma Dayanımı	Düşük tel içeriklerinde bile 1.25-2 kat artış.
Pullanma-Dökülme Direnci	Bütün matris içerisinde dağılan çelik tel takviyesi ile öncelikle bağlantı köşelerinin ve kenarlarının korunması.
Isı Şoku Direnci	Düşük çelik tel içeriklerinde bile önemli ölçüde iyileşme.
Basınç Dayanımı	Küçük değişiklik.
Tokluk	Düşük tel içeriklerinde bile en belirgin iyileşme.

Çelik tellerin betona katılmasındaki amaç, çatlak genişliğinin olabildiğince küçük tutmak ve tepe yükü sonrası çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı koymaktır. Çelik tellerin görevi büyük agregaları bir arada tutmak ve kenetlemek, ayrıca çimento hamurundaki mikro çatlakların açılmasını ve oluşmasını önlemektir. Çelik teller vasıtasıyla çatlak üzerinden gerilme transferi yapılır. Bu şekilde çatlak uçlarında daha düşük gerilme yığılması olur ve böylece çatlak gelişimi önlenir.



Şekil 2.6. Çelik tel donatılı beton kirişlerin tipik yük-sehim eğrileri.

ÇTDB'ların mekanizmaları ilk olarak Romualdi ve Batson (1963) tarafından incelendi [39]. Bu çalışmada, eğilme dayanımındaki ve süneklikteki artışın çelik tellerin çatlak frenlemeye karşı kabiliyetlerine bağlı olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca, ilk çatlak dayanımının çelik teller arasındaki mesafeye bağlı olduğu belirtilmektedir. Çelik tellerin matris içerisindeki mevcut mikro çatlakları frenlemesi ve kesmesi için matris içerisinde yeterli miktarda bulunması ve dağılımının iyi olması gerekir. Bu olay “mesafe mekanizması” olarak adlandırılır [17]. Karışım içerisinde rastgele dağılılı olarak bulunan çelik teller oluşan mikro çatlakları keser ve genişlemesini önler. Çatlak frenleme miktarı kullanılan çelik tel miktarına doğrudan bağlıdır. Matrisin çatlamasından sonra yüklerin bir kısmını taşıyan çelik teller köprü görevi görerek çatlağın ilerlemesi ve yayılmasını yavaşlatır, bu sırada matrisin yük taşımasını sağlar. Bu mekanizma “çatlak köprüleme mekanizması” olarak adlandırılır [17]. Tepe noktası sonrası yük taşıma kapasitesi kullanılan çelik tel tipine ve miktarına bağlıdır. Köprüleme mekanizmasını etkileyen en önemli etken ise çelik tellerin matristen sıyrılma dirençleri, yani çelik tel ile hamur arasındaki aderans olmaktadır. Köprüleme mekanizmasının etkin olabilmesi için matris ile yeterli aderansa sahip çok miktarda uzun tellerin matriste bulunması gerekir. Çelik tellerin uçlarının kancalı oluşu tellerin matris ile ankrajını kuvvetlendirir ve tellerin matristen sıyrılma dirençlerini artırır [27].

Çelik tellerin en önemli etkisi gevrek olan çimento hamurunun tokluğunu önemli ölçüde iyileştirmesidir. Matris içersinde rastgele dağılı olarak bulunan çelik teller matrisin çatlamasından sonra mikro çatlakları tutar, köprüleme etkisi yaparak çatlakların ilerlemesini ve yayılmasını önler ve sınırlar, ayrıca çatlağın kontrollü ilerlemesini sağlar. Matriste ilk çatlak oluşumundan sonra çelik tellerin matrizen sıyrılmaları veya kopmaları için büyük enerji gerekir, böylece matrisin tokluğu, tekrarlı ve dinamik yüklere karşı direnci arttırılmış olur [17].

Genel olarak ÇTDB'ların mekanik davranışını iki parametre belirler; eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu. Tokluk göçme anına kadar yutulan toplam enerjiyi ifade eder. ÇTDB ların tokluklarını ve maksimum yük taşıma kapasitelerini etkileyen en önemli faktörlerin başında tel tipi, tel hacmi, narinlik ve telin matris içersindeki yönelmesi gelmektedir. Narinlik, çelik tel boyunun tel çapına bölünmesiyle elde edilir ve telin beton ile temas yüzeyini ifade eder. Tellerin matris içersindeki konumu ise genellikle rastgeledir. Matrisin görevi telleri bir arada tutarak lifler arasında gerilme transferi yapmaktadır. Çelik lifli betonlarda yük, sürekli fazı oluşturan matris tarafından süreksiz fazı oluşturan lif fazına aktarılmasıyla taşınmaktadır.

ÇTDB' ları normal betonlardan ayıran en önemli özellik süneklik ve enerji yutma kapasitesindeki farklılıklardır. Matriste ilk çatlak oluşumundan sonra yükler çelik teller tarafından taşınır. Çelik tellerin kendi çekme dayanımları ve çekme şekil değiştirme kapasiteleri yüksek olduğundan matrisin daha fazla yük taşımasını sağlarlar. Çelik tellerin bu etkisi ile gevrek olan matris, elastik ve daha fazla şekil değiştirebilen bir yapıya dönüşür, buna bağlı olarak matris daha sünek bir davranış gösterir. İlk çatlak yükünden sonra, çelik teller tarafından taşınan yüklerin etkisi ile matris içersindeki çelik teller şekil değiştirmeye başlar ve yükün artması ile teller matrizen genellikle sıyrılma eğilimi gösterirler. ÇTDB'ların maksimum yüke (tepe yüküne) ulaştıktan sonra göçmeye kadar olan süreci göçme bölgesindeki çelik tellerin matrizen tamamen sıyrılmasıyla son bulur. Ancak bu davranış çekme dayanımı 1100 N/mm^2 olan geleneksel çelik tel içeren su/çimento oranı düşük, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda farklı olmaktadır. Matris dayanımı yüksek olan ÇTDB'larda çelik teller matrizen sıyrılmadan kopma eğilimi gösterirler, bu sonuç yüksek çekme dayanımına sahip çelik tel üretimini gündeme getirmiştir ve bugün çekme dayanımı 2000 N/mm^2 olan çelik teller üretilmektedir [1].

Çelik teller taze betonun sertleşmesi süresince matrisin büzülmesi ile meydana gelen çekme gerilmeleri ile oluşan mikro çatlakların oluşumunu azaltır, gelişimini ve yayılmasını çatlak ucunda köprüleme etkisi yaparak önler. Ayrıca, matris içerisinde bulunan çelik teller ilk matris çatlamasından sonra köprü görevi yaparak gerilme transferi yaparlar. Çelik tellerin matris içerisindeki en önemli görevi, ilk çatlak oluşumundan sonra çatlak ucundaki meydana gelen gerilme yığılmalarının bir kısmını alması ve bir kısmını ise hamurun sağlam olan kısımlarına aktarılmasını sağlamasıdır, böylece azaltılan çatlak ucu gerilmeleri ile çatlak ilerlemesini ve yayılmasını geciktirir ve hamurun şekil değiştirme kapasitesini, dolayısıyla matrisin tokluğunu artırır.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, ÇTDB'lerin kırılma enerjilerinin narinliğin artmasıyla arttığı, ayrıca iki ucu kancalı tellerin düz olanlara kıyasla daha yüksek sıyrılma yüküne sahip olduğu belirtilmektedir [15,40]. Çelik tel üretimindeki son gelişmelerde geleneksel çubuk donatıların çekme dayanımların 2-4 katı olan çelik teller üretilmektedir.

Taşdemir ve diğ. [13] çelik tel miktarının ve narinliğinin ÇTDB'lerin tepe noktası sonrası davranışını ve tokluğunu etkileyen en önemli iki faktör olduğunu ve bu iki parametrenin artmasının su yapılarında kullanılacak olan betonun mekanik özelliklerini büyük ölçüde iyileştirdiğini ifade ettiler.

Bayramov ve diğ. [33] çelik tel narinliği ve içeriğinin artmasıyla betonların göçmeye kadar enerji yutma kapasitelerinin arttığını ve daha sünek bir davranış gösterdiğini ifade ettiler.

Lange-Kornbak D., ve Karihaloo B.L., [41] ÇTDB'lerin kırılma enerjilerinin kullanılan çelik telin boyunun karesi ile doğru orantılı ve tel çapının karakökü ile ters orantılı olduğunu ifade ettiler.

Swamy ve Mangat [42], çelik tel donatılı betonlarda ilk çatlağın lif sıyrılmasından oluştuğunu, nihai göçmenin ise göçme bölgesindeki liflerin sıyrılması ve yüzeysel kopma gerilmelerinin maksimum çimento hamuru-lif kenetlenme dayanımına ulaşması ile meydana geldiğini söylemişlerdir.

Ezeldin ve Balaguru [43] maksimum aderans yükünde sıyrılmanın çelik tel içeriğinde artma ile arttığı ve tepe yükü davranışın da çelik tel kullanımıyla iyileştiği sonucuna vardılar.

Banthia [44] lif donatılı betonların gerçek üstünlüğünün çatlak gelişimi ve yükleme durumundaki çatlak genişlemelerinde saklı olduğunu gösterdi.

Ramakrishnan ve diğ. [9] iki ucu kancalı ve düz çelik tellerin betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı, tokluk indisi, tepe-noktası yük taşıma kapasitesi ve enerji yutma kapasitelerini araştırdılar. İki ucu kancalı çelik tel donatılı betonların bahsedilen özellikleri üzerinde en iyi performansı gösterdiğini ve ilk çatlak yükünü %90 ve eğilme dayanımını %129 artırdığını ifade ettiler. Düz çelik tellerin ise daha az iyileştirme yaptığını belirttiler.

Balaguru ve diğ. [3] iki ucu kancalı çelik teller, burgulu ve sonlanmış çelik tellerden daha iyi performans gösterdi. Farklı tel boyuna sahip iki ucu kancalı çelik tellerin betonların tokluğu üzerinde fazla etkisinin olmadığı belirti.

Arslan ve Aydın [19] ÇTDB'larda ilk çatlak sonrası dayanımın çelik tel boyuna, tel dağılımına ve telin gerilme-şekil değiştirme özelliklerine bağlı olduğunu ifade ettiler.

Chang ve Chai [28] çelik tel narinlik oranı artıkça ilk çatlak yükü değerinin arttığını ve matris içersinde rastgele dağılı bulunan lifler arasındaki mesafenin 8 mm'den az olduğunda ÇTDB'nun ilk çatlak yükünde büyük artış gözlemlendiği ifade ettiler.

Moyson ve diğ. [45] yaptıkları çalışmalarda ÇTDB'nin ilk çatlak yükünün beton özelliklerine bağlı olduğunu ve çelik tel içeriğinden etkilenmediğini belirttiler.

Soroushian ve diğ. [46] ÇTDB'larda en iyi performansı daha ince uzun ve dayanımı yüksek olan çelik tellerin gösterdiğini ve ayrıca bu liflerin en yüksek matris-lif aderans dayanımı sahip olduğunu belirttiler.

Balendran ve Zhou [47] ÇTDB'larda boyut etkisini araştırdılar ve betona katılan çelik tel hacminin yeterli olması durumunda ($>3\%$) çok sünük betonlar üretilebileceğini ve boyut etkisinin ihmal edilecek düzeyde olduğunu belirttiler. Buna karşılık, düşük tel içeriklerinde boyut etkisi görüldüğünü ifade ettiler. Çelik tel

donatılı betonlarda kritik boyutun 150 mm. aşması durumunda boyut etkisinin önemini kaybettiğini belirtti.

2.6. Çelik Tel Donatılı Betonların Özellikleri

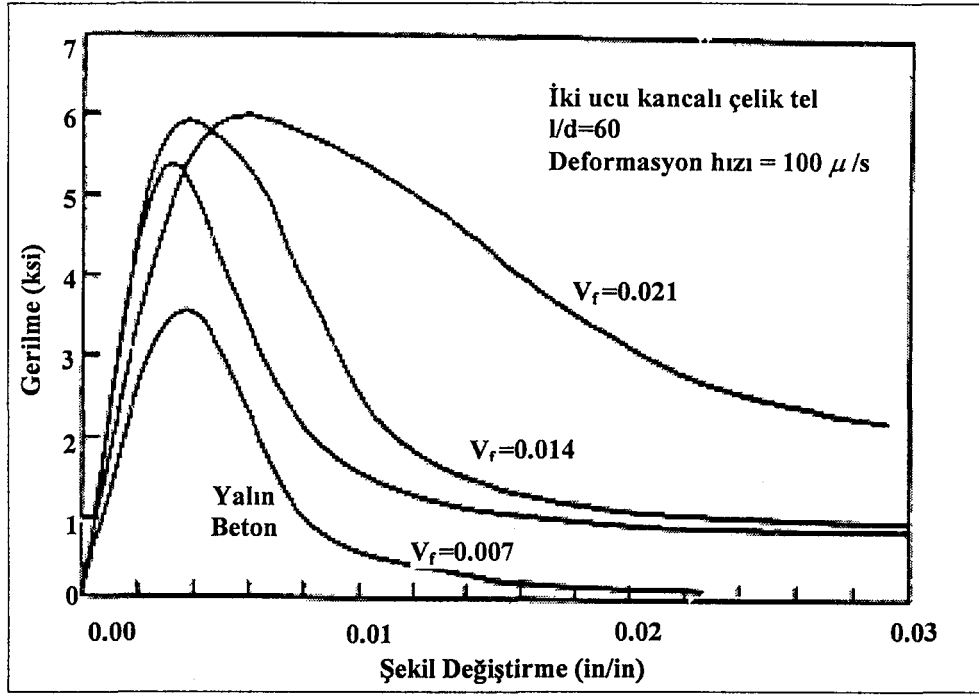
2.6.1. Basınç Dayanımı

Çelik tellerin betonun basınç dayanımına etkisi eğilme ve çekme dayanımlarına nazaran daha azdır [14]. ACI Committe 544 [14] tarafından, %1.5 çelik tel içeriğinde betonların basınç dayanımlarında %0 ile %15 arasında bir artış olabileceği ifade edilmektedir. ÇTDB'ların basınç dayanımını etkileyen en önemli faktörler çelik tel geometrisi ve matris dayanımıdır [48]. Çelik tel donatılı betonlarda yüksek dayanım isteniyorsa silis dumanı ve kimyasal katkıların ortak kullanılması yararlı olmaktadır.

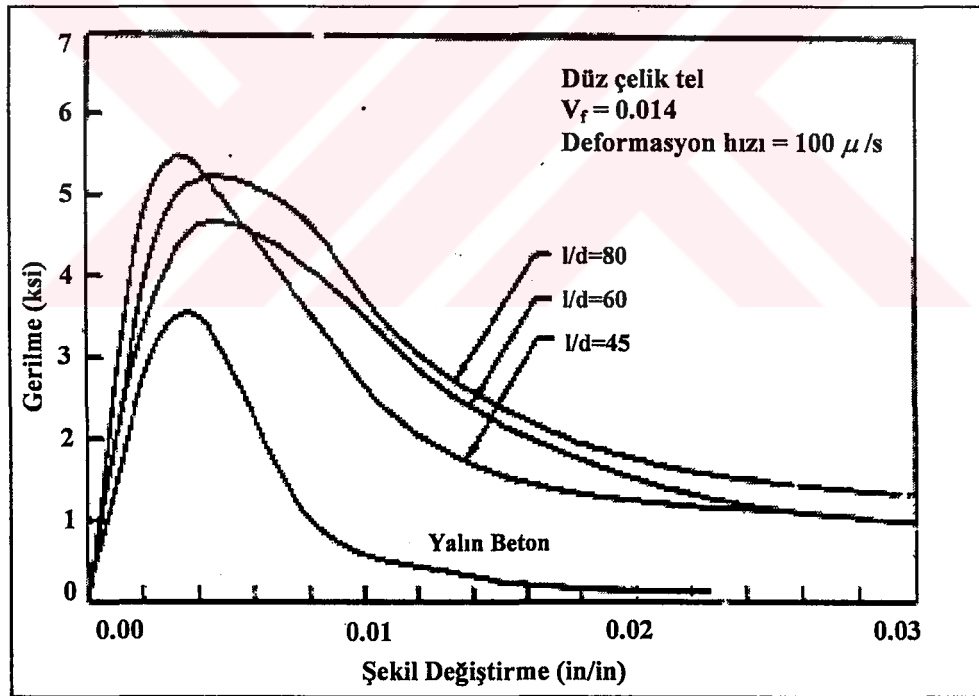
Çelik teller yüksek dayanımlı betonların oldukça dik olan gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmında belirgin bir şekilde değişiklik yapmaktadır. Ayrıca şekil değiştirme-yumuşama davranışını daha keskin halde uzaklaştırmakta ve basınç tokluğunu arttırmaktadır [43,49]. Basınç tokluğunu bu artış genel olarak kullanılan çelik tel miktarı ve narinliğine bağlı olarak değişmektedir. Kullanılan çelik tel miktarı ve narinlik arttıkça basınç tokluğu artmaktadır [50]. Çelik tel içeriğinin ve narinliğinin ÇTDB'ların gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi Şekil 2.7 ve 2.8'de verilmektedir [21]. Karışım içerisindeki tel hacmi arttıkça matris fazında homojenlik bozulmakta ve kusurlar artmaktadır, buna rağmen basınç altında tokluk artmaktadır.

Williamson [50] ve Naaman ve diğ. [51] çelik tellerin harçların basınç dayanımına ihmal edilecek kadar az arttırdığını, buna karşılık betonların basınç dayanımlarında %23 artış yaptığını ifade ettiler.

Otter ve Naaman [21] çelik teller kullanılmasıyla düşük dayanımlı betonların basınç dayanımlarının donatısız olan yalın betonlara oranla büyük ölçüde arttığını ve bu artışın çelik tel hacmi ile doğrudan ilişkisi olduğunu ifade etti. Ayrıca iki ucu kancalı tellerin betonun basınç dayanımındaki iyileştirmede düz olanlara kıyasla daha etkili olduğu açıklandı.



Şekil 2.7. Çelik tel içeriğinin gerilme-şekil değişirme ilişkisine etkisi [21].



Şekil 2.8. Çelik tel narinliğinin gerilme-şekil değişirme ilişkisine etkisi [21].

Soroushian ve Bayasi [11] yaptıkları çalışmalara bağlı olarak, iki ucu kancalı çelik tellerin basınç tokluğunda en iyi iyileştirmeyi yaptığını, kıvrımlı çelik tellerin ise düz olanlara kıyasla daha az etkili olduğunu ifade ettiler. Ayrıca çelik tel geometrisinin basınç dayanımına etkisinin olmadığını belirttiler.

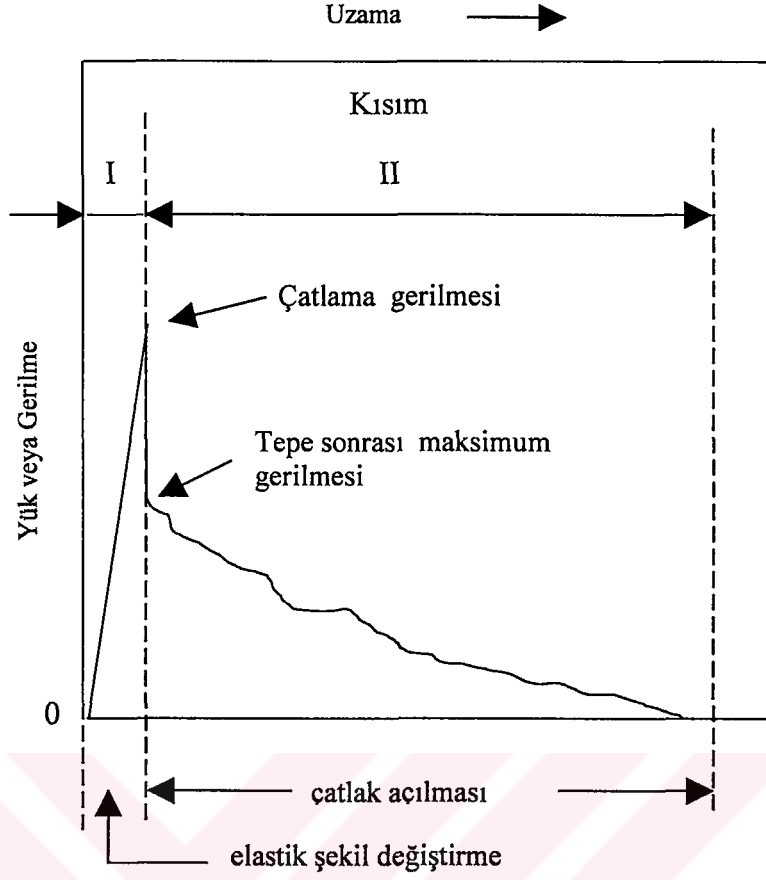
Ezeldin ve Balaguru [52] iki ucu kancalı çelik tellerin, silis dumanı içeren ve içermeyen betonların basınç tokluklarını büyük ölçüde arttırdığını, basınç dayanımı ve tepe gerilmesine karşı gelen şekil değiştirmesini ise çok az arttırdığını ifade ettiler. Ayrıca silis dumanı miktarının artmasıyla ÇTDB' ların silis dumanı içermeyenlere kıyasla daha gevrek hale geldiğini gösterdiler.

Taylor ve diğ. [32] çalışmalarında çelik tel içeriğinin artmasıyla betonların basınç dayanımlarında küçük bir artış olduğunu ve en büyük artışın ise 120 MPa nominal basınç dayanımına sahip betonlarda gözlemlendiğini kanıtladılar. Bu artışın kullanılan silis dumanı ve yüksek beton sınıflarında değişik miktarlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcının etkisine bağlı olduğunu belirttiler. Bu sonucu, kullanılan malzemelerin özelliklerinin, özellikle silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcının Portland Çimentosu ile birleştiğindeki kimyasının bir sonucu olduğunu belirttiler.

Marar ve diğ. [7] yüksek dayanımlı çelik tel donatılı betonların basınç tokluklarını incelediler ve çelik tel içeriği ve narınlığın kırılma enerjisinin arttığını ifade ettiler. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde, tepe noktasından sonra düşen kısmın eğiminin lif hacmi arttıkça azaldığını ve ayrıca tepe noktası basınç değerine karşı gelen şekil değiştirmenin çelik tel hacminin artmasıyla arttığını belirtti.

2.6.2. Tek Eksenli Çekme Dayanımı

Çimento esaslı matrisler çekme altında gevrek göçme davranışı gösterirler, ayrıca küçük çekme şekil değiştirme kapasitelerine sahiptirler. Çelik tellerin bu tür malzemelerin matrisine sürekli veya süreksiz şekilde ikamesi ile çekme özelliklerini donatı ile takviyesiz olan matrislere kıyasla kısmen güçlendirirler. Çekme özelliklerindeki bu iyileşme kayda değer seviye olmaktadır. ÇTDB' ların çekme dayanımlarını belirlemek için henüz standart deney numunesi bulunmamaktadır, ancak numune şekli ve boyutuna, ölçü boyuna, ölçü boyu içerisindeki oluşan çatlak sayısına, yükleme durumuna ve deney cihazının rijitliğine bağlı olarak çekme dayanımı-çekme şekil değiştirme eğrileri elde edilmekte ve yorumlanmaktadır. Çelik tellerin betonların çekme davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymaktaki en büyük zorluk, ilk ana çatlağın genişlemesiyle devam eden tepe yükü sonrası çatlak davranışının etkisidir.



Şekil 2.9. ÇTDB'lerin tipik çekme gerilmesi-çekme şekil değiştirme eğrisi [58].

Çelik teller gevrek olan betonun çekme şekil değiştirmesini artırır ve betona yarı-süneklik özelliği kazandırır. Bundan dolayı çelik teller betonun çekme dayanımı ve tokluk özelliklerinde iyileşmeler olmasını sağlar. Çelik tel katılmasıyla betonun çekme dayanımı çatlak sonrası artış gösterir, ancak bu artış geleneksel çelik donatı çubuklarının gösterdiği artışa oranla oldukça düşüktür. Çekme tokluklarının çelik tel tipine ve kullanım hacmine bağlı olarak arttığı ve bu artışın çelik tellerin matris ile aderansına ve matristen sıyrılma direncine bağlı olduğu görülmüştür [53,54,55]. Çelik tel tipinin ve miktarının ise genellikle ilk çatlak yükünü etkilemediği kabul edilmektedir [56,57].

Şekil 2.9'da hacimce %3'den daha az çelik tel içeren ÇTDB'lerin tipik çekme gerilmesi-çekme şekil değiştirme eğrisi verilmektedir [58]. Bu eğri iki kısma ayrılabilir. Çatlama meydana gelmeden önceki davranış için elastik malzemeler için tanımlanan ve matrislerinkine benzer çekme gerilmesi-uzama davranışı tanımlanabilir. Çatlama öncesi ilk doğrusal kısımda kompozit malzemeler için verilen çekme gerilmesi-uzama yaklaşımı kullanılabilir. Kompozit malzeme

mekaniği yardımıyla çatlama öncesi kompozitin çekme dayanımı aşağıda şekilde elde edilir [8].

$$\sigma_{cc} = \sigma_{mu} (1 - V_f) + \alpha_1 \alpha_2 \tau (V_f L / d_f) \quad (2.1)$$

burada, σ_{mu} donatısız matrisin çekme dayanımını, V_f ve L/d_f sırasıyla çelik telin içeriğini (hacimce) ve narinliğini, τ çelik telin çatlama anındaki matrsten sıyrılma dayanımını, α_1 matrisin çatlama şekil değiştirme durumunda aderans kabiliyetine bağlı bir katsayıyı ve α_2 ise çatlama öncesi çelik telin matris içerisindeki yönlendirilmesine bağlı bir etkinlik katsayısını ifade etmektedir.

ÇTDB'ların çekme altında çatlak sonrası dayanımları, çelik tellerin narinliğinin, hacminin ve matris ile aderans dayanımının artırılmasıyla artar. Çekme altında ÇTDB'ların nihai çekme dayanımlarının belirlenmesi için çeşitli ampirik formüller bulunmaktadır [8,52,54,57]. Hemen hemen verilen bütün formüllerde nihai çekme dayanımı σ_{pc} , çelik tel takviye indisi $V_f L/d_f$ ve telin aderans dayanımı τ 'nun bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$\sigma_{pc} = k \tau_u V_f L / d_f \quad (2.2)$$

burada, k ($k < 1.0$) çelik telin matris ile aderansına, yönlendirilmesine ve matris içerisindeki dağılımına bağlı bir katsayıdır.

Kayali ve diğ. [59] çelik tel içeren betonların geleneksel betonlara oranla yüksek çekme mukavemetleri ile birlikte düşük elastisite modülüne sahip olduğunu ve çelik tel kullanımının betonların rötre çatlaklarının azalmasında etkili olduğunu ifade ettiler.

Lim ve Oh [60] çelik tellerin betonun çekme özelliklerini ve çatlama karşı direncini büyük ölçüde iyileştirdiğini belirttiler.

2.6.3. Yarma Çekme Dayanımı

ÇTDB'ların yarmada çekme dayanımları üzerinde yapılan çalışmalar, onun tek eksenli çekme, basınç ve eğilme dayanımları için yapılanlara kıyasla daha azdır. ÇTDB'ların tek eksenli çekme, basınç ve eğilme dayanımlarını etkileyen bütün parametreler; çelik tel hacmi, narinliği ve çelik tel matris özellikleri yarmada çekme

dayanımını da etkilemektedir [6,31,32,60,61]. Ayrıca iki ucu kancalı ve uzunluğu boyunca çentikli tellerin yarmada çekme dayanımında en iyi iyileştirmeyi yapmaktadır.

Gao ve diğ. [61] çelik tel içeren betonların yarma dayanımlarında büyük artış olduğunu ve bu artışın çelik tellerin çatlak frenleme özeliğine bağlı olduğunu ifade ettiler. Ayrıca maksimum yükün çelik tel narinliğinin ve miktarının artmasıyla arttığını belirttiler.

Taylor ve diğ. [32] çelik tel içeriği artıkça eğilme ve yarma dayanımlarının arttığını saptadılar.

Lim ve Oh [60] çelik teller betonun basınç, eğilme ve yarma dayanımlarını artırdığını ve en büyük artışın yarma dayanımında görüldüğünü ifade ettiler.

2.6.4. Eğilme Dayanımı

Çelik teller, betonlar üzerindeki en iyi iyileştirmeyi onun eğilme dayanımı ve eğilme tokluğunda yapmaktadır. Çelik tel donatılı betonlar yüksek eğilme rijitliğine sahiptirler ve servis yükleri altında daha az çatlak genişliğine sahip olurlar. Çelik tel kullanımı ile eğilme dayanımındaki iyileşme geleneksel olarak kullanılan donatı çubuklarının gösterdiği iyileşme potansiyeline karşı oldukça yetersizdir.

Çelik tel donatılı betonların eğilme davranışını ve dayanımını etkileyen bir çok parametre bulunmaktadır. Bunlar; çelik tel tipi ve şekli, tel boyu, narinliği, tel hacmi, matris içerisindeki yönelmesi ve matris ile aderans özellikleri olarak sıralanabilir. Bunun yanında işlenebilirliği etkileyen su/çimento oranı, hava içeriği ve yoğunluk gibi parametreler de etkilemektedir. Nihai eğilme dayanımı ise tel hacmine, boyuna, aderans özelliklerine ve telin çekme dayanımına bağlı olarak değişmektedir [3,4,6,9,61-63]. Nihai eğilme dayanımı bu parametrelerin katkısına bağlı olarak ilk çatlak dayanımından yüksek veya düşük olabilmektedir [64]. Şekil 2.10' da kiriş deneylerinden elde edilen tipik yük-sehim eğrisi verilmektedir. Eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisi üç kısımda incelenebilir (Şekil 2.10). Bu kısımlar şu şekilde açıklanabilir.

I. Kısım: A noktasına kadar hemen hemen doğrusal bir davranış görülmektedir. Bu kısımdaki davranış tel-matris arayüz yardımıyla matrizen

tellere aktarılan gerilme transferini içermektedir. Bu bölgede gerilmeler, ilk çatlak dayanımı (orantılık sınırı) denilen ve matrisin çatladığı noktayı ifade eden yere kadar matris ve çelik teller tarafından taşınır.

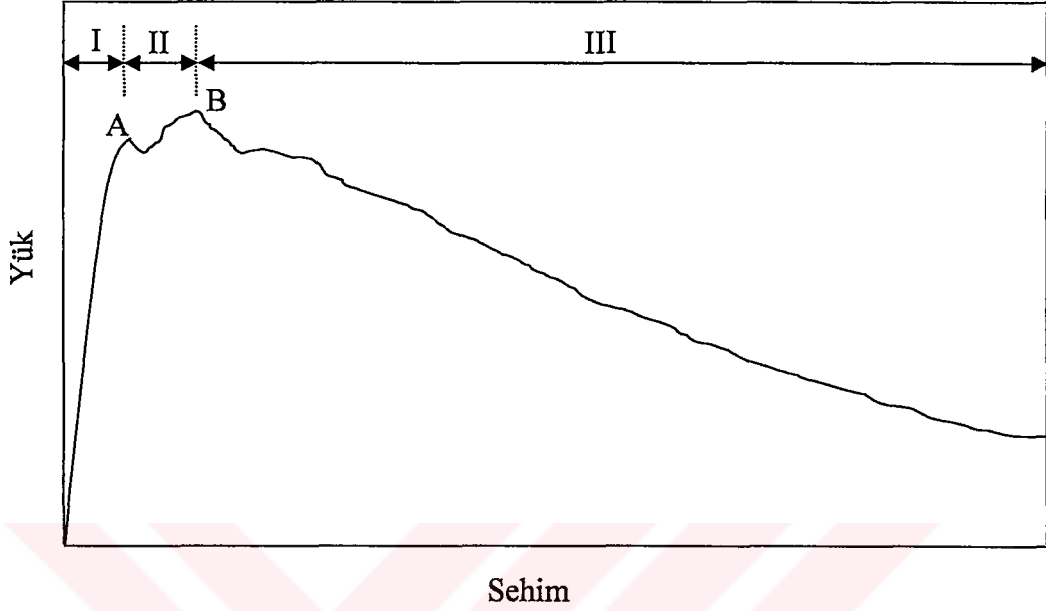
II. Kısım: A noktası ve maksimum yükün olduğu B noktası arasında doğrusal olmayan bir geçiş bölgesi vardır. (Burada B noktasındaki yük A noktasındaki yükten büyük olduğu kabul edilmiştir. Özellikle düşük çelik tel içeriklerinde ($V_f < \%0,5$) B noktası A noktasından daha düşük olmakta, hatta bazen A noktasından B noktasına ani düşme gözlenmektedir.) Çatlak sonrası oluşan bu bölgede gerilmeler tamamen çelik tellere aktarılır. Yükün artmasıyla çelik teller, B noktasındaki nihai eğilme dayanımına ulaşmaya kadar doğrusal olmayan yük-sehim davranışı sergileyerek matrsten sıyrılma eğilimi gösterirler. Bu nokta “tepe yükü” olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgede şekil değiştirmeler belirgin biçimde yerleşmektedir.

III. Kısım: Tepe yükü sonrası yük-sehim eğrisinin azalan kısmı tipik şekil değiştirme yumuşaması sergiler. Bu kısmın davranışı ve sehimin artmasıyla dayanımdaki ani olmayan azalma, çelik tellerin enerji yutma kapasitelerinin bir göstergesidir. Bu bölgenin davranışı ÇTDB’ları yalın betonlardan ayıran en önemli durumdur.

Yapılan ilk çalışmalarda matris içerisindeki çelik teller arasındaki mesafelerin ilk çatlak yükünü etkileyen en önemli etken olduğu belirtilmektedir [39,65]. Buna karşılık, daha sonraki çalışmalarda ilk çatlak yükünün sadece teller arasındaki mesafe yaklaşımı ile tahmin edilemeyeceği ifade edilmektedir [10,42,56]. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda ise bu etkenlerin çelik tel narinliği, hacmi ve matris içerisindeki yönelmesi olduğu vurgulanmaktadır [3,4,9,61].

İlk çatlak yükünün tahmin edilmesinde kompozit malzeme mekaniği yaklaşımının teller arası mesafe yaklaşımına kıyasla daha gerçekçi ve doğru sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur [10]. Kompozit malzeme mekaniğinde, genel olarak çelik tellerin matris içerisinde yük doğrultusu boyunca konumlandığı, çelik tellerin matrise bağlı olduğu ve matrisin poisson oranının sıfır olduğu kabul edilmektedir [64]. Ayrıca, çatlak davranışında çelik tel donatılı kompozitlerde, çelik tellerin etkisinin beton elemanlardaki geleneksel donatı ile benzer davranış gösterdiği dikkate alınır. Buna

karşılık, çelik teller matris içerisinde rastgele dağıldığından dağılımı da dikkate almak için tel hacmi bir etkinlik katsayısı ile çarpılır. Yapılan çalışmalarda bu etkinlik katsayısının %40 ile %80 arasında değiştiği görülmüştür [65,66].



Şekil 2.10. ÇTDB kirişler için tipik yük-sehim eğrisi.

ÇTDB'ların nihai eğilme dayanımları çelik tel içeriğine ve narinliğine bağlı olduğundan, tel hacmi ile narinliğin çarpımı olarak tanımlanan çelik tel takviye indisinin ($V_f L / d_f$) artmasıyla nihai eğilme dayanımı artmaktadır. Kompozit malzeme mekaniği yaklaşımı ile ÇTDB'ların nihai eğilme dayanımlarının tahmini için Shah ve Rangan (1971) tarafından önerilen eşitlik;

$$f_{cc} = A f_m (1 - V_f) + B (V_f L / d_f) \quad (2.3)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada, f_{cc} nihai eğilme dayanımını, f_m yalın betonun maksimum eğilme dayanımını (harç veya beton), V_f tel hacmini, A ve B ise deneysel olarak belirlenen katsayıları ifade etmektedir. Yalın beton için $A=1$ ve $B=0$ 'dır. B katsayısının çelik telin matris ile aderasına ve dağılımına bağlı olduğu bilinmektedir. Swamy ve diğ. [67] çelik tel içeren betonların nihai eğilme dayanımları için $A=0,97$ ve $B=4,94$ ve ilk çatlak yükünün tahmini için ise bu katsayıları sırasıyla 0,843 ve 4,25 olarak önermişlerdir.

Çelik tellerin çatlak tutmaya karşı yetenekleri ve matristen sıyrılma dirençleri ÇTDB'ların eğilme dayanımında ve sünekliğindeki iyileşmeler için belirleyici rol

oyunar. Yapılan çalışmalarda iki ucu kancalı çelik tellerin betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu üzerinde en iyi iyileştirmeyi sağladıkları gözlenmiştir [3,4,9,63].

Ramakrishnan ve diğ. [9] iki ucu kancalı, düz ve kıvrımlı çelik tellerin betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı, tokluk indisi, tepe-noktası sonrası yük taşıma kapasitesi ve enerji yutma kapasitelerini araştırdı. Çelik tellerin betona ikamesi ile betonların ilk çatlak yüklerinde %15 ile %90 ve statik eğilme dayanımlarında ise %15 ile %129 arasında değişen artışlar olduğunu ifade ettiler. İki ucu kancalı tellerin en çok, buna karşılık düz olanların ise en az iyileştirmeyi yaptığını belirtti. Ayrıca topaklanmaya neden olmaması iki ucu kancalı tel hacminin için %1 ile sınırlandırılması gerektiğini vurguladılar.

Balaguru ve diğ. [3] iki ucu kancalı çelik tellerin, kıvrımlı ve sonlanmış çelik tellere göre ÇTDB'ların ilk çatlak yükü ve eğilme tokluğu üzerinde en iyi performans gösterdiğini ifade ettiler. Benzer şekilde Banthia ve diğ. [63] çelik tellerin betona ilavesi ile betonun eğilme dayanımı ve tokluğunu önemli ölçüde arttırdığı ve iki ucu kancalı çelik tellerin toklukta en iyi iyileştirmeyi yaptığı belirttiler.

Banthia ve Trottier [4] eğilme tokluğu etkileyen etkenlerin çelik tel geometrisi ve matris dayanımı olduğunu vurguladılar. En önemli etkenin ise çelik tellerin matrsten sıyrılma direnci olduğunu ve toklukta en iyi etkiyi ucu kancalı tellerin yaptığını belirtti.

Gao ve diğ. [61] çelik tel içeren betonların eğilme dayanımlarında normal betonlara kıyasla büyük artış olduğunu ve maksimum yükün çelik tel narinliği ve içeriğinin artmasıyla arttığını ifade ettiler. Hacmen %1 ve %1,5 çelik tel içeriklerinde betonların eğilme ve kırılma tokluğunda büyük ölçüde iyileşme gözlemlendiğini belirttiler.

2.6.5. Elastisite Modülü

Bilindiği gibi, çelik ve cam gibi yalın malzemelerin elastik modüllerinin deneysel belirlenmesi ve uygulamada kullanılması, ÇTDB'lar gibi farklı malzemelerden elde edilen kompozit malzemelere göre daha kolay olmaktadır. Bunun nedeni kompozit

malzemelerin elastisite modüllerini etkileyen malzeme özelliklerinden dışında parametrelerin olmasıdır.

Kompozit malzemelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi için çok sayıda model bulunmaktadır. İki malzemedan yapılmış kompozitler için verilen en basit model, malzemelerin kompozit içerisindeki hacim oranları ve malzemelerin elastisite modellerine bağlı olarak belirlenmesini içeren üst sınır ve alt sınır modelleridir. Çelik tel donatılı kompozitler için ise, çelik telin sürekliliği, dağılımı, yönlenmesi ve narinliği gibi parametreleri içeren modeller geliştirilmiştir [64]. İki malzemedan (beton ve çelik tel) yapılmış olduğu düşünülen ÇTDB'ların elastisite modüllerinin belirlenmesinde genellikle en basit modeller olan üst sınır ve alt sınır veya ikisinin aritmetik birleşimi olan çözümler kullanılmaktadır.

Üst sınır çözümleme çelik tellerin sürekli olduğunu ve elastisite modülünün belirleneceği doğrultu boyunca konumlandığını dikkate almaktadır ve elastisite modülü şu şekilde ifade edilmektedir;

$$E_{cL} = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.4)$$

burada, c, L, f ve m sırasıyla, kompoziti, uzun doğrultuyu, çelik teli ve matrisi ifade etmektedir.

Alt sınır çözümleme ise çelik tellerin elastisite modülünün belirleneceği doğrultuya dik yönde kümелendiğini dikkate almaktadır ve elastisite modülü şu şekilde ifade edilmektedir;

$$E_{cT} = E_f E_m / [(1 - V_f) E_f + V_f E_m] \quad (2.5)$$

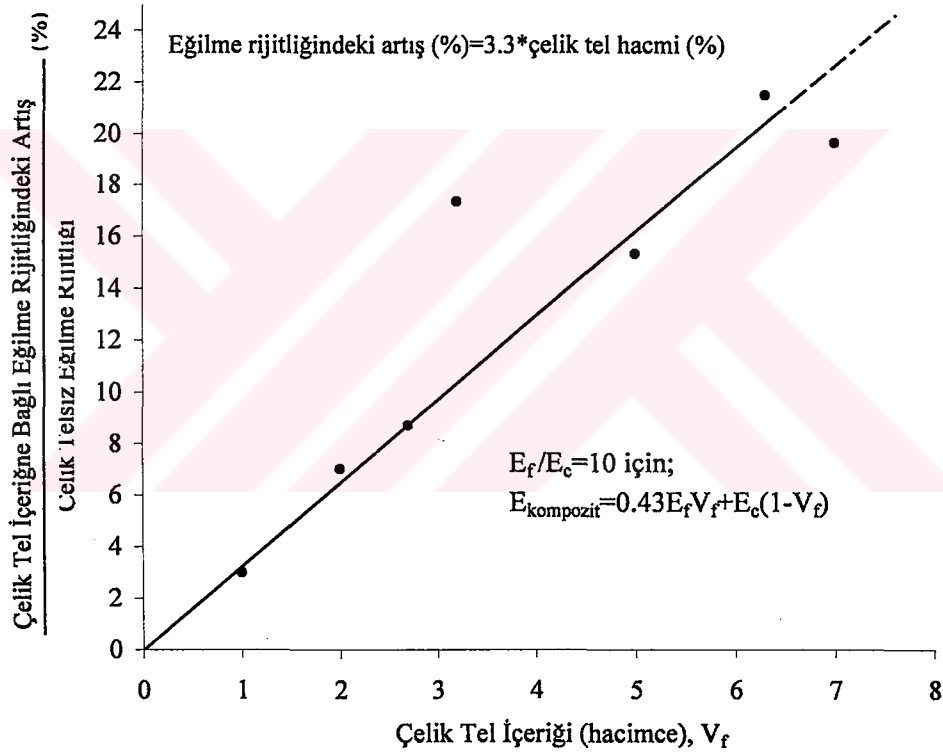
burada, T enine doğrultuyu ifade etmektedir.

Halpin ve Tsai [68] çelik tellerin matris içerisinde rastgele dağılılı bulunması durumunda, elastisite modül için üst sınır ve alt sınır modellerde verilen eşitliklerin birleşimini içeren bir model önerdi ve bu modellere bağlı olarak ÇTDB'ların elastisite modülünü (E_c);

$$E_c = (3/8)E_{cL} + (5/8)E_{cT} \quad (2.6)$$

formülüyle ifade etti. Burada, E_{cL} boyuna, E_{cT} ise enine doğrultudaki elastisite modülüdür.

Yapılan çalışmalarda genel olarak çelik tel içeren betonların elastisite modülleri normal betonlara göre yüksek olduğu ifade edilmektedir [63,69]. Ayrıca ÇTDB'ların elastisite modüllerinin, çelik telin narinlik oranı ve miktarı, malzemelerin elastik modülleri, telin matris içerisindeki konumu ve tellerin süreklilik ve süreksizlik durumlarının yanı sıra, çelik tel-matris ara yüzeyindeki aderans karakteristiklerine bağlı olduğunu belirtilmektedir [63,64,70]. Hasarsız eğilme rijitliğindeki artışın çelik tel içeriğine bağlı olarak değişimi Şekil 2.11' de verildi [71].



Şekil 2.11. Hasarsız eğilme rijitliğindeki artış-çelik tel içeriği ilişkisi [71].

Swamy ve Mangat [42] hacimce %2 çelik tel içeren betonların dinamik elastisite modüllerinin normal (donatısız) betonlara oranla %5 değişiklik gösterdiğini ve buna bağlı olarak statik elastisite modülleri için verilen bilinen klasik modellerin dinamik elastisite modüllerinin belirlenmesinde de kullanılabileceğini belirttiler.

Shah ve diğ. [72] ve Fanella ve Naaman [73] çelik tellerin betonun gerilme şekil-şekil değiştirme eğrisinin artan kısmını çok az etkilediğini, hatta hacimce %4 çelik

tel içeren betonların bile elastisite modüllerinin normal betonlara kıyasla fazla değişmediğini ifade ettiler.

Ezeldin ve Lowe [74] çelik tellerin betona 30 kg/m^3 , 45 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 miktarlarda katılmasıyla elde edilen betonların sekant elastisite modülünü araştırdılar ve çelik tellerin betonun elastisite modülünü çok az arttırdığını ifade ettiler.

Najm ve Naaman [70] kompozitlerin elastisite modülleri için önerilen modellerde yer alan parametrelere ek olarak, çelik tel boyu veya narinliğinin, tel yönlenmesinin ve tel içeren matris arayüzeyin de dikkate alınması gerektiğini vurguladılar.

2.6.6. Darbe ve Yorulma Dayanımı

Yüksek çekme dayanımı ve süneklik sağlayan çelik teller, betonların çatlamaya karşı dirençlerini ve hasar düzeylerini sınırlamadaki kabiliyetlerini büyük ölçüde arttırmaktadır. Ayrıca servis yükleri altında, matris içerisinde mevcut veya oluşan çatlakların ilerlemesini ve yayılmasına karşı gösterdikleri köprüleme etkisi ile betonların darbe ve yorulma direnci kapasitelerini önemli ölçüde iyileştirmektedir [7,13,17,34,35]. Bunun sonucunda betonların darbe ve yorulma altındaki hasar düzeyleri azaltılmaktadır. Çelik tellerin matris içerisinde çatlakları köprüleme etkisi ve çatlak sonrası yük taşıma özeliği ile kazanılan yüksek süneklik, tekrarlı yükler altında ÇTDB'ların göçmeye karşı dirençleri normal betonunkilere oranla daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Betonların darbe dayanımları çelik tel kullanılmasıyla 2-20 kat artmakta ve yorulma dayanımlarında ise düşük tel içeriklerinde bile 1.25-2 kat iyileşme görülmektedir [17]. Darbe ve yorulma dayanımındaki bu iyileşmeler, özellikle tekrarlı dinamik yükler altındaki havaalanı, karayolu kaplama betonları ve endüstriyel zemin beton uygulamalarında önemli bir konuma sahiptir.

Ramakrishnan ve diğ. [35] farklı çelik tel içeren betonların eğilme halinde yorulma ve darbe dayanımını araştırdılar. Çelik tellerin betonların eğilmede yorulma dayanımını arttırdığını ve darbe dayanımlarını ise çok az arttırdığını ifade ettiler. İki ucu kancalı çelik tellerin betonların bu özellikleri üzerinde en iyi iyileştirmeyi yaptığını ve düz olanların ise daha az iyileştirme yaptığını belirttiler. İki ucu kancalı çelik tel içeren betonların eğilme halinde yorulma dayanımlarında normal betonlara kıyasla %143 artış elde ettiler.

Batson [75] iki ucu kancalı, kıvrımlı ve düz çelik tellerin hacmen %0.1-%2 arasında değişen oranlarda kullanılmasıyla betonların eğilmede yorulma dayanımlarını inceledi. İki milyon tekrarlı yükleme sonunda bütün tel tip ve içeriklerinde eğilme halinde yorulma dayanımının arttığını ve %1 oranında iki ucu çelik tel içeren betonların en iyi iyileşmeyi yaptığını ifade etti. Eğilmede yorulma dayanımının tel içeriği ve tipine bağlı olarak 28 günlük statik eğilme dayanımının %80'i aşan değerlere kadar ulaştığını belirtti.

Yan ve diğ. [76] silis dumanını ve çelik telin betonda birlikte kullanımının YDB'ların darbe ve yorulma dayanımlarında büyük ölçüde iyileştirmeler yaptığını belirttiler. Ayrıca, silis dumanı ve çelik telin birlikte kullanılmasının, silis dumanı ve çelik telin ayrı ayrı kullanılmasından daha etkili olduğunu ifade ettiler.

Marar ve diğ. [7] yüksek dayanımlı çelik tel donatılı betonun, YDÇTDB, darbe direncinin çelik tel hacmine bağlı olarak arttığını, hacmen %2 çelik tel içeren ve narinliği 83 olan YDÇTDB'ların darbe dayanımlarının çelik tel içermeyen YDB'ların darbe dayanımlarının 74 katı olduğunu ifade ettiler.

2.6.7. Tokluk

Eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu çelik tel donatılı betonları çelik tel içermeyen betonlardan ayıran en belirgin iki özelliğdir. Tokluk, ÇTDB'ların sünekliliğinin bir ölçüsüdür ve betonların enerji yutma kapasitelerini gösteren bir parametredir. Çelik tel donatılı betonların toklukları büyük ölçüde çatlağın konumuna, çelik tel tipine, hacmine, matris içerisindeki yönelmesine ve telin matristen sıyrılma direncine bağlıdır [4,32] ÇTDB'ların eğilme tokluk düzeylerinin belirlenmesi için deney yöntemleri ve şartnameler bulunmaktadır. Bunlardan en sık kullanılanları ÇTDB kirişler için ASTM (American Society of Testing Materials), JSCE (Japan Society of Civil Engineering) ve RILEM tarafından önerilen deney yöntemleridir [77-79].

Tokluk değeri yük-sehim eğrisi altında kalan alandan elde edilir. ÇTDB'ların tokluğu, enerji yutma kapasiteleri olarak tanımlanır. ÇTDB'ların toklukları genellikle üçte bir veya orta noktalarından yüklenen (dört noktalı veya üç noktalı eğilme deneyleri) çentikli veya çentiksiz prizmatik kiriş numuneler üzerinde yapılan eğilme veya dört kenarı serbest oturan plak deneylerinden elde edilen yük-sehim eğrilerine bağlı olarak belirlenir.

Kiriş numuneler için en geniş olarak kullanılan tokluk ölçümleri, enerji esaslı boyutsuz olarak ifade edilen tokluk indisleridir. Bu indislerin uygulamaya girişleri Heneger [80] tarafından yapılan çalışmalar esas alınarak hazırlanan ACI (American Concrete Institute) tokluk indeksleri ile başlar. Bu tanımlamada tokluk indisleri, çelik tel donatılı betonun belirli bir sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanının “ilk kırılma yüküne kadar olan kısmının altında kalan alana” oranı olarak ifade edilmektedir. Bu indisler ACI Committee 544 [14] tarafından tanımlanmıştır.

Plak numunelerin kırılma enerjilerini veya enerji yutma kapasitelerinin ifadesi için ise genel olarak EFNARC [81] tarafından önerilen tokluk tanımlaması kullanılmaktadır. EFNARC dört kenarı serbest oturan plak deneylerinden elde edilen yük-sehim eğrisinde, 25 mm’lik sehime kadar yutulan enerjiyi esas almaktadır.

Tokluk indisleri bakımından yalın betonun tokluk değeri 1 olarak düşünülebilir, çünkü bütün yalın beton kirişler ilk çatlaktan hemen sonra göçer. Çelik tel donatılı betonların tokluk indeksleri büyük ölçüde çelik tel tipine, matrise katılma oranına ve matris içerisindeki konumuna bağlıdır. Çelik tellerin kancalı, kıvrımlı veya yüzeylerinin pürüzlü olmasının, matrsten sıyrılma ve çatlak kontrolü açısından önemli olduğu gibi tokluğun artırılmasında da büyük etkisi vardır.

Banthia ve diğ. [63] çelik tellerin püskürtme betona eklenmesiyle betonun eğilme tokluğunun önemli ölçüde arttığını ve iki ucu kancalı çelik tellerin toklukta en iyi iyileştirmeyi yaptığını belirttiler.

Moyson ve diğ. [45], genel olarak, ÇTDB’ların davranış özelliklerini belirleyen en önemli iki parametrenin eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu olduğunu belirttiler. Ayrıca ilk çatlak yükünün (veya dayanımının) beton özelliklerine bağlı olduğunu ve çelik tel içeriğinden etkilenmediğini ifade ettiler.

Banthia ve Trottier [4] tokluğu etkileyen etkenlerin çelik tel geometrisi ve matris dayanımı olduğunu ifade ettiler. En önemli etkenin ise tellerin matrsten sıyrılma direnci olduğunu ve toklukta en iyi etkiyi ucu kancalı tellerin yaptığını vurguladılar.

Balendran ve Zhou [47] boyut etkisinin tokluk indisleri üzerindeki etkisini incelediler ve numune boyutu artıktıkça ÇTDB’ların tokluk indislerinin azaldığını ifade ettiler.

2.6.8. Korozyon

Çelik tellerin betonda kullanımı paslanma etkisi sorusunu akla getirir. Genel olarak betona katılan çelik tel betona gömülü olduğundan ve yüzeyde kalanların az olmasından dolayı nedeniyle paslanmaya bağlı olarak oluşacak genişleme kuvvetleri sınırlı düzeyde kalır ve genelde beton yüzeyinde pullanma görülmez. Betonun yüzey tabakasına çok yakın olarak bulunan çelik teller düşük yüzey karbonatlaşma derinliğinden dolayı hızlı bir şekilde paslanmaya ve betonda pas rengi yüzeylerin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu da istenmeyen estetik bir kusur düşünülebilir. Ayrıca, paslanan çelik tellerin dayanıma katkısının azalması da ayrı bir konu olarak dikkate alınması gereken bir noktadır. Genel olarak uygulamalarda düşük karbonlu çelik tel kullanıldığı için çelik tellerdeki paslanma geleneksel betonlarda kullanılan donatı paslanmalarına oranla daha azdır. Ayrıca süreksiz bir şekilde beton matrisinde bulunan çelik tellerin elektriksel iletkenliğin süreksiz olması da paslanma açısından bir üstünlük sayılabilir. Bunun yanı sıra çelik teller beton matrisindeki çatlakları dikine keserek yük taşıma sürekliliği sağlar ve çatlakların genişlemesini önleyerek çelik tellerin korozyondan bozulmasını engeller. Çelik tellerin zemin betonuna iyi bir biçimde gömülmesi için su/çimento oranı yüksek olmamalıdır. Kohezyonu uygun bir betonda vibratörlü master uygulaması sırasında çelik teller betona gömülmektedir.

2.6.9. Sünme ve Büzülme

Kuru ortamlarda beton büzülür. Büzülmenin gelişimi malzemelerin özellikleri de dahil olmak üzere, sıcaklık ve ortamın nemine, betonun yaşına ve kütlesine bağlıdır [20]. Eğer betonun rötresi kısıtlanırsa çekme gerilmesi oluşur ve beton çatlayabilir. Rötire çatlakları perde, döşeme ve beton kaplamalarında genel bir sorundur. Bu rötire çatlaklarını azaltmanın en etkili yolu beton matrisine rastgele dağıtılacak olan çelik tellerin takviyesidir. Betonlar hemen hemen mesnet durumlarından dolayı rötresi kısıtlandığı için çatlama eğilimi gösterirler. Çelik teller bu durumda üç rol oynar. Çelik teller çok yönlü çatlak oluşumu sağlar, çatlak üzerinden gerilme transferi yaparlar ve bu gerilme transferi çatlakların kapanmasına müsaade edecek kadar uzun sürebilir.

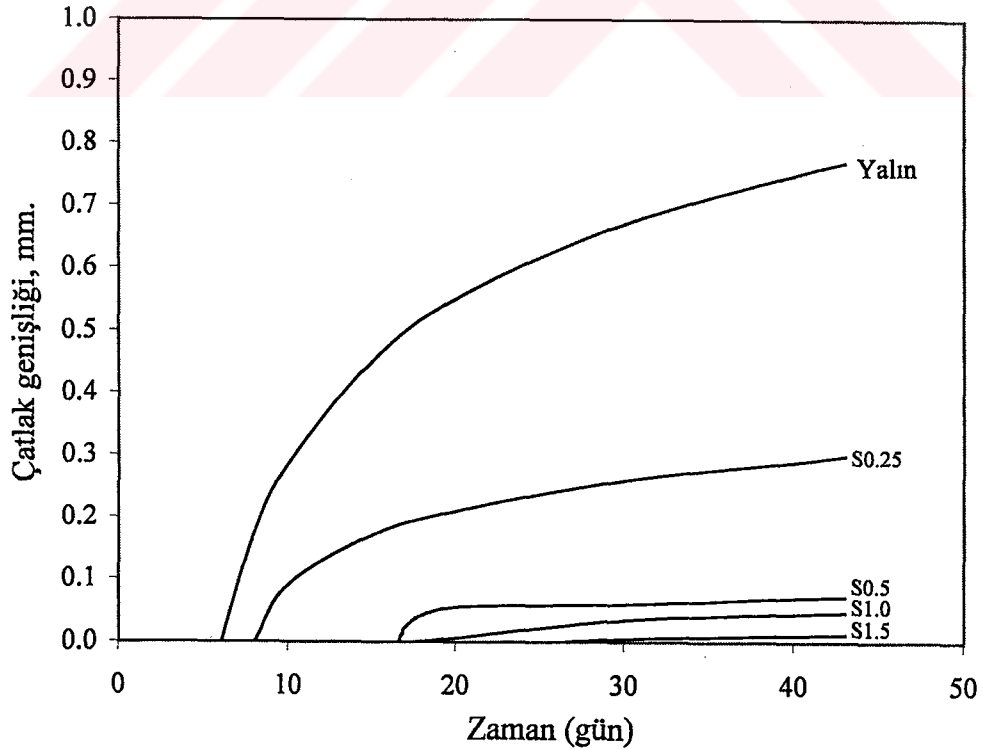
ÇTDB'ların sünme ve büzülme özelliklerini etkileyen çelik tel ile ilgili parametrelerin en önemlisi kullanılan çelik tel miktarıdır. Çelik tellerin sünme ve büzülme özellikleri

üzerinde iyileştirme yapması için matris içerisinde etkili olacak şekilde yeterli miktarda bulunmalıdır. Düşük çelik tel içeriklerinde bile daha iyi gerilme dağılımı ile çatlak genişliklerinde %70' lere ulaşan azalma görülebilmektedir [17].

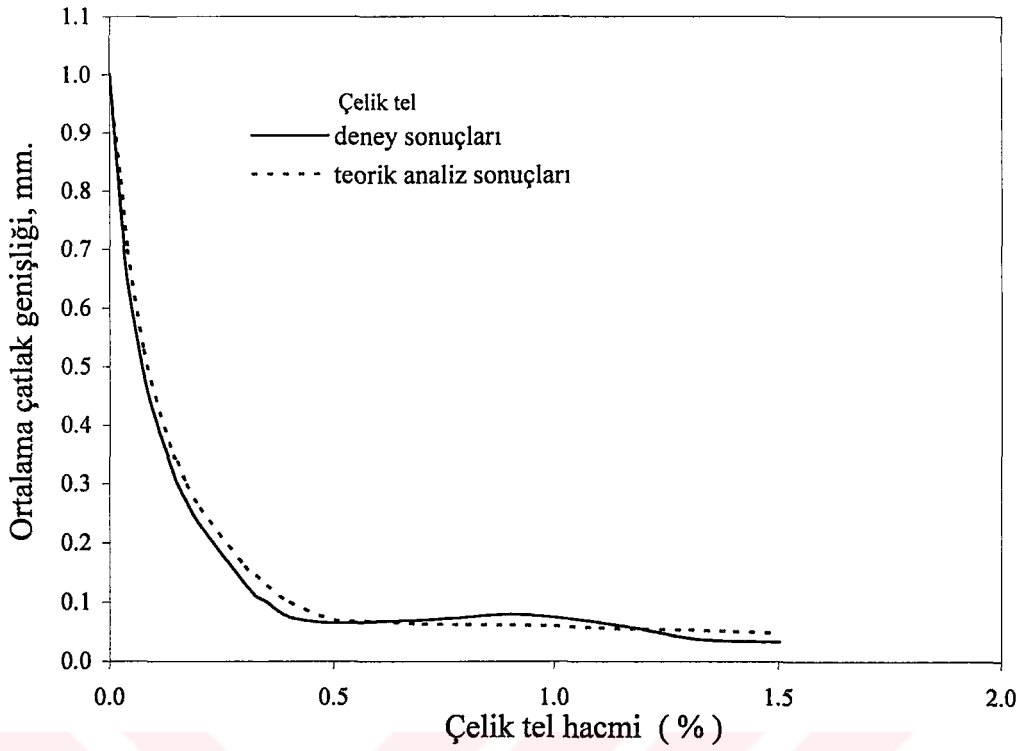
Kayali ve diğ. [59] çelik tel donatılı betonların rötre çatlakları normal betonlara kıyasla daha az olduğunu vurguladılar.

Grzybowski ve Shah [82] yaptıkları çalışmada çelik tellerin betonların büzülme çatlamaına etkisini araştırdılar. Az miktarda çelik tel içeriğinde bile (20 kg/m^3) betonda çatlak genişliğinin azaldığını ifade ettiler. Yalın betonda ortalama büzülme çatlak genişliği 1 mm. iken hacimce %0,25 (20 kg/m^3) çelik tel içeren betonlarda bu değerin 0,2 mm'den daha az olduğunu belirttiler. Deney sonuçlarından elde edilen çatlak genişliği-zaman ve çatlak genişliği-çelik tel hacmi ilişkileri sırasıyla Şekil 2.12 ve Şekil 2.13' de verilmektedir.

Edgington [83] yaptığı çalışmada, 12 ay boyunca sünme etkisine maruz bırakılan ÇTDB'ların sünme şekil değiştirmelerinin normal betonlarınkinden farklı olmadığını ifade etti.



Şekil 2.12. Farklı tel hacimlerinde çatlak genişliği-zaman ilişkisi [83].



Şekil 2.13. Ortalama çatlak genişliği-çelik tel hacmi ilişkisi [83].

Swamy ve Stavrides [84] çelik tel kullanımı ile çatlak miktarı ve çatlak derinliklerinin azaldığını belirtti.

2.6.10. Aşınma, Erozyon ve Kaviteasyon Direnci

Çelik teller, genel olarak betonların aşınma, erozyon ve kaviteasyon dirençleri artırmaktadır [13,64,85]. Su yapılarında kullanılan betonların aşınma, kaviteasyon ve kimyasal etkilerle meydana gelen erozyona karşı dirençlerini kısmen iyileştirmektedir [13,64]. Çelik teller darbeli aşınmanın neden olduğu mikro-kırılma çatlaklarını kontrol ederek betonların aşınma hasarlarını azaltmaktadır [17].

ACI Committee [56,57,86] hidrolik yapılarda düşük hızlarda, küçük taneciklerin yuvarlanması ile beton yüzeyinde oluşan düzenli aşınma olayında, agrega kalitesinin ve yüzey sertliğinin erozyon miktarını belirleyen en önemli etkenler olduğunu ifade etmektedir. Buna karşılık çelik tellerin, yüksek hızların ve büyük parçaların çarpması sonucu oluşan aşınmaya karşı betonların erozyon direncini önemli ölçüde artırdığını belirtmektedir.

Nanni [87] çelik tel donatılı betonların aşınma dirençlerinin normal betonlarınkine kıyasla fazla değişmediğini, ancak çelik tellerin beton kaplamaların yüzeylerinin pullanmasını önleyiciliği etki yaptığını belirledi.

Sustersic ve diğ. [88] çelik tellerin betonların aşınma-erozyon dirençlerine etkisini araştırdı. Su/çimento oranı 0,30-0,65 arasında değişen betonlara iki ucu kancalı tellerin hacmen %0,25-%2 arasındaki miktarlarda katılmasıyla elde edilen numuneler üzerinde aşınma ve erozyon deneyleri yaptı. Deneyler sonucunda çelik teller betonun erozyon ve aşınma dirençlerini iyileştirdiğini ve su/çimento oranı ve çelik tel içeriği arttıkça betonların aşınma ve erozyon dirençlerinin arttığını gösterdi.

2.6.11. Donma-Çözülme

Çelik tellerin betonların donma-çözülme direncine etkisi belirgin değildir [36,89]. Yani, çelik tellerin betonun donma-çözülme direncini iyileştirmedeği söylenebilir. Geleneksel betonlarda olduğu gibi dayanıklı beton elde etmek için geçerli uygulamalar ve hava sürüklenme kriterleri ÇTDB'lar için de kullanılmalıdır. Buna karşılık çelik teller mikro çatlak oluşumunu ve yayılmasını geciktirir, buna bağlı olarak donma-çözülme esnasında betonun göçme ve hasar görmesini yavaşlatır. Göçme modundaki bu iyileşme çelik telin çatlak köprüleme etkisine ve çatlak-tutma becerisine bağlıdır. Beton içerisinde rastgele dağılı olarak bulunan çelik teller, betonun boşluk oranına ve doygunluk derecesine bir etkisi olmadığından çözülme sırasında beton yüzeyindeki pullanmayı önleyememektedir. Dolayısıyla ÇTDB donma çözülme etkisinde kütle kaybı normal betonlardakine benzer olmaktadır [36].

Balaguru ve Ramakrishnan [89] su/çimento oranı 0.40 olan ve çimento miktarı 415 kg/m³ 'den az olan ÇTDB'ların donma-çözülme dirençlerinin iyileştirilmesi için en az %6 hava sürüklenmesinin gerektiğini belirtti.

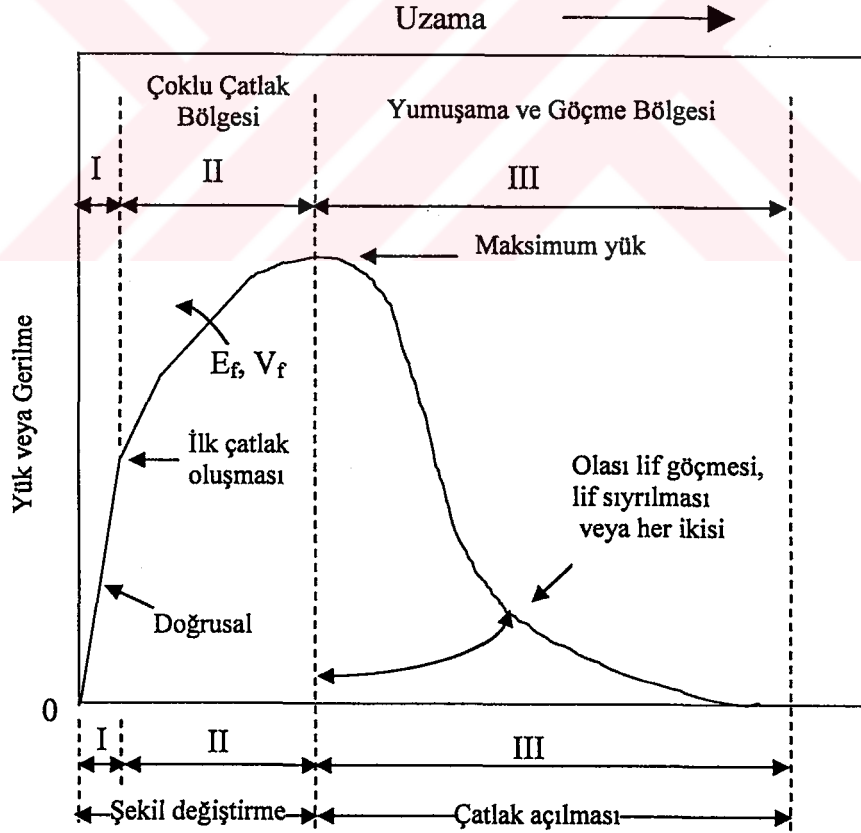
Vares [90] donma-çözünme etkisine maruz ÇTDB'ların mikro yapısını inceledi. %2 ve %4 çelik tel ilave edilmesiyle elde edilen betonların 100 ve 200 çevrim sonunda (suda saklanan), tokluklarındaki ve mikro yapılarındaki değişikliklere bağlı olarak donma dirençlerini belirledi. 200 çevrim sonunda ÇTDB'ların mikro yapılarında ciddi hasarlar olmadığını ifade etti. Mu ve diğ. [91] çelik tellerin donma-çözülme ve tuz etkisi gibi olaylara maruz kalan betonların bozunmaya karşı direncini arttığını vurguladılar.

2.7. Çimento Hamuru Enjekte Edilmiş Lif Donatılı Betonlar (SIFCON)

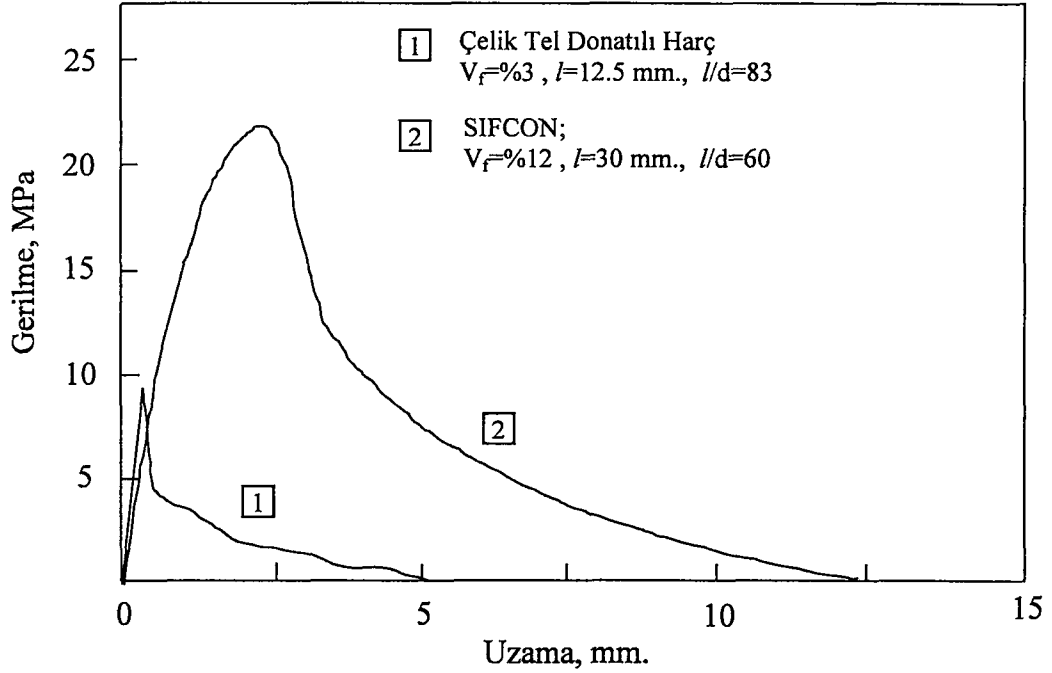
SIFCON kısa çelik tellerin Portland Çimentosu matrisinde kullanılmasıyla elde edilen bir kompozit malzemedir. Geleneksel ÇTDB'larda olduğu gibi çelik teller karışıma doğrudan katılmaz, viskoz haldeki çimento hamuruna sonradan ilave edilir. Çelik tel içeriği ise genellikle hacmen %5-%25 arasında değişmektedir [64].

