

**T.C.  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**ÇELİK TEL KANCA TİPİNİN BETONLARIN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Eyüp TAŞKAN**

**Tez Danışmanı  
Yrd. Doç. Dr. Yuşa ŞAHİN**

**Yozgat 2017**



**T.C.  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**ÇELİK TEL KANCA TİPİNİN BETONLARIN  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Eyüp TAŞKAN**

**Tez Danışmanı  
Yrd. Doç. Dr. Yuşa ŞAHİN**

**Bu çalışma, Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi  
tarafından 2015 FBE/T213 kodu ile desteklenmiştir.**

**Yozgat 2017**

**T.C.**  
**BOZOK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEZ ONAYI**

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı 70110713009 numaralı öğrencisi Eyüp TAŞKAN'ın hazırladığı “**Çelik Tel Kanca Tipinin Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 12/05/2017 Cuma günü saat 10:00'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/~~oy çokluğu~~ ile karar verilmiştir.

**Başkan** : Prof. Dr. Fatih ALTUN

**Jüri Üyesi (Danışman)** : Yrd. Doç. Dr. Yuşa ŞAHİN

**Jüri Üyesi** : Yrd. Doç. Dr. Polat ÖZYİĞİT

**ONAY:**

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun ~~30~~..~~05~~..~~17~~ tarih ve ~~15~~.. sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

~~30~~..~~05~~..~~2017~~

**Doç. Dr. Fuat KÖKSAL**  
**Müdür**

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	4
2.1. Çelik Tel Donatılı Betonlar .....	5
2.1.1. Betonda Kullanılan Çelik Teller .....	5
2.1.2. Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları .....	8
2.2. Çelik Tellerin Taze Beton Özelliklerine Etkileri .....	11
2.3. Çelik Tellerin Sertleşmiş Betonların Mekanik Özelliklerine Etkileri.....	14
2.3.1. Basınç Dayanımı .....	20
2.3.2. Elastisite Modülü .....	22
2.3.3. Çekme Dayanımı.....	24
2.3.4. Yarmada Çekme Dayanımı .....	25
2.3.5. Eğilme Dayanımı .....	26
2.3.6. Darbe ve Yorulma Dayanımı .....	27
2.3.7. Tokluk .....	28
2.3.8. Korozyon.....	29
2.3.9. Sünme ve Büzülme .....	30
2.3.10. Aşınma Erozyon ve Kavitasyon Direnci.....	31
2.3.11. Donma-Çözülme .....	32
2.4. Çelik Tel Donatılı Betonların Performansına Etki Eden Faktörler.....	33
2.4.1. Çelik Tel Özelliklerinin Etkisi .....	33
2.4.1.1. Çelik Tel Türü ve Tipi.....	33
2.4.1.2. Çelik Tel Miktarı.....	36
2.4.1.3. Çelik Tel Uzunluğu, Çapı ve Narinliği .....	39
2.4.1.4. Çelik Tel Yönlenmesi .....	42

2.4.2. Matris Bileşiminin Etkisi .....	43
2.4.3. Karışım Özellikleri, Numune Boyutu ve Deney Yönünün Etkisi.....	44
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>46</b>
3.1.Kullanılan Malzemeler .....	46
3.1.1. Çimento .....	46
3.1.2. Agregası .....	46
3.1.3. Mineral Katkı .....	48
3.1.4. Kimyasal Katkı .....	48
3.1.5. Çelik Tel.....	48
3.2.Beton Karışımları .....	50
3.3.Deneysel Yöntemler.....	51
3.3.1. Geleneksel Beton Deneyleri ve Standartları .....	51
3.3.2. Eğilmede Çekme Dayanımının Tayini.....	51
3.4. Deney Sonuçları .....	55
3.4.1. Taze Beton Deney Sonuçları.....	55
3.4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları.....	56
<b>4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....</b>	<b>59</b>
4.1.Taze Beton Deney Sonuçları.....	59
4.1.1. Çökme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	59
4.1.2. Vebe Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	60
4.1.3. Birim Ağırlık Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	61
4.1.4. Sıcaklık Değerlerinin Kontrol Edilmesi.....	64
4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları .....	65
4.2.1. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü .....	65
4.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı .....	68
4.2.3. Eğilmede Deneyi.....	69
4.2.3.1. Yük-sehim eğrileri .....	70
4.2.3.2. Eğilme dayanımı ve ilk tepe dayanımı.....	77
4.2.3.3. Artık gerilmeler .....	80

4.2.3.4. Tokluk .....	82
4.2.3.5. Eşdeğer eğilme gerilme oranı.....	85
<b>5. GÖRÜNTÜ ANALİZİ ÇALIŞMALARI .....</b>	<b>88</b>
5.1. Görüntü Analizi Literatür.....	88
5.2. Görüntü Analizi İle Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	91
5.2.1. Görüntü Analizi İçin Numunelerin Hazırlanması .....	91
5.2.2. Kamera Ayarları ve Fotoğraf Çekim Yöntemi .....	92
5.2.3. Görüntülerin Bilgisayar Desteği İle İşlenmesi.....	93
5.2.4. Görüntü Analizi Sonuçları İle Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	97
<b>6. SONUÇLAR .....</b>	<b>101</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>103</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>113</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>122</b>

# ÇELİK TEL KANCA TİPİNİN BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Eyüp TAŞKAN

Bozok Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

2017; Sayfa: 122

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Yuşa ŞAHİN

## ÖZET

Betonların mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla lif kullanımı uzun zamandır yapılan yaygın bir uygulamadır. Lif olarak çeşitli malzemeler kullanılabilmeyle beraber üstün mekanik özellikleri dolayısıyla çelik teller daha yüksek performans istenilen uygulamalarda tercih edilmektedir. Çelik tellerin uzunluğunun, narinliğinin, miktarının, dayanımının betonlar üzerindeki etkileri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Son yıllarda yapılan araştırma sonuçları ve teknolojinin gelişmesiyle çelik tel çeşitleri artmış ve farklı kanca tipine sahip çelik teller üretilmiştir.

Tez kapsamında, çelik tel özellikleri ve miktarı farklı olan betonlar üzerinde bir deneysel çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmada, 3 farklı kanca tipi ve dayanıma sahip çelik teller (3D, 4D ve 5D) 4 farklı miktarda (15, 30, 45, 60 kg/m<sup>3</sup>) 3 farklı basınç dayanımdaki (C40/50, C50/60 ve C80/95) betonlara katılmıştır. Elde edilen betonlar üzerinde basınç dayanımı, elastisite modülü ölçümü, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmış ve betonlara ait mekanik özellikler belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen verilerle çelik tel kanca tipinin betonların mekanik özellikleri üzerine etkisi ortaya konmuştur. Ayrıca beton numunelerden alınan kesitler üzerinde yapılan görüntü analizleri ile mekanik özellikler arasında ilişkiler incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Beton, çelik tel, kanca tipi, mekanik özellikler, görüntü analizi.



# **EFFECT OF THE TYPE OF HOOKED-END STEEL FIBERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETES**

**Eyüp TAŞKAN**

**Bozok University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering  
Master of Science Thesis**

**2017; Page: 122**

**Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Yuşa ŞAHİN**

## **ABSTRACT**

The addition of fibers have been long termed and widely used application in order to increase of mechanical properties of concretes. Steel fibers are generally used when high performance is required, due to their superior mechanical properties. Effect of the amount, length, aspect ratio, and strength of fibers on the concrete properties are investigated by numerous studies. According to research results and development in technology, type of fibers were increased and new fibers with different hooked-ended were produced.

In the scope of the thesis, an experimental study was carried out on the mechanical properties of concrete including hooked-ended steel fibers. In experiments, three different steel fibers which have a different type of hooked-ends and strengths were added in three different concretes (C40/50, C50/60 ve C80/95) in 4 different ratios (15, 30, 45, 60 kg/m<sup>3</sup>). The compressive, modulus of elasticity, splitting tensile and bending tests were conducted on concretes. Effects of type of steel fiber hooked-end on different concretes are revealed by the experiments. Also, image analyses were performed on the concrete sections and relationship between mechanical properties and the image analysis were investigated.

**Keywords:** Concrete, steel fiber, hooked-end, mechanical properties, image analysis.

## TEŞEKKÜR

Her Őeyden önce gerek yüksek lisans eğitimim süresince ve gerekse tüm tez çalışmalarımın başından sonuna her aşamasında bilgi ve tecrübeleri ile her konuda yardımcı olan değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Yuşa ŞAHİN'e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Yüksek lisans eğitim süresi boyunca üzerimde emekleri bulunan Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde görevli değerli hocalarıma, eğitim sürem boyunca sağladıkları kolaylıklardan dolayı Yozgat İl Özel İdaresi Proje ve Yapım İşleri Bürosunda çalışan tüm iş arkadaşlarıma ve Büro Yöneticimiz Sayın İzzet GÖK'e, deneysel çalışmalarımın tamamında yardımcı olan İnŐ. Y. Müh. Yunus GÜNDÜZ'e ve Hayrullah GÜLER'e teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında maddi manevi her konuda tüm desteklerini esirgmeden sunan sevgili babam Gültekin TAŞKAN'a, sevgili annem Sultan TAŞKAN'a ve kız kardeşlerim Gamze BOLAT'a ve Ümmügülsüm TAŞKAN'a sonsuz teşekkür ederim.

## TABLolar LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Tablo 2.1</b> Normal betona kıyasla ÇTDB'lerin genel özellikleri [27]. .....	16
<b>Tablo 3.1.</b> Çimento Özellikleri .....	47
<b>Tablo 3.2.</b> Agrega Özellikleri .....	47
<b>Tablo 3.3.</b> Silis Dumanının Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri .....	49
<b>Tablo 3.4.</b> Çelik Tellerin Özellikleri .....	49
<b>Tablo 3.5.</b> Beton Karışımları ve Bileşen Miktarları (kg/m <sup>3</sup> ) .....	50
<b>Tablo 3.6.</b> Uygulanan Deneyler ve İlgili Standartlar .....	51
<b>Tablo 3.7.</b> Taze Beton Deney Sonuçları .....	55
<b>Tablo 3.8.</b> Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları .....	56
<b>Tablo 3.9.</b> Eğilmede Çekme Dayanımı Deney Sonuçları .....	57
<b>Tablo 3.9.</b> Eğilmede Çekme Dayanımı Deney Sonuçları .....	58
<b>Tablo 4.1.</b> Yarmada Çekme Dayanımlarının Ortalama Artış Miktarları .....	69
<b>Tablo 5.1.</b> Beton Kesitlerindeki Tel Sayıları .....	97

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Düz, Pürüzsüz Yüzeyleli Tel [16] .....	6
Şekil 2.2. Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller [16] .....	7
Şekil 2.3. Sonu kancalı teller [16].....	7
Şekil 2.4. Taze Beton İçerisindeki Çelik Tellerin Dağılımı.....	12
Şekil 2.5. Farklı Lif Boyutlarının Çatlak Köprüleme Etkisi [40]. .....	15
Şekil 2.6. Çelik Tel Donatılı Beton Kirişlerin Tipik Yük-Sehim Eğrileri [28]. .....	17
Şekil 2.7. ÇTDB’lerde Tel İçeriğinin Etkisi [24]. .....	21
Şekil 2.8. ÇTDB’lerde Tel Narinliğinin Etkisi [24]. .....	21
Şekil 2.9. Hacimce %3’den Daha Az Çelik Tel İçeren ÇTDB’lerin Tipik Çekme Gerilmesi-Çekme Şekil Değıştirme Eğrisi [66]. .....	25
Şekil 2.10. Çelik Tel Tipleri ve Kesitleri [2] .....	34
Şekil 2.11. Yük-Sehim Eğrisine Değışik Çelik Tel Tiplerinin Etkisi [91] .....	36
Şekil 2.12. Yük-Sehim Eğrisine Farklı Çelik Tel Hacminin Etkisi [90] .....	37
Şekil 2.13. Çelik Tel Hacminin Eğilme Dayanımına Etkisi [97] .....	38
Şekil 2.14. ÇTDB’lerde Narinliğinin Etkisi [102].....	40
Şekil 2.15. ÇTDB’lerde Tel İçeriğı ve Narinliğinin Etkisi [67] .....	41
Şekil 2.16. Yük-Sehim Eğrisine Silis Dumanı Eklenmesinin Etkisi [90].....	43
Şekil 2.17. Numune Boyutunun Basınç Dayanımına Etkisi [115] .....	45
Şekil 3.1. Agrega Karışımına Ait Granülometri Eğrisi .....	48
Şekil 3.2. Çelik Teller .....	49
Şekil 3.3. Yükleme Düzeneğı .....	51
Şekil 3.4. Tipik Yük-sehim Grafiğı ve Artık Gerilme Noktaları.....	53
Şekil 4.1. Çökme Deneyi Sonuçları.....	59
Şekil 4.2. Vebe Deneyi Sonuçları .....	60
Şekil 4.3. Teorik ve Deneysel Birim Ağırlık Değeri .....	61
Şekil 4.4. Taze ve Sertleşmiş Birim Ağırlık Değeri .....	62
Şekil 4.5. Teorik ve Sertleşmiş (Silindir) Birim Ağırlık Değeri.....	63
Şekil 4.6. Sıcaklık Değeri .....	65

<b>Şekil 4.7.</b> Basınç Dayanımı Değerleri.....	66
<b>Şekil 4.8.</b> Elastisite Modülü Değerleri.....	67
<b>Şekil 4.9.</b> Yarmada Çekme Dayanımı Değerleri .....	68
<b>Şekil 4.10.</b> Yarmada Çekme Dayanımı Değerleri (Beton Dayanımı ve Tel Kanca Tipi Değerlendirmeleri) .....	69
<b>Şekil 4.11.</b> L Kodlu Karışımlarda Tel Miktarı Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri .....	70
<b>Şekil 4.12.</b> N Kodlu Karışımlarda Tel Miktarı Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri.....	71
<b>Şekil 4.13.</b> H Kodlu Karışımlarda Tel Miktarı Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri.....	72
<b>Şekil 4.14.</b> L Kodlu Karışımlarda Tel Kanca Tipi Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri... 73	
<b>Şekil 4.15.</b> N Kodlu Karışımlarda Tel Kanca Tipi Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri .. 74	
<b>Şekil 4.16.</b> H Kodlu Karışımlarda Tel Kanca Tipi Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri .. 74	
<b>Şekil 4.17.</b> 3D Kanca Tipli Tellerin Kullanıldığı Karışımlarda Beton Dayanımının Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri.....	75
<b>Şekil 4.18.</b> 4D Kancalı Tipli Tellerin Kullanıldığı Karışımlarda Beton Dayanımının Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri.....	76
<b>Şekil 4.19.</b> 5D Kanca Tipli Tellerin Kullanıldığı Karışımlarda Beton Dayanımının Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri.....	76
<b>Şekil 4.20.</b> Eğilme Dayanımı Değerleri.....	77
<b>Şekil 4.21.</b> İlk Tepe Dayanımı Değerleri .....	78
<b>Şekil 4.22</b> İlk Tepe Yüğü ve Maksimum Yük Değerleri .....	80
<b>Şekil 4.23.</b> Artık Gerilme Değerleri.....	81
<b>Şekil 4.24.</b> Tokluk – Tel Miktarı .....	82
<b>Şekil 4.25.</b> Tokluk – Tel Kanca Tipi.....	83
<b>Şekil 4.26.</b> Tokluk – Beton Dayanımı .....	84
<b>Şekil 4.27.</b> Eşdeğer Eğilme Gerilme Oranı – Tel Miktarı .....	85
<b>Şekil 4.28.</b> Eşdeğer Eğilme Gerilme Oranı – Tel Kanca Tipi .....	86
<b>Şekil 4.29.</b> Eşdeğer Eğilme Gerilme Oranı – Beton Dayanımı .....	86
<b>Şekil 5.1.</b> Sayısallaştırılmış Resim [123].....	89
<b>Şekil 5.2.</b> Görüntü İşleme Genel Akım Şeması [124] .....	89
<b>Şekil 5.3.</b> Numunelerin Kesim İşlemi.....	91
<b>Şekil 5.4.</b> Fotoğraf Çekim İşlemi.....	93
<b>Şekil 5.5.</b> İşlenmemiş Fotoğraf Görüntüsü .....	94

<b>Şekil 5.6.</b> Görüntünün Ayarlanması .....	95
<b>Şekil 5.7.</b> Görüntünün Ayarlanması .....	96
<b>Şekil 5.8.</b> Görüntünün Ayarlanması .....	97
<b>Şekil 5.9.</b> Kesitteki Tel Sayısı İle Yarmada Çekme Dayanımı İlişkisi.....	98
<b>Şekil 5.10.</b> Kesitteki Tel Sayısı İle Eğilme Dayanımı İlişkisi .....	98
<b>Şekil 5.11.</b> Kesitteki Tel Sayısı İle Tokluk İlişkisi .....	99



## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>ACI</b>	: Amerikan Beton Enstitüsü
<b>ASTM</b>	: Amerikan Malzeme Testleri Birliği
<b>ÇAAD</b>	: Çatlak Ağzı Açılma Deplasmanı
<b>ÇTDB</b>	: Çelik Tel Donatılı Beton
<b>EN</b>	: Avrupa Standardı
<b>JSCE</b>	: Japon İnşaat Mühendisleri Birliği
<b>MPa</b>	: Megapaskal
<b>RPC</b>	: Reaktif Pudra Betonu
<b>RILEM</b>	: Uluslararası Yapı Malzemeleri, Sistemler ve Yapılar Laboratuvarları ve Uzmanları Birliği
<b>SD</b>	: Silis Dumanı
<b>TS</b>	: Türk Standardı
<b>YDB</b>	: Yüksek Dayanımlı Beton
<b>E</b>	: Elastik Modül
<b>E<sub>c</sub></b>	: ÇTDB Elastisite Modülü
<b>g</b>	: Yerçekimi İvmesi
<b>G<sub>F</sub></b>	: Kırılma Enerjisi
<b>I<sub>ch</sub></b>	: Karakteristik Boy
<b>V<sub>f</sub></b>	: Tel Hacmi
<b>L/d</b>	: Narinlik
<b>S/Ç</b>	: Su / Çimento oranı

## 1. GİRİŞ

Beton günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesi olma özelliğini korumaktadır. Betonun ekonomik ve dayanımlı olması yanında uzun süreli performansa (kalıcılık) sahip olması da istenir. Uzun açıklıklı köprülerin, yüksek binaların, yeraltı 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 malzemeler geleneksel taşıyıcı yapı malzemelerinden ayrılarak dayanıklılığı artırılmış olan “ yüksek performanslı malzemeler ” adı altında toplanmıştır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında bu tür malzemelere ihtiyaç giderek artmakta bazen süneklikte performansın bir ölçüsü olarak kabul edilmektedir [1].

Lif kullanımı yeni bir düşünce değildir. Eski zamanlarda samanların kullanıldığı killer kerpiç duvarların sıvasında kullanılmıştır. 20. yüzyılın son çeyreğinde lifli betonlar üzerinde birçok çalışma yapılmış ve bu konuda önemli mesafeler kaydedilmiştir. İlk çalışmalar 1963 yıllarında betonda cam lifi kullanımınıdır. Daha sonraki çalışmalarda ise farklı lif tiplerinin ve içeriklerinin etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda beton içerisinde süreksiz bir şekilde dağılmış olarak bulunan çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımı arttırdığı görülmüştür [1, 2]. Lif donatılı betonların ilk uygulamaları savunma düşüncesiyle sığınak türü yapılarda olmuştur. Günümüzde ise çoğunlukla püskürtme betonlar, saha betonları, endüstriyel zemin betonları, köprü ayakları ve prekast elemanlarda kullanılmaktadır [3].

Betonda kullanılan çelik tellerin uzunlukları 5-70 mm ve çapları 0,45 – 1 mm aralığında değişmektedir. Çelik tel kullanım miktarı ise hacimce % 0,25-2 ve ağırlıkça 20-160 kg/m<sup>3</sup> aralığında değişmektedir. Çelik tel kullanımının betonlar üzerindeki avantajı matris çatlamasından sonra görülmektedir. Ani göçmeyi önlemek



için yüksek enerji yutma kapasitesine sahip betonların üretilmesinde çelik tel kullanımı önemli bir yere sahiptir [4, 5]. 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 [6].

Yüksek Dayanımlı Betonların (YDB) en büyük sakıncası normal betonlara göre daha gevrek olmaları ve enerji yutma kapasitelerinin daha düşük olmasıdır [7, 8]. Dolayısıyla YDB'lerin 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.

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/m<sup>2</sup>'yi aşan yüksek performanslı betonlar üretilmektedir. Bu tür betonlar Reaktif Pudra Betonu (RPB) olarak adlandırılmakta, süneklikleri normal betonlarınkine kıyasla 300 kat daha fazla olabilmektedir [6, 8]. RPB'lerde en zayıf faz olan çimento hamuru-agrega ara yüzeyinin iyileştirilmesi ve boşlukların azaltılması için ultra incelikteki silis dumanı (mikrosilis) kullanılmakta ve yüksek dayanımlara ulaşabilmek için su/bağlayıcı oranları düşük tutulmaktadır. Bu betonların sünekliğini arttırmak için de kısa kesilmiş çelik teller kullanılmakta ve bazen taze halde sertleşme süresinin başlangıcında basınç altında ısıtılarak uygulanmaktadır [7].

Çelik tellerin kullanıldığı bir başka yapı malzemesi ise yüksek oranda çelik tel içeren çimento bulamacı olarak tanımlanan SIFCON'dur (matrisi; ince kum, silis dumanı, su ve çimentodan oluşan hacimce %20'ye kadar çelik tel içeren beton).

SIFCON' da kırılma enerjisi beton basınç dayanımına göre değişmekte olup normal betonunkinin 1340 katına kadar çıkmaktadır [6, 8].

Bu çalışma, farklı kanca tipine ve dayanıma sahip çelik tellerin farklı dayanımdaki betonlarda farklı miktarlarda kullanılmasıyla elde edilen ÇTDB'lerin mekanik özelliklerinin araştırılmasını konu almaktadır. Ayrıca, beton kesitlerinde görüntü analizleri ile elde edilen çelik tel sonuçları ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiler incelenmiştir.



## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Eski çağlarda üretilen yapı malzemelerinde ve yapılan uygulamalarda günümüzde lif olarak bilinen malzemeler kullanılmıştır. Eski Mısırlıların güneşte kurutulmuş tuğlaların üretiminde, tavan sıvalarında ve bunun gibi çoğu uygulamada saman, at yelesi gibi malzemeleri kullandıkları bilinmektedir [9]. Günümüzdeki betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için yaygın bir şekilde kullanılan yapay lifler, çok eski uygulamalarda kullanılan doğal liflerden ilham alınarak kullanıldığı bilinmektedir. Özellikle beton hamuruna eklenen cam, karbon, sentetik ve çelik lifler birçok beton özelliklerinin iyileştirilmesinde iyi sonuçlar vermiştir [10, 11].

Geleneksel beton diğer yapı malzemeleri ile kıyaslandığında en makul maliyet/dayanım özelliğine sahip olduğundan dolayı halen günümüzde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir.

Geçmişte insanlar üretmiş oldukları malzemelerde ve uygulamalarda günümüzde lif olarak tanımlanan malzemeler kullanmışlardır. Eski Mısır'daki insanların saman, at saçı gibi malzemeleri güneşte pişirilmiş tuğlaların üretiminde, tavan sıvalarında ve bunun gibi birçok uygulamada kullanmış oldukları bilinmektedir [9]. Doğal liflerin çok eski uygulamalarından ilham alınarak yapay liflerin günümüzdeki betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için yaygın bir şekilde kullanıldığı bilinmektedir. Özellikle betonda kullanılan cam, sentetik, karbon ve çelik lifler birçok beton özelliklerinin iyileştirilmesinde iyi sonuçlar vermiştir [10].

Yapısal beton diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında en düşük maliyet/dayanım özelliğine sahip olduğundan dolayı hala en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Betonun zayıf olan bazı yapısal özelliklerini iyileştirmek amacıyla, portland çimentosu, kimyasal ve mineral katkılarla birlikte beton karışımına doğrudan giren bir diğer bileşen olarak çelik ve karbon lifler kullanılmaktadır [12].

## **2.1. Çelik Tel Donatılı Betonlar**

Çelik tel donatılı beton (ÇTDB), geleneksel beton karışım bileşenleri olan agrega, hidrolük çimento ve su ile üretilen betonlara süreksiz çelik tel katılmasıyla elde edilen kompozit malzemedir. Ayrıca çelik tel donatılı betonlar, geleneksel betonla yaygın olarak kullanılan puzolanlar ve/veya katkı maddeleri de içerebilir [13].

Geleneksel betonların gevrek malzemeler olduğu ve sünek olmayan davranış sergiledikleri bilinmektedir. Bu yönleriyle çekme gerilmesi altında donatısız betonlar çatlar. Bu sorun çekme yüküne karşı koyacak donatı çubuklarının kullanılmasıyla 1800'lü yılların başında çözülmüştür.

Gevrek bir yapıya sahip olan geleneksel betonlar, aşınma, çekme, yorulma ve çatlak dayanımı sonrası yük taşıma kapasiteleri açısından zayıf özelliktedirler. Beton hamuruna çelik tellerin katılmasıyla betonun bu zayıf yönlerinin önemli ölçüde iyileştiği görülmüştür. Katılan bu çelik teller gevrek olan geleneksel betonun çekme şekil değiştirmesinde artış meydana getirerek betonun yarı-sünek davranış özelliği kazanmasını sağlar. Bundan dolayı betonun çatlama dayanımı ve tokluk özelliklerinde iyileşmeler elde edilir.

Geleneksel betonlarda çatlak kontrolünü sağlamak ve tepe yükü sonrası çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı mukavemet göstermek için çelik teller kullanılır. ÇTDB'lerin davranışını genel olarak eğilmedeki tokluğu ve eğilme dayanım özellikleri belirler. Çelik tellerin beton özellikleri üzerindeki katkıları, kullanılan çelik telin tipine, türüne, narinliğine, miktarına, beton içerisindeki dağılımına (yönlenmesine) ve telin matristen sıyrılma dayanımına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

### **2.1.1. Betonda Kullanılan Çelik Teller**

Geleneksel beton hamuruna katılan çelik tellerin tanımı tel boyunun eşdeğer tel çapına bölünmesiyle elde edilen boy/çap oranı olarak kabul edilir. Bu oran aynı zamanda tel narinliği olarak da ifade edilir [13]. Betonda kullanılan çelik lifler genellikle daire kesitlidir, bununla beraber dikdörtgen kesitli çelik teller de kullanılmaktadır. Yalın beton hamuruna katılan çelik tellerin boyları 30-60 mm,

çapları 0,5-1,0 mm arasında değişirken çekme dayanımları ise 345 - 2000 N/mm<sup>2</sup> arasında değişmektedir [6]. Uçları düz olan çelik tellere kıyasla uçları kancalı olan çelik tellerin sıyrılma dayanımları daha fazladır [14, 15].

Düşük karbonlu çelik ile üretilen teller; soğukta çekilen tellerin kesilmesiyle, çelik plakaların kesilmesiyle ve erimiş haldeki çelik potasından çıkarılarak üç farklı yöntemle elde edilirler. Çelik tel sınıfları ve tipleri TS 10513'e göre şu şekilde verilmektedir [16].

Çelik Sınıfları ve Tipleri;

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

B Sınıfı: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller;

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

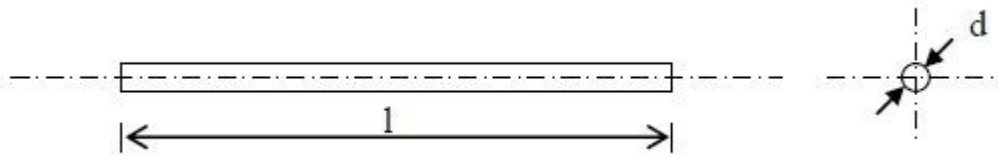
Tip 2: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller (Şekil 2.2.b)

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

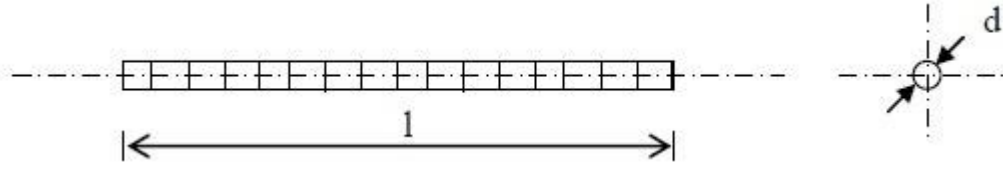
C Sınıfı: Sonu kancalı teller

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

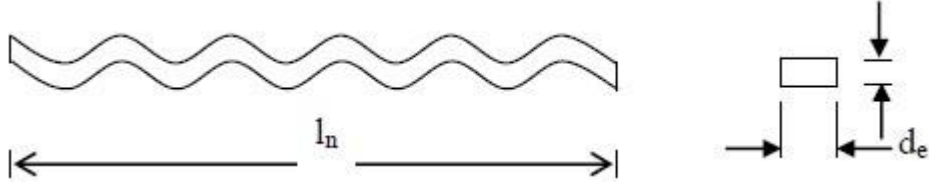
Tip 2: Tek ucu kancalı teller (Şekil 2.3.b)



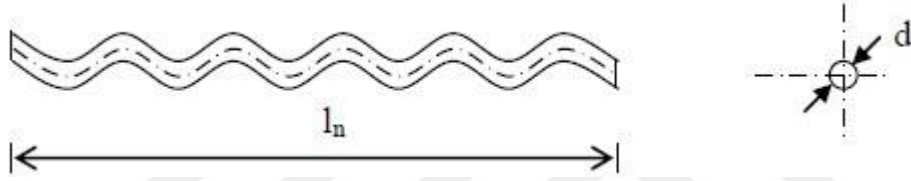
Şekil 2.1. Düz, Pürüzsüz Yüzeyle Tel [16]



a) Üzerinde girintiler ve çıkıntılar oluşturulmuş tel

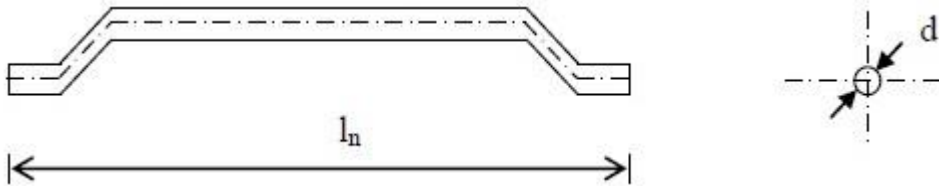


b) Uzunluğu boyunca dalgalı teller

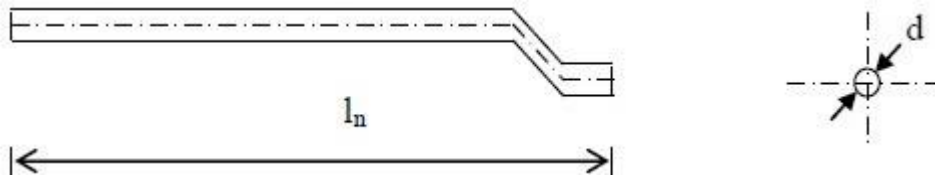


c) Ay biçimi teller

**Şekil 2.2.** Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller [16]



a) İki ucu kancalı teller



b) Bir ucu kancalı teller

**Şekil 2.3.** Sonu kancalı teller [16]

### 2.1.2. Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları

Geleneksel betonlara belirli oranlarda çelik tel ilave edilerek elde edilen çelik tel donatılı betonun yalın betona kıyasla çekme dayanımını artırmasının yanı sıra birçok mühendislik özelliklerinde de iyileştirmeler sağlamıştır. Çelik teller sadece betonun mekanik özelliklerine katkıda bulunmaz. Beton basınç ve çekme kuvvetleri etkisi altındayken tellerin çekme mukavemeti tam olarak kullanılmadan önce betonda oluşacak kılcal çatlakları önlediği veya geçirdiği için betona durabilite kazandırarak pek çok uygulamada tercih nedeni olmaktadır. Bunlarla beraber kesme, yorulma ve burulmaya karşı da dirençli bir sistem elde edilir. Çelik liflerin betona olan bir diğer katkısı da tokluğu artırarak yüksek değerlerdeki yükler altında betonun göçmesi sırasında patlamasını önlemesidir. Tüm bu özellikleri nedeniyle çelik tellerin betonda kullanılmasıyla kesitler daha da küçülerek malzemedan tasarruf sağlanır ve hatta bazı uygulamalarda asal donatıya bile gerek kalmaz.

ÇTDB'ler, 1940'lı yıllardan beri çoğu alanda uygulanan modern malzemeler arasında önemli konumda bulunmaktadır. Karayolları, havaalanları, endüstriyel zemin beton kaplamaları gibi önemli alanlarda kullanılmaktadır [17]. ÇTDB'lerin bu yaygın kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir.

a) Püskürtme beton uygulamaları; Çekme donatısı kullanmadan yüksek dayanımlı ve diğer hasırlı betonlara nazaran daha ince kaplama kalınlığına sahip betonlar elde edilir. Bununla beraber kırılmaya karşı yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olmasından dolayı daha büyük bir süneklik elde edilir. Kazıların ve temellerin desteklenmesi, kanal kaplamaları, köprü mesnetlerinin korunması, deforme olan su yapılarının ve köprülerin onarımı, bazı sığınakların kaplamaları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bunlarla birlikte kaya ve toprak zeminlerin şev stabilizasyonu veya istinat duvarı yapımlarında yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olmasından dolayı tercih edilmektedir.

b) Yol kaplamaları; Beton yol kaplamalarında ve geleneksel yolların temel döşemesinde yükleri alt temellere 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. Buna 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'lerin en belirgin avantajı normal betonlara kıyasla daha yüksek sünekliğe sahip olmalarıdır. Ayrıca yüksek kırılma enerjileri ile bağlantı boyunca çatlakların 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'lerde daha düşük olmaktadır. Ayrıca daha ince kaplama kalınlığına imkan vermesi ve donatının döşeme içerisine 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.

1. Yüksek sünekliğe 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 bozulmaya 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 sızmadığının azaltılması için yüzeylerinin ince kaplamalarında kullanılmaktadır. Bununla birlikte aşınma direncinin büyük olmasından dolayı kavitasyon hasarlarına karşı kaplama olarak kullanılabilir [19].

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 elemanının 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 kasalan ve kanaletlerdir [19].

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

g) Kabuk yapılar; Kesit kalınlıklarının azaltılmasına imkan verdiği için ince kabuk yapılarda, kubbelerde ve mimari açıdan kalınlığı sınırlı olan yapı elemanlarında kullanılmaktadır [20].

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

i) Patlama (infilak tesislerine) karşı; Genellikle normal donatı çubukları ile birlikte kullanıldığında, güç santralleri ve askeri tesislerin yapımında çok uygun kullanım arz etmektedir.

## **2.2. Çelik Tellerin Taze Beton Özelliklerine Etkileri**

Beton hamuruna ilave edilen çelik tellerin homojen olarak dağıtılması ve karışımın ardından da homojen dağılımın korunması çelik tellerin betona sağlayacağı katkıların önemli derecede artmasını sağlamaktadır. Bundan dolayı çelik tellerin beton matrisi içerisinde üniform bir şekilde dağılması önem arz etmektedir. Şekil 2.4'te taze betondaki çelik tellerin dağılımı gösterilmiştir. Taze betondaki çelik tellerin homojen dağıtılması, harmanlama ve karıştırma işlemleri esnasında gerçekleştirilmelidir. Bu işlem kimyasal katkılarla ve su azaltılmasıyla her zaman mümkün olmadığından agrega tane karışımının optimizasyonu da iyi bir çözüm oluşturmaktadır. Çimento hamuruna daha az ihtiyaç kalması için agrega karışımında maksimum yoğunluk sağlanmalıdır. Karışımın toplam rötresi, hamurun özelliklerine, çimento, su ve kimyasal katkı miktarına, sıcaklık ve agrega tipine bağlıdır [21] . Karışımındaki su miktarının düşük olması rötrenin daha az olmasını sağlamaktadır. Çimento hamuru ile agrega yüzeyi arasındaki bağı etkileyen en önemli faktörün su/çimento oranı olduğu söylenebilir. Düşük su/çimento oranlarında çimento hamuru ve agrega ara yüzeyinde düşük yoğunlukta bir bölge elde edilmesine karşılık, ara yüzeyin bölgesinin genişliği azalmaktadır.



**Şekil 2.4.** Taze Beton İçerisindeki Çelik Tellerin Dağılımı

Çelik tel türlerinden dairesel kesitli düz ve kancalı olanların betonun özellikleri üzerinde en etkin iyileştirmeyi yaptıkları yapılan çalışmalarla gözlenmiştir [2, 22, 23, 24]. Taze betona karıştırılan bu tellerin narinlik oranları 20~100 arasında ve hacimsel katılma oranları ise %0,5 ~ %2,5 arasında değişebilmektedir. Çelik tellerin katılma oranı arttıkça karışım içerisinde topaklandığı ve homojen bir dağılım sağlamadığı, hatta basınç dayanımının yalın betona kıyasla düşük olduğu gözlenmiştir [25, 26]. Karışımında çelik tel oranının yüksek tutulması tellerin topaklaşmasına sebebiyet verir ki bu da matris içerisinde büyük hava boşluklarına yol açar ve buna bağlı olarak betonda zayıf bölgeler oluşur. Çelik tellerin taze beton içerisinde topaklanmasını önlemek ve işlenebilirliği istenilen seviyede ayarlayabilmek için çelik tellerin narinliği ve miktarı için bir üst sınır konulmalıdır. Bu sınır değerler yapılan çalışmalarda çelik tel hacmi için genelde %2 ve narinlik için ise 100 olarak belirlenmektedir [27]. Ayrıca su azaltıcı katkılarla ÇTDB'lerin işlenebilirliği istenilen seviyede ayarlandığı gibi karışımında ince agrega kullanılması, çelik tel miktarının artırılması ve işlenebilirliğin sağlanması için uygun bir çözümdür.

Çelik tellerin betonun özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerden narinlik oranı, bir çelik telin geometrik özelliklerini tanımlamak için kullanılan sayısal bir parametredir. Dairesel kesitli teller için narinlik oranı tel boyunun tel çapına oranı, dairesel kesitli olmayanlar için ise eşdeğer lif çapına oranı olarak ifade edilir. Çelik

tellerin narinliği genellikle 20~100 arasında olurken boyları 6,4 mm. ile 76 mm. arasında değişiklik göstermektedir [13]. Çelik tel narinliği azaldığı takdirde çelik tel-matris bağı kritik hale gelir. Buna karşılık narinlik artarsa da topaklanma ve homojen dağılma gerçekleşmediğinden karıştırma problemi ortaya çıkmaktadır [28]. Çelik tel narinliğinin yüksek olmasıyla genelde beton üzerinde en önemli iyileştirmeler yapacağı beklense de narinlikle beraber karıştırma, yerleştirme ve sonlandırma işlemlerinde ortaya çıkan sorunlar nedeniyle sınırlandırmanın gerekliliği yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur [27, 29].

Mohammadi ve diğ. çalışmalarında karışımlarda kısa lif miktarının artmasının işlenebilirliği arttığını ortaya koymuşlardır [30].

Chang ve Chai birim hacimdeki çelik tel yüzey alanı artıka betonun işlenebilmesinin azaldığını ve çelik tellerin yeterli etki gösterebilmesi için su miktarının artırılması veya su azaltıcı katkı kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir [31].

Chenkui ve Guafon çelik tel boyu/kaba agrega boyutu oranının dayanıma etkisi araştırdı ve bu oranın 1,5 ve 2 arasında değiştini belirttiler. Bu oranlar dışında çelik telin etkisinin daha az olduğunu belirttiler. Bu araştırmada, 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 belirtilmektedir. Buna karşılık, çelik tel boyunun çok büyük olmasının işlenebilmenin olumsuz etkileyeceği ve buna bağlı olarak betonun özelliklerinde beklenen iyileştirmelerin sağlanamayacağını ifade ettiler. Ayrıca, tel boyunun 35 mm. den küçük olmaması şartıyla, çelik tellerin sadece ince agrega içeren betonların takviyesinde değil, maksimum tane çapı 40 mm'ye kadar olan betonların takviyesinde kullanılabileceğini belirttiler [32].

Yıldırım (1994) ve Taylor ve diğ. (1997) çelik tel kullanımının betonun işlenebilmeyi olumsuz etkilediğini, taze betonun çökme değerini düşürdüğünü ve VeBe işlenebilme süresini yükselttiğini belirttiler [33, 34]. Benzer olarak Eren ve

Çelik (1997) beton takviyesinde kullanılan çelik tel çapının artmasıyla betonun VeBe süresinin arttığını ve buna bağlı olarak işlenebilmenin azaldığını ifade ettiler [35].

Bayramov ve diğ. (2002) işlenebilirliği etkileyen en önemli faktörlerin çelik tel narinliği ve tel hacmi olduğunu ifade ettiler. Çelik tellerin taze betonun işlenebilirliğini azalttığını, özellikle uzun çelik tel kullanıldığında bu etkinin belirgin olarak görüldüğünü belirttiler. 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 sınırlandırmasının gerektiğini vurguladılar [36].

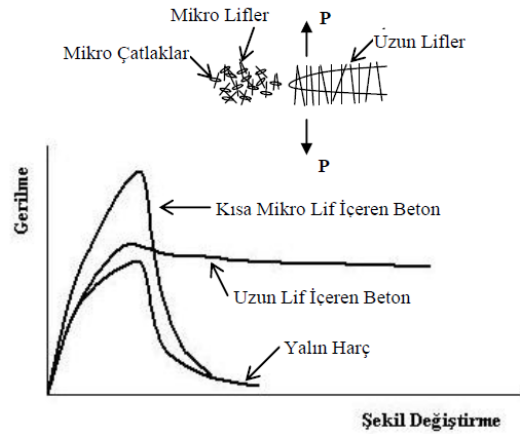
Soroushian ve Bayasi (1991) farklı tel tipleri kullanılarak yaptıkları çalışmalarda çelik tel tipinin taze betonun işlenebilmesini önemli ölçüde etkilediğini ifade ettiler. Çelik tel içeren taze betonların işlenebilmesinin kullandıkları bütün çelik tel tiplerinde normal betonlara kıyasla azaldığını, sadece kıvrımlı çelik tel içeren taze betonların işlenebilmesinde daha çok değişiklik olduğunu ve çelik tel narinliğinin belirli bir değerden fazla olmaması gerektiği sonucuna ortaya koydular [2].

### **2.3. Çelik Tellerin Sertleşmiş Betonların Mekanik Özelliklerine Etkileri**

Hidrolik bağlayıcı, agrega ve çelik telin karışımı ile üretilen ÇTDB'lerin matrisi içerisinde süreksiz ve rastgele dağılı olarak bulunan çelik teller, yükler ve çevresel değişiklikler altında betonda çatlak oluşumuna ve yayılımına köprüleme etkisi yaparlar. Betonda uygun miktar ve dayanımda, çelik tel-matris aderansı yeterli çelik teller kullanılarak çatlak genişliği küçük düzeyde tutulur ve betonun kırılma yükü sonrası büyük şekil değiştirme yaparak yük taşıması sağlanır. Bu sayede yüksek sünekliğe sahip betonlar üretmek mümkün olur.

ÇTDB'lerde çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu büyük oranda azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, darbe, yorulma ve çekme dayanımı önemli derecede arttırdığı yapılan araştırmalarda tespit edilmiştir [14, 20, 22, 31, 37, 38]. Beton çekme ve basınç yükleri altındayken çelik teller kendi çekme mukavemetlerine ulaşmaya kadar beton matrisinde oluşabilecek kılcal çatlakların büyük ölçüde önüne geçer. Bununla beraber, çimento hamuru çelik telleri birlikte

tutarak çelik tellerin gerilme transferi yapmasına ve bu şekilde kırılma birim uzamasını çelik tellere kıyasla düşük olan çimento hamurunda meydana gelebilecek kılcal çatlaklar önlenmektedir. Tüm bunların yanı sıra çelik teller çatlak köprüleme etkisi ve tutma başarısıyla ÇTDB'lerin göçme modunda iyileştirmeler yapar [39]. Farklı lif boyutlarına sahip liflerin çatlak köprüleme etkisi Şekil 2.5' te verilmektedir [40].



**Şekil 2.5.** Farklı Lif Boyutlarının Çatlak Köprüleme Etkisi [40].

Betonda kullanılan çelik teller betonun sünekliğini ve çatlak direncini büyük oranda iyileştirerek çatlak oluşumdan sonra da yük taşımasını sağlarlar. Beton hamuru içerisinde homojen olarak dağılı bulunan çelik teller, betonun prizi sırasında çekme gerilmeleri ile hamur içerisinde oluşan çok sayıda küçük boşlukları ve çatlaklara karşı köprüleme etkisi yaparak rötne çatlaklarının oluşumunu ve gelişimini büyük ölçüde önler [6, 39]. Geleneksel betona kıyasla ÇTDB'lerin genel özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

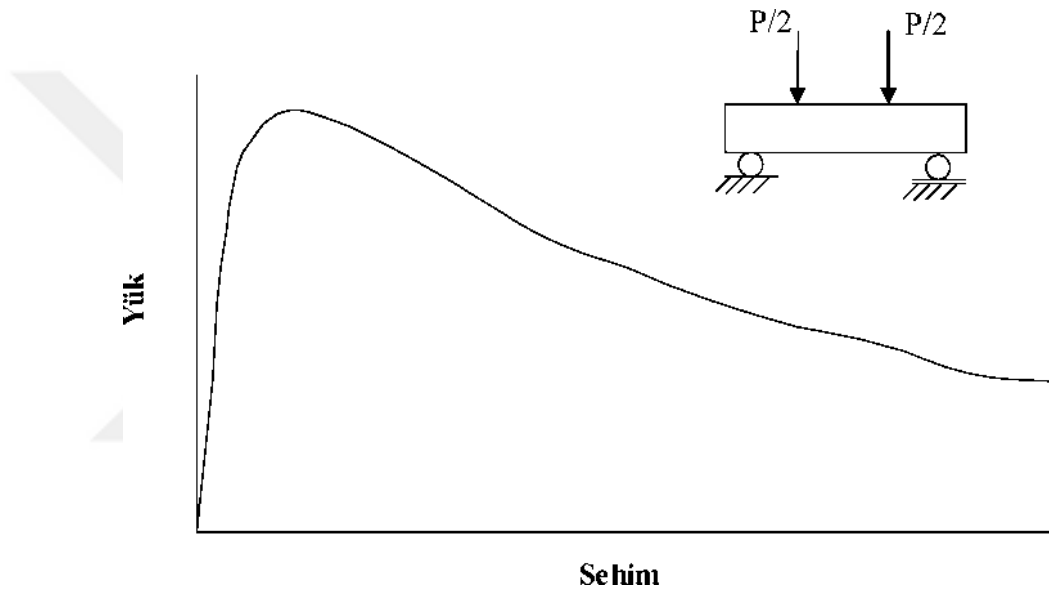
Beton elemanların kırılma davranışlarının çözülmesi için çatlak oluşumundan sonraki davranışlarının incelenmesi gerekir. Gevrek olan betonda göçme olayı çatlak oluşumundan sonra ani bir şekilde oluşurken çelik tel içeren betonda sünek olan teller sayesinde matrisin çatlak sonrası yük taşıması sağlanır ve böylelikle yapının bütünlüğü korunmuş olur [27]. Geleneksel betonun çekme şekil değiştirmesini arttırarak betona yarı-süneklik kazandıran çelik tellerin betonun çatlama dayanımı ve tokluk özelliklerinde iyileştirmeler yapması beklenir.

Betona katılan çelik teller ile betonun çekme yükü taşıma kapasitesi artarken taşıma gücüne eriştikten sonra da yük taşımaya devam ederek ilk kırılma yükünden sonra yüksek bir sünekliğe sahip olurlar, bu da kırılma enerjilerinin yüksek olmasını sağlar [41, 42]. Çelik tel donatılı bir kirişin tipik yük-sehim eğrisi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. ÇTDB'lerin maksimum yük taşıma kapasiteleri çelik tellerin beton matrisinden sıyrılma dirençlerine bağlılık göstermektedir. Çünkü çelik teller oldukça yüksek akma dayanımına sahipken çelik donatı çubukları gibi büyük şekil değiştirme yüzeylerine sahip olmadıklarından beton matrisinde bir noktaya kadar şekil değiştirme yaptıktan sonra matristen sıyrılma eğiliminde olurlar [28].

**Tablo 2.1** Normal betona kıyasla ÇTDB'lerin genel özellikleri [27].

<b>Özellik</b>	<b>Açıklama</b>
<b>Aşınma Direnci</b>	Kısmi olarak darbe aşınmasının sebep olduğu mikro-kırılma çatlaklarını kontrol eder.
<b>Yorulma Direnci</b>	Düşük tel içeriklerinde bile 1,25~2 kat iyileşme.
<b>Donma-Çözünme Direnci</b>	Donma-çözünmenin neden olduğu hasarlar azaltılabilir. Hava sürükleyici katkıların kullanılması önlenir.
<b>Darbe Dayanımı</b>	2~20 kat iyileşme görülür.
<b>Kopma Modülü</b>	20~50 kg/cm <sup>3</sup> çelik tel içeriklerinde ilk çatlak yükünde küçük değişiklikler.
<b>Önleşmiş Rötire</b>	Düşük çelik tel içeriklerinde bile daha iyi gerilme dağılımı ile çatlak genişliklerinde %70'lere ulaşan azalma.
<b>Kayma Dayanımı</b>	Düşük tel içeriklerinde bile 1,25~2 kat artış.
<b>Pullanma-Dökülme Direnci</b>	Matris içerisinde dağılan çelik tel ile öncelikle bağlantı köşelerinin ve kenarlarının korunması.
<b>Isı Şoku Direnci</b>	Düşük tel içeriklerinde bile önemli derecede iyileşme.
<b>Basınç Dayanımı</b>	Küçük değişiklik.
<b>Tokluk</b>	Düşük tel içeriklerinde bile en belirgin iyileşme.

Betonlarda çatlak oluşumunu geciktirmek, çatlak genişliğini olabildiğince küçük tutmak ve tepe yükü sonrasında çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı koymak için betona çelik teller katılmaktadır. Çimento matrisi içerisindeki büyük agregaları bir arada tutan ve kenetleyen çelik teller çimento hamurunda oluşan mikro çatlakların açılmasını ve oluşmasını da engellemektedir. Çatlak üzerinden gerilme transferleri çelik teller aracılığıyla yapılarak çatlak uçlarında daha düşük gerilme yığılması olur ve böylece çatlak gelişimi engellenir.



**Şekil 2.6.** Çelik Tel Donatılı Beton Kirişlerin Tipik Yük-Sehim Eğrileri [28].

Çelik tel donatılı betonların mekanik davranışları ilk olarak Romualdi ve Batson (1963) tarafından incelendi [43]. Bu araştırma sonucunda betonların eğilme dayanımındaki ve süneklikteki artışın çelik tellerin çatlakları köprüleme etkisine ve çelik teller arasındaki mesafeye bağlı olduğu belirtilmektedir. Aynı çalışmada çelik tellerin matris içerisindeki mevcut mikro çatlakların oluşumu geciktirmesi ve çatlak yayılmasını önlemesi için matris içerisinde yeterli miktarda bulunması ve dağılımının iyi olması gerektiği ifade edilmektedir. Matrisin çatlamasından sonra yüklerin bir kısmını taşıyan çelik teller köprü görevi görerek çatlakların ilerlemesi ve yayılmasını yavaşlatmakta ve böylece matrisin yük taşımasını sağlamaktadır. Bu mekanizma “çatlak köprüleme mekanizması” olarak adlandırılmaktadır [27]. Köprüleme mekanizmasını etkileyen en önemli etken ise çelik tellerin matristen sıyrılmama



dirençleri, yani çelik tel ile hamur arasındaki aderans olmaktadır. Çelik tellerin çatlaklara köprüleme etkisi yapabilmesi için matris ile yeterli aderansa sahip ve yeterli miktarda matriste bulunması gerekir. Çelik tellerin uçlarının kancalı olması ise tellerin matristen sıyrılmaya dirençlerini artırır [29].

Süneklik ve enerji yutma kapasitesindeki farklılıklar ÇTDB'leri normal betonlardan ayıran en önemli özelliklerdir. Çelik teller kendi çekme dayanımları ve çekme şekil değiştirme kapasiteleri yüksek olduğundan matrisin ilk çatlak oluşumundan sonra daha fazla yük taşımasını sağlarlar. Bu şekilde gevrek olan matris, elastik ve daha fazla şekil değiştirebilen bir yapıya dönüşmesi sağlanır ve buna bağlı olarak matris daha sünek bir yapıya kavuşur. Matrisi çatlaması sonrası çelik teller tarafından taşınan yüklerin etkisi ile çelik teller şekil değiştirmeye başlar ve yükün artması ile teller matristen genellikle sıyrılmaya veya kopma eğilimi gösterirler. Maksimum yüke (tepe yüküne) ulaşıldıktan sonra göçme çelik tellerin matristen tamamen sıyrılmaya veya kopmasına meydana gelir. Çelik tellerin sıyrılmaya veya kopma eğilimi göstermeleri matris ve çelik tel dayanımına bağlı olmaktadır. Zayıf matris dayanımında genellikle çelik teller fazla uzama yapmadan sıyrılmaya eğilimi gösterirken, yüksek matris dayanımına sahip betonlarda ise çelik teller büyük şekil değiştirme yaparak kopma eğilimi gösterirler [44].

ÇTDB'lerin kırılma enerjilerinin çelik telin narinliğinin artmasıyla arttığı, ayrıca iki ucu kancalı tellerin düz olanlara kıyasla daha yüksek sıyrılmaya yüküne sahip olduğu ifade edilmektedir [15, 45]. Günümüzde geleneksel çubuk donatıların çekme dayanımlarının 2-4 katı olan yüksek karbonlu çelik teller üretilmektedir.

Taşdemir ve diğ. (2002) ÇTDB'lerin tepe noktası sonrası davranışını ve tokluğunu etkileyen en önemli iki faktörün çelik tel miktarının ve narinliğinin olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, bu iki parametrenin artmasıyla su yapılarında kullanılacak olan betonun mekanik özelliklerini büyük ölçüde iyileşme olduğunu belirtmişlerdir [6]. Benzer şekilde, Bayramov ve diğ. (2002) çelik tel içeriği ve narinliğinin artmasıyla betonların göçmeye kadar enerji yutma kapasitelerinin arttığını ve betonların normal betonlara kıyasla daha sünek bir davranış gösterdiğini ifade ettiler [36].

Lange-Kornbak D. ve Karihaloo B.L. (1998) yaptıkları araştırmada, ÇTDB'lerin kırılma enerjisi miktarının kullanılan elik telin boyunun karesi ile doğru orantılı ve tel çapının karekökü ile de ters orantılı olduğunu belirttiler [46].

Swamy ve Mangat (1974), elik tel içeren betonlarda ilk çatlağın telin sıyrılmasından olduğunu, nihai göçmenin ise göçme bölgesindeki köprüleme yapan elik tellerin sıyrılması ve yüzeysel kopma gerilmelerinin maksimum imento hamuru-elik tel aderans dayanımına ulaşması ile meydana geldiğini ifade etmişlerdir [47].

Ramakrishnan ve diğ. (1989) farklı tel tiplerinin betonun mekanik çelikleri üzerindeki araştırmışlardır. Bu çalışmada kancalı uçlu ve düz elik teller kullanarak betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı, tokluk indisi, tepe-noktası yük taşıma kapasitesi ve enerji yutma kapasitelerini belirlemişlerdir. Araştırma sonucunda ise, kancalı uçlu elik tellerin düz elik tellere kıyasla betonların bahsedilen çelikleri üzerinde daha iyi performansı gösterdiğini ve ilk çatlak yükünü %90 ve eğilme dayanımını %129 artırdığını belirtmişlerdir [23]. Benzer şekilde, Balaguru ve diğ. (1992) kancalı uçlu elik tellerin, burgulu ve sonlaşmış elik tellerden daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir [22]. Soroushian ve diğ. (1995) ise ÇTDB'lerde en iyi performansın daha ince uzun ve dayanımı yüksek olan elik tellerin gösterdiğini ve ayrıca bu tellerin en yüksek matris-lif aderans dayanımı sahip olduğunu ifade etmişlerdir [48].

Chang ve Chai (1995) elik tel narinliğinin etkisini araştırmışlar ve narinlik oranı artıkça ilk çatlak yükü değerinin arttığını, ayrıca matris içerisinde rastgele dağılı bulunan teller arasındaki mesafenin 8 mm'den az olduğunda ÇTDB'nin ilk çatlak yükünde büyük artış gözlendiği ifade etmişlerdir [31].

Balendran ve Zhou (2002) elik tel içeren betonların boyut etkisini araştırmışlar ve betona katılan elik tel hacminin yeterli olması durumunda ( $> \%3$ ) sünekliği oldukça yüksek olan betonlar üretilebileceğini, ayrıca boyut etkisinin ihmal edilecek düzeyde olduğunu ifade etmişlerdir. Buna karşılık, düşük tel içeriklerinde boyut etkisi görüldüğünü ve elik tel donatılı betonlarda boyut etkisinin önemsiz olması için kritik boyutun 150 mm aşması gerektiği belirtmişlerdir [49].

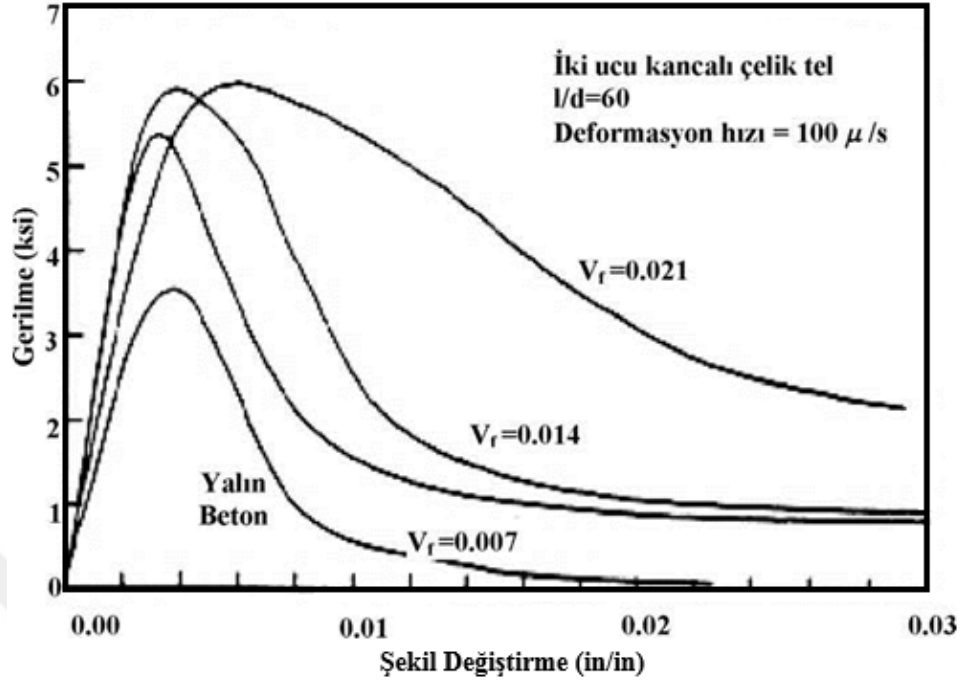
### 2.3.1. Basınç Dayanımı

Çelik tellerin betonun basınç dayanımına etkisinin eğilme ve çekme dayanımlarına göre daha az olduğu ACI Committe 544 tarafından belirtilmektedir. Bunun yanı sıra %1,5 çelik tel içeriğinde betonların basınç dayanımlarında %0 ile %15 arasında bir artış olabileceği de ifade edilmektedir [13]. Çelik tel donatılı betonların basınç dayanımını etkileyen en önemli faktörlerinden birisinin de çelik telin geometrisi ve matris dayanımı olduğu bilinmektedir [50]. Bu betonlarda yüksek dayanıma ulaşılabilmesi için geleneksel betonlarda da olduğu gibi silis dumanı ile kimyasal katkıların ortak kullanılması yararlı olmaktadır [51].

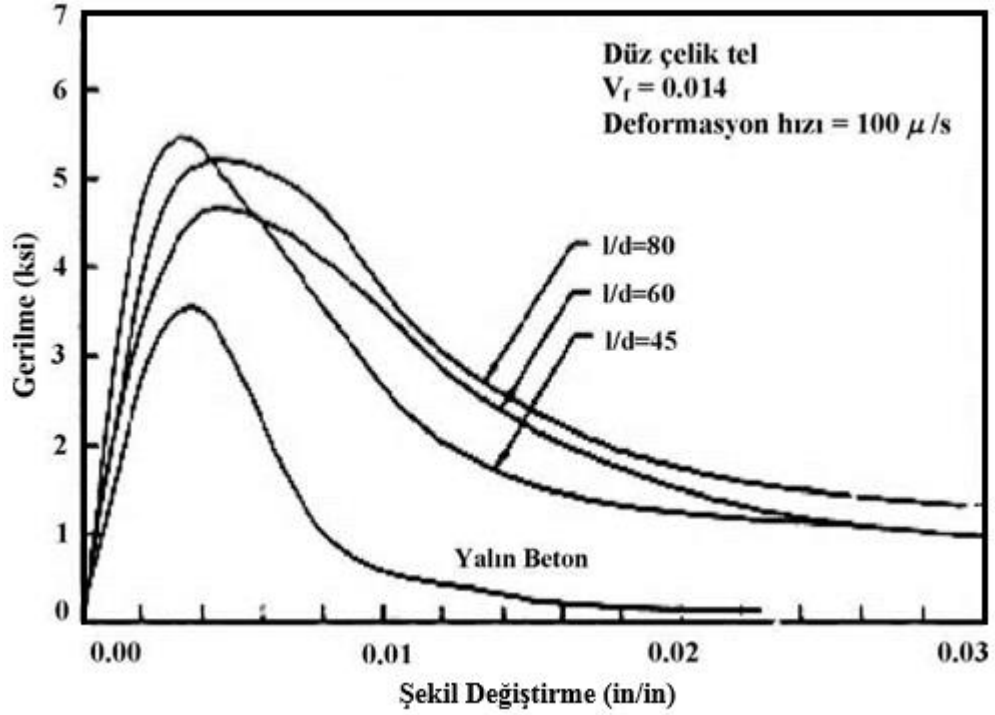
Yüksek dayanımlı betonların içerisinde çelik teller oldukça dik gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmında belirgin bir şekilde değişiklik göstermektedir. Ayrıca basınç tokluğunu arttırmakta ve şekil değiştirme-yumuşama davranışını daha keskin hale getirerek uzaklaştırmaktadır [52, 53]. Basınç tokluğunu bu artış genel olarak kullanılan çelik tel miktarı ve narinliğine bağlı olarak değiştirmektedir. Kullanılan çelik tel miktarı ve narinlik arttıkça basınç tokluğu artmaktadır [54]. Çelik tel içeriğinin ve narinliğinin çelik tel donatılı betonların gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi Şekil 2.7 ve 2.8’de verilmektedir [24]. Karışım içerisindeki tel hacmi arttıkça matris fazında homojenlik bozulmakta ve kusurlar artmaktadır, buna rağmen basınç altında tokluk ise yine de artmaktadır.

Williamson yaptığı araştırmada çelik tellerin harçların basınç dayanımına ihmal edilecek kadar az arttırdığını, buna karşılık olaraksa betonların basınç dayanımlarında %23 artış olduğunu ifade etmiştir [54].

Otter ve Naaman (1988) çalışmalarında çelik teller kullanılmasıyla düşük dayanımlı betonların basınç dayanımlarının donatısız olan yalın betonlarla karşılaştırıldığında daha büyük ölçüde arttığını ve bu artışın çelik tel hacmi ile doğrudan ilişkisi olduğunu ifade ettiler. Ek olarak iki ucu kancalı tellerin betonun basınç dayanımındaki iyileştirmede düz olanlara kıyasla daha etkili olduğunu belirtmişlerdir [24].



Şekil 2.7. ÇTDB'lerde Tel İçeriğinin Etkisi [24].



Şekil 2.8. ÇTDB'lerde Tel Narınlığının Etkisi [24].