SIFCON' da kullanılan çelik teller geleneksel ÇTDB'larda kullanılanlar ile aynıdır. Hamur bileşenleri genellikle, Portland Çimentosu, silis dumanı ve/veya uçucu kül ve su'dur. Üniform tane çapına sahip ince kum da kullanılmaktadır. Hamurun akıcılığını sağlamak için ise yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmaktadır.

Çelik tel içeriği ÇTDB'larda olduğu gibi SIFCON'un gerilme-şekil değiştirme veya yük-sehim davranışını etkileyen en önemli faktördür. SIFCON' un çekme altında tipik gerilme-uzama eğrisi Şekil 2.14'de ve çelik tel donatılı harç ile karşılaştırmalı gerilme-uzama eğrisi ise Şekil 2.15'de verilmektedir [58].



Şekil 2.14. SIFCON' un çekme altında tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi [58]



Şekil 2.15. SIFCON ve çelik tel donatılı harcın gerilme-uzama eğrilerinin karşılaştırılması [58].

Silis dumanı ara yüzeyin yapısını iyileştirmekte, zayıf olan ara yüzeyin aderans dayanımını artırmakta ve mevcut çatlak boyutunu ve sayısını azaltmaktadır, dolayısıyla çelik tellerin çatlamaya karşı direncini ve betonların hasar düzeylerini sınırlamadaki yeteneklerini büyük ölçüde artırmaktadır. Silis dumanı ve çelik telin ortak kullanılmasının etkisi silis dumanı ve çelik telin ayrı ayrı kullanılması etkisinden daha fazla olmaktadır [76].

SIFCON oldukça pahalı bir malzemedir ve yüksek dayanımlı betonların istenilen tokluğa sahip olmadığı durumlarda tercih edilir. Çarpma ve patlamaya karşı direnç istenen yerlerde, prekast yapı elemanlarının üretiminde, koruyucu kaplamalarda ve yol kaplamalarında, ayrıca köprü ve kaldırımların onarımında kullanılmaktadır.

2.8. Çelik Tel Donatılı Püskürtme Betonları (ÇTDPB)

Çelik tel takviyeli püskürtme beton süreksiz bir şekilde çelik tel içeren betonun hava yardımıyla bir yüzeye püskürtülmesiyle elde edilir. Püskürtme betona eklenen çelik teller çatlak direncini, sünekliğini, enerji yutma kapasitesini ve çarpma direncini iyileştirir. Ayrıca ilave bir çekme donatısına gerek kalmadan betonun çekme dayanımını artırır. Püskürtme beton matrisinde rastgele dağılı olarak bulunan çelik

teller, püskürtme betonun boyutsal stabilitesini artırmakta ve uygulanan yükler altındaki davranışını önemli ölçüde iyileştirmektedir [63]. Çelik tel içeren püskürtme betonların kırılma enerjileri aynı koşullarda hazırlanan hasır donatılı olanlara kıyasla daha yüksek olmaktadır.

Püskürtme betonlar da normal betonlar gibi gevrek malzeme davranışı gösterirler. Düşük sünekliklerinden dolayı çatlak sonrası ani göçme davranışı sergilerler. Bu davranış tehlikeli ve istenmeyen bir durumdur. Çelik tellerin püskürtme betonlara katılmasıyla süneklikleri ve çatlak sonrası yük taşıma kapasiteleri artar, buna bağlı olarak sünek göçme sağlanır. Yüksek sünekliğe sahip ÇTDPB kaplamalarının kaya patlaması ve delme patlatma olaylarına karşı dirençleri büyük ölçüde artar. Yüksek eğilme dayanımlı betonlar üretilmesine karşın, süneklik çelik tel tipinin ve dozajının bir fonksiyonu olmaktadır.

Çelik teller püskürtme betonların çarpmaya karşı direncini, aşınma ve erozyon direncini artırır. Ayrıca taze betonun büzülmesinden dolayı meydana gelecek olan çatlakları mikro düzeyde tutarak geçirimsizliği, dolayısıyla donma direncini azaltır. Yalın ve hasır çelik donatılı püskürtme betonlara göre daha yüksek aderans kapasitesi sağlar.

Çelik tellerin püskürtme betonlar üzerinde yaptığı diğer bir iyileştirme ise son eğilme dayanımının korunmasıdır. Büyük boyutlu numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda, yalın betonların eğilme dayanımları sertleşme sonrası büzülme ve mikro çatlaklardan dolayı yarıya düştüğü görülmüştür, buna karşılık çelik tel donatılı püskürtme betonlarında sertleşme sonrası eğilme dayanımları korunmaktadır.

Çelik tel donatılı püskürtme betonlar ile ilgili deneysel çalışmalar 1971 yılında başladı. İlk uygulama ise 1973 yılında U.S. Corp of Engineers' de yapıldı. 1980 yılı başlarında yapılan çalışmalarda Norveç Teknik Araştırma Birliği tarafından yapılan büyük çaplı bir araştırma ise ÇTDPB' ların hasır çelik takviyeli püskürtme betonlara eşdeğer performans gösterdiği görüldü. Ayrıca, kırılma enerjilerinin hasır donatılı olanlara kıyasla daha yüksek olduğu, daha hızlı tünel kaplama, daha ucuz beton ve daha kaliteli tünel kaplama betonu üretimine imkan verdiği ifade edildi [92]. Bu çalışmada elde edilen çelik tel ve hasır çelik donatılı betonların yük-sehim eğrileri Şekil 2.16.'da verilmektedir [94].

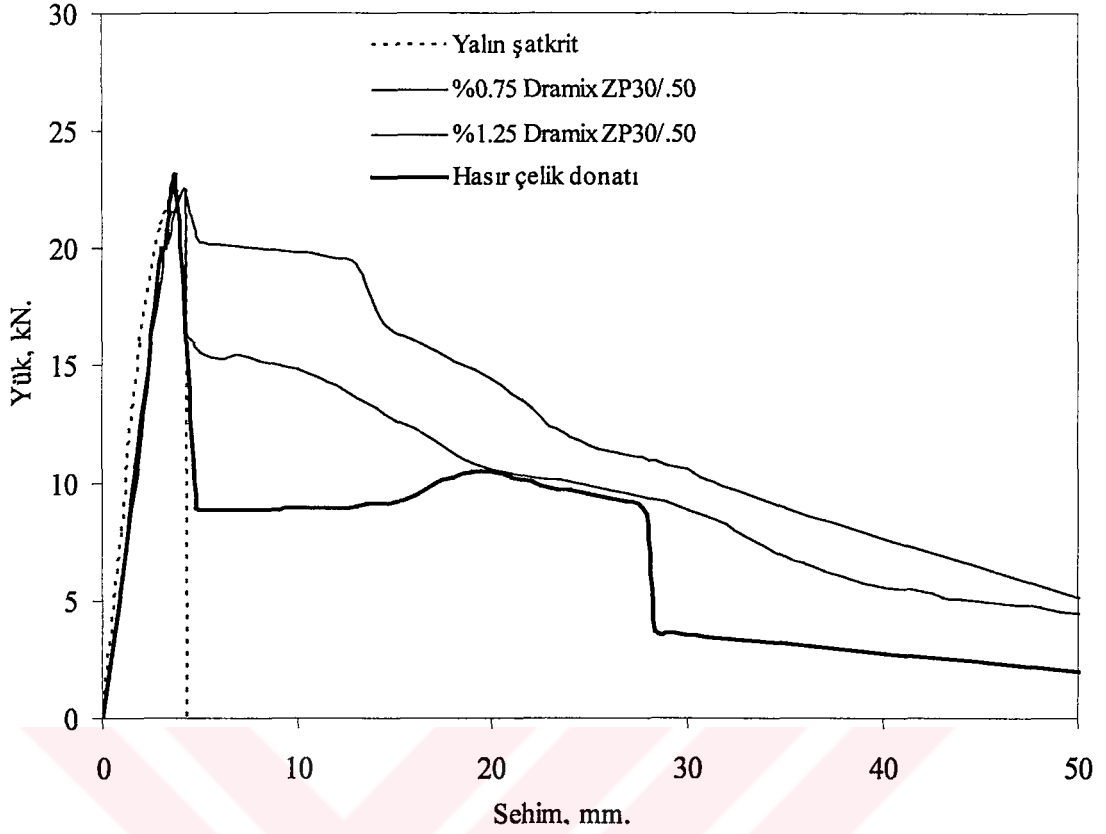
Çelik tel donatılı püskürtme betonlar çelik tellerin en yaygın olarak kullanıldığı uygulama alanıdır. İlk zamanlar çelik teller, püskürtme betonlarda iyi kaya şartlarında geleneksel hasır donatısız olarak ve daha sonraları ise zayıf kaya şartlarında hasır çelik donatılar ile birlikte kullanıldı. Şimdilerde ise çelik teller hasır çelik donatının yerini almaktadır. Geri dönen malzeme kaybının (ribaunt) düşük olması, kaplama kalınlığında azalma, hızlı ve ekonomik üstünlüklerinden dolayı püskürtme betonlarda çelik tel kullanımı hızla artmaktadır.

ÇTDPB ile ilgili yapılan ilk çalışmalarda yüksek tel içeriği, küçük tel çapı ve yüksek narinliğin kullanılması sonuçlarına varılmasına karşın, sonraki çalışmalar aynı dayanım özelliklerinin, eşdeğer lif çapına sahip iki ucu kancalı çelik tellerin daha az miktarlarda kullanılmasıyla elde edilebileceğini göstermiştir [26].

ÇTDPB'lar tünel kaplama, şevlerin stabilitesi, kazıların ve temellerin desteklenmesi, kanal kaplamaları, köprü mesnetlerinin korunması, nükleer atıkların saklandığı büyük mağaraların kaplamaları, kanalizasyon, baraj, yüzme havuzu ve su depoları gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Ayrıca diğer önemli bir kullanım alanı ise liman, otoyol, demiryolu ve köprüler gibi yapıların tamir ve onarımıdır.

Çelik tellerin püskürtme betonda kullanılmasının tercih edilmesinin en önemli nedenlerinin başında hasır çelik donatının tünel duvarına sabitlenmesinin zor olması, zaman israfı, pahalı ve bazen de riskli olması gelmektedir. Ayrıca geleneksel hasır çelik kullanarak kayma göçmesine karşı kaplamayı güçlendirmek mümkün olmamaktadır [26]. Bunun yanı sıra püskürtme beton kaplama kalınlığı hasırlı beton kaplamalarına kıyasla daha ince olmakta ve büyük enerji yutma kapasitesi ile kaya patlaması gibi ani yüklemelere karşı büyük bir süneklik sağlamaktadır [93].

Belirgin avantajlarından dolayı çelik teller püskürtme beton uygulamalarında geleneksel hasır donatıya kıyasla daha fazla tercih edilmektedir. Çelik tellerin püskürtme betonların mekanik ve dırabilite özellikleri üzerinde yaptıkları iyileşmeler yapıların servis süresi içerisinde daha iyi anlaşılmaktadır. Çelik tel donatılı püskürtme betonların performanslarının belirlenmesi için yeni ölçme yöntem ve tekniklerinin geliştirilmesi gerekir.



Şekil 2.16. Çelik tel ve hasır çelik donatılı püskürtme betonların yük-sehim eğrilerinin karşılaştırılması [94].

Taşdemir [24,38] çelik tel donatılı plakların ilk çatlak yükünün çelik hasır donatılı olanlara kıyasla daha yüksek olduğunu, ayrıca çelik tel donatılı plaklarda kırılma türünün sünek, çelik hasırlı plaklarda ise gevrek olduğunu ifade etti. Çelik tel donatılı plaklarda 20 mm. sehim durumunda plaklarda hiçbir dağılma olmamasına karşın, çelik hasır donatılı plakalarda söz konusu sehimden daha düşük sehimlerde belirgin çatlakların, kırılmaların ve dökülmelerin olduğunu belirtti. Bunun yanı sıra çelik tel içeriği ve narinliğinin artması ile maksimum yükün ve yutulan enerjinin belirgin biçimde arttığını, ayrıca ucu kancalı tellerin yutulan enerjinin daha da yükselmesine neden olduğunu ifade etti.

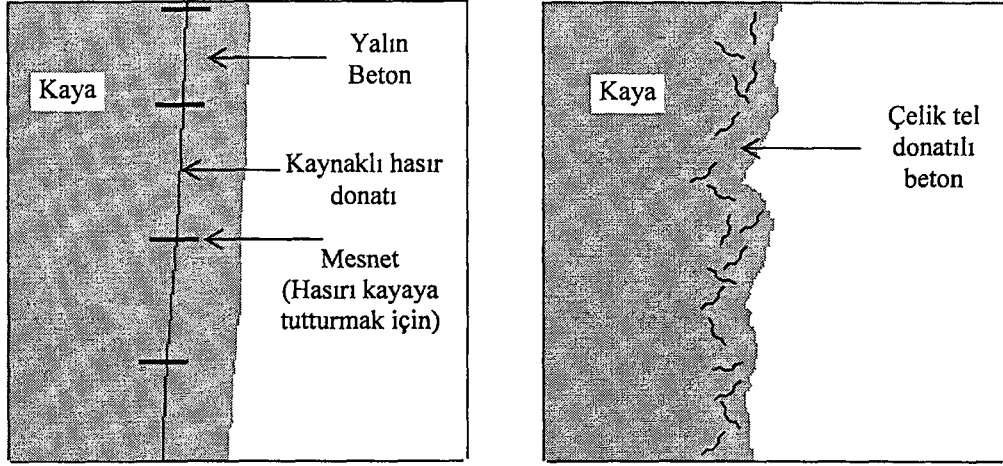
Banthia ve diğ. [63] çelik tellerin püskürtme betona ilavesi ile betonun eğilme dayanımı ve tokluğunu önemli ölçüde artırdığını ve iki ucu kancalı çelik tellerin toklukta en iyi iyileştirmeyi yaptığı saptadılar.

2.9. Çelik Tel Donatılı Betonlar ile Hasır Donatılı Betonların Karşılaştırılması

Hasır çeliklerin fiyatı çelik liflerden daha az olmasına rağmen üretim, işçilik ve depolanma açısından çelik tel kullanımı önemli faydalar sağlamaktadır. Ayrıca hasır çeliğin kalıba yerleştirilmesi için gerekli zamandan tasarruf sağlaması da üretim açısından önemli bir rol oynar. Çelik tel kullanımının ekonomik faydalarının yanı sıra teknik üstünlükleri vardır. Bunlardan biri, geleneksel hasır çelik donatılı betonlar ile karşılaştırıldığında ÇTDB'nun üstün durabilitesidir. Betonarme yapılarıdaki gibi ÇTDB'larda klasik korozyon görülmez. Çelik teller, süresiz ve ayrı olduğundan paslanmanın ilerleme ve gelişimi mekanizmasını desteklemez. Ayrıca paslanan tellerde hacim artışı betonun yarılması için yetersiz olacağından betonun zarar görme riskini ortadan kaldırır. Diğer önemli bir üstünlüğü de çelik tellerin homojen bir dağılım ile matraste sürekli bir donatı görevi görmesidir. Çelik teller yüzeye daha yakındır ve betonların kenar ve köşelerinin, özellikle tünel kaplama beton parçalarının az hasar görmesini sağlar. Ayrıca korozyona karşı minimum paspayı sağlar.

Çelik hasır donatının montajı çok zaman alan bir işlemdir ve yapının toplam inşaat süresini arttırmaktadır. Çelik hasırın tünel yüzeyine tutturulması zor, uzun zaman alan, masraflı ve bazen de tehlikeli bir iştir. Düzensiz olan tünel yüzeylerinde hasır donatı ankrajlı mesnetlere bağlanarak tutturulur ve bu mesnetlerin arkasında oluşan boşluklar beton ile doldurulur. ÇTDBPB'larda püskürtme ve donatı takviye işi birleşmektedir, aynı sürede iki iş birlikte yapılmaktadır. Donatı yerleştirilmesi için ayrıca zaman ve işçilik gerekmemektedir. Bunun yanı sıra tamir sırasında normal donatının yerleştirilmesi de sıkıntılı olmaktadır.

Kaynaklı çelik hasır donatı yerine çelik tel kullanılmasıyla zaman israfından ve tehlikeli işlemlerden kaçınılabilir. Çelik teller kullanımı toplam maliyeti azaltır ve zamandan kazandırır. İşçilik ve malzeme fiyatı baz alındığında çelik tel maliyeti hasır çelik maliyetinin %50-%60 arasında olmaktadır. Ayrıca hasır çelik kullanıldığında püskürtme beton iki tabaka halinde uygulanmaktadır, bundan dolayı tünel kaplama çalışmalarının gecikmesine bağlı olarak ek maliyet ortaya çıkmaktadır. Hasır donatı arkasındaki gölge etkisi ile meydana gelen boşlukların 30-50 mm. kaplama yapılarak doldurulması gerekmektedir. Çelik tel kullanılması durumunda bu işleme gerek kalmayacağından bu dolgu maliyeti ortadan kalkacaktır.



Şekil 2.17. Hasır ve çelik tel donatılı püskürtme betonlarda kaplama kalınlığının karşılaştırılması.

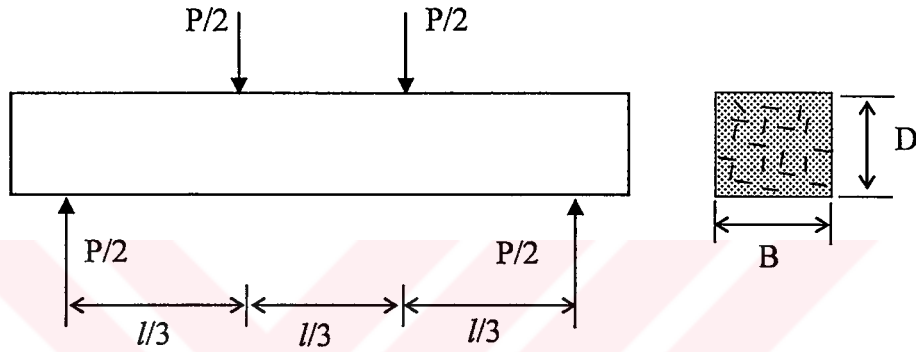
ÇTDPB ile istenilen kalınlık yüzey şekliğinin düzensizliğine bağlı kalınmadan bütün yüzey boyunca uygulanabilir (Şekil 2.17). ÇTDPB' lar kaya yüzeylerini takip edebilmekte ve istenilen kalınlık yüzey boyunca sabit olmaktadır, dolayısıyla daha az beton kullanılmaktadır [93]. Ayrıca hasır çelik, arkasında meydana gelen gölge nedeni ile malzeme kaybının artmasına neden olur ve gölge etkisi hasır donatı arkasında boşluk kalmasına neden olabilir. Bu önemli bir problemdir, çünkü donatı korozyonuna ve pullanma ile dökülmeye ve kopmalara neden olabilmektedir. Süneklik düzeyi yüksek olmasından dolayı da daha güvenlidir.

2.10. Tokluk Ölçme Deney Yöntemleri ve Yönetmelikler

ÇTDB'ların tokluk düzeylerinin belirlenmesi için deney yöntemleri ve şartnameler bulunmaktadır. Bunlardan en sık kullanılanları ÇTDB kirişler için ASTM (American Society of Testing Materials), JSCE (Japan Society of Civil Engineering), RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) ve plaklar için ise EFNARC (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures) tarafından önerilen deney metotlarıdır [77,78,79,81].

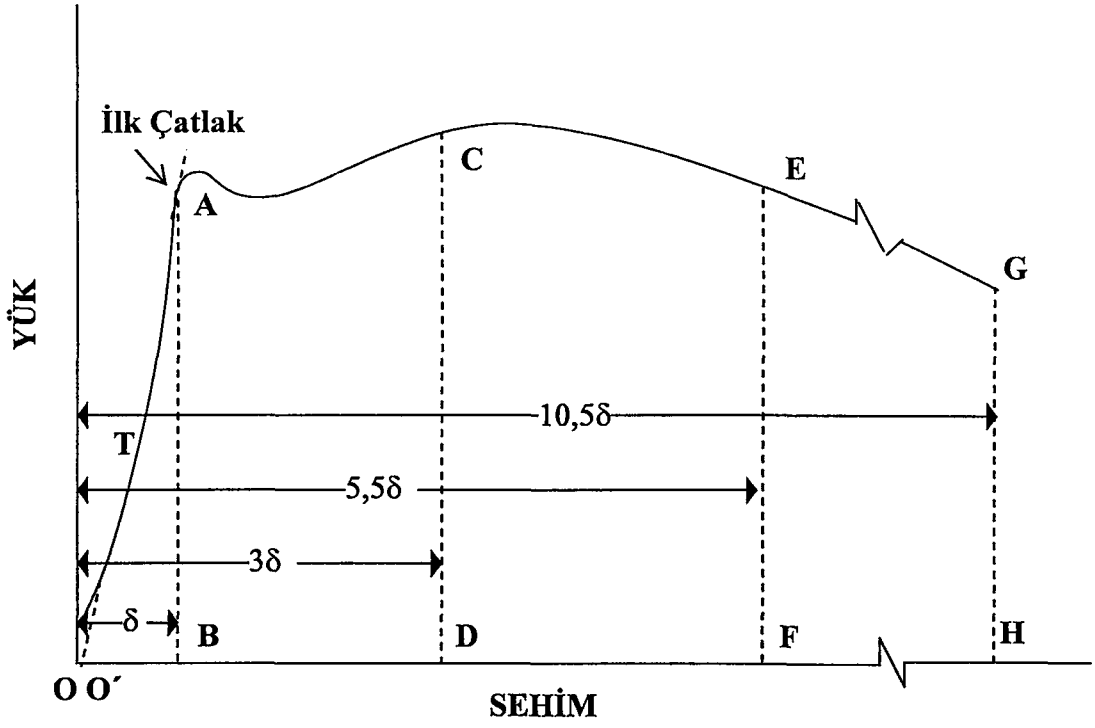
2.10.1. ASTM Yöntemi

Bu metot belirli sehime kadar malzeme davranışlarını tanımlayan tokluk indislerinin belirlenmesini içermektedir. Tokluk indisleri, çelik tel donatılı betonun belirli bir sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanının ilk kırılma yüküne kadar olan kısmının altında kalan alana oranı olarak ifade edilmektedir. Ayrıca yük-sehim eğrisine bağlı olarak ilk çatlak yüküne karşı gelen eğilme dayanımının belirlenmesini de içermektedir. Kiriş numuneler üzerinde ASTM C 1018'e göre yapılan standart eğilme deney düzeneği Şekil 2.18'de verilmektedir.

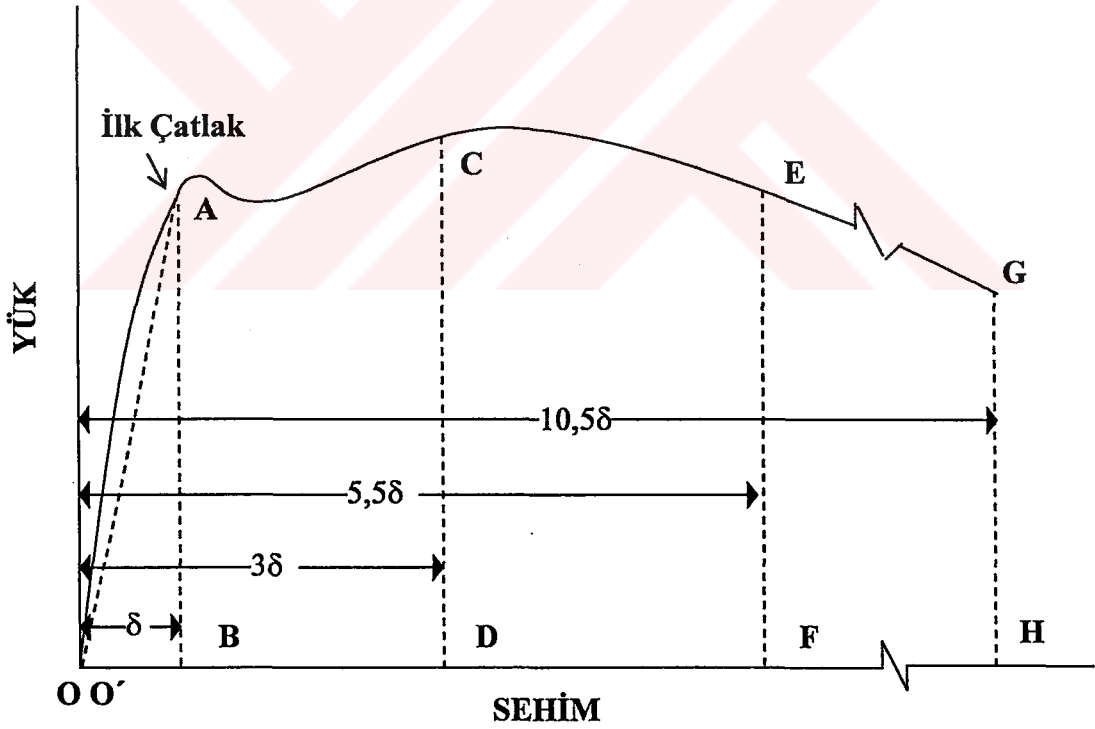


Şekil 2.18. ASTM C 1018' e göre ÇTDB kirişler için eğilme deney düzeneği [77].

Kapalı çevrim kontrollü (sehim kontrollü) yükleme cihazı ile yapılan deney ile kirişin orta noktasında ölçülen sehime bağlı olarak elde edilen yük-sehim eğrilerinden tanımlanan tokluk indeksleri belirlenmektedir. Sehim hızı ise 0.1 mm/dakika olarak verilmektedir. Bu metotta belirtilen ve tokluk indekslerinin hesaplamalarda kullanılan önemli sehim noktaları tipik yük-sehim eğrisi üzerinde Şekil 2.19 ' da verilmektedir [77]. Bu metotta yük-sehim eğrisinin lineer bölümden ilk kez ayrıldığı nokta (A noktası) tanımlanarak ilk çatlak belirlenir. Dış etkileri düzeltmek için deney eğrisinden ayrıldığı T noktasından itibaren yük-sehim eğrisinin lineer bölümünü temsil eden düz çizgi AT, O' noktasında yeni bir merkeze taşınır. Böylece O'TA çizgisi alan hesaplamalarında OTA yerine kullanılır. Yük-sehim eğrisinde ilk çatlağa karşılık gelen yüke bağlı olarak ilk çatlamayı oluşturan gerilme hesaplanır. İlk çatlama sehim O'B uzunluğuna karşılık gelen sehim (δ) olarak belirlenir. İlk çatlak sehimine kadar, yük-sehim eğrisinin altındaki alan belirtilir. Bu alan O'AB üçgen alanı ilk çatlak tokluğudur.



a) İlk çatlağa kadar eğrilik yukarı doğru.



b) İlk çatlağa kadar eğrilik aşağı doğru.

Şekil 2.19. ASTM C 1018' e göre tipik yük-sehim eğrisi ve önemli noktaları [77].

Bu yöntemde belirtilen tokluk indeksleri şu şekilde tanımlanmaktadır.

I_5 Tokluk İndeksi ; ilk çatlak sehiminin 3 katı sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanın, ilk çatlak yüküne kadar eğri altına kalan alana oranıdır.

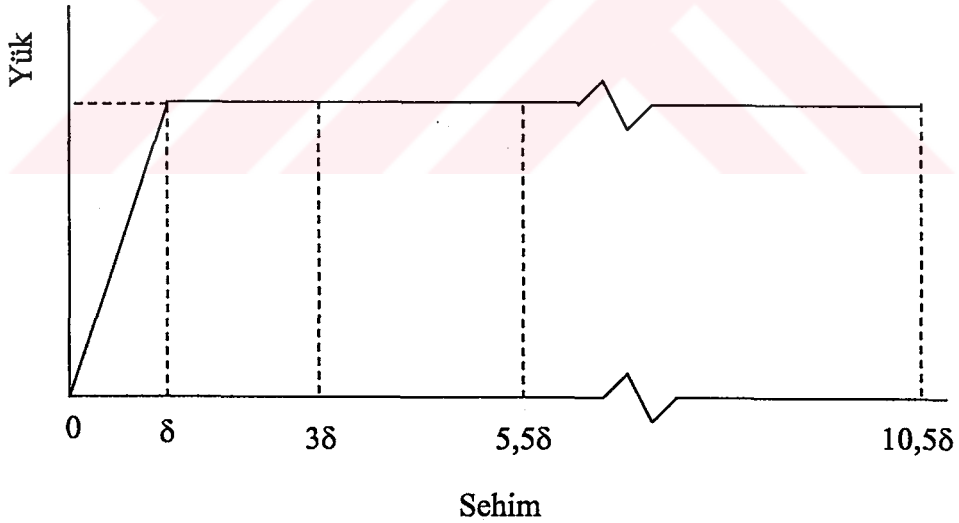
I_{10} Tokluk İndeksi ; ilk çatlak sehiminin 5.5 katı sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanın, ilk çatlak yüküne kadar eğri altına kalan alana oranıdır.

I_{20} Tokluk İndeksi ; ilk çatlak sehiminin 10.5 katı sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanın, ilk çatlak yüküne kadar eğri altına kalan alana oranıdır.

Tanımlanan bu tokluk indekslerinin hesaplanması ise Şekil 2.19.'a bağlı olarak aşağıda verilmektedir :

$$I_5 = \frac{O'ACD}{O'AB} , \quad I_{10} = \frac{O'AEF}{O'AB} \quad \text{ve} \quad I_{20} = \frac{O'AGH}{O'AB} \quad (2.7)$$

Tam elasto-plastik bir malzeme için, yani ilk çatlaktan sonra elasto-plastik davranış durumunda I_j tokluk indisi j değerine eşit olur. Bu durumda, I_5 , I_{10} ve I_{20} tokluk indislerindeki 5, 10 ve 20 değerleri ilk çatlığa kadar olan lineer elastik kısma ve ondan sonra tam plastik sehimlere uygun gelmektedir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Tam elasto-plastik malzemenin yük-sehim eğrisi.

Tokluk indisi değerinin düşük olması, çatlama sonrası dayanımdaki hasarın büyük ve enerji yutma yeteneğinin ise az olduğunu ifade etmektedir. Yüksek tokluk indislerinin elde edilebilmesi için çelik telin tipi, içeriği, narinliği ve matris parametrelerinin uygun seçilmesi gereklidir.

Çatlama-sonrasındaki farklı aşamalarda hasarın derecesi kalıcı dayanım faktörleri ile de gösterilebilir. ASTM C 1018'e göre kalıcı dayanım faktörleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$R_{5,10} = 20 (I_{10} - I_5) \quad (4.2)$$

$$R_{10,20} = 10 (I_{20} - I_{10}) \quad (4.3)$$

$R_{5,10}$ ve $R_{10,20}$ gibi kalıcı dayanım faktörleri, ölçülen ilk çatlak dayanımının yüzdesi olarak ilk çatlaktan sonra belirli sehime kadar ortalama kalıcı dayanımı ifade etmektedir. Kiriş deneyinden elde edilen yük-sehim eğrisinde, ilk çatlak oluştuktan sonra malzemenin yük-sehim eğrisi tam plastik davranış göstermesi durumunda $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}=100$, yumuşama eğilimi göstermesi durumunda ise $R_{5,10}$ ve $R_{10,20}<100$ olmaktadır. Yalın betonda ise kalıcı dayanım faktörleri sıfırdır ($R_{5,10}$ ve $R_{10,20}=0$). ÇTDB'lar kalıcı dayanım faktörlerine göre Tablo 2.2'deki gibi sınıflandırılmaktadır.

Tablo 2.2. ÇTDB'ların kalıcı dayanım faktörlerine göre sınıflandırılması [77].

Sınıf	Değerlendirme	Kalıcı Dayanım Faktörü
I	Zayıf	< 40
II	Orta	40-60
III	İyi	60-80
IV	Mükemmel	80-100

2.10.2. JSCE SF-4 Yöntemi

Bu yöntem, çelik tel donatılı betonlarda eğilme tokluğunun hesaplanmasını içermektedir. Eğilme dayanımını maksimum yükü göre tanımlanmakta ve kopma modülü (f_u) olarak adlandırmaktadır. Yöntem, tokluğu kiriş açıklığı/150 mm sehime kadar ortalama yükten elde edilen bir eşdeğer eğilme dayanımı olarak tanımlamaktadır. Tipik yük-sehim eğrisi ve eğrinin önemli noktaları Şekil 2.21.'da verildi [78]. Bu metotta yük-sehim eğrisi, üçte bir noktalarından yüklenen kiriş deney metodu ile kiriş numunelerin kapalı çevrim kontrollü (sehim kontrollü) yükleme cihazı ile kirişin orta noktasındaki sehim'in, kiriş açıklığı/150 sehime kadar ölçülmesiyle elde edilmektedir.

Kopma modülü ve eşdeğer eğilme dayanımı için verilen tanımlamalar ise aşağıda verilmektedir.

Kopma modülü (maksimum eğilme dayanımı):

$$f_u = P_u \frac{l}{b.h^2} \quad (2.9)$$

Eşdeğer eğilme dayanımı :

$$f_e = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \frac{l}{bh^2} \quad (2.10)$$

denklemlerde,

P_u = Maksimum yükü

b = kiriş numunesinin genişliğini

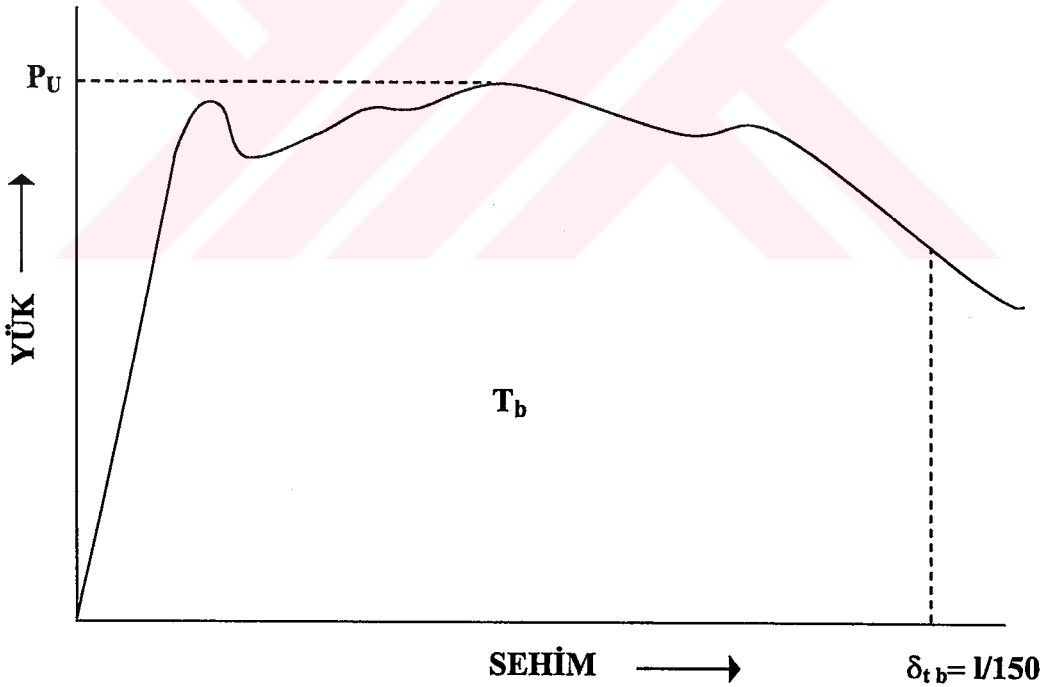
h = kiriş numunesinin yüksekliğini

l = kiriş açıklığını

T_b = $l/150$ sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alanı

δ_{tb} = kiriş açıklığı/150 sehimi

ifade etmektedir.

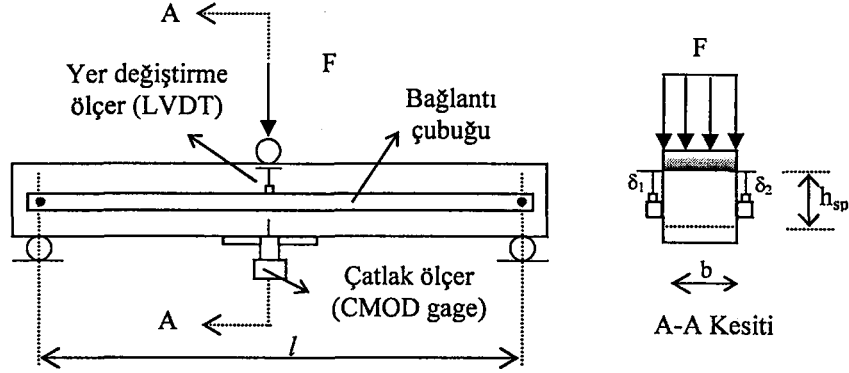


Şekil 2.21. JSCE SF-4' e göre tipik yük-sehim eğrisi ve önemli noktaları [78].

2.10.3. RILEM Yöntemi

Bu yöntem, orta noktasından yüklenen çentikli kiriş numunelerinden elde edilen yük-sehim eğrisine bağlı olarak çelik tel donatılı betonların eğilme davranışını belirlenmesini içermektedir [79]. Ayrıca çatlak ağzı açılmasını da opsiyonel olarak

belirlenmektedir. Kiriş ortasındaki net sehim, kirişin yan yüzlerine takılan ve kiriş numunesine mafsallı bağlanan çubukların orta noktalarında ölçülen sehimlerin ortalaması olarak alınmaktadır. Deney düzeneği Şekil 2.22.' de verilmektedir [79].



Şekil 2.22. RILEM yöntemi deney düzeneği [79].

Yüklemeye ise, kiriş ortasındaki ortalama net sehim, $(\delta_1 + \delta_2)/2$, 0.2 mm./dakika olacak şekilde kapalı çevrim kontrollü cihazda, sehim belirli bir noktaya gelinceye kadar sürekli kaydedilerek yapılmaktadır. Tipik yük-sehim eğrisi ve hesaplamalarda kullanılan kullanılan önemli noktalar Şekil 2.23.' de verilmektedir.

Orantılık sınırındaki yük (F_u) Şekil 2.23.a'da verildiği gibi belirlenir. Bu yüke karşılık gelen kiriş ortasındaki eğilme momenti ise;

$$M_u = \frac{F_u l}{2} \quad (2.11)$$

olur ve burada l =numunenin açıklığıdır. Numunenin kesiti boyunca gerilmenin doğrusal değiştiği kabulü ile F_u kuvvetinin yaptığı eğilmede çekme gerilmesi, $f_{ct,fl}$, aşağıdaki şekilde belirlenir;

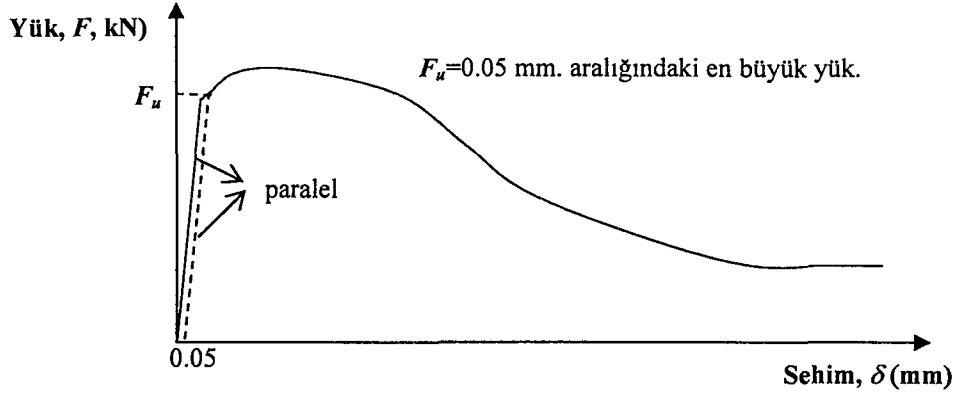
$$f_{ct,fl} = \frac{3F_u L}{2bh_{sp}^2} \quad (2.12)$$

burada,

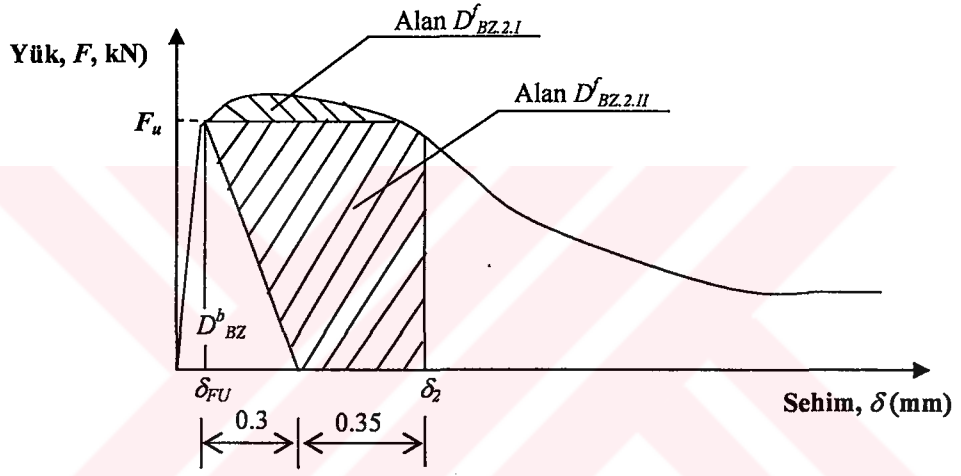
b =kiriş numunesinin enini

h_{sp} = çentik ucu ile numunenin üst kısmı arasındaki mesafeyi

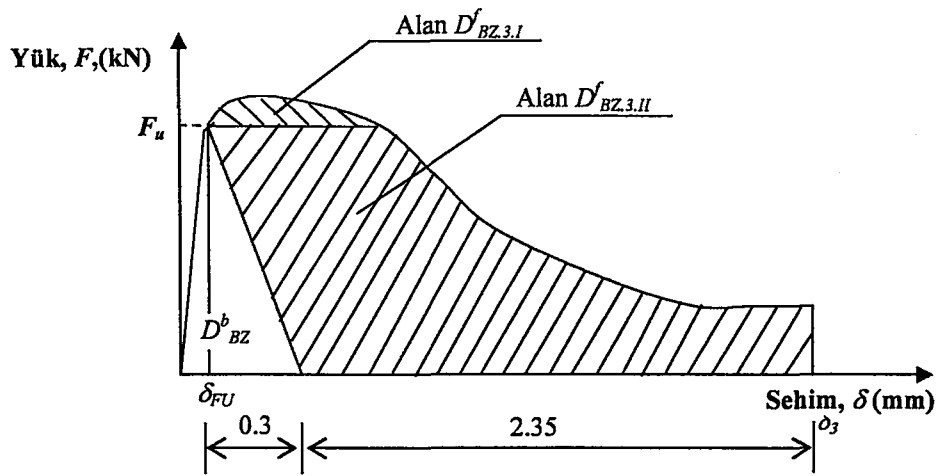
ifade etmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.23. RILEM yönteminde verilen tipik yük-sehim eğrileri ve önemli noktaları [79].

Enerji yutma kapasitesi $D_{BZ,2}$ ($D_{BZ,3}$) ise δ_2 (δ_3) sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alan olarak ifade edilmektedir. $D_{BZ,2}$ ($D_{BZ,3}$) de iki kısımdan oluşmaktadır;

▪ Yalın beton $\rightarrow D^b_{BZ}$

▪ Liflerin etkisi

$$\rightarrow D^f_{BZ,2} = D^f_{BZ,2,I} + D^f_{BZ,2,II} \quad (2.13)$$

$$D^f_{BZ,3} = D^f_{BZ,3,I} + D^f_{BZ,3,II} \quad (2.14)$$

δ_{FU} sehimini F_u yüküne karşı gelen sehimini ifade etmektedir. δ_2 ve δ_3 sehimleri de aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\delta_2 = \delta_{FU} + 0.65 \text{ mm.} \quad (2.15)$$

$$\delta_3 = \delta_{FU} + 2.65 \text{ mm.} \quad (2.16)$$

F_2 (F_3) ise $D_{BZ,2}$ ($D_{BZ,3}$) taralı alanına eşit ortalama yükü ifade etmekte ve aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$F_2 = \frac{D^f_{BZ,2,I}}{0.65} + \frac{D^f_{BZ,2,II}}{0.50} \quad (2.17)$$

$$F_3 = \frac{D^f_{BZ,3,I}}{2.65} + \frac{D^f_{BZ,3,II}}{2.50} \quad (2.18)$$

F_2 (F_3) yüküne karşı gelen açıklık ortasındaki moment ise;

$$M_2 = \frac{F_2}{2} \frac{L}{2} = \left[\frac{D^f_{BZ,2,I}}{0.65} + \frac{D^f_{BZ,2,II}}{0.50} \right] \frac{l}{4} \quad (2.19)$$

$$M_3 = \frac{F_3}{2} \frac{L}{2} = \left[\frac{D^f_{BZ,3,I}}{2.65} + \frac{D^f_{BZ,3,II}}{2.50} \right] \frac{l}{4} \quad (2.20)$$

denklemleri ile belirlenir. Bu momentlere bağlı olarak eşdeğer eğilmede çekme dayanımları, $f_{eq,2}$ ve $f_{eq,3}$ aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \left[\frac{D^f_{BZ,2,I}}{0.65} + \frac{D^f_{BZ,2,II}}{0.50} \right] \frac{l}{bh_{sp}^2} \quad (2.21)$$

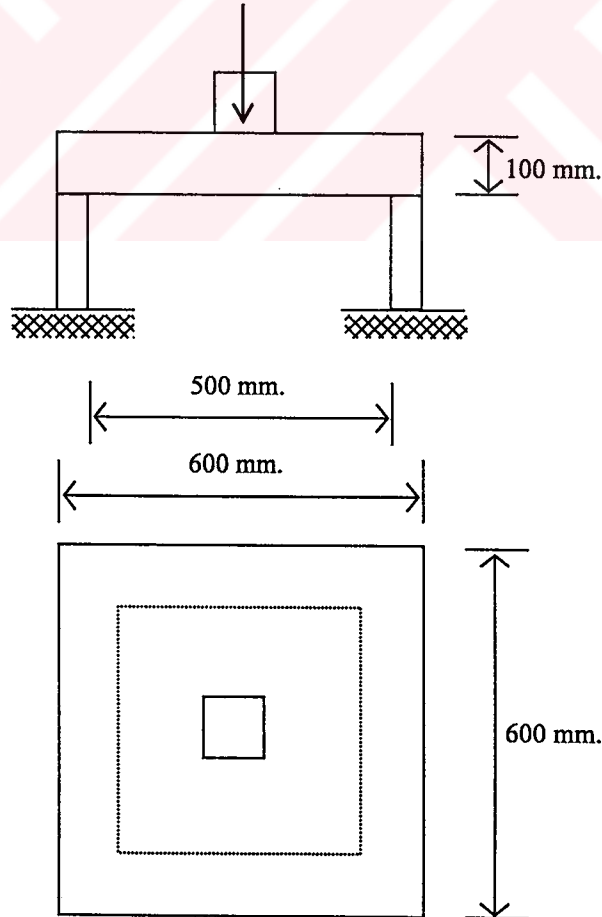
$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} \left[\frac{D^f_{BZ,3,I}}{2.65} + \frac{D^f_{BZ,3,II}}{2.50} \right] \frac{L}{bh_{sp}^2} \quad (2.22)$$

2.10.4. EFNARC Deney Yöntemi

Bu metot genellikle püskürtme beton deney numunelerinin tokluk değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Tokluk değeri, dört kenarı serbest oturan plak deneylerinden elde edilen yük-sehim eğrisinde, 25 mm'lik sehime kadar yutulan enerjiyi esas almaktadır. Üç plak numunesi üzerinde yapılan deney sonucunda elde edilen plakların enerji yutma kapasitelerinin ortalaması ÇTDB'ların tokluklarının sınıflandırılması için kullanılır. Tablo 2.3'de EFNARC yöntemine çelik tel donatılı betonlar için belirtilen tokluk sınıflandırması verilmektedir [81]. Deney düzeneği ise Şekil 2.24.'de verildi. Yükleme ise kapalı çevrim kontrollü cihazda plak ortasındaki sehim hızı 1 mm/dak. olacak şekilde yapılması öngörülmektedir [81].

Tablo 2.3. EFNARC' a göre çelik tel donatılı beton plaklarda tokluk sınıfları [81]

Tokluk Sınıfı	25mm'e kadar yutulan enerji (Joule)
a	500
b	700
c	1000



Şekil 2.24. EFNARC plak deney düzeneği [81].

2.10.5. Tokluk Deney Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Düşük lif içeriklerinde tepe noktasına ulaşıldıktan sonra ani bir enerji boşalması ve geniş bir çatlak açılması ile ani bir düşme olmaktadır. Bundan dolayı ASTM C 1018 metotunda belirtilen ve bu bölge içerisinde kalan I_5 ve I_{10} tokluk indisleri değerleri matris ve lif karakterleri ile ilgili olmamaktadır. Yüksek dayanımlı matrislerde (> 70 MPa) I_{20} tokluk indisi de bu kararsız bölgeye düşmektedir [63]. Ayrıca tokluk indisleri ilk çatlak yüküne bağlı olarak belirlenmektedir. Ancak ilk çatlak yükü tepe yüküne yakın olmasına rağmen belirlenmesi oldukça güç olmaktadır.

JSCE SF-4 yöntemi ise tokluk değerinin belirlenmesinde ilk çatlak yükünü dikkate almamasına karşın, kiriş açıklığı/150 sehime kadar olan alanı hesaplarda kullanmaktadır. Ancak, hemen hemen bütün uygulamalardaki bu sehim limit değerlerden fazla olmaktadır [95].

Tokluk değerlerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin hepsinde tokluk yük-sehim eğrisi altında kalan alan yardımıyla hesaplanmaktadır. Ancak tokluğun numune boyutu, yükleme düzeni (üç veya dört noktadan yükleme) ve yükleme hızı gibi parametrelere bağlı olmakta ve ilk çatlak deformasyonunu bu parametrelerden etkilenmektedir [5]. Sonuç olarak ÇTDB ve ÇTDPB'ların tokluk değerlerinin hesaplanması için geliştirilmiş yeni tekniklere gereksinim vardır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

Çalışmada Lafarge-Aslan Çimento Fabrikasından temin edilen PC42.5 cinsi Portland Çimentosu kullanıldı. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1' de verildi.

3.1.2. Agregası

Kaba agrega olarak Kırmataş I ve Kırmataş II, ince agrega olarak da Kırma Kum ve iki tip Silis Unu kullanıldı. Çalışmada en büyük agrega boyutu 32 mm. olarak seçildi. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo 3.2' de, Silis Unu 1 ve Silis Unu 2' nin kimyasal özellikleri ve tane boyutu dağılımı sırasıyla Tablo 3.3 ve Tablo 3.4.' de verilmektedir.

3.1.3. Çelik Tel

Çalışmada Beksa Çelik Tel ve Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından temin edilen RC 80/60 BN, RC 65/60 BN ve ZP305 tipi iki ucu kancalı çelik teller kullanıldı. Kullanılan çelik tellerin özellikleri Tablo 3.5' de verilmektedir. Çelik tellerin standard çekme dayanımları 1100 N/mm^2 ve yoğunluğu ise 7.85 g/cm^3 'tür. Kullanılan çelik teller ile ilgili diğer bilgiler Ek A'da verilmektedir.

3.1.4. Hiperakışkanlaştırıcı

Bu çalışmada taze betonların işlenebilirliği 12 cm. $\pm$ 2 cm. çökme değerinde sabit tutuldu. İstenilen işlenebilirliği sağlamak için Yapı Kimyasalları Sanayi (YKS) firmasından temin edilen polikarboksilik eter zincirleri esaslı Glenium 27 tipi hiperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanıldı. Glenium 27'nin yoğunluğu 20°C' de $1.03-1.07 \text{ gr/cm}^3$ tür.

Tablo 3.1. Portland Çimentosunun (PÇ42.5) özellikleri.

Çimento Tipi	PÇ42.5
Çözünmeyen Kalıntı	0.2
MgO, %	1.67
SO ₃ , %	3.24
K ₂ O, %	0.58
Kızdırma Kaybı, %	1.02
Cl, %	0.01
serbest CaO, %	0.4
C ₃ A, %	9.2
C ₃ S, %	50.7
Özgül ağırlık g/cm ³	3.16
Blaine cm ² /g.	3003
Su/çimento, %	27.4
Priz Süreleri	
Priz başı dk.	177
Priz sonu, dk.	223
Le Chatelier, mm	1
Basınç Dayanımı, N/mm ²	
1 gün	17.9
2 gün	27.5
7 gün	41.9
28 gün	58.7

Tablo 3.2. Agregaların fiziksel özellikleri.

Agrega	Gevşek Birim Ağırlık, kg/m ³	Özgül Ağırlık, kg/m ³	Su Emme %
Silis Unu 1	-	2650	-
Silis Unu 2	-	2650	-
Kırmakum	1550	2510	1.35
Kırmataş I	1420	2660	1.05
Kırmataş II	1440	2710	0.87

Tablo 3.3. Silis Unu 1 ve Silis Unu 2'nin kimyasal Özellikleri.

Bileşenler, %	Silis Unu 1	Silis Unu 2
CaO	0.37	0.97
SiO ₂	97.69	99.62
Al ₂ O ₃	0.63	1.82
Fe ₂ O ₃	0.61	0.50
MgO	0.04	0.03
K ₂ O	0.01	0.13
Cl	0.0182	0.0087
Na ₂ O	0.08	0.01
TiO ₂	0.43	0.32
SO ₃	0.20	0.22

Tablo 3.4. Silis Unu 1 ve Silis Unu 2' nin tane dağılımı.

Tane Çapı, μ	Elekt Üstü, %	
	Silis Unu 1	Silis Unu 2
32	97.69	99.62
45	0.63	1.82
63	0.61	0.50
90	0.04	0.03
125	0.01	0.13
200	0.0182	0.0087

Tablo 3.5. Çelik tellerin özellikleri

Çelik Tel Tipi	Boy mm.	Çap mm.	Narinlik (uzunluk/çap)	Yoğunluk, (g/ cm ³)
Dramix RC 80/60 BN	60	0.75	80	7.85
Dramix RC 65/60 BN	60	0.92	65	7.85
Dramix ZP 305	30	0.55	55	7.85

3.2. Beton Karışımları

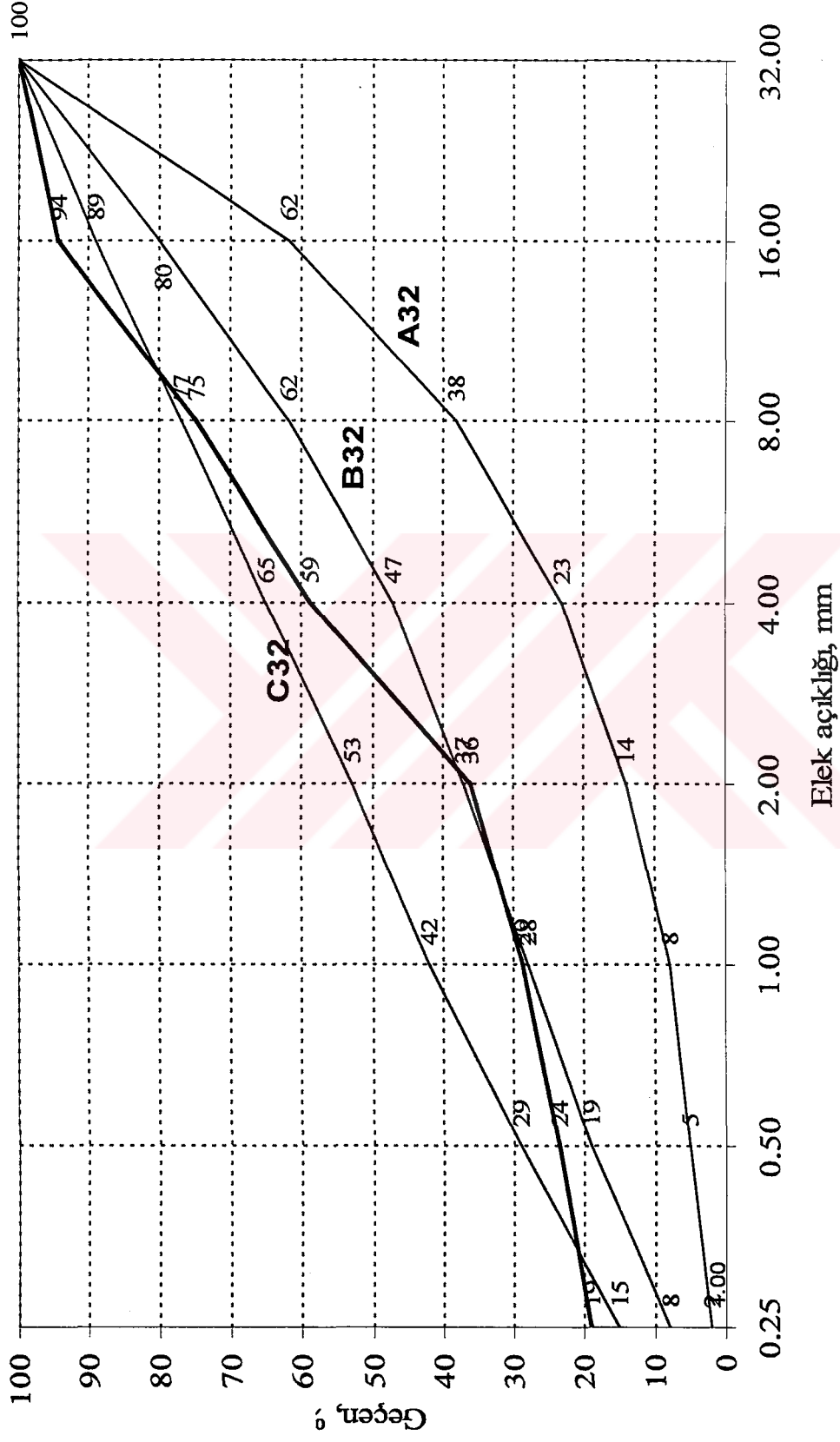
Üretilen betonlarda kullanılan agrega oranları hacmen Tablo 3.6.'da ve karışım agregasına ait tane dağılımı eğrisi Şekil 3.1.'de, taze beton özellikleri ve gerçek karışım miktarları ise Tablo 3.7.' de verilmektedir.

Tablo 3.6. Agrega karışım oranları (hacimce)

Agrega	Karışım %' si (hacimce)
Silis Unu 1	10
Silis Unu 2	10
Kırma Kum	35
Kırmataş I	30
Kırmataş II	15

3.3. Üretilen Betonların Özellikleri

Bu çalışmada su/çimento oranları 0.45 ve 0.70 olan betonlar kullanıldı. Bu betonlara 55, 65 ve 80 narinliğe sahip çelik tellerin 0 kg/m³, 20 kg/m³, 40 kg/m³ ve 60 kg/m³ miktarlarda katılmasıyla beton numuneler üretildi. Betonların çökme değerleri hiperakışkanlaştırıcı kullanılarak 12 cm. ± 2 cm. olacak şekilde sabit



Şekil 3.1. Karışım agregası tane dağılımı eğrisi.

Tablo 3.7. Taze beton özellikleri.

Su/Çimento Oranı	Tel Tipi	Narinlik	Seri Kodu	Çimento kg	Su kg	Gilenium27 Akış.Katki, %	Tel Miktarı kg.	Silis Unu1 kg.	Silis Unu2 kg.	Kırma Kum kg.	Kırmataş I kg.	Kırmataş II kg.	Çökme cm.	Birim Ağırlık kg/m ³	Hava Miktarı %
0.45	Kontrol	-	G1-N0T0	398	179	1,30	0	179	179	512	632	276	13	2352	1,6
			G1-N55T20	398	179	1,52	20	179	179	512	632	276	10	2355	1,3
	ZP305	55	G1-N55T40	398	179	1,75	40	179	179	512	632	276	11	2391	1,0
			G1-N55T60	398	179	2,25	60	179	179	512	632	276	11	2423	0,8
	RC 65/60	65	G1-N65T20	398	179	1,51	20	179	179	512	632	276	11	2363	1,3
			G1-N65T40	398	179	1,75	40	179	179	512	632	276	12	2413	1,0
			G1-N65T60	398	179	1,90	60	179	179	512	632	276	13	2431	0,8
			G1-N80T20	398	179	1,50	20	179	179	512	632	276	12	2393	1,3
	RC 80/60	80	G1-N80T40	398	179	1,77	40	179	179	512	632	276	12	2418	1,0
			G1-N80T60	398	179	2,00	60	179	179	512	632	276	12	2421	0,8
	Kontrol	-	G2-N0T0	298	209	-	0	179	179	512	632	276	12	2239	1,8
			G2-N55T20	298	209	-	20	179	179	512	632	276	13	2275	1,5
0.70	ZP305	55	G2-N55T40	298	209	-	40	179	179	512	632	276	11	2310	1,2
			G2-N55T60	298	209	-	60	179	179	512	632	276	10	2326	0,9
			G2-N65T20	298	209	-	20	179	179	512	632	276	12	2336	1,5
	RC 65/60	65	G2-N65T40	298	209	-	40	179	179	512	632	276	11	2344	1,2
			G2-N65T60	298	209	-	60	179	179	512	632	276	10,5	2358	0,9
			G2-N80T20	298	209	-	20	179	179	512	632	276	12	2302	1,5
	RC 80/60	80	G2-N80T40	298	209	-	40	179	179	512	632	276	11	2305	1,2
			G2-N80T60	298	209	-	60	179	179	512	632	276	10	2334	0,9

tutuldu. Betonlar üretildikten bir gün sonra kalıptan çıkarılarak laboratuvar ortamında 28 gün süreyle sulandı ve üzerine naylon geçirilmek suretiyle rutubeti korundu. Numunelerin 28. günden itibaren deney zamanına kadar laboratuvar ortamında 20 ± 5 sıcaklıkta ve $\%60 \pm\%10$ bağıl nem bırakıldı. Üretilen betonların kodlamasında su/çimento oranı 0.45 olan betonlar 1. grup, G1 ve su/çimento oranı 0.70 olan betonlar ise 2. grup, G2 olarak alındı. Kodlamalarda G harfinin önündeki sayı grup numarasını (su/çimento oranını), N sayısının önündeki sayı kullanılan çelik telin narinliğini ve T sayısının önündeki sayı ise kg/m^3 olarak kullanılan çelik tel miktarını ifade etmektedir. Örnek olarak, G2N65T20, su/çimento oranı 0.70 olan betonlara narinliği 65 olan çelik telin 20 kg/m^3 miktarda katılmasıyla üretilen betonu ifade etmektedir.

Her seri için 3 adet 600 mm x 600 mm x 100 mm. boyutlarında plak ve 4 adet 150 mmx300 mm (çap=150mm. ve yükseklik= 300 mm.) standart silindir numuneler üretildi. Plak numuneler üzerinde tokluk tayini deneyi, 3 adet silindir üzerinde yükleme-boşaltma deneyi ile beton basınç dayanımı, elastisite modülü tayini ve gevreklik indisi tayini deneyleri ve kalan 1 adet silindir numunesinin üç eşit parçaya kesilmesiyle elde edilen 150 mm. çapında ve 100 mm. kalınlığındaki disk numuneler üzerinde ise yarmada çekme deneyleri yapıldı.

Ayrıca her bir kontrol grubu (çelik tel içermeyen ve su/çimento oranı 0.45 ve 0.70 olan betonlar) için 6 adet küp numuneler üretildi. Bu numunelerin 3 tanesi 28 gün, diğer 3 tanesi ise 160 gün süresince laboratuvar ortamında 20 ± 5 sıcaklıkta ve $\%60 \pm\%10$ bağıl neme tabii tutuldu. Bu süreler sonunda numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyi yapıldı.

3.4. Beton Deneyleri

3.4.1. Taze Beton Deneyleri

3.4.1.1. Birim Ağırlık Deneyi

Üretilen betonlar üzerinde TS 2941' e uygun olarak taze birim ağırlık deneyi yapıldı [96]. Deney sonuçları Tablo 3.7.' da verildi.

3.4.1.2. İşlenebilme Deneyi

Hiperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak çökme değeri (slump) $12 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ olacak şekilde işlenebilme sabit tutuldu. Çökme deneyi TS TS2871 uygun olarak yapıldı [97]. Deney sonuçları Tablo 3.7.' da verilmektedir.

3.4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Laboratuvar ortamında 20 ± 5 sıcaklıkta ve $\%60 \pm \%10$ bağıl neme 160 süreyle tabii tutulan numuneler üzerinde sertleşmiş beton deneyleri yapıldı. Yapılan deneyler aşağıda verildi.

3.4.2.1. Basınç Dayanımı Tayini

Basınç dayanımı deneyleri her grup beton için 3 adet $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$. standard silindir numuneler üzerinde $0.26 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ yükleme hızında TSE 3114' e uygun olarak yapıldı [98]. Ayrıca kontrol grubu (çelik tel içermeyen) beton numunelerin 28 günlük ve deney zamanı küp basınç dayanımları belirlendi. Deney sonuçları Tablo 3.8 ve 3.9'da verilmektedir.

Tablo 3.8. Kontrol numunelerine ait 28 günlük ve plak deneylerinin yapıldığı gün küp basınç dayanımı sonuçları.

Su/çimento oranı	28 günlük Küp basınç dayanımı, MPa.	160 günlük Küp basınç dayanımı, MPa
0,45	50,1	65,0
0,70	24,3	33,8

3.4.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı Tayini

Yarmada çekme deneyi 1 adet $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ standart silindir numunesinin üç eşit parçaya kesilmesiyle elde edilen $150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$. boyutlarındaki disk numuneler üzerinde yapıldı. Deney sonuçları Tablo 3.10' da verilmektedir.

Tablo 3.9. Basınç dayanımı deney sonuçları.

Su/çimento oranı	Çelik tel tipi	Narinlik (L/d)	Seri Kodu	Tel içeriği (V_t), kg/m ³	Basınç Dayanımı (f_c), MPa
0.45	Kontrol	-	G1-N0T0	0	61,5
	ZP305	55	G1-N55T20	20	57,3
			G1-N55T40	40	61,0
			G1-N55T60	60	61,3
	RC 65/60	65	G1-N65T20	20	57,3
			G1-N65T40	40	62,9
			G1-N65T60	60	61,4
	RC 80/60	80	G1-N80T20	20	59,1
			G1-N80T40	40	63,6
			G1-N80T60	60	62,6
0.70	Kontrol	-	G2-N0T0	0	32,0
	ZP305	55	G2-N55T20	20	30,8
			G2-N55T40	40	32,3
			G2-N55T60	60	31,2
	RC 65/60	65	G2-N65T20	20	32,1
			G2-N65T40	40	31,4
			G2-N65T60	60	34,2
	RC 80/60	80	G2-N80T20	20	31,7
			G2-N80T40	40	32,5
			G2-N80T60	60	31,3

Tablo 3.10. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.

Su/çimento oranı	Çelik tel tipi	Narinlik (L/d)	Seri Kodu	Tel içeriği (V_t), kg/m ³	Yarmada Çekme Dayanımı, (f_{st}), MPa
0.45	Kontrol	-	G1-N0T0	0	5,06
	ZP305	55	G1-N55T20	20	4,95
			G1-N55T40	40	5,77
			G1-N55T60	60	6,12
	RC 65/60	65	G1-N65T20	20	4,56
			G1-N65T40	40	6,3
			G1-N65T60	60	5,53
	RC 80/60	80	G1-N80T20	20	4,88
			G1-N80T40	40	4,71
			G1-N80T60	60	5,82
0.70	Kontrol	-	G2-N0T0	0	4,16
	ZP305	55	G2-N55T20	20	3,55
			G2-N55T40	40	3,69
			G2-N55T60	60	3,51
	RC 65/60	65	G2-N65T20	20	3,13
			G2-N65T40	40	4,14
			G2-N65T60	60	4,07
	RC 80/60	80	G2-N80T20	20	3,65
			G2-N80T40	40	4,04
			G2-N80T60	60	3,69

3.4.2.3. Elastisite Modülü Tayini

Elastisite modülü standard silindir basınç deneyi numuneleri üzerinde yapıldı. Elastisite modülü gerilme-şekil değiştirme eğrisinden elde edilen maksimum yükün %5 ve %45' aralıklarına düşen gerilme-şekil değiştirme noktalarının doğrusal kabul edilmesiyle elde edilen doğrunun eğimi olarak alındı. Deney sonuçları Tablo 3.11' de verilmektedir.

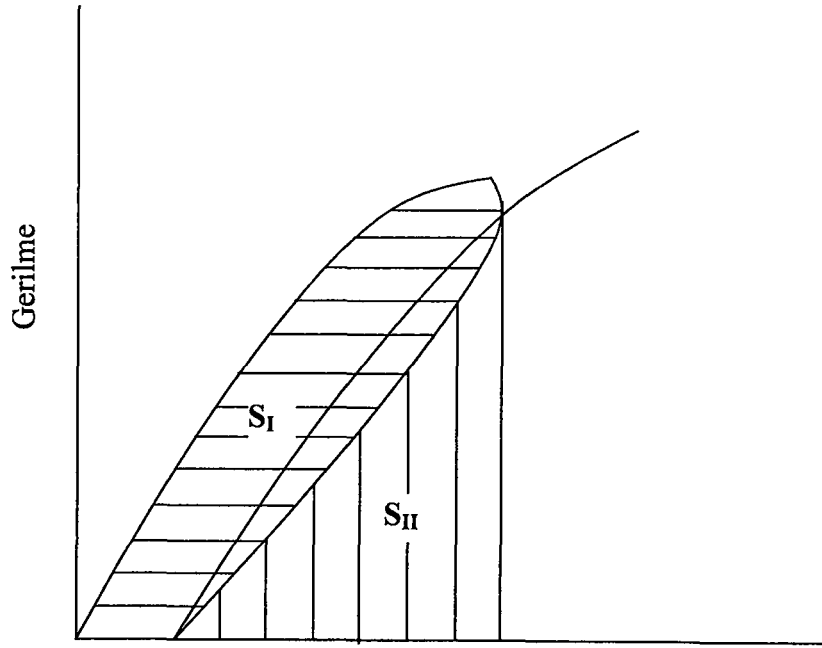
Tablo 3.11. Elastik modülü deney sonuçları.

Su/çimento oranı	Çelik tel tipi	Narinlik (L/d)	Seri Kodu	Tel içeriği (V _f), kg/m ³	Elastisite Modülü (E), GPa
0.45	Kontrol	-	G1-N0T0	0	47,7
	ZP305	55	G1-N55T20	20	44,0
			G1-N55T40	40	41,7
			G1-N55T60	60	45,4
			G1-N65T20	20	43,9
	RC 65/60	65	G1-N65T40	40	45,3
			G1-N65T60	60	44,9
			G1-N80T20	20	46,6
	RC 80/60	80	G1-N80T40	40	45,2
			G1-N80T60	60	46,0
0.70	Kontrol	-	G2-N0T0	0	37,9
	ZP305	55	G2-N55T20	20	35,5
			G2-N55T40	40	34,1
			G2-N55T60	60	34,4
	RC 65/60	65	G2-N65T20	20	36,1
			G2-N65T40	40	37,9
			G2-N65T60	60	38,0
	RC 80/60	80	G2-N80T20	20	38,7
			G2-N80T40	40	37,6
			G2-N80T60	60	35,7

3.4.2.4. Gevreklik İndeksi Tayini

Gevreklik indisi tayini basınç deneyi sırasında numunelerin yükleme- boşaltmaya tabii tutulmasıyla belirlendi. Yükleme-boşaltma için tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 3.2' de verilmektedir. Gevreklik indisi aşağıdaki formül ile belirlendi ve deney sonuçları 3.12' de verilmektedir.

$$\text{Gevreklik indisi} = S_{II}/S_I \quad (3.1)$$



Şekil Değişirme

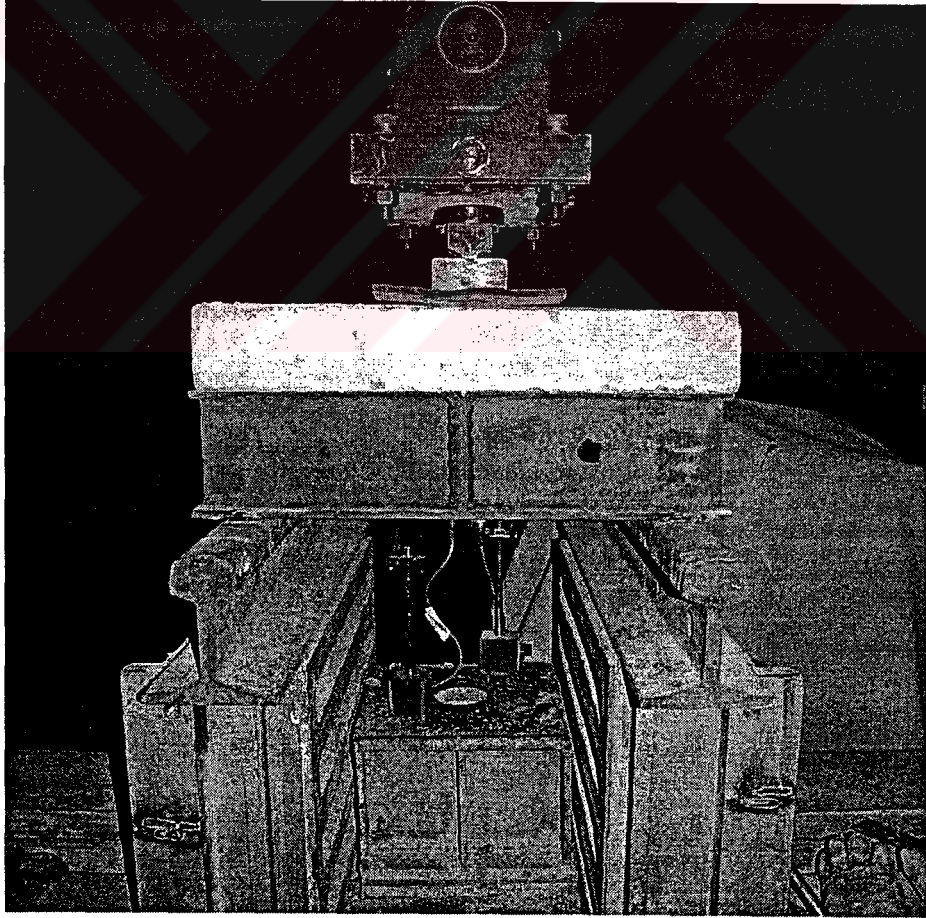
Şekil 3.2. Yükleme-boşaltma için tipik gerilme –şekil değiştirme eğrisi.

Tablo 3.12. Gevreklik indeksi deney sonuçları.

Su/çimento oranı	Çelik tel tipi	Narinlik (L/d)	Seri Kodu	Tel içeriği (V _f), kg/m ³	Gevreklik İndeksi
0.45	Kontrol	-	G1-N0T0	0	2,64
	ZP305	55	G1-N55T20	20	2,33
			G1-N55T40	40	2,35
			G1-N55T60	60	2,23
	RC 65/60	65	G1-N65T20	20	2,48
			G1-N65T40	40	2,36
			G1-N65T60	60	1,97
	RC 80/60	80	G1-N80T20	20	2,21
			G1-N80T40	40	2,04
			G1-N80T60	60	2,13
0.70	Kontrol	-	G2-N0T0	0	1,67
	ZP305	55	G2-N55T20	20	1,13
			G2-N55T40	40	1,11
			G2-N55T60	60	0,97
	RC 65/60	65	G2-N65T20	20	1,12
			G2-N65T40	40	1,17
			G2-N65T60	60	1,11
	RC 80/60	80	G2-N80T20	20	1,01
			G2-N80T40	40	1,32
			G2-N80T60	60	0,96

3.4.2.5. Tokluk

Numunelerin tokluk kapasiteleri, her grup için 3 adet 600x600x100mm. boyutlarındaki plak numuneler üzerinde EFNARC [81] yöntemiyle yapılan plak deneylerinden elde edildi. Yükleme strok kontrollü cihazda 1 mm/dk. yükleme hızında yapıldı. Plak deney düzeneği Şekil 3.3' de verilmektedir. Deney sonucunda elde edilen yük-sehim eğrilerinde 25 mm.' lik sehime kadar eğri altında kalan alanları tokluk değerleri olarak belirlendi [81]. Tokluk değerleri her grup için elde edilen 3 plak numunesinin tokluk değerlerinin ortalaması olarak alındı. Her grup için tokluk değerleri Tablo 3.13' de, bütün plak numunelere ait yük-sehim eğrileri ve enerji-sehim eğrileri ise Ek B.'de verilmektedir. Ayrıca plakların deney sonrası kırılma şekillerini gösteren resimleri Ek C' de verilmektedir. Deney sırasında plak numunelerin ilk çatlak yükü ve yaklaşık çatlak genişlikleri belirlendi. Ortalama ilk çatlak yükü ve ortalama ilk çatlak genişliği Tablo 3.14' de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Plak deney düzeneği.

Tablo 3.13. Plak numunelere ait tokluk değerleri.

Su/imento oranı	elik tel tipi	Narinlik (L/d)	Seri Kodu	Tel içeriği (V_t), kg/m ³	Tokluk (T), Joule
0.45	ZP305	55	G1-N55T20	20	756
			G1-N55T40	40	1037
			G1-N55T60	60	1245
	RC 65/60	65	G1-N65T20	20	832
			G1-N65T40	40	1357
			G1-N65T60	60	1849
	RC 80/60	80	G1-N80T20	20	989
			G1-N80T40	40	1032
			G1-N80T60	60	1412
0.70	ZP305	55	G2-N55T20	20	426
			G2-N55T40	40	642
			G2-N55T60	60	908
	RC 65/60	65	G2-N65T20	20	771
			G2-N65T40	40	1069
			G2-N65T60	60	1500
	RC 80/60	80	G2-N80T20	20	741
			G2-N80T40	40	1239
			G2-N80T60	60	1618

Tablo 3.14. Plakların ilk çatlak yükü ve ilk çatlak genişliği.

Su/imento oranı	elik tel tipi	Narinlik (L/d)	Seri Kodu	Tel içeriği (V_t), kg/m ³	İlk atlak Yükü (P_i), kN	İlk atlak Genişliği, mm.
0.45	Kontrol	-	G1-N0T0	-	38,2	-
	ZP305	55	G1-N55T20	20	43,5	0,23
			G1-N55T40	40	49,3	0,20
			G1-N55T60	60	53,7	0,13
	RC 65/60	65	G1-N65T20	20	46,7	0,17
			G1-N65T40	40	48,0	0,10
			G1-N65T60	60	55,3	0,10
	RC 80/60	80	G1-N80T20	20	53,7	0,20
			G1-N80T40	40	51,7	0,10
			G1-N80T60	60	45,7	0,10
0.70	Kontrol	-	G2-N0T0	-	32,3	-
	ZP305	55	G2-N55T20	20	31,7	0,13
			G2-N55T40	40	39,0	0,10
			G2-N55T60	60	39,0	0,10
	RC 65/60	65	G2-N65T20	20	36,3	0,20
			G2-N65T40	40	38,0	0,13
			G2-N65T60	60	40,3	0,10
	RC 80/60	80	G2-N80T20	20	34,8	0,20
			G2-N80T40	40	36,0	0,13
			G2-N80T60	60	36,8	0,10

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

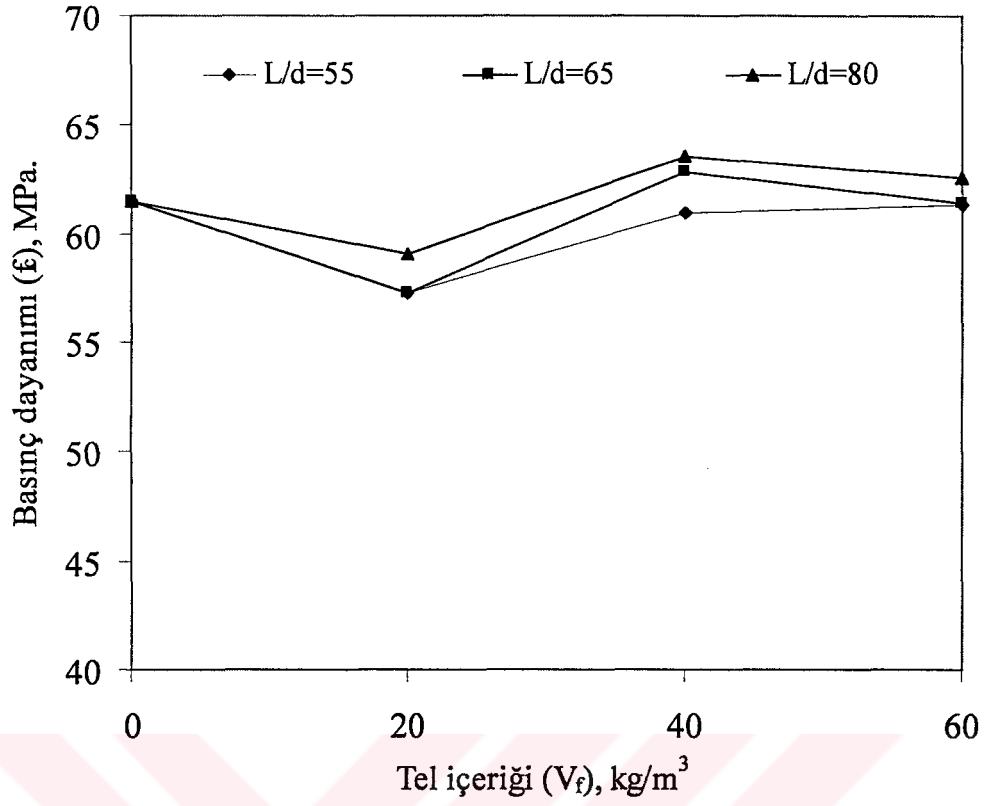
4.1. Basınç Dayanımı

Çelik tellerin betonun basınç dayanımına etkisi eğilme ve çekme dayanımlarında yaptıkları iyileşmeye kıyasla oldukça az olmaktadır [64]. Su/çimento oranı 0.45 ve 0.70 için betonların basınç dayanımlarına tel narinliğinin ve içeriğinin etkisinin fazla olmadığı gözlemlendi. Betonların basınç dayanımlarının, çelik tel narinliğine ve çelik tel içeriğine bağlı değişimi sırasıyla, Şekil 4.1 ve 4.2’ de verilmektedir.

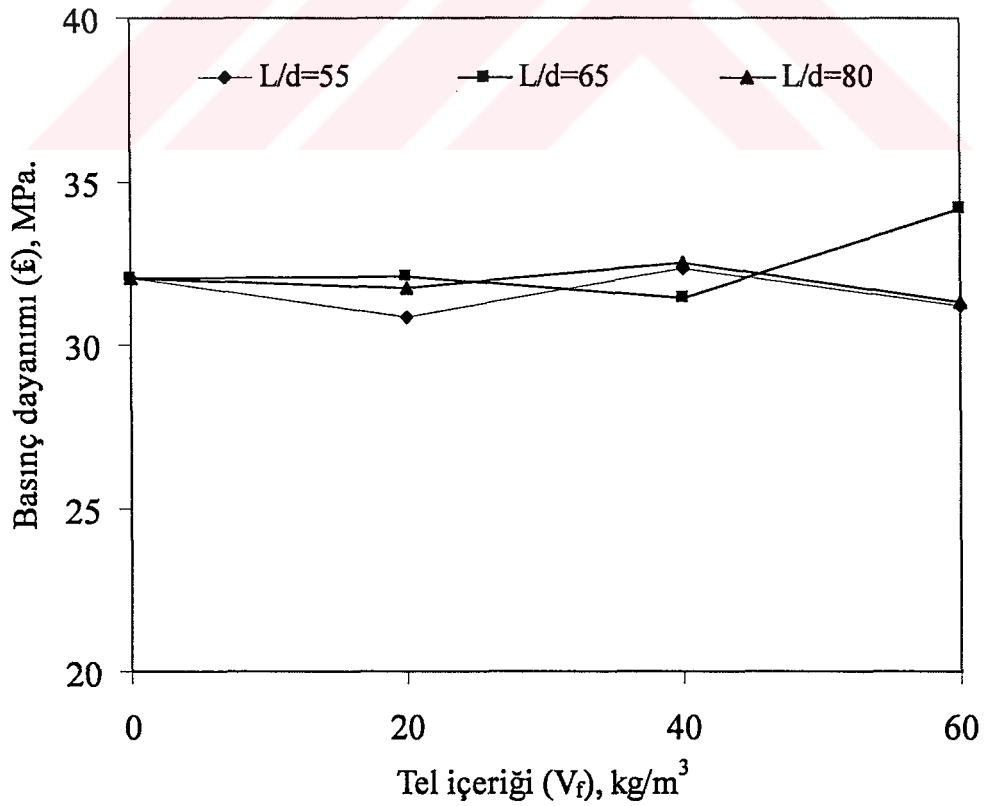
Su/çimento oranı 0,45 olan ve 20 kg/m^3 tel içeren betonların basınç dayanımları bütün tel narinliği değerlerinde kontrol grubuna kıyasla daha düşük bulundu. En düşük basınç dayanımı 55 ve 65 narinliklerde ve kontrol grubuna oranla %6,8 olarak gerçekleşti. Su/çimento oranı 0,45 olan ve 40 kg/m^3 tel içeriğine sahip betonların basınç dayanımlarının 55 ve 65 narinliklerde kontrol grubu ile hemen hemen aynı, 80 narinlikte ise %3,4 fazla olduğu görüldü. Su/çimento oranı 0.45 ve 60 kg/m^3 tel içeriklerinde ise basınç dayanımları 55, 67 ve 80 narinliklerde kontrol grubuna kıyasla değişiklik göstermedi.

Su/çimento oranı 0.70 olan betonlarda bütün tel içeriklerinde ve tel narinliklerinde basınç dayanımlarında kontrol grubuna kıyasla çok az değişiklik gözlemlendi. Su/çimento oranı 0.70 ve 20 kg/m^3 tel içeren betonların basınç dayanımları 65 ve 80 tel narinliklerinde değişmezken, 55 narinlikte kontrol grubuna kıyasla yaklaşık %4 daha düşük elde edildi. Su/çimento oranı 0.45 olan betonların 40 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 tel içeriklerindeki basınç dayanımları bütün tel narinliklerinde kontrol grubu betonların basınç dayanımlarına yakın olduğu görüldü.

Sonuç olarak çelik tel içeriğinin ve narinliğinin betonların basınç dayanımları üzerindeki etkisinin çok az olduğu söylenebilir. ÇTDB’ların basınç dayanımları esas olarak matris dayanımına bağlı olmaktadır. Çelik tel içermeyen beton numunelerin basınç dayanımlarının kendi aralarında bile değişiklik gösterdiği düşünülürse elde edilen bu farkların önemli olmadığı söylenebilir.



Şekil 4.1. Su/çimento=0,45 için çelik tel içeriği ve narinliğe bağlı basınç dayanımı.



Şekil 4.2. Su/çimento=0,70 için çelik tel içeriği ve narinliğe bağlı basınç dayanımı.

4.2. Yarmada Çekme Dayanımı

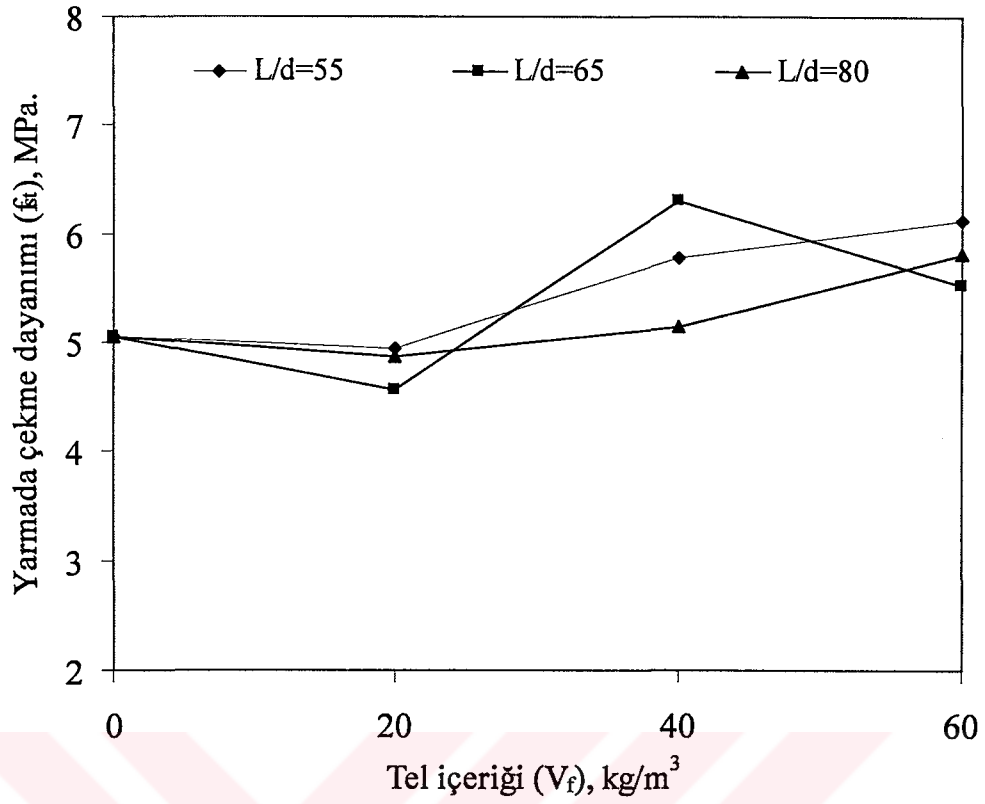
Çelik tellerin betonların yarmada çekme dayanımlarını genel olarak iyileştirdiği bilinmektedir. Ancak bu iyileşme betonun direkt çekme ve eğilme dayanımlarındaki iyileştirmeye oranla daha az olmaktadır. ÇTDB'ların yarmada çekme dayanımlarını etkileyen en önemli etkenler, çelik tel miktarı, narinlik ve çelik tel-matris özellikleridir [6,31,32,60,61]. Betonların yarmada çekme dayanımlarının, farklı su/çimento oranlarında çelik tel narinliğine ve çelik tel içeriğine bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 4.3 ve 4.4' de verilmektedir.

Deneyisel çalışma sonucunda su/çimento oranı 0,45 olan betonlarda bütün tel narinlikleri için yarmada çekme dayanımları kontrol grubuna kıyasla genel olarak 20 kg/m³ tel içeriklerinde değişmezken, 40 kg/m³ ve 60 kg/m³ tel içeriklerinde ise artış gözlemlendi. Buna karşılık, su/çimento oranı 0.70 için bütün tel narinliklerinde ve tel içeriklerinde yarmada çekme dayanımları kontrol grubuna kıyasla daha düşüktür.

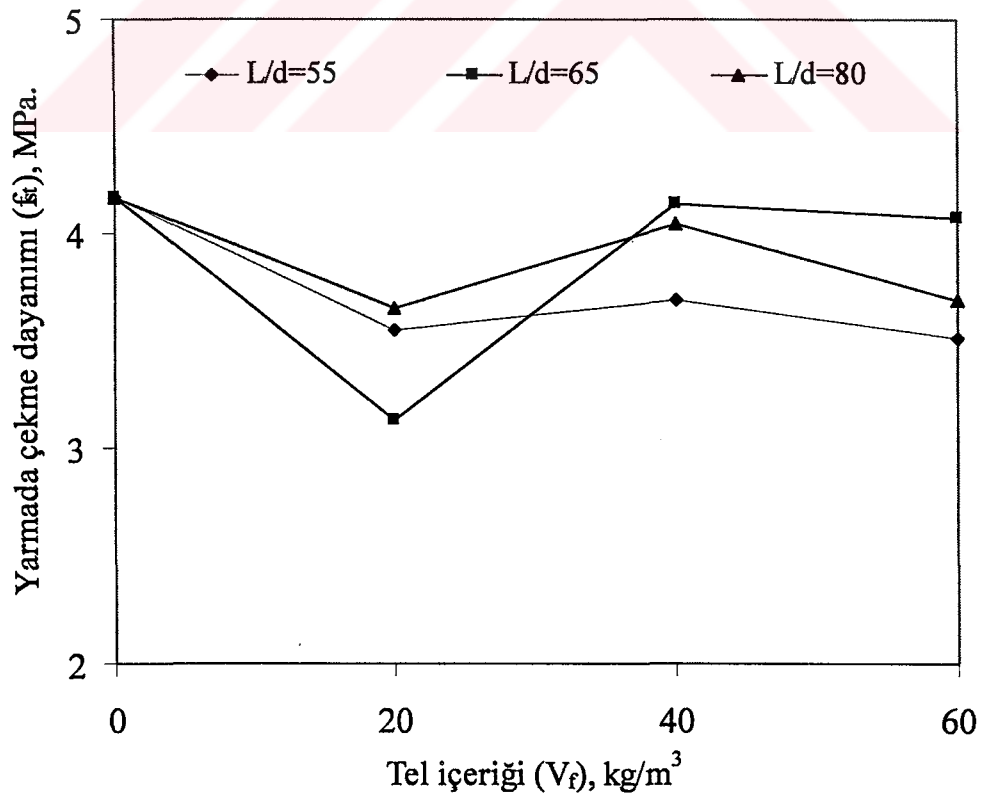
Su/çimento oranı 0,45 ve 55 narinlikte yarmada çekme dayanımındaki en büyük artış 60 kg/m³ tel içeriğinde %21 oldu. Benzer şekilde, 65 narinlikte ve 40 kg/m³ tel içeriğinde yarmada çekme dayanımında yaklaşık %25 artış, 80 narinlikte ve 60 kg/m³ tel içeriğinde ise %15 artış elde edildi. Su/çimento oranı 0,45 ve 20 kg/m³ tel içeriklerinde yarmada çekme dayanımlarında bütün tel narinliklerinde kontrol grubuna kıyasla fazla değişmediği görüldü.

Su/çimento oranı 0.70 olan çelik tel donatılı betonların bütün tel içeriklerinde ve tel narinliklerinde yarmada çekme dayanımlarında kontrol grubuna kıyasla azalma gözlemlendi. En büyük azalma 65 narinliğe sahip ve 20 kg/m³ tel içeren betonlarda %25 olarak elde edildi. En düşük azalmalar ise bütün tel narinliklerinde 40 kg/m³ çelik tel içeren betonlarda görüldü.

Sonuç olarak çelik tellerin matris dayanımı düşük veya su/çimento oranı yüksek olan betonların yarmada çekme dayanımını olumsuz etkilediği görüldü. Ancak farklı yüksek su/çimento oranlarında bu etkinin incelenmesi daha fazla deneyi gerektirir..



Şekil 4.3. Su/çimento=0,45 için tel içeriği ve narinliğine bağlı yarma dayanımı.

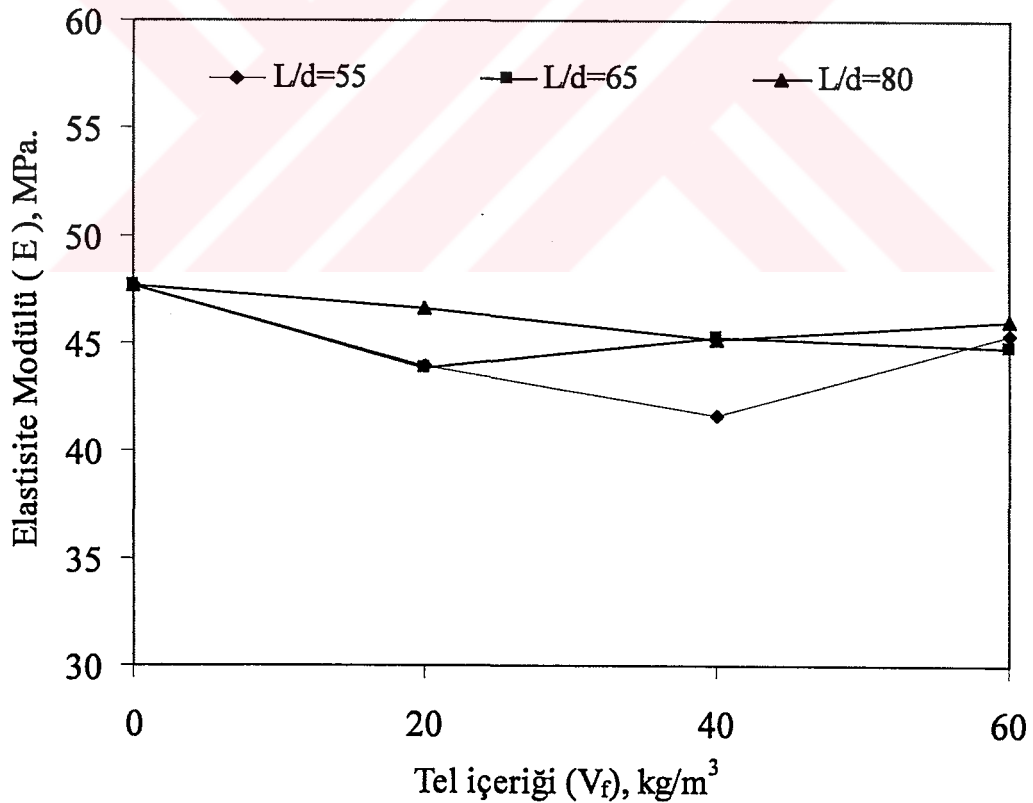


Şekil 4.4. Su/çimento=0,70 için tel içeriği ve narinliğe bağlı yarma dayanımı.

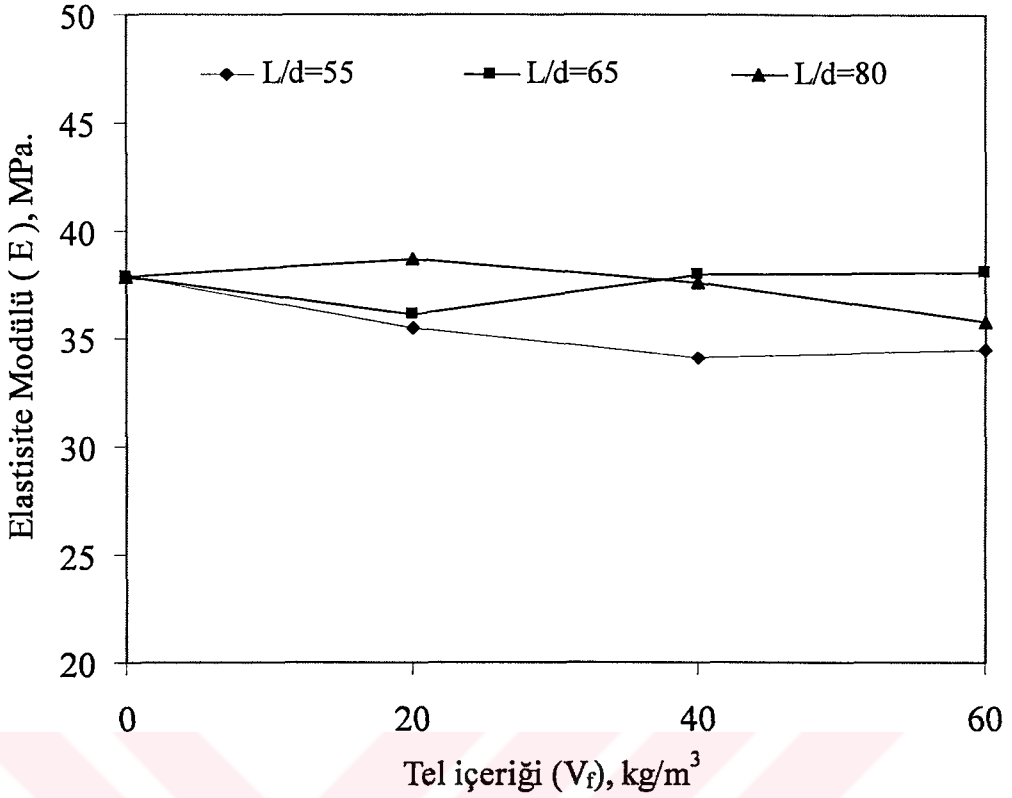
4.3. Elastisite Modülü

Yapılan çalışmalarda çelik tellerin tek eksenli basınç altında betonun gerilme şekil değiştirme eğrisini fazla etkilemediği ve elastisite modüllerinde çok az değişiklik yaptığı görülmüştür [22,72 73]. Shah ve diğ. [72], Fanella ve Naaman [73] hacimce %4 çelik tel içeren (310 kg/m^3) betonlarda bile elastisite modülünün fazla değişmediğini gösterdiler.

Bu çalışmada da farklı narinliğe sahip iki ucu kancalı çelik tellerin farklı su çimento oranlarına sahip betonlara 20 kg/m^3 , 40 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 eklenmesiyle elde edilen numunelerin elastisite modüllerinin çelik tel içermeyen kontrol grubuna ait numunelerinkine kıyasla azaldığı veya fazla değişmediği saptanmıştır. Çalışmada elde edilen ve su/çimento oranı 0,45 ve 0,70 olan betonların elastisite modüllerinin çelik tel narinliğine ve içeriğine bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 4.5 ve 4.6' de verildi.



Şekil 4.5. Su/çimento=0,45 için çelik tel içeriği ve narinliğe bağlı elastisite modülü.

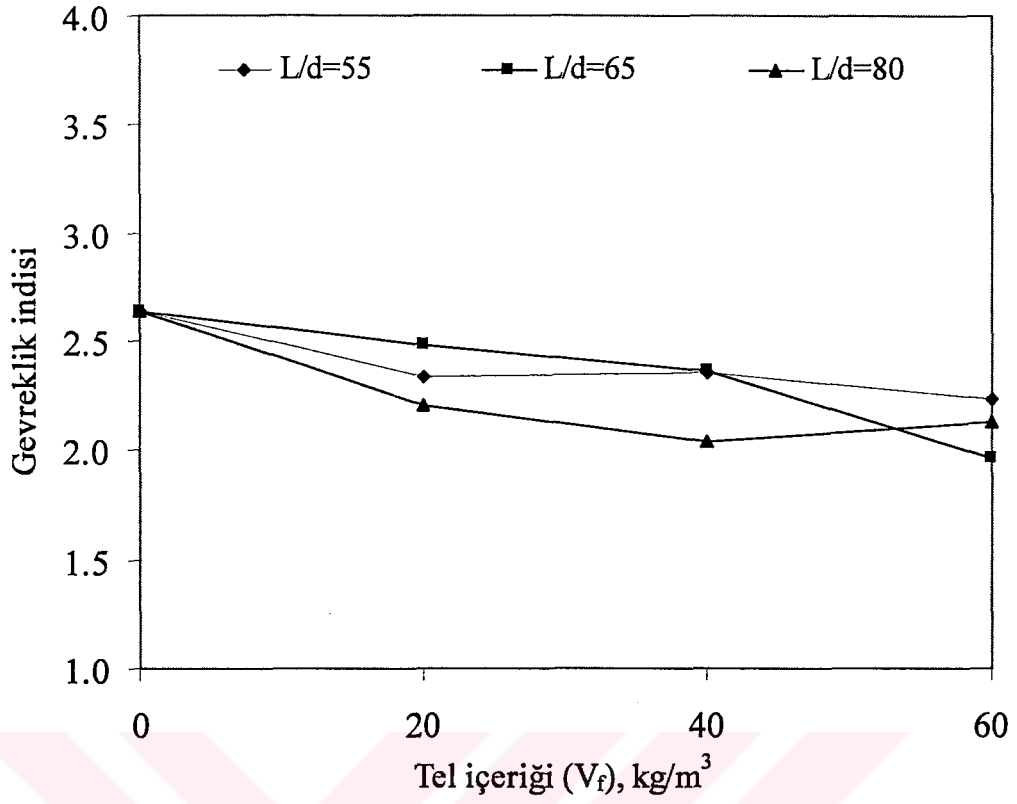


Şekil 4.6. Su/çimento=0,70 için çelik tel içeriği ve narinliğe bağlı elastisite modülü.

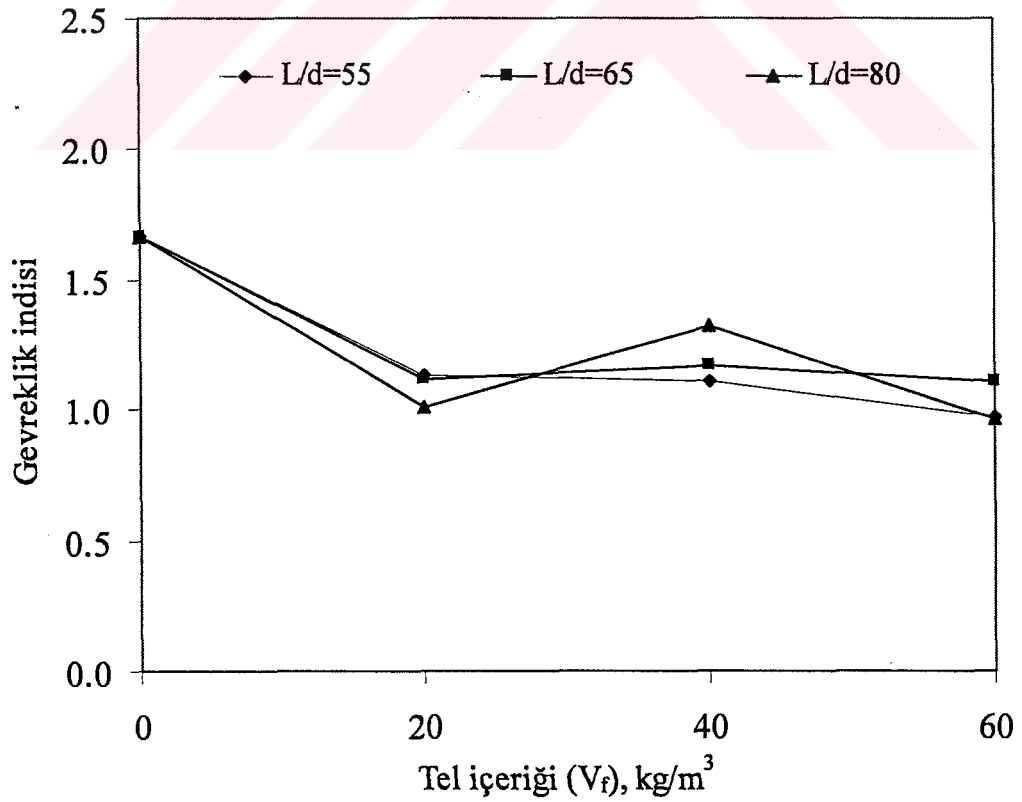
Genel olarak bütün tel narinliklerinde 20 kg/m^3 tel içeren betonların elastisite modüllerinde kontrol grubuna kıyasla azalma gözlenmesine karşın, 40 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 tel içeriklerinde değişme olmadığı veya çok az arttığı gözlemlendi.

4.4. Gevreklik İndeksi

Deneyler sonunda çelik tellerin betona katılmasıyla gevreklik indekslerinin azaltıldığı belirlendi. Çalışmada elde edilen ve su/çimento oranı 0,45 ve 0,70 olan betonların gevreklik indislerinin çelik tel narinliğine ve içeriğine bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 4.7 ve 4.8’de verildi. Deney sonuçlarından gevreklik indekslerinin azalmasında çelik tel içeriğinin narinliğe kıyasla daha etkili olduğu ve çelik tel içeriği arttıkça gevreklik indeksinin azaldığı söylenebilir. Ayrıca, su/çimento oranı 0,70 olan betonların gevreklik indislerindeki azalma su/çimento oranı 0,45 olan betonlarınkine kıyasla fazladır. Su çimento oranı 0,70 için ve 0,45 için gevreklik indislerindeki en büyük azalma sırasıyla %43 ve %23 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Su/çimento=0,45 için tel içeriği ve narinliğine bağlı gevreklik indisi.



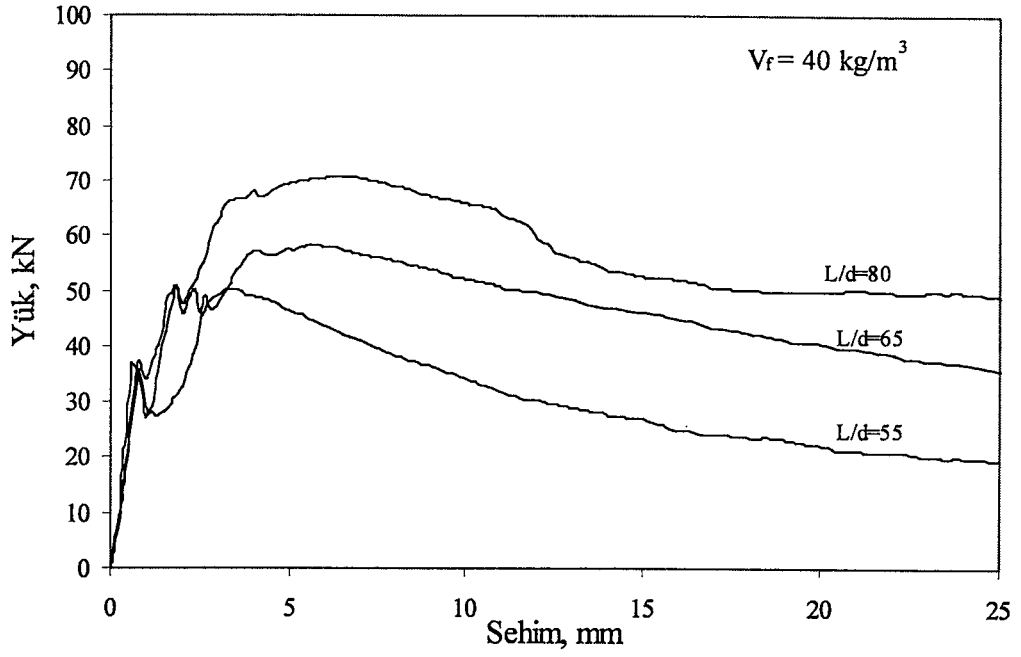
Şekil 4.8. Su/çimento=0,70 için tel içeriği ve narinliğine bağlı gevreklik indisi.

4.5. Tokluk

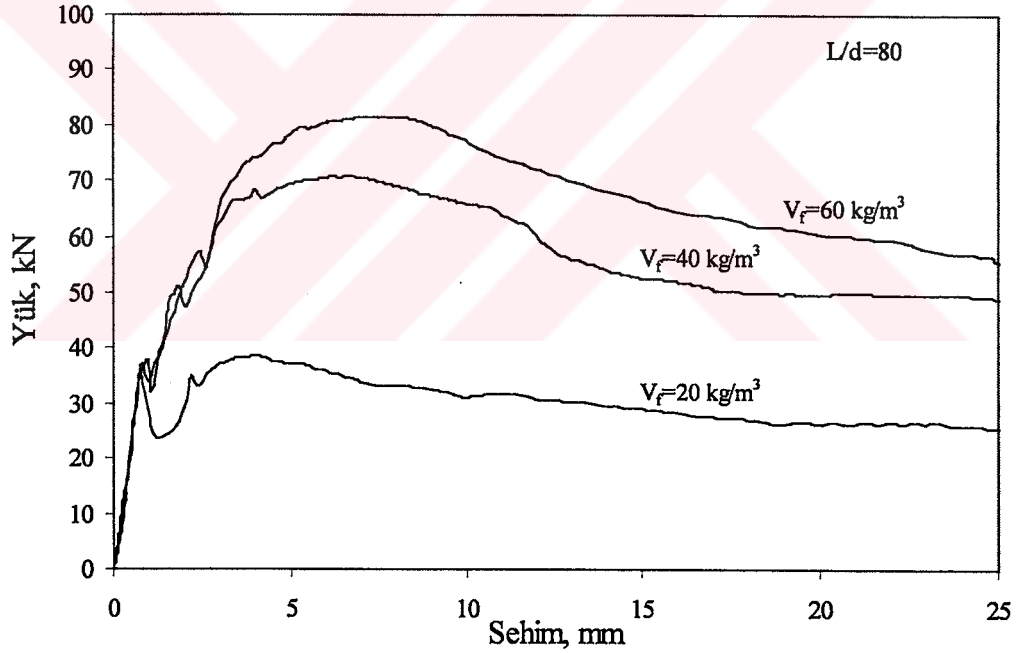
Tokluk veya enerji yutma kapasitesi, çelik tel donatılı betonları çelik tel içermeyen betonlardan ayıran en belirgin özeliştir. ÇTDB'ların tokluk değerleri yük-sehim eğrilerinden elde edilir. Yapılan çalışmalarda çelik tel donatılı betonların tokluklarının büyük ölçüde çatlağın pozisyonuna, çelik tel tipine, hacmine, matris içerisindeki yönlenmesine ve telin matrsten sıyrılma direncine bağlı olduğu belirtilmektedir [4,32,45,47]. ÇTDB'ların ilk çatlak yükünün ise beton özelliklerine bağlı olduğu ve çelik tel özelliklerinden ve betona katılma miktarlarından etkilenmediği genelde belirtilmesine karşın bazı çalışmalarda çelik tellerin ilk çatlak yükünü arttırdığı ifade edilmektedir [9,28,45].

Bu çalışmada plakların tokluk değerleri 25 mm sehime kadar ölçülen her grup için 3 adet plak numunesinin yük-sehim eğrisi altında kalan alan olarak hesaplanan değerlerin ortalamasıdır. Su/çimento oranı 0,70 ve çelik tel içeriği $V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisi ile narinlik ilişkisi Şekil 4.9'da verilmektedir. Su/çimento oranı 0,70 olan ve 80 narinliğe sahip çelik tel içeren betonların yük-sehim eğrisi ile çelik tel içeriği ilişkisi de Şekil 4.10' da verilmektedir. ÇTDB plaklara ait diğer yük-sehim eğrileri ise Ek B' verilmektedir. Su/çimento oranı 0,45 ve 60 kg/m^3 çelik tel içeren betonların enerji-sehim eğrilerinin tel narinliği ile ilişkisi Şekil 4.11'de verilmektedir. Su/çimento oranı 0,70 ve 80 narinliğe sahip çelik tel içeren betonların enerji-sehim eğrilerinin çelik tel içeriğine bağlı değişimi ise Şekil 12'de verilmektedir. ÇTDB plaklara ait diğer enerji-sehim eğrileri ise Ek B' de ve deney sonrası plakların kırılma şekillerini gösteren fotoğraflar ise Ek C' de verilmektedir. Su/çimento oranı 0,45 ve 0,70 olan beton plakların ilk çatlak yükünün çelik tel içeriği ve narinlik ilişkisi sırasıyla Şekil 4.13 ve 4.14'de, tokluk değerleri ise Tablo 4.15 ve 4.16'da verilmektedir. Ayrıca su/çimento oranı 0.45 ve 0.70 olan çelik tel donatılı plakların çelik tel içeriğine ve narinliğine bağlı yük-sehim eğrileri ise Ek B'de verilmektedir.

Plakların ilk çatlak yükü değerlerinin çelik tel içeriği ve narinliğinin artmasıyla arttığı görüldü. Su/çimento oran 0,45 ve 0,70 için ilk çatlak yükündeki en büyük artışlar 65 narinliğe sahip ve 60 kg/m^3 çelik tel içeren betonlarda sırasıyla %45 ve %25 olarak elde edildi.



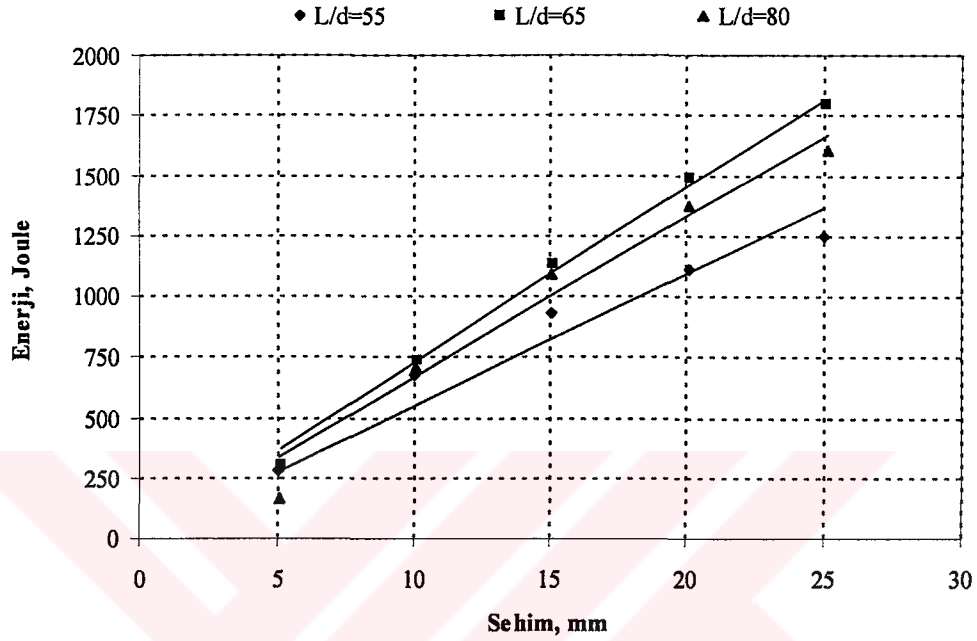
Şekil 4.9. $V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri (su/çimento=0,70)



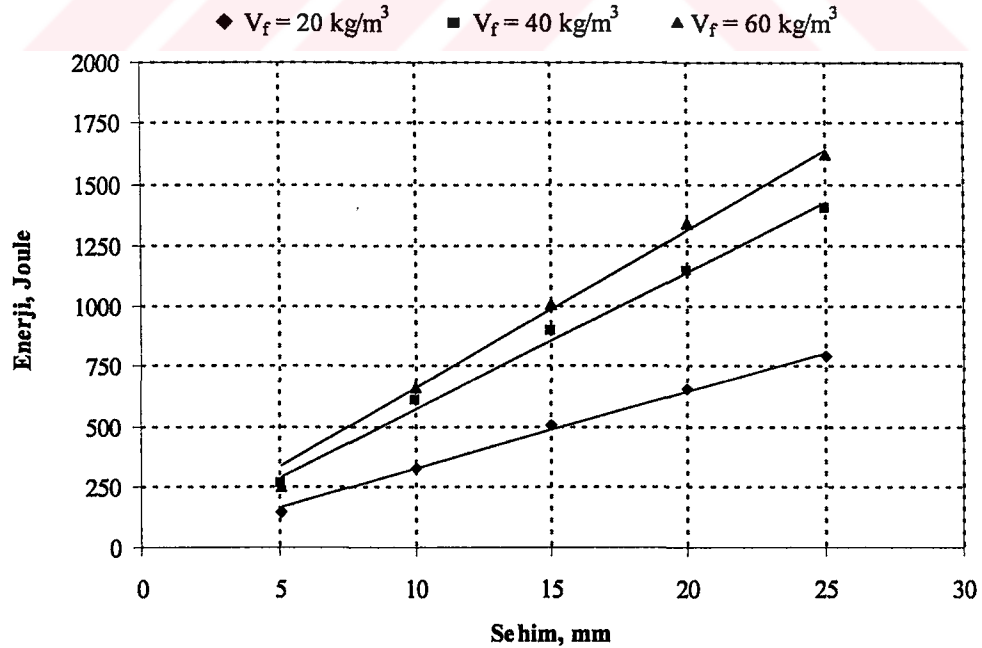
Şekil 4.10. $L/d = 80$ için yük-sehim eğrileri (su/çimento=0,70)

Plakların toklukları (enerji yutma kapasiteleri) ise narinliğin ve çelik tel içeriğinin artmasıyla belirgin bir şekilde arttı. Su/çimento oranı 0,45 ve 55 narinliğe sahip betonların 20 kg/m^3 , 40 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 tel içeriklerindeki tokluk değerleri sırasıyla 756 Joule, 832 Joule ve 1245 Joule elde edildi. Bu değerler 67 narinlik için sırasıyla 832 Joule, 1357 Joule ve 1849 Joule olurken, 80 narinlik için ise sırasıyla 989 Joule, 1032 Joule ve 1412 Joule olarak belirlendi. Benzer şekilde su/çimento oranı

0,70 ve 55 narinliğe sahip betonların 20 kg/m^3 , 40 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 tel içeriklerindeki tokluk değerleri sırasıyla 426 Joule, 642 Joule ve 908 Joule elde edildi. Bu değerler 67 narinlik için sırasıyla 771 Joule, 1069 Joule ve 1500 Joule olurken, 80 narinlik için ise sırasıyla 741 Joule, 1239 Joule ve 1618 Joule olarak belirlendi.



Şekil 4.11. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$)



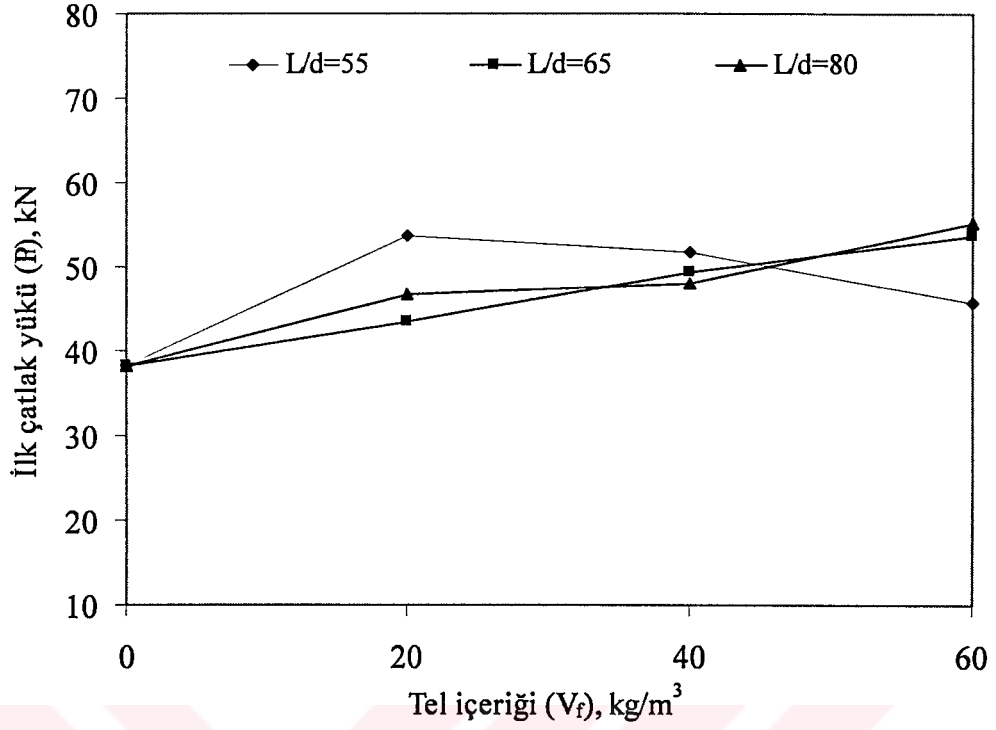
Şekil 4.12. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve $L/d=80$)

Su/çimento oranı 0,45 olan ve 55 narinlikteki betonun tel içeriğinin 20 kg/m^3 'den 40 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 'e çıkarılmasıyla tokluk değerlerinde sırasıyla %37 ve %65 artış olmaktadır. Benzer şekilde 65 narinlik için bu artışlar sırasıyla, %63 ve %122 ve 80 narinlik için ise sırasıyla, %5 ve %43 olarak belirlendi.

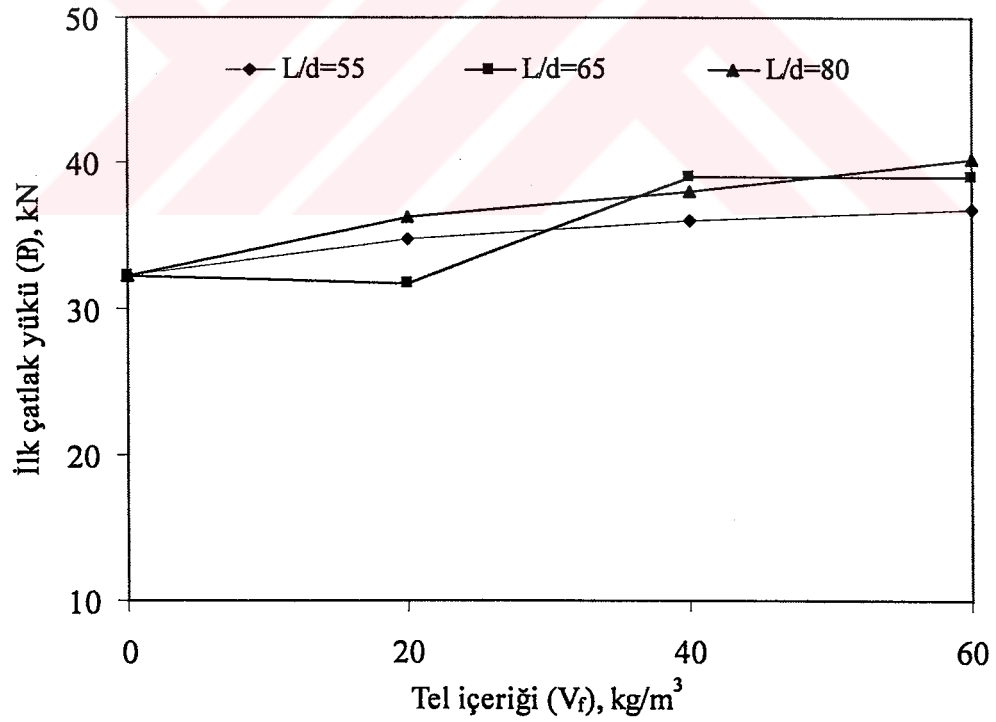
Su/çimento oranı 0,70 olan ve 55 narinlikteki betonun tel içeriğinin 20 kg/m^3 'den 40 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 'e çıkarılmasıyla tokluktaki artışlar sırasıyla, %51 ve %113 olarak belirlendi. Benzer şekilde 65 narinlik için bu artışlar sırasıyla, %39 ve %95 ve 80 narinlik için ise sırasıyla, %67 ve %118 elde edilmiştir.

Su/çimento oranı 0,70 olan betonlarda ilk çatlak yüklerinin düşük olmasına karşın tokluklarının su/çimento oranı 0,45 olan betonlarınkine yakın olarak elde edilmesi bağlı olarak kullanılan çelik tellerin su/çimento oranı yüksek olan veya matris dayanımı düşük olan betonlarda daha fazla iyileştirme yaptığı söylenebilir. Çelik teller düşük matris dayanımına sahip betonlarda sıyrılma eğilimi göstermelerine karşın, matris dayanımı yüksek veya su/çimento oranı düşük olan matrislerde sıyrılmadan çok kopma eğilimi göstermektedirler. Bu nedenle yüksek matris dayanımına sahip betonlarda 1100 N/mm^2 çekme dayanımından daha yüksek olan çelik teller kullanılmasıyla performans arttırabilir. Gerçekte son yıllarda çekme dayanımı 2000 N/mm^2 'yi aşan çelik tellerlin kullanılmasıyla üretilen ÇTDB'lar araştırmalara yeni boyut kazandırmıştır. Bu betonların hem taze halde iken reolojisi hem de sertleşmiş halde iken mekanik davranış üzerine çalışmalar yapılmaktadır [99,100].

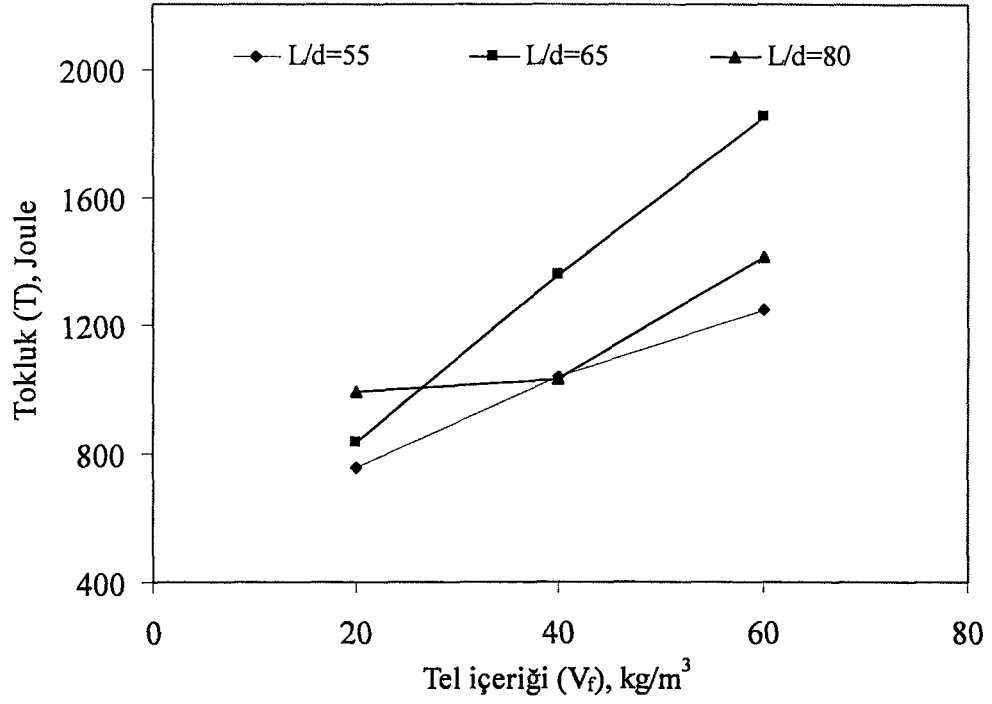
Düşük tel içeriklerinde çelik tel donatılı betonlar tepe yükü veya ilk çatlak yükü sonrası ani bir düşme eğilimi göstermektedirler ve daha sonra toparlanarak bazen tekrar yükselen bazen de azalan bir davranış ile yük taşımaya devam etmektedirler. Bu çalışmada da 20 kg/m^3 tel içeriklerinde plak numuneler genelde ilk çatlak yükü sonrası ani bir düşme ve daha sonra yeniden yükselen ve tepe yükü sonrası azalarak yük taşımaya devam eden bir davranış sergilemektedirler. Bu, matris içinde çelik tellerin yetersiz olmasından dolayı betonun gevrek ve sünek arasında bir geçiş eğilimi sergilemesi olarak açıklanabilir. Çelik tel içeriği arttıkça yük-sehim eğrisinin tepe yükü sonrası düşen kolunun eğimi azalmakta ve betonların toklukları büyük ölçüde artmaktadır.



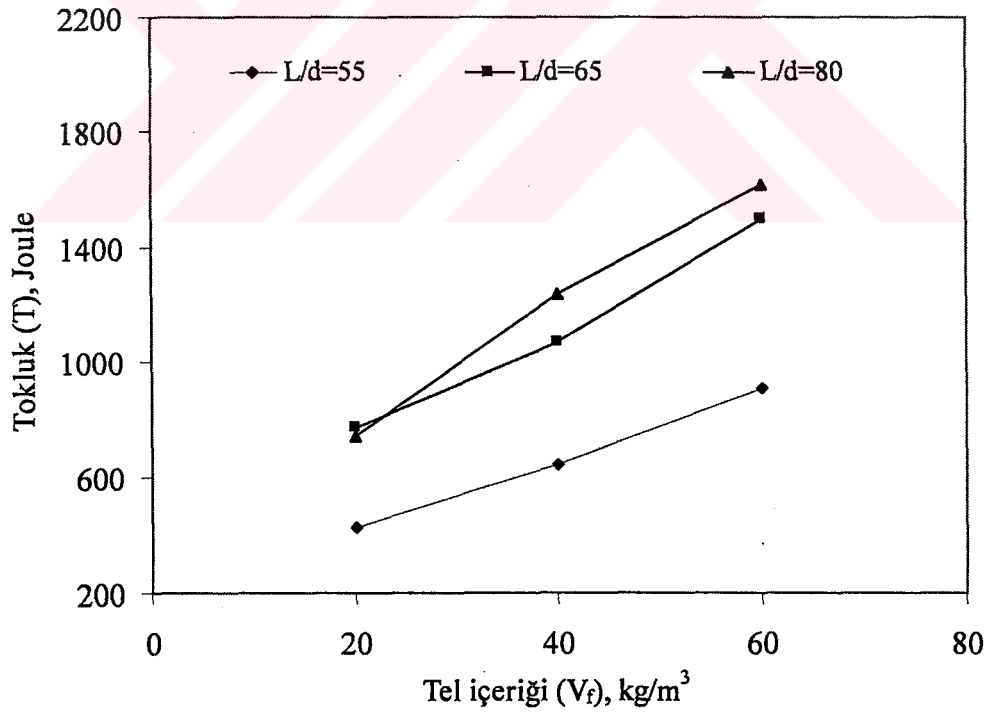
Şekil 4.13. Su/çimento=0,45 için tel içeriği ve narinliğin ilk çatlak yüküne etkisi.



Şekil 4.14. Su/çimento=0,70 için tel içeriği ve narinliğin ilk çatlak yüküne etkisi.



Şekil 4.15. Su/çimento=0.45 için tel içeriği ve narinliğinin ilk çatlak tokluğa etkisi.



Şekil 4.16. Su/çimento=0.45 için tel içeriği ve narinliğinin ilk çatlak yüküne etkisi.

Plak deneyleri sırasında ilk çatlak yükü ve ilk çatlak genişliği dikkatli bir şekilde belirlendi. Genel olarak yüksek çelik tel içeriklerinde ilk çatlak yükünü ve ilk çatlak genişliğini belirlemek güçtür. Çelik tellerin çatlak köprüleme etkisinin yüksek tel içeriklerinde fazla olmasından dolayı matriste çatlak oluşumu kılcal düzeylerde olmaktadır. Çelik tel miktarı artıkça ilk çatlak kılcal düzeylerde olmasına karşın, düşük tel içeriklerinde gözle görülebilen ilk çatlaklar oluştu ve ilk çatlak yükü kolaylıkla belirlendi. İlk çatlak sonrası çatlak genişliğindeki açılma miktarı ise çelik tel içeriği artıkça azaldı.

Deney sonrası plakların kırılma şekilleri hemen hemen aynı tipte olduğu gözlemlendi. Düşük tel içeren plakların deney sonrası çatlak genişlikleri yüksek miktarda çelik tel içeren plak numunelerinkine kıyasla daha fazla olduğu, ancak buna rağmen plaklarda kopma ve parçalanma gözlenmedi.



5. DENEY SONUÇLARININ OPTİMİZASYONU

5.1. Optimizasyonun Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada farklı su/çimento oranları (0,45 ve 0,70) için çelik tel narinliği ve içeriği olmak üzere 2 bağımsız değişkene bağlı olarak ÇTDB'ların yarmada çekme dayanımı ve tokluk deney sonuçları elde edilmiştir. Optimizasyonun amacı, bu bağımsız değişkenlere bağlı olarak elde edilen deney sonuçlarını (tepkileri) temsil eden en iyi modellerin belirlenmesi ve bu modellere optimizasyon yöntemleri uygulanarak ÇTDB'larda maksimum sünekliği (minimum gevrekliği) ve maksimum yarmada çekme dayanımını sağlayacak minimum tel içeriklerinin (minimum maliyet) elde edilmesini içermektedir. Deney sonuçların modellenmesi ve optimizasyonu için matematiksel ve istatistiksel yaklaşımların ortak kullanılması esasına dayanan Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYY) kullanılmıştır. TYT ile ilgili genel bilgiler aşağıda verilmektedir.

5.2. Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYT)

Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYT) matematiksel ve istatistiksel tekniklerin beraber kullanılmasıyla, deneysel verilerin ampirik modellemesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem deneysel olarak bağımsız değişkenlere bağlı edilen tepkilerin (sonuçların) tasarım optimizasyonu yapılması için geliştirilmiştir [101]. TYT'nin tasarım optimizasyonu uygulamalarındaki amacı pahalı analiz metotlarının (sonlu elemanlar ve sonlu farklar vb.) fiyatını ve onların sayısal karmaşaları azaltmaktır [101,102]. TYT kalite mühendisliği alanında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

TYT uygun yüzeyler elde etmek için regresyon yüzey uydurmayı, deney sonuçlarının tasarımında minimum varyansa sahip tepkimeler elde etmeyi ve seçilen uygun tepkime modelini kullanarak optimizasyon yapmayı içermektedir. Tepki yüzeyi analizi deneysel çalışmalarda birden fazla değişkene bağlı olarak tepkinin nasıl değiştiğinin tanımlanması için kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca optimum tepkimeyi (sonuç) veren bağımsız değişken kombinasyonlarının belirlenmesini sağlar. TYT çoklu regresyon yöntemine benzer bir yöntemdir. Bu modelin iki amacı vardır;

1. Optimum sonuçları sağlayan bağımsız değişkenleri belirlemek.
2. Tepki yüzeyinin topografyasını anlamak.

Bu yöntem, deneysel olarak elde edilen tepkileri (sonuçları) deneye giren bağımsız değişkenlere bağlı olarak en iyi temsil edecek bir fonksiyonun elde edilmesi yaklaşımı gibi düşünülebilir.

Örneğin x_1 ve x_2 değişkenine bağlı elde edilen tepki “y” ise, tepki değişkenlerin bir fonksiyonu olarak şu şekilde ifade edilebilir;

$$y = f(x_1, x_2) + e \quad (5.1)$$

Burada, “e” tepkimede elde edilen hatayı ifade etmektedir. $f(x_1, x_2)$ fonksiyonu ile elde edilen yüzey ise “tepki yüzeyi” olarak adlandırılmaktadır. Tepki, 3-boyutlu grafiksel olarak veya tepki yüzeyinin izdüşümünden elde edilen kontur çizgilerle 2-boyutlu olarak ifade edilebilir. Şekil 5.1’ de tepki yüzeylerinin tipik gösterimleri verilmektedir.

Tepki yüzeyi modellerinde yaklaşım fonksiyonları olarak genellikle işlem kolaylıklarından dolayı polinomlar kullanılmaktadır. Ancak fonksiyonlar polinom ile sınırlı değildir. Kuadratik polinom için tepki yüzeyi modelini aşağıda verilmektedir.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j \quad i < j \quad (5.2)$$

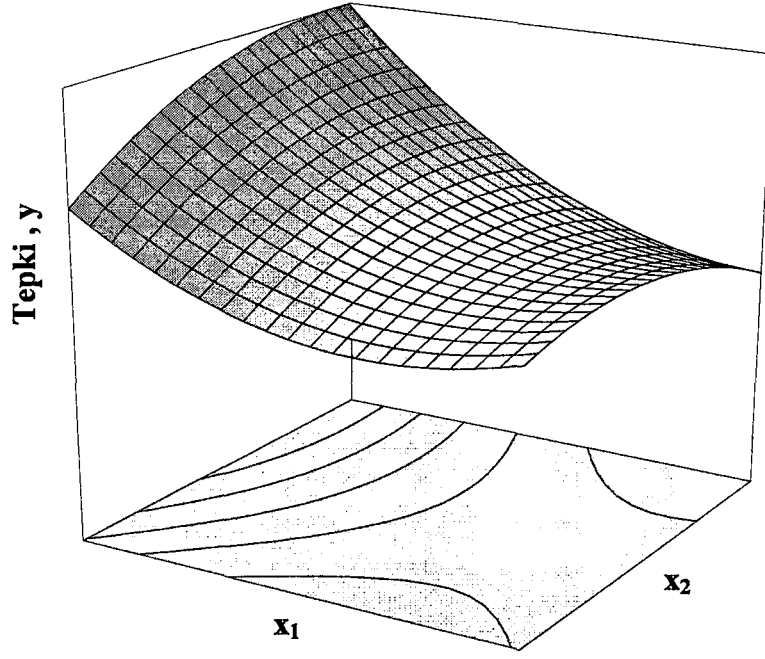
burada n değişken bağımsız değişken sayısını ifade etmektedir. İki bağımsız değişkenli durum için tepki yüzeyi ;

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2^2 + a_5 x_1 x_2 \quad (5.3)$$

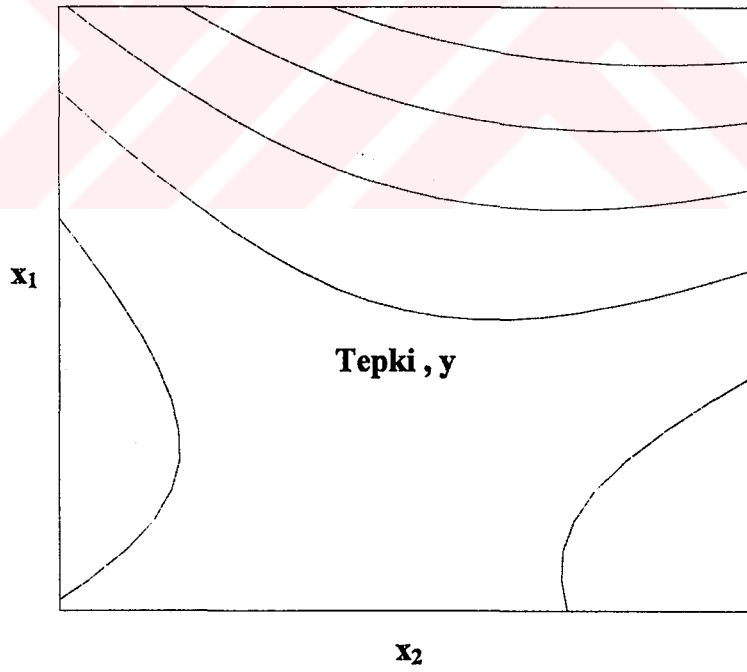
olur. $x_3 = x_1^2$, $x_4 = x_2^2$ ve $x_5 = x_1 x_2$ olarak yazılırsa Denklem 5.3 aşağıdaki lineer regresyon modeline dönüşür.