Soroushian ve Bayasi (1991) yaptıkları çalışmalara bağlı olarak, farklı çelik tellerin basınç altındaki özelliklerini araştırmışlardır. Kancalı uçlu çelik tellerin kıvrımlı ve düz çelik tellere kıyasla betonların basınç tokluğunda daha fazla iyi iyileştirme yaptığını ifade ettiler. Bunun yanı sıra, çelik tel geometrisinin basınç dayanımına etkisinin olmadığını belirtmişlerdir [2].

Ezeldin ve Balaguru (1992) yaptıkları çalışmada iki ucu kancalı çelik tellerin, silis dumanı içeren ve içermeyen betonların basınç tokluklarına ortak etkisini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda silis dumanı içeren ve içermeyen betonların basınç tokluklarını büyük ölçüde arttırdığını, basınç dayanımı ve tepe gerilmesine karşı gelen şekil değiştirmesini ise çok az arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca silis dumanı miktarının artmasıyla çelik tel donatılı betonların silis dumanı içermeyenlere kıyasla daha gevrek hale geldiğini ifade etmişlerdir [55].

Taylor ve ark, (1997) çalışmalarında betonların içerisindeki çelik tel miktarının artmasıyla betonların basınç dayanımlarında küçük bir artış olduğunu gözlenmiştir. En büyük artışın ise 120 MPa nominal basınç dayanımına sahip betonlarda gözlemlendiğini kanıtlamışlardır. Bu artışın kullanılan silis dumanı ve yüksek beton sınıflarında değişik miktarlarda kullanılan süper akışkanlaştırıcının etkisine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonucu, kullanılan malzemelerin özelliklerinin, özellikle silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcının Portland Çimentosu ile birleştiğindeki kimyasının bir sonucu olduğunu ifade etmişlerdir [34].

Marar ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı çelik tel donatılı betonların basınç tokluklarını araştırdılar ve çelik tel içeriği ve narinliğin kırılma enerjisinin arttığını tespit ettiler. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde, tepe noktasından sonra düşen kısmın eğiminin lif hacmi arttıkça azaldığını ve ek olarak tepe noktası basınç değerine karşı gelen şekil değiştirmenin çelik tel hacminin artmasıyla arttığını belirtmişlerdir [56].

### **2.3.2. Elastisite Modülü**

Çelik, cam vb. yalın malzemelerin elastik modüllerinin deneysel olarak belirlenmesi ve uygulamalarda kullanılması, ÇTDB'ler gibi farklı malzemelerden elde edilen

kompozit malzemelere kıyasla daha kolaydır. Çünkü kompozit malzemelerin elastisite modüllerini etkileyen malzeme özelliklerinin dışında farklı türde parametreler de mevcuttur. Kompozit malzemelerin elastisite modüllerini belirlemek için literatürde pek çok model bulunmaktadır. En basit iki malzemedan oluşturulmuş kompozitler için verilen model, malzemelerin kompozit içerisindeki malzemelerin elastisite modellerine ve hacim oranlarına bağlı olarak belirlenmesini içeren alt ve üst sınır modelleridir. Çelik tel donatı içeren kompozitler için geliştirilen modeller ise, çelik telin narinliği, dağılımı, sürekliliği ve yönlenmesi vb. parametreleri içerir [57].

Halpin ve Tsai'nin önerdiği modellerde eşitliklerin birleşiminin içeriği elastisite modül için üst ve alt sınır modellerde verilen içeriktir. Önerilen modelde matris içerisinde çelik tellerin rastgele dağılı bulunması durumunda ÇTDB'lerin elastisite modülünü ( $E_c$ );

$$E_c = (3/8)E_{cL} + (5/8)E_{cT} \quad (2.1)$$

formülüyle ifade etmişlerdir. Burada,  $E_{cL}$  boyuna,  $E_{cT}$  ise enine doğrultudaki elastisite modülü olarak verilmektedir [58].

Beton üzerine yapılan araştırmalarda çelik tel kullanımının genel olarak elastisite modülünü geleneksel betonlara kıyasla arttırdığı gözlemlenmiştir [52]. Ayrıca ÇTDB'lerin elastisite modüllerinin, çelik telin matris içerisindeki konumu, telin miktarı ve narinlik oranı, tellerin süreksizlik ve süreklilik durumları ve çelik tel-matris ara yüzeyindeki aderans karakteristiklerine bağlı olduğu belirtilmiştir [59, 60].

Swamy ve Mangat yaptıkları çalışmalarda hacimce %2 çelik tel içeren betonların dinamik elastisite modüllerinin geleneksel (donatısız) betonların dinamik Elastisite modüllerine oranla %5 değişiklik gösterdiğini ve bu nedenle verilen klasik modüllerin dinamik Elastisite modüllerinin belirlenmesinde ÇTDB'lerin statik elastisite modüllerinin de kullanılabileceğini belirtmişlerdir [47]. Shah ve diğ. ile Fanella ve Naaman da buna benzer çalışmalarda bulunarak betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisini arttırmada çelik tellerin pek etkili olmadıklarını ve bunun yanı sıra normal betonlara oranla hacimce %4 çelik tel içeren betonların bile elastisite

modüllerinde fazla değişim göstermediğini belirttiler [61, 62]. Najm ve Naaman ise önerilen modellerde kompozit malzemelerin elastisite modüllerinde yer alan parametrelere ek olarak, çelik tel boyunun, çelik tel narinliğinin, tel yönlenmesinin ve tel- matris arayüzeyinin de dikkate alınmasının önemine yer vermiştir [60].

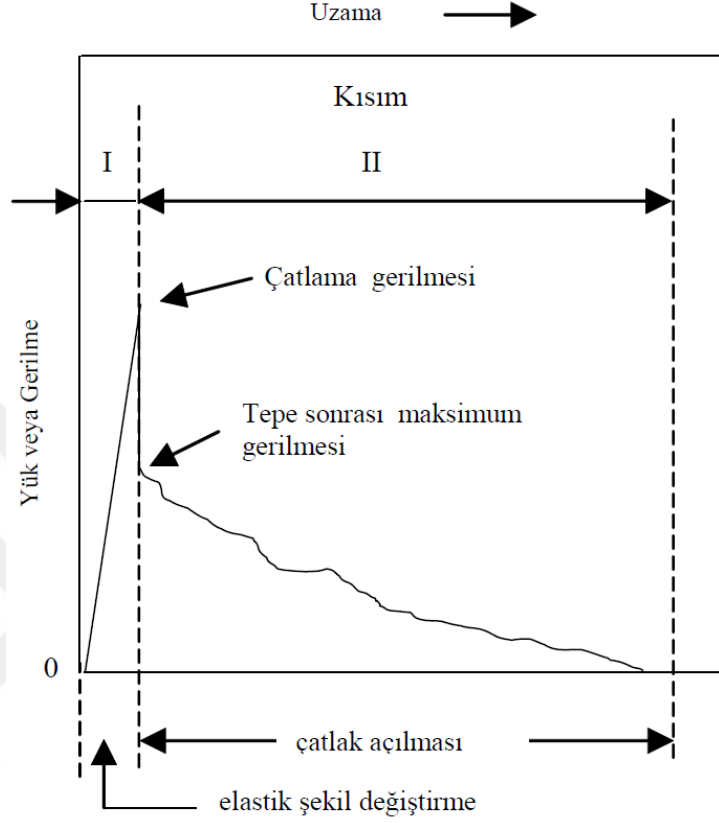
### **2.3.3. Çekme Dayanımı**

Çimento içeren kompozitlerin çekme etkisinde gevrek göçme gösterdiği ve çekme şekil değiştirme kapasitelerinin küçük olduğu bilinmektedir. Bu tür kompozit malzemelerin üretilmesinde çekme özellikleri çelik tel kullanılması ile donatılı veya takviyesiz matrislere oranla güçlendirir. Öyle ki, bu güçlenme oranı kayda değer seviyelerde olmaktadır. Genel olarak, standart deney numuneleri betonların çekme dayanımlarını belirlemek için henüz standart deney numunesi mevcut değildir. Fakat numune şekli ve boyutuna, yükleme durumuna, ölçü boyutuna, deney cihazının rijitliğine, ölçü boyutu içerisindeki oluşan çatlak sayısı dikkate alınarak çekme dayanımı ve çekme-şekil değiştirme grafikleri elde edilmekte ve yorumlanmaktadır. Betonların çekme davranışı üzerinde çelik tellerin etkisini belirlemede görülen en büyük zorluk, ilk oluşan ana çatlağın büyümesiyle oluşan tepe yükü sonrası çatlak davranışının belirlenmesidir.

Çelik tellerin kullanılmasıyla Gevrek yapıda olan betonun çekme şekil değiştirme kapasitesi artırılır ve beton yarı-sünek özelliğe sahip olur. Buna göre betonun çekme kapasitesinde ve tokluk özelliklerinde iyileşme görülmesinde çelik tellerin etkisi beklenen bir özelliktir. Betonun çekme dayanımı çelik tel kullanılmasıyla çatlak sonrası artış gösterir, fakat bu artış çelik donatı çubuklarının gösterdiği dayanıma oranla bir hayli düşüktür.

Yapılan araştırmalarda, çelik tel tipinin ve kullanım hacminin çekme tokluğunu arttırdığı ve bu artışın çelik tellerin matris ile aderansına ve matristen sıyrılmaya direncine bağlı olduğu ifade edilmektedir [63, 64]. Buna göre, genellikle ilk çatlakların yükünü çelik tel tipinin ve kullanılan çelik tel miktarının etkilemediği kabul edilmektedir [27, 65].

Hacimce %3'den daha az çelik tel içeren ÇTDB'lerin tipik çekme gerilmesi-çekme şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.9'da verilmektedir [66].



**Şekil 2.9.** Hacimce %3'den Daha Az Çelik Tel İçeren ÇTDB'lerin Tipik Çekme Gerilmesi-Çekme Şekil Değişirme Eğrisi [66].

#### 2.3.4. Yarmada Çekme Dayanımı

Çelik telli betonlarda çelik tellerin yarmada çekme dayanımlarına yaptığı katkı tek eksenli çekme ve eğilme dayanımları için yapılanlara oranla daha azdır. ÇTDB'lerin mekanik özelliklerini etkileyen narinlik, çelik tel hacmi, çelik tel tipi matris özellikleri vb. gibi bütün parametreler yarmada çekme dayanımını da etkilemektedir [37, 67]. Çelik tel tiplerinden kancalı uçlu ve uzunluğu boyunca çentikli olanları yarmada çekme dayanımında diğerlerine kıyasla daha etkilidir.

Gao ve diğ. yaptıkları çalışmalarda betonlarda çelik tel kullanılmasıyla yarma dayanımlarında önemli derecede artış olduğunu ve bu artışın ise çelik tellerin çatlak köprüleme özeliği ile sağladıklarını belirttiler. Buna ek olarak maksimum yarmada



çekme yükünün çelik tel narinliğinin ve miktarının artmasıyla arttığını belirttiler [67]. Benzer olarak, Taylor ve diğ. (1997) de çelik tellerin betonun yarma dayanımlarını artırdığını ifade etmişlerdir [34].

### **2.3.5. Eğilme Dayanımı**

Çelik tellerin betonların özelliklerine katkı sağladığı en iyi iyileştirmeler, eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu üzerlerinde yapmış oldukları artışlardır. ÇTDB'lerin sahip oldukları yüksel eğilme rijitliği sayesinde servis yükleri altındayken elemanlarda çatlak genişliği daha az olur. Buna rağmen çelik tel kullanılmasıyla betonlardaki eğilme dayanımının iyileşmesi geleneksel olarak kullanılan donatı çubuklarının gösterdiği iyileşme potansiyeline kıyasla oldukça yetersizdir.

Çelik tel donatılı betonların eğilme davranışını ve dayanımını; çelik tel tipi ve şekli, tel boyu, narinliği, tel hacmi, matris içerisindeki yönelmesi, matris-tel aderans özellikleri ve çelik telin matristen sıyrılmaya direnci gibi birçok parametre etkilemektedir. Bunların yanı sıra, çelik tel donatılı betonların işlenebilirliği etkileyen su/çimento oranı, hava içeriği ve yoğunluk gibi parametreler de bulunmaktadır. ÇTDB'lerde nihai eğilme dayanımının ise tel hacmine, boyuna, aderans özelliklerine ve telin çekme dayanımı ile etkilendiği literatürde ifade edilmektedir.

Yapılan araştırmalarda matris içerisindeki çelik teller arasındaki mesafelerin ilk çatlak yükünü etkileyen en önemli etken olduğu ifade edilmektedir [43, 68]. Buna karşılık, bazı çalışmalarda ise ilk çatlak yükünün sadece teller arasındaki mesafe yaklaşımı ile tahmin edilemeyeceği ifade edilmektedir [38, 69]. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda ise çelik tel narinliği, tel hacmi ve telin matris içerisindeki yönelmesinin ilk çatlak yükünde daha etkili olduğu vurgulanmaktadır [22, 67]. ÇTDB'lerin eğilme dayanımında ve sünekliğindeki iyileşmelerde çelik tellerin çatlak tutmaya karşı yetenekleri ve matristen sıyrılmaya dirençleri belirleyici rol oynar. Yapılan araştırmalarda kancalı uçlu çelik tellerin betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu üzerinde en iyi iyileştirmeyi sağladıkları gözlenmiştir.

Ramakrishnan ve diğ. (1989) kancalı uçlu, düz ve kıvrımlı çelik tellerin betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı, tokluk indisi, tepe-noktası sonrası yük taşıma

kapasitesi ve enerji yutma kapasitelerine etkisini araştırdı. elik tellerin betonların ilk çatlak yüklerinde %15 ile %90 ve statik eğilme dayanımlarında ise %15 ile %129 arasında değişen artışlar sağladığını, kancalı uçlu tellerin ise en fazla iyileştirmeyi yaptığını ifade ettiler. Ayrıca topaklanmaya neden olmaması için kancalı uçlu tel hacminin için %1 ile fazla kullanılmaması gerektiğini vurgulamışlardır [23]. Benzer şekilde Balaguru ve diğ. (1992) kancalı uçlu elik tellerin, kıvrımlı ve sonlaşmış elik tellere göre ÇTDB'lerin ilk çatlak yükü ve eğilme tokluğu üzerinde en iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir [22].

Gao ve diğ. (1997) elik tel narinliği ve içeriğinin artmasıyla maksimum yükün arttığını ve betonların eğilme dayanımlarında normal betonlara kıyasla büyük artış olduğunu ifade ettiler [67].

Banthia ve Trottier (1995) elik tel geometrisi ve matris dayanımı eğilme tokluğu etkilediğini, en önemli etkenin ise elik tellerin matristen sıyrılma direnci olduğunu belirtti [14].

### **2.3.6. Darbe ve Yorulma Dayanımı**

elik teller betonların çekme dayanımı ve sünekliğini arttırıyor olduğundan, betonların çatlamaya karşı dirençlerini ve hasar düzeylerini sınırlamadaki kabiliyetlerini büyük lde iyileştirmektedir. Ayrıca, matris içerisinde mevcut veya oluşan çatlakların ilerlemesini ve yayılmasına karşı gösterdikleri köprüleme etkisi ile betonların yük altında darbeye ve yorulmaya karşı daha dirençli olmalarını sağlamaktadır. Böylece, betonların darbe ve yorulma altındaki hasar düzeyleri elik tel kullanılmasıyla azaltılmış olmaktadır. elik tellerin matris içerisinde çatlakları köprüleme etkisi ve çatlak sonrası yük taşıma özeliği ile kazanılan yüksek süneklik, tekrarlı yükler altında ÇTDB'lerin gcmeye karşı dirençleri normal betonunkilere kıyasla daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda betonların darbe dayanımları elik tel kullanılmasıyla 2-20 kat artabildiği ve yorulma dayanımlarının ise düşük tel içeriklerinde bile 1,25-2 kat iyileşme görüldüğü ifade edilmektedir [27, 56]. Darbe ve yorulma dayanımındaki bu iyileşmeler, özellikle tekrarlı dinamik yükler altındaki karayolu kaplama betonları, havaalanı ve endüstriyel zemin beton uygulamalarında önemli rol oynamaktadır.

Ramakrishnan ve diğ. ÇTDB'lerin betonların eğilme altında yorulma ve darbe dayanımına çelik tel tipinin etkisini araştırmışlardır [23]. Çelik tellerin betonların eğilmede yorulma dayanımını arttırdığını ifade ederlerken, darbe dayanımlarını ise çok az arttırdığını belirtmişlerdir. Kancalı uçlu çelik tellerin betonların yorulma ve darbe dayanımı üzerinde en iyi iyileştirmeyi yaptığını, buna karşı olarak düz olanların ise daha az iyileştirme yaptığını ifade etmişlerdir. Benzer sonuçlar Batson tarafından da elde edilmiştir [70].

Yan ve diğ. (1999) silis dumanının ve çelik telin betonların darbe ve yorulma dayanımlarına ortak etkisini araştırmışlardır. Silis dumanı ve çelik telin betonların darbe ve yorulma dirençlerini büyük ölçüde iyileştirmeler yaptığını belirtmişler. Ayrıca, silis dumanı ve çelik telin birlikte kullanılmasının, silis dumanı ve çelik telin ayrı ayrı kullanılmasından daha etkili olduğunu açıklamışlardır [71].

Marar ve diğ. (2001) betonların darbe direncinin çelik tel hacmine bağlı olarak arttığını, hacimce %2 çelik tel içeren ve narınlığı 83 olan ÇTDB'lerin darbe dayanımlarının çelik tel içermeyen betonların darbe dayanımlarınının 74 katı olduğunu belirtmişlerdir [56].

### **2.3.7. Tokluk**

ÇTDB'leri çelik tel içermeyen betonlardan ayıran en önemli iki özellik eğilme dayanımı ve eğilme tokluğudur. Tokluk genel olarak sünekliliğin bir ölçüsüdür ve malzemelerin enerji yutma kapasitelerini gösteren bir parametredir. Çelik tel donatılı betonlarda tokluk, çatlağın konumuna, çelik tel hacmine, çelik tel tipine, telin matristen sıyrılma direncine ve matris içerisindeki yönelmesine bağlıdır [14, 34]. Kullanılan çelik tellerin kıvrımlı, kancalı ya da yüzeylerinin pürüzlü olması, matristen sıyrılma direnci de çatlak kontrolü açısından önemli olduğu gibi tokluğun artırılmasında da büyük etkisi olmaktadır.

Betonların tokluk değerleri yük-sehim eğrisi altında kalan alandır ve enerji yutma kapasiteleri olarak tanımlanır. ÇTDB'lerin toklukları genellikle çentikli ya da çentiksiz prizmatik kiriş numuneler üzerinde yapılan eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrileri kullanılarak belirlenmektedir.

ÇTDB'lerin eğilme tokluk düzeylerinin belirlenmesi için deney yöntemleri geliştirilmiş ve şartnameler düzenlenmiştir. Bunlardan en sık kullanılanları ÇTDB kırımları için ASTM (American Society of Testing Materials), JSCE (Japan Society of Civil Engineering), RILEM ve EN (European Norm) tarafından önerilen deney yöntemleridir [72, 73].

Banthia ve diğ. (1994) çalışmalarında çelik tellerin betonun eğilme tokluğunun önemli ölçüde arttığını ve kancalı uçlu çelik tellerin diğer tel tiplerine göre toklukta iyileşmesinde daha etkili olduğunu belirtmişlerdir [59].

Şahin ve Köksal (2011) yaptıkları çalışmada ÇTDB'lerin tokluklarında iyileşmenin çelik tel çekme dayanımı ve matris dayanımının uyumuna göre değişiklik gösterdiğini belirterek, yüksek dayanımlı betonlarda yüksek çekme dayanımına sahip çelik tel kullanımının performansı büyük ölçüde arttırdığını ifade etmişlerdir [44].

Moyson ve diğ. (1994), genel olarak, ÇTDB'lerin eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu belirgin iyileşmeler olduğunu, ilk çatlak dayanımının (veya yükünün) ise beton özelliklerine bağlı olduğunu ve çelik tel etkili olmadığını belirtmişlerdir [74].

Banthia ve Trottier (1995) yaptıkları çalışmada farklı çelik tel ve matris dayanımına sahip betonların tokluklarını araştırmışlardır ve tellerin matristen sıyrılmaya direncinin tokluk artışında en önemli etken olduğunu ve en iyi etkiyi ise kancalı uçlu tellerin yaptığını vurgulamışlardır [14].

Balendran ve Zhou (2002) çalışmasında ÇTDB'lerde boyut etkisinin tokluk indisleri üzerindeki etkisini araştırmışlar ve numune boyutu arttıkça tokluk değerinin azaldığını belirtmişlerdir [49].

### **2.3.8. Korozyon**

Çelik teller donatılı betonlarda korozyon (paslanma) etkisi ilk akla gelen soru olmaktadır. Genel olarak betona içerisindeki çelik teller betona gömülü olduğundan ve yüzeyde kalanların az olması nedeniyle paslanmaya bağlı olarak oluşacak genişleme kuvvetleri sınırlı düzeyde kalmakta ve genelde beton yüzeyinde pullanma görülmemektedir. Buna ek olarak, betonun yüzey tabakasına çok yakın olan çelik

teller düşük yüzey karbonatlaşma derinliğinden dolayı hızlı bir şekilde korozyona ve betonda pas rengi yüzeylerin oluşmasına sebep olabilmektedir. Bu durum istenmeyen estetik bir kusur olarak ortaya çıkmaktadır. Uygulamalarda daha çok düşük karbonlu çelik tel kullanıldığı için çelik tellerdeki paslanma geleneksel betonlarda kullanılan donatı korozyonlarına oranla daha az olmaktadır. Bunun yanı sıra, süreksiz bir şekilde beton matrisinde bulunan çelik tellerin elektriksel iletkenliğinin süreksiz olması da korozyon açısından bir üstünlük olarak kabul edilebilir. Çelik teller beton matrisindeki çatlakları çapraz keserek yük taşıma sürekliliği sağlamakta ve çatlakların genişlemesini önleyerek çelik tellerin korozyondan bozulmasını engellemektedirler. Çelik tellerin betonuna iyi bir biçimde gömülmesi için su/çimento oranı belirli miktarlarda olması gerekmektedir. Kohezyonu uygun bir betonda çelik teller vibratörlü mastar uygulaması sırasında betona iyi bir şekilde gömülmektedir.

### **2.3.9. Sünme ve Büzülme**

Bilindiği gibi beton kuru ortamlarda büzülür. Büzülmenin gelişimi ve miktarı ise malzemelerin özellikleri de dâhil olmak üzere, sıcaklık ve ortamın nemine, betonun yaşına ve kütlesine bağlı olmaktadır [24]. Betonun rötresi kısıtlanmadığı sürece çekme gerilmesi oluşmaz ve beton çatlamaz. Rötreye çatlakları özellikle perde, döşeme ve beton kaplamalarında sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Çelik tellerin beton matrisine katılmasıyla rötreye çatlaklarını azaltılabilmektedir. Betonlar elemanlar mesnet durumlarından dolayı rötresi kısıtlandığı için çatlama eğilimi göstermektedirler. Çelik tel miktarı ÇTDB'lerin sünme ve büzülme özelliklerini etkileyen çelik tel ile ilgili en önemli parametredir. Bu nedenle çelik tellerin sünme ve büzülme özelliklerinde iyileştirmede bulunmaları için matris içerisinde etkili olacak şekilde uygun miktarda bulunması gerekmektedir. Düşük çelik tel miktarlarında bile çatlak genişliklerinde %70'lere ulaşan azalma görülebilmektedir [27].

Kayalı ve diğ. (1995) yapmış oldukları araştırmada, çelik tel donatılı betonların rötreye çatlaklarının normal betonlara kıyasla daha az olduğunu belirtmişlerdir [75].

Grzybowski ve Shah (1987) çalışmalarında çelik tel miktarının betonların büzülme çatlamaına etkisini incelemişlerdir. 20 kg/m çelik tel içeriğinde bile betonda çatlak genişliğinin azaldığını ve yalın betonda ortalama büzülme çatlak genişliği 1 mm iken çelik tel içeren betonlarda bu değerin 0,2 mm'den daha az olduğunu belirtmişlerdir [76].

Edington (1973) ise çalışmasında 12 ay boyunca sünme etkisine maruz bırakılan ÇTDB'lerin sünme şekil değiştirmelerinin normal betonlarınkinden farklı olmadığını belirtmiştir [77].

Swamy ve Stavrides (1979) yaptıkları araştırmada çelik teller ile çatlak miktarını ve çatlak derinliğini azaldığını belirtmişlerdir [78].

#### **2.3.10. Aşınma Erozyon ve Kavitasyon Direnci**

Yapılan çalışmalarda çelik tellerin genel olarak betonların erozyon, aşınma ve kavitasyon dirençlerini arttırdığı belirtilmektedir [39]. Çelik teller su yapılarında kullanılan betonların aşınma, kavitasyon ve kimyasal etkilerle meydana gelen erozyona karşı dirençlerini kısmen iyileştirmektedir [39]. Buna ek olarak çelik teller darbeli aşınma ile oluşan mikro-kırılma çatlaklarını kontrol altına alarak betonların aşınma hasarlarını azaltmaktadır [52].

Hidrolik yapılarda düşük hızlarda, küçük taneciklerin yuvarlanması ile beton yüzeyinde oluşan düzenli aşınma olayında, agrega kalitesinin ve yüzey sertliğinin erozyon miktarını belirleyen en önemli etkenlerdir [69]. Buna karşılık çelik tellerin, yüksek hızların ve büyük parçaların çarpması sonucu oluşan aşınmaya karşı betonların erozyon direncini önemli ölçüde arttırdığını ifade etmektedir.

Nanni (1989) yapmış olduğu çalışmasında çelik tellerin beton kaplamaların yüzeylerinin pullanmasını önleyiciliği bir etki yaptığını, fakat çelik tel donatılı betonların aşınma dirençlerinin normal betonlarınkine kıyasla fazla değişmediğini ifade etti [79].

Sustersic ve diğ. (1991) yaptıkları çalışmada su/çimento oranı 0,30-0,65 arasında değişen betonlara kancalı uçlu çelik tellerin hacimce %0,25-%2 arasındaki miktarlarda katılmasıyla elde edilen beton numunelerin aşınma-erozyon dirençlerini araştırdılar. Çelik tellerin betonun erozyon ve aşınma dirençlerini iyileştirdiğini, ayrıca su/çimento oranı ve çelik tel içeriği arttıkça betonların aşınma ve erozyon dirençlerinin arttığını belirttiler [80].

### **2.3.11. Donma-Çözülme**

Betona ikame edilen çelik tellerin betonun donma-çözülme direncine etkisi belirgin değildir [39, 81]. Dayanıklı beton üretmek için geleneksel betonlarda kullanılan uygulamalar ve hava sürüklenme kriterleri, çelik tel donatılı betonlarda da kullanılabilir. ÇTDB'ler mikro çatlak oluşumunu ve yayılmasını geciktirir, bununla beraber donma-çözünme sırasında betonun göçmesini ve hasar görmesini yavaşlatır. Bu iyileşme çelik tellerin çatlak köprüleme etkisine ve çatlak tutma becerisiyle orantılıdır. Beton matrisi içerisinde rastgele dağılı bulunan çelik teller, betonun boşluk oranına ve doygunluk derecesine bir etkisi bulunmadığından çözülme sırasında beton yüzeyindeki pullanmaya mani olamamaktadır. Bu nedenle çelik tel donatılı betonlarda donma-çözülme etkisinde kütle kaybı geleneksel betonlardaki ile eşdeğer olmaktadır [39].

Balaguru ve Ramakrishnan (1989) yaptıkları çalışmalarda su/çimento oranı 0,40 olan ve çimento miktarı 415 kg/m<sup>3</sup>'den az olan çelik tel donatılı betonların donma-çözünme dirençlerinin iyileştirilmesi için en az %6 hava sürüklenmesinin gerektiğini belirtmişlerdir [81].

Vares de yaptığı çalışmalarda (1992) ÇTDB'lerin donma-çözünme etkisi altındayken mikro yapılarını incelemiştir. %2 ve %4 çelik tel ilave edilerek elde edilen betonların 100 ve 200 çevrim sonunda (suda saklanan), tokluklarındaki ve mikro yapılarındaki değişikliklere bağlı olarak donma dirençlerini belirlemiş 200 çevrim sonunda ÇTDB'lerin mikro yapılarında ciddi hasarlar olmadığını ifade etmiştir [82].

Mu ve diğ. (2002) ise yaptıkları araştırmalarda donma-özölme ve tuz etkisi altındaki ÇTDB'lerin geleneksel betonlara kıyasla bozulmaya karşı dirençlerinin arttığını belirtmişlerdir [83].

#### **2.4. elik Tel Donatılı Betonların Performansına Etki Eden Faktörler**

elik tel donatılı betonların mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörler; tel, numune, matris ve tel-matris ara yüzey özellikleri olarak dört ana başlıkta toplanabilir. Bunlar;

Tel ile ilgili faktörler: Telin tipi, narinliği, geometrisi, elastisite modülü, çekme dayanımı, yönlenmesi ve dağılımı, hacim oranı.

Matris ile ilgili faktörler: Matris dayanımı, elastisite modülü, maksimum çekme şekil değiştirmesi, maksimum çekme dayanımı, en büyük agrega boyutu ve ilk çatlak boyutu.

Numune ile ilgili faktörler: Numunenin boyutu, geometrisi ve üretim metodu.

##### **2.4.1. elik Tel Özelliklerinin Etkisi**

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte elik liflerin çekme dayanımları bakımından hasır donatılara oranla 2-3 kat daha iyi olabildikleri görölmektedir. elik tel lifler, ufak boyutlarda olmalarına rağmen geleneksel çubuk donatılarına oranla daha büyük yüzey alanı oluşturmalarından dolayı beton matrisinde daha kuvvetli bağ oluştururlar [84]. elik tel donatılı betonların performansını büyük ölçüde elik telin tipi, dayanımı, narinliği ve oranı etkilemektedir [85].

##### **2.4.1.1. elik Tel Türü ve Tipi**

Son yıllarda yapılan araştırmalar elik telin matris içerisinde en düzenli şekilde dağılmasını ve kompozitin performansına yapmış olduğu katkıyı en yüksek düzeyde artırmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmalardan bir kısmı da elik tel türünün kompozitin kullanım alanına göre seçilmesidir. ASTM A 820 tarafından üretim türlerine göre elik telleri 5 tip olarak incelemiştir [86]. elik tel tipleri aşağdaki gibidir;



Tip I: Soğuk şekil değiştirme uygulanmış lif

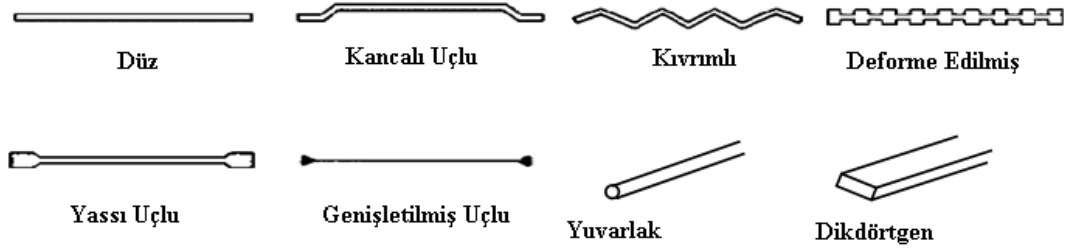
Tip II: Plakadan kesilmiş lif

Tip III: Ergitilerek üretilmiş lif

Tip IV: Mille kesilmiş lif

Tip V: Modifiye soğuk şekil verilmiş lif

TS 10153'e göre ise çelik tel lifler Madde 2.1.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.10. Çelik Tel Tipleri ve Kesitleri [2]

Kesilmiş telden üretilen yuvarlak kesitli düz çelik teller, genel olarak 0,25-1 mm arasında çaplara sahiptir. Dalgalı ve deforme edilmiş çelik teller, tüm uzunluğu boyunca dalgalı veya sadece uçlarında genişletilerek üretilirler. Yassı düz çelik teller ise, tipik olarak 0,25-1,14 mm genişlik, 0,15-0,41 mm kalınlık aralığındaki en kesite sahip kesilmiş plaka veya yassılaştırılmış telden üretilmektedir. Bazı çelik teller hem beton matrisi ile olan ankrajı iyileştirmek hem de karıştırma ve taşıma özelliğini arttırmak için yassı veya eğimli şeklinde deforme edilirler [87]. Uçları kancalı çelik tel gibi bazı teller, karıştırmayı kolaylaştırmak için özel tutkalla birleştirilirler. Karıştırma sırasında her bir tel birbirinden ayrılarak tellerin topaklanması önlenmektedir [86].

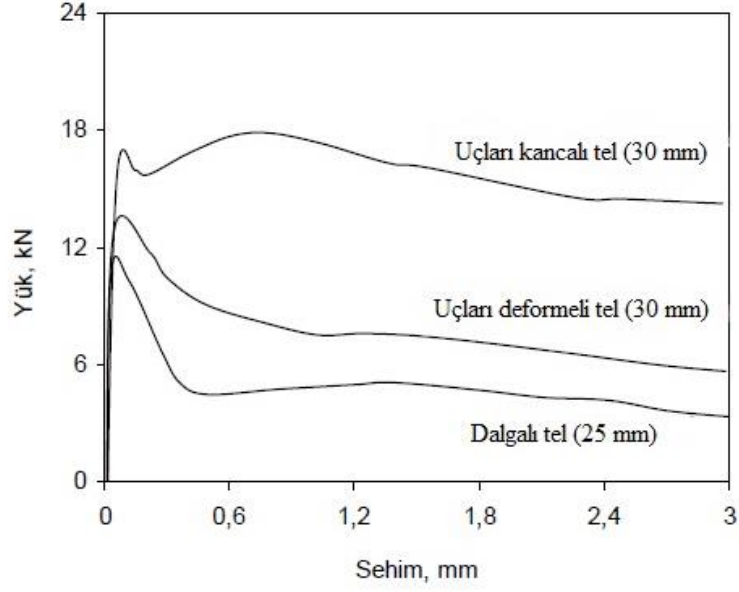
Geleneksel betonların zayıf mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan çelik teller, ACI 544'e göre tel boyutunun eşdeğer tel çapına bölünmesi ile elde edilen boy/çap (L/d) oranına göre tanımlanmaktadır. Bu orana kısaca çelik telin narinliği denir [88]. Çelik tellerin genel olarak çekme dayanımı 345-2200 MPa aralığında, uzunluğu 19-60 mm aralığında, narinliği (uzunluk/çap) 30-100 aralığında değişmekte

olduğu gibi elastisite modülü de 205 GPa'dır [5]. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle çelik tel çekme dayanımı 2600 MPa'ya kadar çıkabilen yüksek performanslı çelik teller üretilmektedir. Çelik teller en kesitlerine göre dikdörtgen, dairesel, eşkenar, üçgen, kare, poligon (çok köseli) veya sabit poligon şeklinde üretilmektedirler. Çelik tel ve beton matrisi arasında daha güçlü aderans sağlamak amacıyla çelik tellerin mekanik deformasyonlarının artırılır veya uzunluğu boyunca yüzeyi pürüzlendirilerek iyileştirilirler. Bu nedenle çelik teller yüzey durumuna göre nervürlü, düz, düzensiz, zikzaklı (kıvrımlı), çift baskılı, helezon, uçları kancalı, uçları düğmeli, uçları kanatlı şekilde üretilmektedirler. Çelik teller için tipik örnekler Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan çelik tel türü bükülmüş kanca uçlu çelik tellerdir. Çünkü çelik tel uçlarındaki farklı geometrideki kancalar, beton matrisi ile çelik tel arasındaki aderansı arttırmaktadır. Çelik teller betonarme elemanları bütün doğrultuda takviye etmektedir. Üretim aşamasında seri ve kolay üretim yapılması için özel tutkal ile yapıştırılmış olarak demetler halinde bulunabilen uçları kancalı çelik teller, beton karıştırma mikserinde karma suyu ile temasından sonra basit ve hızlı bir biçimde dağılmakta ve topaklanma önlenmektedir [17, 89].

Tel uçları konik, kanatlı ve düğmeli olarak biçimlendirilmiş çelik tellerin kullanıldığı betonlarda çelik tel-matris arasındaki mekanik ankraj yoluyla sağlanan aderansın, düz tellerin katılması ile sürtünmeli kayma bağı gerilmesi ile sağlanan aderansdan daha etkili olduğu görülmektedir [90].

Uçları kancalı (30 mm), dalgalı (25 mm) ve şekillendirilmiş (deformeli) üç farklı şekildeki çelik tel donatılı betonların yük-sehim eğrileri üzerindeki etkisi Şekil 2.11'de gösterilmektedir [91]. Uçları kancalı çelik telli beton diğer iki türe göre daha fazla çekme dayanımına sahip olduğu ve çatlak sonrası davranışta daha iyi olduğu görülmüştür. Oluşan ilk çatlaktan sonra yükteki düşüş, dalgalı ve uçları deforme olan tellerde kancalı tele göre daha fazladır.



**Şekil 2.11.** Yük-Sehim Eğrisine Değişik Çelik Tel Tiplerinin Etkisi [91]

Nataraja ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda basınç dayanımı 30-50 MPa aralarında değişen çelik tel donatılı betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin belirlenmesi amacıyla, üç hacim oranında (%0,5, %0,75 ve %1) ve iki değişik narinlikte (55 ve 82) dairesel kesitli dalgalı teller kullanmışlardır. Betona tel eklenmesiyle betonun tokluğu, en büyük gerilme, en büyük gerilmedeki şekil değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dalgalı çelik tellerin betona eklenmesiyle betonun, basınç dayanımını, tokluğunu ve en büyük gerilmedeki şekil değiştirme kapasitesini arttırdığı belirtilmiştir [92].

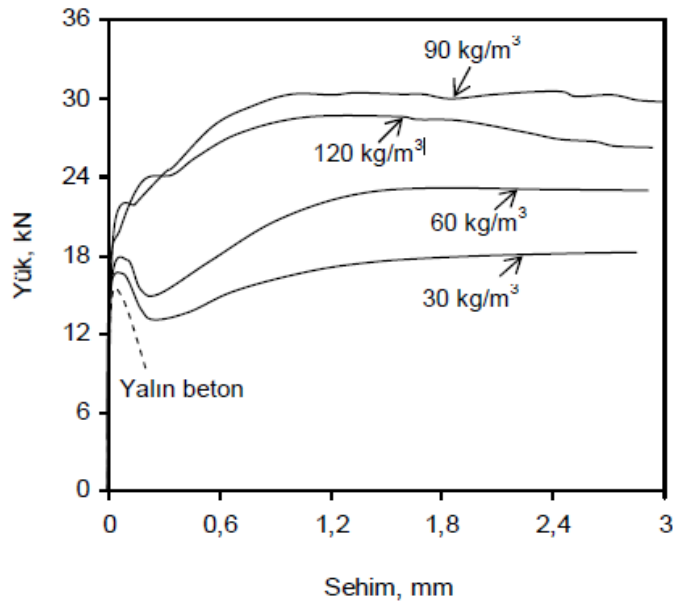
Yoo ve Banthia araştırmalarında deforme edilmiş (kancalı uçlu ve burulmuş) tellerin mekanik özellikleri diğer tellere kıyasla daha fazla arttırdığını ve bu tellerin kullanılmasıyla çekme dayanımının, şekil değiştirme kapasitesinin ve eğilme dayanımının sırasıyla %32, %205 ve %167 oranlarında arttığını belirtmişlerdir [8].

#### **2.4.1.2. Çelik Tel Miktarı**

Çelik tel donatılı betonlar için tel hacim oranını belirlemede işlenebilirlik, maliyet gibi parametreler göz önüne alındığında tel hacim oranı tipik üst limiti %2-%3 civarındadır [93]. Çelik tel hacim oranının %2'nin altında olduğu durumlarda, çelik teller genellikle çatlama sonrası sünekliğe ve enerji yutma kapasitesine katkı

sağlamaktadır. En büyük dayanım ve çekme şekil değiştirme kapasitesi gibi diğer özelliklerdeki iyileşmeler önemli seviyede değildir [94]. Beton içerisindeki çelik tel oranının % 2'nin üzerinde olması durumlarında betonda işlenebilirlik azalmakta ve çelik telin dağılması zorlaşmaktadır [90].

Betondaki çelik tel hacmi, betonun kullanılacağı yere ve çelik telin türüne göre değişiklik göstermektedir. Öyle ki endüstriyel zemin döşemelerinde kullanılan çelik tel hacmi %0,3-%0,5 (24-36 kg/m<sup>3</sup>) aralığında iken yapısal uygulamalarda 60-100 kg/m<sup>3</sup> aralığında kullanılmaktadır [95]. Şekil 2.12'de uzunluğu 50 mm olan uçları kancalı çelik tel donatılı 100x100x350 mm boyutlarındaki kirişlerin yük-sehim davranışlarındaki çelik tel hacim oranının etkisi gösterilmiştir [90]. Yük-sehim eğrilerine göre, enerji yutma kapasitesindeki iyileşmenin, çelik tel hacim oranının artmasıyla daha yüksek olduğu gösterilmektedir. Betondaki çelik tel hacim oranı arttıkça ilk çatlak yükü sonrası ani düşmede azalma olur. Farklı çelik tel tiplerinde bu azalma oranında farklılıklar görülür. Çelik tel hacim oranının yüksek olduğu betonlarda çatlak sonrası yükte kayda değer artış gözlenmekte ve bu artış eğilme dayanımında da artışa neden olur.

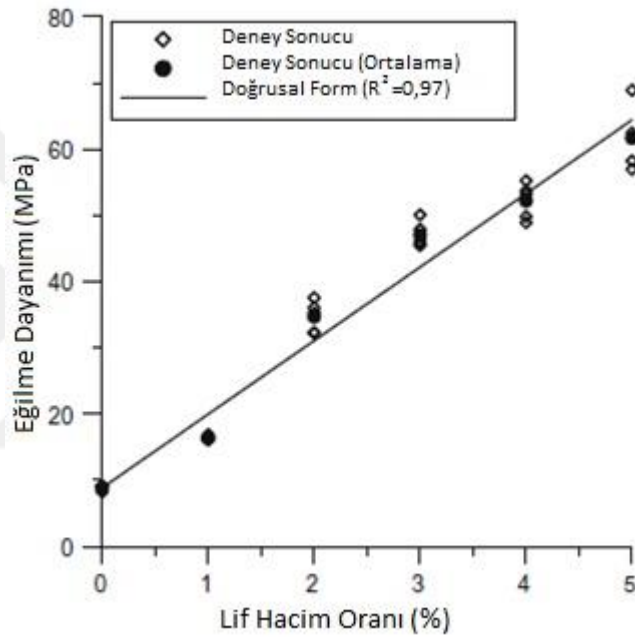


**Şekil 2.12.** Yük-Sehim Eğrisine Farklı Çelik Tel Hacminin Etkisi [90]

Dugat ve ark. yapmış oldukları çalışmada, farklı çelik tel içeriklerinin kırılma enerjisine olan etkilerini incelemek için, çelik tel boyutları D= 0,15 mm, L= 13mm,

çelik tel içeriği %0, %2, %2,5 ve %4 olan karışımların kırılma enerjilerini kıyaslamışlar ve ideal çelik tel içeriğinin %2 ~ %3 arasında olduğunu saptamışlardır. Bu çalışmalarının sonucunda da yüksek oranlarda kullanılan çelik telin kırılma enerjisini düşürdüğü görülmüştür [96].

Kang ve diğ. ultra yüksek dayanıma sahip betonlar üzerinde yaptıkları çalışmalarında tel miktarı arttıkça eğilme dayanımının doğrusal olarak arttığını Şekil 2.13'te göstermişlerdir [97].



**Şekil 2.13.** Çelik Tel Hacminin Eğilme Dayanımına Etkisi [97]

Wille ve ark. yapmış oldukları çalışmalarında, çelik tel hacminin %1,5 ten %2,5'e artması durumunda dayanımın 8 MPa'dan 14 MPa'ya ve birim şekil değiştirmenin %0,17'den %0,24'e çıktığını belirlemişlerdir. Aynı çalışmada düz tel yerine burulmuş tel kullanımında ise dayanımın 8 MPa'dan 15 MPa'ya ve birim şekil değiştirmenin %0,33'den %0,61'e çıktığını göstermişlerdir [98].

### 2.4.1.3. Çelik Tel Uzunluğu, Çapı ve Narinliği

Genel olarak, çelik tellerin narinliğinin yüksek olması çelik tel donatılı betonların verimliliğini her ne kadar arttırsa da betonun işlenebilirliği düşürmekte, dolayısıyla da betonun performansı büyük ölçüde etkilenmektedir. Çelik tellerin narinliğinin artması taze betonun karışımında ve yerleşiminde sorunlara neden olarak çelik tellerin beton içerisinde homojen olarak dağılımını engellemektedir. Homojen olarak dağılmayan çelik teller topaklanmaya sebebiyet vererek matris içerisinde zayıf bölgeler oluşturmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı işlenebilirliğin sağlanması için tel narinliğinin 100, tel içeriğinin de %2 ile sınırlandırılmalıdır [99].

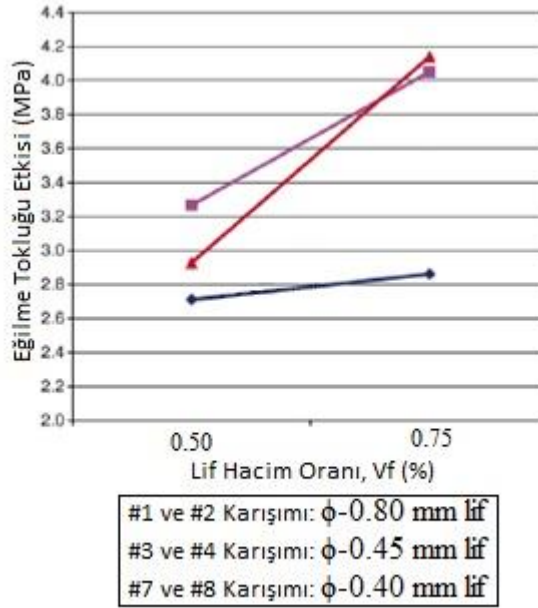
Çelik tel donatılı betonlarda tel uzunluğunun etkisi ise düz çelik tel kullanılması durumlarda çok daha fazla önemlidir. Yüksek narinliğe sahip uzun teller, dayanım artışı ve enerji yutma ile daha iyi performans göstermektedir [38].

Tellerin matristen sıyrılma dayanımı tel uzunluğu ile beraber artmaktadır. Sıyrılma dayanımının ara yüzey alanı ile orantılı olmasından dolayı aynı boy için çapı daha düşük olan yani daha narin olan teller daha yüksek sıyrılma dayanımı göstermektedir [3]. Çelik tel narinliği azaldığı takdirde çelik tel-matris bağı kritik hale gelir. Buna karşılık narinlik artarsa da topaklanma ve homojen dağılma gerçekleşmediğinden karıştırma problemi ortaya çıkmaktadır [100].

Yoo ve Banthia araştırmalarında uzun tellerin matris ve tel arasındaki bağ alanlarının fazla olması nedeniyle daha yüksek sıyrılma ve yük taşıma kapasitesi sağladıklarını belirtmişlerdir. Bununla birlikte çatlak yüzeyindeki çatlak sonrası davranışta ana faktör olan lif sayısının lif uzunluğu (çaplar eşit) ile değişmediğini söylemişlerdir. Örneğin, birim alana düşen lif sayısının kısa liflerde  $34,00/\text{cm}^2$ , orta boyutlu liflerde  $33,12/\text{cm}^2$  ve uzun liflerde ise  $35,79/\text{cm}^2$  olduğunu referans çalışmaya göre belirtmişlerdir [101]. Bunun nedeninin ise aynı miktarda tel kullanıldığı durumlarda uzun tel kullanılmasıyla karışıma daha az tel katılmasına rağmen çatlak yüzeyinde bulunma olasılıklarının uzunluklarının artmasıyla artacağı olarak açıklamışlardır [97].

Uygulamalarda en yaygın olarak tercih edilen çelik tel tipleri; yüksek narinliğe ve yüksek çekme dayanımına sahip uzun (50-60 mm) ve deforme edilmiş teller ile yüksek sünekliğe, düşük narinliğe ve düşük çekme dayanımına sahip kısa (20-25 mm) ve dalgalı tellerdir. Betonlarda uzun ve yüksek narinlikteki tellerin kullanılmasıyla daha iyi çatlama-sonrası tokluk ve kalıcı dayanım elde edilmektedir. Bir çelik telin beton ile ankraj kabiliyeti çelik telin çapı ve uzunluğuna da bağlıdır. Kırılma şekli eğilme olması düşünülen elemanlarda iyi ankraj mekanizmasına sahip uzun çelik teller tercih edilirler. Kısa teller ise çatlak yayılmasının kontrol edilmesinde, özellikle çekme halinde, uzun tellere kıyasla iyi değildirler [18].

Banthia ve Sappakittipakorn yaptıkları çalışmalarında kalın çaplı yani düşük narinlikli tellerin daha ucuz, beton içinde kolay dağılan ve işlenebilirliği çok düşürmeyen özelliklerinin yanı sıra düşük narinliklerinden dolayı ÇTDB'lerin tokluklarını olumsuz etkilediklerini Şekil 2.14'te göstermişlerdir [102].

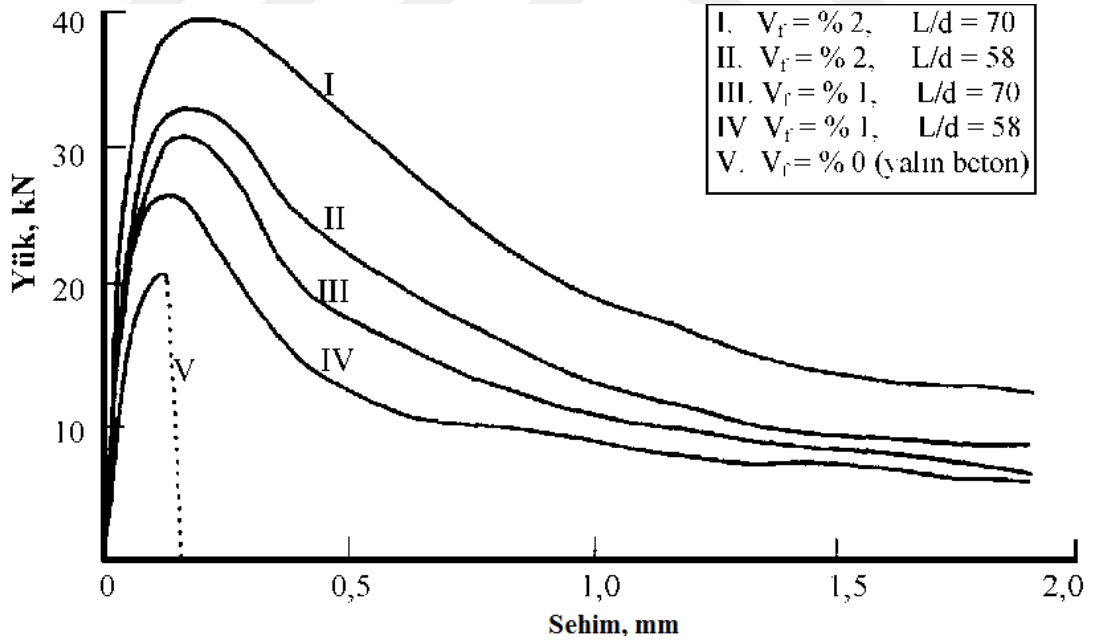


Şekil 2.14. ÇTDB'lerde Narinliğinin Etkisi [102]

Yazıcı ve diğ. çalışmalarında farklı narinliğe (45, 65 ve 80) sahip çelik telleri farklı miktarlarda (%0,5, %1 ve %1,5) beton karışımlarına katarak mekanik özellikler üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda çelik tel miktarının ve

narinliğinin artmasının mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır [10].

Gao ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda yüksek dayanımlı, hafif betonlarla ilgili hem çelik telin içeriğinin hem de narinliğinin artmasıyla yük-sehim eğrisi altında kalan alanın arttığı görülmüştür. Şekil 2.15’da gösterildiği gibi çelik tel içeriğinin ( $V_f$ ) % 0’dan % 2’ye artmasıyla yarma çekme dayanımı 4,95 MPa’dan 8,8 MPa’ya çıkarak % 78, eğilme dayanımı ise 6,2 MPa’dan 9,6 MPa’ya çıkarak % 90 artmıştır. Yapılan çalışmalarda, çelik tel narinliğinin ve hacminin, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğuna belirgin bir etkisi olduğu, basınç dayanımını ise az miktarda iyileştirdiği görülürken çekme/basınç dayanımı oranını da belirgin bir şekilde arttırdığı belirtilmiştir. Narinliğin ve tel hacminin artmasıyla, en büyük yüke karşılık gelen eğilme şekil değiştirmesinin (sehim) arttığı ve tellerin çatlak durdurmasına bağlı olarak en büyük yük sonrası yük-sehim eğrisinde ağır bir şekilde azalma olduğu gözlenmiştir [67].



Şekil 2.15. ÇTDB’lerde Tel İçeriği ve Narinliğinin Etkisi [67]

Mohammadi ve diğ. çelik tel donatılı betonun basınç, eğilme dayanımı, yarmada çekme ve ultrasonik dalga hızı üzerinde, hacim oranının ve tel narinliğinin etkileri araştırılmıştır. Bu hedef için üç farklı narinlikte (45, 65 ve 80) uçları kancalı çelik



teller kullanılmıştır. Teller beton hacminin %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında eklenmiştir. Çelik tellerin eklenmesi, hacim oranına ve narinliğe bağlı olarak betonun eğilme ve yarma-çekme dayanımını önemli oranda arttırdığı bulunmuştur [30].

#### **2.4.1.4. Çelik Tel Yönlenmesi**

ÇTDB'lerin performansında liflerin yönlenmesi önemli rol oynamaktadır. Lifler çatlaklara dik doğrultuda yönlendirilerek performansları maksimize edilebilir [103, 104]. Çelik tellerin beton içerisindeki yönlenmesi betondan sıyrılmaları esnasında önemli bir rol oynar. Çelik tellerin beton içerisinde yönlenmeleri, üretim tekniği, yerleştirme koşulları ve taze betonun jeolojisine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir [105].

Çelik telli betonların yerleştirilmesi ve sıkıştırılmasına bağlı olarak çelik teller numunenin alt bölümlerine doğru yerleşme eğiliminde bulunurlar. Bu durum ise betonda homojen olmayan dağılıma sebebiyet vermektedir. Bu sebeple çelik tel donatılı betonlar için eğilme deney metodunu tanımlayan ASTM C 1018 standardında geniş numunelerde döküm yönüne dik deney yapılmasının uygun olacağı tanımlanmaktadır [106]. Bu standartla, beton içerisinde homojen dağılmayan çelik tellerin sebep olduğu tel yerleşiminin etkisi ihmal edilmektedir. Burada tel yerleşim etkisi, döşeme sistemleri, zemin üzerindeki tabliyeler ve kirişlerde çekme bölgesi gibi uygulama alanlarında çelik tel donatılı betonun eğilme davranışını arttırmak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte tel yönlenmesinin düşük şekil değiştirmelerde ölçülen elastik özellikler sebebiyle dinamik elastisite modülü üzerinde etkisi daha az olmaktadır [30].

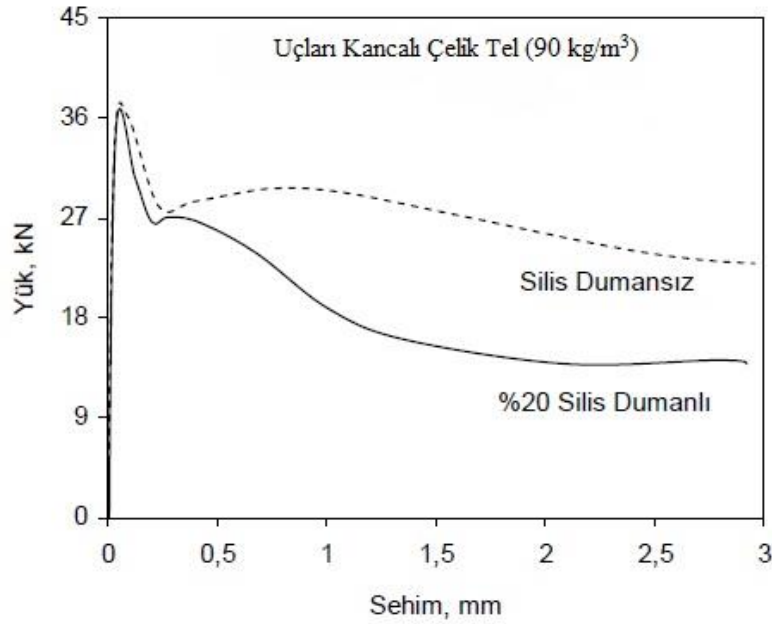
Şanal ve Özyurt Zihnioğlu, araştırmalarında lif yönlenmesinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırmışlar ve malzeme özellikleri döküm ve yerleştirme yöntemlerinin ÇTDB'lerin tasarımındaki önemlerini ortaya koymuşlardır [107].

Kang ve Kim çalışmalarında ultra yüksek dayanımlı betonlar üzerinde çekme dayanımı ve lif dağılımı ilişkisini incelemişler ve lif dağılımının tahmini için analitik bir yöntem önermişlerdir [108].

#### 2.4.2. Matris Bileşiminin Etkisi

ÇTDB'lerde çelik tellerin etkisi matrisin çatlamasından sonra görülmektedir. Çelik tellerin çekme dayanımının sertleşmiş betondan daha yüksek olmasından dolayı ÇTDB'lerin göçmesi matris ile çelik tel arasındaki bağın göçmesinden kaynaklanmaktadır. Tellerin sıyrılma etkisi çekme deneyi ile belirlenmektedir. Kancalı uçlu tellerin üstünlükleri bu deneylerle gözlemlenmiştir [109].

Geleneksel betonlarda dayanımın artmasıyla beton daha fazla gevrek bir hal alacağından sünekliliği elde edebilmek için çimento hamuruna çelik tel katmak gerekmektedir. Silis dumanının matris bileşimine katılmasıyla, matrisi daha gevrek yapacağından dolayı benzer tel tipi ve hacim oranlarından silis dumanlı beton kırımları daha az tokluğa sahiptir. Silis dumanı içeren betonların sade (silis dumanı içermeyen) betonlara göre çatlak sonrası yük-sehim eğrisinde daha fazla bir azalma olduğu Şekil 2.16'da görülmektedir.



Şekil 2.16. Yük-Sehim Eğrisine Silis Dumanı Eklenmesinin Etkisi [90]

Chan ve Chu çalışmalarında silis dumanı kullanımı ile bağ dayanımı ve sıyrılma enerjisi değerlerinin Reaktif Pudra Betonlarında (RPB) belirgin bir şekilde arttığını ortaya koymuşlardır [110].

Balendran ve diğ. yaptığı çalışmalarda beton numune boyutu ve türüne göre betonların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için tellerin etkinliğini araştırmışlardır. Kireç taşı agregalı ve hafif agregalı yalın ve çelik telli betonlar üretilmiştir. Çelik tellerin hacim oranı %1 olan betonların basınç dayanımları 90-115 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Benzer tip ve hacimdeki telle, eğilme dayanımı ve yarmada çekmedeki iyileşme normal ağırlıklı betonlara göre hafif ağırlıklı betonda daha yüksek olduğu belirtilmiştir [111].

Tel ve matris arasındaki bağ dayanımının artırılmasında kancalı uçlu çelik tel kullanımının etkisi yüksektir.

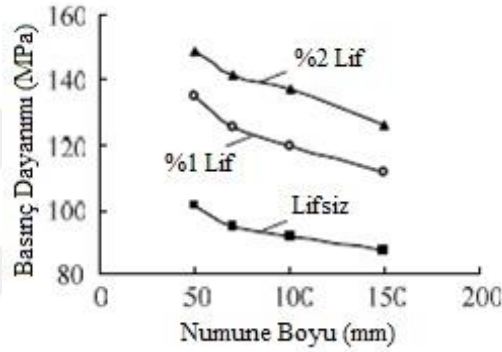
### **2.4.3. Karışım Özellikleri, Numune Boyutu ve Deney Yönünün Etkisi**

Çelik tel donatılı betonların matris bileşimi, kür yöntemleri ve deney yönleri mekanik özelliklerini etkilemektedir [112]. Geleneksel betonlara kıyasla çelik tel donatılı beton genellikle ince malzeme içeriğine ve daha yüksek çimento ve daha küçük agregalardan oluşur. Karışımında çelik tel oranı artarken çökme değeri azalır [113]. Çelik tel donatılı betonun işlenebilirliğindeki bu azalma miktarı kullanılan çelik tellerin içeriği ve tipine bağlıdır. Yüksek tel içeriğine sahip betonda telleri çimento hamuru içerisinde homojen olarak dağıtmak kolay değildir. Çelik tellerden istenilen performansı elde etmek için beton içerisinde homojen tel dağılımı istenmekle beraber geleneksel beton kullanıldığında yüksek tel hacim oranlarına ulaşmak zordur. Bu nedenle yüksek tel hacim oranlarında istenilen işlenebilirlikte beton oluşturabilmek için kendiliğinden yerleşen karışım yöntemleri kullanılabilir. Bir tel firması işlenebilirliği ve pompalaması kolay çelik tel donatılı betonlar elde edebilmek için şu sınırlamalar kullanmıştır [113].

- Çimento miktarı 320-350 kg/m<sup>3</sup> aralığında olmalıdır.
- 750-850 kg/m<sup>3</sup> kaliteli ve iyi derecelenmiş 0-4 mm kırma kum olmalıdır.
- Yuvarlak çakıl için en büyük eleman boyutu 28 mm, kırmataş ise en büyük 32 mm boyutlu devamlı agrega tane boyutu dağılımı olmalıdır. 14 mm'den daha büyük boyutlu eleman %15-%20 arasında sınırlandırılmalıdır.

- Karakteristik basınç dayanımı en düşük 25 N/mm<sup>2</sup> olmalıdır.
- Su/çimento oranı yaklaşık olarak 0,50 olmalı ve 0,55 değerini aşmamalıdır.
- Gerekli işlenebilirlik elde edilmesi için süper akışkanlaştırıcı kullanılmalıdır.
- Klor iyonu veya klorürlü içeren beton katkıları kullanılmamalıdır [114].

An ve diğ. reaktif pudra betonlarının basınç dayanımları üzerinde numune boyutu etkisini araştırmışlar ve numune boyutunun azalmasının dayanımı arttırdığı sonucunu ortaya koymuşlardır (Şekil 2.17) [115].



**Şekil 2.17.** Numune Boyutunun Basınç Dayanımına Etkisi [115]

Tautanji ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda, çelik tel donatılı betonların üretim yöntemlerinin mekanik özellikleri üzerinde etkileri incelenmiştir. Deney yönünün etkisi, döküm yönünün ve kür şartları değiştirilerek çelik tel donatılı betonun mekanik özelliklerine olan etkileri belirlenmiştir. Deneylerde numuneler üç değişik çevresel koşullarda (su, buhar, hava) kür edilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre buhar kürü sudaki küre kıyasla çelik tel donatılı betonun, eğilme tokluğunu azaltırken eğilme dayanımını etkilemediği gözlemlenmiş ve çelik tel donatılı betonun eğilme dayanımı döküm yönü ile önemli bir şekilde değiştiği belirtilmiştir [112].

Çelik tel donatılı betonun yerleştirilmesi, mastarlanması ve kürü için geleneksel alet, donanım ve işlemlerin kullanılması yeterli olmaktadır. Sıkıştırma ve mastarlamadan sonra aşınmaya karşı çimento ve ürünler, çoğunlukla beton yüzeyi üzerinde yayılmaktadır [5]. ÇTDB, sade beton gibi eşit teknik ve metot ile kürlenmeli ve korunmalıdır [13].

### **3. DENEYSEL ÇALIŞMA**

Çelik tel kanca boyunun beton özelliklerine ve kırılma parametreleri üzerine etkileri deneysel çalışma ile araştırılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında 3 farklı kanca boyuna sahip çelik teller, 3 farklı basınç dayanımına sahip beton karışımlarına 4 farklı miktarda katılmıştır. Üretilen betonların taze halde beton kıvamı üzerine etkileri çökme ve Vebe deneyleri ile incelenmiştir. Ayrıca taze beton karışımları üzerinde birim ağırlık ölçümleri de yapılarak tel miktarının beton birim hacim ağırlığı üzerine etkisi ve beton karışımlarının hava miktarları belirlenmiştir. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde ise basınç dayanımı, elastisite modülü ölçümü, yarmada çekme dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Çalışma kapsamında, kullanılan malzemeler, üretilen beton karışımları, uygulanan deney yöntemleri ve elde edilen sonuçlar bu bölüm içinde sunulmuştur.