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 \quad (5.4)$$

Toplam deney sayısı “n” için tepki yüzeyi matris formunda aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.



a) Tepki yüzeyinin 3-boyutlu olarak tipik gösterimi.



b) Tepki yüzeyinin kontur çizgilerle 2-boyutlu olarak tipik gösterimi.

Şekil 5.1. Tepki yüzeyinin tipik gösterimleri.

$$Y = \tilde{X}\tilde{A} + \tilde{e} \quad (5.5)$$

burada,

$$\tilde{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \tilde{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nh} \end{bmatrix} \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad \tilde{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix}$$

e hata vektörüdür. Katsayılar matrisi $\tilde{A}$ 'nın tarafsız tahmincisi $\tilde{b}$, minimum kareler yöntemi ile aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

$$\tilde{b} = (\tilde{X}^T \tilde{X})^{-1} \tilde{X}^T \tilde{Y} \quad (5.6)$$

$\tilde{b}$ ' nin varyans-kovaryans matrisi ise;

$$\text{cov}(b_i, b_j) = C_{ij} = s^2 (\tilde{X}^T \tilde{X})^{-1} \quad (5.7)$$

olur. Burada s , $\tilde{Y}$ 'nin hata oranıdır. s 'in tahmin edilen değeri;

$$s^2 = \frac{SS_E}{n - k - 1} \quad (5.8)$$

elde edilir. SS_E hataların karelerinin toplamıdır ve

$$SS_E = \tilde{Y}^T \tilde{Y} - \tilde{b}^T \tilde{X}^T \tilde{Y} \quad (5.9)$$

şeklinde ifade edilir.

Tepki yüzeyi yaklaşımının doğruluğunun hükmü için düzeltilmiş ortak korelasyon katsayısı $R_{\text{düz.}}^2$ kullanılır.

$$R_{\text{düz.}}^2 = 1 - \frac{SS_E / (n - k - 1)}{S_{yy} / (n - 1)} \quad (5.10)$$

burada S_{yy} karelerin tüm toplamıdır.

$$S_{yy} = \tilde{Y}^T \tilde{Y} - \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \quad (5.11)$$

$R_{\text{düz.}}^2$ ' in en büyük değeri 1 ve en küçük değeri ise 0'dır. Tepki yüzeyi modeli iyi ise bu değer 1' e daha yakın olur.

Tepki yüzeyi modelindeki her bir katsayı t-istatistik kullanılarak anlamlılık düzeyi test edilebilir. Modeldeki b_j katsayıları için t-istatistik aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$t_0 = \frac{b_j}{\sqrt{s^2 C_{jj}}} \quad (5.12)$$

burada, C_{jj} Denklem (4.7)' nin varyans-kovaryans matrisinin jj numaralı elemanıdır. Eğer t_0 ' ın mutlak değeri $|t_0| > t_{\alpha/2, n-k-1}$ sağlıyorsa sıfır hipotezi $\beta_j = 0$ reddedilir. Diğer bir deyişle, j ' inci terim regresyon model de anlamlılık düzeyine sahip olduğuna karar verilir.

Tepki Yüzeyi Yöntemi ile deneysel veriler arasındaki etkileşmeyi en iyi temsil edecek modelin belirlenmesi için, bağımsız değişkenlere, deney sayısına (deney tasarım noktalarına) ve tasarım probleminin cinsine bağlı olarak, birçok tasarım yöntemleri bulunmaktadır. Bu tasarım yöntemlerinden bazıları aşağıda verilmektedir:

1. Tam Faktöriyel Tasarım
2. Merkezi Birleşik Tasarım
3. D-optimal Tasarım
4. Karma Tasarım
5. Box-Behnken Tasarım

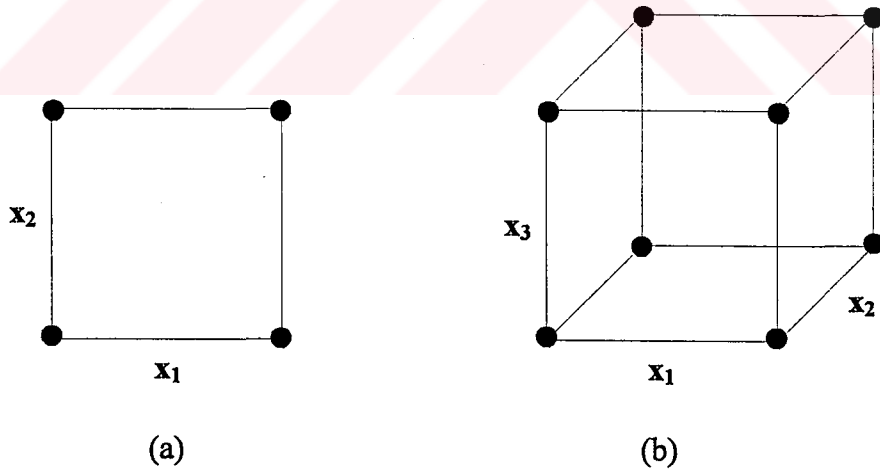
Bu yöntemlerin her birinin kendi kriterleri bulunmaktadır. Modelleme yapılırken hangi yöntemi kullanacağına bu kriterler doğrultusunda karar verilir. Aslında, tasarımcı deneysel çalışmaya başlamadan kullanacağı yöntemi seçmesi daha uygun olmaktadır, çünkü tasarım noktaları (değişkenler bağlı deney sayısı veya deneyde kullanılacak tasarım noktaları) yöntemin seçiminde ve uygulanmasında en önemli etken olmaktadır. Bu nedenle deneysel çalışma seçilen yöntemin uygun gördüğü deney noktalarında yapılmalıdır. Aksi takdirde tasarım yönteminde kullanılacak deney veri sayısı eksik veya yeterli olmayabilir. Bu durumda model eksik deney

noktaları için verilen “kullanıcı tanımlı yöntem” veya “mevcut veri yöntemi” ile tasarlanabilir.

Tepki Yüzeyi Yöntemi ile deneysel verilerin modellenmesinde en sık kullanılan tasarım metotları olan “Tam Faktöriyel Tasarım” ve “Merkezi Birleşik Tasarım” metotları aşağıda açıklanmaktadır.

5.2.1. Tam Faktöriyel Tasarım

Tam Faktöriyel yaklaşım “n” bağımsız değişkene bağlı bir tepkinin tasarımı için değişkenlerin bütün kombinezonlarında tepkinin araştırılmasını içerir [101-103]. Bu da “n” bağımsız değişkenin farklı kombinezonları kadar deney sayısının gerektiği anlamına gelmektedir. Optimizasyon problemi için “n” bağımsız değişkenin alt ve üst sınırları tanımlanır. Her bir değişken için sadece alt ve üst sınır (iki seviye) tanımlanırsa, bu durumda tasarım “ 2^n Tam Faktöriyel” veya “İki-Seviyeli Tam Faktöriyel” tasarım olarak adlandırılır. İki faktörlü ve üç değişkenli 2^n Tam Faktöriyel tasarımın şematik gösterimi Şekil 5.2’ de ve model için gerekli değişken sayısına bağlı deney sayısı (2^n) ise Tablo 5.1’ de verilmektedir.



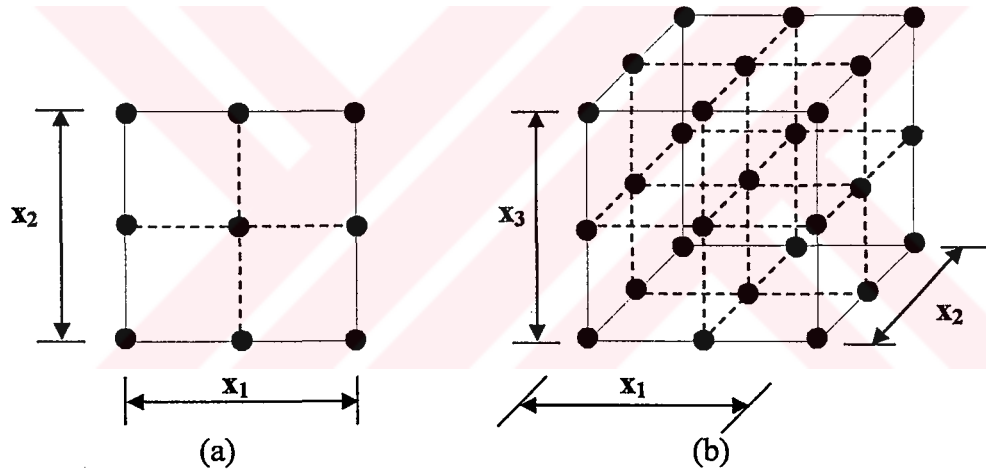
Şekil 5.2. a) İki Faktörlü-İki Seviyeli Tam Faktöriyel tasarım şeması b) Üç faktörlü-İki seviyeli Tam Faktöriyel tasarım şeması.

Benzer olarak, bağımsız değişkenler için alt ve üst sınırın yanı sıra orta noktanın da tanımlanması durumunda tasarım “ 3^n Tam Faktöriyel” veya “Üç Seviyeli Tam Faktöriyel” tasarım olarak adlandırılır. İki faktörlü ve üç değişkenli 3^n Tam

Faktöriyel tasarımın şematik gösterimi Şekil 5.3' de ve model için gerekli değişken sayısına bağlı deney sayısı (3^n) ise Tablo 5.2' de verildi.

Tablo 5.1. İki Seviyeli-(2^n) Tam Faktöriyel tasarım için gerekli deney sayısı.

Değişken Sayısı, n	Deney Sayısı, 2^n
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128



Şekil 5.3. a) İki Faktörlü-Üç Seviyeli Tam Faktöriyel tasarım şeması, b) Üç Faktörlü-Üç Seviyeli Tam Faktöriyel tasarım şeması.

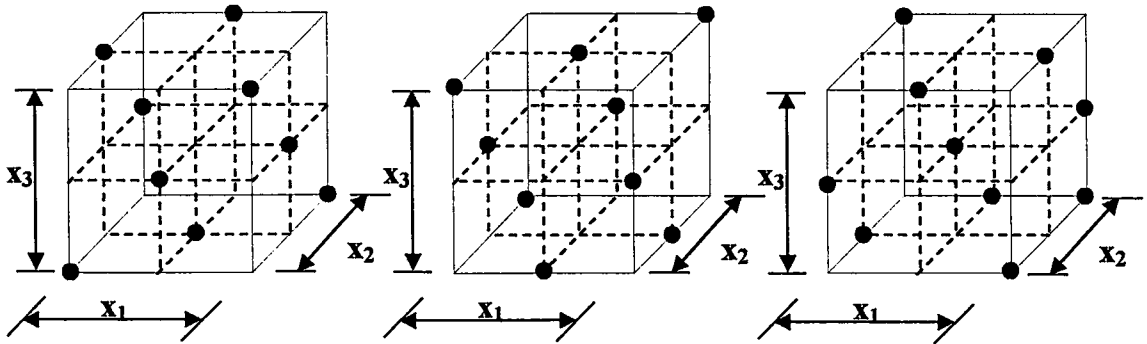
Faktöriyel tasarımlarda genellikle ikinci dereceden modeller kullanılır. Birinci dereceden modeller değişkenler ve yüzey eğrisi arasında ilişkinin kurulmasında yetersiz kalmaktadırlar. İkinci dereceden modelin genel ifadesi aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j \quad i < j \quad (5.13)$$

Tablo 5.2. Üç seviyeli (3^n) Tam Faktöriyel tasarım için gerekli deney sayısı.

Değişken Sayısı, n	Deney Sayısı, 3^n
2	9
3	27
4	81
5	243

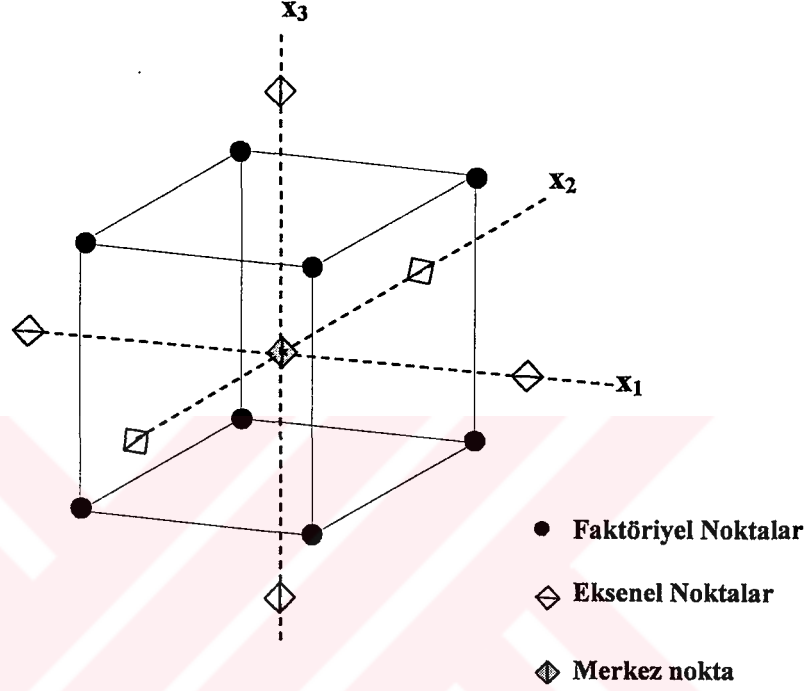
Burada, x_i ve x_j bağımsız değişkenleri, a ise modeldeki katsayıları ifade etmektedir. Model için gerekli deney sayısı (deney noktası) üstel olarak arttığı için (3^n), çok sayıda değişkenli problemler için bu metot pratik olmamaktadır. Tam Faktöriyel tasarım genellikle 5 veya daha az değişkenli problemlerin modellenmesinde kullanılır. Ancak değişken sayısının fazla olması durumunda (>5) Tam Faktöriyel tasarımın için gerekli nokta sayısının bir kısmı kullanılarak modelleme yapılabilir. Bu “Kısmi Faktöriyel Tasarım” olarak adlandırılır [101]. Tam Faktöriyel tasarım için gerekli deney sayısında azaltma ve eleme yapılmasıyla bu metot uygulanabilir. 3^n Tam Faktöriyel tasarımın $\left(\frac{1}{3}\right)^p$ kısmı alınarak 3^{n-p} deney sayısı ile Kısmi Faktöriyel tasarım yapılabilir [98,100]. Burada p , faktöriyel tasarımın fraksiyon derecesini gösterir. Örneğin, değişken sayısı $n=3$ için 3^3 Tam Faktöriyel tasarımının üçte-bir’lik kısmı alınarak 3^{3-1} Kısmi Faktöriyel tasarımı yapılabilir. Böylece Tam Faktöriyel için gerekli deney sayısı 27’ den Kısmi Faktöriyel tasarım yapılması durumunda 9’a düşürülmüş olur. Üçte-bir Kısmi Faktöriyel tasarımın şematik gösterimi Şekil 5.4’de verildi.



Şekil 5.4. Üçte-bir Kısmi Faktöriyel tasarımının şematik gösterimi.

5.2.2. Merkezi Birleşik Tasarım

Merkezi Birleşik Tasarım (MBT) ile ikinci dereceden bir model elde etmek mümkün olmaktadır [101]. MBT, merkez ve eksenel noktaların tasarıma dahil edilmesiyle, ikinci dereceden modellerin katsayılarını elde edilmesini sağlayan birinci dereceden model (2^n) tasarımıdır. İki seviyeli-üç faktörlü bir problemin MBT ile şematik gösterimi Şekil 5.5.'de verilmektedir.



Şekil 5.5. İki seviyeli-üç faktörlü bir problemin MBT ile şematik gösterimi.

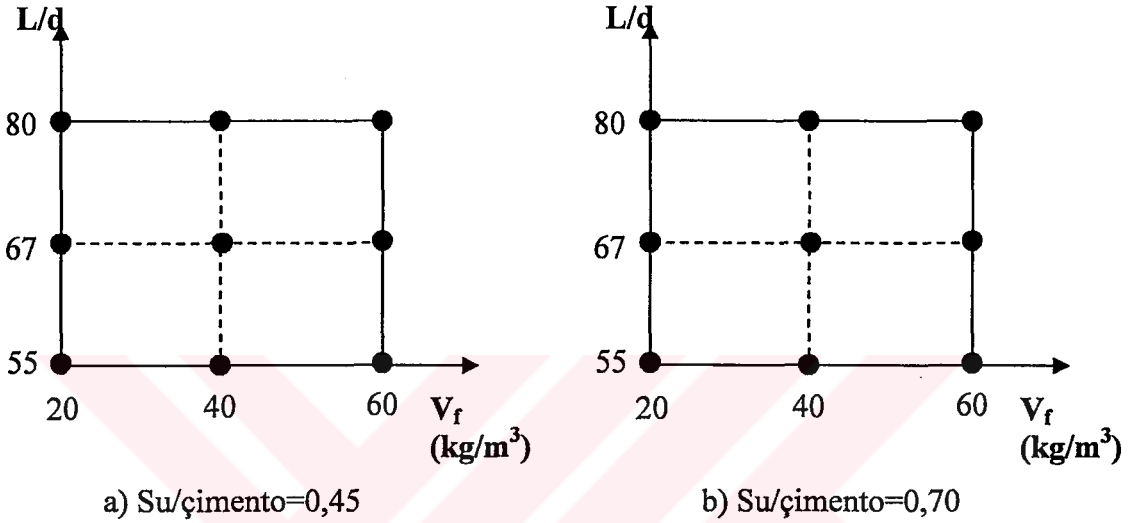
MBT, 3^n Tam Faktöriyel tasarım ile ikinci dereceden bir model elde edilmesine alternatiftir. Çünkü ikinci dereceden bir model elde edilmesi için 3^n Tam Faktöriyel tasarımda gerekli deney sayısı 27 iken ($n=3$ ve $3^3=27$), MBT' da bu sayı 15'e (8 köşe nokta + 6 eksenel nokta + 1 merkez nokta) düşürülmüştür.

5.3. Deneysel Tasarım

Deney sonuçlarını temsil eden en iyi fonksiyonu veya en uygun çözümleri bulmak için öncelikle bir model elde edilmelidir. Daha sonra ise bu modelin tepki yüzeyini kullanarak optimizasyon işlemi yapılır. ÇTDB'ların optimum tasarımı için genel olarak çok amaçlı simültane optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada her bir su/çimento oranı serisi (su/çimento=0,45 ve 0,70) için Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYYY) ile iki-faktörlü (L/d ve V_f), üç-seviyeli ($V_f=55, 65$ ve 80 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3, 40 \text{ kg/m}^3$ ve 60 kg/m^3) tam faktöriyel deneysel tasarım yapıldı. Üç-

seviyeli iki-faktörlü tam deneysel tasarım ile bir tepki yüzeyi elde edilebilmektedir. İki bağımsız değişken için tam faktöryel tasarım $2^2=4$ köşe, $2 \times 2=4$ kenar ve 1 orta nokta olmak üzere, toplam $3^2=9$ noktadan oluşmaktadır. Her bir su/çimento oranı için üç-seviyeli iki-faktörlü tam deneysel tasarım şeması Şekil 5.6'da verilmektedir. Tasarımda, çelik tel narinliği (L/d) ve çelik tel miktarı (V_f) bağımsız değişkenleri, yarmada çekme dayanımı (f_{st}) ve tokluk (T) ise tepkileri ifade etmektedir.



Şekil 5.6. Deneysel tasarım şeması.

Deneysel çalışmada su/çimento oranı 0,45 ve 0,70 için kullanılan bağımsız değişkenlerin aralıkları için alt ve üst sınır değerler aşağıda verilmektedir.

$$55 \leq L/d \leq 80 \quad (5.14)$$

$$20 \text{ kg/m}^3 \leq V_f \leq 60 \text{ kg/m}^3$$

Uygun bölgeyi belirten ve Denklem (5.14)'de verilen yan kısıtlamalara çelik telin özellikleriyle ilgili aşağıdaki kısıtlamalar da eklenmektedir:

Narinliğin $55 \leq L/d \leq 65$ aralığında $L=3(L/d)-135$ mm olup, L ve d 'nin aralıkları sırasıyla, $30 \leq L \leq 60$ mm ve $0,55 \leq d \leq 0,92$ mm'dir. Narinliğin $65 \leq L/d \leq 80$ aralığında ise $L=60$ mm ve $0,75 \leq d \leq 0,92$ mm'dir.

Şekil 5.6'da verilen tasarım noktalarını ifade eden ve su/çimento oranları 0,45 ve 0,70 için bağımsız değişkenlere bağlı deneysel olarak elde edilen tepkiler ise Tablo 5.3 ve 5.4' de verilmektedir.

Tablo 5.3. Su/çimento 0,45 için modelde kullanılan deney (tasarım) noktaları.

Değişken 1 (L/d)	Değişken 2 (V _f) kg/m ³	Tepki 1 Yarmada çekme dayanımı (f _{st}), MPa	Tepki 2 Tokluk (T), Joule
55	20	4,95	756
55	40	5,77	1037
55	60	6,12	1245
65	20	4,56	832
65	40	6,30	1357
65	60	5,53	1849
80	20	4,88	989
80	40	4,71	1032
80	60	5,82	1412

Tablo 5.4. Su/çimento 0,70 için modelde kullanılan deney (tasarım) noktaları.

Değişken 1 (L/d)	Değişken 2 (V _f) kg/m ³	Tepki 1 Yarmada çekme dayanımı (f _{st}), MPa	Tepki 2 Tokluk (T), Joule
55	20	3,55	426
55	40	3,69	642
55	60	3,51	908
65	20	3,13	771
65	40	4,14	1069
65	60	4,07	1500
80	20	3,65	741
80	40	4,04	1239
80	60	3,69	1618

ÇTDB'ların yarmada çekme dayanımı ve toklukları için deneysel verilerin analizi, istatistiksel değerlendirmeleri ve sonuçların optimizasyonu Design-Expert™ yazılımı kullanılarak yapıldı. Yazılım, her bir tepki için seçilen modelin en iyi model olup olmadığı ve değişkenlerin modeldeki anlamlılık düzeyleri araştırmakta ve tepkiyi temsil eden en iyi tepki yüzeyini ve modelini önermektedir.

5.4. Regresyon Analizi

Bu çalışmada, her bir su/çimento oranı serisinde, bağımsız değişkenlere (L/d ve V_f) bağlı olarak ÇTDB'un yarmada çekme dayanımı ve tokluğu için deneysel olarak elde edilen 9 veri varyans analizi (ANOVA) kullanılarak polinom türü matematiksel modele uyduruldu. Tepkileri (f_{st} ve T) temsil eden en iyi tepki yüzeyi her bir tepki için "kuadratik model" olarak belirlendi. Su/çimento oranı 0,45 için elde edilen regresyon modelleri aşağıda verilmektedir:

$$f_{st} = -6.24 + 0.289(L/d) + 0.136(V_f) - 0.0023(L/d)^2 - 0.0014(V_f)^2 \quad (5.15)$$

$$T = -7980 + 252.1(L/d) + 15.9(V_f) - 1.8(L/d)^2 + 0.06(V_f)^2 - 0.07(L/d)(V_f) \quad (5.16)$$

Benzer şekilde, su/çimento oranı 0,70 için elde edilen regresyon modelleri aşağıda verilmektedir:

$$f_{st} = -2.555 + 0.131(L/d) + 0.089(V_f) - 0.0009(L/d)^2 - 0.001(V_f)^2 \quad (5.17)$$

$$T = -4831 + 151.8(L/d) - 14.48(V_f) - 1.08(L/d)^2 + 0.065(V_f)^2 + 0.4(L/d)(V_f) \quad (5.18)$$

Deneysel verilere bağlı olarak elde edilen ve tepkileri en iyi temsil eden modellere ait korelasyon katsayıları da Tablo 5.5' de verilmektedir.

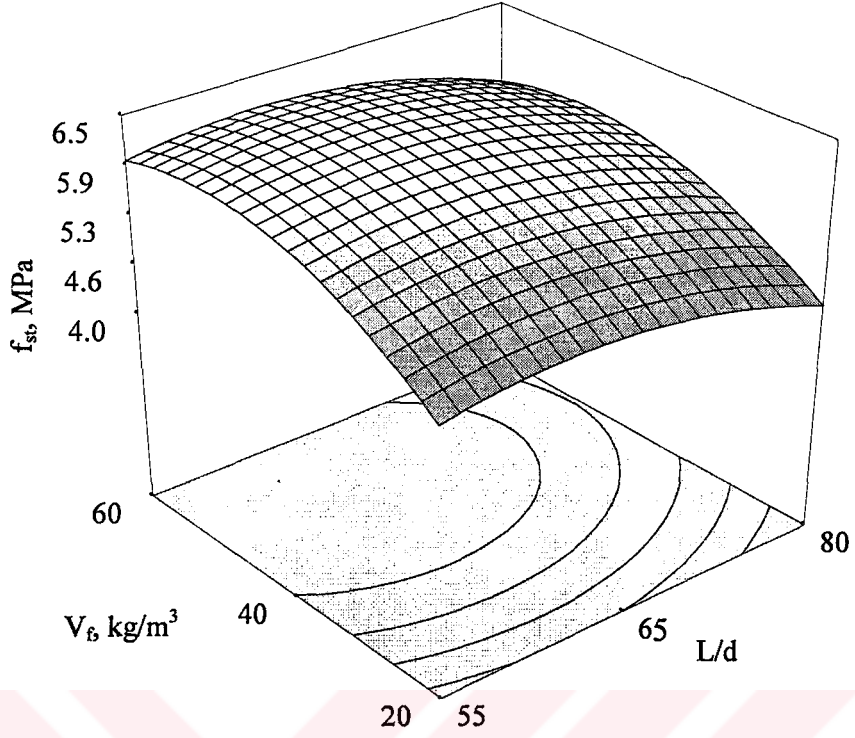
Tablo 5.5. Modellere ait korelasyon katsayıları.

Su/Çimento oranı	Korelasyon katsayıları (R^2)	
	Yarmada çekme dayanımı, f_{st}	Tokluk, T
0,45	0.69	0,88
0,70	0,73	0,99

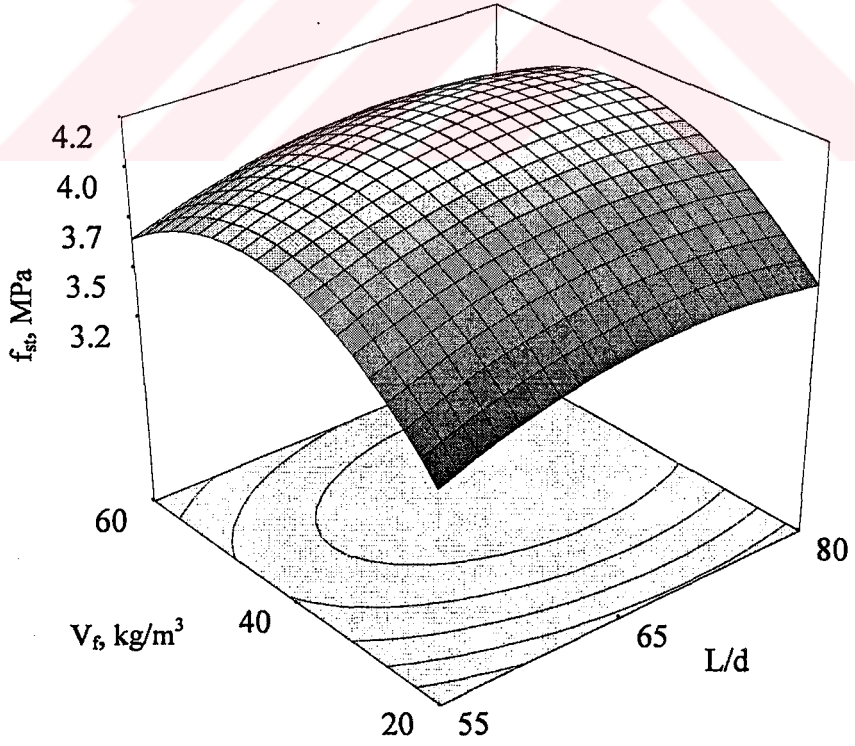
ÇTDB'ların yarmada çekme dayanımı ve toklukları temsil eden en uygun regresyon modellerine ait denklemler (Denklem 5.15-5.18) ile hesaplanan değerler ile deneysel olarak elde edilen değerler karşılaştırılmalı olarak Tablo 5.6'da verilmektedir. Her bir su/çimento oranı için narinlik ve tel içeriğine bağlı olarak yarmada çekme dayanımını (f_{st}) ve tokluğu (T) temsil eden tepki yüzeyleri ise Şekil 5.7-5.10'da gösterilmektedir.

Tablo 5.6. ÇTDB'ların yarmada çekme dayanımı ve tokluk için elde edilen deneysel sonuçları ile modelle bulunan değerlerin karşılaştırılması.

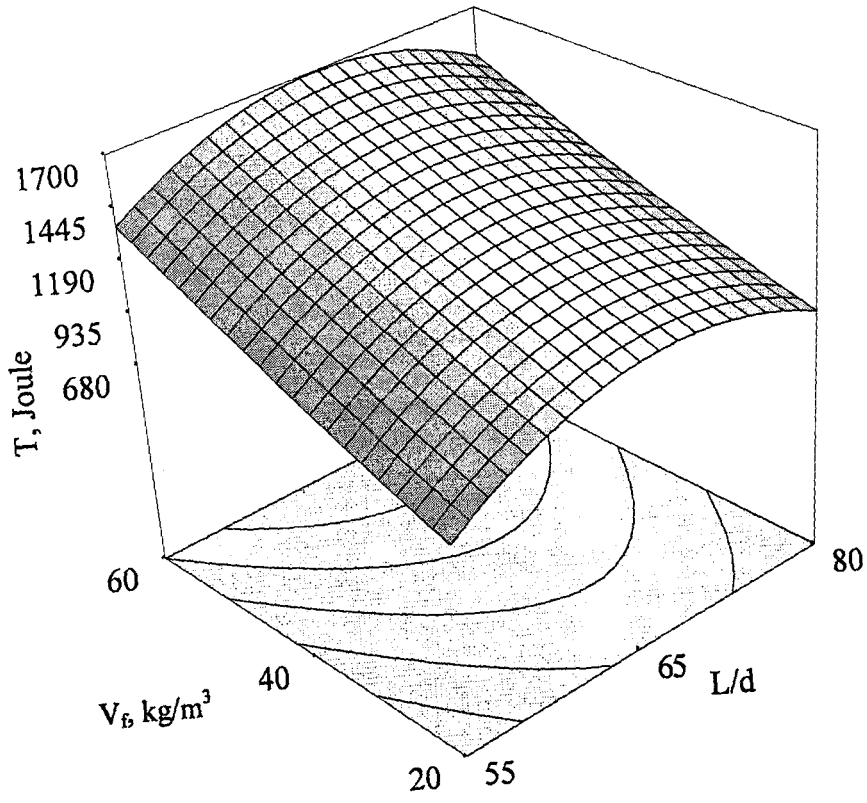
Su/Çimento oranı	Çelik tel narinliği, (L/d)	Çelik tel içeriği (V _f) kg/m ³	Deneysel		Model	
			f _{st} (MPa)	T (Joule)	f _{st} (MPa)	T (Joule)
0,45	55	20	4,95	756	4,86	706
	55	40	5,77	1037	5,90	1019
	55	60	6,12	1245	5,82	1380
	65	20	4,56	832	4,96	1079
	65	40	6,30	1357	6,00	1375
	65	60	5,53	1849	5,92	1719
	80	20	4,88	989	4,32	898
	80	40	4,71	1032	5,36	1176
	80	60	5,82	1412	5,28	1502
0,70	55	20	3,55	426	3,31	427
	55	40	3,69	642	3,89	656
	55	60	3,51	908	3,67	936
	65	20	3,13	771	3,56	764
	65	40	4,14	1069	4,14	1088
	65	60	4,07	1500	3,92	1465
	80	20	3,65	741	3,55	777
	80	40	4,04	1239	4,13	1206
	80	60	3,69	1618	3,91	1686



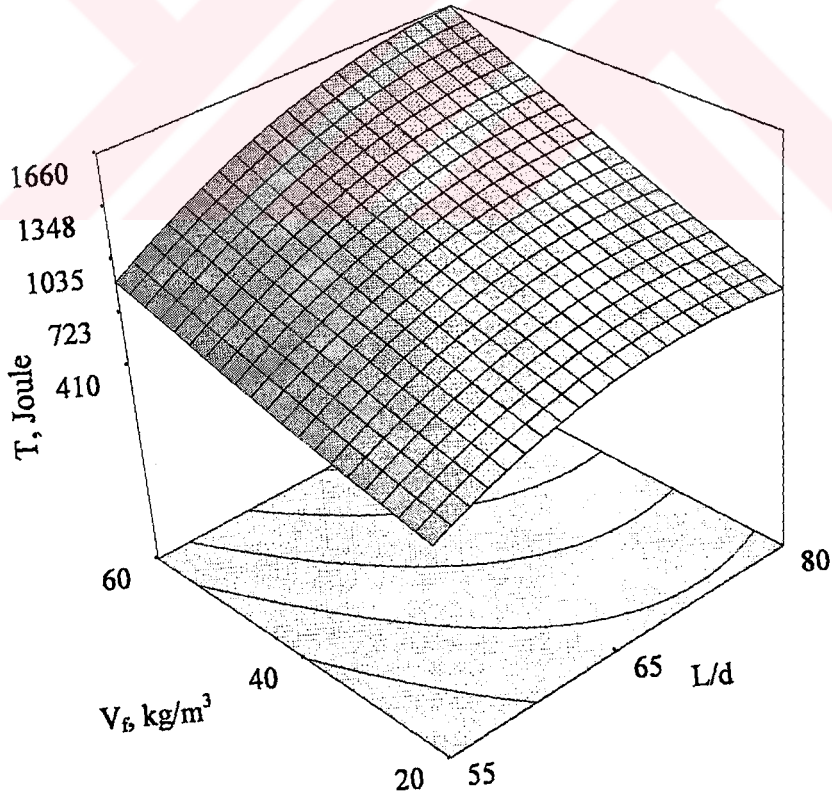
Şekil 5.7. Yarmada çekme dayanımı (f_{st}) tepki yüzeyi modeli (su/çimento=0,45)



Şekil 5.8. Yarmada çekme dayanımı (f_{st}) tepki yüzeyi modeli (su/çimento=0,70).



Şekil 5.9. Tokluk (T) için tepki yüzeyi modeli (su/Çimento=0,45)



Şekil 5.10. Tokluk (T) için tepki yüzeyi modeli (su/çimento=0,70).

5.5. Optimum Karışım Tasarımı

Denklem 5.15-5.18’de verilen, faktörler (narinlik ve tel içeriği) ve tepkiler (yarmada çekme dayanımı ve tokluk) arasında ilişkiyi ifade eden regresyon modelleri kurulduktan sonra karışımı optimize etmek için tüm bağımsız değişkenler ayrı ayrı ve aynı anda değiştirilebilir. Çok amaçlı optimizasyonda birkaç faktör ve tepkinin olması ve bunların aynı anda göz önüne alınması gerekmektedir. Genel olarak karışım optimizasyonları elde edilen tepkilerin bir veya birkaçını veya faktörün maksimum veya minimum yapılarak ekonomik olan en uygun çözümlerin bulunmasını hedefler.

Geleneksel betonların karışım tasarımları genel olarak işlenebilirliğe bağlı yüksek basınç dayanımı ilkesine göre yapılmaktadır. Ancak bu tür yaklaşımlarda betonun gevrekliği veya sünekliği ihmal edilmektedir. Bu nedenle beton karışımlarının optimum tasarımı yarmada çekme dayanımı, net eğilme dayanımı, kırılma enerjisi (tokluk) gibi diğer mekanik özelliklerinde dikkate alınması gerekir. Özellikle ÇTDB gibi, normal betonlara göre farklı mekanik davranış gösteren ve daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip betonların karışım optimizasyonlarında süneklik en önemli yere sahip olmaktadır.

Bu çalışmada, her bir su/çimento oranı için çelik tel narinliği ve içeriğine bağlı olarak elde edilen ÇTDB’ların yarmada çekme dayanımı ve tokluk değerlerini temsil eden en iyi modellere optimizasyon yöntemi uygulanarak karışım tasarımı yapıldı. Tasarım ÇTDB’larda maksimum sünekliği (minimum gevrekliği) ve maksimum yarmada çekme dayanımını sağlayacak biçimde minimum tel içeriklerinin (minimum maliyet) elde edilmesini içermektedir.

Çoklu optimizasyon, yani birden fazla tepkinin maksimize veya minimize edilmesi, her bir tepki için hesaplanan amaç fonksiyonunu (d_j) kullanan sayısal optimizasyon teknikleri ile yapılmaktadır. Amaç fonksiyonu $0 \leq d_j \leq 1$ arasında değerler alan amaç fonksiyonudur ve optimizasyona katılacak her bir tepki için ayrı ayrı hesaplanmaktadır [104]. Tekil amaç fonksiyonlarının geometrik ortalaması olarak elde edilen çoklu amaç fonksiyonu (Denklem (5.19)) ile çok amaçlı optimizasyon problemi çözülebilir. Çoklu amaç için, Denklem 5.14’de tasarım değişkenleri için verilen uygun bölge içinde kalınarak “D” maksimize edilir:

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_z)^{\frac{1}{z}} \quad (5.19)$$

burada, z - optimizasyonda göz önüne alınan tepki sayısıdır. Tepkilerden veya faktörlerden her hangi birinin amaç sınırının dışında kalması durumunda D sıfır olur.

Çok amaçlı optimizasyonda her hangi bir tepki için tepkiyi maksimum yapmak hedeflenmesi durumunda tepkinin amaç fonksiyonu (d_j) aşağıdaki gibi belirlenmektedir:

$$d_j = \begin{cases} 0 & Y_j \leq \min f_j \\ \left[\frac{Y_j - \min f_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{wt_j} & \text{ve } 0 < d_j < 1, \min f_j < Y_j < \max f_j \\ 1 & Y_j \geq \max f_j \end{cases} \quad (5.20)$$

Benzer şekilde tepkiyi minimum yapmak hedeflenmesi durumunda ise tepkinin amaç fonksiyonu (d_j) aşağıdaki gibi belirlenmektedir:

$$d_j = \begin{cases} 1 & Y_j \leq \min f_j \\ \left[\frac{\max f_j - Y_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^{wt_j} & \text{ve } 0 < d_j < 1, \min f_j < Y_j < \max f_j \\ 0 & Y_j \geq \max f_j \end{cases} \quad (5.21)$$

burada, d_j , Y_j , $\min f_j$ ve $\max f_j$ sırasıyla, j . tepkinin amaç fonksiyonu, TYY ile bulunan değeri, deneysel elde edilen alt ve üst sınır değerleri ifade etmektedir. wt_j ise optimizasyona katılan j . tepkinin ağırlık faktörüdür ve o tepkiye verilen önemi ifade etmektedir [101,104].

Daha yüksek sünekliğe sahip minimum maliyetli karışımı elde etmek için en düşük tel içeriğinde yüksek tokluk ve yarmada çekme dayanımı gerekir. ÇTDB'ların karışım maliyetlerinde çimento, agrega ve kimyasal katkı maliyetleri sabit tutuldu. Karışım maliyetinin minimum olması optimizasyonlarda tel içeriğinin minimum yapılmasıyla sağlanmaktadır. Optimizasyon 55, 65 ve 80 narinlikte maksimum tokluk ve maksimum yarmada çekme dayanımı sağlayan en düşük tel içeriklerinin belirlenmesini içermektedir. Böylece, üç tepkinin optimizasyonda (T , f_{st} ve V_f) eşit ağırlıklı olduğu kabul edilir ($wt_j = 1$) ve her bir su/çimento oranı için Tablo 5.7 ve

5.8’de verilen tasarım değişkenleri ve tepkilere ait deneysel alt ve üst sınırları içinde kalınarak aynı anda maksimum yapılır. Bu durumda, $z=3$ (optimizasyona katılan faktör ve/veya tepki sayısı) için Denklem 5.19 aşağıdaki gibi olur:

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3)^{\frac{1}{3}} \quad (5.22)$$

Burada, d_1 ve d_2 sırasıyla, çok amaçlı optimizasyona katılan ve maksimum yapılması gereken tokluk (T) ve yarmada çekme dayanımı (f_{st}) için Denklem 5.20 ile hesaplanmış amaç değerleridir, d_3 ise minimum yapılması gereken çelik tel içeriğinin (V_f) Denklem 5.21 ile hesaplanmış amaç değeridir. Su/çimento oranı 0,45 ve 0,70 için Denklem 5.22 ile hesaplanan çoklu amaç fonksiyonunun (D) grafiksel gösterimi sırasıyla, Şekil 5.11-5.12 ve Şekil 5.13-5.14’de verilmektedir.

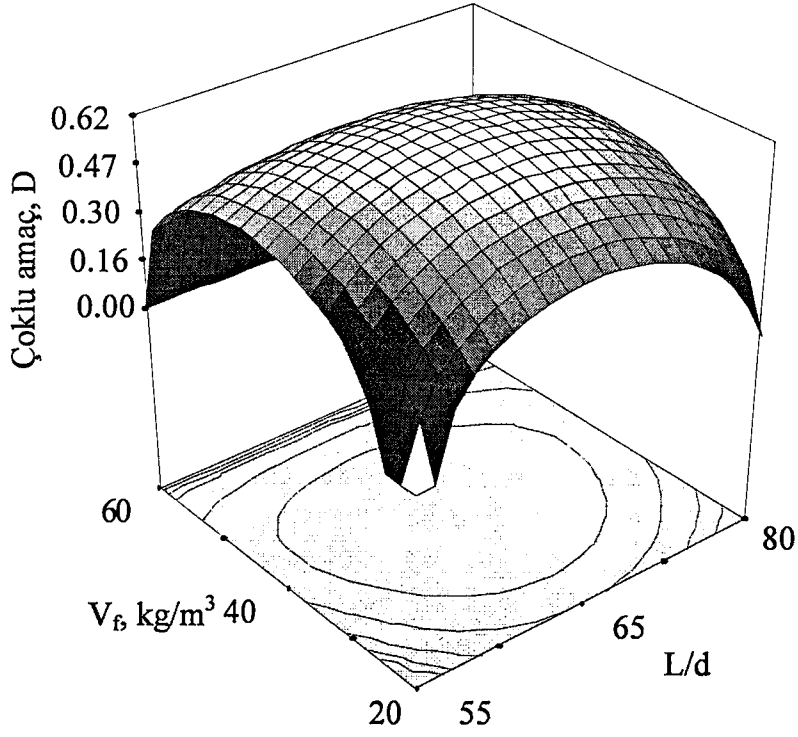
Tablo 5.7. Tasarım değişkenleri ve mekanik özelliklerin alt ve üst sınırları (su/çimento=0,45)

		Alt sınır	Üst sınır
Değişkenler	Tel narinliği (L/d)	55	80
	Tel içeriği (V_f), kg/m ³	20	60
Tepkiler	Yarmada çekme dayanımı (f_{st}), MPa	4,56	6,30
	Tokluk (T), Joule	756	1849

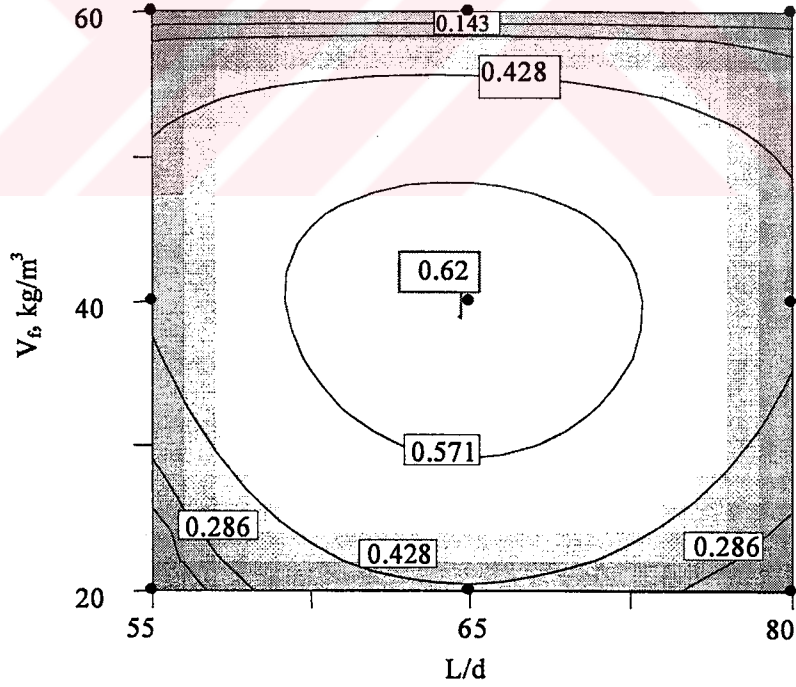
Tablo 5.8. Tasarım değişkenleri ve mekanik özelliklerin alt ve üst sınırları (su/çimento=0,70).

		Alt sınır	Üst sınır
Değişkenler	Tel narinliği (L/d)	55	80
	Tel içeriği (V_f), kg/m ³	20	60
Tepkiler	Yarmada çekme dayanımı (f_{st}), MPa	3,13	4,14
	Tokluk (T), Joule	426	1618

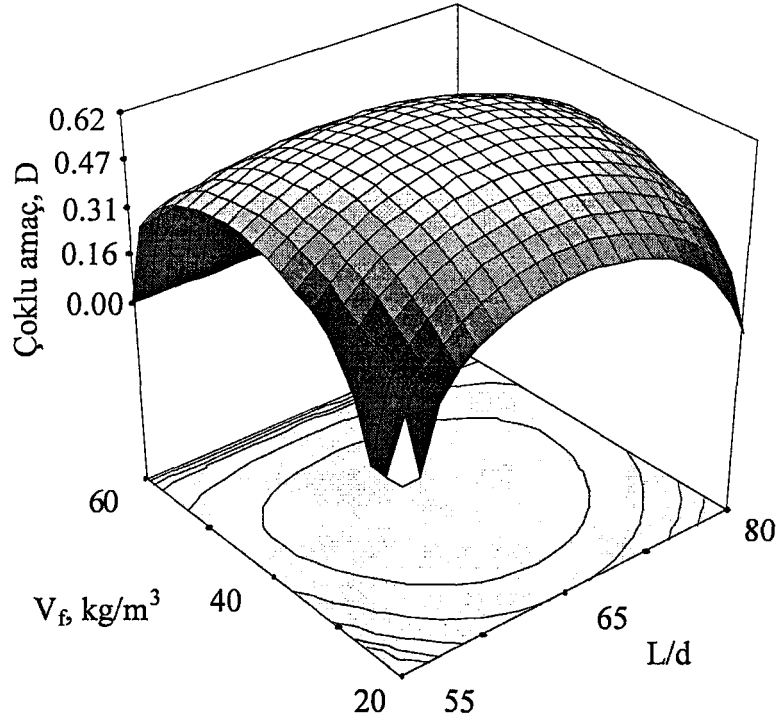
Maksimum tokluk ve maksimum yarmada çekme dayanımı ile minimum tel içeriği için optimum çözümler su/çimento oranı 0,45 ve 0,70 için sırasıyla, Tablo 5.9 ve Tablo 5.10’da verilmektedir. ÇTDB’ların tokluk ve yarmada çekme dayanımları için tahmin edilen optimum değerleri % 95 güven aralığında belirlenmiştir.



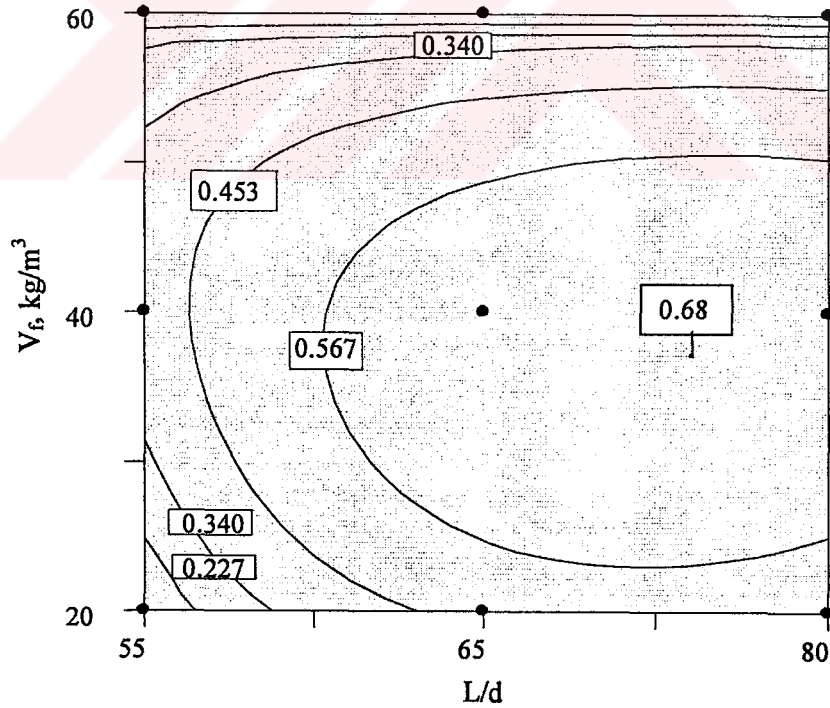
Şekil 5.11. Tokluk (T) ve yarma-çekme dayanımının (f_{st}) nin maksimum, V_f ' in ise aynı anda minimum yapılması halinde çoklu amacın (D), L/d ve V_f ile değişimini gösteren tepki yüzeyi (su/çimento=0,45)



Şekil 5.12. Tokluk (T) ve yarma-çekme dayanımının (f_{st}) nin maksimum, V_f ' in ise aynı anda minimum yapılması halinde çoklu amacın (D), L/d ve V_f ile değişimini gösteren tepki yüzeyi izdüşümü (su/çimento=0,45)



Şekil 5.13. Tokluk (T) ve yarma-çekme dayanımının (f_{st}) nin maksimum, V_f ' in ise aynı anda minimum yapılması halinde çoklu amacın (D), L/d ve V_f ile değişimini gösteren tepki yüzeyi (su/çimento=0,70)



Şekil 5.14. Tokluk (T) ve yarma-çekme dayanımının (f_{st}) nin maksimum, V_f ' in ise aynı anda minimum yapılması halinde çoklu amacın (D), L/d ve V_f ile değişimini gösteren tepki yüzeyi izdüşümü (su/çimento=0,70)

Tablo 5.9. Maksimum tokluk ve maksimum yarmada çekme dayanımı ile minimum tel içeriği için optimum çözümler (su/çimento= 0,45).

	Optimum çözümler		
	1	2	3
Tel narinliği (L/d)	55	65	80
Tel içeriği (V_f), kg/m^3	44,4	38,8	42,4
Yarmada çekme dayanımı (f_{st}), MPa	6,1	6,1	5,6
Tokluk (T), Joule	1072	1324	1176

Tablo 5.10. Maksimum tokluk ve maksimum yarmada çekme dayanımı ile minimum tel içeriği için optimum çözümler (su/çimento= 0,70).

	Optimum çözümler		
	1	2	3
Tel narinliği (L/d)	55	65	80
Tel içeriği (V_f), kg/m^3	42,3	37,0	37,7
Yarmada çekme dayanımı (f_{st}), MPa	3,9	4,1	4,0
Tokluk (T), Joule	670	1018	1132

ÇTDB'ların tokluklarının ve yarmada çekme dayanımlarının maksimum olduğu minimum tel içeriklerinin belirlenmesi için yapılan optimizasyon sonucunda; su/çimento oranı 0,45 için en uygun çözüm narinliğinin 65 değerinde ve $38,8 \text{ kg/m}^3$ tel içeriğinde yarmada çekme dayanımı ve tokluk değerleri sırasıyla 6,1 MPa ve 1324 Joule olarak elde edildi. Ayrıca, narinliğin 55 ve 80 değerlerinde ise optimum tel içeriği sırasıyla, 44,4 ve $42,4 \text{ kg/m}^3$ olarak belirlendi. Bu optimum değerlere karşı gelen tokluklar sırasıyla, 1072 ve 1176 Joule, yarmada çekme dayanımları ise, sırasıyla, 6,1 ve 5,6 MPa'dır.

Benzer biçimde, su/çimento oranı 0,70 için ise en uygun çözümün narinliğinin 80 değerinde ve $37,7 \text{ kg/m}^3$ tel içeriğinde yarmada çekme dayanımı ve tokluk değerleri ise sırasıyla, 4,0 MPa ve 1132 Joule olarak belirlendi. Ayrıca, narinliğin 55 ve 65 değerlerinde ise optimum tel içeriği sırasıyla, 42,3 ve $37,0 \text{ kg/m}^3$ olarak belirlendi. Bu optimum değerlere karşı gelen tokluklar sırasıyla, 670 ve 1018 Joule, yarmada çekme dayanımları ise, sırasıyla, 3,9 ve 4,1 MPa'dır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlara ve bu sonuçların deneysel tasarıma bağlı olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Çelik tel içeriği ve narinliğin ÇTDB'ların basınç dayanımına ve elastisite modülüne etkisinin belirgin olmadığı görüldü. Ancak çelik tel çapı ve olası yönlenmesinin basınç dayanımında etkili olabileceği açıktır. Basınç dayanımında etkili olabilir. Ayrıca, çelik tellerin betona eklenmesi ÇTDB'ların basınç dayanımından çok basınç tokluğunu iyileştirmektedir.
2. Su/çimento oranı 0,45 olan betonlarda tel içeriği arttıkça yarmada çekme dayanımları arttı. Su/çimento oranı 0,45 ve 65 narinlikte yarmada çekme dayanımındaki en büyük artış 60 kg/m^3 tel içeriğinde %25 oldu. Benzer şekilde, 55 narinlikte ve 40 kg/m^3 tel içeriğinde yarmada çekme dayanımında yaklaşık %21 artış, 80 narinlikte ve 60 kg/m^3 tel içeriğinde ise %15 artış elde edildi. Buna karşılık su/çimento oranı 0,70 olan betonlarda 55 ve 80 narinlik için çelik tel içeriğinin yarmada çekme dayanımına belirgin bir etkisi olmadığı belirlendi. Sonuç olarak ÇTDB'ların yarma dayanımında önemli iyileştirme 65 narinliğe sahip ÇTDB'larda, özellikle su/çimento oranı düşük olan betonlarda görüldü. Kırılma düzlemi boyunca çatlak açılması ve yayılması çelik teller tarafından engellenmektedir. Çatlak ilerlemesi sırasında bazı çelik teller kopma eğilimi gösterirken, bazıları matristen sıyrılma eğilimi sergilerler. Yarmada çekme deneyi sonunda incelenen kırılma yüzeylerinde, çoğu zaman 65 narinliğe sahip çelik tellerin kopmadan sıyrıldığı, buna karşılık 80 narinliğe sahip çelik tellerin koptuğu belirlendi. Buradan, aynı boydaki çelik tellerden (burada narinliği 65 ve 80 olan çelik tellerin boyları 60 mm, çapları ise sırasıyla 0,92 mm ve 0,75 mm) çapı büyük olanın daha etkili olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu davranışta ayrıca 80 narinlikteki çelik teller ile beton matrisi arasındaki uyumsuzluğun etkili olduğu düşünülebilir, zira çelik tel içermeyen yalın betonun standart silindir dayanımı 60 MPa civarındadır. Bu çalışmada kullanılan çelik tellerin çekme dayanımları ise

1100 MPa'dır. Son yıllarda, yüksek dayanımlı betonlarda çekme dayanımı 2000 MPa olan çelik tellerin kullanılmasının nedeni budur.

3. Çelik tellerin betona katılmasıyla gevreklik indislerinin azaldığı görüldü. Gevreklik indislerinin azalmasında çelik tel içeriğinin narinliğe kıyasla daha etkili olduğu ve çelik tel içeriği arttıkça gevreklik indeksinin azaldığı söylenebilir. Ayrıca su/çimento oranı 0,70 olan betonların gevreklik indisindeki azalma su/çimento oranı 0,45 olan betonlarınkine kıyasla fazla olmuştur. Su çimento oranı 0,70 için ve 0,45 için gevreklik indekslerindeki en büyük azalma sırasıyla %43 ve %23 olarak elde edildi.
4. Plakların ilk çatlak yükü değerlerinin çelik tel içeriği ve narinliğinin artmasıyla arttığı görüldü. Su/çimento oran 0,45 ve 0,70 için ilk çatlak yükündeki en büyük artışlar 65 narinliğe sahip ve 60 kg/m³ çelik tel içeren betonlarda sırasıyla %45 ve %25 olarak elde edildi.
5. Su/çimento oranı 0,45 olan ÇTDB'larda tokluk ve ilk çatlak yükü belirgin bir biçimde arttı. Bu, çelik tel içeriği ve narinliğe bağlı olarak artan yüksek sünekliğin bir sonucudur. Tokluktaki bu artış liflerin matristen sıyrılma ve kırılma sırasında lif-matris bağının ayrılması için yüksek enerji gereksiniminden kaynaklanabilir. Çelik tel içeriğinin artması ile tokluktaki artış ise çok sayıdaki çelik telin çatlak köprüleme etkisinin fazla olması olarak açıklanabilir. Çelik teller matris çatlamasından sonra tel-matris arayüzeyinde çatlak oluşumuna kadar yük taşırlar, buda çelik tellerin yarı-gevrek olan betonun nasıl sünek bir yapıya dönüştürdüğünün kanıtı olmaktadır.
6. Plakların toklukları (enerji yutma kapasiteleri) ise narinliğin ve çelik tel içeriğinin artmasıyla belirgin bir şekilde artmaktadır. Su/çimento oranı 0,45 ve 55 narinliğe sahip betonların 20 kg/m³, 40 kg/m³ ve 60 kg/m³ tel içeriklerindeki tokluk değerleri sırasıyla 756 joule, 832 joule ve 1245 joule elde edildi. Bu değerler 65 narinlik için sırasıyla 832 joule, 1357 joule ve 1849 joule olurken, 80 narinlik için ise sırasıyla 989 joule, 1032 joule ve 1412 joule olarak belirlendi. Benzer şekilde su/çimento oranı 0.70 ve 55 narinliğe sahip betonların 20 kg/m³, 40 kg/m³ ve 60 kg/m³ tel içeriklerindeki tokluk değerleri sırasıyla 426 joule, 642 joule ve 908 joule elde edildi. Bu değerler 65 narinlik için sırasıyla 771 joule, 1069 joule ve 1500 joule olurken,

80 narinlik için ise sırasıyla 741 joule, 1239 joule ve 1618 joule olarak bulundu.

7. Su/çimento oranı 0,45 olan ve 55 narinlikteki betonun tel içeriğinin 20 kg/m^3 'den 40 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 'e çıkarılmasıyla tokluk değerlerinde sırasıyla %37 ve %65 artış olmaktadır. Benzer şekilde 65 narinlik için bu artışlar sırasıyla, %63 ve %122 ve 80 narinlik için ise sırasıyla, %5 ve %43 olarak belirlendi.
8. Su/çimento oranı 0,70 olan ve 55 narinlikteki betonun tel içeriğinin 20 kg/m^3 'den 40 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 'e çıkarılmasıyla tokluktaki artışlar sırasıyla, %51 ve %113 olarak belirlendi. Benzer şekilde 65 narinlik için bu artışlar sırasıyla, %39 ve %95 ve 80 narinlik için ise sırasıyla, %67 ve %118 olarak elde edildi.
9. Su/çimento oranı 0,70 olan betonlarda ilk çatlak yüklerinin düşük olmasına karşın tokluklarının su/çimento oranı 0,45 olan betonlarınkine yakın olarak elde edilmesi, kullanılan çelik tellerin su/çimento oranı yüksek olan veya matris dayanımı düşük olan betonlarda daha fazla iyileştirme yaptığını göstermektedir.
10. Düşük tel içeriklerinde çelik tel donatılı betonların tepe yükü veya ilk çatlak yükü sonrası ani bir düşme eğilimi gösterdikleri ve daha sonra toparlanarak bazen tekrar yükselen bazen de azalan bir davranış ile yük taşımaya devam ettikleri gözlemlendi. Bu çalışmada da 20 kg/m^3 tel içeriklerinde plak numuneler genelde ilk çatlak yükü sonrası ani bir düşme ve daha sonra yeniden yükselen ve tepe yükü sonrası azalarak yük taşımaya devam eden bir davranış sergilediler. Bu davranış, matris içinde çelik tellerin yetersiz olmasından dolayı betonun gevrek ile sünek arasında bir davranış sergilemesi olarak açıklanabilir. Çelik tel içeriği artıkça yük-sehim eğrisinin tepe yükü sonrası düşen kolunun eğimi azaldı ve betonların toklukları büyük ölçüde arttı.
11. Çelik tel miktarı artıkça ilk çatlağın kılcal düzeylerde olduğu, düşük tel içeriklerinde ise gözle görülür ilk çatlaklar meydana geldiği görüldü. Bu çelik tellerin yüksek miktarda kullanılmasının daha çok çatlak köprüleme etkisi yapması olarak açıklanabilir. İlk çatlak sonrası çatlak genişliğindeki açılma miktarı ise çelik tel içeriği artıkça azaldı.
12. Deney sonrası ÇTDB plakların kırılma şekilleri hemen hemen aynı tipte olduğu görüldü.

13. ÇTDB'ların tokluklarının ve yarmada çekme dayanımlarının maksimum olduğu minimum tel içeriklerinin belirlenmesi için yapılan optimizasyon sonucunda; su/çimento oranı 0,45 için en uygun çözüm narinliğinin 65 değerinde ve $38,8 \text{ kg/m}^3$ tel içeriğinde yarmada çekme dayanımı ve tokluk değerleri sırasıyla 6,1 MPa ve 1324 Joule olarak elde edildi. Ayrıca, narinliğin 55 ve 80 değerlerinde ise optimum tel içeriği sırasıyla, $44,4 \text{ kg/m}^3$ ve $42,4 \text{ kg/m}^3$ olarak belirlendi. Bu optimum değerlere karşı gelen tokluklar sırasıyla, 1072 ve 1176 Joule, yarma-çekme dayanımları ise, sırasıyla, 6,1 ve 5,6 MPa'dır. Benzer biçimde, su/çimento oranı 0,70 için ise en uygun çözümün narinliğinin 80 değerinde ve $37,7 \text{ kg/m}^3$ tel içeriğinde yarmada çekme dayanımı ve tokluk değerleri ise sırasıyla, 4,0 MPa ve 1132 Joule olarak belirlendi. Ayrıca, narinliğin 55 ve 65 değerlerinde ise optimum tel içeriği sırasıyla, $42,3 \text{ kg/m}^3$ ve $37,0 \text{ kg/m}^3$ olarak belirlendi. Bu optimum değerlere karşı gelen tokluklar sırasıyla, 670 ve 1018 Joule, yarma- çekme dayanımları ise, sırasıyla, 3,9 ve 4,1 MPa'dır.

Çelik tellerin betonlar üzerinde yaptığı iyileştirmelerin ve ÇTDB'ların mekanik davranışlarının belirlenmesi konularında yapılacak çalışmalar için aşağıda öneriler verilmektedir.

1. Çelik teller içeriğinin ve narinliğinin yanı sıra çelik telin matrsten sıyrılma dayanımının betonun özelliklerinin etkileyen en önemli etken olduğu açıktır. Bu nedenle, deneysel çalışmalarda ve tasarım kriterlerinde dikkate alınmasında yarar vardır. Yüksek dayanımlı betonlarda yüksek dayanımlı çelik tel kullanmanın birlikte çalışma bakımından daha uygun olacağı düşünülmelidir.
2. Çelik tellerin betonlar üzerinde yaptığı iyileştirme taze betonun reolojisi ve matris dayanımına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu nedenle çalışmalarda optimum sonuçlar bu özellikleri de dikkate alınarak belirlenebilir. Yüksek su/çimento oranlarında daha geniş deneysel çalışmalar ile bu etkinin derecesi incelenebilir. Çelik tel donatılı betonların reolojisi de optimizasyonda hesaba katılmalıdır.

3. Çelik tel donatılı betonların özelliklerinin belirlenmesinde standart deney metotların yeniden gözden geçirilmesi ve yeni uygun metotların belirlenmesine gerek vardır.
4. Çelik tel donatılı betonların tasarımı dayanımından çok şekil değiştirme kapasitesi, dürabilite ve tokluk gibi özellikler göz önüne alınarak performansa göre yapılmalıdır.



KAYNAKLAR

- [1] Taşdemir, M.A. ve Bayramov F., 2002. Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı, *itüdergisi/d* Cilt 1, Sayı 2, Aralık, 125-144.
- [2] Taşdemir, M.A., 1999. Çelik tel takviyeli betonların mekanik davranışı, *Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu*, Sabancı Center, İstanbul, 24 Kasım, s.9-11.
- [3] Balaguru, P. N., Narahari, R., and Patel, M., 1992. Flexural toughness of steel fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, **89(6)**, 541-545.
- [4] Banthia, N. And Trottier, J-F., 1995. Concrete reinforced with deformed steel fibers Part II:Toughness characterization, *ACI Materials Journal*, **92(2)**,146-154.
- [5] Gopalaratnam, V.S., Shah, S.P., Batson, G.B., Criswell, M.E., Ramakrishnan, V. and Wecharatana, M., 1991. Fracture toughness of fibre reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, **88(4)**, 339-353.
- [6] Koksall, F., Eyyubov, C. ve Özcan, D.M., 2002. Çelik tel içeriğinin betonun mekanik özelliklerine etkisi", 5. *İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 25-27 Eylül, s.169-179.
- [7] Marar, K., Eren, Ö. and Çelik, T., 2001. Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength fiber-reinforced concrete, *Materials Letters*, **47**, 201-304.
- [8] Naaman, A.E., 1987. High performance fiber reinforced cement composites. concrete structures for the future, *IABSE Symposium*, Paris, 371 376.
- [9] Ramakrishnan, V., Wu, G. Y., and Hosalli, G., 1989. Flexural behavior and toughness of fiber reinforced concretes" , *Transportation Research Record*, No. 1226, 69-77.
- [10] Shah, S. P. and Rangan, B. V., 1971. Fiber reinforced concrete properties, *ACI Materials Journal*, **68(2)**, 126-135.
- [11] Soroushian, P. and Bayasi, Z., 1991. Fiber-type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, **88(2)**, 129-134.

- [12] **Barros, J.A.O. ve Trotier, J.F.**, 1995. Flexural behaviour of sfrc: testing and modelling, *Journals of Materials in Civil Engineering*, (11)4, 331-339.
- [13] **Taşdemir, M.A., İlki, A. and Yerlikaya, M.**, 2002. Mechanical behaviour of steel fibre reinforced concrete used in hydraulic structures, *Proceedings of HYDRO 2002: International Conference of Hydropower and Dams*, Antalya, Turkey, November 4-7, 159-166.
- [14] **ACI Commitee 544**, 1993. Guide for specifying, mixing, placing and finishing steel fibre reinforced concrete (ACI544.3R-93), *ACI Materials Journal*, 90(1), 94-101.
- [15] **Van Gysel, A.**, 1999. A Pull-out model for hooked-end steel fibres, *High Performance Fibre Reinforced Composites (HPFRCC3)*, pp.351-359, Reinhardt, H.W., Naaman A.E.,(eds.), RILEM Publishers.
- [16] **TS10153**, 1992. Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [17] **Bayramov F., İlki A., Taşdemir C., Taşdemir M.A. and Yerlikaya M.**, 2004. SFRCs for Concrete Roads in Heavily Trafficked Situations, *9th International Symposium on Concrete Roads*, 2, Istanbul, Turkey, April 4-7, 73-82.
- [18] **ACIFC**, 1999. Steel Fibre Reinforced Concrete Industrial Ground Floors, Association of Industrial Flooring Contractors, Warwickshire.
- [19] **Arslan, A. ve Aydın, A.C.**, 1999. Lifli betonların darbe etkisi altındaki genel özellikleri, *Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu*, Sabancı Center, İstanbul, 24 Kasım, s.44-53
- [20] **Neville, A.M.**, 1975. Properties of Concrete, Pitmann Publishing, London.
- [21] **Otter, D.E. and Naaman, A. E.**, 1988. Fiber reinforced concrete under cyclic and dynamic compression load, *Research Report*, No. **UMCE 88-9**, Department of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 178 pp.
- [22] **Swamy, R.N. and Mangat, P.S.**, 1974. Influence of fibre-aggregate interaction of some properties of SFRC, *Materials and Structures*, 7(41), 307-313.
- [23] **Swamy, R.N.**, 1971. Fibre reinforcement of cement and concrete evaluation of fibre reinforcement cement and composites, *Materials and Structures*, 19 FRC Commitee, 8(45), 235-254.