#### **3.1.Kullanılan Malzemeler**

Bu çalışmada çimento, agrega ve sudan oluşan beton karışımlarına silis dumanı, kimyasal katkı ve çelik teller belirli oranlarda eklenerek farklı beton tasarımları oluşturulmuştur.

##### **3.1.1. Çimento**

Çalışma kapsamında CEM I 42,5 R Tipi Çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 3.1’de verilmektedir.

##### **3.1.2. Agrega**

Çalışma kapsamında kalker esaslı kırma kum, kırmataş I ve kırmataş II agregaları kullanılmıştır. Agregalara ait tane boyut dağılımları ve fiziksel özellikler Tablo 3.2’de verilmektedir.

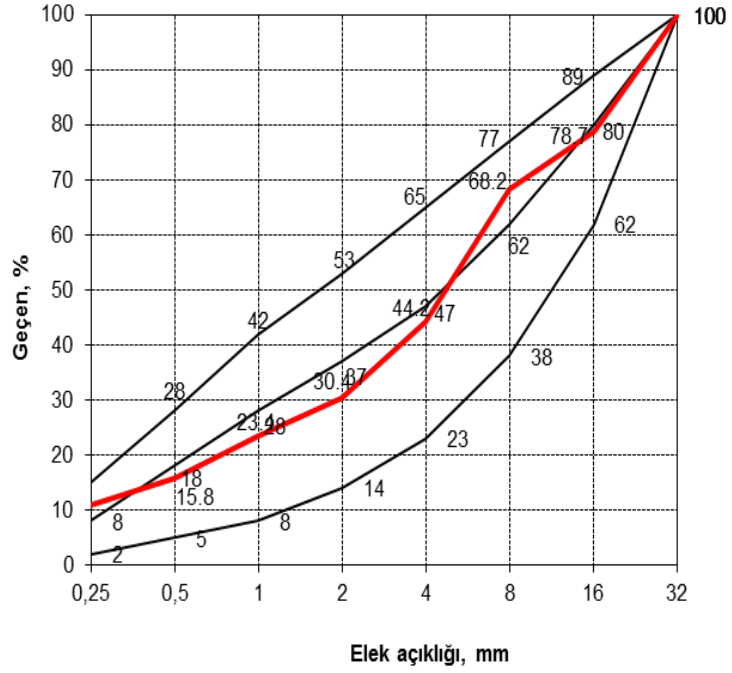
**Tablo 3.1.** Çimento Özellikleri

Kimyasal Bileşim	%	Fiziksel Özellikler		Mekanik Özellikler	MPa
CaO	62,30	32 $\mu$ altı (%)	17,39	1 Günlük	21,5
S. CaO	0,69	45 $\mu$ altı (%)	6,88	2 Günlük	33,3
SiO <sub>2</sub>	18,70	Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3,11	7 Günlük	46,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,48	Özgül yüzey Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3319	28 Günlük	55,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,01	Priz başı, dakika	166		
SO <sub>3</sub>	3,25	Priz sonu, dakika	216		
MgO	2,60				
Cl	0,0099				
K <sub>2</sub> O	1,11				
Na <sub>2</sub> O	0,23				
Çözünmeyen kalıntı	0,84				
Kızdırma kaybı	2,57				
C3S	58,17				
C2S	9,81				
C3A	9,44				
C4AF	9,16				

**Tablo 3.2.** Agrega Özellikleri

Agrega	Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Su emme (%)	Elek boyutu, mm % Geçen							
			0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Kırma kum	2,63	1,2	22,5	32,6	48,5	63,0	90,1	100	100	100
Kırma taş I	2,70	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	3,3	74,5	100	100
Kırma taş II	2,71	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	14,8	100

% 48 kırma kum, %27 kırma taş I ve % 25 kırma taş II kullanılmasıyla elde edilen karışıma ait granülometri eğrisi Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1. Agrega Karışımına Ait Granülometri Eğrisi

### 3.1.3. Mineral Katkı

Çalışmada, Ukrayna menşeli Silis dumanı (SD) kullanılmıştır. Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3'te verilmektedir.

### 3.1.4. Kimyasal Katkı

Çalışmada, polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı/yeni ikinci nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkısı (BASF Glenium Sky™ 650 M) kullanılmıştır.

### 3.1.5. Çelik Tel

Çalışmada, aynı narinliğe sahip fakat kanca boyları farklı olan 3 farklı çelik tel kullanılmıştır. Çelik tellerin özellikleri Tablo 3.4'te verilmektedir. Tellere ait görüntüler ise Şekil 3.2'de verilmektedir.

**Tablo 3.3.** Silis Dumanının Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Kimyasal Bileşim	
Bileşen (%)	Silis Dumanı
SiO <sub>2</sub>	85,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,39
CaO	0,80
MgO	1,47
SO <sub>3</sub>	1,34
Kızdırma Kaybı	3,4
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,23
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr) +45 mikron üzeri	2336
Hacim yoğunluğu (kg/dm <sup>3</sup> )	%58

**Tablo 3.4.** Çelik Tellerin Özellikleri

Çelik Tel Tipi	Boy, l (mm)	Çap, d (mm)	Narinlik (l/d) (uzunluk/çap)	Yoğunluk (g/ cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanım, f <sub>su</sub> ( N/mm <sup>2</sup> )
Dramix3D65/60 BN	60	0,90	65	7,85	1160
Dramix4D65/60 BG	60	0,90	65	7,85	1500
Dramix5D65/60 BG	60	0,90	65	7,85	2300



**Şekil 3.2.** Çelik Teller



### 3.2.Beton Karışımları

Çalışma kapsamında çelik tel içeriğinin, kanca ucunun farklı dayanımlara sahip betonlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Beton karışımları ve bileşen miktarları Tablo 3.5'te verilmektedir. Karışımların kodlanmasında kanca tipleri 3D, 4D ve 5D ile tel miktarları kullanım yüzdelerine göre belirtilmiştir. L, N ve H sırasıyla 0,60, 0,45 ve 0,30 s/ç oranına sahip karışımları göstermektedir. Örneğin, 3DV45L kodlu karışım kanca tipi 3D olan 45 kg/m<sup>3</sup> tel içeriğine sahip 0,60 s/ç oranındaki karışımı göstermektedir.

**Tablo 3.5.** Beton Karışımları ve Bileşen Miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

Su/Ç	Tel Miktarı	Çimento	Su	K.Kum	K.Taş I	K.Taş II	Süperakış.	Silis Dumanı	Birim ağırlık
0,60	0	300	180	892	515	479	2,0	0	2368
	15	300	180	890	514	478	2,0	0	2378
	30	300	180	887	512	476	2,0	0	2388
	45	300	180	885	511	475	2,0	0	2398
	60	300	180	883	510	474	2,0	0	2408
0,45	0	400	180	856	494	459	1,6	0	2391
	15	400	180	853	493	458	1,6	0	2401
	30	400	180	851	491	457	1,6	0	2411
	45	400	180	849	490	455	1,6	0	2421
	60	400	180	846	489	454	1,6	0	2430
0,30	0	450	149	847	489	455	5,4	45	2441
	15	450	149	845	488	454	5,4	45	2450
	30	450	149	843	487	452	5,4	45	2460
	45	450	149	840	485	451	5,4	45	2470
	60	450	149	838	484	450	5,4	45	2480

### 3.3.Deneysel Yöntemler

#### 3.3.1. Geleneksel Beton Deneyleri ve Standartları

Çalışma kapsamında uygulanan deneyler ve ilgili standartlar Tablo 3.6’da verilmektedir.

**Tablo 3.6.** Uygulanan Deneyler ve İlgili Standartlar

Deney Adı	Standart
Çökme	TS EN 12350-2
Vebe	TS EN 12350-3
Birim Ağırlık (Taze beton)	TS EN 12350-6
Birim Ağırlık (Sertleşmiş beton)	TS EN 12390-7
Basınç Dayanımı	TS EN 12390-3
Yarmada Çekme Dayanımı	TS EN 12390-6
Eğilmede Çekme Dayanımı	TS EN 14651

#### 3.3.2. Eğilmede Çekme Dayanımının Tayini

Eğilmede çekme dayanımı tayini deneyi ASTM C 1609 standardına uygun olarak yapılmıştır. Numunelerin genişlik ve yüksekliği 150’şer mm, uzunluğu 550 mm ve mesnet açıklığı 450 mm’dir. Yükleme Şekil 3.3’te gösterilmektedir.



**Şekil 3.3.** Yükleme Düzenegi

Eğilme deneyi kapalı çevrimli sehım kontrollü bir cihazla yapılabilmektedir. Yükleme hızı numune boyutuna ve sehım miktarına göre 0,025-0,3 mm/dakika aralığında seçilebilmektedir.

#### Hesaplamalar:

Eğilme dayanımı:

$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.1)$$

Burada;

$f$  : Gerilme değeri, MPa

$P$  : Yükleme değeri, N

$L$  : Mesnet açıklığı, mm

$b$  : Numune genişliği, mm

$d$  : Numune yüksekliği, mm

Artık gerilmeler:

$$f_i^D = \frac{P_i L}{bd^2} \quad (3.2)$$

Burada;

$f_i^D$  ve  $P_j$  sırasıyla,  $i$ . sehımdaki artık gerilme (MPa) ve yük (N) değeri'dir.

Eşdeğer eğilme gerilme oranı:

$$R_{T,150}^D = \frac{150 * T_{150}^D}{f_1 bd^2} * 100 (\%) \quad (3.3)$$

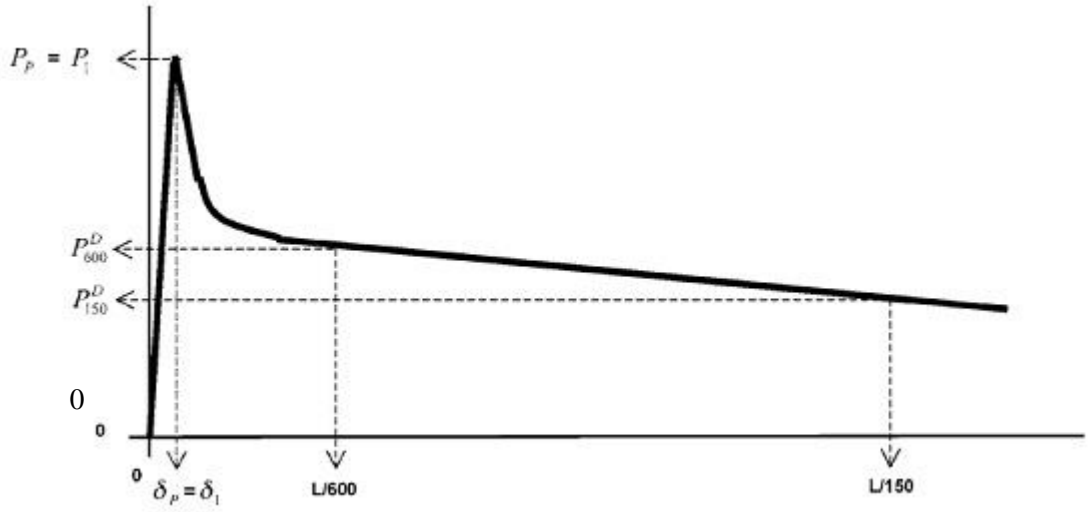
Burada;

$R_{T,150}^D$  : Eşdeğer eğilme gerilme oranı, MPa

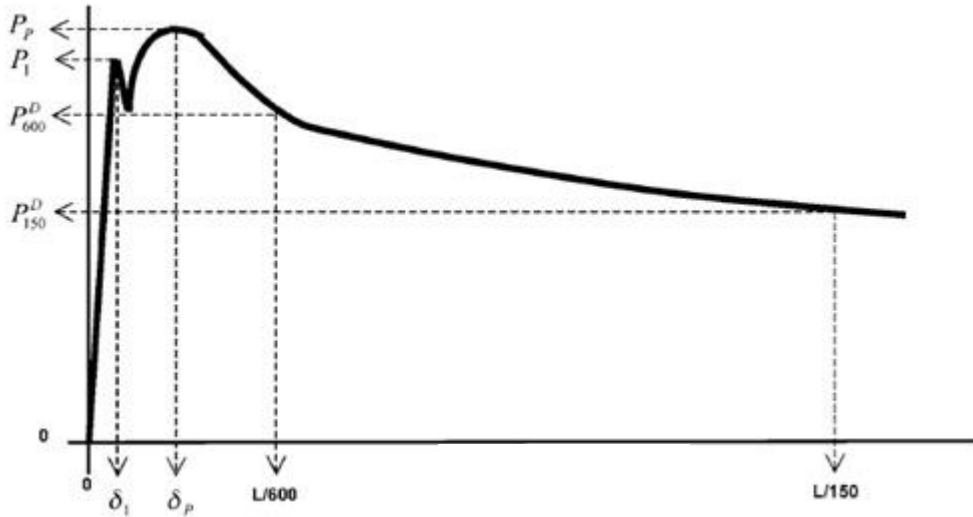
$T_{150}^D$  : Tokluk, Joule (N.m)

$f_1$  : İlk-tepe dayanımı, MPa

Tipik yük-sehim grafiği ve artık gerilme noktaları Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.4. Tipik Yük-sehim Grafiği ve Artık Gerilme Noktaları

Grafiklerde;

$L$  = Mesnet açıklığı

$P_1$  = İlk-tepe yükü

$P_p$  = Tepe yükü

$\delta_1$  = İlk-tepe yükündeki net sehım değeri

$\delta_p$  = Tepe yükündeki net sehım değeri

$f_1$  = İlk-tepe dayanımı

$f_p$  = Eğilme dayanımı

$P_{600}^D$  =  $L/600$  net sehım değerindeki kalıcı yük değeri

$f_{600}^D$  =  $L/600$  net sehım değerindeki kalıcı gerilme değeri

$P_{150}^D$  =  $L/150$  net sehım değerindeki kalıcı yük değeri

$f_{150}^D$  =  $L/150$  net sehım değerindeki kalıcı gerilme değeri

$T_{150}^D$  =  $L/150$  net sehım değerine kadar yük-sehım eğrisi altında kalan alan

### 3.4. Deney Sonuçları

#### 3.4.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Çalışmada üretilen betonlara ait taze beton sonuçları Tablo 3.7’de verilmektedir.

**Tablo 3.7.** Taze Beton Deney Sonuçları

Karışım Kodu	Çökme cm	Vebe sn	Birim ağırlık kg/m <sup>3</sup>	Beton sıcaklığı °C	Ortam sıcaklığı °C
L	16	3	2368	23,0	23,5
3DV15L	16,5	3,5	2378	23,8	24,2
3DV30L	14,5	4,2	2376	23,6	24,2
3DV45L	13,5	5	2388	22,6	24,2
3DV60L	12	6,5	2414	22,8	23,3
4DV15L	16	3	2374	22,2	23,4
4DV30L	14	3,5	2386	22,1	23,9
4DV45L	13,5	4	2390	22,3	23,7
4DV60L	10	6	2414	22,3	23,2
5DV15L	15,5	4	2380	21,1	23,3
5DV30L	15	4,2	2406	21,4	23,2
5DV45L	12,5	4,8	2422	21,1	22,7
5DV60L	11	10,5	2422	20,8	22,5
N	16	3	2370	22,5	22,6
3DV15N	14	3,8	2394	21,2	23,8
3DV30N	13,5	4,5	2406	20,3	22,3
3DV45N	12,5	5	2428	20,3	21,9
3DV60N	8	7,5	2440	20,3	22,6
4DV15N	15	4,3	2404	20,1	21,8
4DV30N	11	5,2	2420	19,9	22,2
4DV45N	10	5,5	2418	22,1	23,1
4DV60N	8	8,4	2424	22,6	23,2
5DV15N	15	3	2390	22,1	23,4
5DV30N	14	3,8	2406	22,2	23,1
5DV45N	12	4,4	2416	22,6	23,2
5DV60N	7	9,7	2428	22,3	23,5
H	18	3	2408	22,2	23,7
3DV15H	18	2,7	2434	23,2	24,8
3DV30H	16	3,8	2434	22,4	24,8
3DV45H	14	5	2438	22,9	24,8
3DV60H	12	7,5	2446	22,3	23,8
4DV15H	18	3	2434	23,0	24,8
4DV30H	16	4	2440	23,0	25,0
4DV45H	13	6,5	2448	21,8	24,6
4DV60H	12	9,5	2448	22,6	24,0
5DV15H	17	3	2424	22,7	23,9
5DV30H	16	4,5	2440	22,2	23,3
5DV45H	11,5	7,5	2448	22,0	23,9
5DV60H	11	9	2452	22,3	23,8

### 3.4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanım sonuçları Tablo 3.8'de verilmektedir.

**Tablo 3.8.** Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Karışım Kodu	Basınç Dayanımı MPa	Elastisite Modülü GPa	Yarmada Çekme Dayanımı MPa
L	40,4	30,7	3,02
3DV15L	40,1	30,6	3,45
3DV30L	40,4	29,5	3,59
3DV45L	40,0	29,1	3,75
3DV60L	39,6	31,3	3,63
4DV15L	39,8	31,1	3,40
4DV30L	41,5	31,6	3,58
4DV45L	42,4	31,9	3,75
4DV60L	42,5	31,7	3,91
5DV15L	43,7	30,5	3,52
5DV30L	43,2	31,5	3,65
5DV45L	42,1	33,6	3,80
5DV60L	42,3	34,3	3,94
N	49,5	34,7	3,38
3DV15N	52,0	34,6	3,47
3DV30N	52,1	35,1	3,55
3DV45N	48,5	34,5	3,76
3DV60N	49,4	35,8	3,72
4DV15N	51,0	35,3	3,40
4DV30N	50,4	35,1	3,56
4DV45N	48,3	34,0	3,65
4DV60N	48,2	34,0	3,72
5DV15N	52,5	33,2	3,41
5DV30N	53,4	34,0	4,01
5DV45N	48,1	34,6	4,10
5DV60N	52,1	34,9	4,05
H	83,0	41,5	4,11
3DV15H	80,4	40,8	4,88
3DV30H	83,0	39,6	5,29
3DV45H	80,7	40,9	5,49
3DV60H	84,0	40,7	5,54
4DV15H	83,0	41,1	4,90
4DV30H	85,5	40,5	5,28
4DV45H	82,5	41,5	5,43
4DV60H	81,8	39,3	5,26
5DV15H	84,3	41,3	4,92
5DV30H	82,5	39,3	5,32
5DV45H	83,3	40,6	5,45
5DV60H	79,9	40,3	5,69

Basınç dayanımı deneyleri TS EN 12390-3 standardına uygun olarak 15 cm çapında 30 cm yüksekliğinde standart silindir numuneler üzerinde, 300 ton kapasiteli preste 13,5 kN/s yükleme hızı uygulanarak yapılmıştır. Basınç dayanımı sonuçları 3 adet numunenin ortalamasıdır. Elastisite modülü ölçümleri ise silindir numunelerin 2 kN/s yükleme hızında, numunelerin basınç dayanımlarının %35'ine kadar yüklenmesiyle yapılmıştır ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin (%5-%35 aralığındaki) eğimi olarak hesaplanmıştır. Elastisite modülü değerleri 2 adet numunenin ortalamasıdır.

Yarmada çekme dayanımı deneyleri TS EN 12390-6 standardına uygun olarak 15 cm çapında 30 cm yüksekliğinde standart silindir numunelerin 6 cm yüksekliğinde dilimlere kesilmesiyle elde edilen numuneler üzerinde, 300 ton kapasiteli preste 0,05 MPa/s yükleme hızı uygulanarak yapılmıştır. Yarmada çekme dayanımı sonuçları 4 adet numunenin ortalamasıdır.

Eğilmede çekme dayanımının deneyleri Madde 3.3.2'de açıklanan yöntemine uygun olarak, 20 ton kapasiteli kapalı çevrimli geri beslemeli sehim kontrollü bir yükleme cihazında, 15 cm yüksekliğinde ve genişliğinde ve 55 cm uzunluğunda prizma numuneler üzerinde yapılmıştır. Eğilmede çekme dayanımı deneyleri 3 (L/150) mm sehim değerine ulaşıncaya kadar yapılmıştır. Deney sonuçları 3 adet numune ortalamasıdır ve 3 mm sehime kadar yük-sehim eğrileri altında kalan alanlar hesaplanarak karışımlara ait eşdeğer eğilme gerilme oranı değeri elde edilmiştir.



**Tablo 3.9. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneysel Sonuçları**

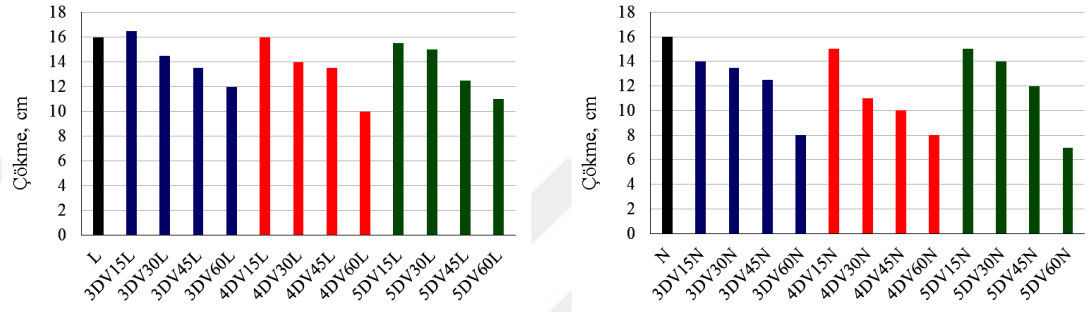
Karışım Kodu	$P_l$ kN	$\delta_l$ mm	$f_l$ MPa	$P_p$ kN	$\delta_p$ mm	$f_p$ MPa	$P^{D_{600}}$ kN	$f^{D_{600}}$ MPa	$P^{D_{150}}$ kN	$f^{D_{150}}$ MPa	$T^{D_{150}}$ Joule	$R^{D_{150}}$ %
L	27,00	1,088	3,60	27,00	1,088	3,60	-	-	-	-	-	-
3DV15L	29,40	0,041	3,93	29,40	0,041	3,93	7,80	1,04	6,80	0,91	24,9	28,0
3DV30L	27,40	0,044	3,65	27,40	0,044	3,65	17,65	2,36	12,60	1,68	48,1	60,0
3DV45L	30,75	0,052	4,11	30,75	0,052	4,11	27,05	3,61	19,20	2,37	71,1	79,0
3DV60L	26,55	0,039	3,54	34,00	1,098	4,54	28,30	3,77	27,85	3,71	86,2	109,0
4DV15L	29,25	0,043	3,90	29,25	0,043	3,90	13,00	1,73	10,10	1,35	39,2	44,0
4DV30L	28,70	0,042	3,82	28,70	0,042	3,82	19,75	2,63	11,90	1,59	54,1	63,0
4DV45L	29,55	0,042	3,94	32,90	0,872	4,39	29,00	3,88	16,85	2,25	70,7	79,5
4DV60L	30,15	0,040	4,02	39,60	1,498	5,28	35,65	4,76	31,05	4,14	106,5	120,0
5DV15L	28,50	0,044	3,81	28,50	0,044	3,81	7,85	1,05	10,15	1,36	38,8	45,5
5DV30L	29,55	0,043	3,94	29,55	0,043	3,94	15,90	2,12	12,80	1,71	47,6	54,5
5DV45L	28,90	0,049	3,85	28,90	0,049	3,85	19,75	2,64	20,20	2,69	62,7	72,5
5DV60L	32,45	0,049	4,33	46,40	1,424	6,19	39,65	5,29	31,40	4,19	109,6	113,0
N	29,00	0,990	3,87	29,00	0,990	3,87	-	-	-	-	-	-
3DV15N	28,00	0,044	3,72	28,00	0,044	3,72	6,35	0,85	6,50	0,87	28,9	34,5
3DV30N	28,50	0,042	3,81	28,50	0,042	3,81	13,90	1,86	13,60	1,82	46,6	54,5
3DV45N	30,80	0,045	4,11	30,80	0,045	4,11	16,30	2,18	14,10	1,88	55,0	60,0
3DV60N	31,80	0,043	4,24	33,60	1,220	4,48	25,25	3,37	18,40	2,46	75,2	79,0
4DV15N	29,60	0,044	3,95	29,60	0,044	3,95	9,50	1,27	6,60	0,88	30,2	34,0
4DV30N	30,55	0,045	4,08	32,65	0,657	4,36	26,20	3,50	10,50	1,40	55,2	60,0
4DV45N	30,15	0,046	4,03	33,20	0,604	4,43	29,70	3,96	8,80	1,18	70,0	77,5
4DV60N	28,90	0,052	3,85	33,40	1,428	4,45	30,00	4,00	10,90	1,46	72,0	83,0
5DV15N	33,20	0,045	4,42	33,20	0,045	4,42	20,20	2,70	20,50	2,71	52,8	53,0
5DV30N	35,05	0,048	4,68	35,05	0,048	4,68	27,70	3,70	23,55	3,14	81,1	76,0
5DV45N	32,60	0,045	4,35	35,60	0,869	4,75	27,30	3,63	25,00	3,33	76,1	78,0
5DV60N	32,40	0,045	4,32	35,95	1,036	4,79	29,20	3,89	22,60	3,02	79,2	82,0
H	33,50	0,880	4,47	33,50	0,880	4,47	-	-	-	-	-	-
3DV15H	37,80	0,045	5,04	37,80	0,045	5,04	18,70	2,49	10,10	1,35	40,6	38,0
3DV30H	39,40	0,044	5,24	39,40	0,044	5,24	16,80	2,24	12,60	1,68	47,5	40,0
3DV45H	38,70	0,045	5,16	38,70	0,045	5,16	20,00	2,67	15,80	2,11	57,5	50,0
3DV60H	40,50	0,045	5,40	41,70	0,204	5,56	24,30	3,24	17,60	2,35	81,3	64,0
4DV15H	35,20	0,044	4,69	35,20	0,044	4,69	17,60	2,35	15,70	2,09	45,0	42,5
4DV30H	38,35	0,048	5,12	38,35	0,048	5,12	22,50	3,01	15,00	2,02	50,0	45,0
4DV45H	41,50	0,050	5,53	41,50	0,050	5,53	26,60	3,55	15,50	2,07	65,0	52,0
4DV60H	39,85	0,045	5,31	42,90	0,636	5,72	28,90	3,85	19,60	2,61	82,0	69,0
5DV15H	37,00	0,046	4,93	37,00	0,046	4,93	15,40	2,05	10,10	1,35	37,8	34,0
5DV30H	37,90	0,040	5,06	37,90	0,040	5,06	23,50	3,13	12,20	1,63	57,0	50,0
5DV45H	36,80	0,040	4,91	36,80	0,040	4,91	22,20	2,96	9,45	1,27	56,4	51,0
5DV60H	39,90	0,043	5,32	50,75	0,257	6,77	29,80	3,98	20,25	2,71	86,2	73,0

## 4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 4.1.Taze Beton Deney Sonuçları

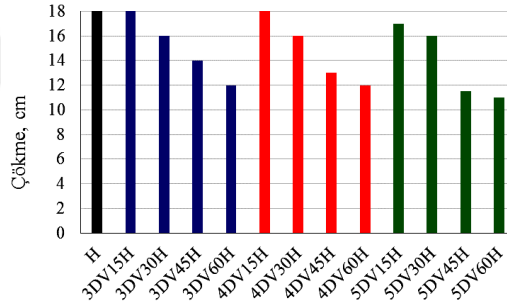
#### 4.1.1. Çökme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çökme deney sonuçlarına ait çubuk grafikler Şekil 4.1’de verilmektedir.



(a) S/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımlar

(b) S/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımlar



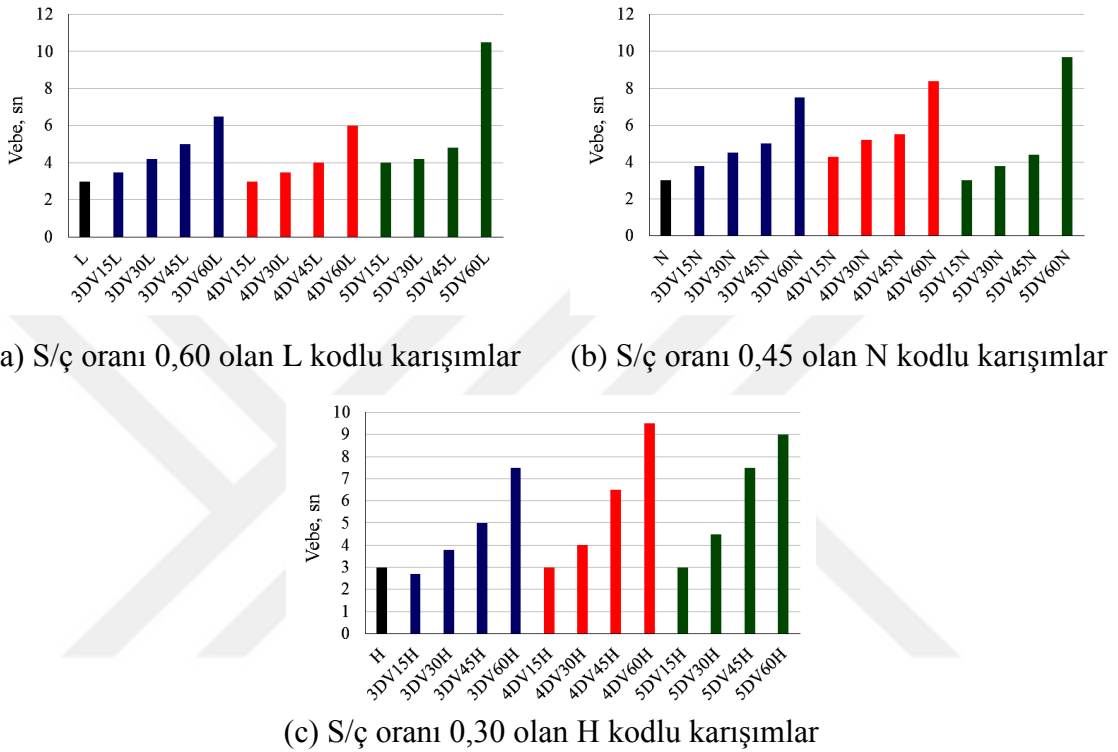
(c) S/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımlar

Şekil 4.1. Çökme Deneyi Sonuçları

Çelik tel kullanılmayan karışımların çökme değerleri S4 (16-21 cm) kıvam sınıfında belirlenmiştir. Çelik tel eklenmesiyle karışımların çökme değerlerinde düşmeler görülmüştür. Çökme değerlerindeki bu değişimlerde çelik tel kanca tipinin belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bununla birlikte 60 kg/m<sup>3</sup> tel içeriğine sahip karışımlarda çelik tel kullanılmayan karışımlara kıyasla çökme değerlerinin çok düştüğü ve kıvamın iki sınıf birden azalarak S2 (5-9 cm) sınıfına gerilediği görülmüştür. Diğer tel içeriklerinde kıvam en fazla bir sınıf azalmıştır.

#### 4.1.2. Vebe Denei Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Vebe denei sonuçlarına ait çubuk grafikler Şekil 4.2’de verilmektedir.

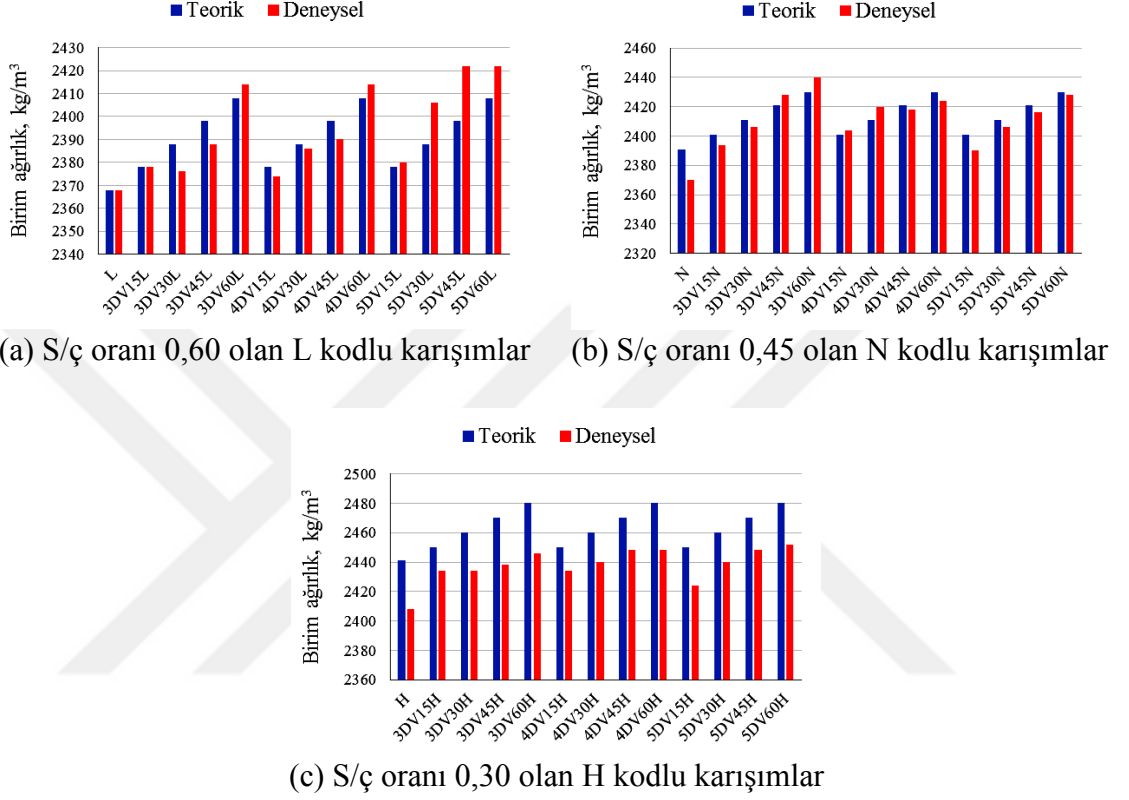


Şekil 4.2. Vebe Denei Sonuçları

elik tel kullanılmayan karışımların Vebe değerleri V4 (5-3 sn) olarak belirlenmiştir. elik tel eklenmesiyle karışımların Vebe değerlerinde artışlar görülmüştür. Vebe değerlerindeki bu değişimlerde tel kanca tipinin belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bununla birlikte 60 kg/m<sup>3</sup> tel içeriğine sahip karışımlarda Vebe değerlerinin daha fazla artış yaparak V3 (6-10 sn) sınıfına gerilediği görülmüştür. Diğer tel içeriklerinin (4DV45H ve 5DV45H karışımları hariç) Vebe sınıfı tel içermeyen karışımlarla aynı sınıfta elde edilmiştir.

### 4.1.3. Birim Ağırlık Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Teorik ve deneysel birim ağırlık deney sonuçlarına ait çubuk grafikler Şekil 4.3'te verilmektedir.



Şekil 4.3. Teorik ve Deneysel Birim Ağırlık Değerleri

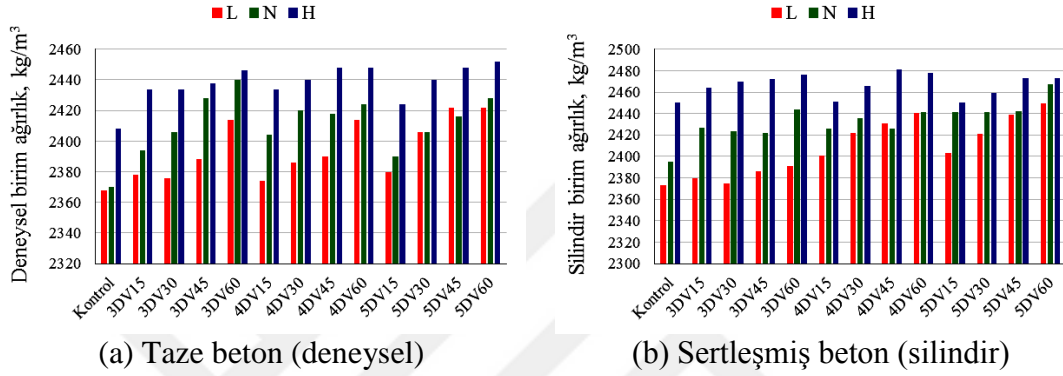
L kodlu karışımlar incelendiğinde tel içeriğinin artmasıyla birim ağırlık değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Kanca tipi 5D olan karışımlarda yüksek tel içeriklerinde deneysel birim ağırlıklar teorik birim ağırlıkların çok üzerinde elde edilmiştir.

N kodlu karışımlarda tel içermeyen karışım olan N kodlu karışım hariç diğer karışımlarda teorik ve deneysel birim ağırlıklar birbirine çok yakın elde edilmiştir. Ayrıca, tel içeriğinin artmasıyla birim ağırlık değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

H kodlu karışımlarda teorik birim ağırlıklar deneysel birim ağırlıklardan belirgin olarak daha yüksek elde edilmiştir. Bu farklılığın, bu betonların tasarım aşamasında kabul edilen hava miktarının gerçekteki değerden daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu karışımlarda da tel içeriğinin artmasıyla birim ağırlık değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Taze beton birim ağırlık değerleri üzerinde

tel kanca tipinin belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür.

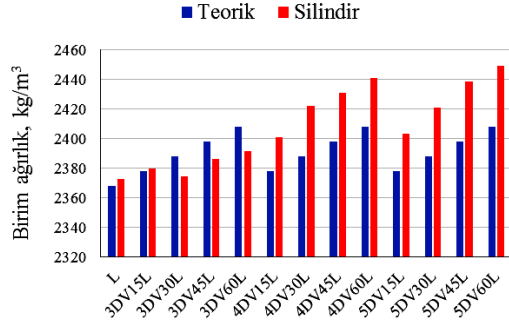
Birim ağırlık değerleri taze betonların yanı sıra sertleşmiş haldeki silindirlerden 28 gün kür sonunda havada (yüzey kuru suya doymun durumda) ve suda tartımlar yapılarak ta belirlenmiştir. Karışımların taze (deneysel) ve sertleşmiş (silindir) birim ağırlık sonuçları Şekil 4.4'te verilmektedir.



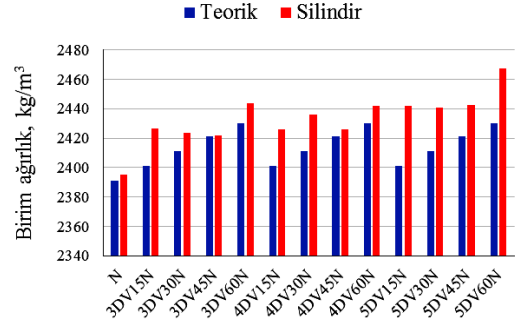
Şekil 4.4. Taze ve Sertleşmiş Birim Ağırlık Değerleri

Karışımların taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerleri incelendiğinde s/ç oranının azalmasıyla (S/Ç<sub>L</sub>:0,60, S/Ç<sub>N</sub>:0,45, S/Ç<sub>H</sub>:0,30) birim ağırlık değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca tüm karışımlarda tel içeriğinin artmasıyla birim ağırlık değerlerinin arttığı da belirlenmiştir.

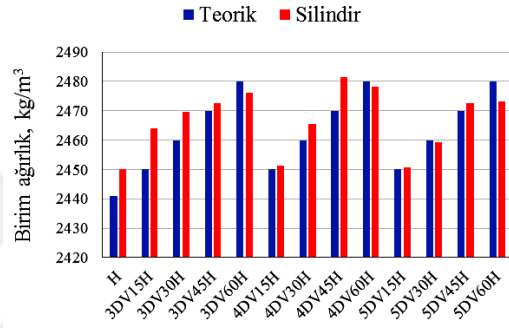
Teorik ve sertleşmiş birim ağırlık deney sonuçlarına ait grafikler ise Şekil 4.5'te verilmektedir. L ve N kodlu 4D ve 5D kanca tipli çelik tel içeren karışımlarda sertleşmiş beton birim ağırlık değerleri teorik birim ağırlık değerlerine kıyasla daha yüksek elde edilmiştir. H kodlu düşük s/ç oranına sahip karışımlarda ise teorik ve sertleşmiş birim ağırlık değerleri birbirine yakın elde edilmiştir. H kodlu karışımlarda taze beton birim ağırlık değerleri ise teorik değerinin altında elde edilmiş ve bu durumun hatalı hava miktarı tahmininden kaynaklandığı düşünülmüştür.



(a) S/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımlar



(b) S/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımlar



(c) S/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımlar

**Şekil 4.5.** Teorik ve Sertleşmiş (Silindir) Birim Ağırlık Değerleri

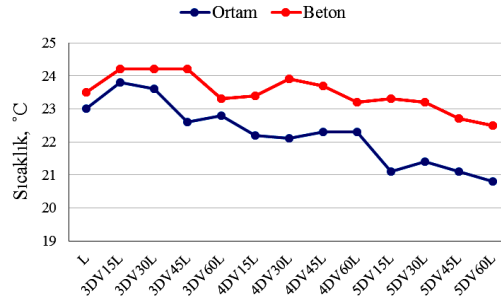
L kodlu beton sınıfında aynı içeriklere sahip sertleşmiş betonlarda tel kanca tipi 3D'den 4D'ye geçince birim ağırlık değerinde artış görülmüştür. Ayrıca 4D'den 5D'ye geçince de birim ağırlık değerinde artış olduğu görülmüştür.

N kodlu beton sınıfında aynı içeriklere sahip sertleşmiş betonlarda tel kanca tipi 3D ve 4D'de birim ağırlık değerinde belirgin bir değişim olmadığı görülmüştür. Ayrıca 5D'de diğer tel kanca tiplerinden yüksek birim ağırlık değerleri görülmüştür.

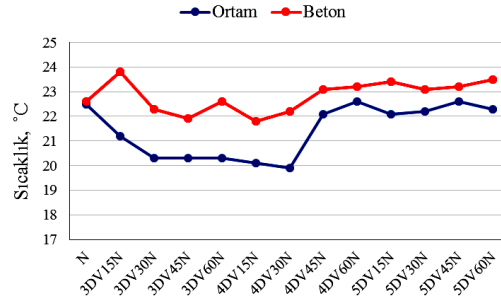
H kodlu beton sınıfında sertleşmiş betonlarda 15 kg/m<sup>3</sup> ve 30 kg/m<sup>3</sup> çelik tel içeren betonlarda tel kanca tipi 3D'den 4D'ye ve 4D'den 5D'ye geçince birim ağırlık değerlerinde artış görülmüştür. Ayrıca 45 kg/m<sup>3</sup> ve 60 kg/m<sup>3</sup> çelik tel içeren betonlarda tel kanca tipinin belirgin bir etkisi görülmemiştir.

#### 4.1.4. Sıcaklık Değerlerinin Kontrol Edilmesi

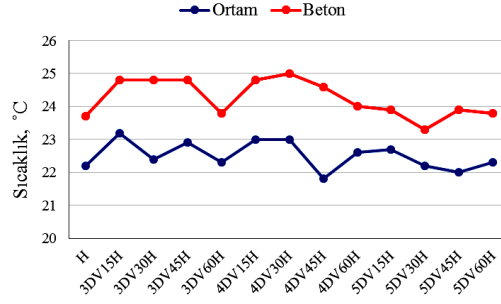
Üretimlerde laboratuvar ortam sıcaklığı  $22\pm 2$  °C ve beton karışımlarına ait sıcaklıklar ise  $23\pm 2$  °C'dir. Üretimlerde laboratuvar ve beton sıcaklıkları aşağıdaki Şekil 4.6'da verilmektedir. Sıcaklık değişiminin beton taze deney sonuçlarına belirgin etkisi olmadığı görülmüştür.



(a) S/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımlar



(b) S/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımlar



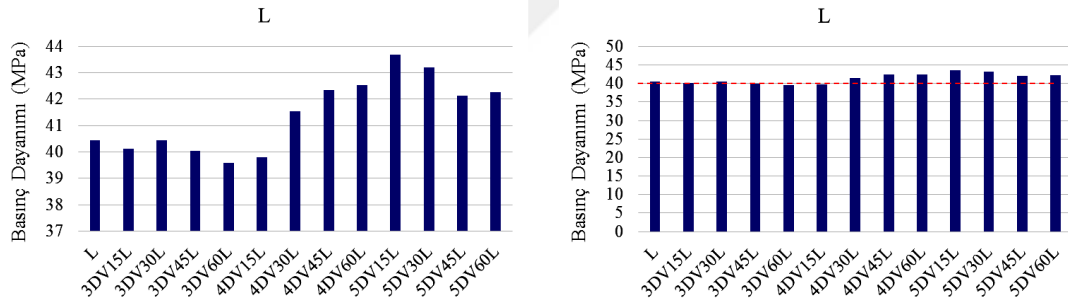
(c) S/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımlar

Şekil 4.6. Sıcaklık Değerleri

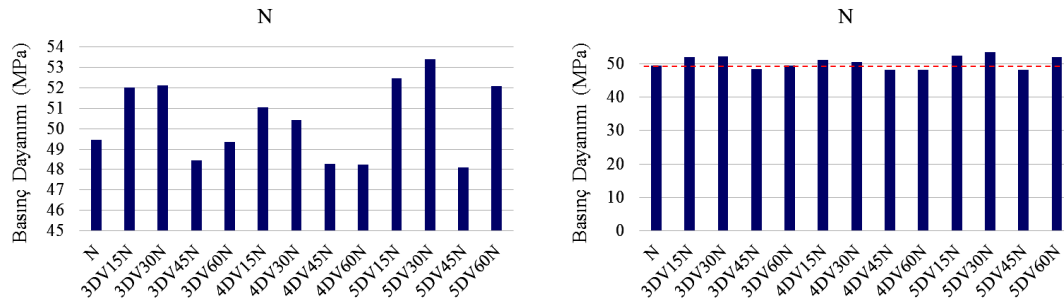
## 4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

### 4.2.1. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü

Basınç dayanımı deney sonuçlarına ait çubuk grafikler Şekil 4.7’de verilmektedir.

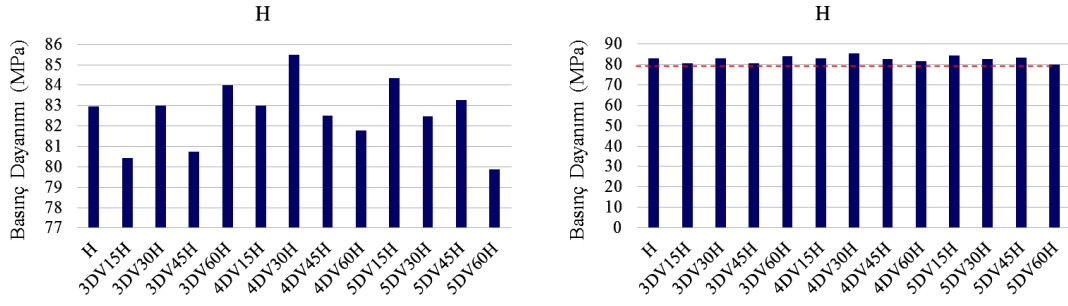


(a) S/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımlar



(b) S/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımlar





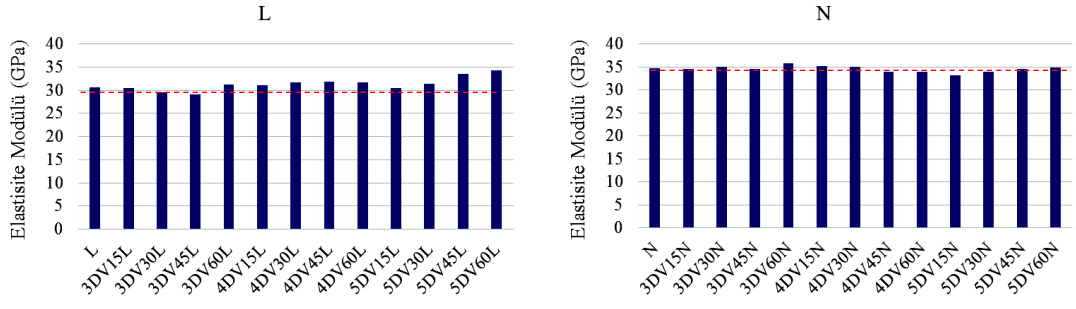
(c) S/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımlar

#### Şekil 4.7. Basınç Dayanımı Değerleri

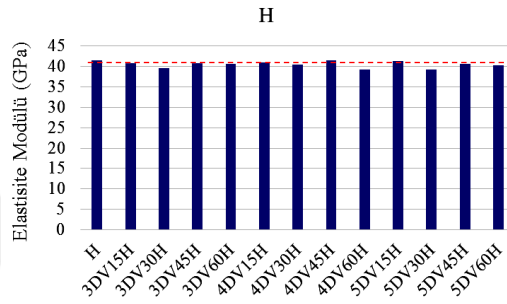
Basınç dayanımı grafikleri basınç dayanımı eksenini değerlerin olduğu dar bir aralıkta (soldaki şekiller) ve değerlerin sıfırdan itibaren değerlendirildiği aralıkta (sağdaki şekiller) olmak üzere iki şekilde gösterilmiştir. Bunun nedeni değerler dar bir aralıkta sunulduğunda karışımlar arasında büyük farklılıklar olduğu yanılgısıdır oysaki değerlerin sıfırdan itibaren değerlendirildiği grafiklerde, basınç dayanımları arasında belirgin farklılıkların olmadığı görülmektedir.

TS EN 206 standardına göre; su/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımların C40/50, su/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımların C50/60 ve su/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımların C80/95 olduğu belirlenmiştir.

Karışımlar kendi dayanım sınıfları içerisinde değerlendirildiğinde, tel kanca tipinin ve içeriğinin betonların basınç dayanımları üzerinde belirgin etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Elastisite modülü deney sonuçlarına ait çubuk grafikler Şekil 4.8'de verilmektedir.



(a) S/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımlar (b) S/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımlar



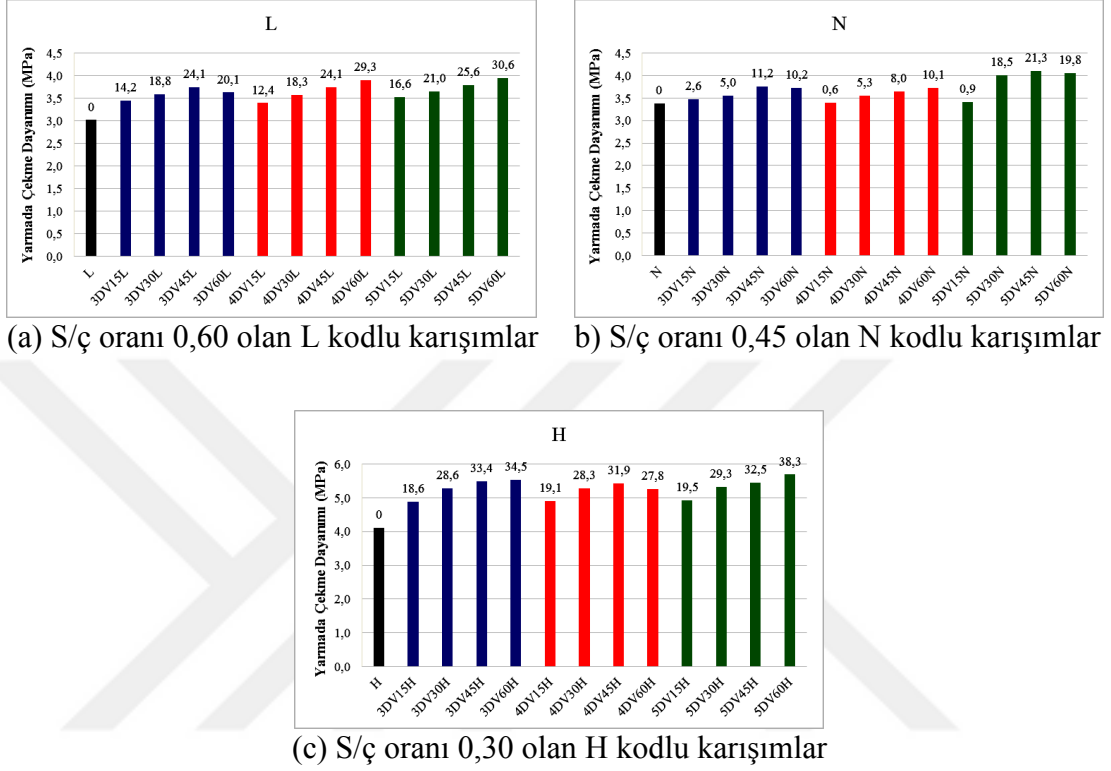
(c) S/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımlar

**Şekil 4.8.** Elastisite Modülü Değerleri

Beton karışımlarının elastisite modülü değerleri değerlendirildiğinde; su/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımların ortalama 30 GPa, su/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımların ortalama 35 GPa ve su/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımların ise ortalama 40 GPa elastisite modülü değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte betonların elastisite modülü değerleri üzerinde tel kanca tipinin ve içeriğinin belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

#### 4.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı

Yarmada çekme dayanımı sonuçlarına ait çubuk grafikler Şekil 4.9’da verilmektedir.



Şekil 4.9. Yarmada Çekme Dayanımı Değerleri

Çelik tel kullanılmayan betonlarda yarmada çekme dayanımı değerleri, L, N, ve H serileri için yaklaşık olarak sırasıyla 3,0 MPa, 3,5 MPa ve 4,0 MPa olarak elde edilmiştir. Çelik tel kullanılmasıyla yarmada çekme dayanımlarında artışlar elde edilmiştir. Her bir serinin tel kullanılmayan kontrol karışımına kıyasla yarmada çekme dayanımını artırdığı miktar yüzde (%) olarak çubukların üzerinde belirtilmiştir.

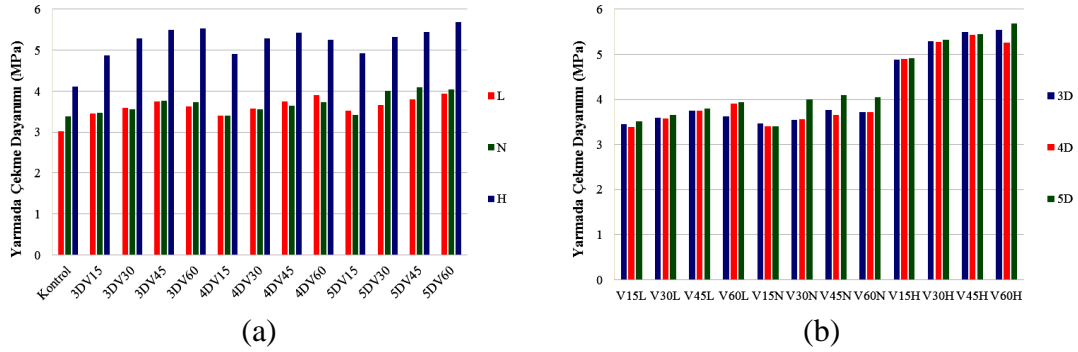
Bu değerler dikkate alındığında tel miktarının artırılmasıyla tüm tel kanca tipleri için tüm beton dayanımlarında yarmada çekme dayanımlarında artışlar olduğu görülmüştür. Bununla birlikte bazı karışımlarda 45 kg/m<sup>3</sup> tel miktarı 60 kg/m<sup>3</sup>'e kıyasla daha yüksek yarmada çekme dayanımı sağlamıştır. Bu duruma yüksek tel içeriğinden dolayı betonlarda daha yüksek hava miktarı oluşabilmesiyle beton dayanımının düşmesinin neden olabileceği düşünülmektedir.

Beton serilerindeki tel içeriklerinin yarmada çekme dayanımı üzerindeki ortalama artış miktarları Tablo 4.1’de verilmektedir.

**Tablo 4.1.** Yarmada Çekme Dayanımlarının Ortalama Artış Miktarları

Seri adı	Ortalama artış (%)
3DL	19,3
4DL	21,0
5DL	23,4
3DN	7,3
4DN	6,0
5DN	15,1
3DH	28,8
4DH	26,8
5DH	29,9

Sonuçlar (Tablo 4.1) değerlendirildiğinde tel kullanımının yarmada çekme dayanımı üzerinde en çok, yüksek dayanıma sahip (C80/95) H kodlu seride, en az ise N kodlu (C50/60) seride etkili olduğu görülmüştür. N kodlu seride ortalama artış miktarının düşük elde edilmesinin nedeni, daha yüksek yarmada çekme dayanımına sahip çelik tel içermeyen N kodlu karışımdır.



**Şekil 4.10.** Yarmada Çekme Dayanımı Değerleri (Beton Dayanımı ve Tel Kanca Tipi Değerlendirmeleri)

5D kanca tipine sahip tellerin kullanıldığı betonların yarmada çekme dayanımları diğer kanca tiplerinin kullanıldığı betonlara kıyasla tüm beton dayanımlarında daha yüksek olarak elde edilmiştir. Bu durum Şekil 4.10b’de ortaya konmuştur.

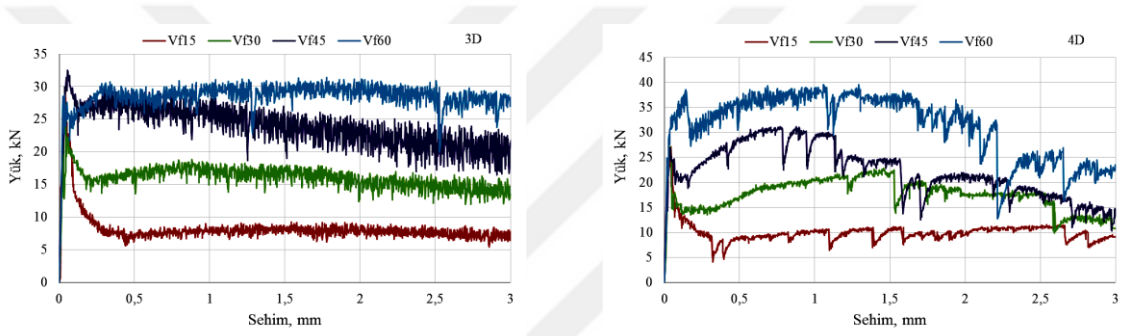
#### 4.2.3. Eğilmede Deneyi

Çalışmada uygulanan eğilme deneyi Madde 3.3.2’de anlatılmış, eğilme deneyi sonucu elde edilen değerler Tablo 3.9’da sunulmuştur. Bu bölümde eğilme deneyi

sonucu elde edilen yük-sehim eğrileri, eğilme dayanımları, artık dayanımlar, tokluk ve eşdeğer eğilme gerilme oranı sonuçları değerlendirilecektir.

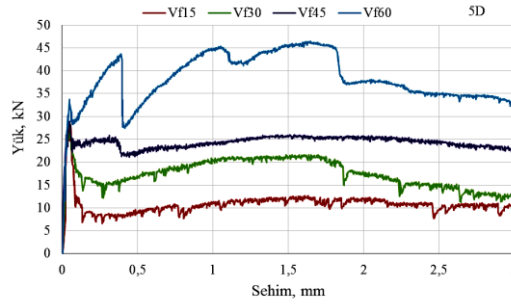
#### 4.2.3.1. Yük-sehim eğrileri

Eğilme deneyi sonucu elde edilen yük-sehim eğrilerinden bazı seçilmiş olanları tel miktarı etkisi karşılaştırılarak, L, N ve H serileri için sırasıyla Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'te verilmektedir. Yük-sehim eğrileri ile yapılan değerlendirmeler görsel karşılaştırma amaçlıdır ve birer adet numunenin eğrileri ile kısıtlıdır. Tüm numunelere ait yük-sehim eğrileri Ek-A'da verilmektedir.



(a) 3D kanca tipli L kodlu karışımlar

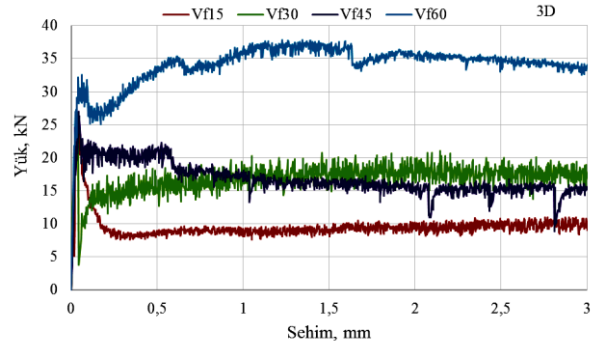
b) 4D kanca tipli L kodlu karışımlar



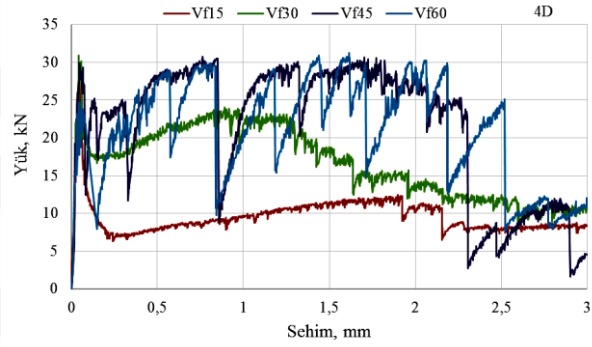
(c) 5D kanca tipli L kodlu karışımlar

#### Şekil 4.11. L Kodlu Karışımlarda Tel Miktarı Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri

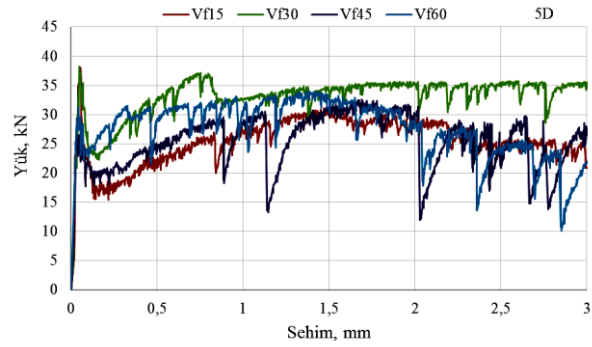
Düşük dayanıma sahip L serisi karışımlarda 3D tipi kanca tipinde yük-sehim eğrilerinde titreşimler görülmektedir. Bu titreşimlerin sıyrılmadan kaynaklı yük değerindeki düşüş ve yükselişlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. 5D tipi tel içeren karışımlarda bu şekilde titreşimler gözlenmemiştir.



(a) 3D kanca tipli N kodlu karışımlar



b) 4D kanca tipli N kodlu karışımlar

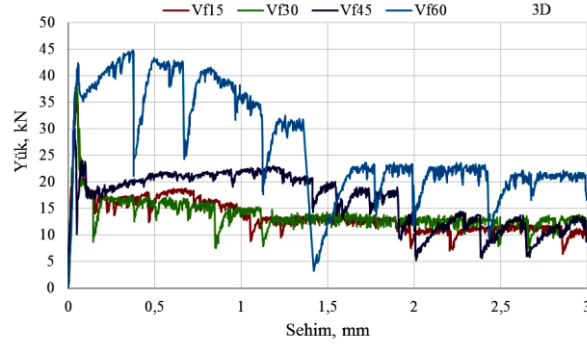


(c) 5D kanca tipli N kodlu karışımlar

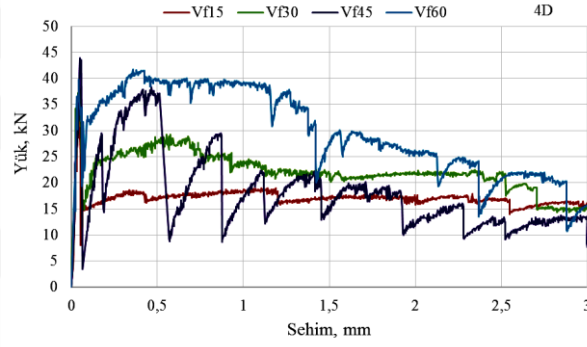
**Şekil 4.12.** N Kodlu Karışımlarda Tel Miktarı Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri

Düşük dayanıma sahip N serisi karışımlarda 3D tipi kanca tipinde yük-sehim eğrilerinde titreşimler görülmektedir. Bu titreşimlerin sıyrılmadan kaynaklı yük

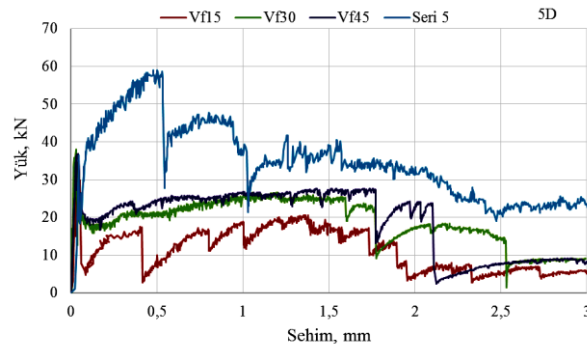
değerindeki düşüş ve yükselişlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. 5D tipi tel içeren karışımlarda bu şekilde titreşimler gözlenmemiştir.