- [24] **Taşdemir, M.A.**, 2000. Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından getirilen dramix çelik tel donatılı beton plaklar üzerinde yapılan deneyler ile ilgili, *Teknik Rapor 1*, **Proje No:2000/323**, İTÜ, İstanbul.
- [25] **Ünal, O.**, 1999. Isıl işlem uygulanmasının betonun mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması, *Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu*, Sabancı Center, İstanbul, 24 Kasım, s.72-79.
- [26] **Hartmann, T.**, 1999. Steel Fibre Reinforced Concrete, Stockholm.
- [27] **Acun, S.**, 2000. Yüksek dayanımlı beton üretiminde dizayn parametrisi olarak lifsel katkıların irdelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- [28] **Chang, D-I. and Chai, W-K.**, 1995. Flexural fracture and fatigue behaviour of steel fibre reinforced concrete structures, *Nuclear Engineering and Design*, **156**, 201-207.
- [29] **Chenkui H. and Guafon Z.**, 1995. Properties of steel fibre reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, **17**,199-206.
- [30] **Eren, Ö. and Çelik T.**, 1997. Effect of silisa fume and steel fibres on some properties of high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, **11(7)**, 373-382.
- [31] **Yıldırım, M.A.** 1994. Hafif ve yarı hafif betonlarda çelik tel kullanımının etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] **Taylor, M., Lydon, F.D. and Barr, B.I.G.**, 1997. Toughness measurement on steel fibre-reinforced high strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, **19**, 329-340.
- [33] **Bayramov, F., Taşdemir, C. and Taşdemir, M.A.**, 2002. Optimum design of cement-based composites materials using statistical response surface method", *Fifth International Congress on Advanced in Civil Engineering*, ITU, İstanbul, Turkey, September 25-27, 725-734.
- [34] **Johnston, C. D. and Zemp, R. W.**, 1991. Flexural fatigue performance of steel fiber reinforced concrete - influence of fiber content, aspect ratio and type, *ACI Materials Journal*, **88(4)**, 374-383.
- [35] **Ramakrishnan, V., Wu, G. Y., and Hosalli, G.**, 1989. Flexural fatigue strength, endurance limit, and impact strength of fiber reinforced concretes, *Transportation Research Record*, **No.1226**.

- [36] Miao, C., Mu, R., Tian, Q. and Sun, W., 2002. Effect of sulfate solution on the frost resistance of concrete with and without steel fibre reinforcement, *Cement and Concrete Research*, **32**, 31-34.
- [37] Betterman, L.R., Ouyang, C. And Shah, S.P., 1995. Fiber matrix interaction in microfiber-reinforced mortar, *Advanced Cement Based Materials*, **2**, 53-61.
- [38] Taşdemir, M.A., 2000. Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından getirilen dramix çelik tel donatılı beton plaklar üzerinde yapılan deneyler ile ilgili, *Teknik Rapor 2*, **Proje No:2000/323**, İTÜ, İstanbul.
- [39] Romualdi, J. P. and Batson, G. B., 1963. Mechanics of crack arrest in concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, **89**, No. EM3, June, 147-168.
- [40] Sullivan, A.P., 1999. The effect of hydro-thermal curing at 90°C and the use of 13 mm steel fibres on reactive powder concrete”, *Master Science Thesis*, University of Wales, Cardiff.
- [41] Lange-Kornbak, D., ve Karihaloo, B.L., 1998. Design of fibre-reinforced DSP mixes for minimum brittleness, *Advanced Cement Based Materials*, **7**, 89-101.
- [42] Swamy, R.N. and Mangat P.S., 1974. A Theory for flexural strength of fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, **4(2)**, 315-325.
- [43] Ezeldin, A. S. and Balaguru, P. N., 1989. Bond behavior of normal and high-strength fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, **86(5)**, 515-524.
- [44] Banthia, N., 1997. Fibre reinforced concrete:present and future, *Asia-Pasific Special Conference On Fibre Reinforced Concrete*, CI-Premier, Singapore, May 8-11, 1-10.
- [45] Moyson, D., Nemegeer, D. and Vandewalle, M., 1994. The design of steel fibre reinforced concrete tunnel linings, *Technical Report*, March, Belgium.
- [46] Soroushian, P., Aouadi, F. and Hsu, J-W., 1995. Theoretical optimization of fibre reinforced cement composites, *ACI Materials Journal*, **92(4)**, 373-382.
- [47] Balendran, R.V. and Zhou, F.P., 2002. Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweigth high strength concrete” , *Building and Environment*, **6**, 255-258.

- [48] **Trottier, J.-F. and Banthia, N.**, 1994. Toughness characterization of steel fiber reinforced concrete, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, **6**(2), 264-289.
- [49] **Taerwe, L. R.**, 1992. Influence of steel fibers on strain-softening of high-strength concrete" *ACI Materials Journal*, **89**(1), 54-60.
- [50] **Williamson, G. R.**, 1974. The effect of steel fibers on the compressive strength of concrete, *A State-of-art report*, **ACI SP-44**, American Concrete Institute, Detroit, MI, 195-207.
- [51] **Naaman, A.E., Moavenzadeh, F. and McGarry, F.**, 1974. Probabilistic analysis of fiber reinforced concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, April, **100**, No. EM2, 397-413.
- [52] **Ezeldin, A. S. and Balaguru, P. N.**, 1992. Normal- and high-strength fiber-reinforced concrete under compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **4**(4), 415-429.
- [53] **Gasparini, D.A., Verna, D. and Abdallah, A.**, 1989. Post cracking tensile strength of fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, **6**, 10-15.
- [54] **Lim, T. Y., Paramavisam, P. and Lee, S. L.**, 1987. Analytical model for tensile behavior of steel fiber concrete. *ACI Materials Journal*, **84**(4), 286-298.
- [55] **ACI Committee 544**, 1982. Fiber reinforced concrete, *A State-of-the-art report* **ACI 544.1R-82**, Concrete International, May, **5**, 9-30.
- [56] **Edington, J., Hannant, D.J. and Williams, R. I. T.**, 1974. Steel fiber reinforced concrete, *Building Research Establishment*, **CP 69174** Garston, Waterford, England.
- [57] **ACI Committee 544**, 1990. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 5, American Concrete Institute, Detroit, MI., USA.
- [58] **Naaman, A.E.**, 1985. High strength fiber reinforced cement composites, *Proceedings Of Symposium On Potential Of Very High Strength Cement-Based Materials*, pp. 217-229, Materials Research Society; Ed. by J. F. Young.
- [59] **Kayali, O., Haque, M.N. and Zhu, B.**, 1995. Drying shrinkage of fibre reinforced concrete containing fly ash, *Cement and Concrete Research*, **29**, 1835-1840.

- [60] **Lim, D.H. and Oh, B.H.**, 1999. Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, **21**, 937-944.
- [61] **Gao, J., Sun, W. and Morino, K.**, 1997. Mechanical properties of steel fibre reinforced high-strength lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*, **19**, 307-313.
- [62] **Shah, S. P.**, 1991. Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrixes?, *ACI Materials Journal*, Nov-Dec, Vol. 88, **6**, 595-602.
- [63] **Banthia, N., Trottier, J.F., Beaupre, D. and Wood D.**, 1994. Properties of steel fibre reinforced shotcrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, **21**, 564-575.
- [64] **Paul Z, Shuaib A. and Michael L.**, 1996. High-performance concretes a state-of-art report (1989-1994) **FHWA-RD-97-030** .
- [65] **Romualdi, J. P. and Mandel, J. A.**, 1964. Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed closely spaced short lengths of wire reinforcement. *ACI Journal*, **61(6)**, 657-671.
- [66] **Nielsen, L. E. and P. E. Chen.**, 1968. Young's modulus of composites filled with randomly oriented fiber, *Journal of Materials*, **3(2)**, 352-358.
- [67] **Swamy, R. N., Mangat, P. S. and Rao, C. V. S. K.**, 1974a. The mechanics of fiber reinforcement of cement matrices. fiber-reinforced concrete, *American Concrete Institute*, **ACI SP-44**, Detroit, MI, 1-28.
- [68] **Halpin, J. C. and Tsai, S. W.**, 1969. Effects of environmental factors on composite materials, *Technical Report*, **AFML-TR 67423**, NY.
- [69] **Husamuddin, S.N. and Antoine, E.N.**, 1995. Prediction model for elastic modulus of high-performance fiber reinforced cement-based composites, *ACI Materials Journal*, **92(3)**, 304-314.
- [70] **Najm, H. and Naaman, A. E.**, 1995. Prediction model for elastic modulus of high performance fiber reinforced cement composites, *ACI Materials Journal*, **92(3)**, 304-314.
- [71] **Patton, M. E. and Whittaker, W.L.**, 1983. Effect of fiber content and damaging load on steel fiber reinforced concrete stiffness, *ACI Materials Journal*, **80(1)**, 13-16.

- [72] **Shah, P., Stroeven, P., Dalhuisen, D. and Stekelenburg P. V., 1978.** Complete stress-strain curves for steel fiber reinforced concrete in uniaxial tension and compression, *Testing And Test Methods of Fibre Cement Composites*, pp.399-408, The Construction Press, Lancaster, England.
- [73] **Fanella, D. A. and Naaman, A. E., 1985.** Stress-strain properties of fiber reinforced concrete in compression. *ACI Materials Journal*, **82(4)**, 475-483.
- [74] **Ezeldin, A. S. And Lowe, S. R., 1991.** Mechanical properties of steel fiber reinforced rapid-set materials, *ACI Materials Journal*, **88(4)**, 384-389.
- [75] **Batson, G.B., 1991.** Fatigue strength toughness indices of fiber reinforced concrete. durability of concrete. *Second International Conference held in Montreal*, pp.715-728. Canada; Ed. by V.M. Malhotra; American Concrete Institute, Detroit, MI, Vol. 2, (ACI SP-126).
- [76] **Yan, H., Sun, W. and Chen, H., 1999.** The effect of silica fume and steel fiber on the dynamic mechanical performance of high-strength concrete, *Cement and Concrete Research*, **29**, 423-426.
- [77] **ASTM C 1018, 1992.** Standart test methods for flexural thoughness and first crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third point loading), American Society of Testing Materials, USA.
- [78] **JSCE Standart SF-4, 1984.** Method of test of flexural strength and flexural thoughness of fiber reinforced concrete, *Japan Society of Civil Engineering*, Japan.
- [79] **RILEM TC 162-TDF, 2000.** Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, RILEM.
- [80] **Heneger, C.H., 1978.** Tougness index of fibre concrete, *Rilem Symposium on Testing and Test Methods of Fiber Cement Composites*, pp.79-86, Contruction Press, Lancaster, UK.
- [81] **EFNARC, 1993.** Specification for sprayed concrete, *The European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers for Construction Industry*, Hampshire.
- [82] **Grzybowski, M.ve Shah, S.P., 1987.** Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, **87(2)**, 138-148.
- [83] **Edington J., 1973.** Steel fiber reinforced concrete", *Ph.D. Thesis*, University of Surrey, UK.

- [84] **Swamy R.S. and Stavrides H.**, 1979. Influence of fibre reinforcement on restraining shrinkage and cracking, *Journal of ACI*, 75, 443-460.
- [85] **Schrader, E.K. and Munch, A.V.**, 1976. Fibrous concrete repair of cavitation damage, *ASCE Journal of the Construction Division*, 102, 385-399.
- [86] **ACI Committee 544**, 1988. Design considerations for steel fiber reinforced concrete (ACI 544.4R-88). *Manual of Concrete Practice*, 5, American Concrete Institute, Detroit, MI.
- [87] **Nanni**, 1989. Abrasion resistance of roller compacted concrete. *ACI Materials Journal*, 86(6), 559-565.
- [88] **Sustersic, J., Mali, E., and Urbancic, S.**, 1991. Erosion-abrasion resistance of steel fibre reinforced concrete, *Second International Conference in Durability of Concrete*, pp 729-743, Montreal, Canada; Ed. by V. M. Malhotra; American Concrete Institute, (ACI SP-126), Detroit, MI.
- [89] **Balaguru P.N. and Ramakrishnan V.** 1986. Freeze-thaw durability of fiber reinforced concrete. *ACI Journal*, 33(3), 374-382.
- [90] **Vares, S.**, 1994. Frost Resistance of steel fiber high strength concrete, *Nordic Concrete Research*, 15, 75-88.
- [91] **Mu, R., Miao, C., Luo, X. and Sun, W.**, 2002. Interaction between loading, freeze-thaw cycles, and chloride salt attack of concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, 1-6.
- [92] **Huga, S. and Helene, P.**, 1995. Physical and mechanical properties of steel fibre reinforced dry-mix shotcrete, *ACI Materials Journal*, 92(3), 258-267.
- [93] **Arıoğlu, E., Arıoğlu B., ve Girgin C.**, 1999. Tünellerde çelik lifli püskürtme beton kaplama tasarımı, mekanik büyüklükler ve kalite kontrol ilkeleri, *Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu*, , Sabancı Center, İstanbul, 24 Kasım, s.24-33.
- [94] **BEKAERT**, 1995. Dramix steel fibre reinforced shotcrete, *Technical Report*, 57-90.
- [95] **Nataraha, M.C., Dhang N. and Gupta A.P.**, 2000. Toughness characterization of steel fibre-reinforced concrete by JSCE approach, *Cement and Concrete Research*, 30, 593-597.
- [96] **TS 2941**, 1978. Taze betonda birim ağırlık, verim ve hava miktarının ağırlık yöntemiyle tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- [97] TS 2871, 1977. Taze beton kıvam deneyi (çökme hunisi metodu ile), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [98] TS 3114, 1990. Beton basınç mukavemeti tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [99] **Grünwald, S. and Walraven, J.C.**, 2002. High strength self-compacting fibre reinforced concrete: Behaviour in the fresh and hardened state, in *6th International Symposium on HSC/HPC*, eds., G König et al., Leipzig, June, 977-989.
- [100] **Vandewalle, L.**, 1996. Influence of the yield strength of steel fibres on the toughness of fibre reinforced high strength concrete. *Proceedings, the CCMS Symposium, Worldwide Advances in Structural Concrete and Masonry*, Chicago, 496-505.
- [101] **Myers, R.H. and Montgomery, D.C.**, 1995. Response Surface Methodology; Process and Product Optimization Using Design Experiments, New York, Wiley.
- [102] **Box, G.E. and Draper N.R.**, 1987. Empirical Model Building and Response Surfaces, John Wiley, New York NY.
- [103] **Montgomery, D.C.**, 1991. Design and Analysis of Experiments, John Wiley and Sons, N.J.
- [104] **Derringer, G. and Suich, R.**, 1980. Simultaneous optimization of several response variables, *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214-219.



Dramix® ZP 305

• **Description:** Dramix® fibres are filaments of wire, deformed and cut to lengths, for reinforcement of concrete, mortar and other composite materials. Dramix® ZP 305 is a cold drawn wire fibre, with hooked ends, and glued in bundles.



• **Applications:**
- shotcrete

• **Geometry:**

Length (l)
30 mm

Diameter (d)
0.55 mm

Aspect ratio
(= l/d): 55

16 750 fibres/kg
Min. dosage = 23 kg/m³
(according to spacing theory (Mack))

• **Tensile strength:**

- on the wire: minimum 1150 N/mm²
- low carbon conforms to: - DIN 17 140-D9
- EN 10016-2 - C9D

• **Coating:** None

• **Approvals:**

Product	Conforms to	Quality System in Belgian Plants	Approval Poland
ATG 1857 1631	ASTM A 820	ISO 9001 Dramix	Nr. Z-2117/95

• **Technical data:**

For shotcrete, ...
ask for specialized documentation.

PRODUCT DATA SHEET @ BEKAERT

Recommendations - mixing

1. General

- ✓ preferably add fibres in the mixer at batching plant
- ✓ recommended maximum dosage:

Dosage (kg/m³)	Aggregate size		
	2/8	4/16	4/32
pour	110	70	60
pump	80	55	45

- ✓ a continuous grading is preferred
- ✓ mix until all glued fibres are separated into individual fibres. Fibres don't increase mixing time significantly.
- ✓ If special cements or admixtures are used, a preliminary test is recommended



2. Fibre addition

2.1. In batching plant mixer

- ✓ never add fibres as first component in the mixer.
- ✓ fibres can be introduced together with sand and aggregates, or can be added in freshly mixed concrete
- ✓ only for drum mixer: unopened degradable bags can be thrown directly in the mixer



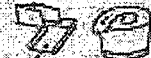
2.2. Truck mixer

- ✓ put mixer on maximum drum speed: 12-18 rpm
- ✓ adjust slump to a min. of 12 cm (preferably with water reducing agents or high water reducing agents)
- ✓ add fibres with maximum speed of 60 kg/min.
- ✓ unopened degradable bags can be added, provided that drum speed is min. 12 rpm.
- ✓ optional equipment: belt hoist elevator
- ✓ after adding the fibres, continue mixing at highest speed for 4-5 min. (± 70 rotations)



2.3. Automatic dosing

- ✓ Fibres in bulk can be dosed at rates up to 3.5 kg/sec with a specially developed dosing equipment.



Recommendations - storage

Protect the pallets against rain	Do not stack the pallets on top of each other	Delivered in: degradable bags of 20 kg or pallet 1100 kg 1200 kg
----------------------------------	---	---

N.V. Bekaert S.A. - Bekaertstraat, 2 - B-8550 Zwevegem - Belgium
Tel.: +32 (0) 56 / 76 69 86 Fax: +32 (0) 56 / 76 79 47

Modifications reserved. All details describe our products in general form only.
For ordering and design only use official specifications and documents, N.V. Bekaert S.A. 1997.

Şekil A.1. Dramix ZP305' in özellikleri.

Dramix®



Description:



Dramix® fibres are filaments of wire, deformed and cut to lengths, for reinforcement of concrete, mortar and other composite materials. Dramix® RC-65/60-BN is a cold drawn wire fibre, with hooked ends, and glued in bundles.

Applications:

- slabs on vibrocompacted piles
- liquid tight floors
- industrial floors
- overlays
- piles
- suspended ground slabs
- segmental linings
- cellar walls
- pavements
- jointless floors
- jointless floors on vibrocompacted piles
- outdoor slabs
- foundation slabs

Geometry:



Length (l)
60 mm
Diameter (d)
0,90 mm

65 Performance class - 65
Aspect ratio (= l/d): 67

3200 fibres/kg

Tensile strength:

- on the wire: minimum 1000 N/mm²
- low carbon conforms to: - DIN 17 140-D9
- EN 10016-2 - C9D

Coating: None

Approvals:



Product

Belgium

ATG 1857

The Netherlands



1631

Turkey

TS 105/3



Product

Russia

TC-07-0116-98

Poland

Z-2117/95

Romania

015-07/012-1997

Germany

Z-71.4-3

Technical data:

For industrial floors, floors on vibrocompacted piles, jointless floors... ask for specialized documentation.

Recommendations - mixing

1. General

- ✓ preferably use a central batching plant mixer
- ✓ recommended maximum dosage:

Max. aggregate size (mm)	Dosage (kg/m³)	
	pour	pump
8	110	80
16	70	55
32	60	45

- ✓ a continuous grading is preferred
- ✓ mix until all glued fibres are separated into individual fibres. Fibres don't increase mixing time significantly.
- ✓ if special cements or admixtures are used, a preliminary test is recommended

2. Fibre addition

2.1. In batching plant mixer

- ✓ never add fibres as first component in the mixer
- ✓ fibres can be introduced together with sand and aggregates, or can be added in freshly mixed concrete
- ✓ only for drum mixer: unopened degradable bags can be thrown directly in the mixer

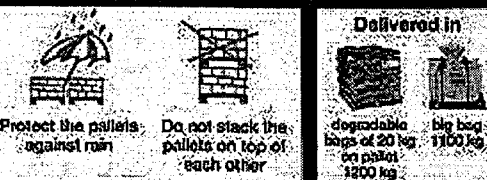
2.2. Truck mixer

- ✓ run mixer at drum speed: 12-18 rpm
- ✓ adjust slump to a min. of 12 cm (preferably with water reducing agents or high water reducing agents)
- ✓ add fibres with maximum speed of 40 kg/min
- ✓ unopened degradable bags can be added provided that drum speed is min. 12 rpm
- ✓ optional equipment: belt-hoist elevator
- ✓ after adding the fibres, continue mixing at highest speed for 4-6 min. (± 70 rotations)

2.3. Automatic dosing

- ✓ Fibres can be dosed from bulk at rates from 0 up to 3,5 kg/sec with a specially developed dosing equipment

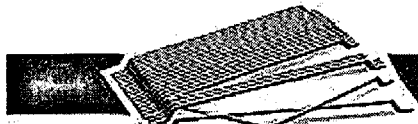
Recommendations - storage



N.V. Bekaert S.A. - Bekaertstraat 2 - 8550 Zwevegem - Belgium
Tel. +32 (0) 56 / 76 69 86 - Fax +32 (0) 56 / 78 79 47
Internet: <http://www.bekaert.com/building>

Values are indicative only. Modifications reserved. All details describe our products in general form only. For ordering and design only use official specifications and documents. © N.V. Bekaert S.A. 2000

Şekil A.2. Dramix RC 65/60 BN' in özellikleri.



PRODUCT DATA SHEET @ BEKAERT

Dramix®



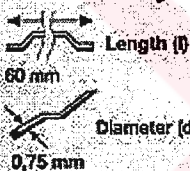
- Description:** Dramix® fibres are filaments of wire, deformed and cut to lengths, for reinforcement of concrete, mortar and other composite materials. Dramix® RC-80/60-BN is a cold drawn wire fibre, with hooked ends, and glued in bundles.



Applications:

- jointless floors
- suspended ground slabs
- jointless floors on vibrocompacted piles
- industrial floors
- slabs on vibro-compacted piles
- liquid light floors
- overlays
- pavements
- segmental linings
- compression layers
- cellar walls
- precast

Geometry:



Performance class: 80
Aspect ratio (= l/d): 80

4600 fibres/kg

Tensile strength:

- on the wire: minimum 1050 N/mm²
- low carbon conforms to: - DIN 17 140-D8
- EN 10018-2 - C8D

Coating: None

Approvals:

Conforms to
ASTM A820

Quality System in
Belgian Plants Brazilian & American Plants
ISO 9001 ISO 9002

Product

Belgium

ATG 1857

The Netherlands



1631

Turkey

TS 105/3

Product

Russia

TC-07-0116-98

Poland

Z-2117/95

Romania

015-07/012-1997

Germany

Z-71.4-3

Technical data:

For industrial floors, floors on vibrocompacted piles, jointless floors... ask for specialized documentation.

Recommendations - mixing

1. General

- ✓ preferably use a central batching plant mixer
- ✓ recommended maximum dosage:

Max. aggregate size (mm)	Dosage (kg/m ³)	
	pour	pump
8	60	45
16	50	35
32	35	30

- ✓ a continuous grading is preferred
- ✓ mix until all glued fibres are separated into individual fibres. Fibres don't increase mixing time significantly.
- ✓ if special cements or admixtures are used, a preliminary test is recommended

2. Fibre addition

2.1. In batching plant mixer

- ✓ never add fibres as first component in the mixer
- ✓ fibres can be introduced together with sand and aggregates, or can be added in freshly mixed concrete
- ✓ only for drum mixer: unopened degradable bags can be thrown directly in the mixer

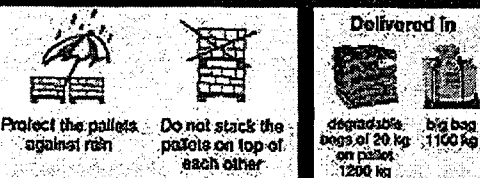
2.2. Truck mixer

- ✓ run mixer at drum speed: 12-18 rpm
- ✓ adjust slump to a min. of 12 cm (preferably with water reducing agents or high water reducing agents)
- ✓ add fibres with maximum speed of 40 kg/min
- ✓ unopened degradable bags can be added provided that drum speed is min. 12 rpm
- ✓ optional equipment: belt-hoist elevator
- ✓ after adding the fibres, continue mixing at highest speed for 4-5 min. (± 70 rotations)

2.3. Automatic dosing

- ✓ Fibres can be dosed from bulk at rates from 0 up to 3.5 kg/sec with a specially developed dosing equipment

Recommendations - storage

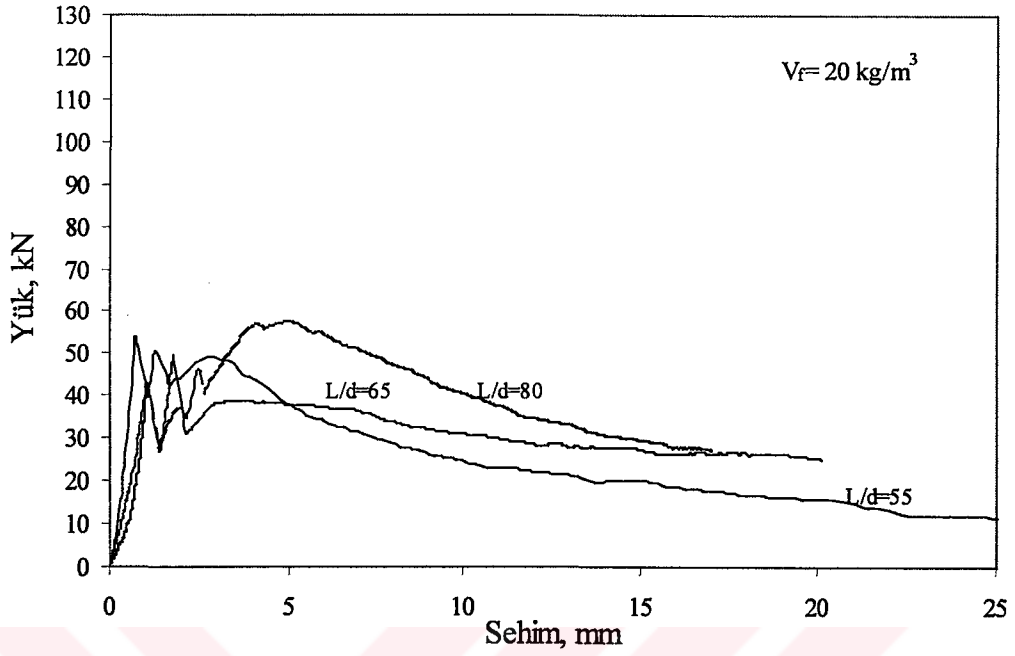


N.V. Bekaert S.A. - Bekaertstraat 2 - 8550 Zwevegem - Belgium
Tel: +32 (0) 55 / 76 69 85 - Fax: +32 (0) 56 / 76 79 47
Internet: <http://www.bekaert.com/building>

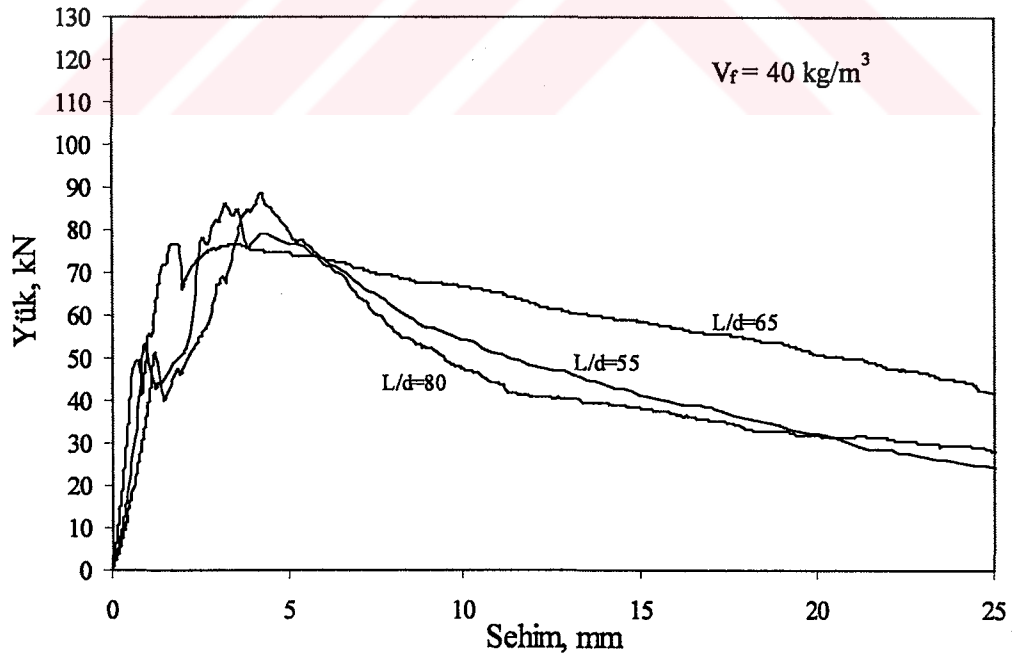
*Values are indicative only. Modifications reserved. All details describe our products in general form only. For ordering and design only use official specifications and documents. N.V. Bekaert S.A. 2000

Şekil A.3. Dramix RC 80/60 BN' in özellikleri.

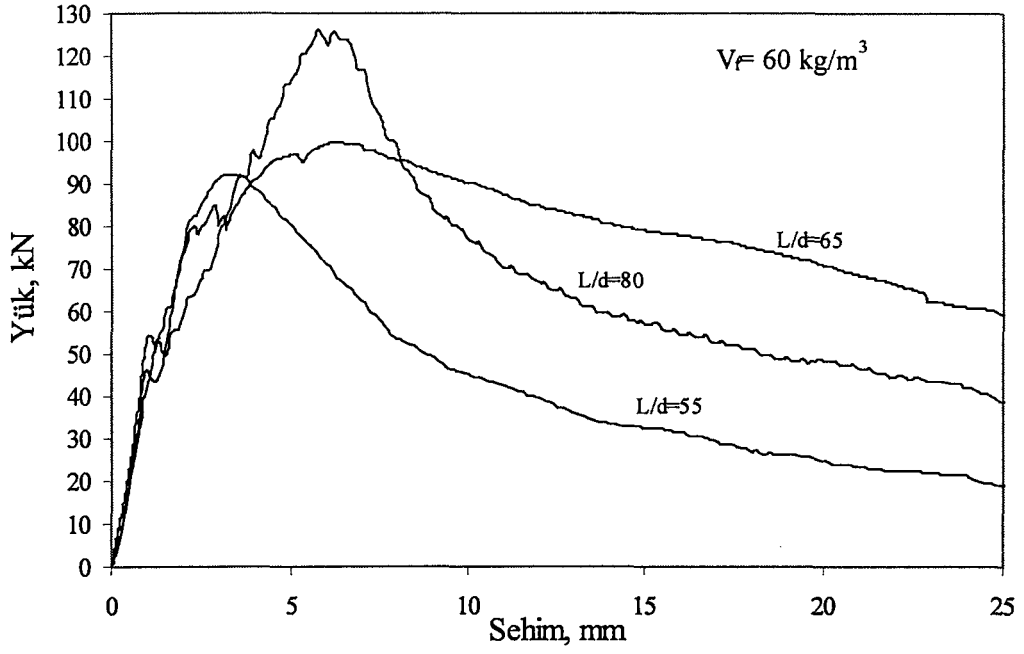
EK B: Yük-Sehim ve Enerji-Sehim Eğrileri



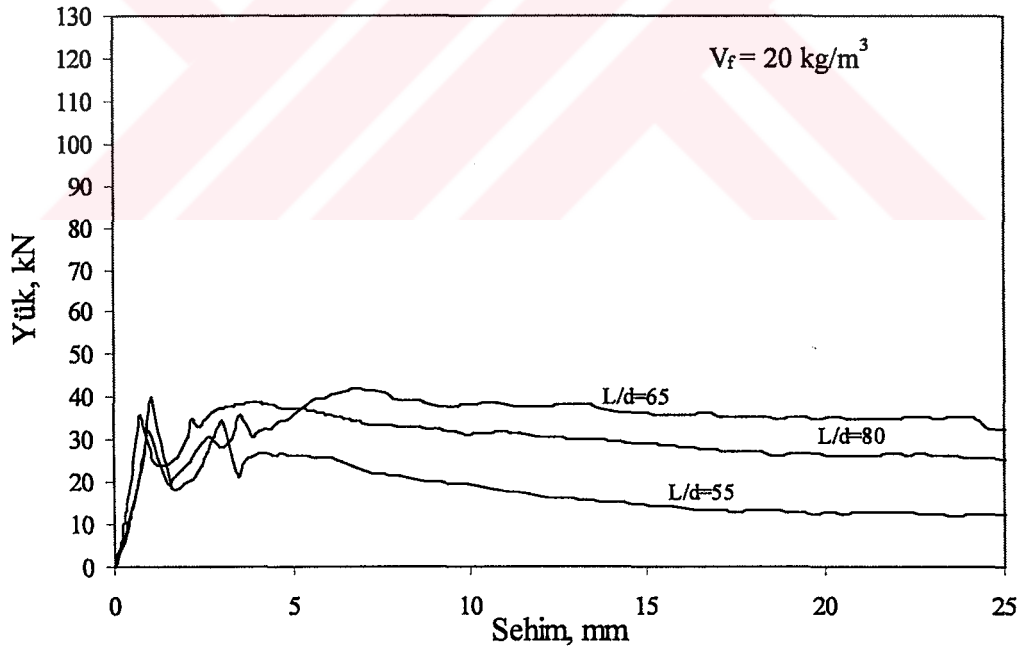
Şekil B.1. Su/imento=0,45 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.



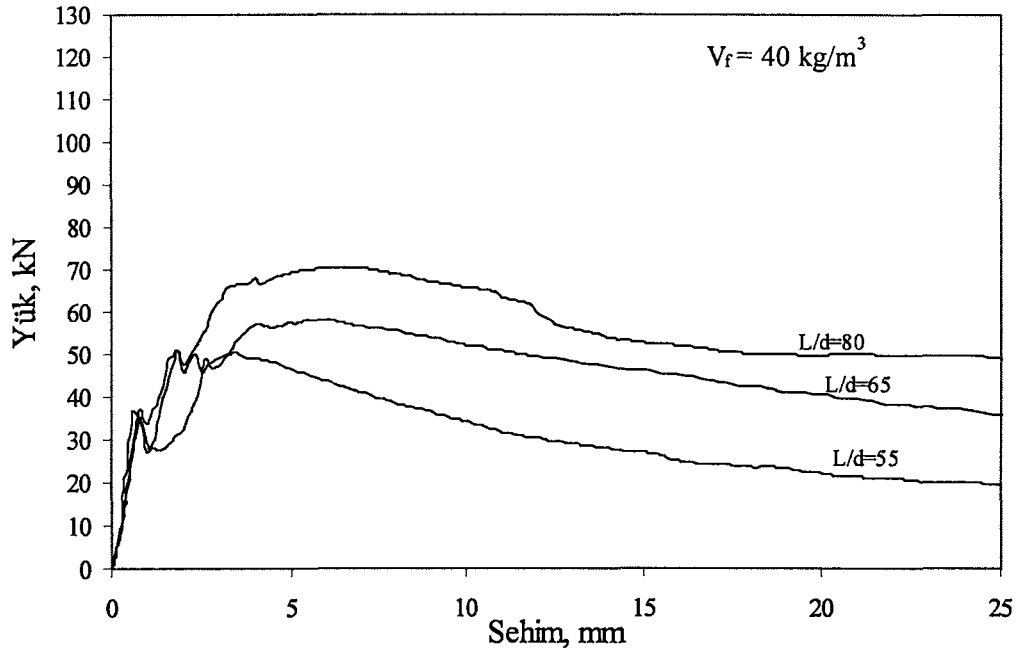
Şekil B.2. Su/imento=0,45 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.



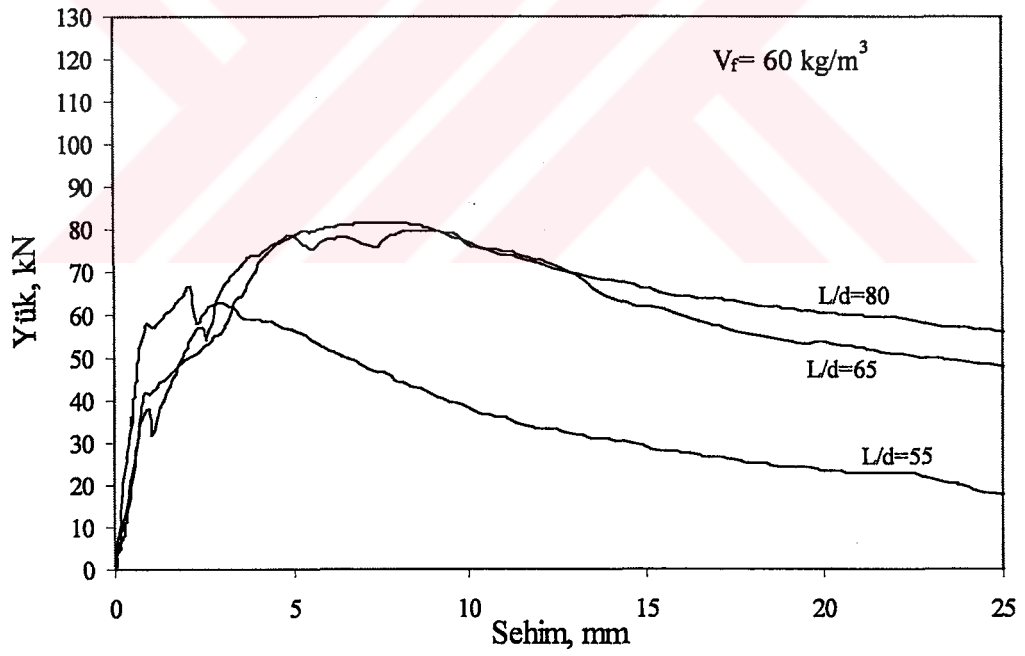
Şekil B.3. Su/çimento=0,45 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.



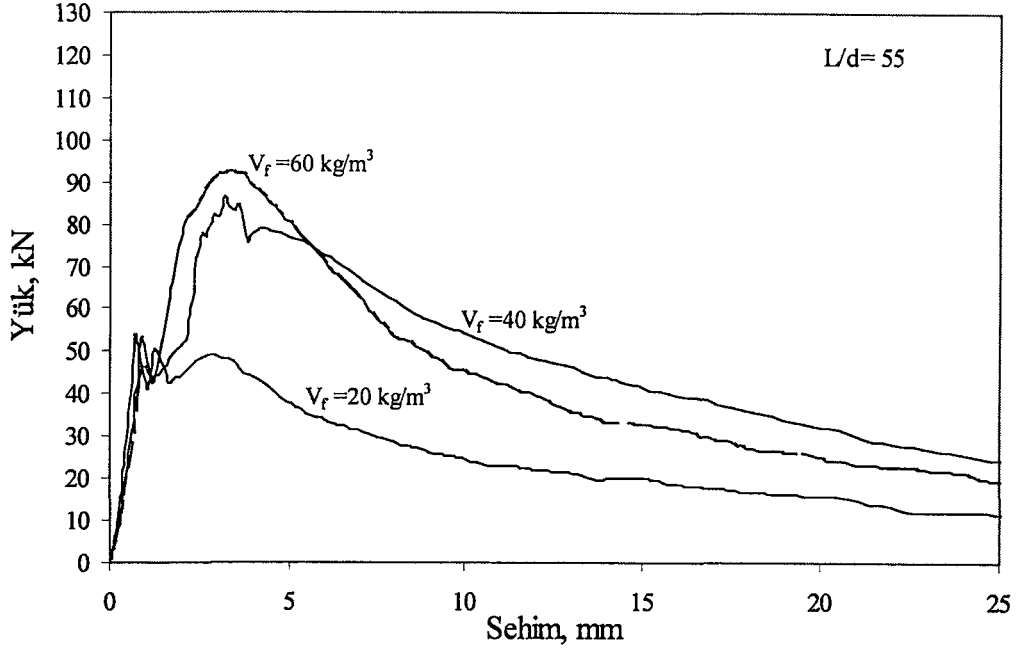
Şekil B.4. Su/çimento=0,70 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.



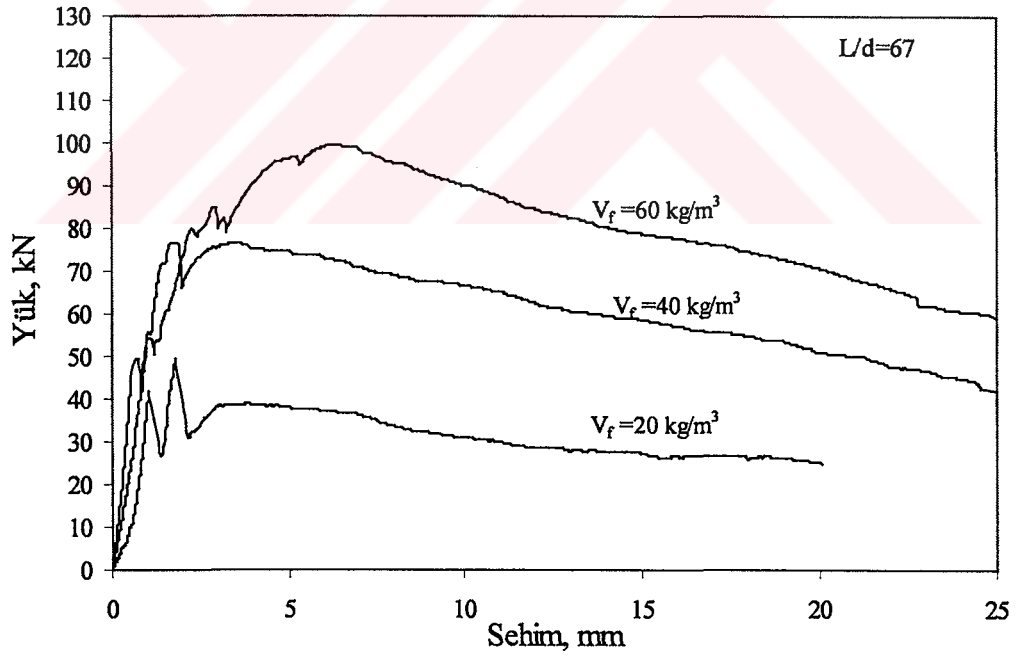
Şekil B.5. Su/çimento=0,70 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.



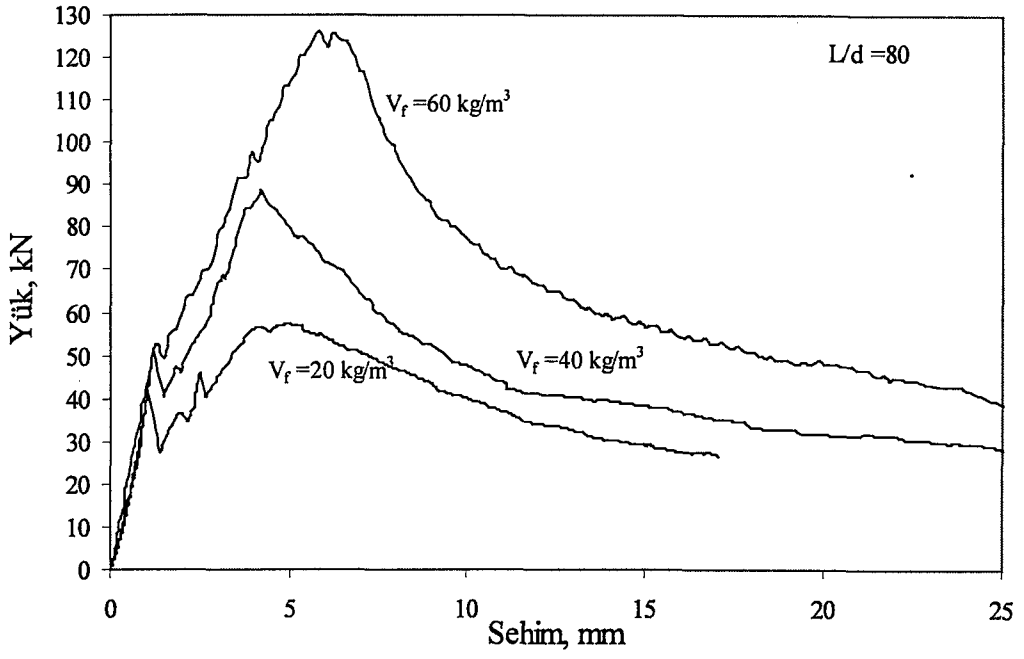
Şekil B.6. Su/çimento=0,70 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrisinde L/d etkisi.



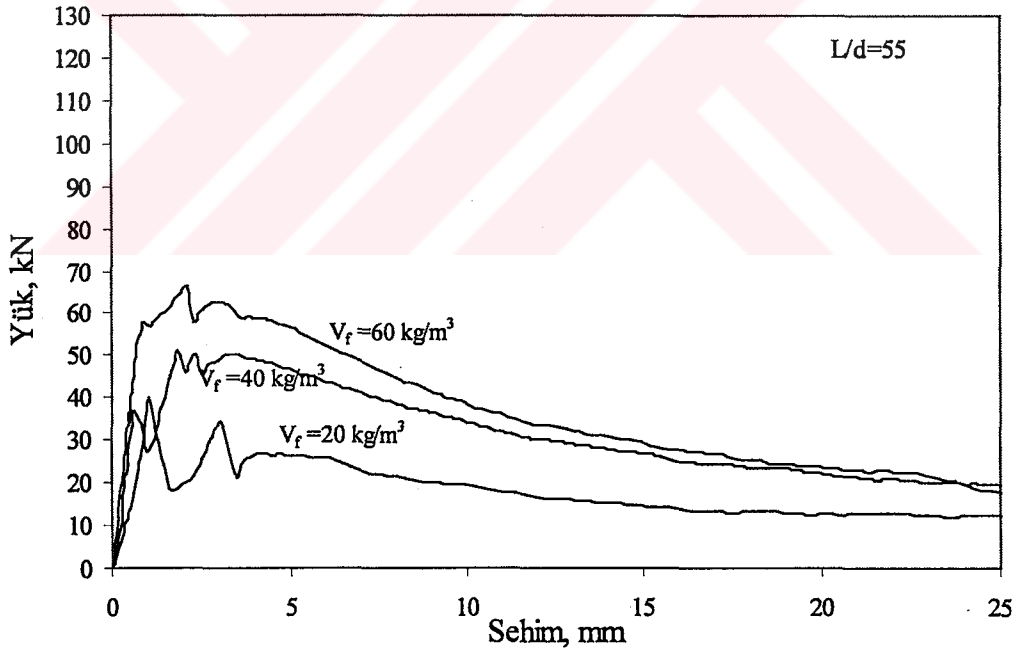
Şekil B.7. Su/çimento=0,45 ve $L/d=55$ için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.



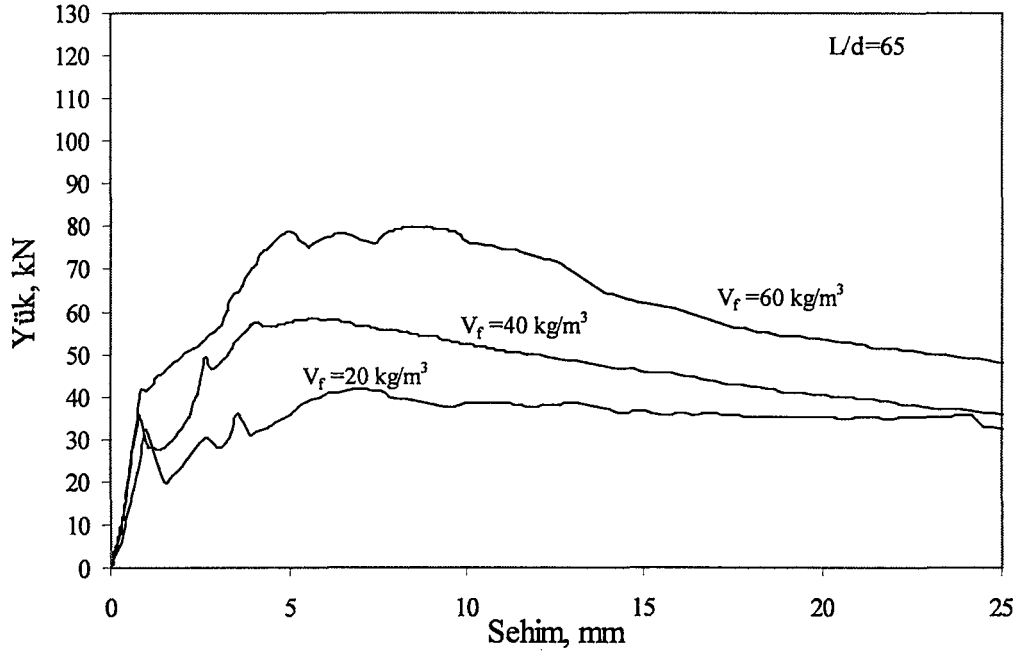
Şekil B.8. Su/çimento=0,45 ve $L/d=65$ için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.



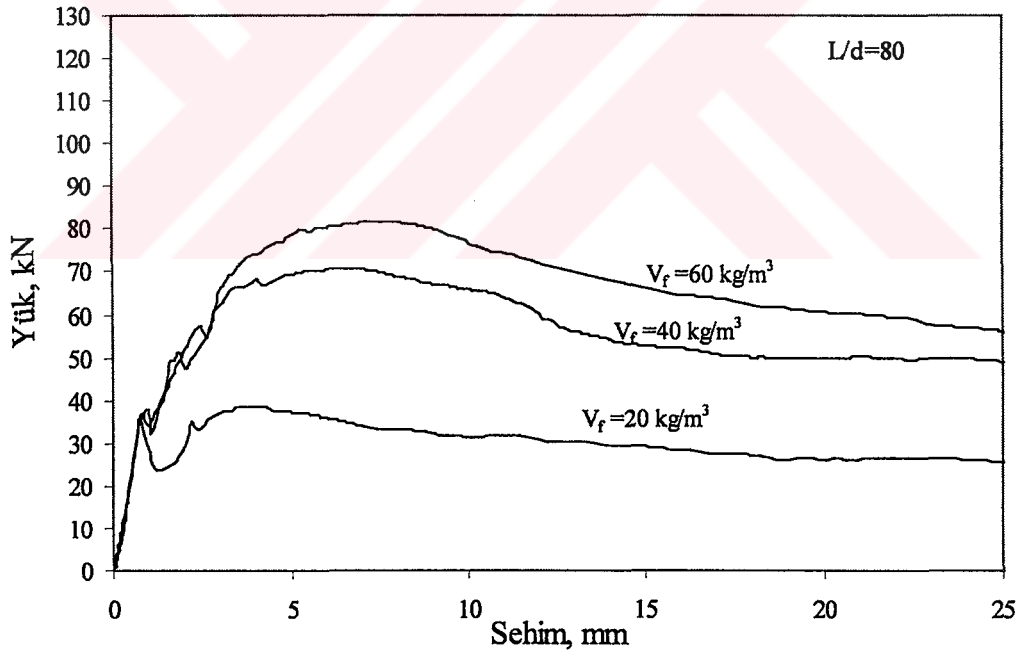
Şekil B.9. Su/çimento=0,45 ve $L/d=80$ için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.



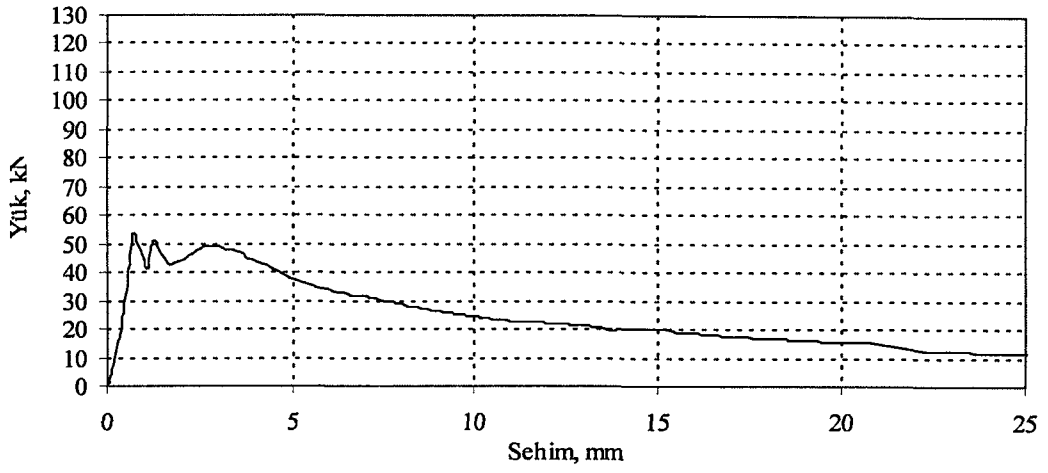
Şekil B.10. Su/çimento=0,70 ve $L/d=55$ için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.



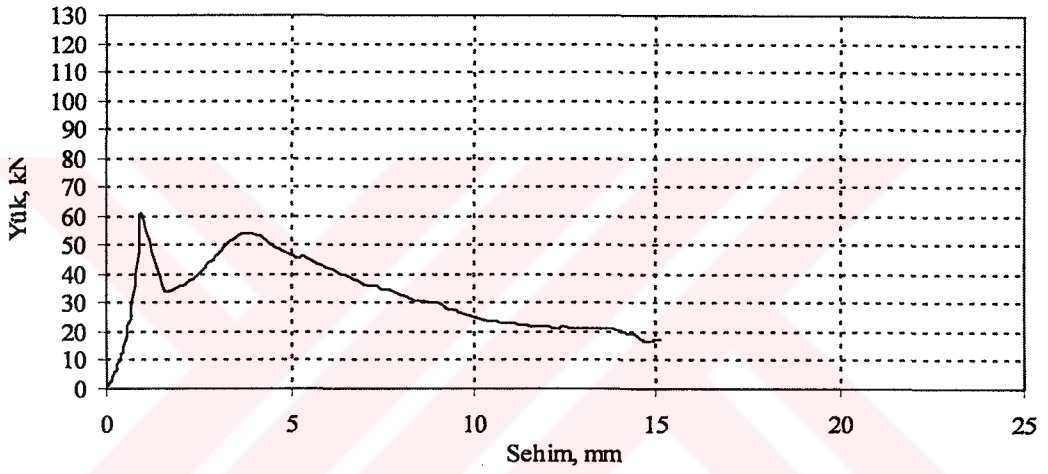
Şekil B.11. Su/çimento=0,70 ve $L/d=65$ için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.



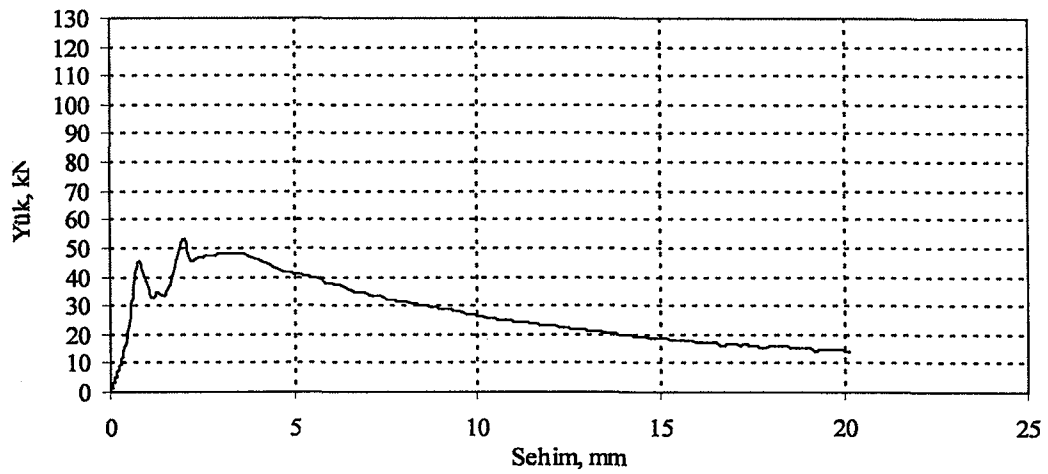
Şekil B.12. Su/çimento=0,70 ve $L/d=80$ için tel içeriğinin yük-sehim eğrisine etkisi.



a) Plak No.1

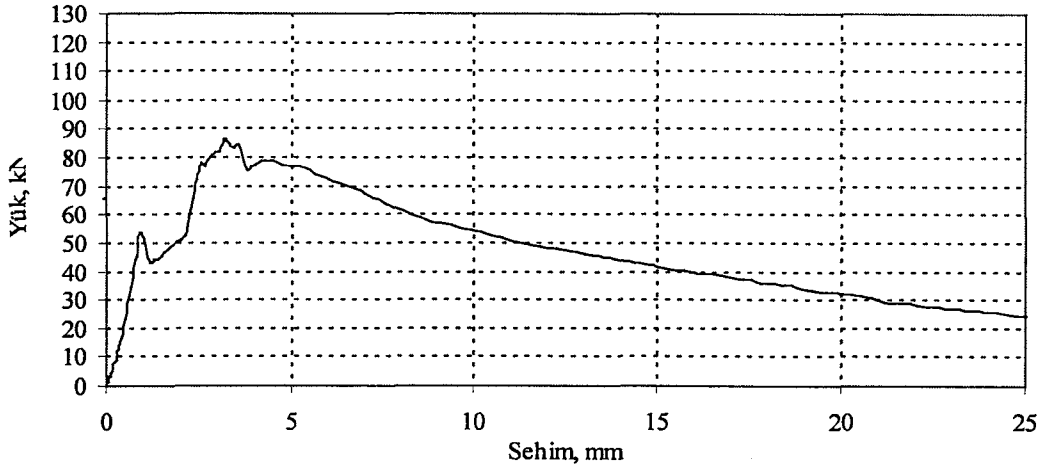


b) Plak No.2

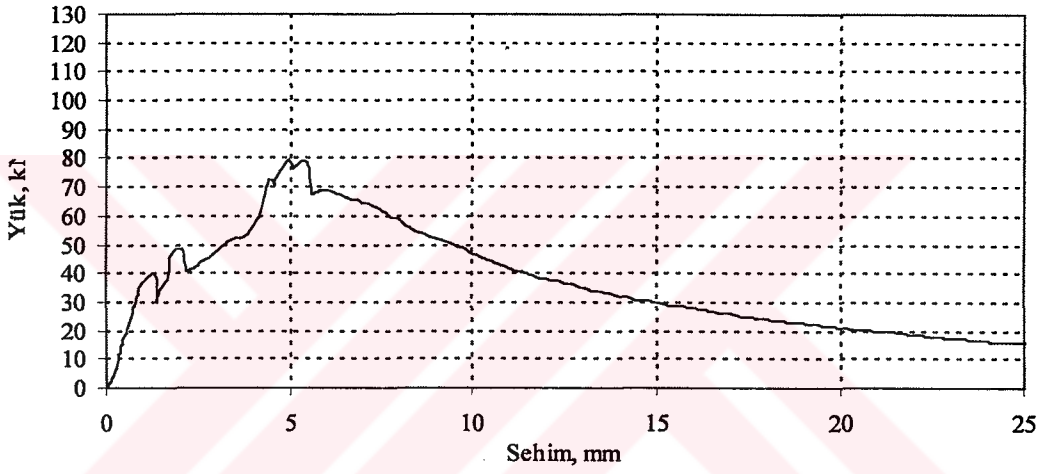


c) Plak No.3

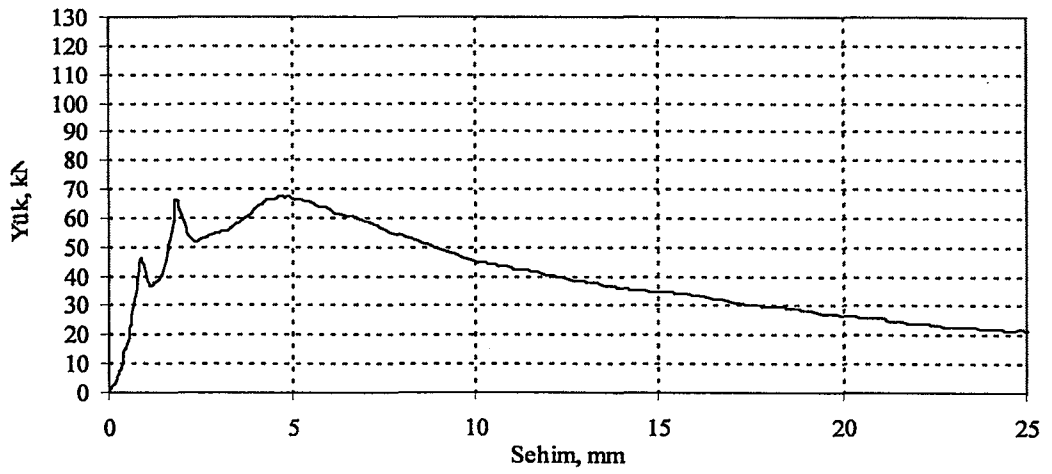
Şekil B.13. Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

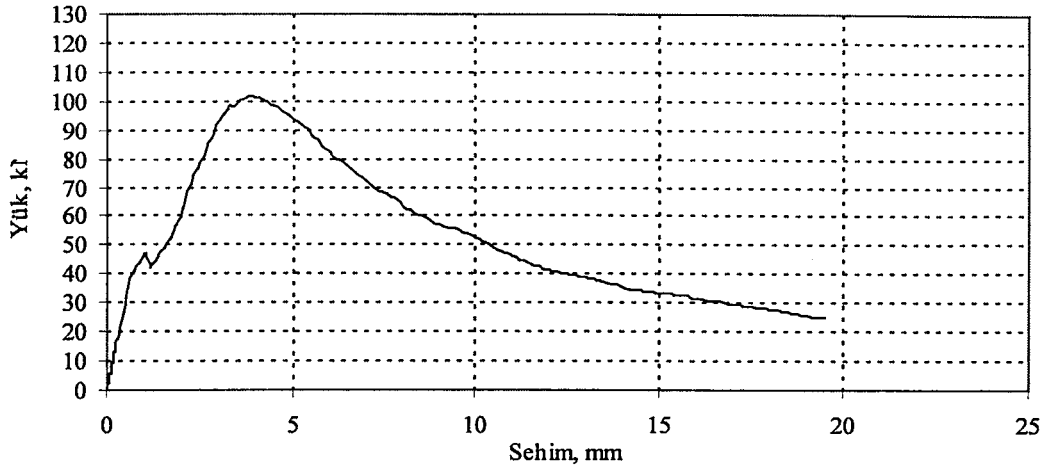


b) Plak No.2

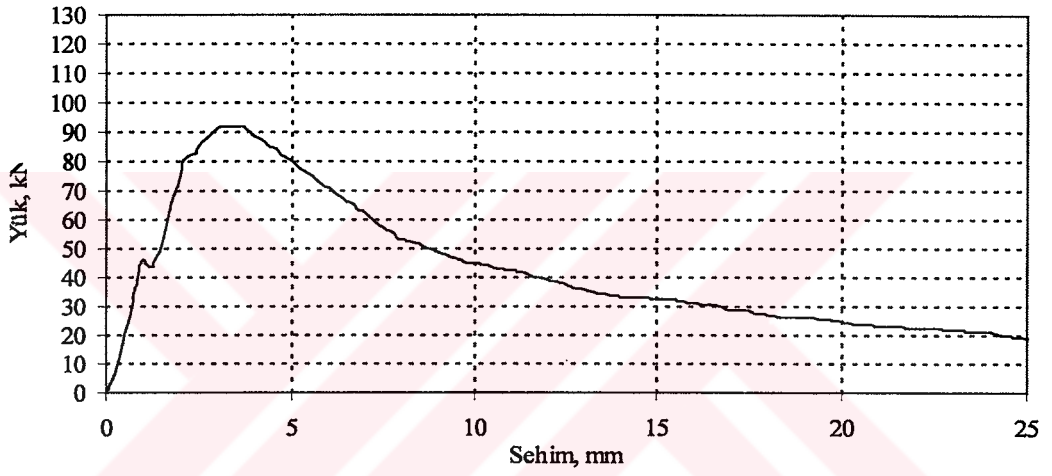


c) Plak No.3

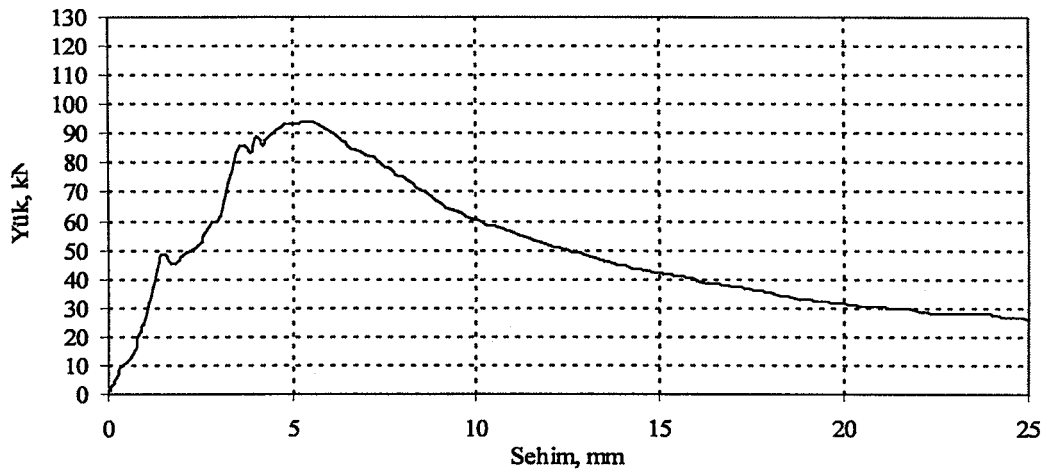
Şekil B.14. Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

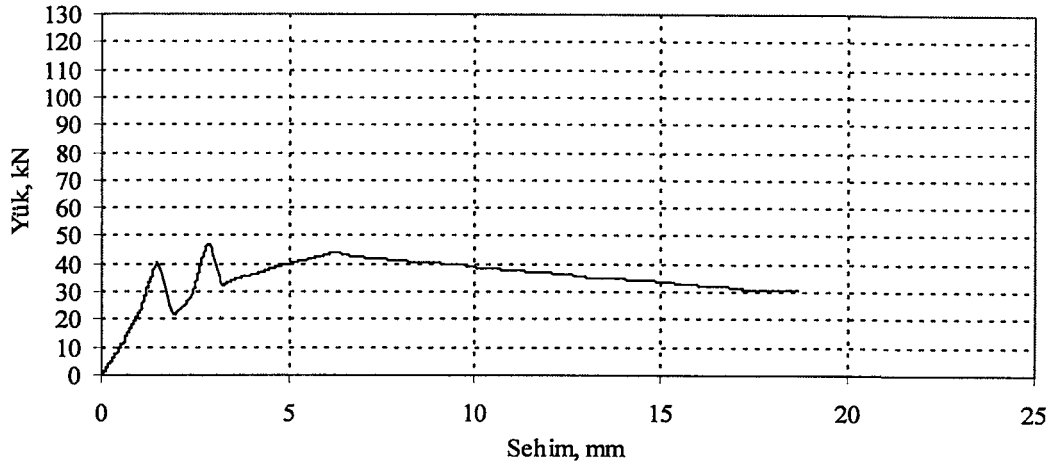


b) Plak No.2

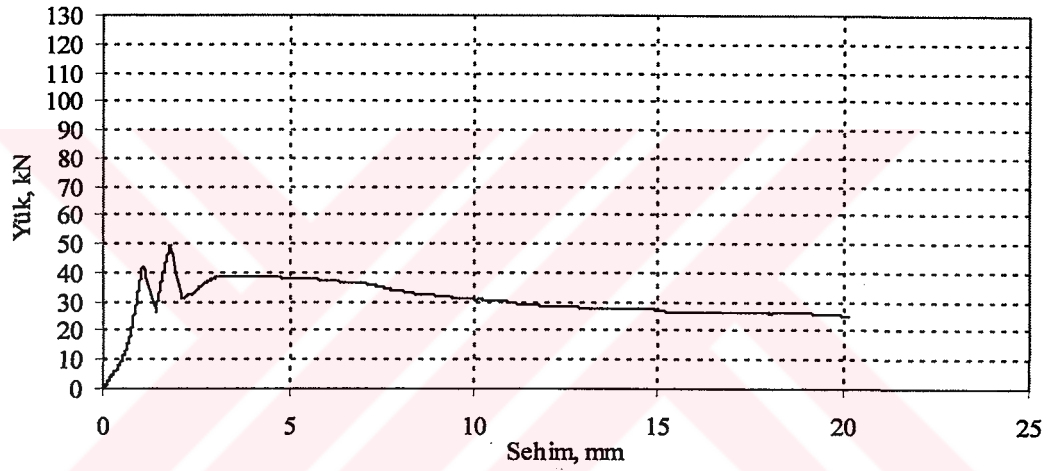


c) Plak No.3

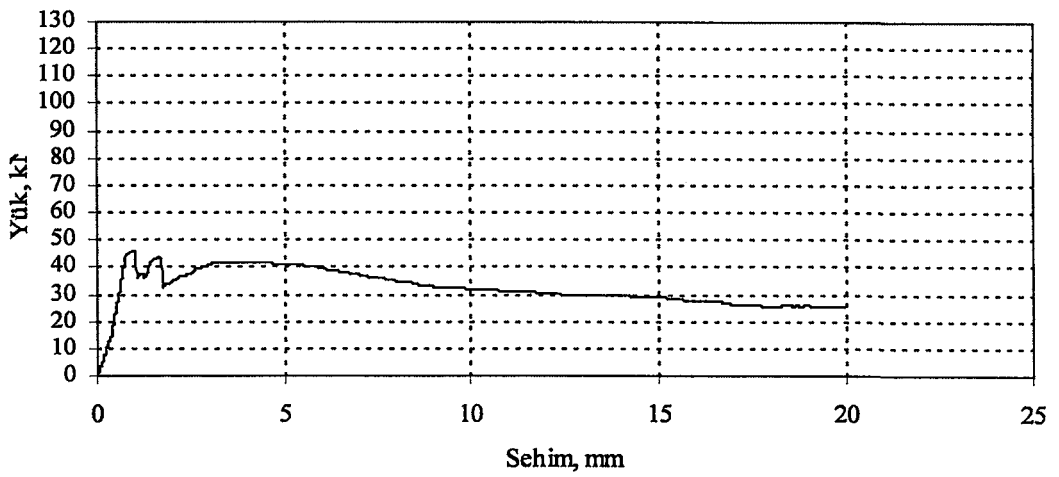
Şekil B.15. Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

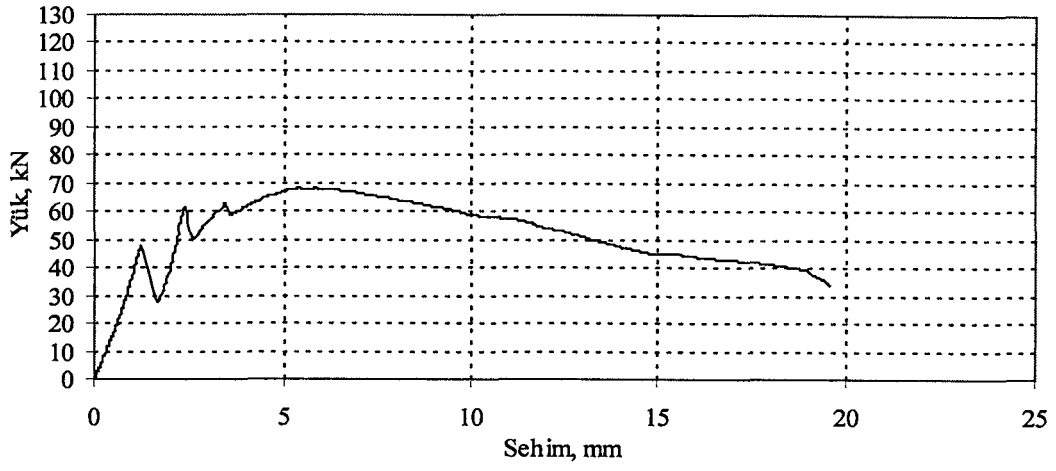


b) Plak No.2

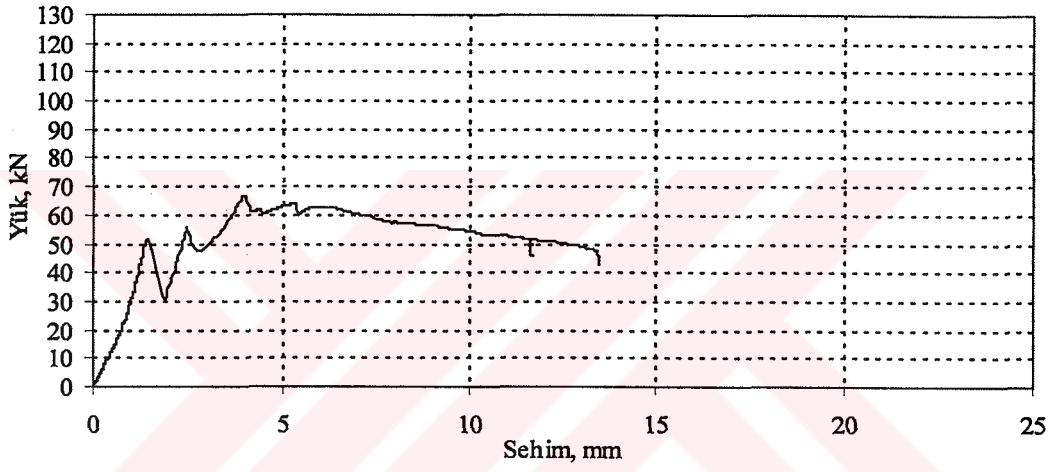


c) Plak No.3

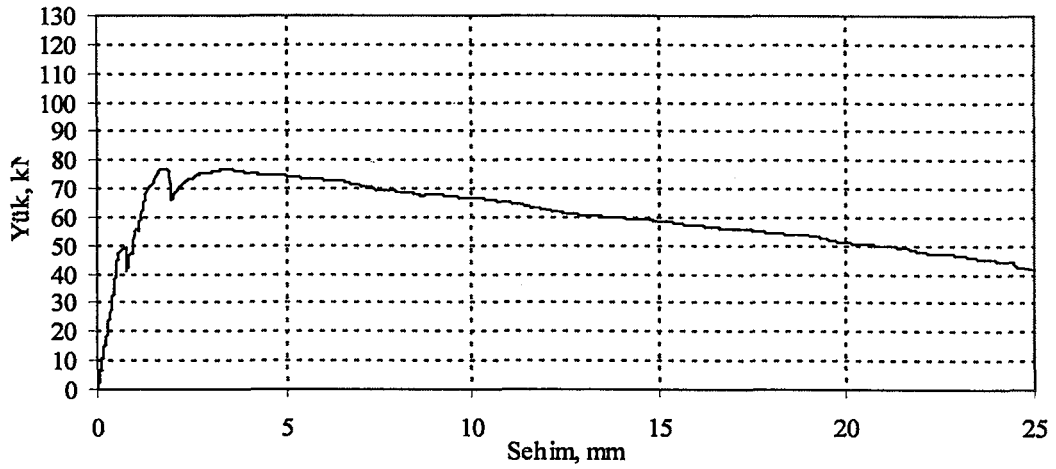
Şekil B.16. Su/çimento=0,45, L/d=65 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

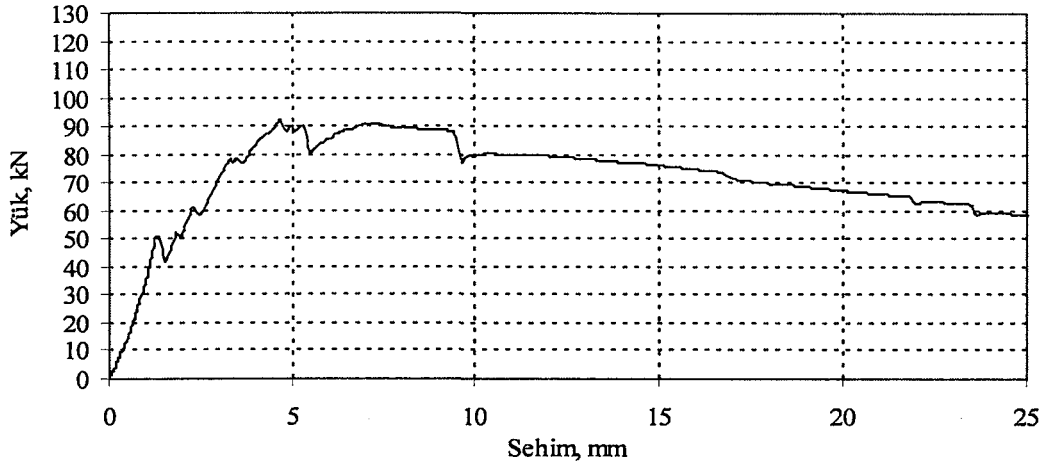


b) Plak No.2

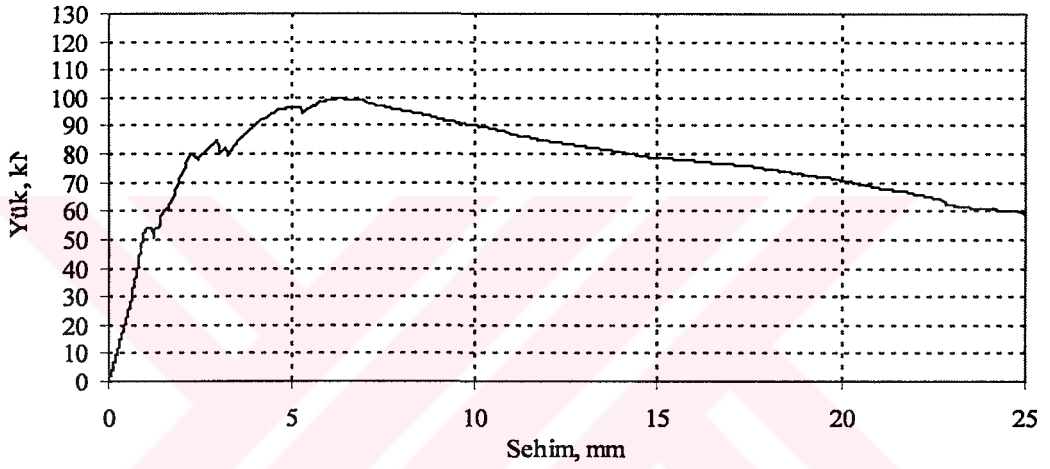


c) Plak No.3

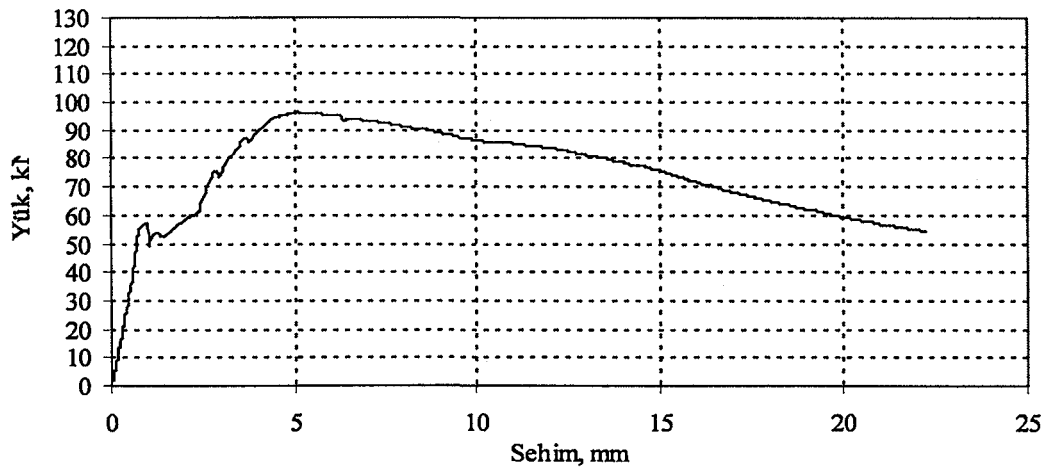
Şekil B.17. Su/çimento=0,45, L/d=65 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

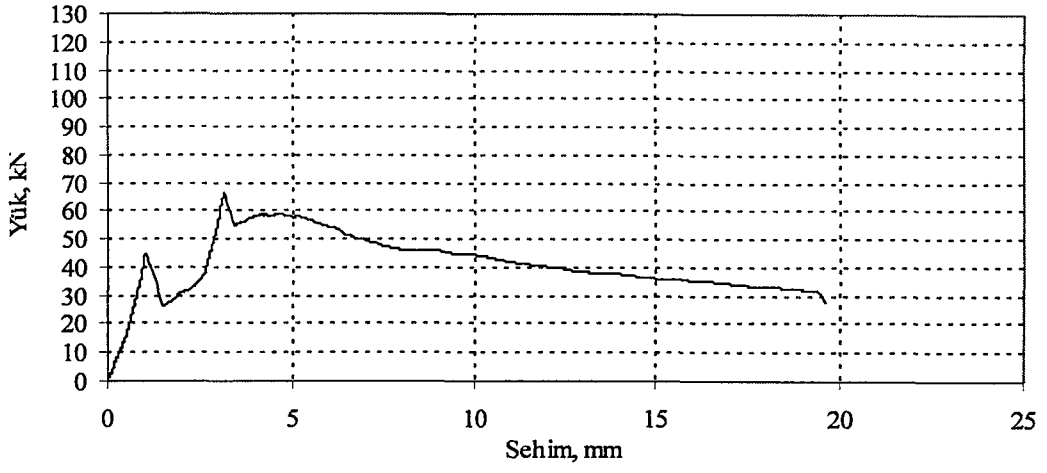


b) Plak No.2

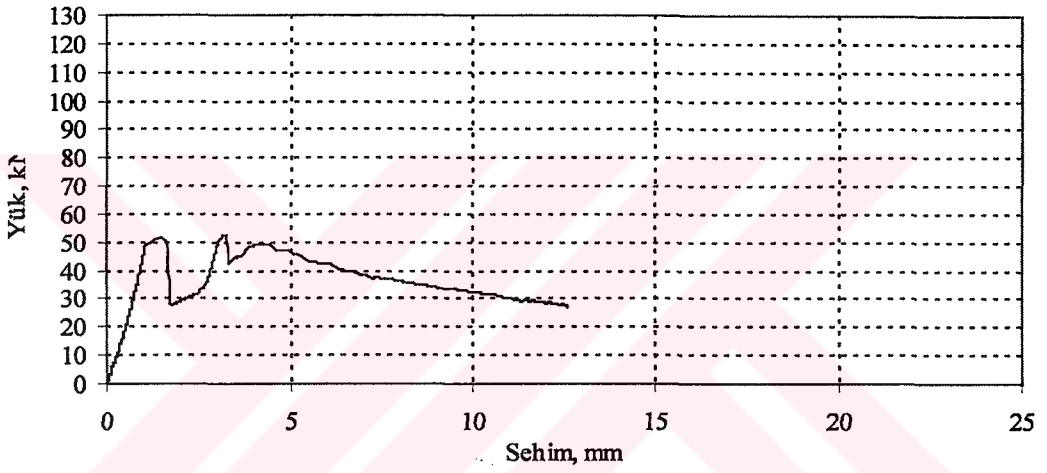


c) Plak No.3

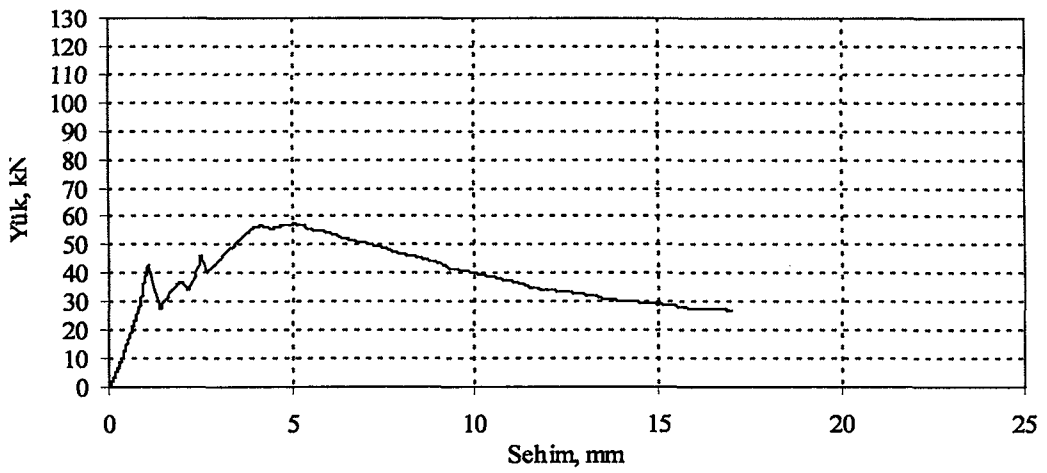
Şekil B.18. Su/çimento=0,45, L/d=65 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

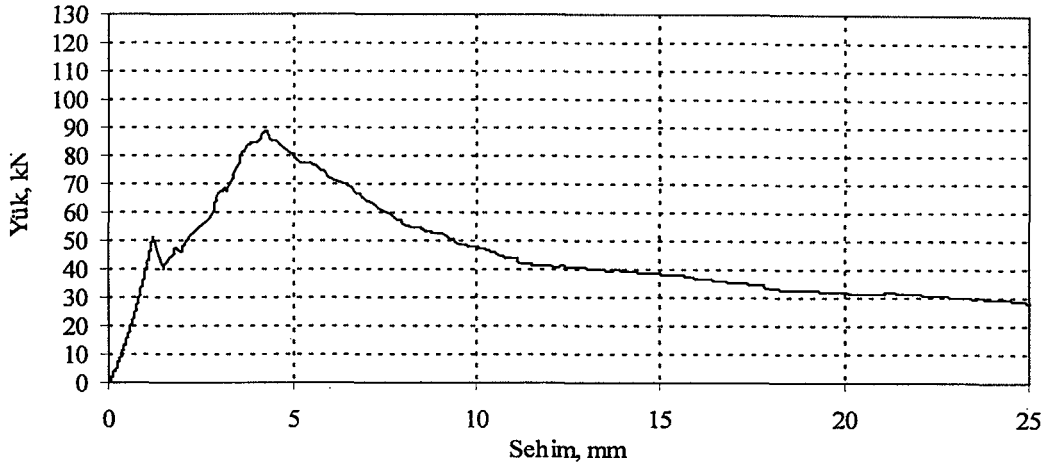


b) Plak No.2

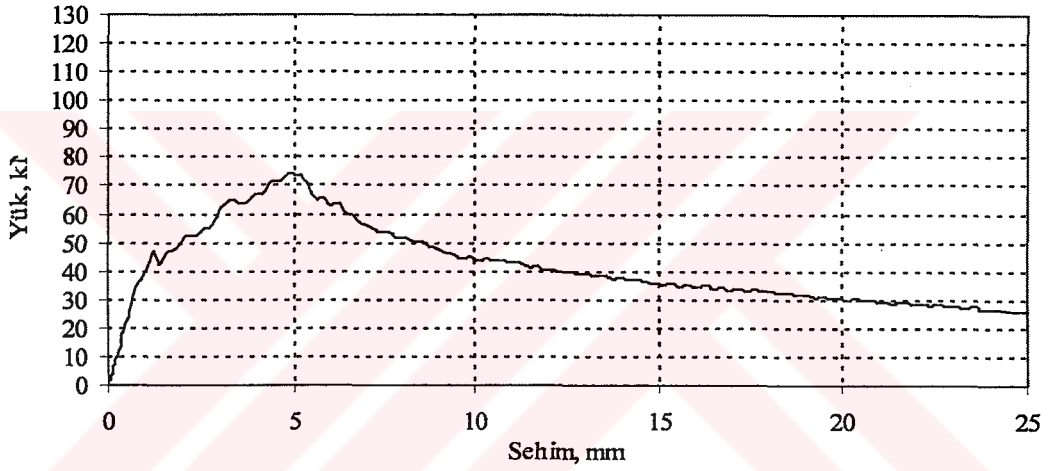


c) Plak No.3

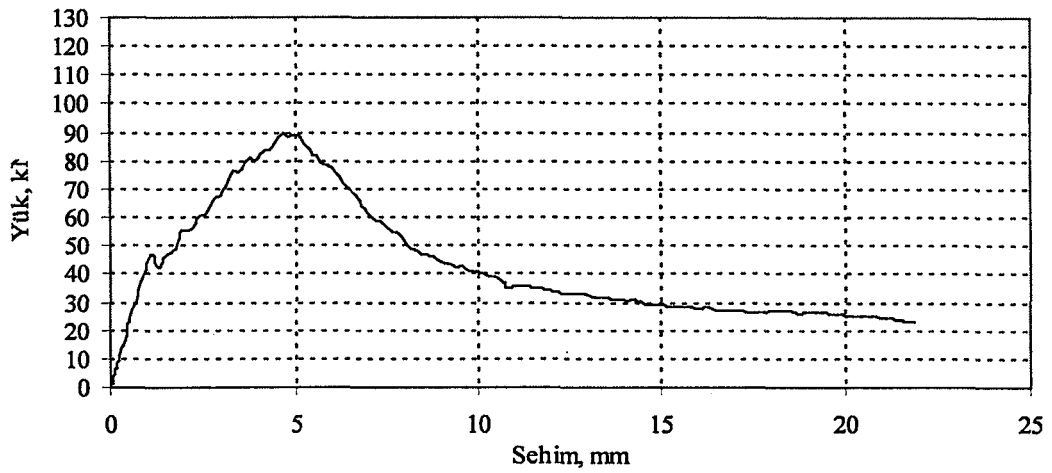
Şekil B.19. Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

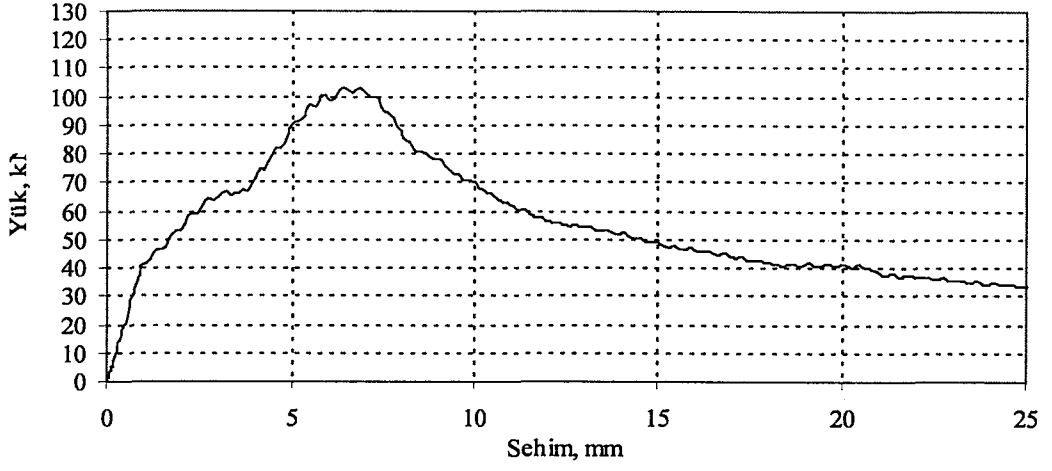


b) Plak No.2



c) Plak No.3

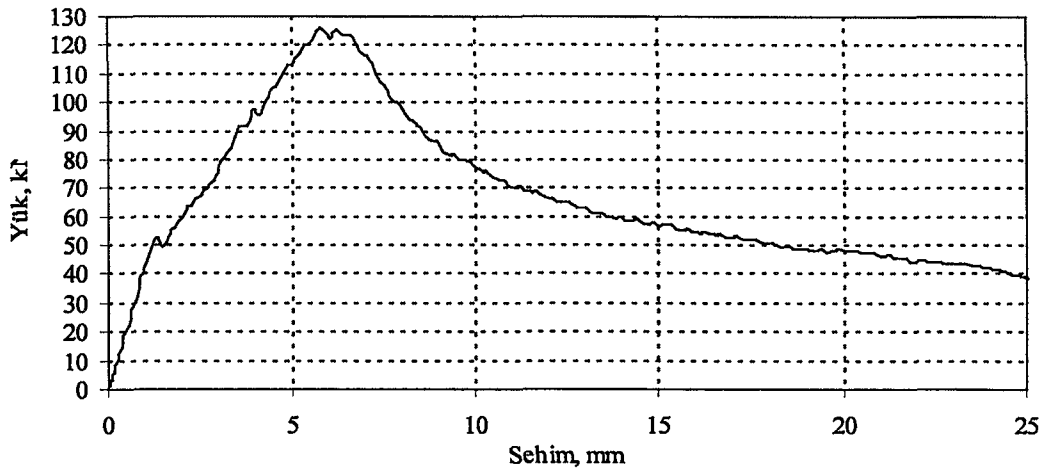
Şekil B.20. Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

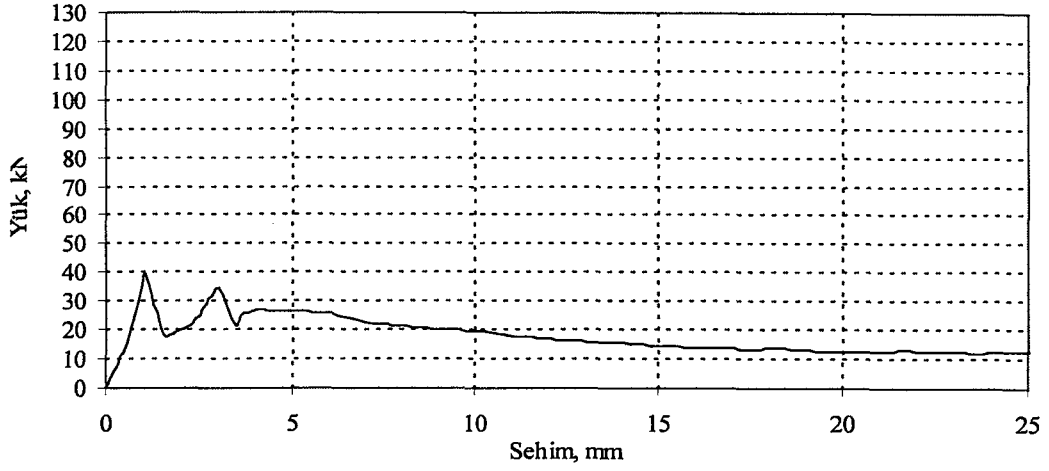


b) Plak No.2

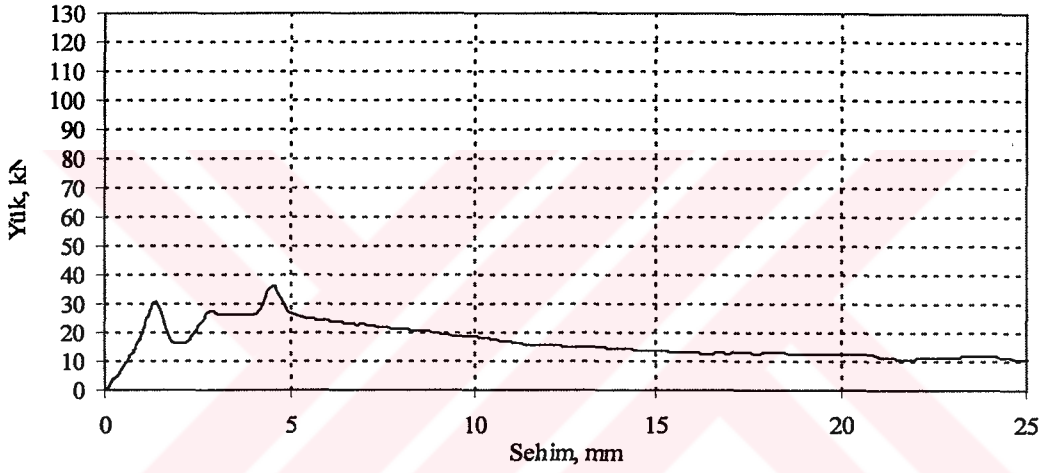


c) Plak No.3

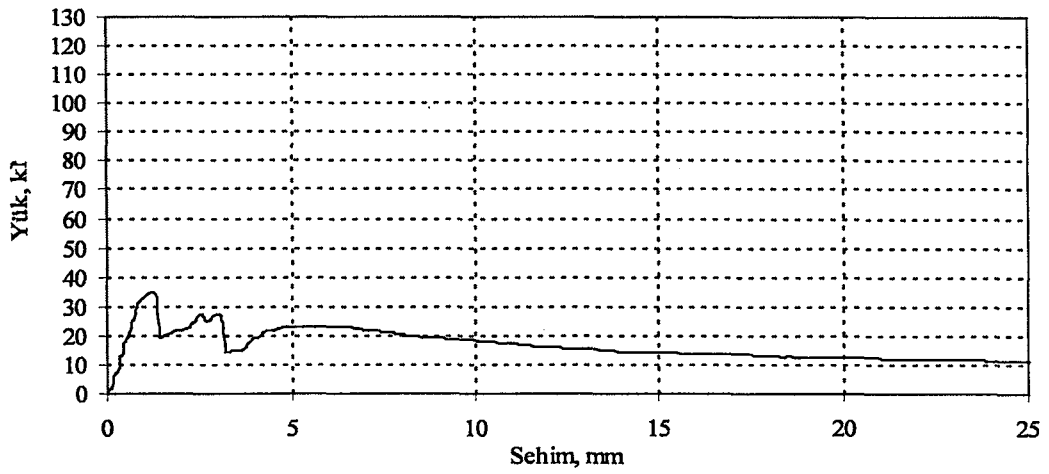
Şekil B.21. Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

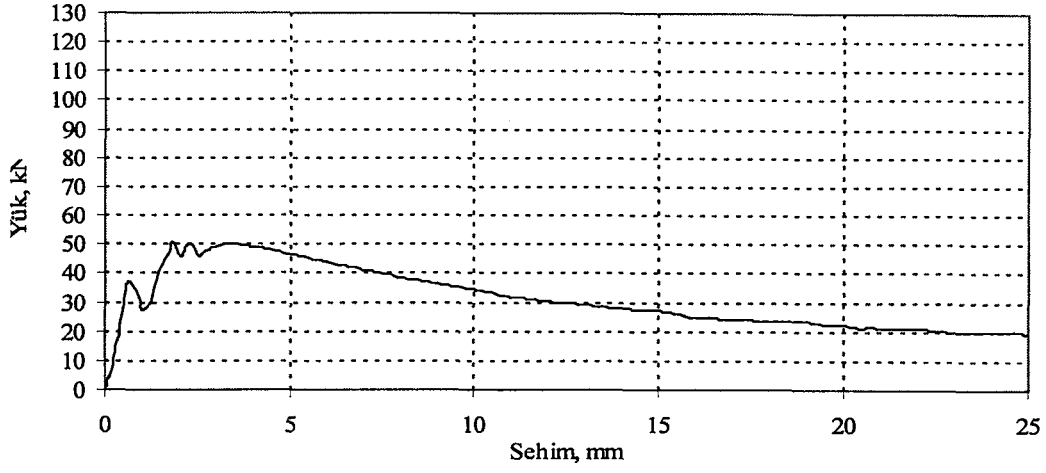


b) Plak No.2

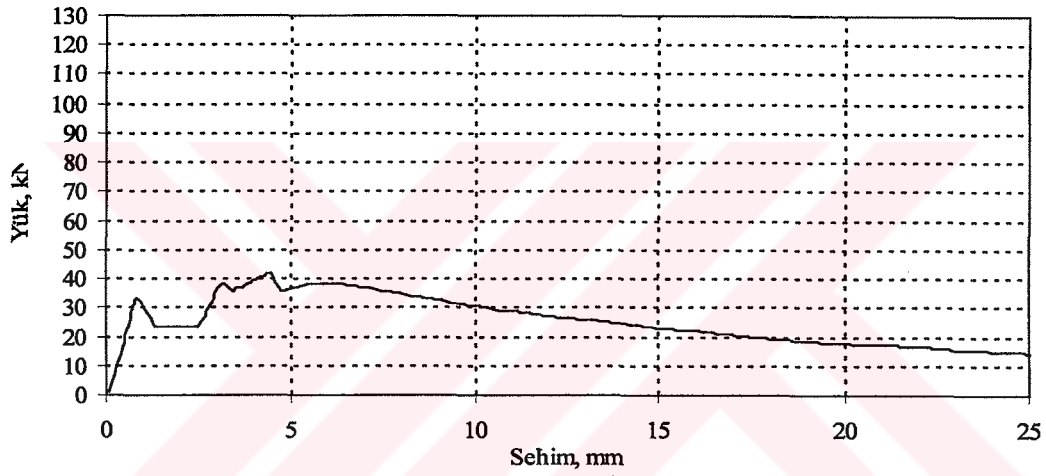


c) Plak No.3

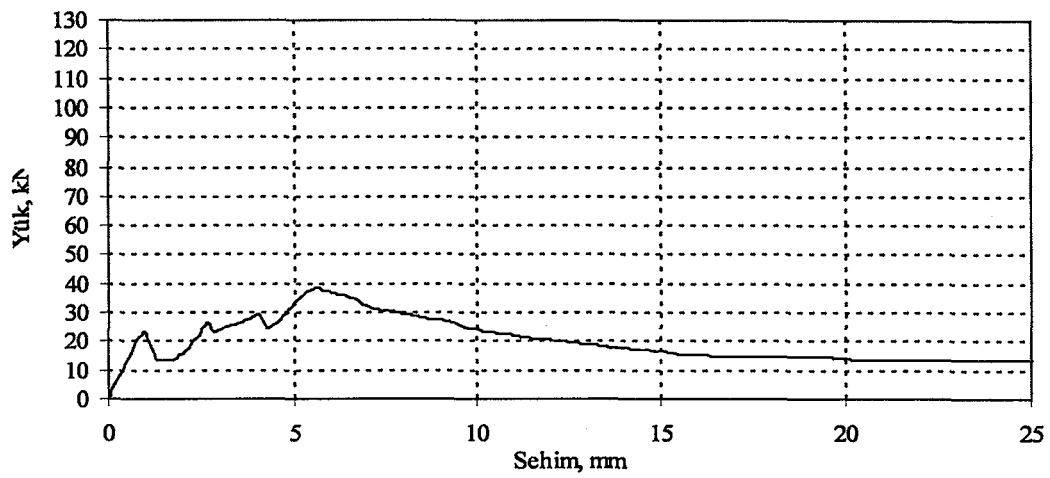
Şekil B.22. Su/çimento=0,70, $L/d=55$ ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

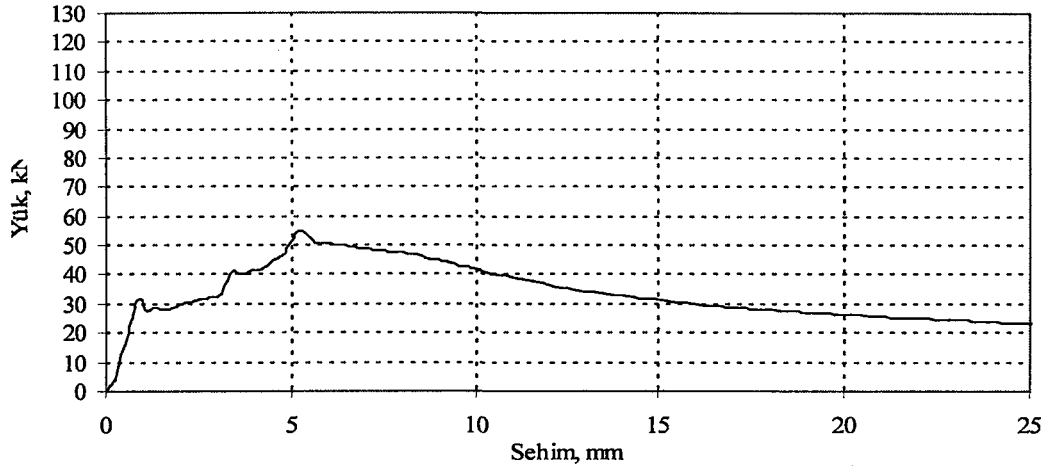


b) Plak No.2

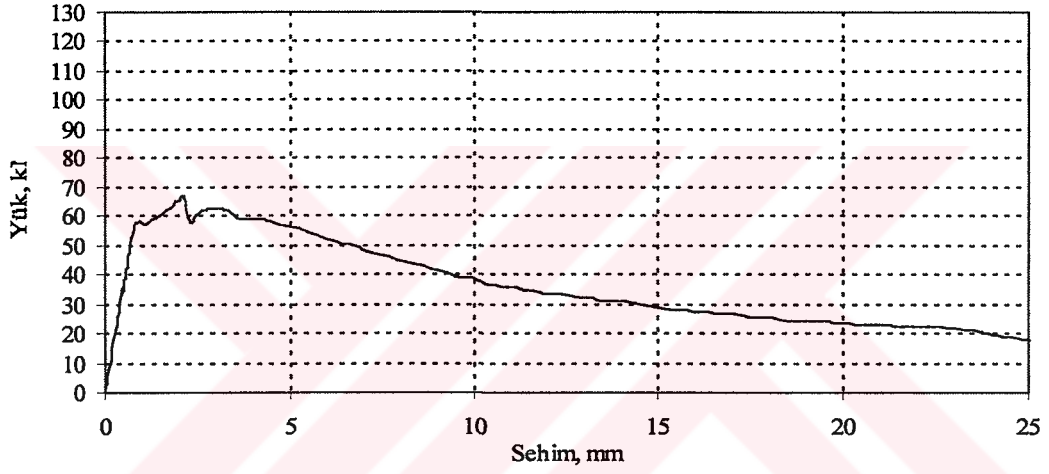


c) Plak No.3

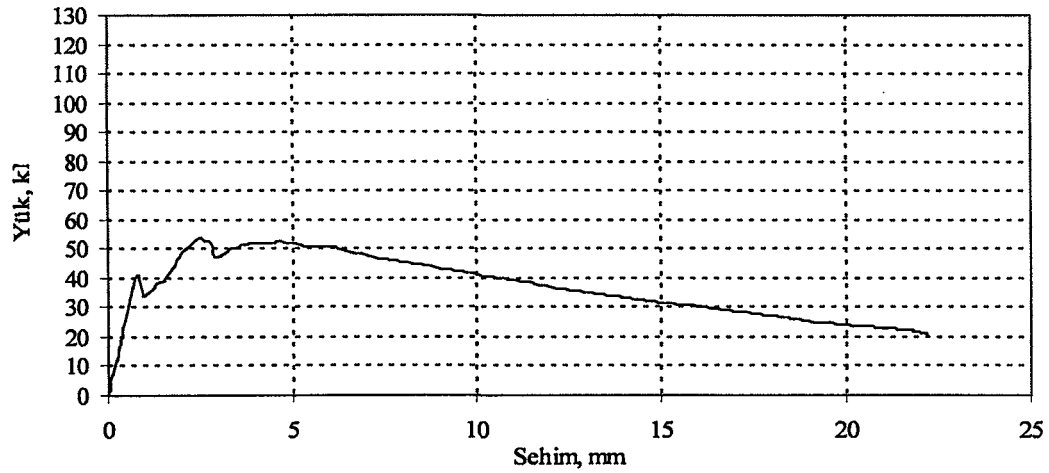
Şekil B.23. Su/çimento=0,70, L/d=55 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

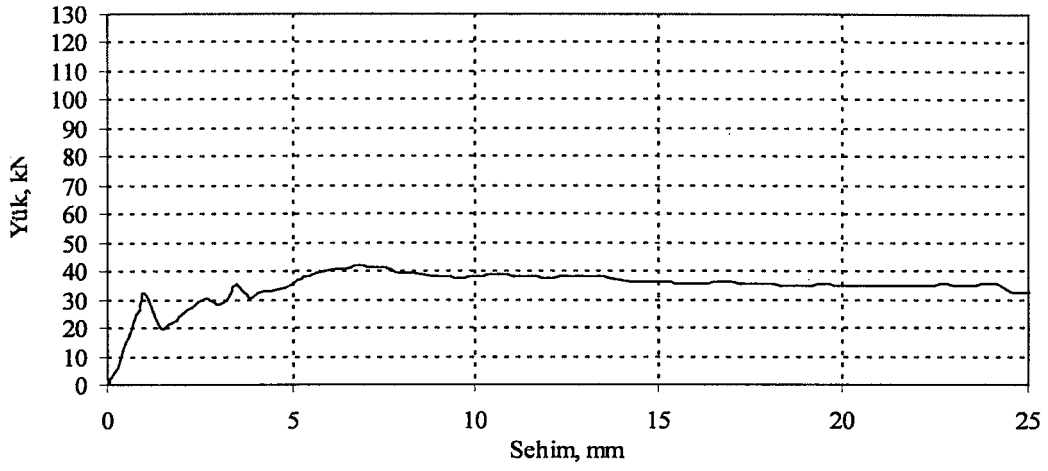


b) Plak No.2

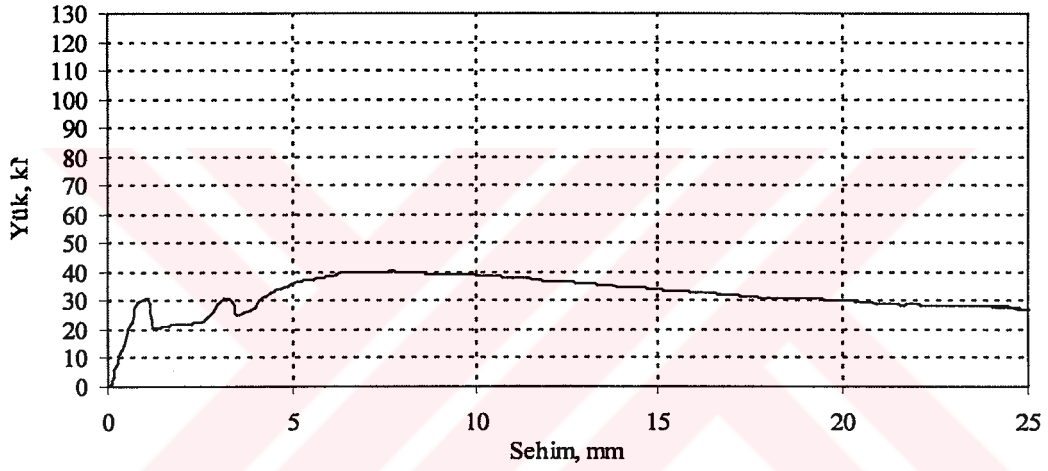


c) Plak No.3

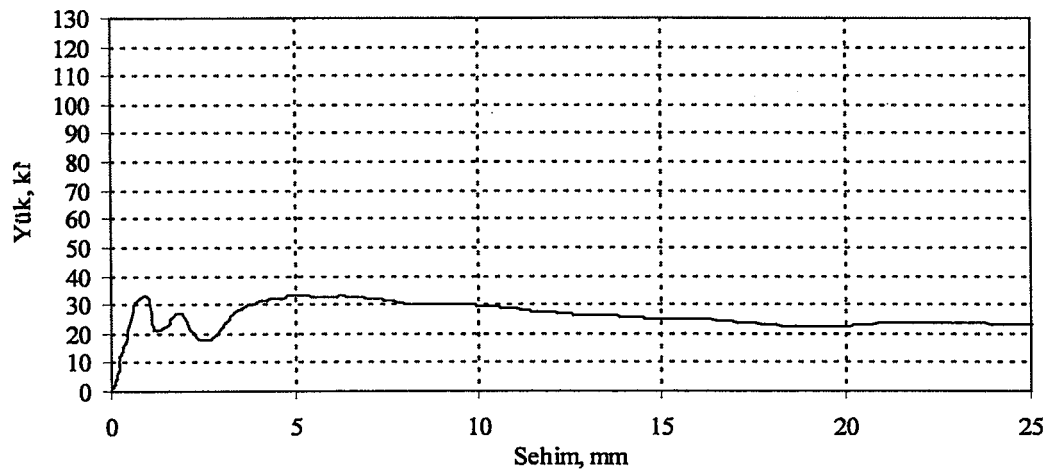
Şekil B.24. Su/çimento=0,70, L/d=55 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

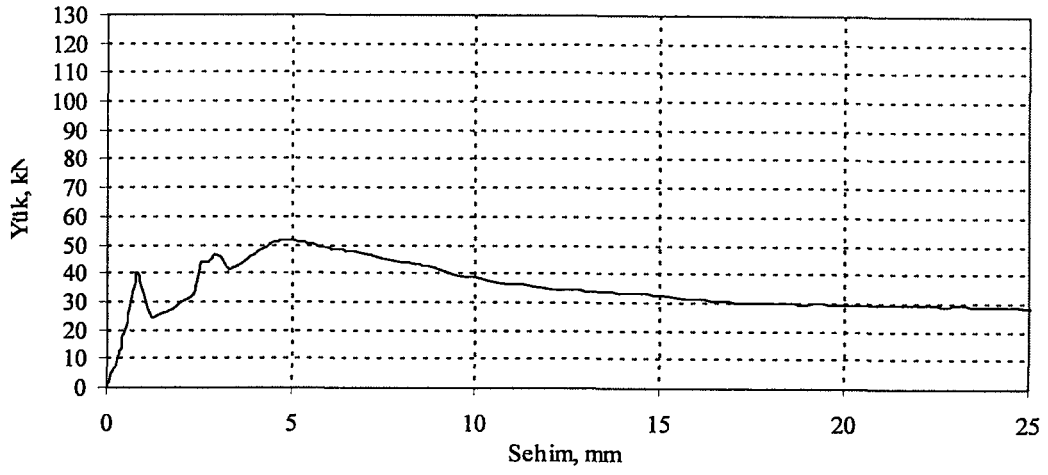


b) Plak No.2

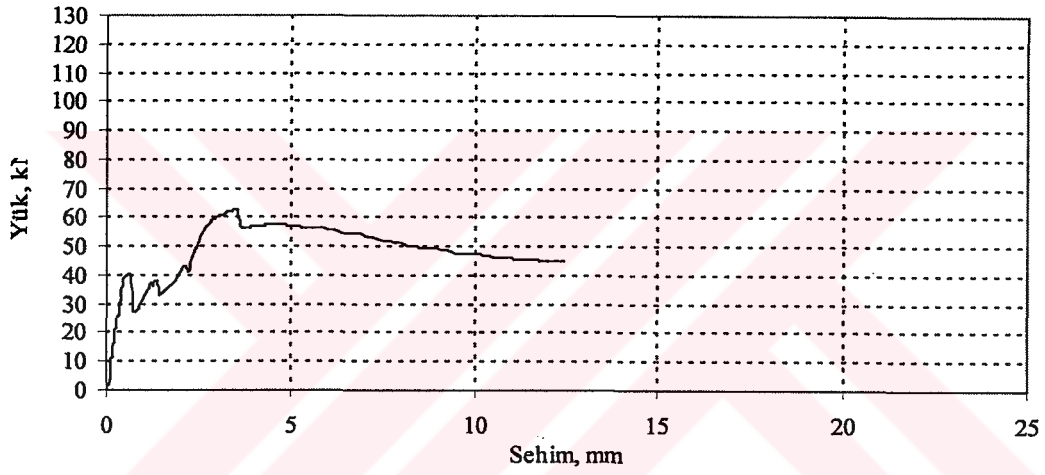


c) Plak No.3

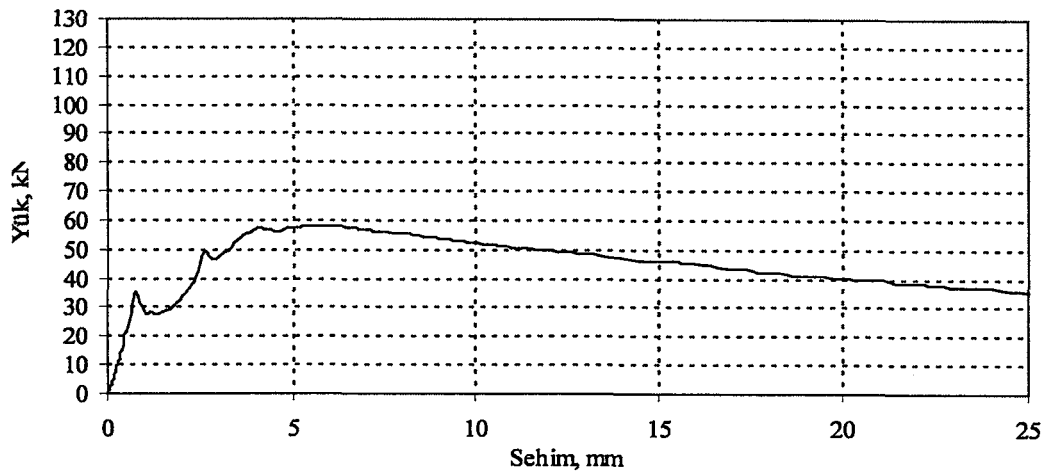
Şekil B.25. Su/çimento=0,70, $L/d=65$ ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

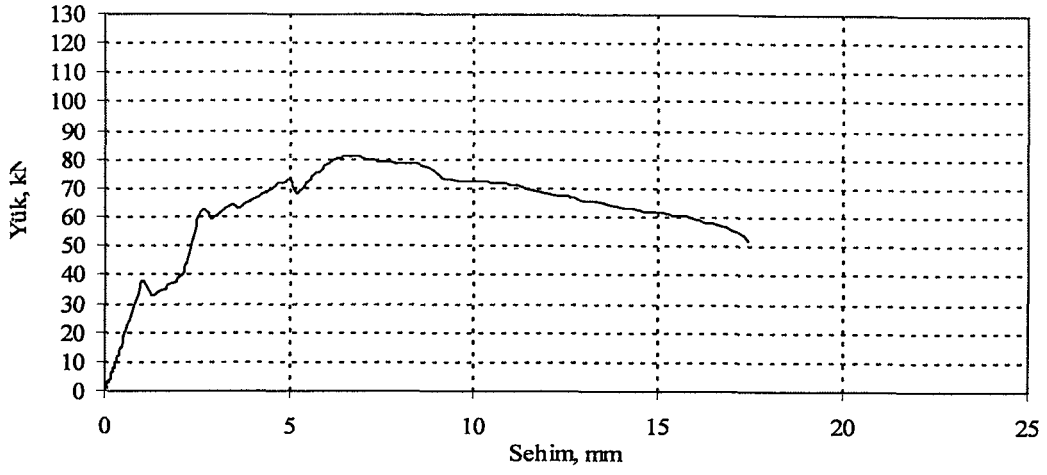


b) Plak No.2

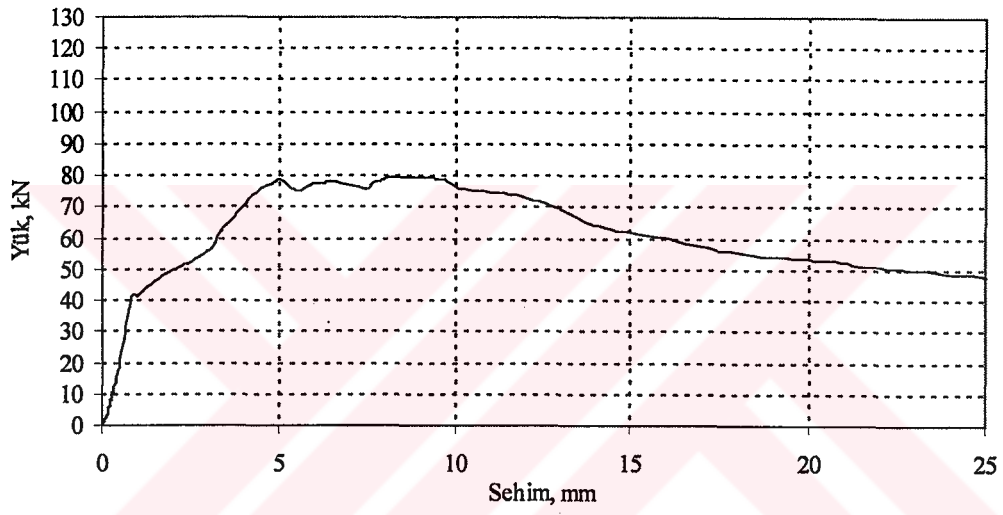


c) Plak No.3

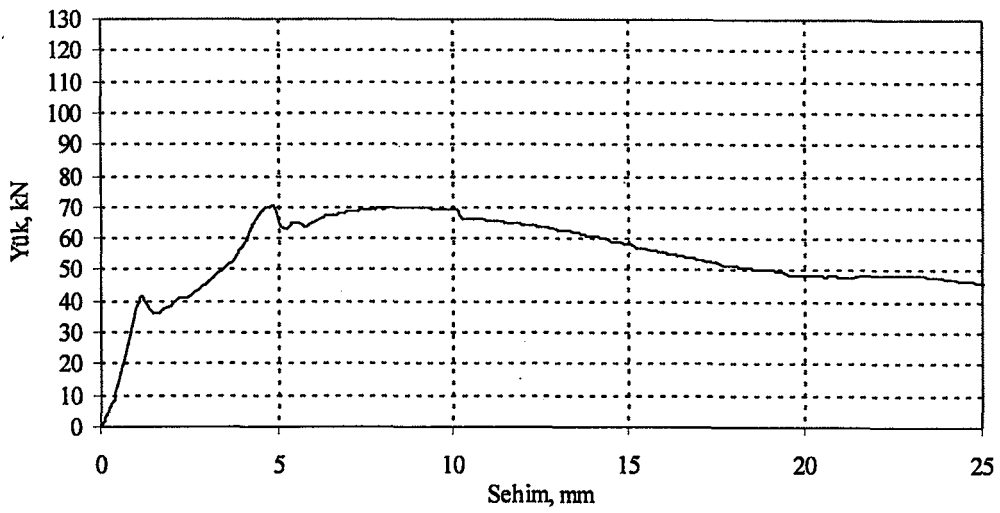
Şekil B.26. Su/çimento=0,70, L/d=65 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

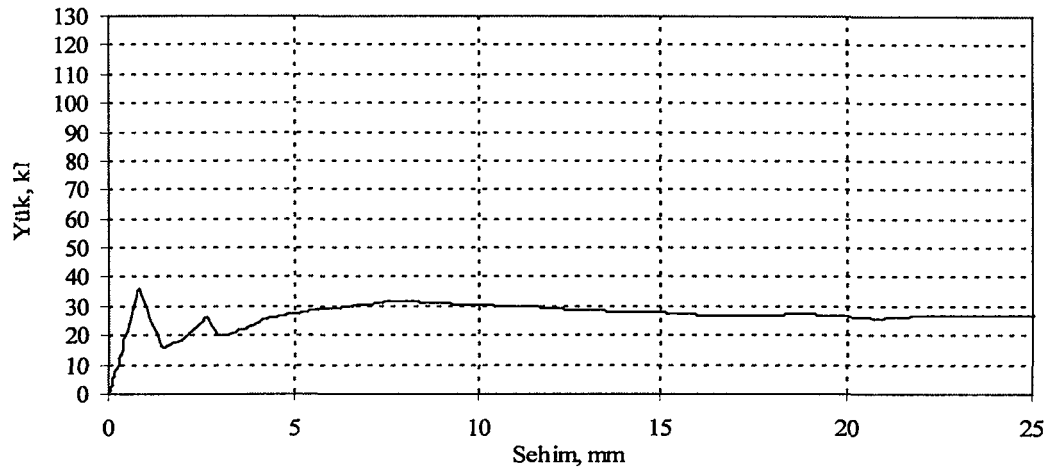


b) Plak No.2

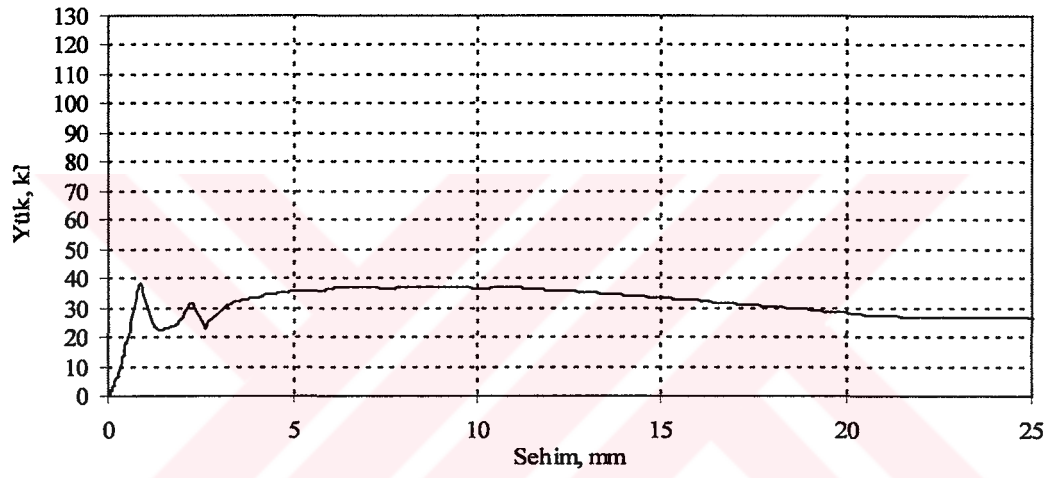


c) Plak No.3

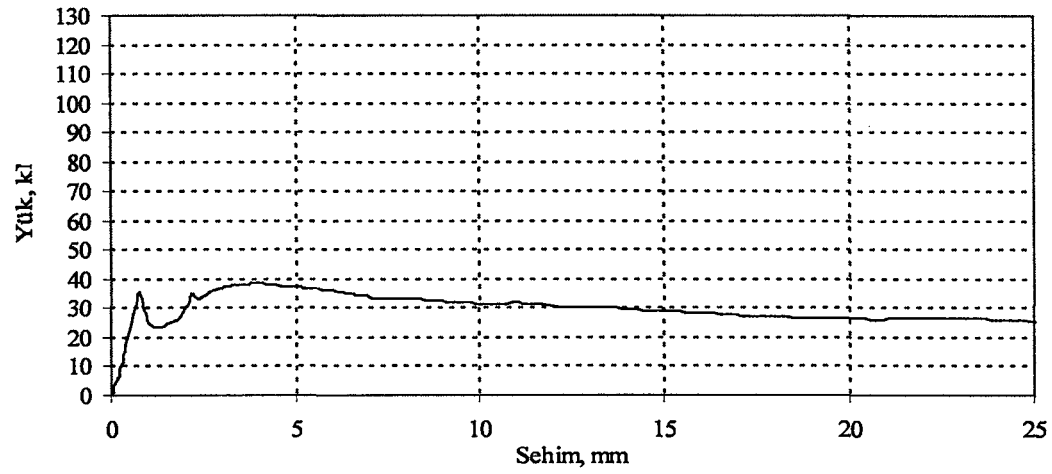
Şekil B.27. Su/çimento=0,70, L/d=65 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

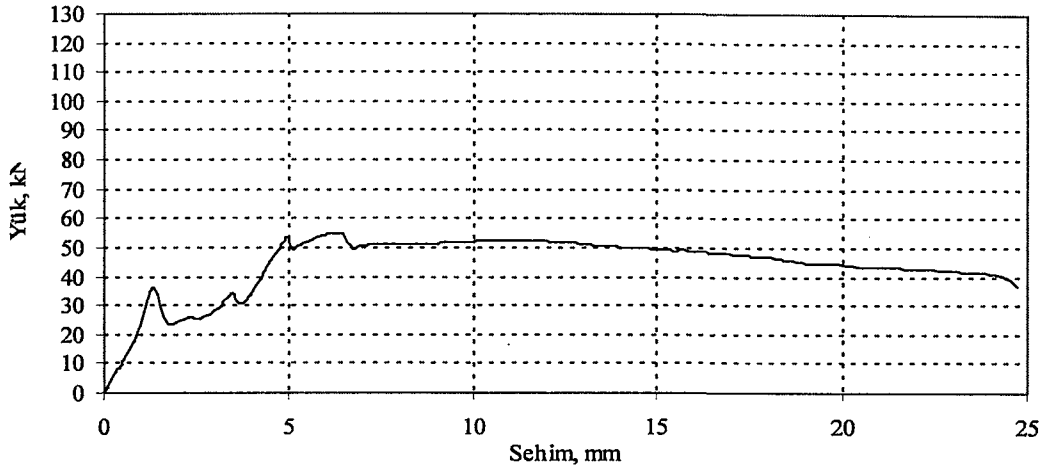


b) Plak No.2

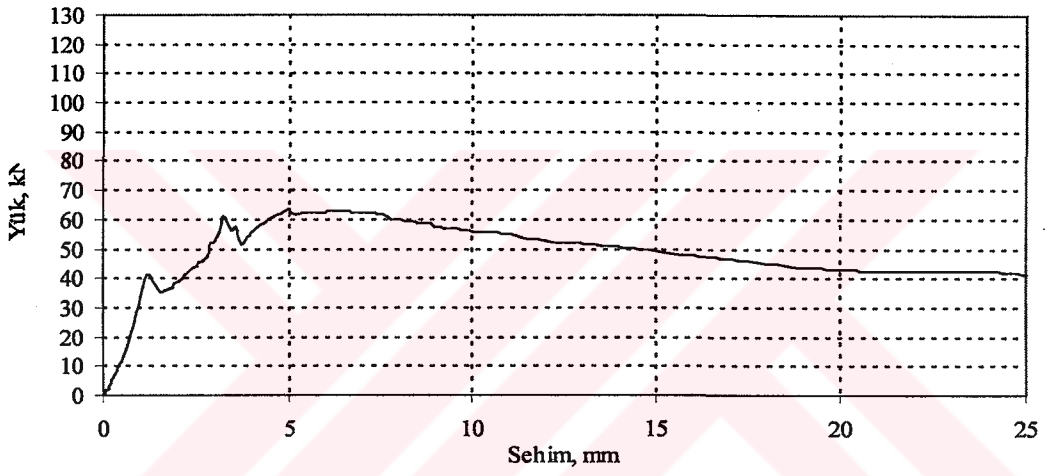


c) Plak No.3

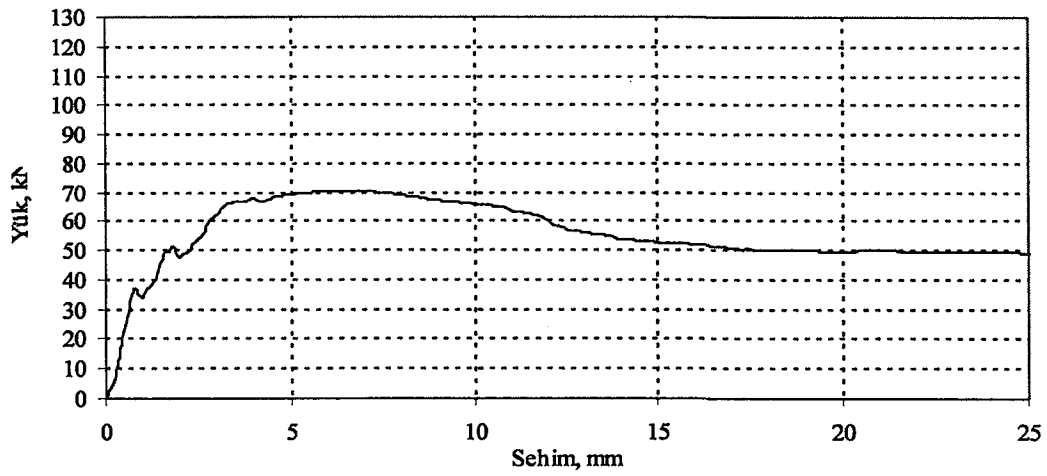
Şekil B.28. Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

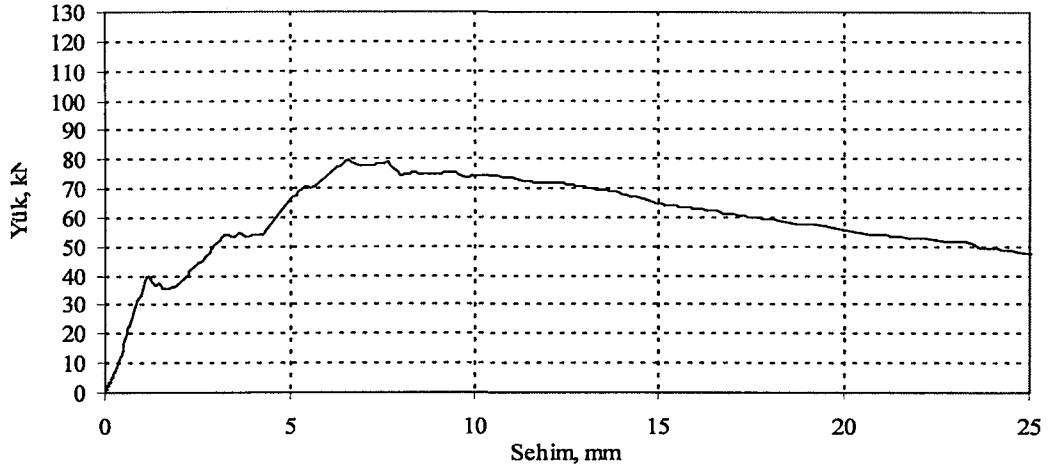


b) Plak No.2

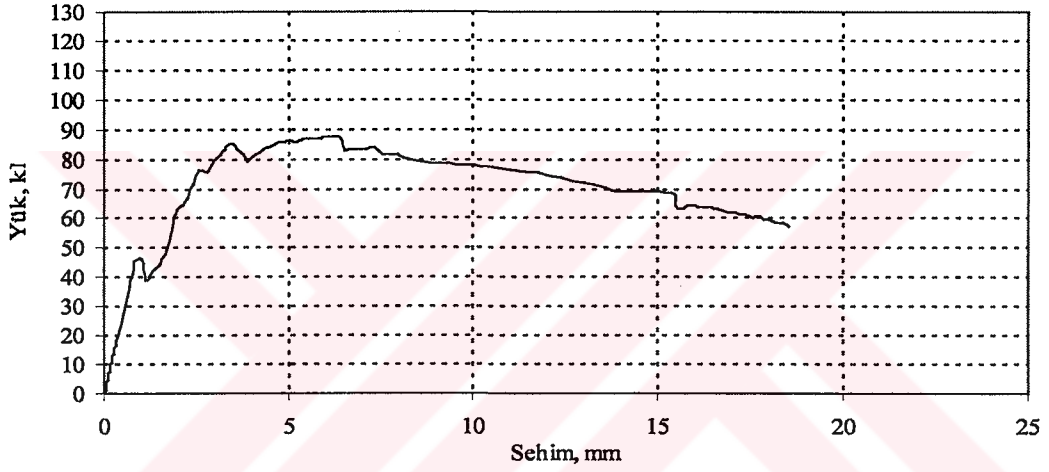


c) Plak No.3

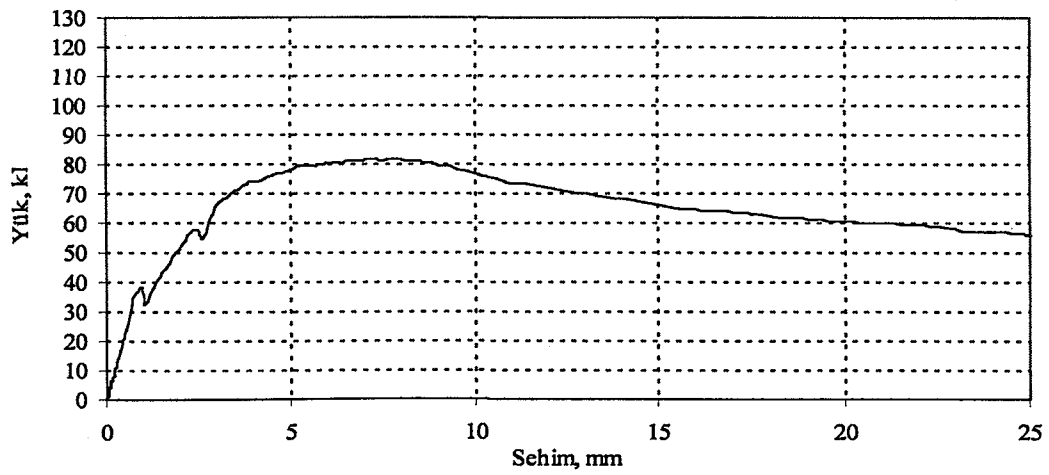
Şekil B.29. Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

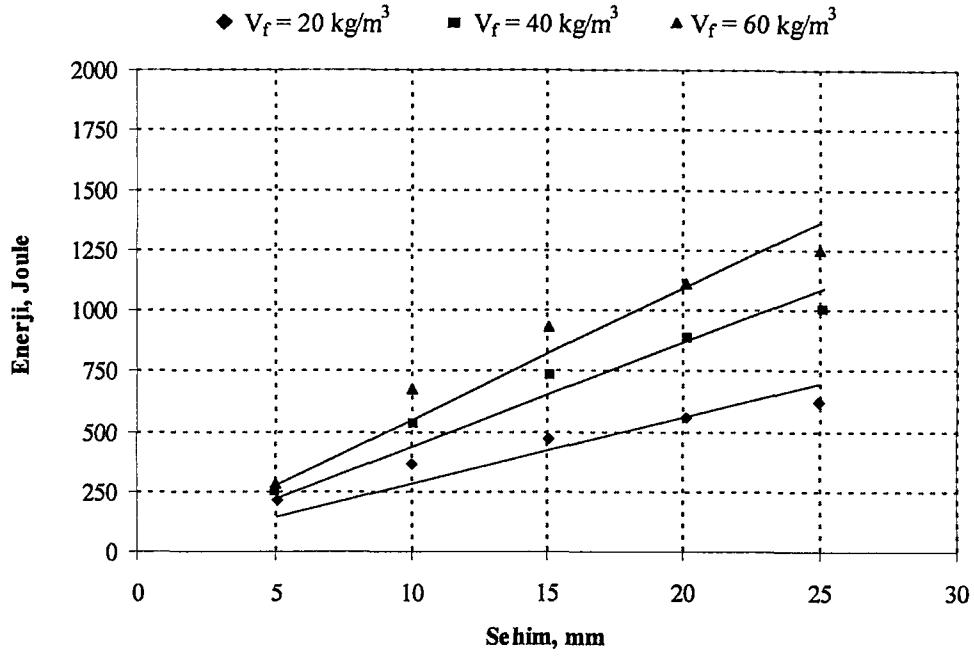


b) Plak No.2

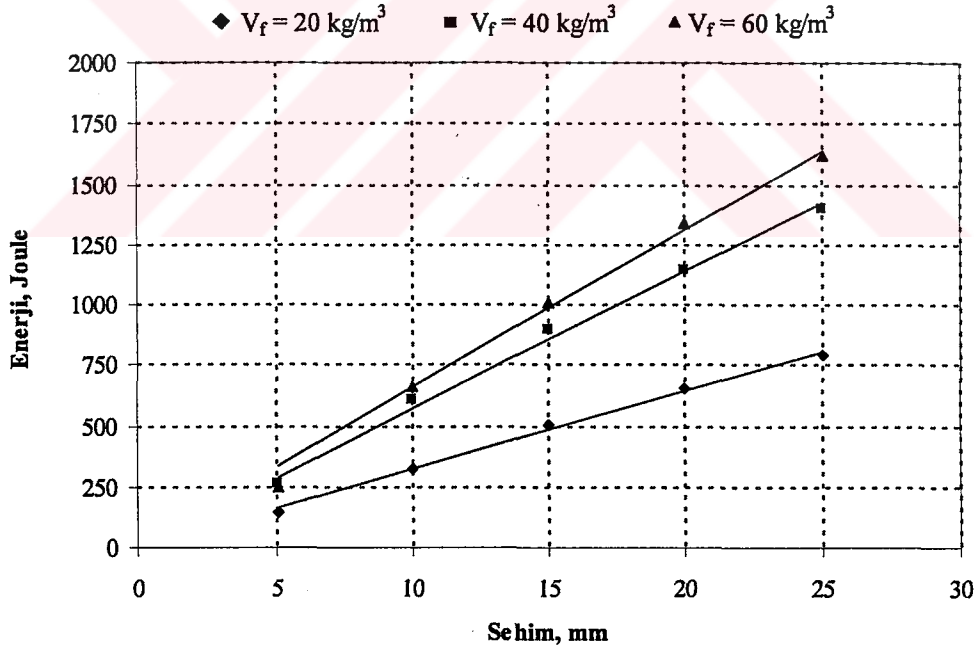


c) Plak No.3

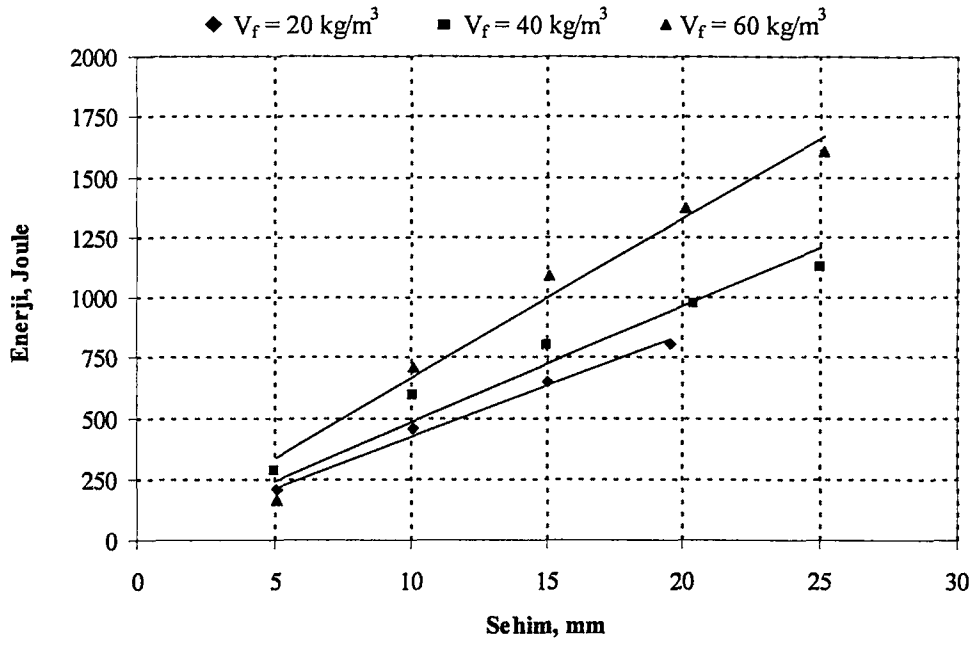
Şekil B.30. Su/çimento=0,70, L/d=80 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için yük-sehim eğrileri.