(a) 3D kanca tipli H kodlu karışımlar



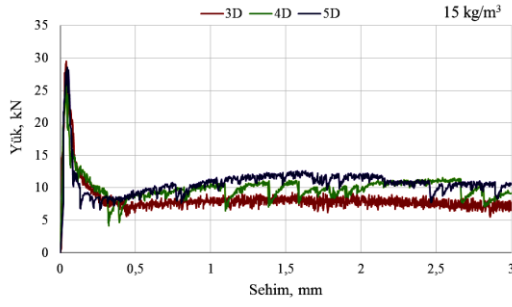
b) 4D kanca tipli H kodlu karışımlar



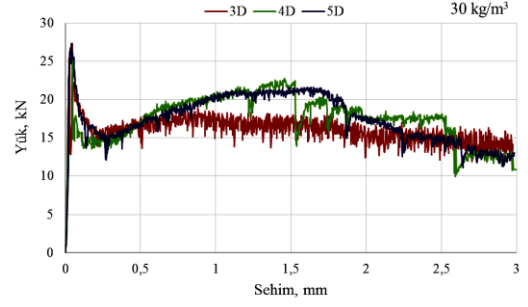
(c) 5D kanca tipli H kodlu karışımlar

**Şekil 4.13.** H Kodlu Karışımlarda Tel Miktarı Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri

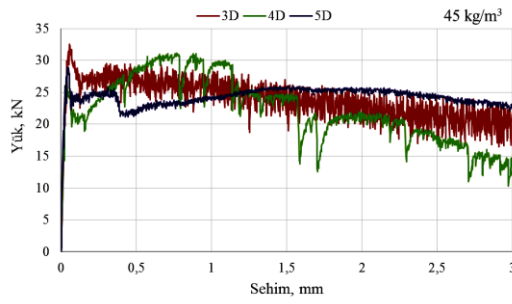
Eğilme deneyi sonucu elde edilen yük-sehim eğrilerinden bazı seçilmiş olanları tel kanca tipi etkisi karşılaştırılarak, L, N ve H serileri için sırasıyla Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16'da verilmektedir. Tüm numunelere ait yük-sehim eğrileri Ek-A'da verilmektedir.



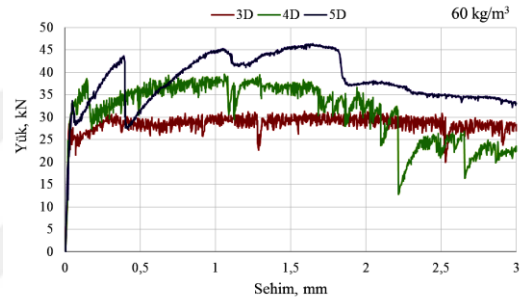
(a)  $V_f = 15 \text{ kg/m}^3$



(b)  $V_f = 30 \text{ kg/m}^3$



(c)  $V_f = 45 \text{ kg/m}^3$

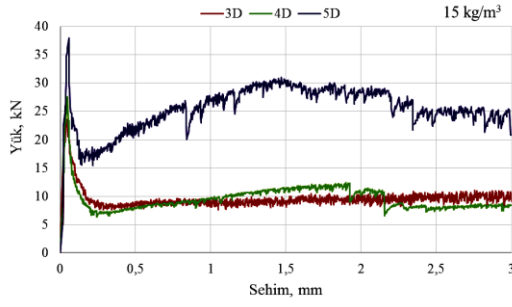


(d)  $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$

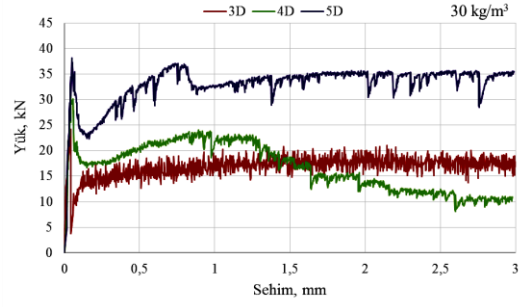
**Şekil 4.14.** L Kodlu Karışımlarda Tel Kanca Tipi Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri

Yük-sehim eğrileri incelendiğinde, düşük dayanıma sahip L serisi karışımlarda tel kanca tipinin etkisi görülmüştür. Tüm tel miktarlarında, 5D tipi kancalı tellerin 4D tipine kıyasla, 4D tipi kancalı tellerinde 3D tipi tellere kıyasla daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Diğer beton dayanımları içinde bazı istisnalar haricinde genel olarak benzer gözlemler yapılmıştır.

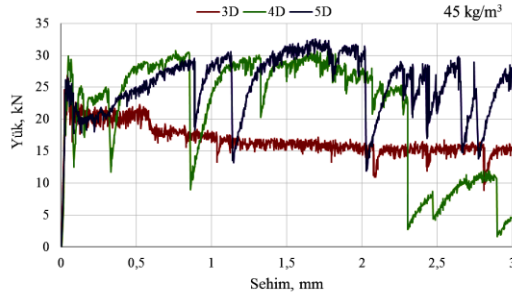




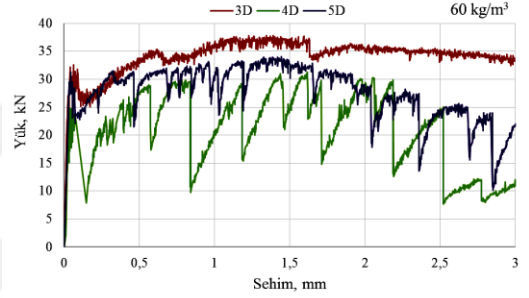
(a)  $V_f = 15 \text{ kg/m}^3$



(b)  $V_f = 30 \text{ kg/m}^3$

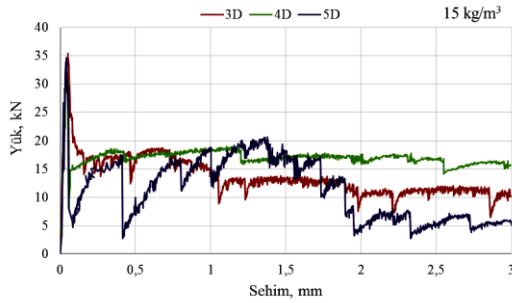


(c)  $V_f = 45 \text{ kg/m}^3$

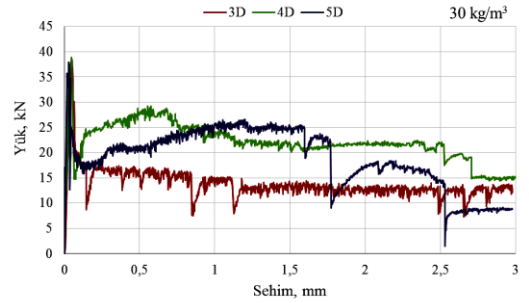


(d)  $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$

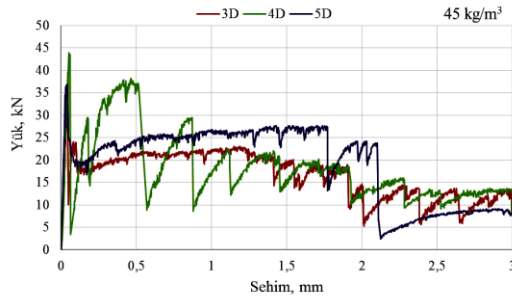
**Şekil 4.15.** N Kodlu Karışımlarda Tel Kanca Tipi Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri



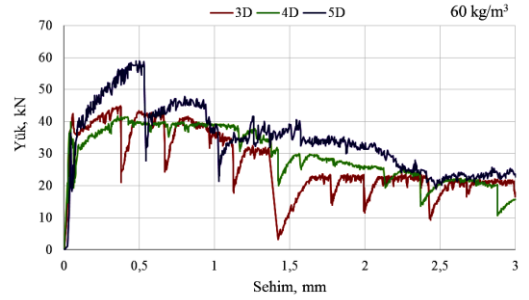
(a)  $V_f = 15 \text{ kg/m}^3$



(b)  $V_f = 30 \text{ kg/m}^3$



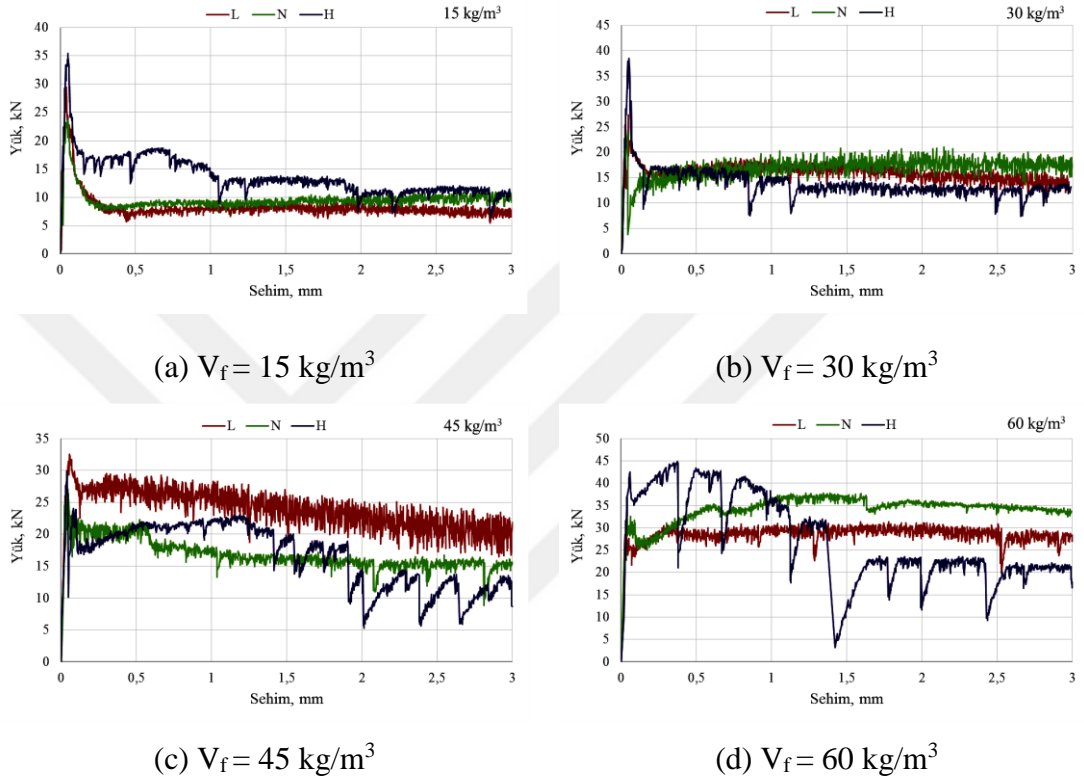
(c)  $V_f = 45 \text{ kg/m}^3$



(d)  $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$

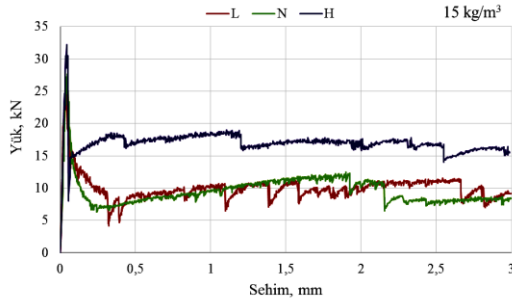
**Şekil 4.16.** H Kodlu Karışımlarda Tel Kanca Tipi Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri

Eğilme deneyi sonucu elde edilen yük-sehim eğrilerinden bazı seçilmiş olanları beton dayanımı etkisi karşılaştırılarak, 3D, 4D ve 5D kanca tipi teller için sırasıyla Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19'da verilmektedir. Tüm numunelere ait yük-sehim eğrileri Ek-A'da verilmektedir.

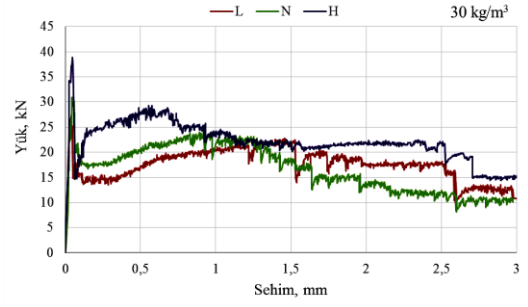


**Şekil 4.17.** 3D Kanca Tipli Tellerin Kullanıldığı Karışımlarda Beton Dayanımının Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri

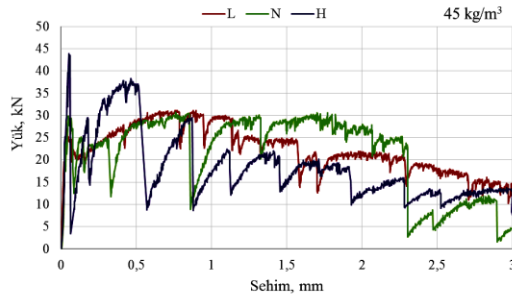
Yük-sehim eğrileri incelendiğinde, 3D tipi kancalı tellerin kullanıldığı karışımlarda sadece düşük tel miktarında ( $15 \text{ kg/m}^3$ ) yüksek dayanımlı beton ( C80/95 ) daha iyi performans sergilemiştir. Diğer tel miktarlarında ise yüksek dayanımlı beton en kötü performansı sergilemiştir. Bu duruma daha gevrek yapısının neden olabileceği düşünülmektedir. 4D tipi kancalı tellerin kullanıldığı karışımlarda ise tüm tel miktarlarında genel olarak, beton dayanımı arttıkça performansların arttığı görülmüştür. 5D tipi kancalı tellerin kullanıldığı karışımlarda düşük tel içeriklerinde normal dayanımlı ( C50/60 ) betonlarda daha iyi performanslar görülmüştür.



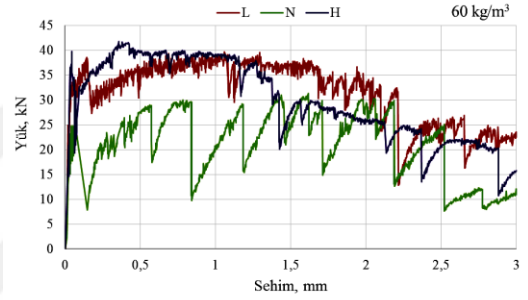
(a)  $V_f = 15 \text{ kg/m}^3$



(b)  $V_f = 30 \text{ kg/m}^3$

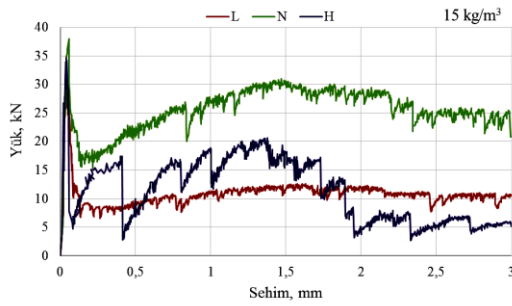


(c)  $V_f = 45 \text{ kg/m}^3$

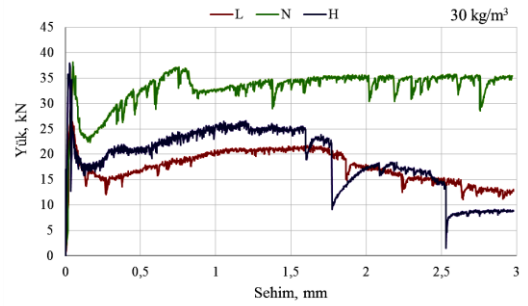


(d)  $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$

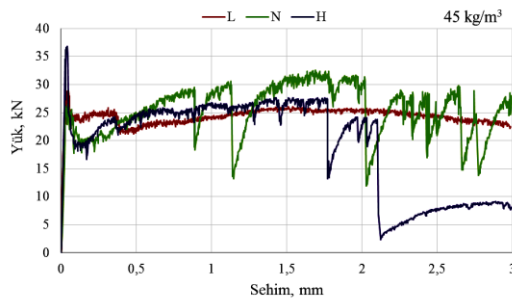
**Şekil 4.18.** 4D Kançalı Tipli Tellerin Kullanıldığı Karışımlarda Beton Dayanımının Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri



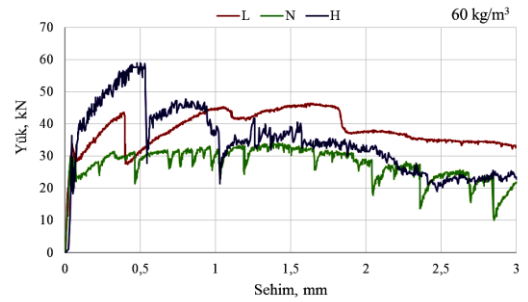
(a)  $V_f = 15 \text{ kg/m}^3$



(b)  $V_f = 30 \text{ kg/m}^3$



(c)  $V_f = 45 \text{ kg/m}^3$



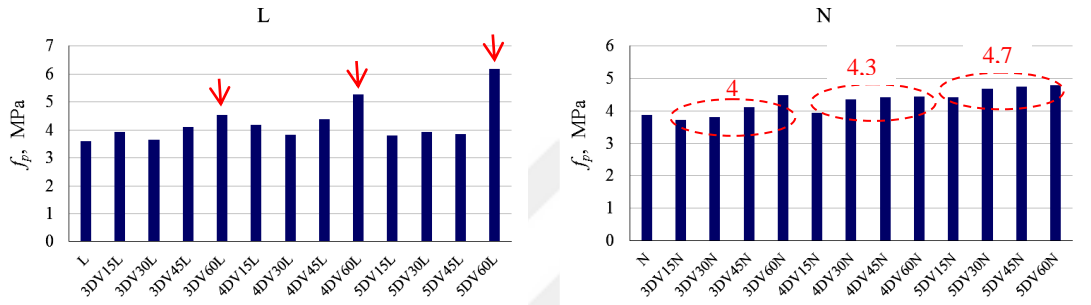
(d)  $V_f = 60 \text{ kg/m}^3$

**Şekil 4.19.** 5D Kanca Tipli Tellerin Kullanıldığı Karışımlarda Beton Dayanımının Etkisi İçin Yük-Sehim Eğrileri

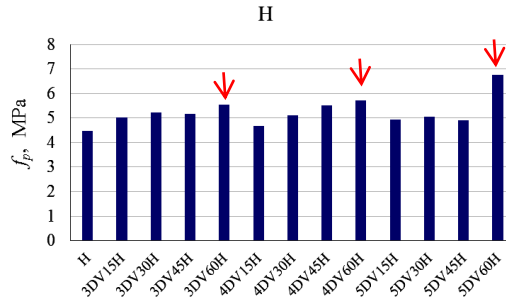
Yük-sehim eğrileri ile yapılan değerlendirmeler görsel karşılaştırma amaçlıdır ve birer adet numunenin eğrileri ile kısıtlıdır.

#### 4.2.3.2. Eğilme dayanımı ve ilk tepe dayanımı

Deneysel sonuçlarda elde edilen eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.20’de verilmektedir.



(a) S/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımlar (b) S/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımlar



(c) S/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımlar

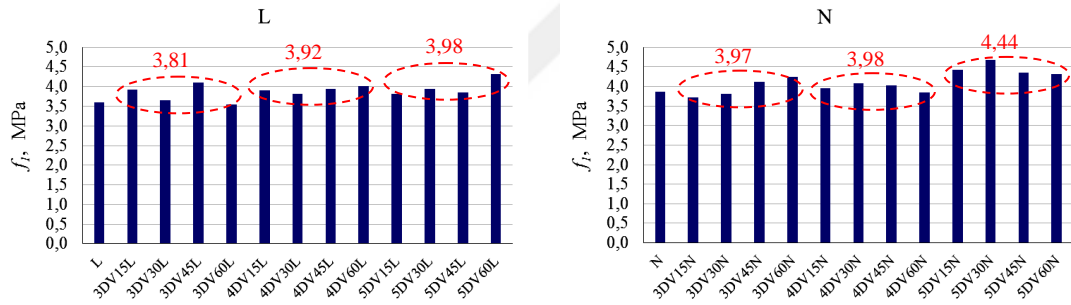
Şekil 4.20. Eğilme Dayanımı Değerleri

L kodlu karışımlarda eğilme dayanımı üzerinde tel içeriği ve kanca tipinin belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bununla birlikte, yüksek tel içeriğine ( $60\text{kg/m}^3$ ) sahip karışımlarda eğilme dayanımları belirgin olarak daha yüksek elde edilmiştir. Bu sonuç Şekil 21’de ki sonuçlarla birlikte değerlendirilecektir. L kodlu karışımlar için eğilme dayanımı ortalama 4,25 MPa olarak elde edilmiştir.

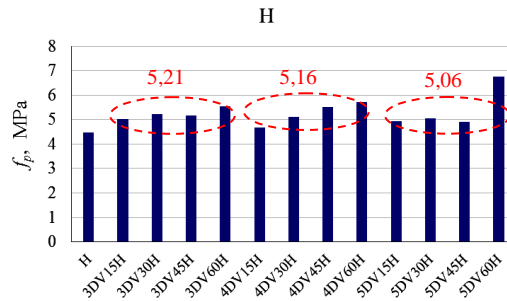
N kodlu karışımlarda eğilme dayanımı üzerinde tel içeriğinin belirgin bir etkisi gözlenmezken tel kanca tipinin etkisi görülmüştür. 3D, 4D ve 5D tipi kancalı teller için eğilme dayanımları ortalama olarak sırasıyla 4, 4,3 ve 4,7 MPa olarak elde edilmiştir.

H kodlu karışımlarda eğilme dayanımı üzerinde tel miktarı arttıkça genel olarak artışlar elde edilmiştir. Kanca tipinin ise belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bununla birlikte, yüksek tel içeriğine ( $60\text{kg/m}^3$ ) sahip karışımlarda eğilme dayanımları belirgin olarak daha yüksek elde edilmiştir. Bu sonuç Şekil 21'de ki sonuçlarla birlikte değerlendirilecektir. H kodlu karışımlar için eğilme dayanımı ortalama 5,25 MPa olarak elde edilmiştir.

Deneyle sonuçunda elde edilen ilk tepe dayanımı değerleri Şekil 4.21'de verilmektedir.



(a) S/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımlar (b) S/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımlar



(c) S/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımlar

Şekil 4.21. İlk Tepe Dayanımı Değerleri

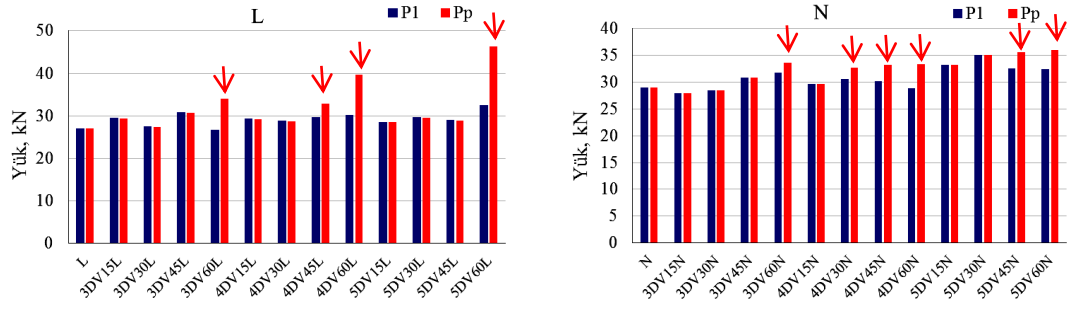
L kodlu karışımlarda ilk tepe dayanımı üzerinde tel içeriğinin belirgin bir etkisi gözlenmezken, kanca tipinin ise etkisi görülmüştür. 3D, 4D ve 5D tipi kancalı teller için ilk tepe dayanımları ortalama olarak sırasıyla 3,81, 3,92 ve 3,98 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 4.20’de eğilme dayanımlarında yüksek tel miktarlarında elde edilen belirgin farklılıklar ilk tepe dayanımlarında görülmemiştir. Bu durumlar toplu olarak Şekil 4.22’de incelenecek ve değerlendirilecektir.

N kodlu karışımlarda ilk tepe dayanımı üzerinde tel içeriğinin belirgin bir etkisi gözlenmezken tel kanca tipinin etkisi görülmüştür. 5D tipi kancalı teller diğer kanca tiplerine kıyasla daha iyi performans sergilemiştir.

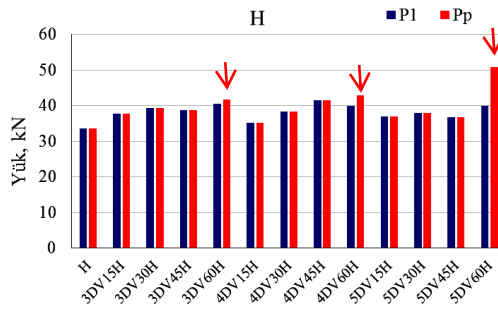
H kodlu karışımlarda ilk tepe dayanımı üzerinde tel içeriğinin belirgin bir etkisi gözlenmezken tel kanca tipinin etkisi görülmüştür. 5D tipi kancalı teller diğer kanca tiplerine kıyasla daha kötü performans sergilemiştir.

Tüm karışımlarda genel olarak tel kullanımıyla yalın betona kıyasla daha yüksek ilk tepe dayanımı değerleri elde edilmiştir. L, N ve H kodlu karışımlar için ilk tepe dayanımları ortalama olarak sırasıyla 3,9, 4,1 ve 5,1 MPa elde edilmiştir.

Karışımlara ait ilk tepe yükü ve maksimum yük değerleri Şekil 4.22’de karşılaştırılmıştır. Tüm beton sınıflarında 60 kg/m<sup>3</sup> tel miktarına sahip karışımlarda ilk tepe yükünden sonra daha yüksek yük değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum, yük-sehim eğrilerinden de gözlemlenebileceği üzere numunenin ilk tepe yükünden sonra ani olarak yük taşıma kapasitesini yitirmesi daha sonra tellerin devreye girmesiyle tekrar yük taşıma kapasitesinin artmaya başlaması ve bu artışın artan sehim miktarıyla beraber tellerin matrinden sıyrılması veya kopmasına kadar devam etmesi, yüksek tel miktarlarında da sıyrılma veya kopmaların daha güç olması ile açıklanabilir.



(a) S/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımlar (b) S/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımlar

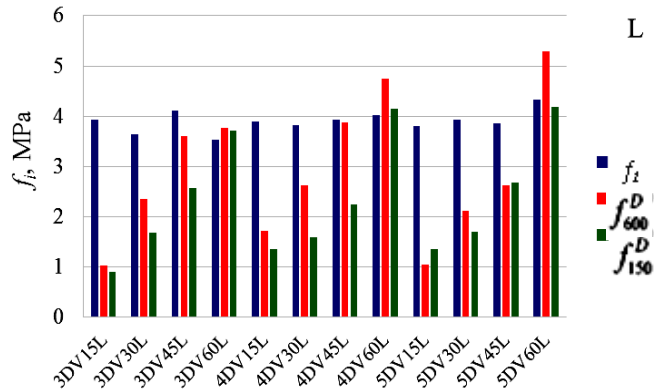


(c) S/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımlar

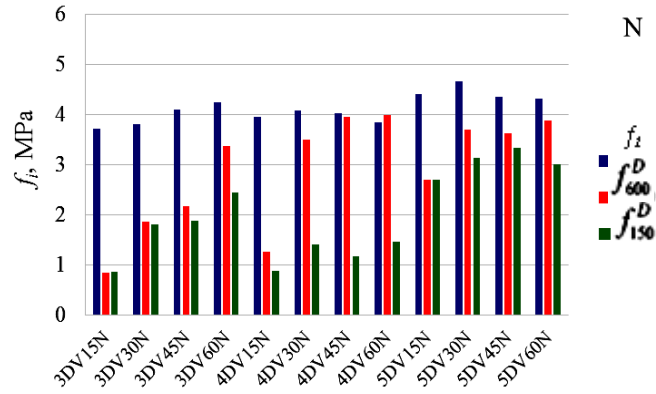
Şekil 4.22 İlk Tepe Yükü ve Maksimum Yük Değerleri

#### 4.2.3.3. Artık gerilmeler

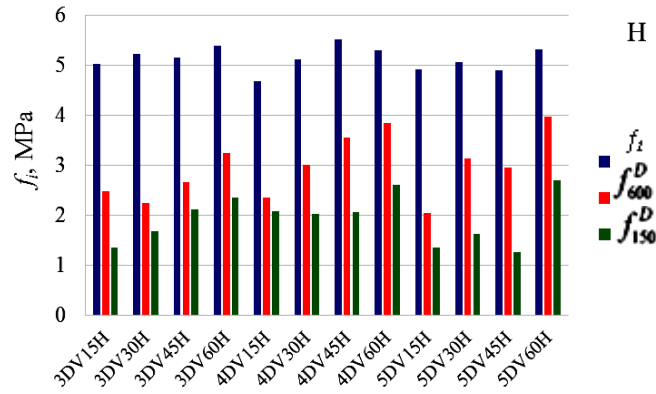
Eğilme deneyi sonucunda artık gerilmeler elde edilmiştir. Elde edilen artık gerilmeler ve hesaplamaları Madde 3.3.2’de anlatılmıştır. Artık gerilme değerleri Şekil 4.23’te verilmektedir.



(a) S/ç oranı 0,60 olan L kodlu karışımlar



(b) S/ç oranı 0,45 olan N kodlu karışımlar



(c) S/ç oranı 0,30 olan H kodlu karışımlar

**Şekil 4.23.** Artık Gerilme Değerleri

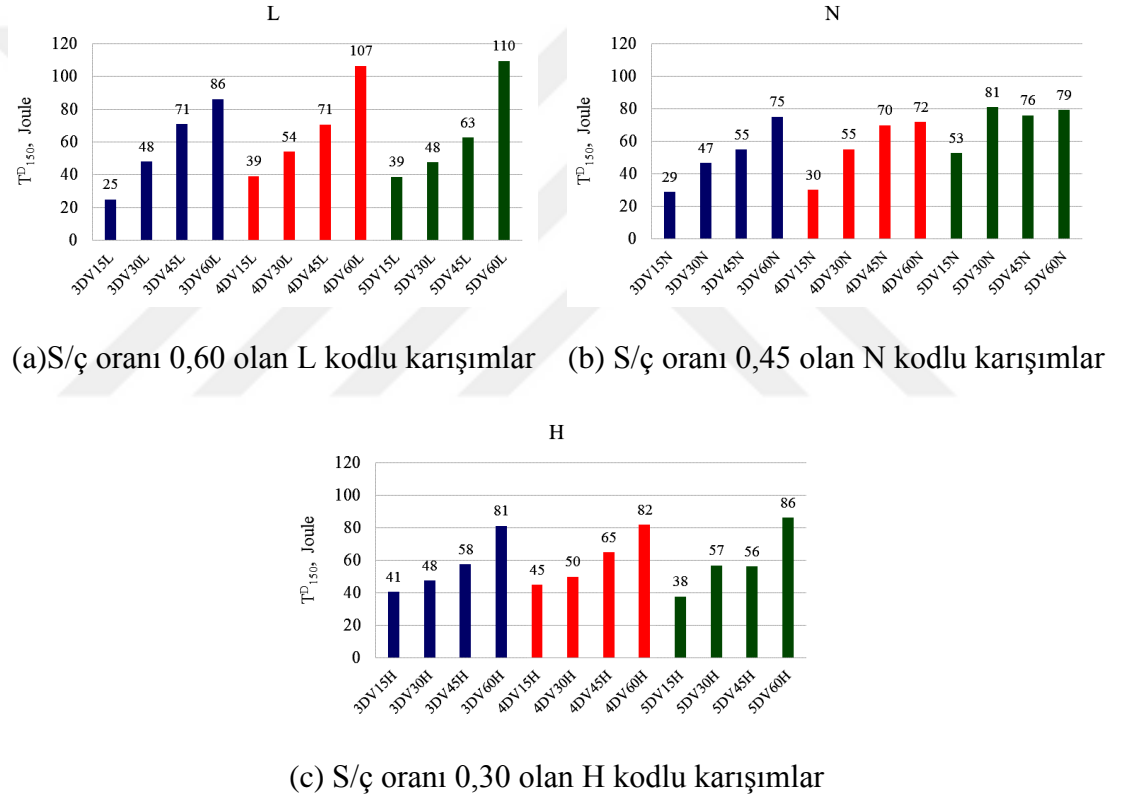
Genel olarak tüm beton dayanımlarında ilk tepe dayanımı ( $f_t$ ) çelik tel miktarına göre değişmezken, artık gerilme değerlerin çelik tel miktarı arttıkça arttığı görülmüştür. 3 mm sehim değerindeki artık gerilmeler ( $f^{D}_{150}$ ) 0,75 mm sehim değerindeki artık gerilmelere ( $f^{D}_{600}$ ) kıyasla daha düşük elde edilmiştir (5DV15L ve 5DV45L karışımları hariç.). Düşük dayanıma sahip L serisi betonlarda yüksek tel miktarına ( $60\text{kg/m}^3$ ) sahip karışımlarda artık gerilmeler ilk tepe dayanımından daha yüksek elde edilmiştir. Diğer beton dayanımlarında ve tel miktarında ise ilk tepe dayanımlarının artık gerilmelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Düşük dayanıma sahip L serisi betonlarda artık gerilmelerin ilk tepe dayanımlarına yakın değerlerde olduğu hatta yüksek tel miktarlarında ilk tepe dayanımlarından daha yüksek değerler alabildiği, beton dayanımlarının artmasıyla ise ilk tepe dayanımlarının artık gerilmelerden çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu sonuç



beton dayanımlarının artmasıyla matrisin ilk tepe yükü sonrası daha gevrek kırılması sonucu yük değerlerinin aşırı düşmesi ile açıklanabilir. Bu durum yük-sehim eğrilerinde de görülmektedir.