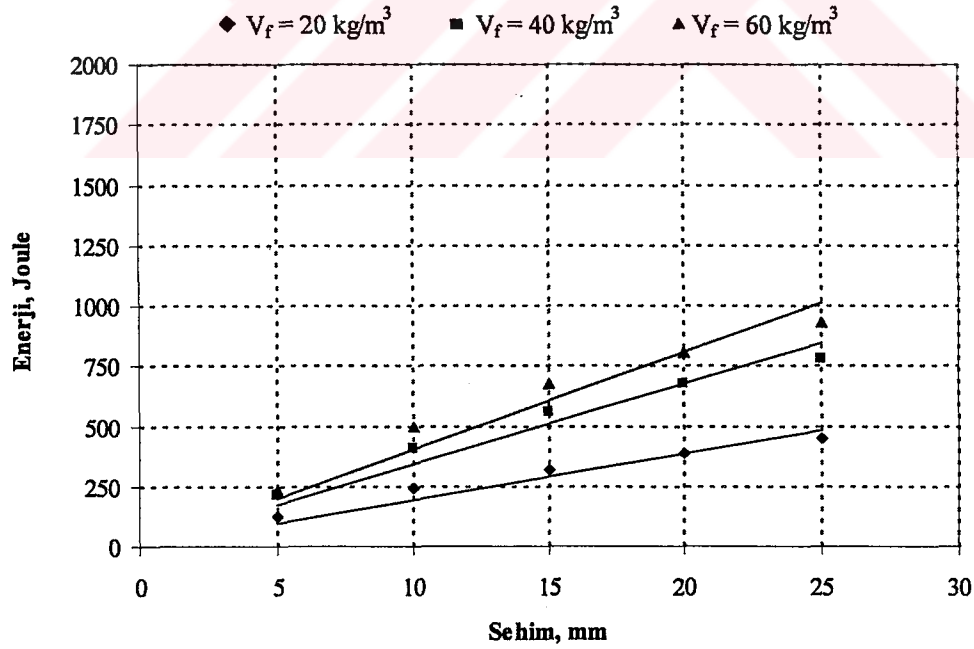
Şekil B.31. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve L/d=55)



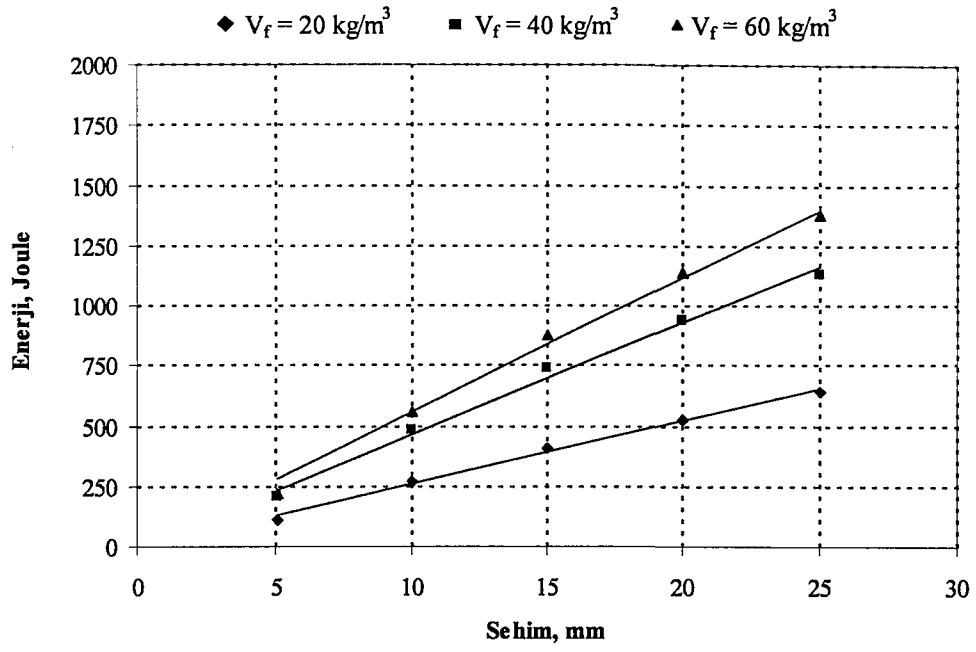
Şekil B.32. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve L/d=65)



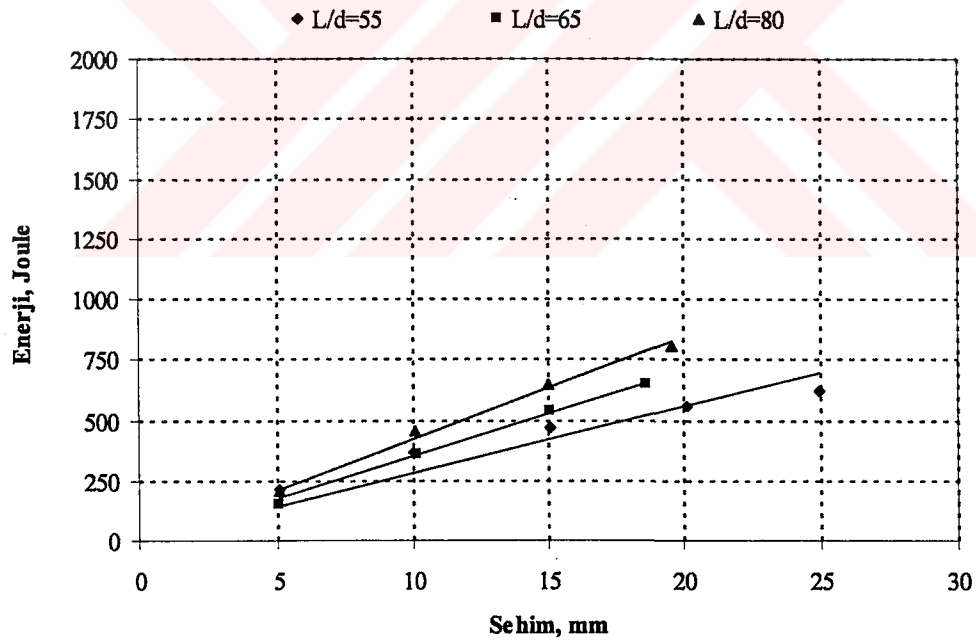
Şekil B.33. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve L/d=80)



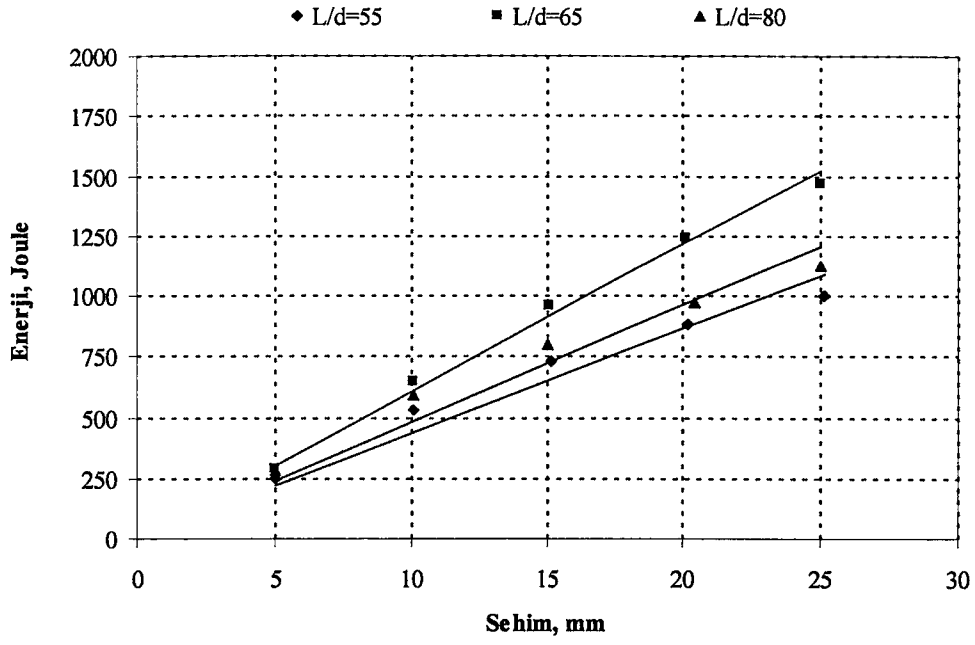
Şekil B.34. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve L/d=55)



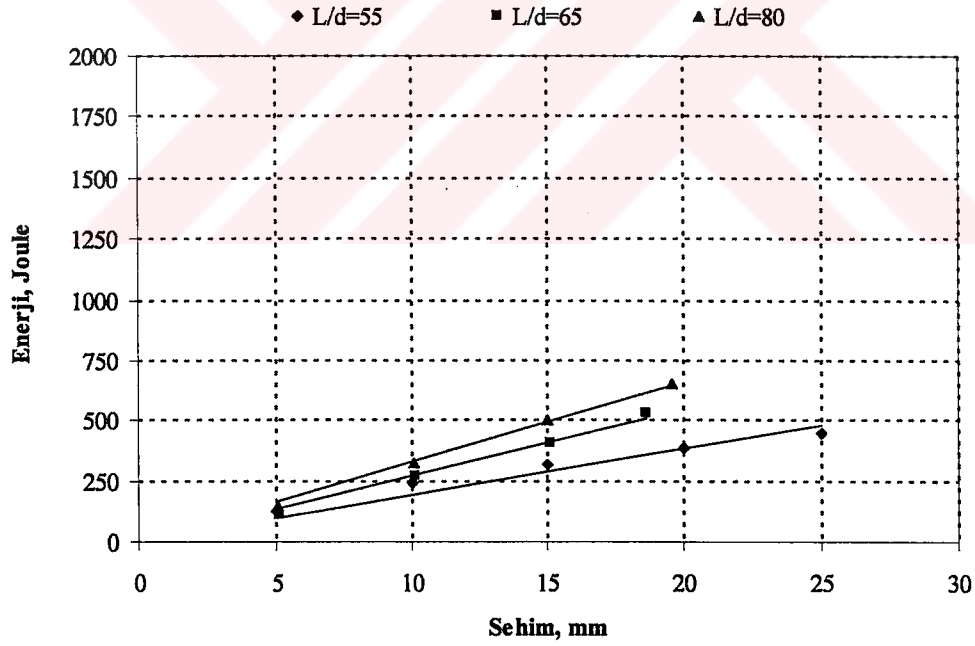
Şekil B.35. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve $L/d=65$)



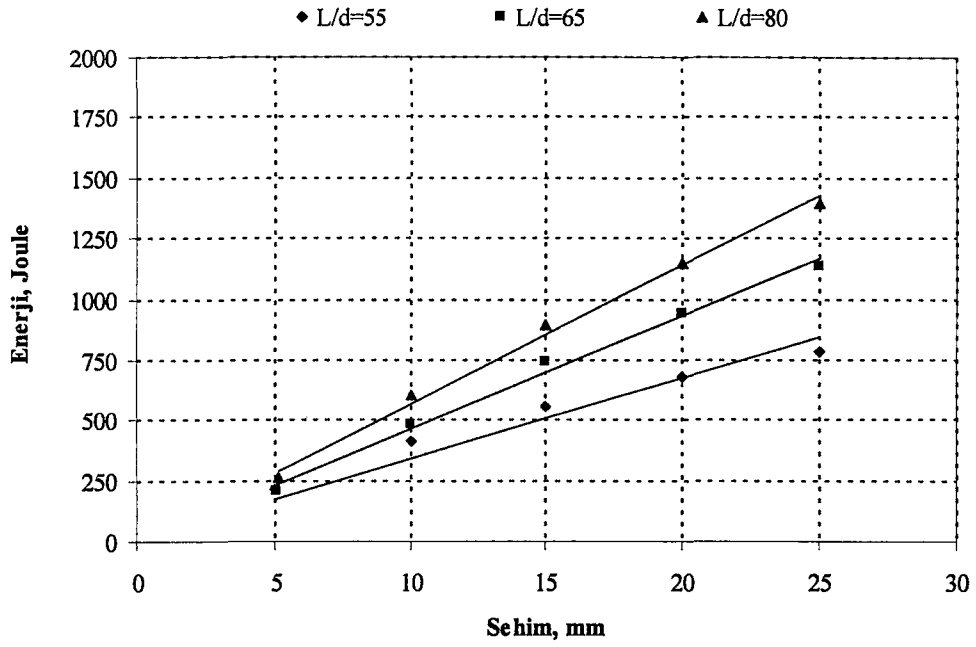
Şekil B.36. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$)



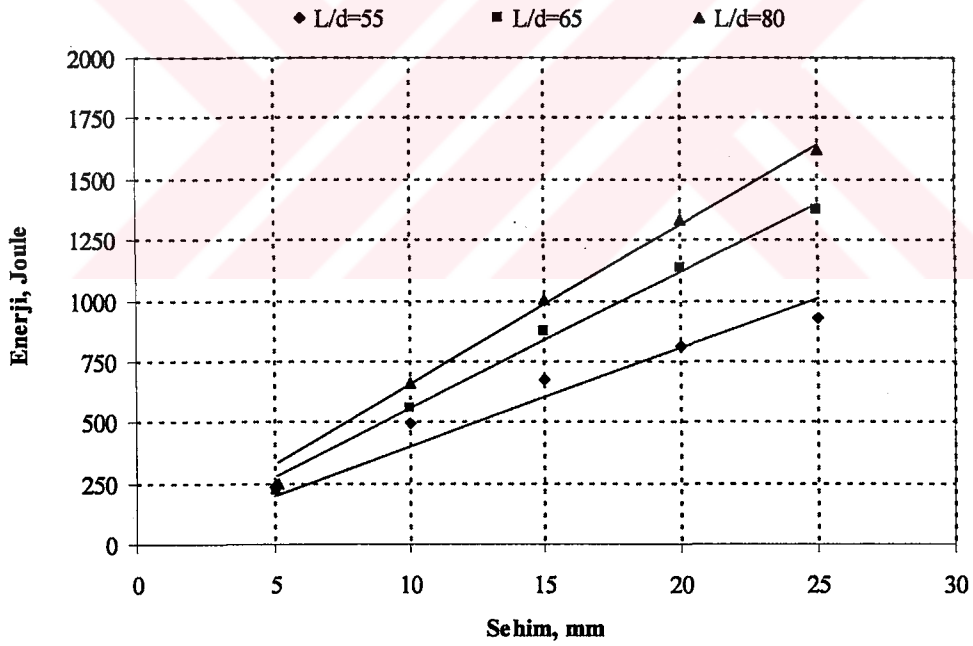
Şekil B.37. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,45 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$)



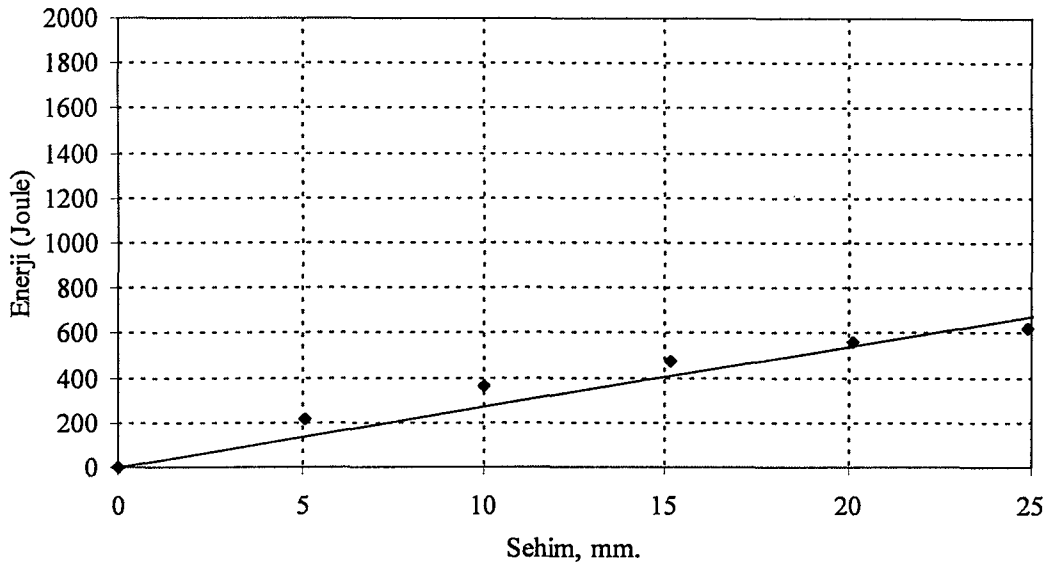
Şekil B.38. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$)



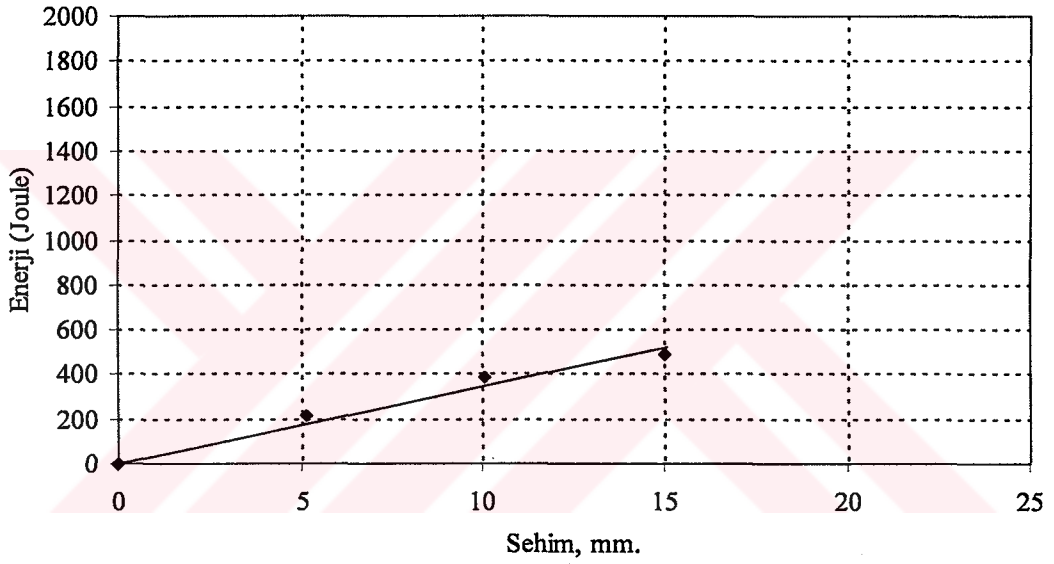
Şekil B.39. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$)



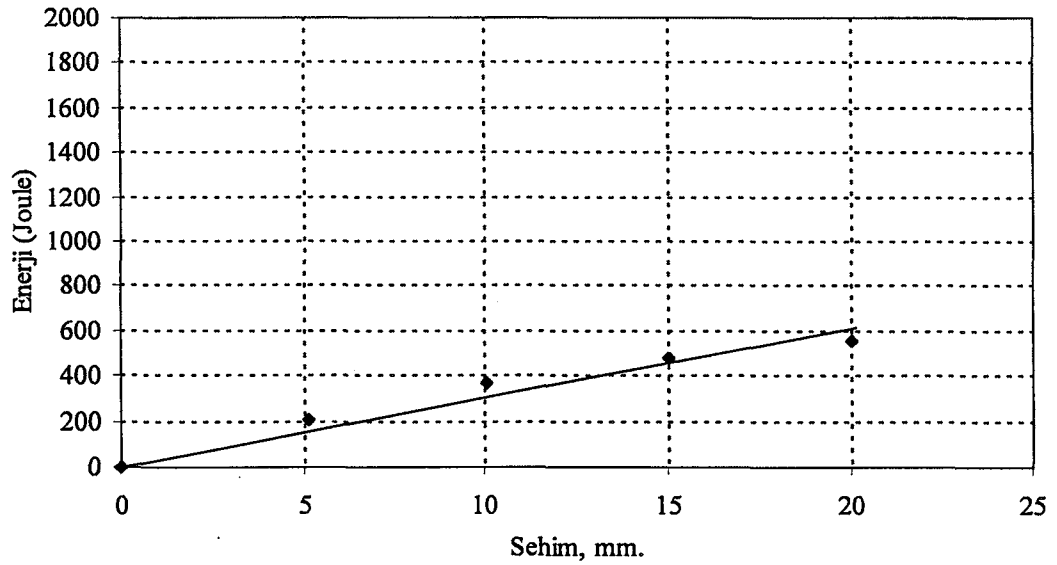
Şekil B.40. Enerji-sehim eğrileri (su/çimento=0,70 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$)



a) Plak No.1

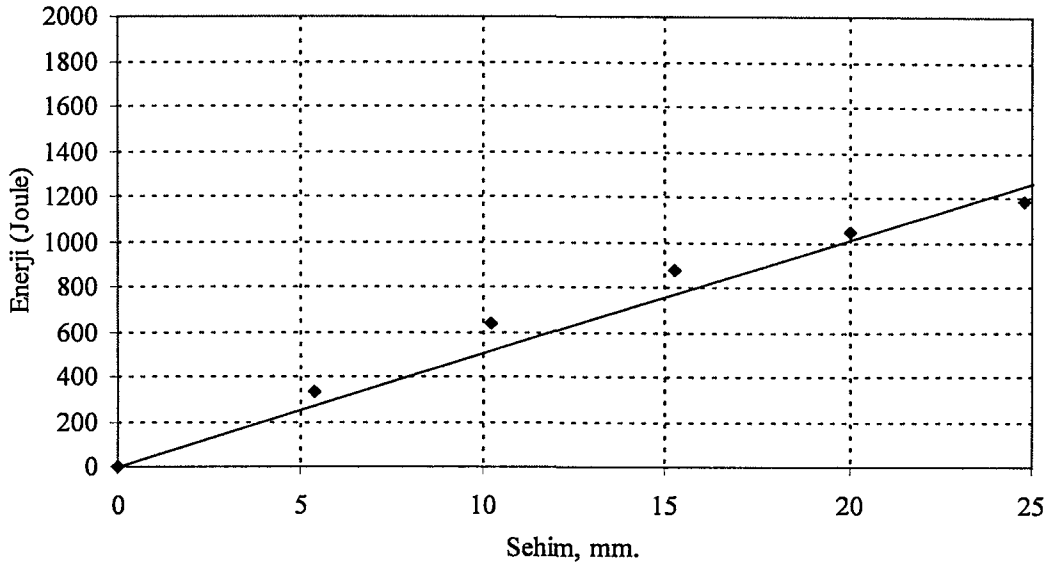


b) Plak No.2

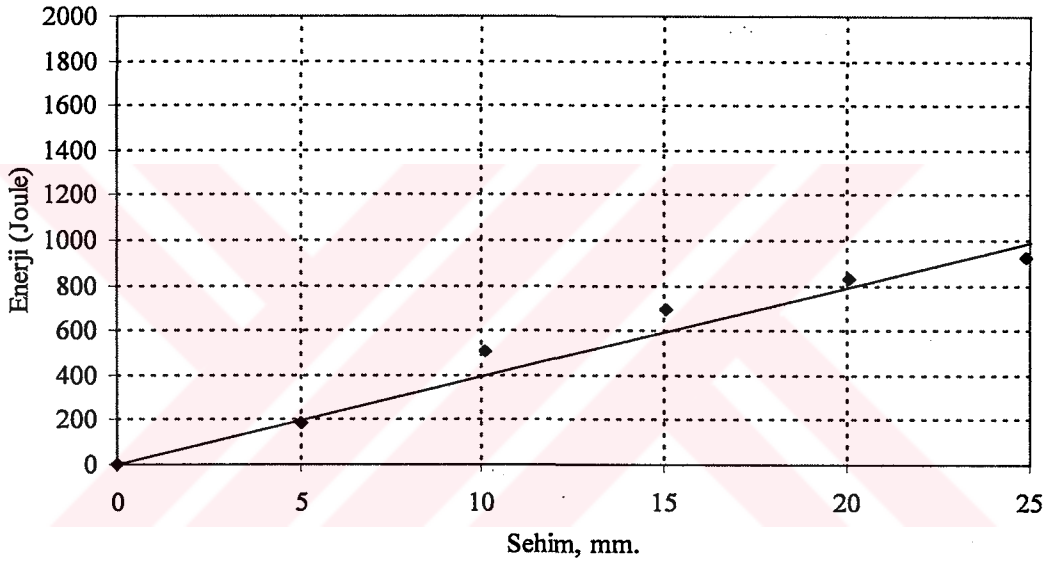


c) Plak No.3

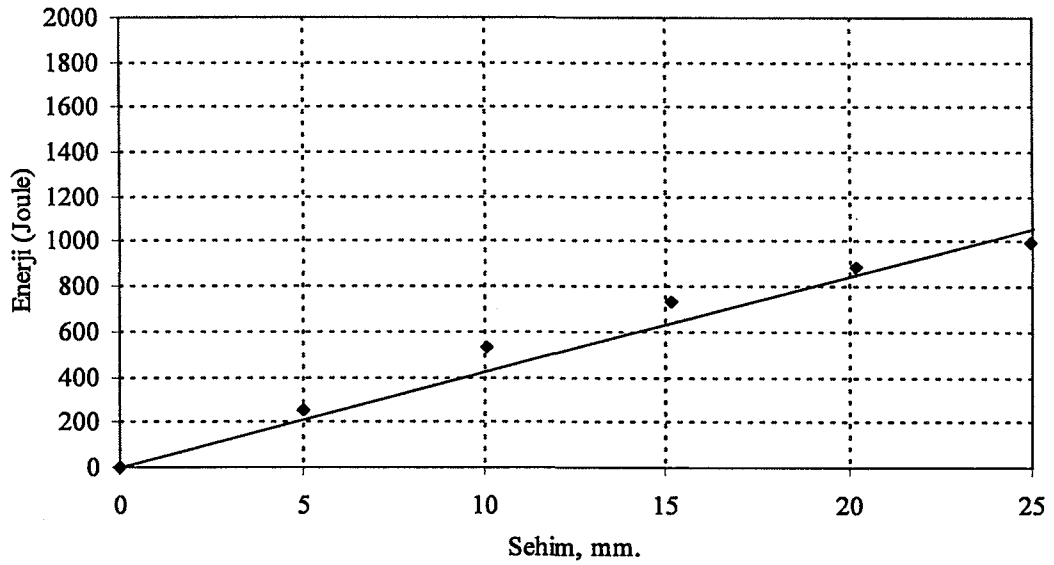
Şekil B.41. Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

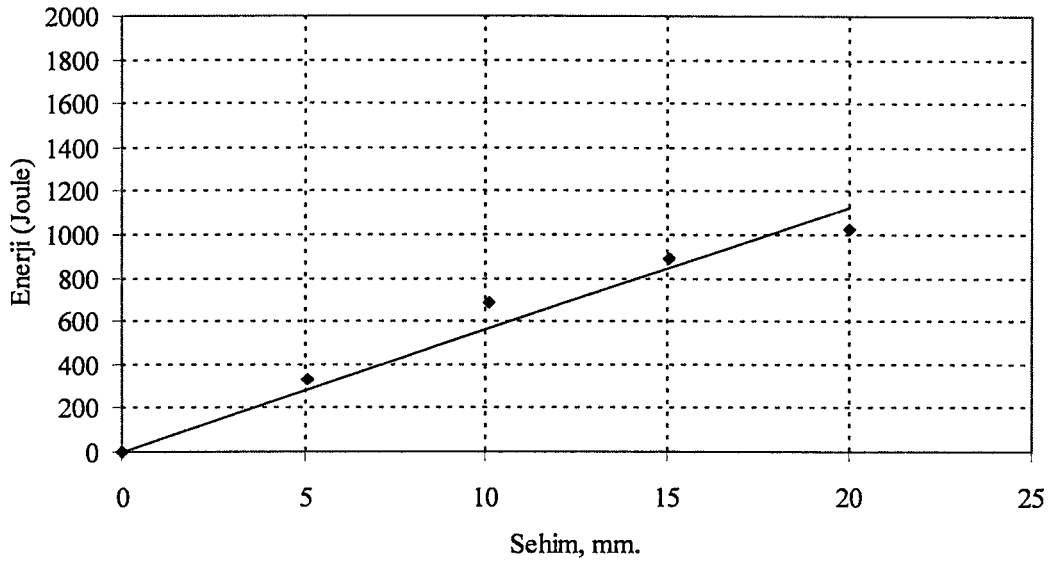


b) Plak No.2

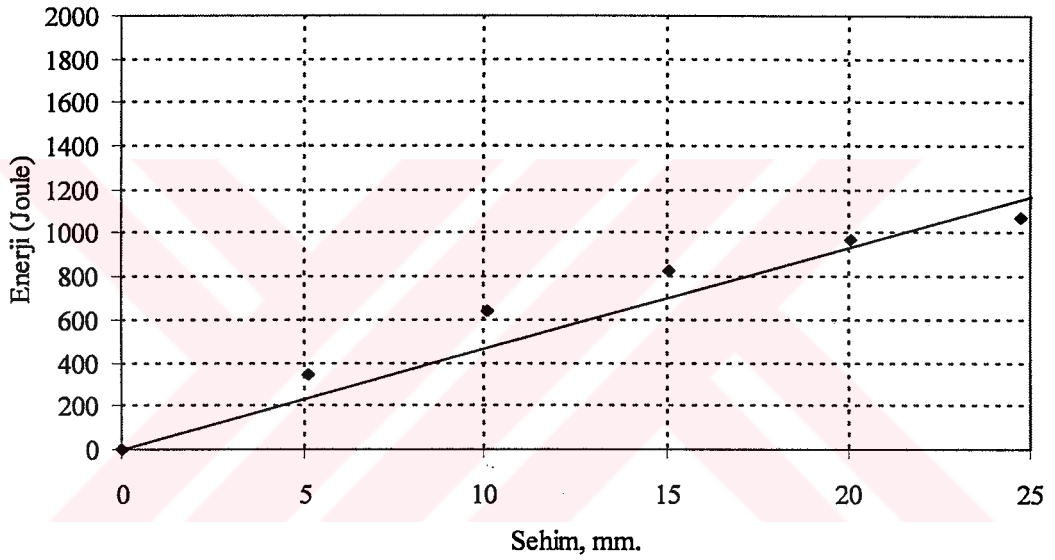


c) Plak No.3

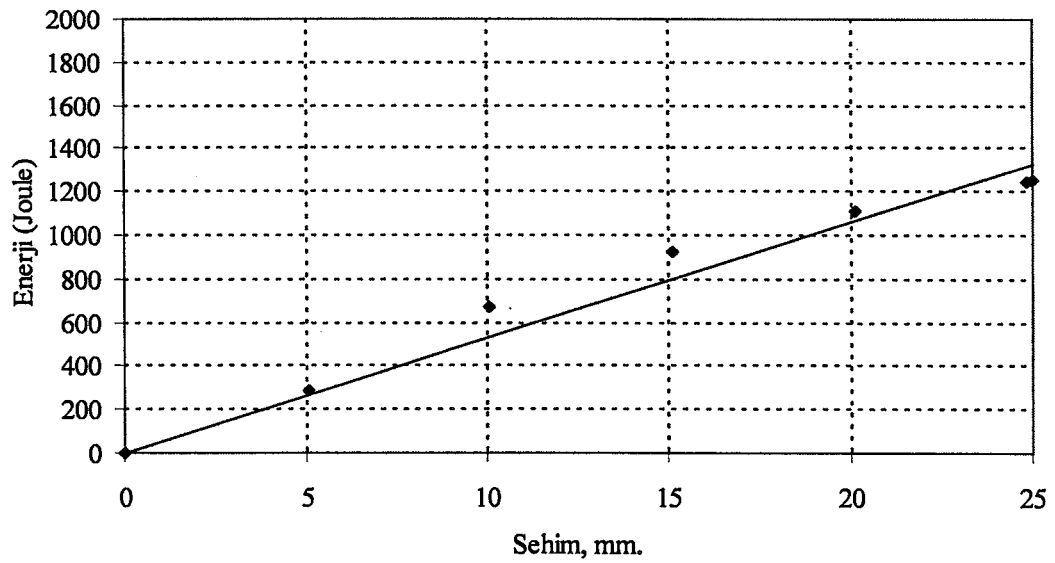
Şekil B.42. Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

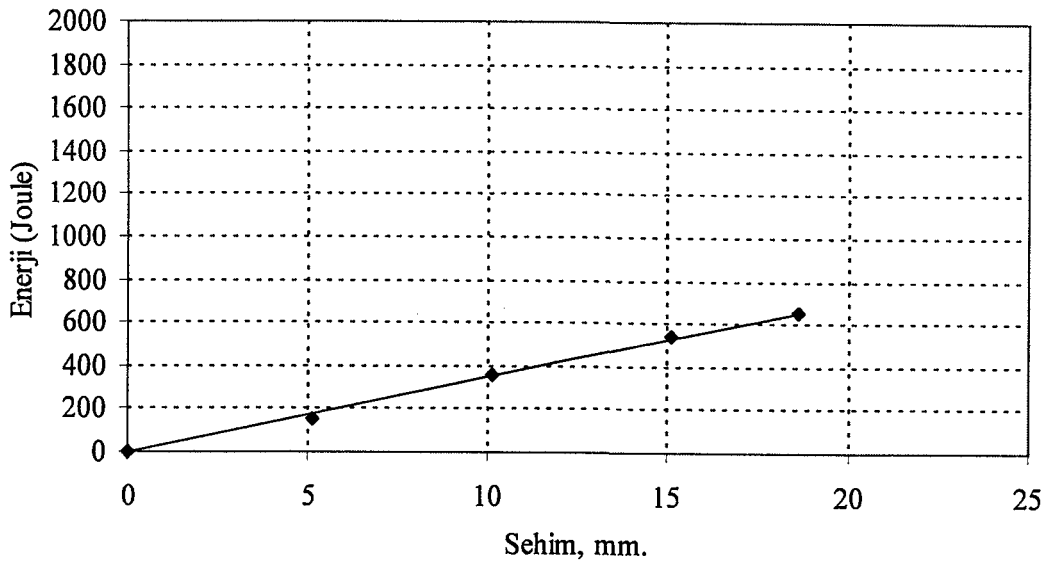


b) Plak No.2

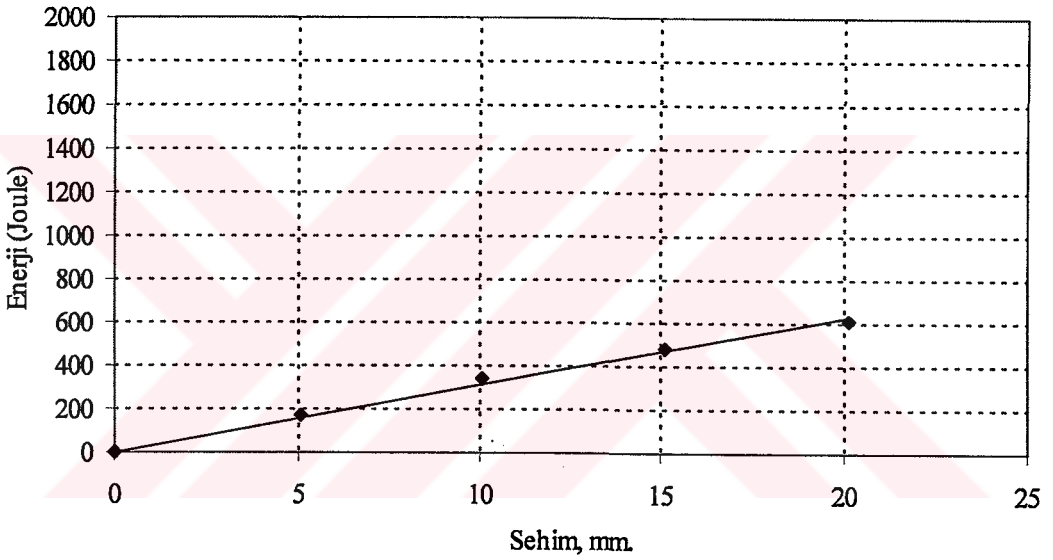


c) Plak No.3

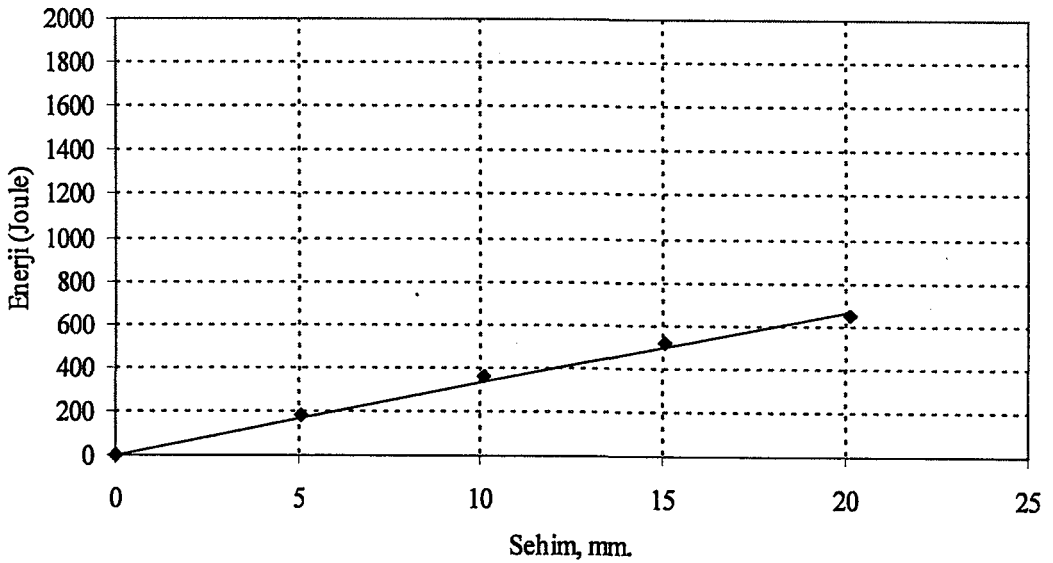
Şekil B.43. Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

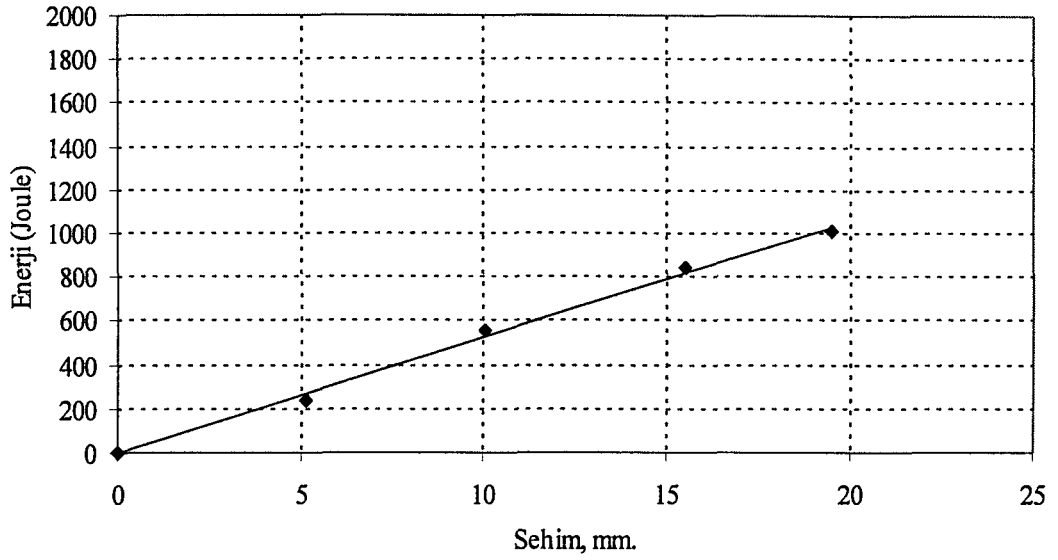


b) Plak No.2

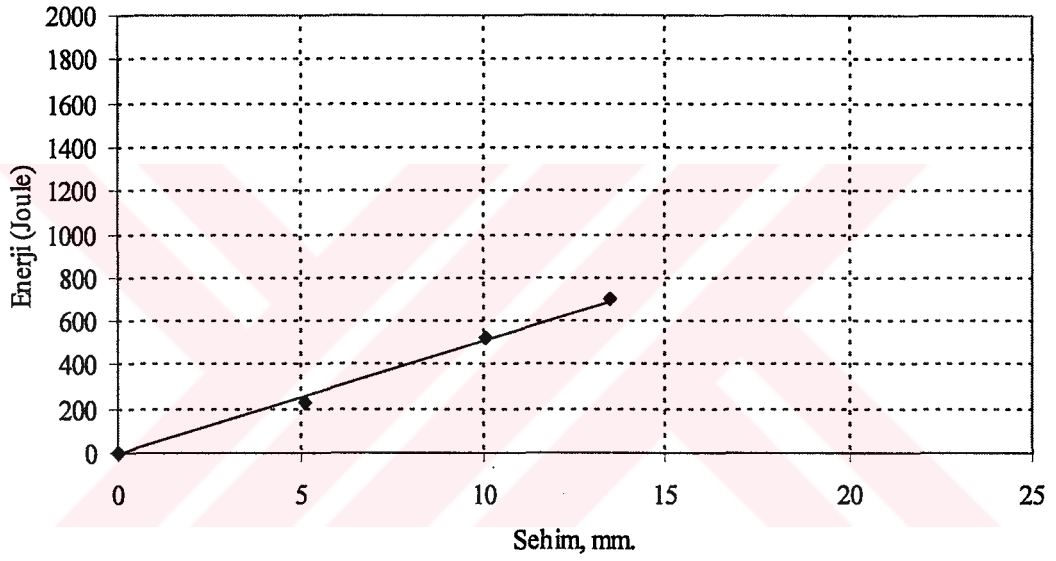


c) Plak No.3

Şekil B.44. Su/çimento=0,45, $L/d=65$ ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

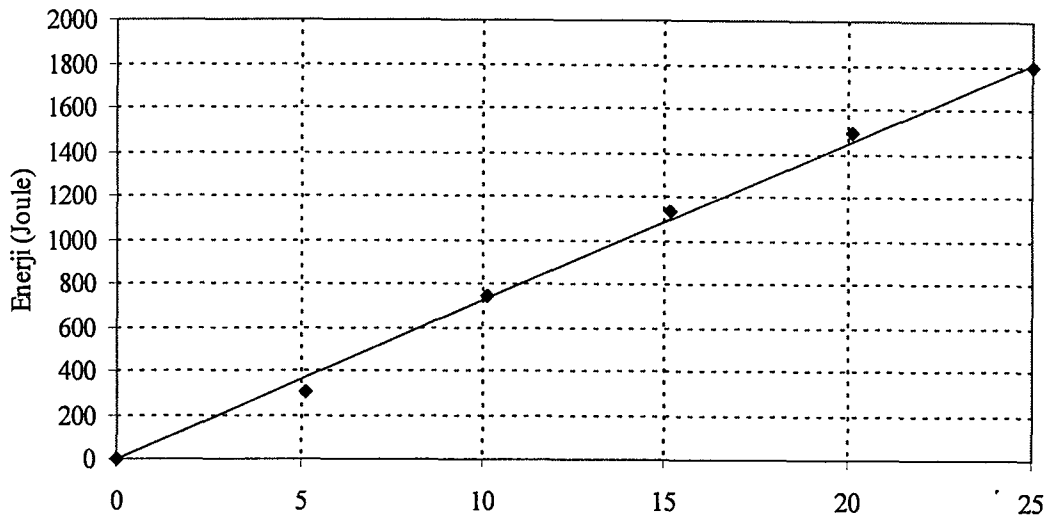


b) Plak No.2

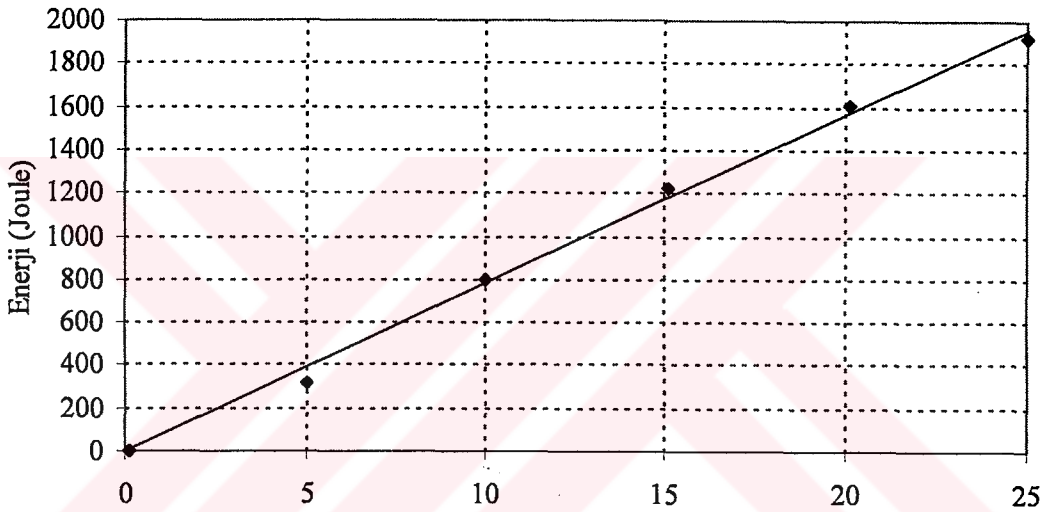


c) Plak No.3

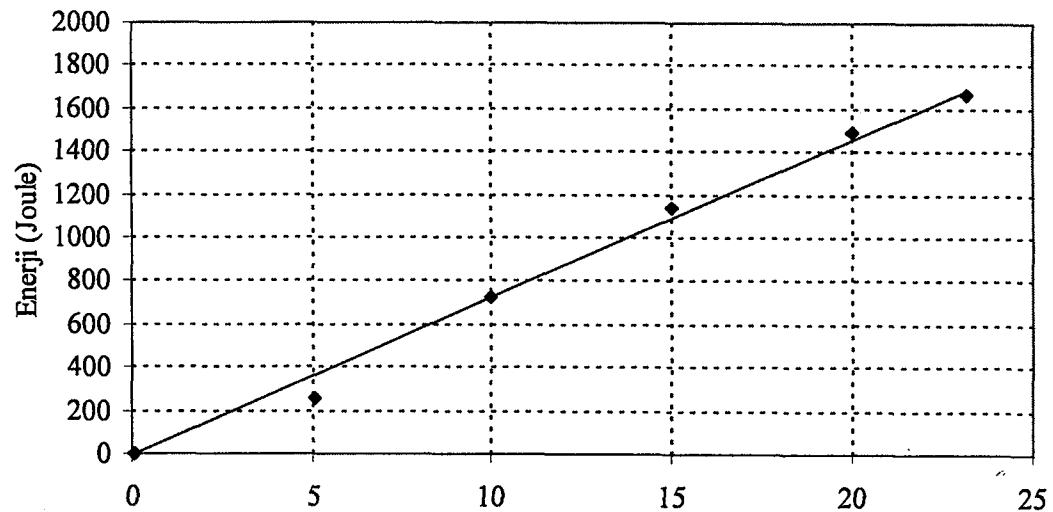
Şekil B.45. Su/çimento=0,45, L/d=65 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrisi.



a) Plak No.1

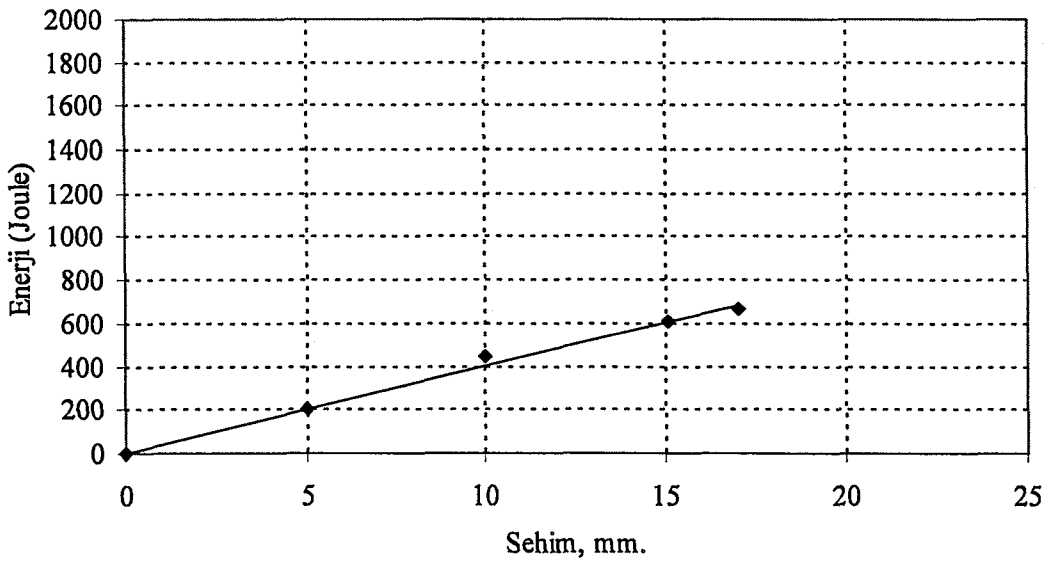
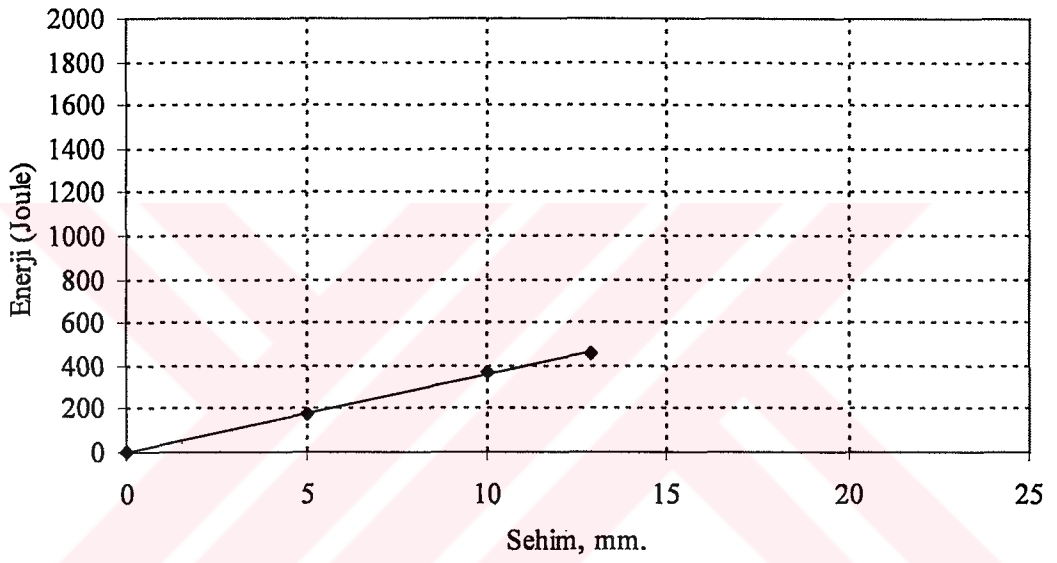
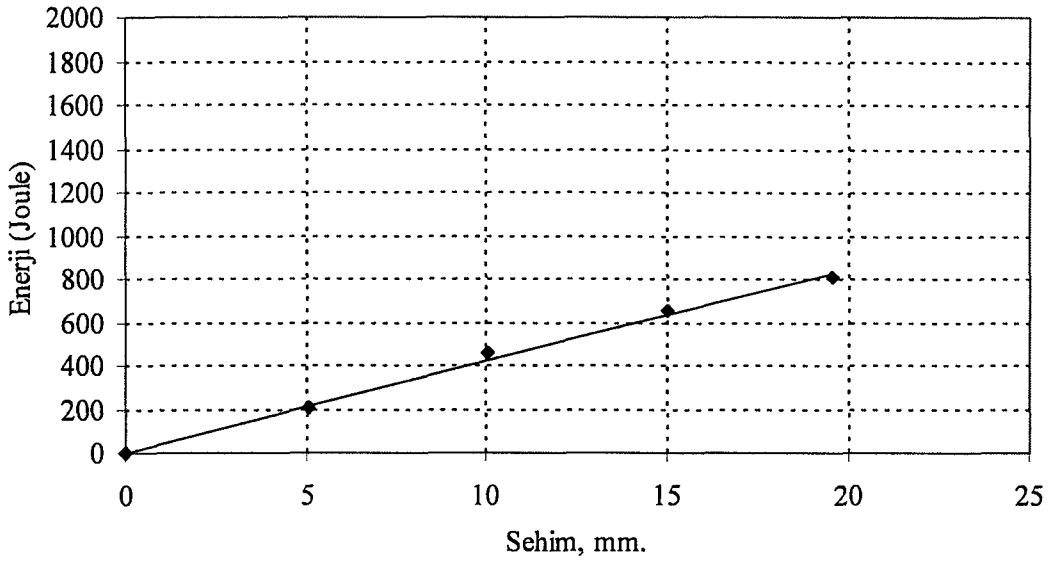


b) Plak No.2

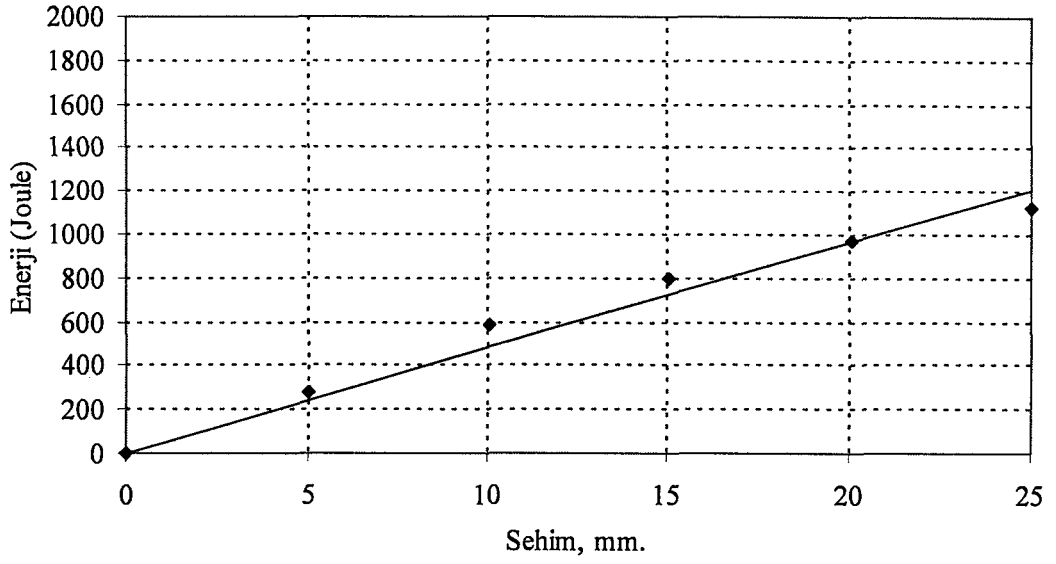


c) Plak No.3

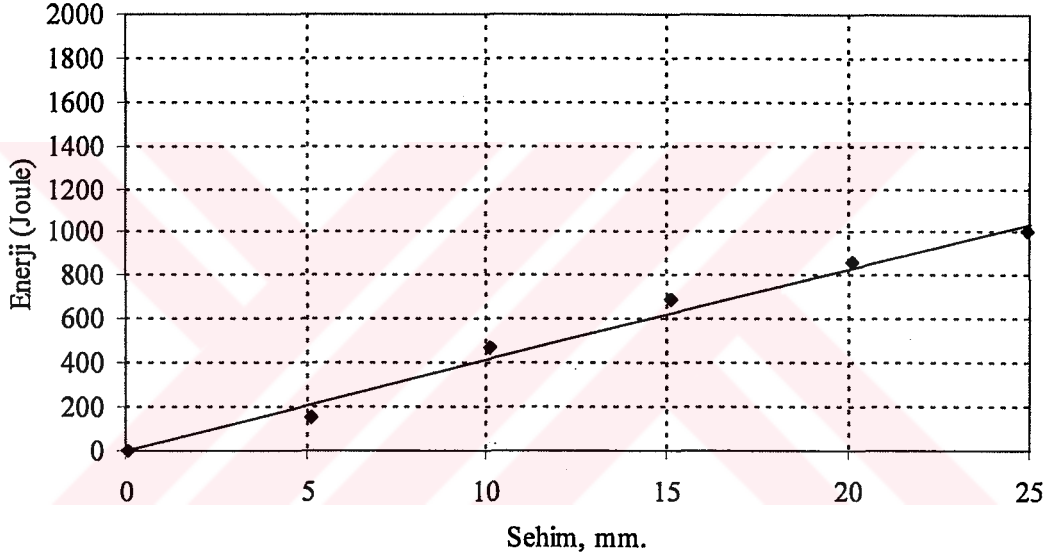
Şekil B.46. Su/çimento=0,45, L/d=65 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



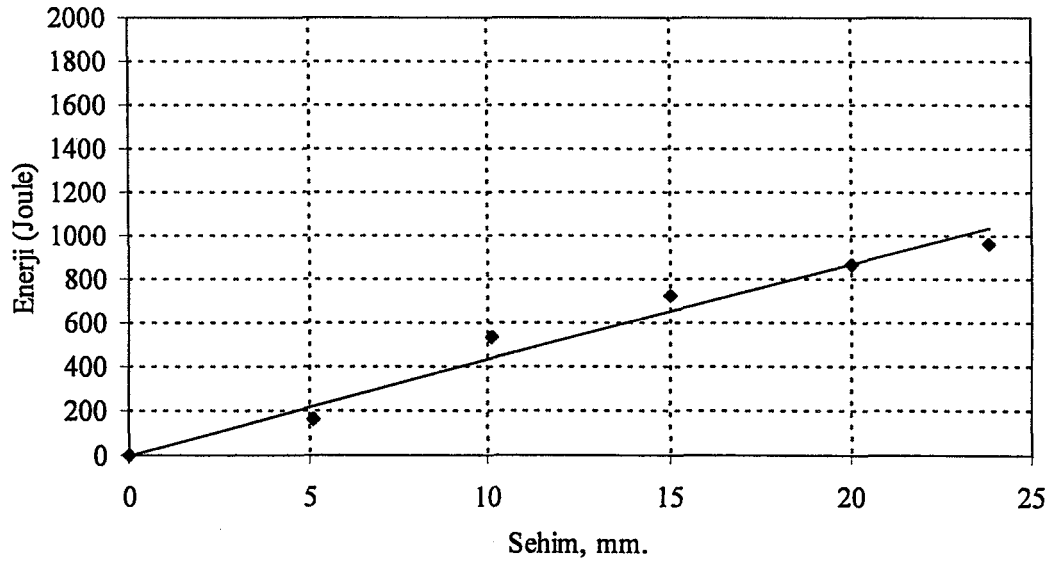
Şekil B.47. Su/çimento=0,45, L/d=80 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

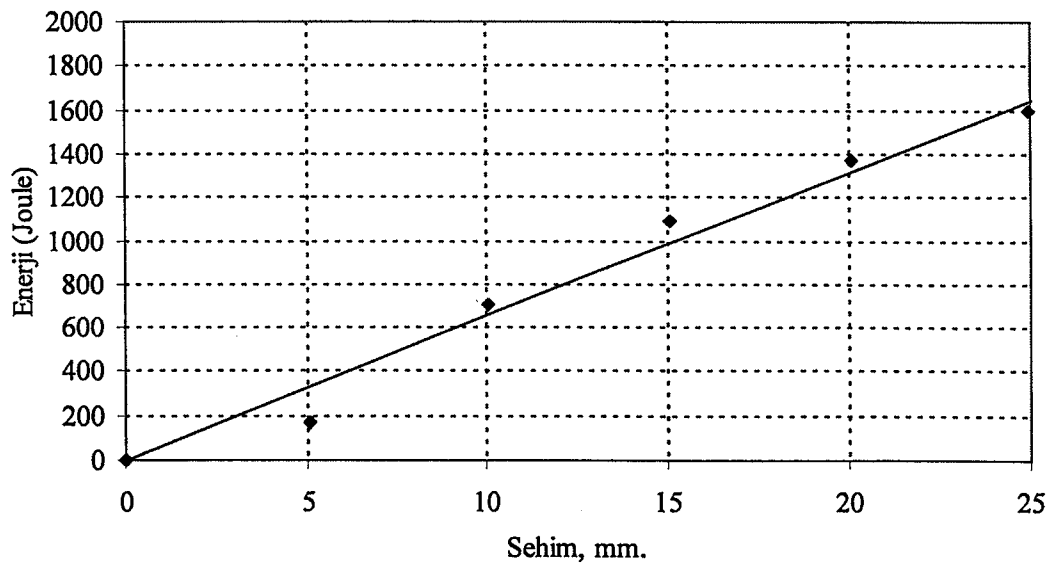
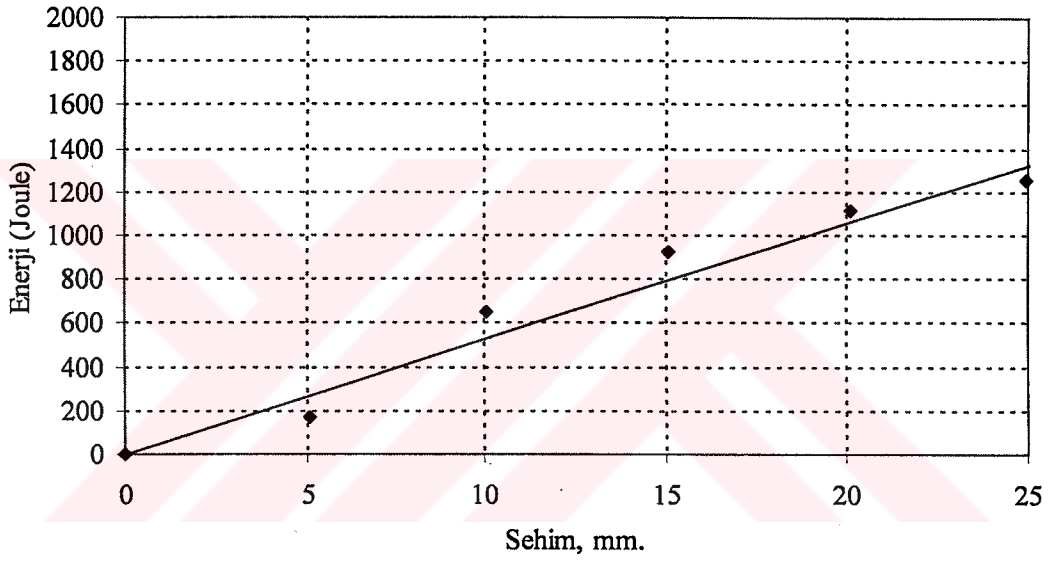
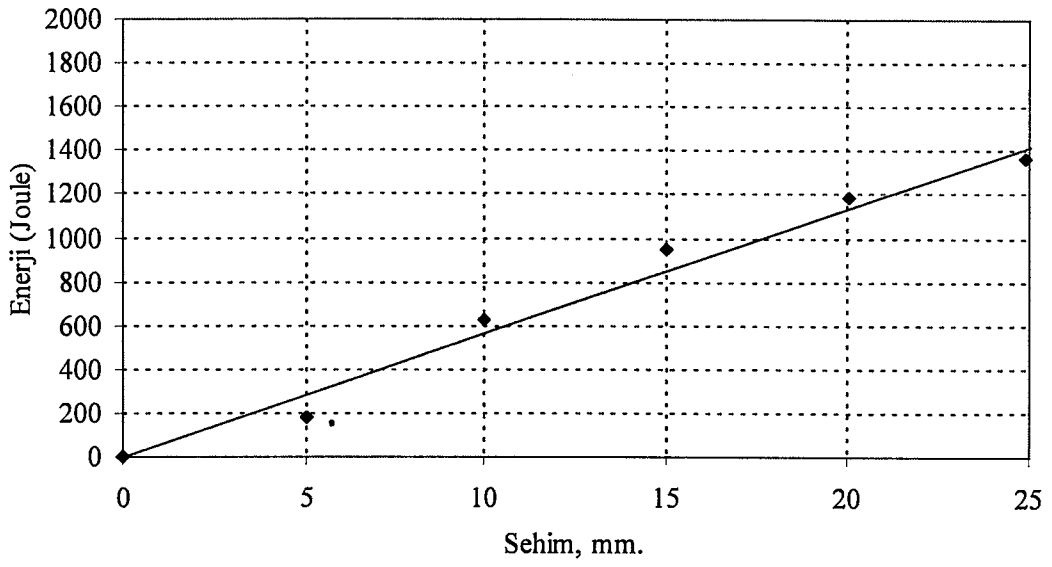


b) Plak No.2

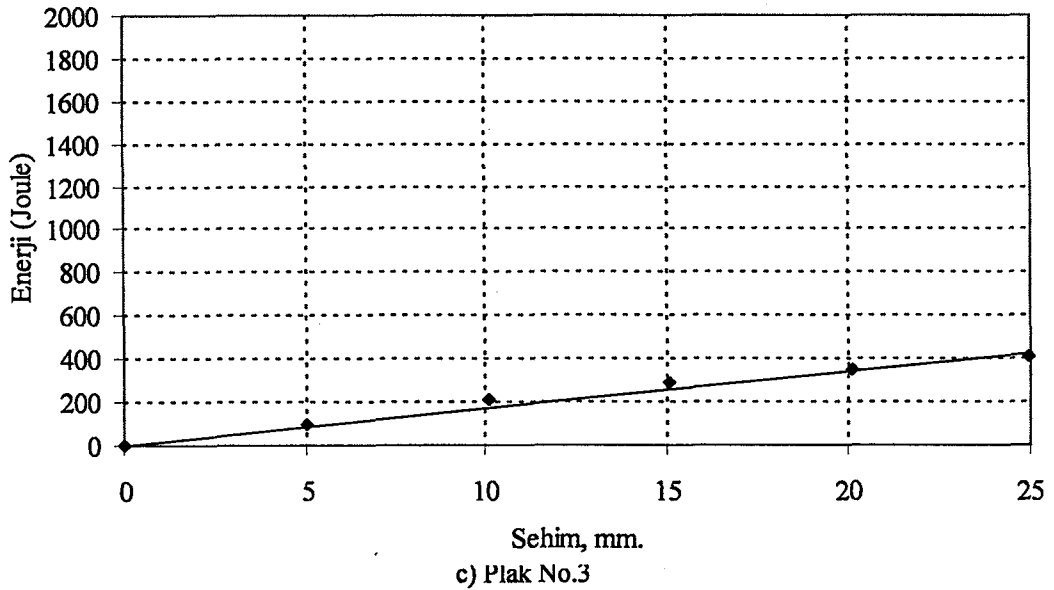
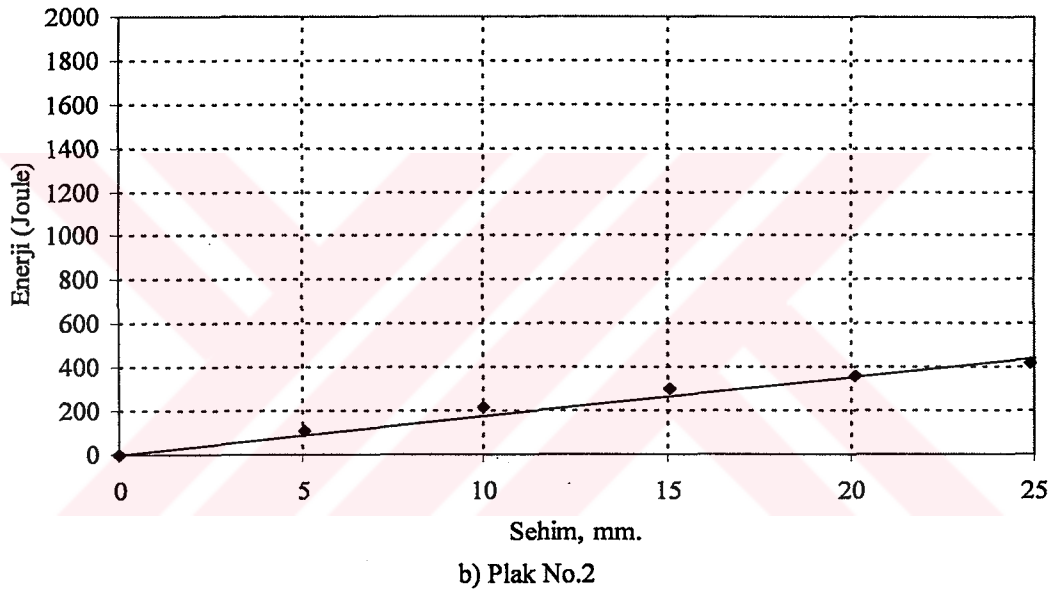
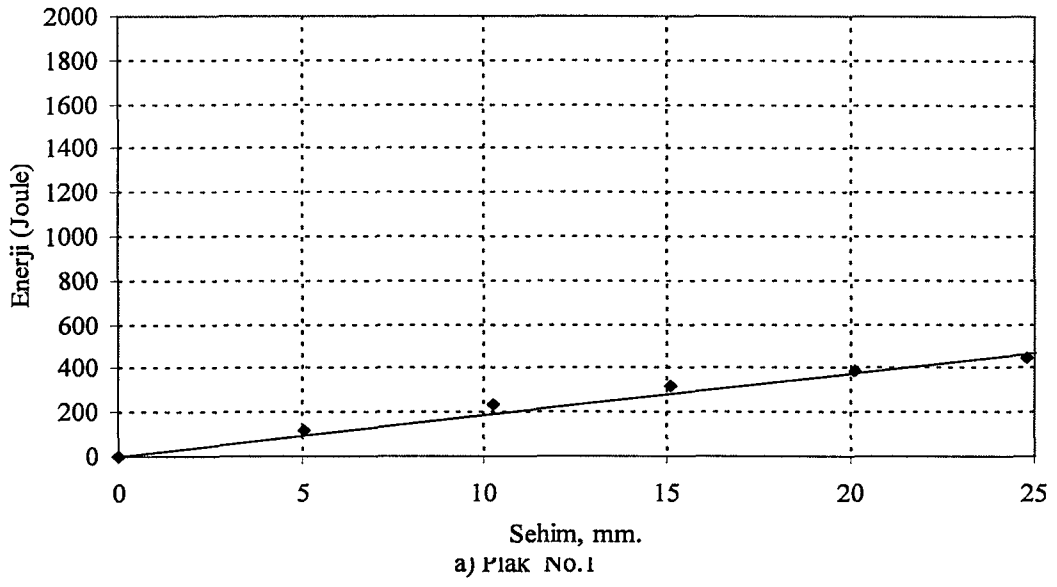


c) Plak No.3

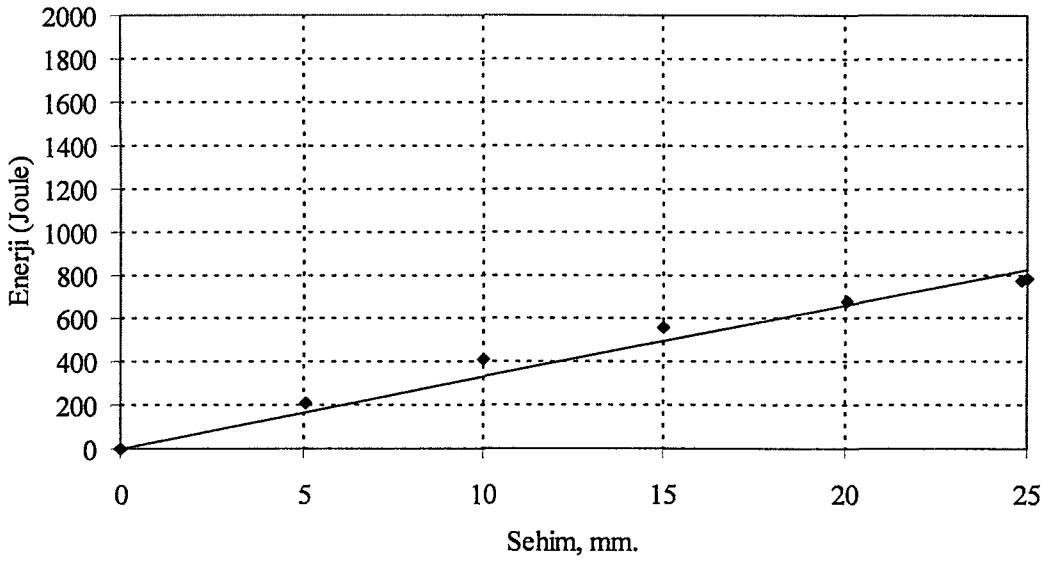
Şekil B.48. Su/çimento=0,45, $L/d=80$ ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



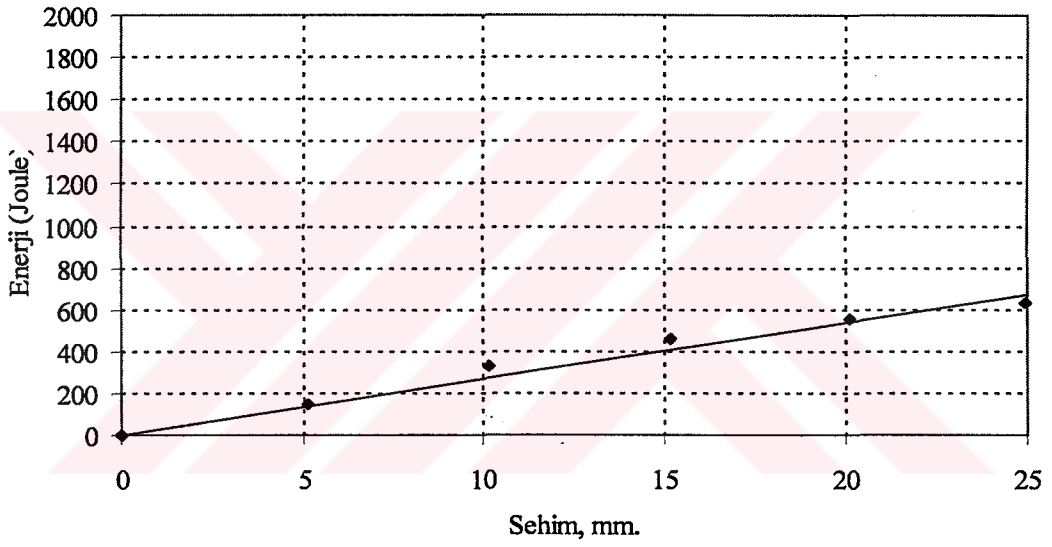
c) Plak No.3
Şekil B.49. Su/çimento=0,45, $L/d=80$ ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



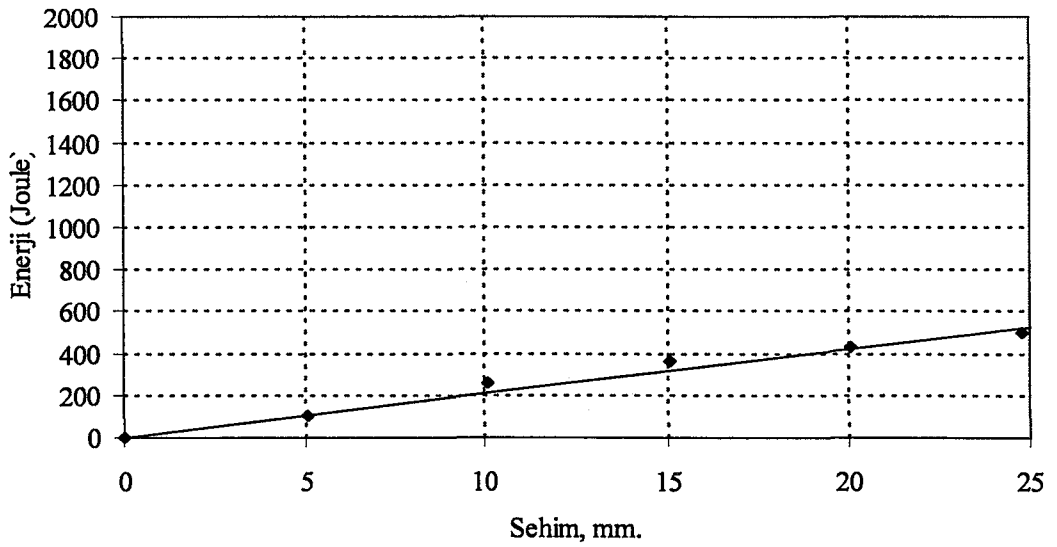
Şekil B.50. Su/çimento=0.70, L/d=55 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

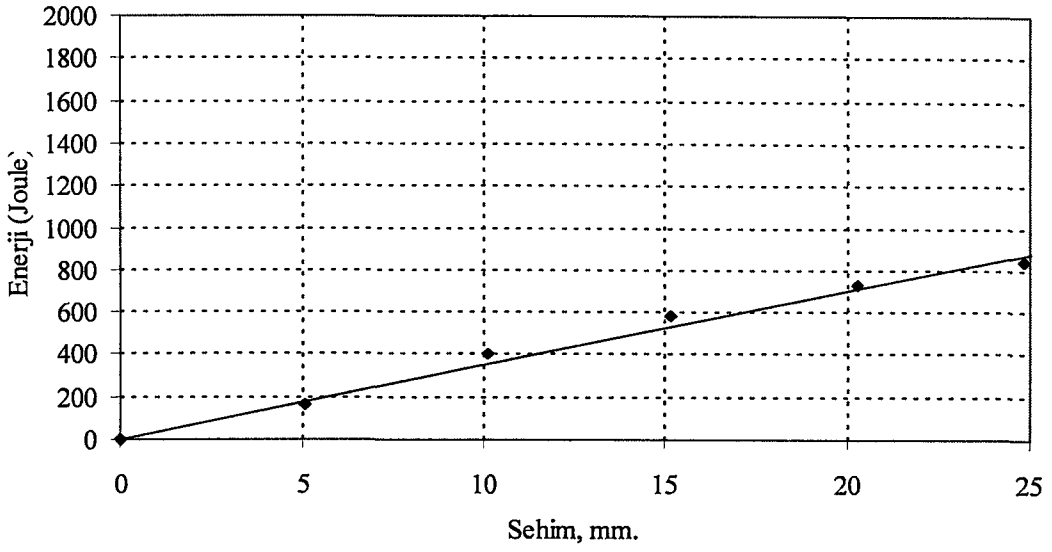


b) Plak No.2

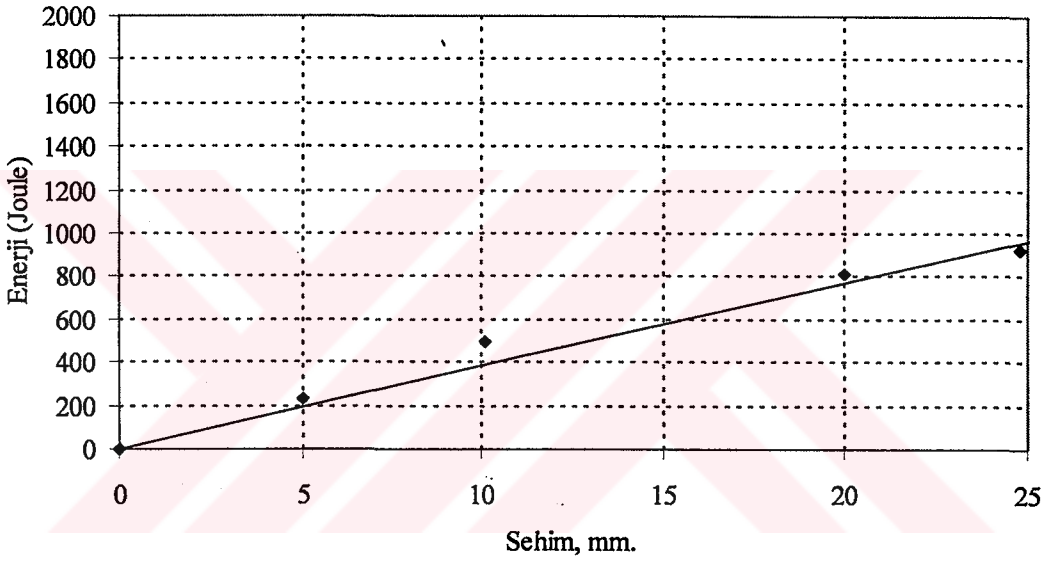


c) Plak No.3

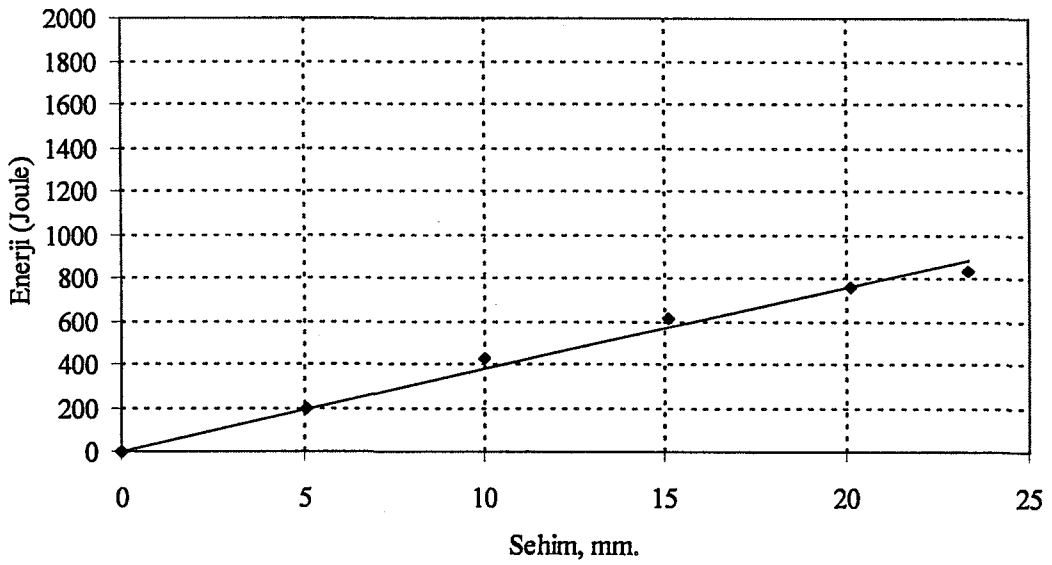
Şekil B.51. Su/çimento=0.70, L/d=55 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

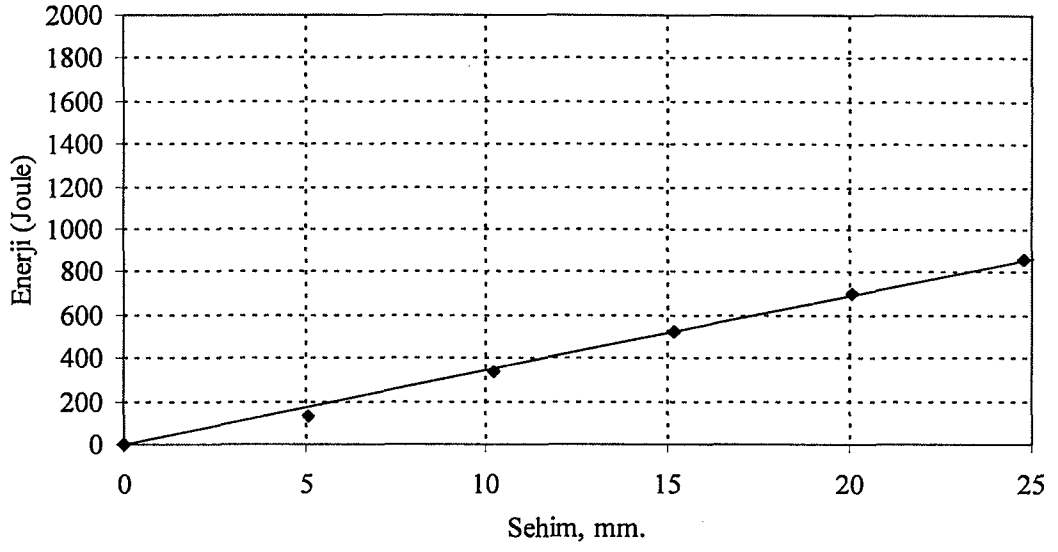


b) Plak No.2

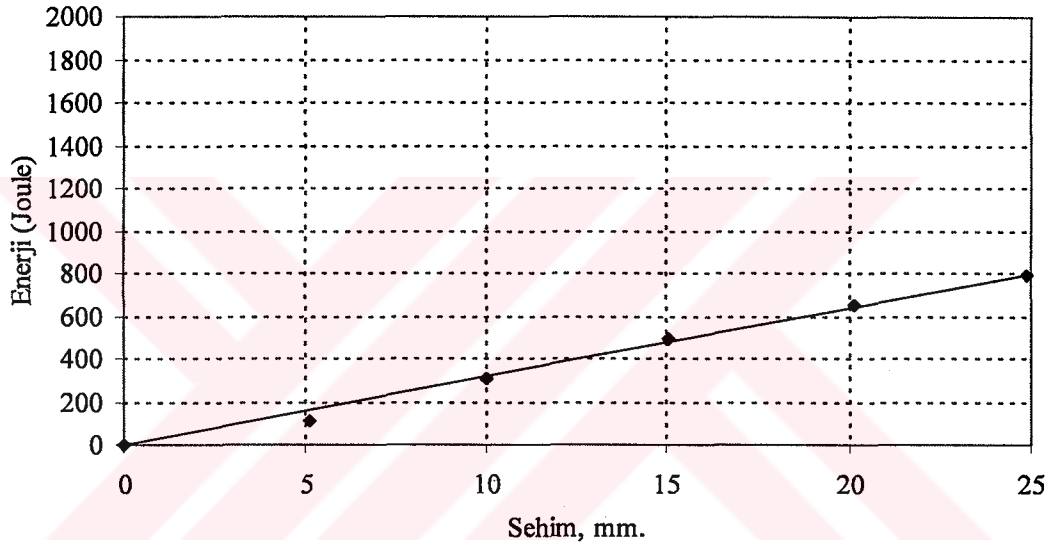


c) Plak No.3

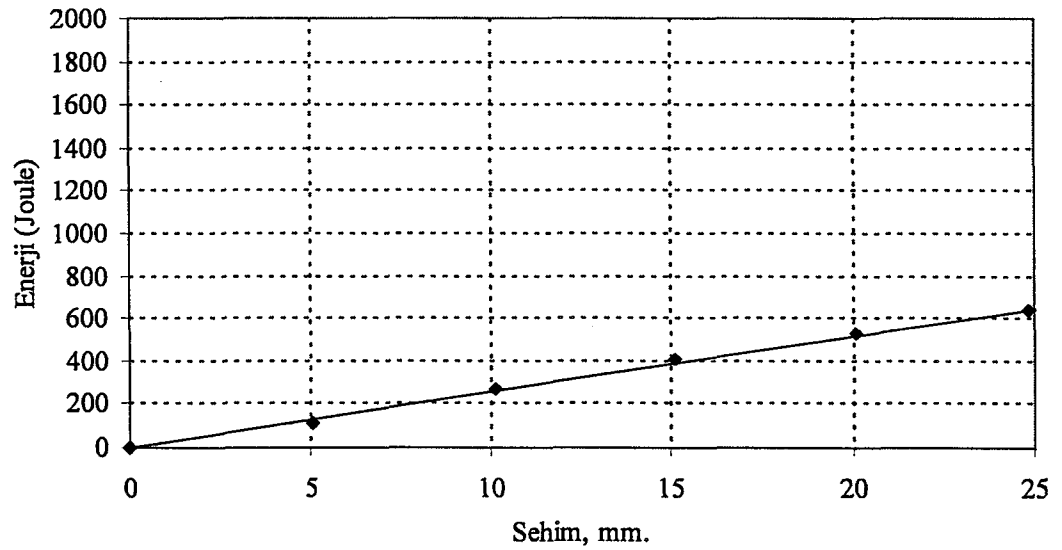
Şekil B.52. Su/çimento=0.70, L/d=55 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

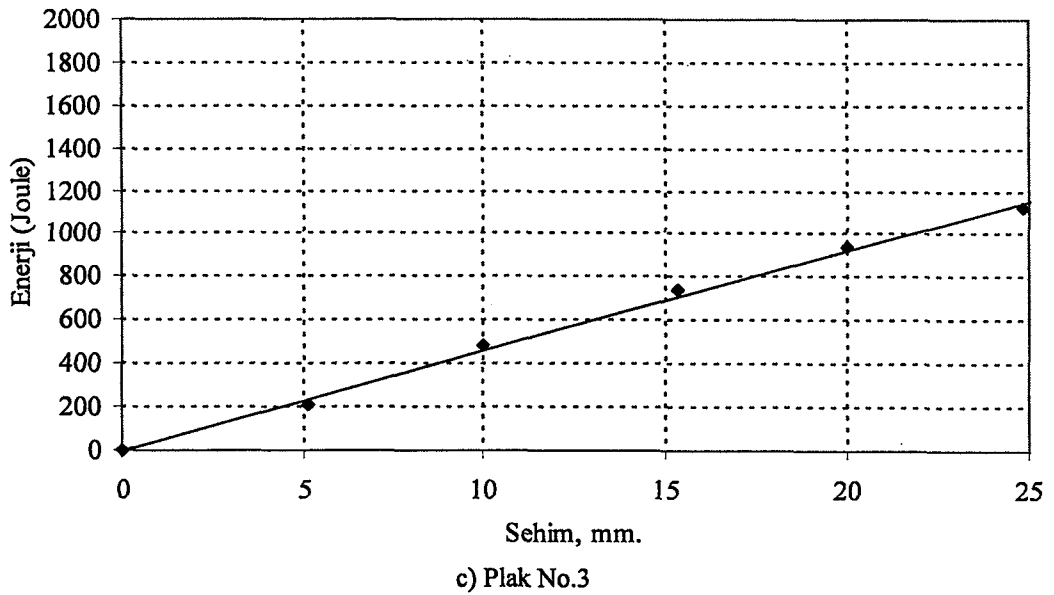
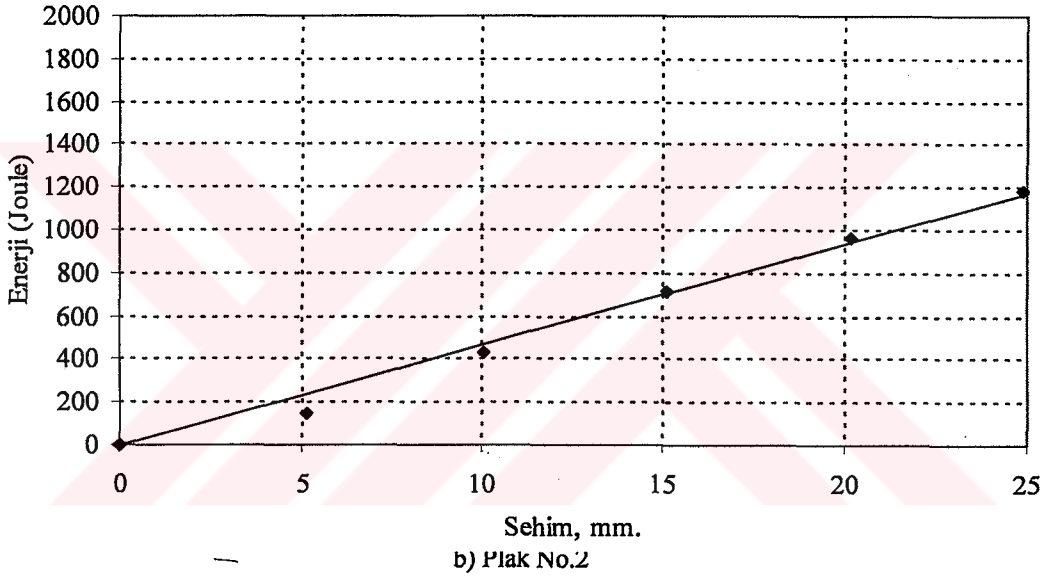
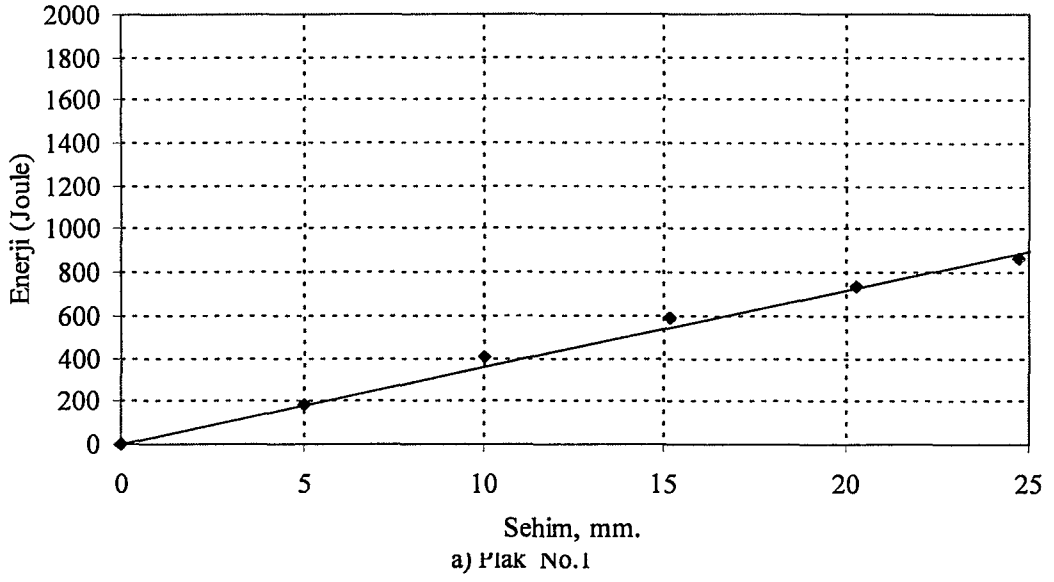


b) Plak No.2

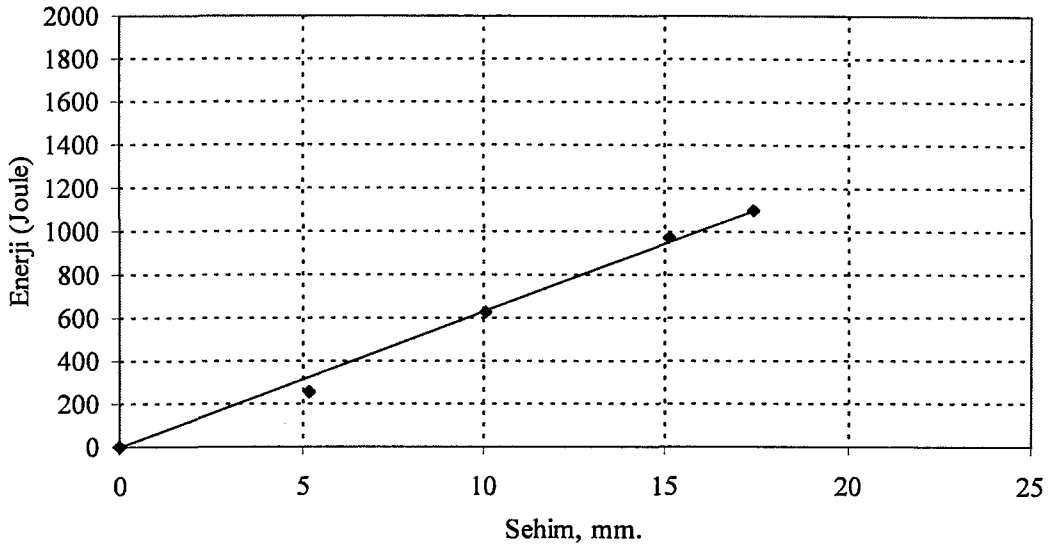


c) Plak No.3

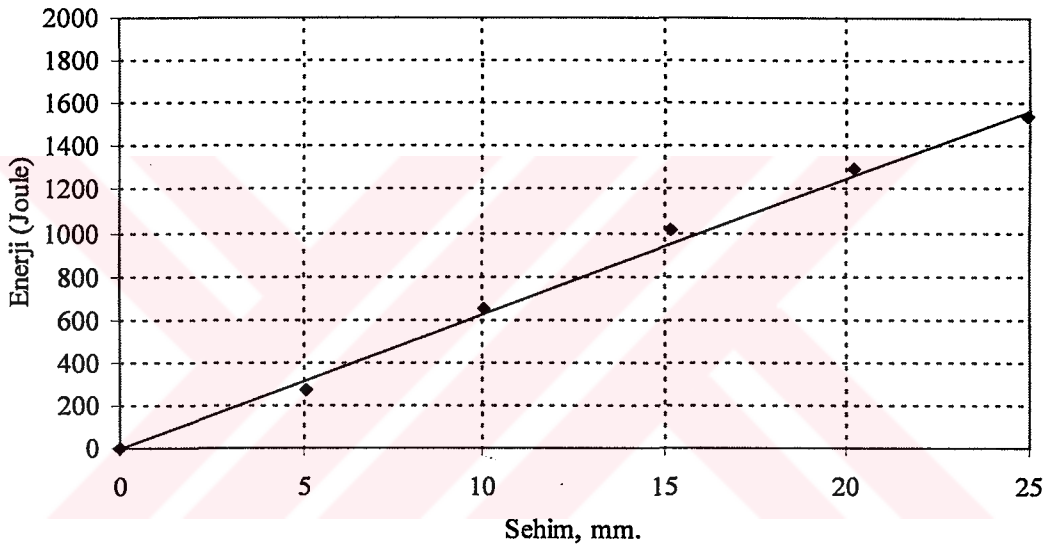
Şekil B.53. Su/çimento=0.70, L/d=65 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



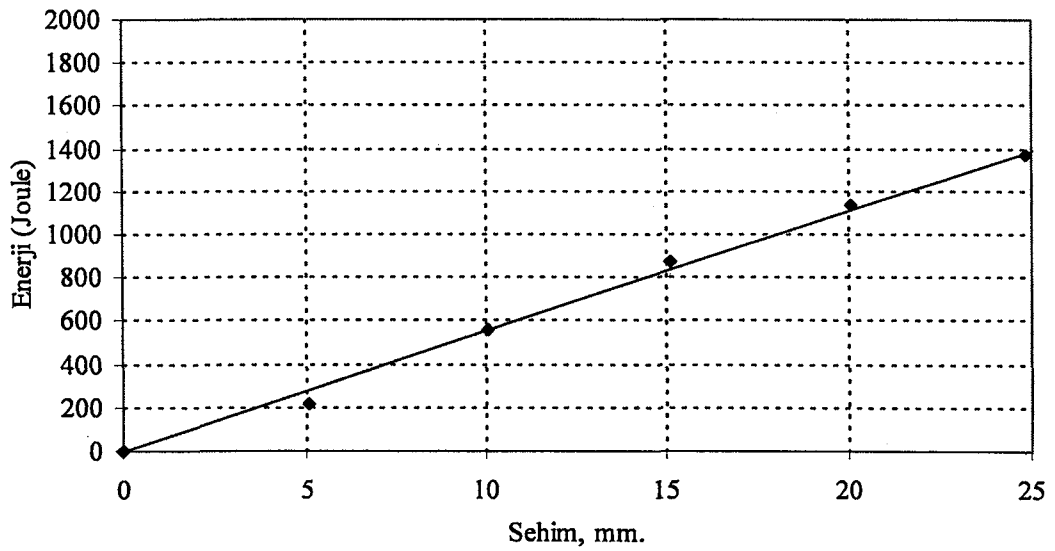
Şekil B.54. Su/çimento=0.70, L/d=65 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

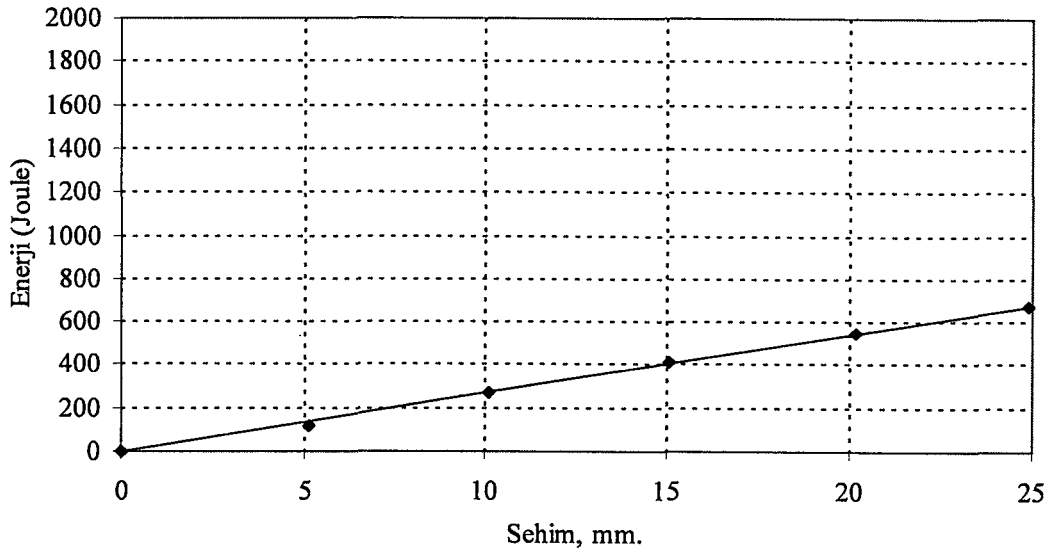


a) Plak No.2

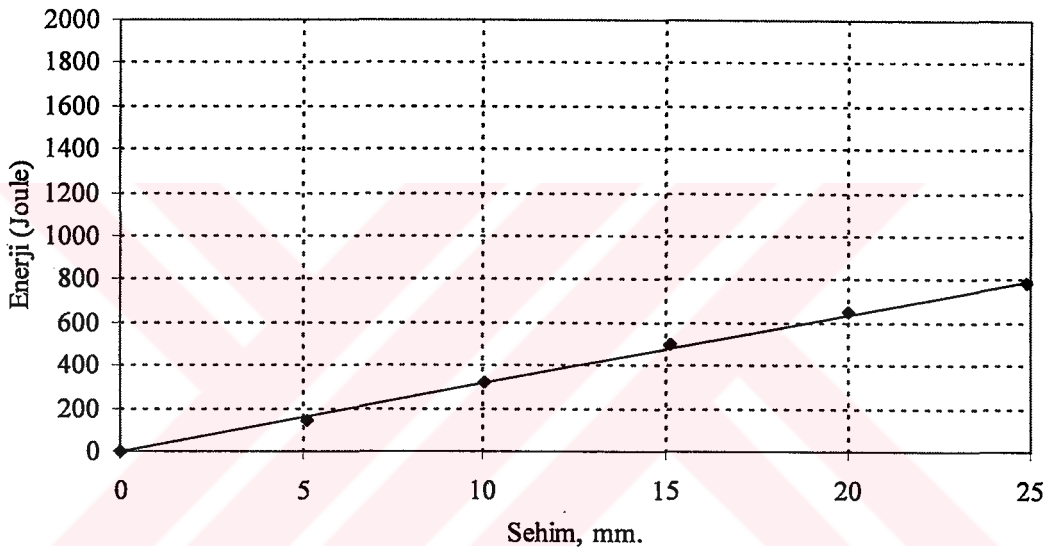


c) Plak No.3

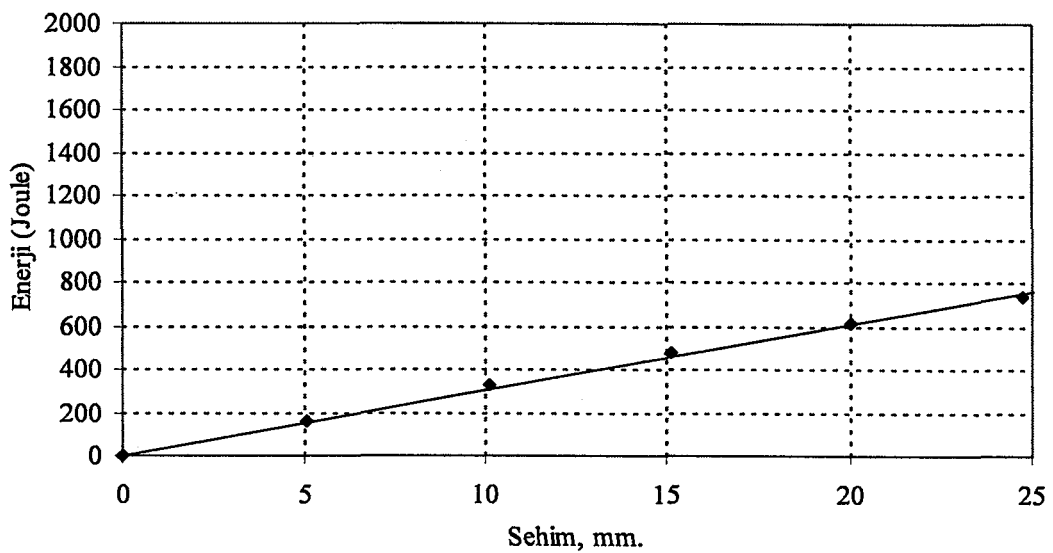
Şekil B.55. Su/çimento=0.70, L/d=65 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

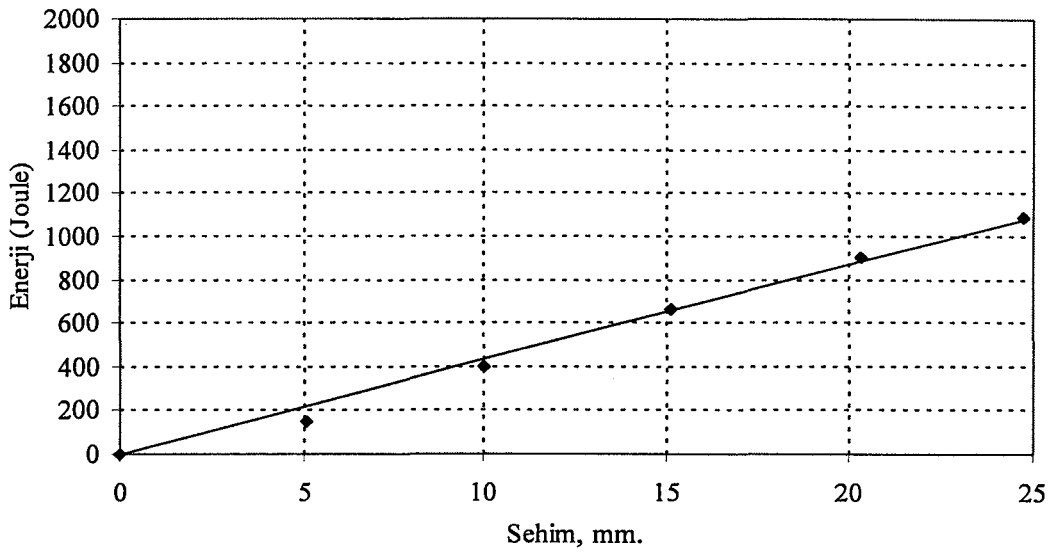


b) Plak No.2

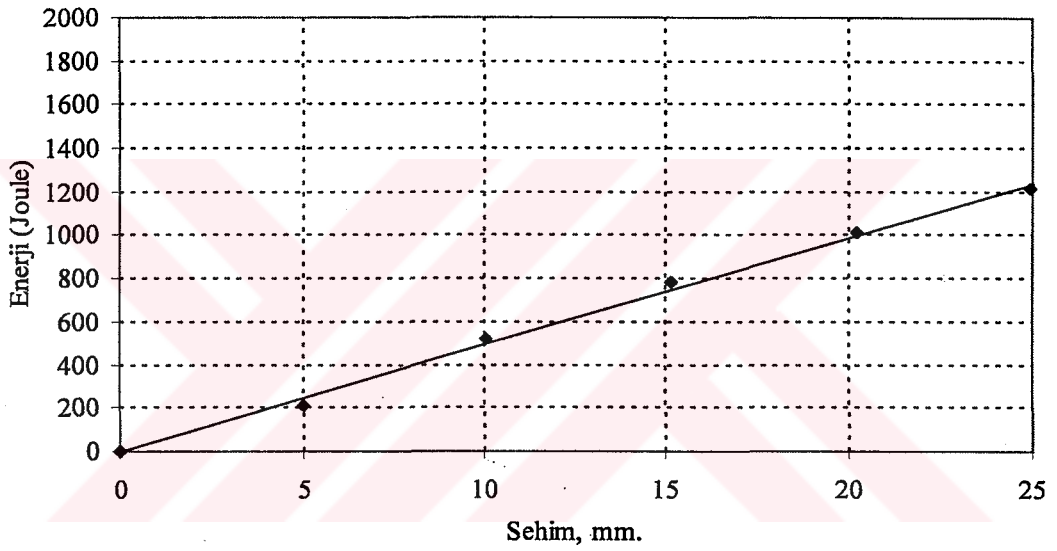


c) Plak No.3

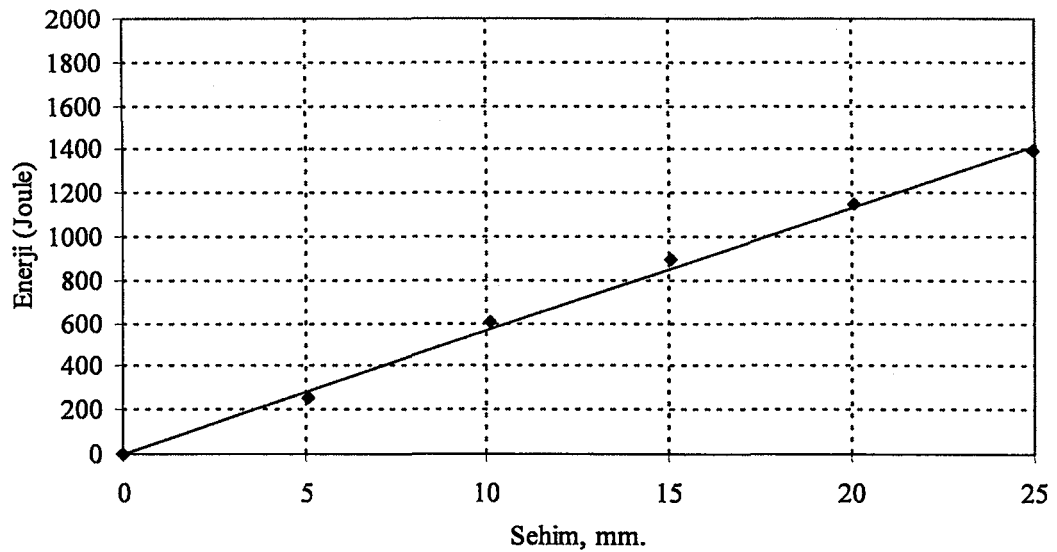
Şekil B.56. Su/çimento=0.70, L/d=80 ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1

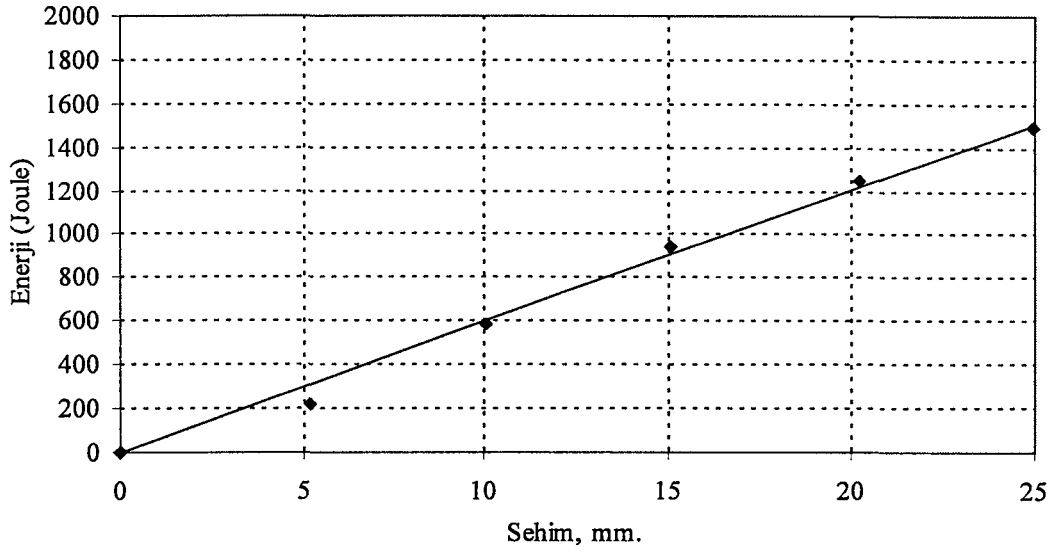


b) Plak No.2



c) Plak No.3

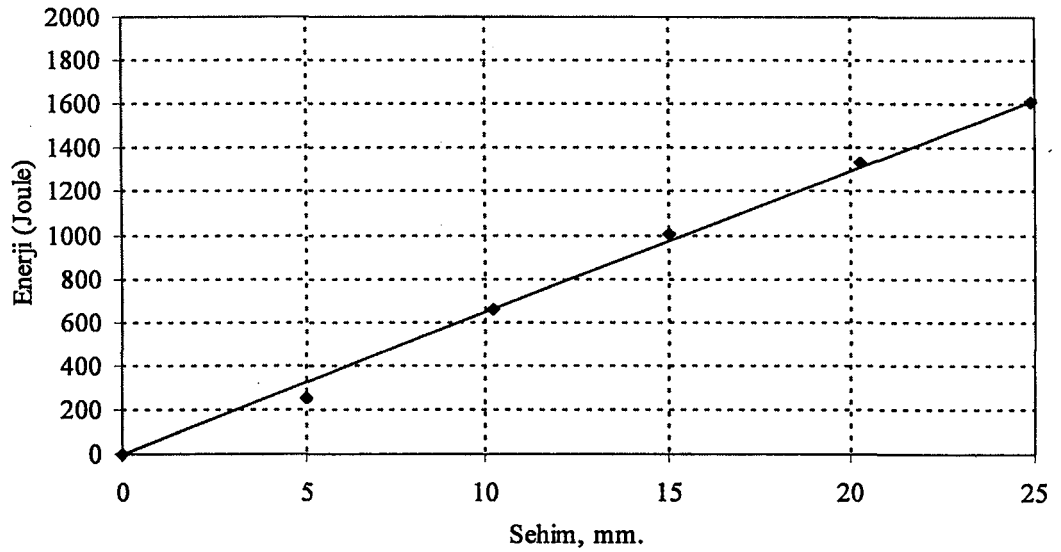
Şekil B.57. Su/çimento=0.70, L/d=80 ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.



a) Plak No.1



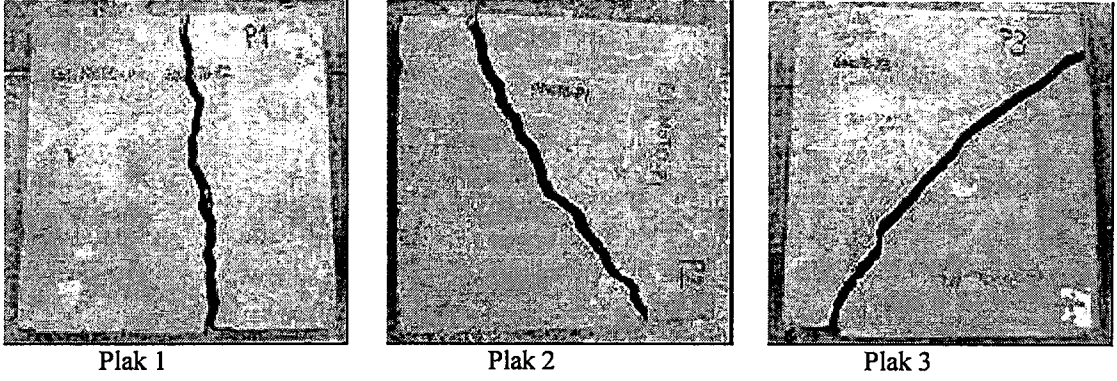
b) Plak No.2



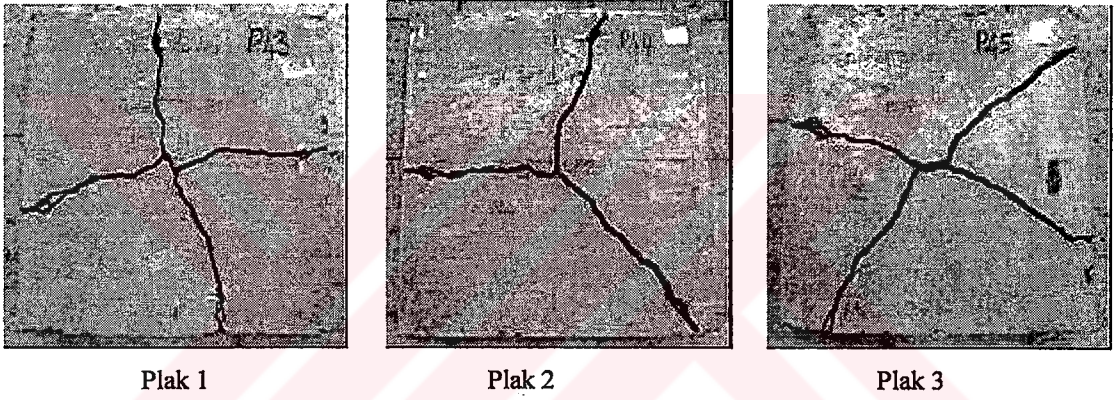
c) Plak No.3

Şekil B.58. Su/çimento=0.70, L/d=80 ve $V_f=60 \text{ kg/m}^3$ için enerji-sehim eğrileri.

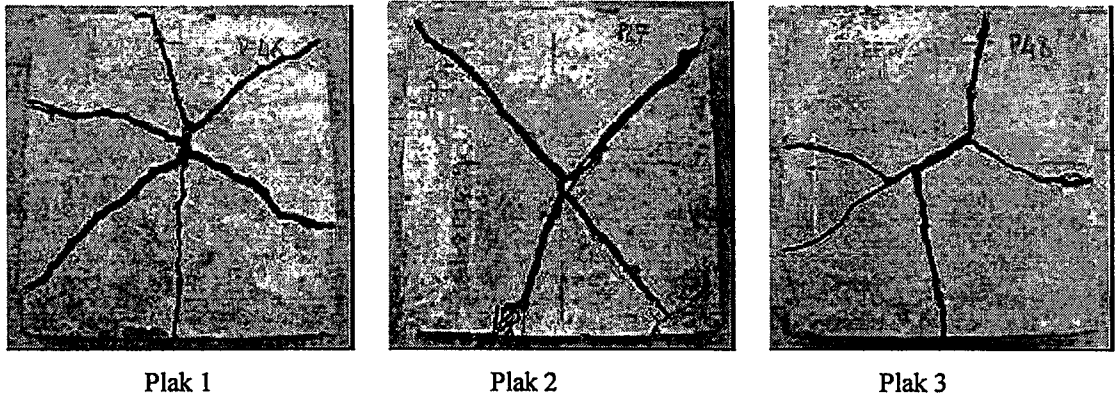
EK C: Plak Numunelerin Deney Sonrası Kırılma Şekilleri.



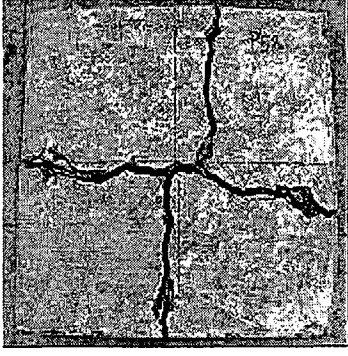
Şekil C.1. Su/çimento=0,45 olan kontrol grubu plak numunelerinin kırılma şekilleri.



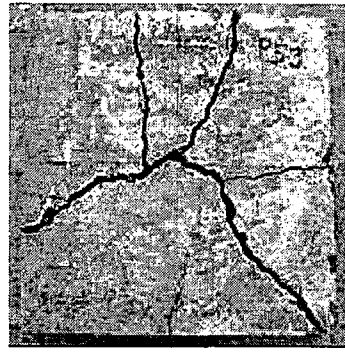
Şekil C.2. Su/çimento=0,45, $L/d=55$ ve $V_f=20 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



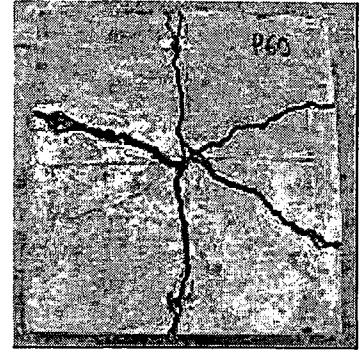
Şekil C.3. Su/çimento=0,45, $L/d=55$ ve $V_f=40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

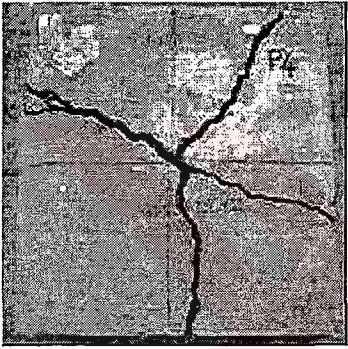


Plak 2

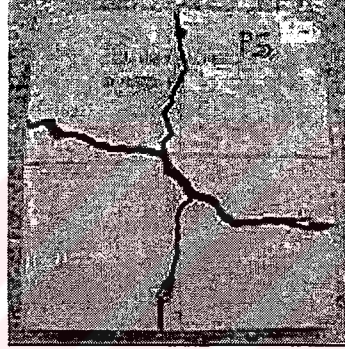


Plak 3

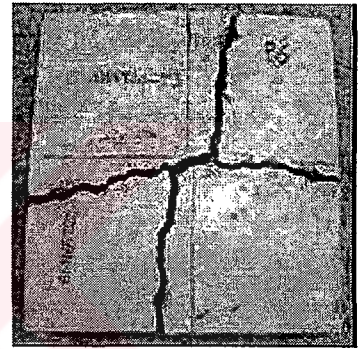
Şekil C.4. Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

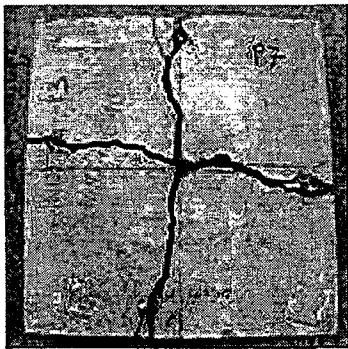


Plak 2

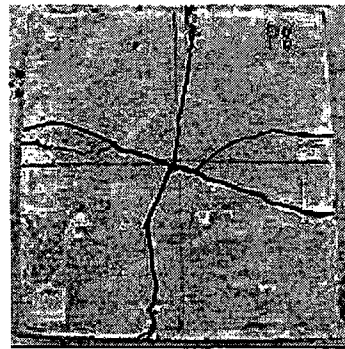


Plak 3

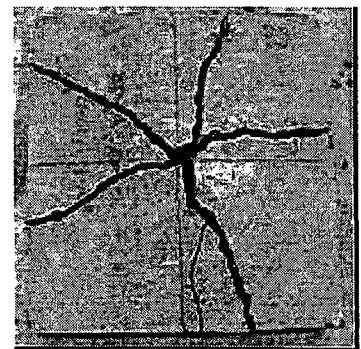
Şekil C.5. Su/çimento=0,45, L/d=65 ve $V_f = 20 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

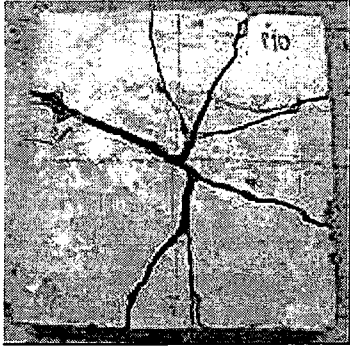


Plak 2

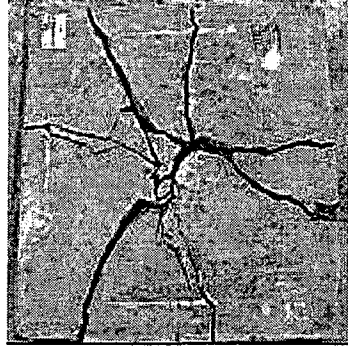


Plak 3

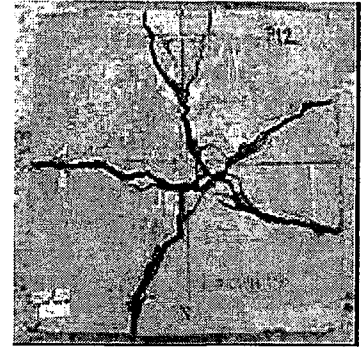
Şekil C.6. Su/çimento=0,45, L/d=55 ve $V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

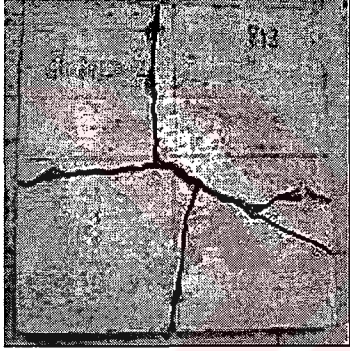


Plak 2

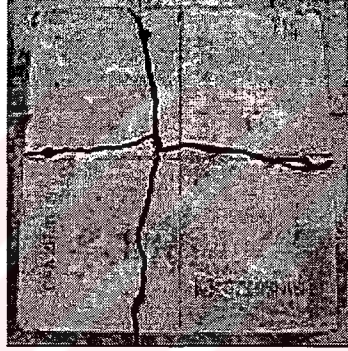


Plak 3

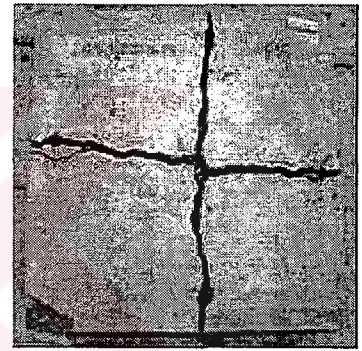
Şekil C.7. Su/çimento=0,45, $L/d=65$ ve çelik tel içeriği= 60 kg/m^3 olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

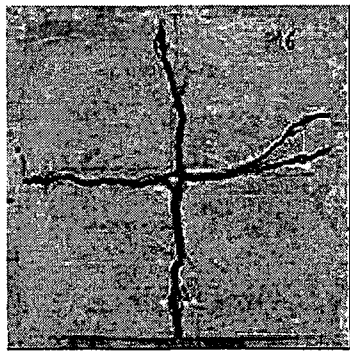


Plak 2

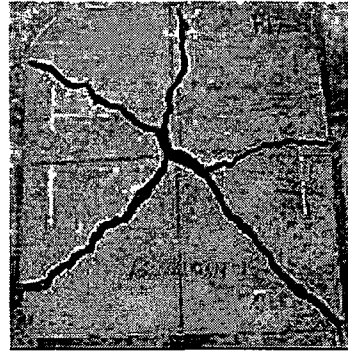


Plak 3

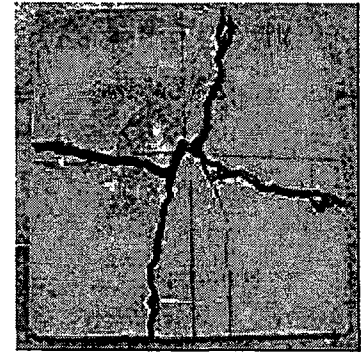
Şekil C.8. Su/çimento=0,45, $L/d=80$ ve çelik tel içeriği= 20 kg/m^3 olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

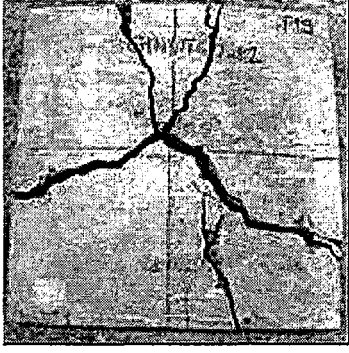


Plak 2

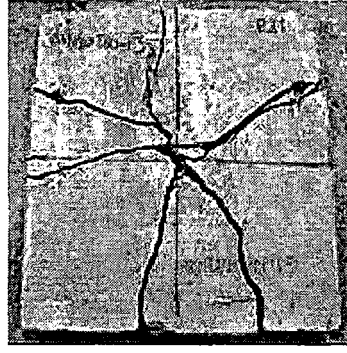


Plak 3

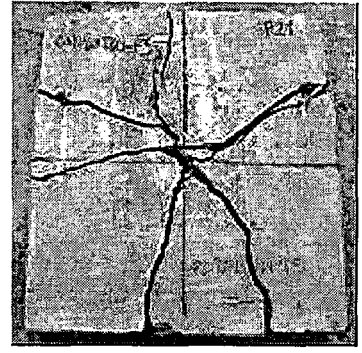
Şekil C.9. Su/çimento=0,45, $L/d=80$ ve $V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

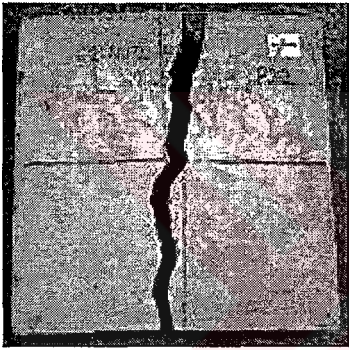


Plak 2

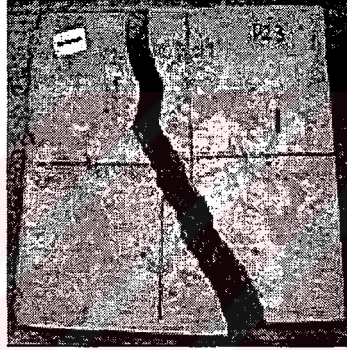


Plak 3

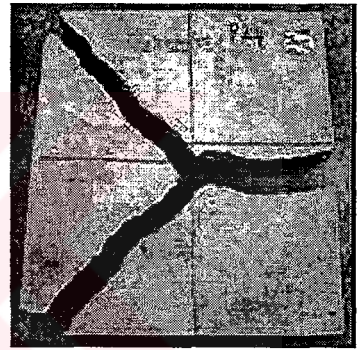
Şekil C.10. Su/çimento=0,45, $L/d=80$ ve $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

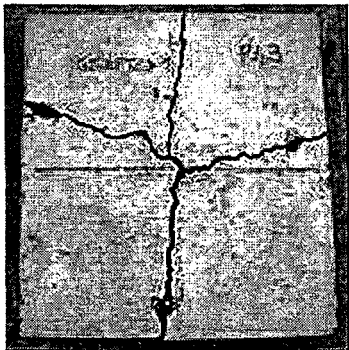


Plak 2

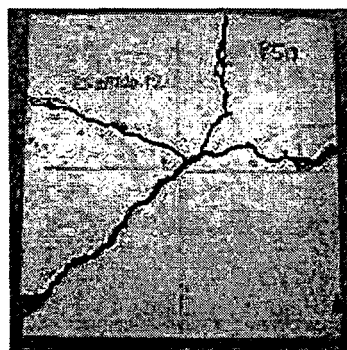


Plak 3

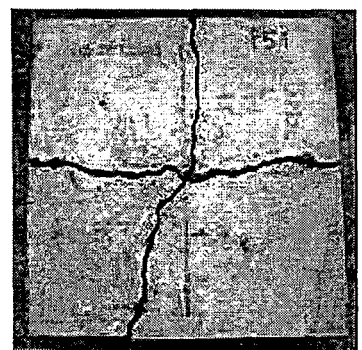
Şekil C.11. Su/çimento=0,70 olan kontrol grubu plak numunelerinin kırılma şekilleri.



Plak 1

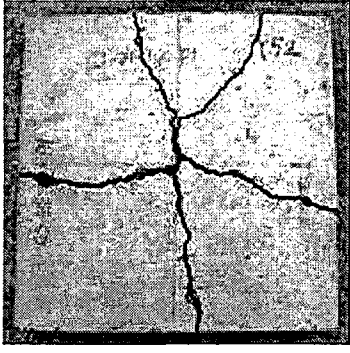


Plak 2



Plak 3

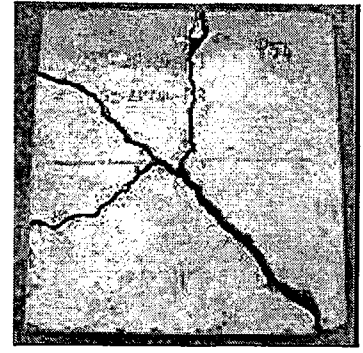
Şekil C.12. Su/çimento=0,70, $L/d=55$ ve $V_f = 20 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

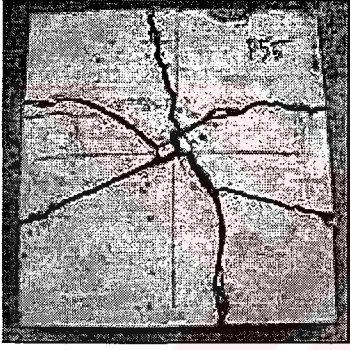


Plak 2

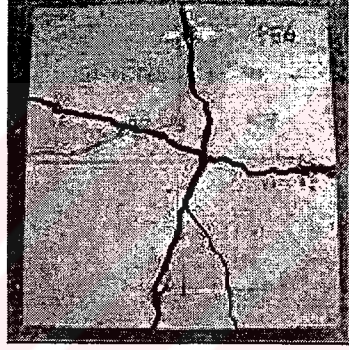


Plak 3

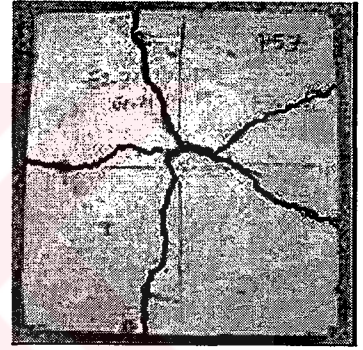
Şekil C.13. Su/çimento=0,70, $L/d=55$ ve $V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1



Plak 2

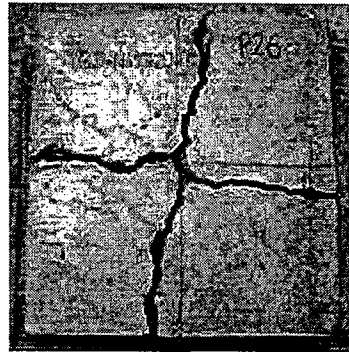


Plak 3

Şekil C.14. Su/çimento=0,70, $L/d=55$ ve $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1



Plak 2

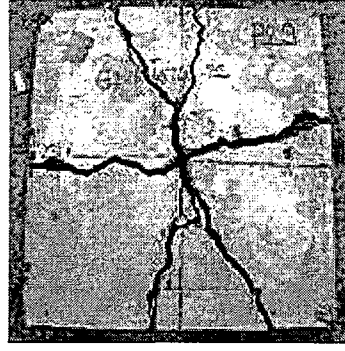


Plak 3

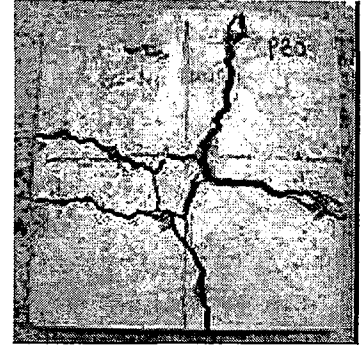
Şekil C.15. Su/çimento=0,70, $L/d=65$ ve $V_f = 20 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

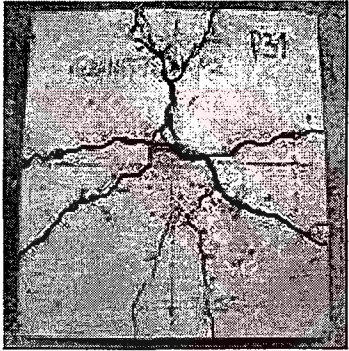


Plak 2

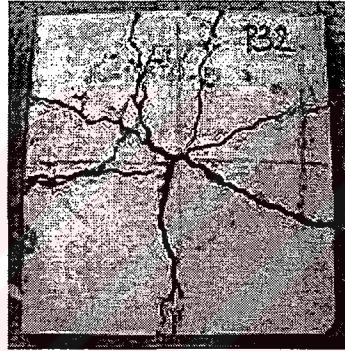


Plak 3

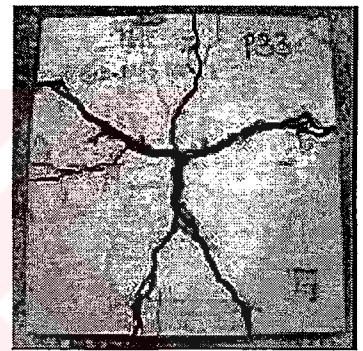
Şekil C.16. Su/çimento=0,70, $L/d=65$ ve $V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

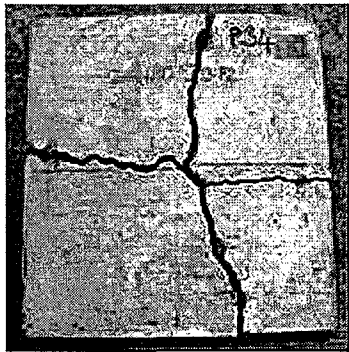


Plak 2



Plak 3

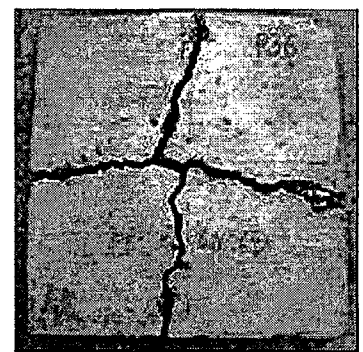
Şekil C.17. Su/çimento=0,70, $L/d=65$ ve $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

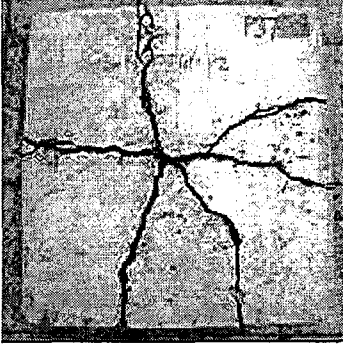


Plak 2

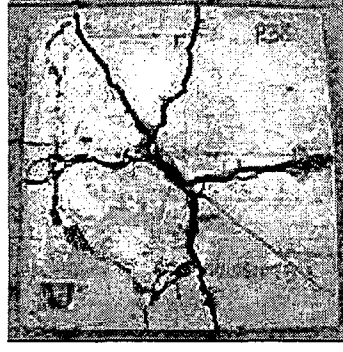


Plak 3

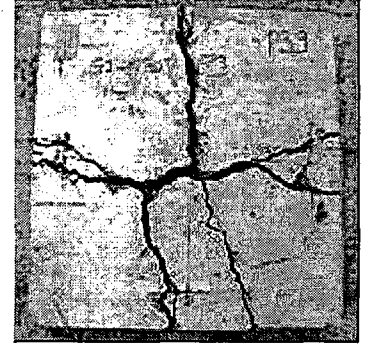
Şekil C.18. Su/çimento=0,70, $L/d=80$ ve $V_f = 20 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1

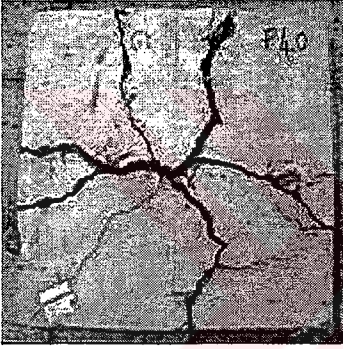


Plak 2



Plak 3

Şekil C.19. Su/çimento=0,70, $L/d=80$ ve $V_f = 40 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.



Plak 1



Plak 2



Plak 3

Şekil C.20. Su/çimento=0,70, $L/d=80$ ve $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$ olan plak numuneleri kırılma şekilleri.

ÖZGEÇMİŞ

1970 yılında Yozgat'ta doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Yozgat'ta tamamladı. 1993 yılında Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun olduktan sonra aynı yıl araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 1996 yılında Yüksek Lisansını Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Anabilim dalında tamamladı. 1996- 1997 yılları arasında kısa dönem olarak askerlik görevini tamamladı. Halen Erciyes Üniversitesi Yozgat Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. İngilizce bilmektedir. Evli ve 1 çocuğu vardır.