#### 4.2.3.4. Tokluk

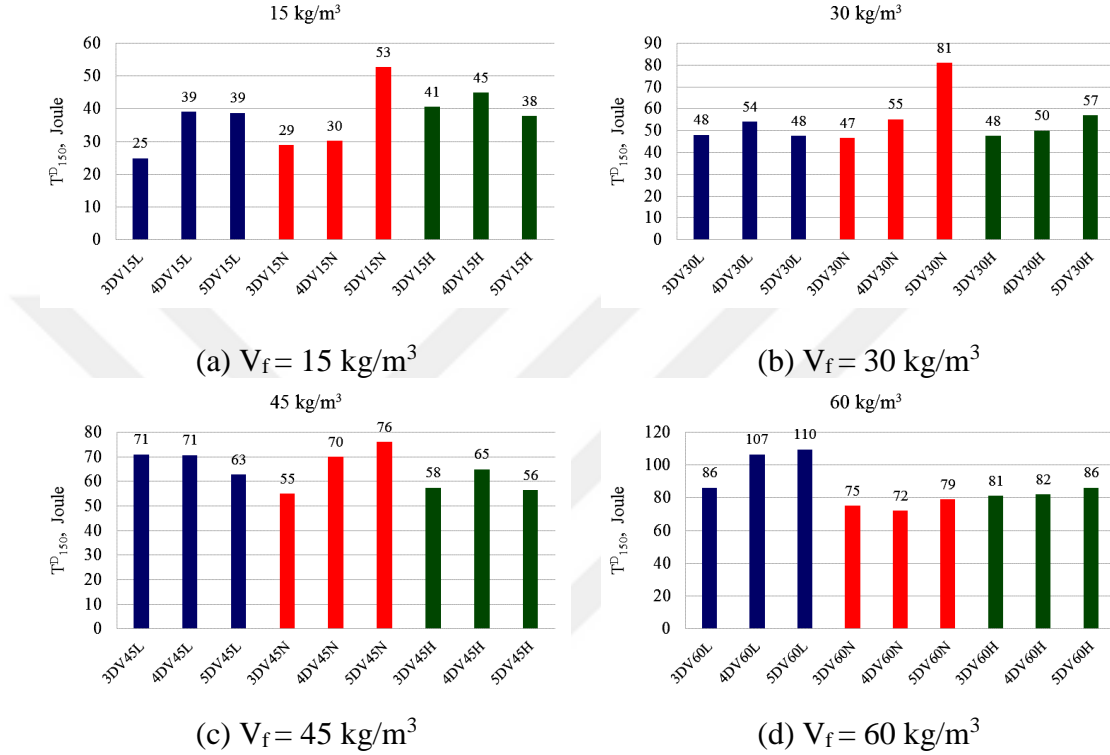
Yük-sehim eğrisi (bu çalışmada 3 mm sehim'e kadar) altında kalan alan yani tokluk değerleri üzerinde tel miktarı miktarının etkisinin incelendiği çubuk grafikler Şekil 4.24'te verilmektedir.



Şekil 4.24. Tokluk – Tel Miktarı

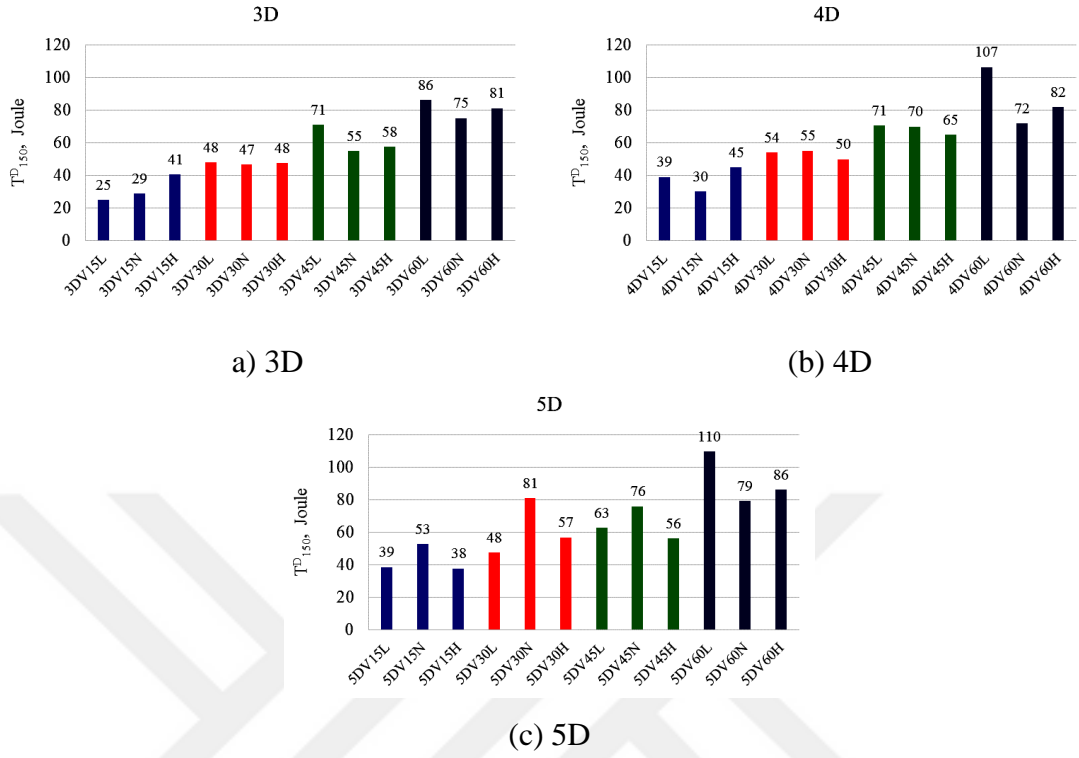
Tüm beton sınıflarında yük-sehim eğrisi altında kalan alan değerlerinin tel miktarının artmasıyla arttığı görülmektedir. Beton dayanımının artmasıyla eğri altında kalan değerleri genel olarak azalmıştır. Bu durum matrisin gevrekleşmesi ile açıklanabilir. Bununla birlikte düşük dayanıma sahip L kodlu karışımlarda 60 kg/m<sup>3</sup> tel içeriklerinde kanca tipinden bağımsız olarak daha yüksek alan değerleri elde edilmiştir. 5D kanca tipi diğer kanca tiplerine kıyasla daha yüksek eğri altında kalan

değerleri sağlamış olup N kodlu karışımlarda daha iyi performans sergilemiştir. Tokluk değerleri üzerinde kanca tipinin ve beton dayanımının etkileri sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmektedir.



Şekil 4.25. Tokluk – Tel Kanca Tipi

Tokluk değerleri üzerinde kanca tipinin etkisinin verildiği Şekil 4.18'de her bir tel miktarı için ayrı ayrı inceleme yapılmış olup L serisi betonlar mavi, N serisi betonlar kırmızı ve H serisi betonlar ise yeşil renkli çubuklarla gösterilmiştir. Düşük tel miktarında ( $15 \text{ kg/m}^3$ ) genel olarak en yüksek tokluk değerlerine 5D tipi kancalı telin kullanıldığı betonlarda ulaşılmıştır. Bununla birlikte yüksek dayanımlı betonlarda tel kanca tipinin etkisi görülmemiştir. 30 ve  $45 \text{ kg/m}^3$  tel miktarına sahip betonlarda ise sırasıyla 3D, 4D ve 5D kanca tipli teller iyi performans sergilemiştir. Bununla birlikte düşük dayanımlı betonlarda 5D tipi kancalı teller diğerlerine kıyasla daha kötü performans sergilemiştir. Yüksek tel miktarına ( $60 \text{ kg/m}^3$ ) sahip betonlarda ise genel olarak en yüksek tokluk değerlerine 5D tipi kancalı tellerin kullanıldığı betonlar ulaşmıştır.

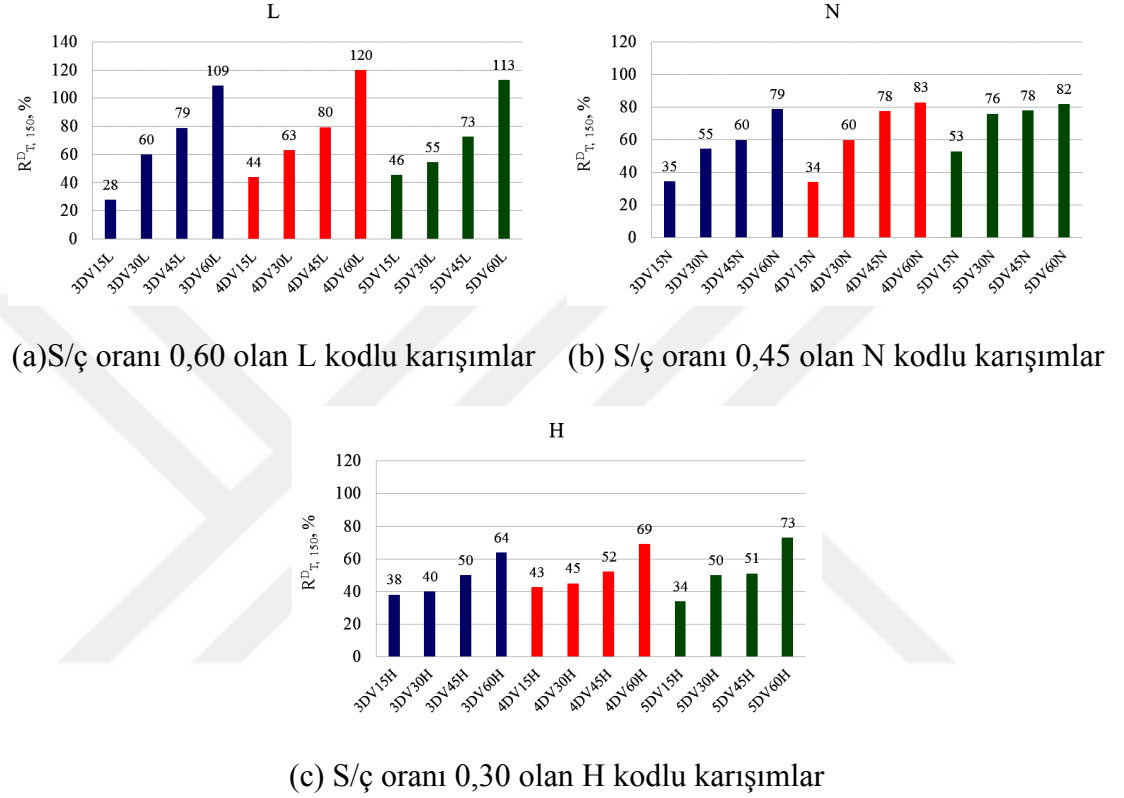


**Şekil 4.26.** Tokluk – Beton Dayanımı

Tokluk değerleri üzerinde beton dayanımı etkisinin gösterildiği Şekil 4.19’da tel kanca tipleri için ayrı ayrı incelemeler yapılmıştır. 15, 30, 45, 60 kg/m<sup>3</sup> tel miktarları için sırasıyla mavi, kırmızı, yeşil ve mor renkli çubuklarla gösterim yapılmıştır. Düşük tel miktarında (15 kg/m<sup>3</sup>) genel olarak en yüksek tokluk değerlerine 5D tipi kancalı telin kullanıldığı betonlarda ulaşılmıştır. Bununla birlikte yüksek dayanımlı betonlarda tel kanca tipinin etkisi görülmemiştir. 30 ve 45 kg/m<sup>3</sup> tel miktarına sahip betonlarda ise sırasıyla 3D, 4D ve 5D kanca tipli teller iyi performans sergilemiştir. Bununla birlikte düşük dayanımlı betonlarda 5D tipi kancalı teller diğerlerine kıyasla daha kötü performans sergilemiştir. Yüksek tel miktarına (60 kg/m<sup>3</sup>) sahip betonlarda ise genel olarak en yüksek tokluk değerlerine 5D tipi kancalı tellerin kullanıldığı betonlar ulaşmıştır.

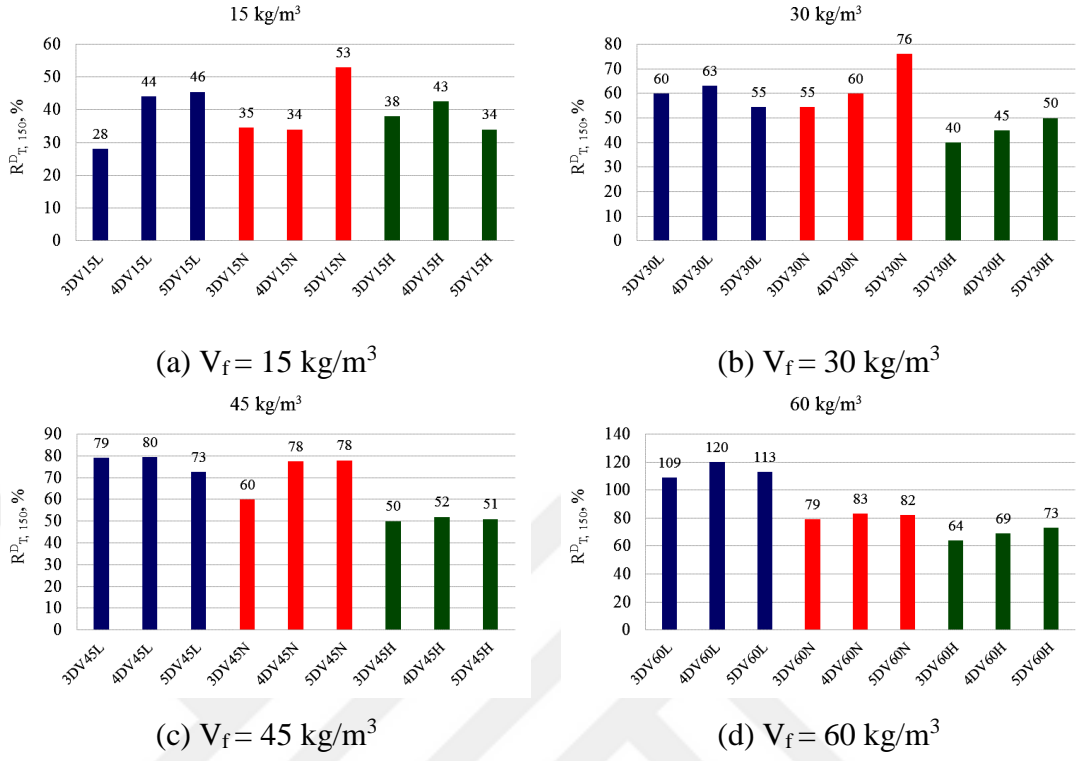
#### 4.2.3.5. Eşdeğer eğilme gerilme oranı

Eşdeğer eğilme gerilme oranı değerleri üzerinde tel miktarının etkisinin incelendiği çubuk grafikler Şekil 4.27’de verilmektedir.

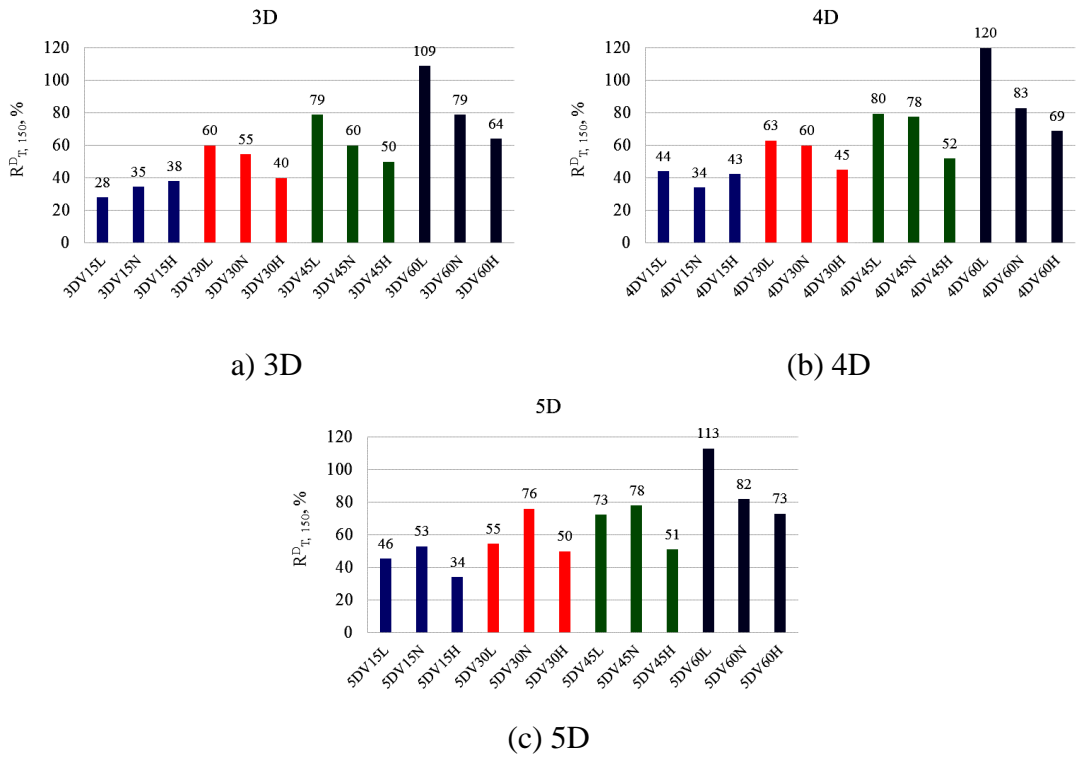


Şekil 4.27. Eşdeğer Eğilme Gerilme Oranı – Tel Miktarı

Tüm beton sınıflarında eşdeğer eğilme gerilme oranı değerlerinin tel miktarının artmasıyla arttığı görülmektedir. Beton dayanımının artmasıyla eşdeğer eğilme gerilme oranı değerleri genel olarak azalmıştır. Bu durum, tokluk değerlerinde de görülmüş olup matrisin gevrekleşmesi ile açıklanabilir. Eşdeğer eğilme gerilme oranı değerleri üzerinde kanca tipinin ve beton dayanımının etkileri sırasıyla Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da verilmektedir.



Şekil 4.28. Eşdeğer Eğilme Gerilme Oranı – Tel Kanca Tipi



Şekil 4.29. Eşdeğer Eğilme Gerilme Oranı – Beton Dayanımı

Eşdeğer eğilme gerilme oranı değerleri üzerinde kanca tipinin etkisinin verildiği Şekil 4.28’de her bir tel miktarı için ayrı ayrı inceleme yapılmış olup L serisi betonlar mavi, N serisi betonlar kırmızı ve H serisi betonlar ise yeşil renkli çubuklarla gösterilmiştir. Eşdeğer eğilme gerilme oranları üzerinde en etkili kanca tipinin sırasıyla 5D, 4D ve 3D olduğu görülmüştür. Bu etkinliğin tel miktarı arttıkça belirginleştiği söylenebilir.

Eşdeğer eğilme gerilme oranı değerleri üzerinde beton dayanımı etkisinin gösterildiği Şekil 4.29’da tel kanca tipleri için ayrı ayrı incelemeler yapılmıştır. 15, 30, 45, 60 kg/m<sup>3</sup> tel miktarları için sırasıyla mavi, kırmızı, yeşil ve mor renkli çubuklarla gösterim yapılmıştır. 3D ve 4D tipi kancalı tellerin kullanıldığı betonlarda düşük tel miktarlı betonların dışında diğer betonlarda beton dayanımının artmasıyla eşdeğer eğilme gerilme oranı değerleri azalmıştır. 5D tipi kancalı teller ise en yüksek performansı N serisi C50/60 dayanıma sahip betonlarda sergilemiştir. Daha sonra en iyi performansı L serisi betonlarda sergilerken ve H serisi betonlarda daha düşük performans sergilemiştir.

## 5. GÖRÜNTÜ ANALİZİ ÇALIŞMALARI

### 5.1. Görüntü Analizi Literatür

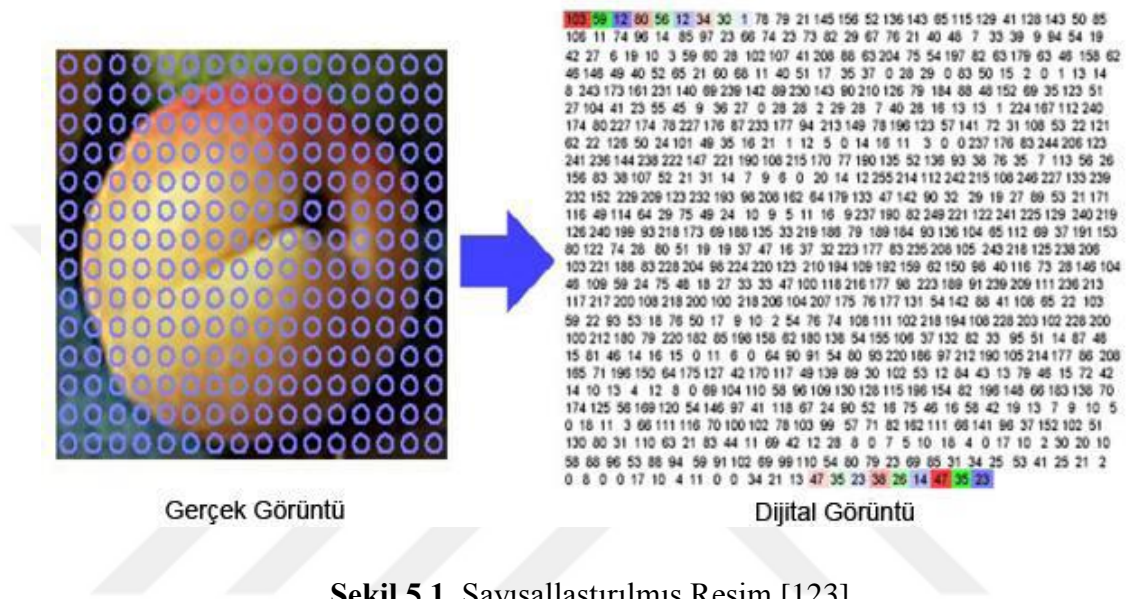
Betonun içyapı özelliklerini inceleme yöntemleri tahribatlı ve tahribatsız yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. Son dönemlerde mühendislik çalışmalarında yapay zeka yöntemlerinin kullanımının artmasıyla beton özelliklerinin araştırılması çalışmalarında da bu yöntemler kullanılmaktadır [116-119]. Kullanılan bu yöntemlere ek olarak görüntü işleme yöntemi de son zamanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Görüntü işleme, insanların görme sisteminin yaptığı işi, bilgisayar yardımıyla görüntünün elde edilip, sayısallaştırılması, bölümlendirilmesi, iyileştirilmesi, sınıflandırılması, kaydedilmesi ve yeniden çağrılması gibi birçok işlemle bilgisayar tarafından yapılmasıdır [120].

Görüntü işleme kaydedilen elektronik (digital) görüntü verilerini, elektronik ortamda istenilen veriler üzerine değiştirmek için yapılan bilgisayar ortamındaki çalışmalardır. Bu yönde mevcut görüntüleri, fotoğraf ve grafikleri, yabancılaştırmak, değiştirmek veya iyileştirmek üzere kullanılır [121].

İnsan görme sistemini temel alan sayısal görüntü işleme yönteminin kavranabilmesi için insan görme sisteminin oluşum mekanizmasının bilinmesi gerekir. Kısacası, insan gözü fotoğraf makinesi olarak varsayılırken, insan beyninin görme kısımlarını da karmaşık bir sayısal görüntü işleme sistemi olarak varsayılabilir [122].

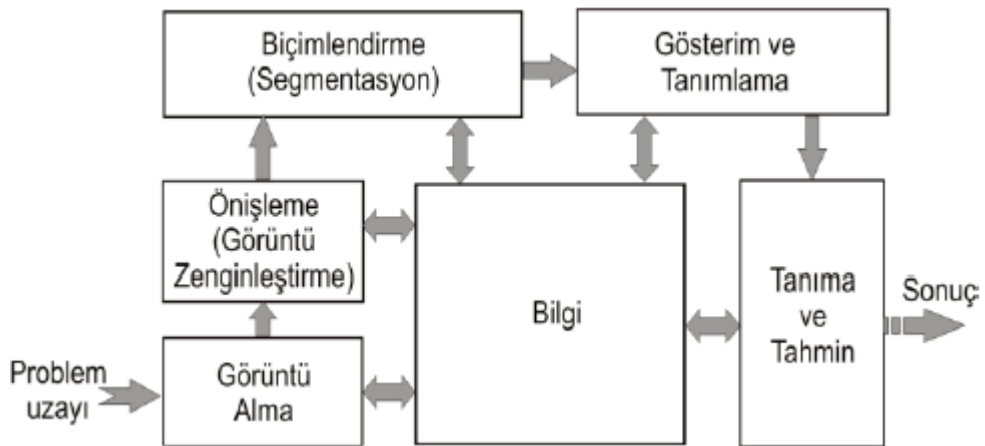
Gerçek yaşamda, bir görüntü veya resim basit 2 değişkenin bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Örneğin  $a(x,y)$  gibi bir fonksiyonla ifade edilen bir resimde  $a$  bir şiddet birimi (örneğin parlaklık) ve  $x$  ve  $y$  değişkenleri ise resmin gerçek koordinatlarıdır. Resim genellikle alt resimlerden oluşur ve bu alt resimlere bölge denir. Bir görüntü işleme sistemi, seçilen bölgelere uygun operasyonu yapabilmelidir. Örneğin resmin bir bölgesine bulanıklık özelliği verilirken, diğer bir bölgesine ise parlaklık özelliği verilebilir [123].

1 ve 0'lerden oluşan sayısal görüntü yapımız  $a[m,n]$ , 2 boyutlu dünyadan elde edilen  $a(x,y)$  fonksiyonundan örnekleme tekniği kullanılarak oluşturulur. Sayısal görüntümüz M ve N sayılarında satır ve sütunlardan oluşur ve satır ve sütunların kesiştiği her bölgeye piksel denir. O pikseldeki değer ise derinlik (z) , renk( $\lambda$ ) ve zamanın(t) bir fonksiyonudur [123].



Şekil 5.1. Sayısallaştırılmış Resim [123]

Sayısal görüntü işleme çalışmalarında kullanılan birçok işlem basamakları vardır. En genel haliyle Şekil 5.2’de grafiksel olarak verilmiştir [124].



Şekil 5.2. Görüntü İşleme Genel Akım Şeması [124]



Görüntü seviyeler açısından üçe ayrılabilir. Sadece siyah (0 değeri) ve beyaz (1 değeri) renkleri içeren ikili görüntü, gri düzeyli görüntü ve renkli görüntü. Her üç seviyedeki görüntünün sunumu da matris formundadır. Matrisin her hangi bir değeri görüntünün o koordinatlardaki noktanın parlaklık, ısı veya buna benzer farklı niteliklerdeki değeri olabilir [125].

Görüntü işleme sisteminin kullanım alanları 1960'lerden başlayarak her geçen gün çoğalarak günümüzdeki halini almıştır. Uzay araştırma faaliyetleri başta olmak üzere, tıp alanında, askeri savunmada, eğitimde, sanatta, tarımda, endüstride, coğrafyada, arkeolojide, fizikte, biyolojide, astronomide, karakter tanımadada, parmak izi tanımadada, x-ray'lerin ve kan örneklerinin incelenip bilgisayar tarafından yorumlanmasında, kısacası hayatımızın hemen hemen her alanında bu sistemden faydalanılmaktadır [126].

Görüntü işleme teknikleri, betonlarda gözeneklilik durumunun tayini, mermer parçalarının kusur tayini, beton agrega şekil parametreleri ile beton basınç dayanımı ilişkisi, çelik numunelerde korozyon etkisi, kiriş numunelerde deplasman ölçümü, ağır beton numunelerin radyasyon tutuculuk özellikleri tayini, yapı malzemelerinde çatlak tespiti, köpük betonlarda hava miktarı tayini, yüksek performanslı hafif beton özelliklerinin belirlenmesi, yol kaplamalarında çatlak tespiti, baraj betonlarında hasar tespiti ve asfalt numunelerde kırılma mekanizmasının incelenmesi gibi birçok konuda uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Son yıllarda ÇTDB'ler de yapılan çalışmalarda betondan alınan kesitlerdeki tel sayısı ile betonların mekanik dayanımları üzerinde tel uzunluğu ve döküm özelliklerinin etkileri araştırılmıştır [101, 108].

Tüm bu değerlendirmeler neticesinde görüntü işleme tekniklerinin inşaat teknolojilerinde ve özelliklede kompozit bir malzeme olan beton özelliklerinin belirlenmesi üzerine yapılacak çalışmalar literatürde kolay yer bulabilecek ve hem bilimsel hem de uygulanabilirlik açısından faydalı olacaktır.

## 5.2. Görüntü Analizi İle Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

### 5.2.1. Görüntü Analizi İçin Numunelerin Hazırlanması

Görüntü analizi için daha önceden 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulan 150x150x550 mm boyutlarındaki prizmatik örnekler kullanılmıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Numunelerin Kesim İşlemi

Kiriş numunelerde oluşan çatlaklar mesnet noktaları arasında bir noktadan başlayarak üst kısma doğru ilerleyip açıldığından ve çatlak düzleminin oldukça pürüzlü olmasından dolayı tam çatlak düzleminde kesim yapılmamıştır. Her bir kiriş numunenin bir köşesinden 200 mm iç mesafeden 150 x 150 x 200 mm boyutlarında prizmalar kesilerek ilgili seri için örnekler görüntü analizine hazır hale getirilmiştir. Ayrıca tam çatlak düzleminde yapılan analizde gözlenen teller kopma olasılığı nedeni ile çatlağın her iki yanı için farklı sayılarda elde edilebilir. Oysaki bazı teller matrinden sıyrıldığı bazıları ise gerek deney sırasında gerekse deney bittikten sonra inceleme için örneği ikiye ayırma çabaları sırasında kopabildiğinden aynı kesit için iki defa sayılmaları söz konusu olabilir. Bu nedenle bu çalışmada olduğu gibi çatlak

düzleminden daha uzakta her bir kiriş için aynı mesafedeki en kesitler üzerinde kesim ve inceleme yapılması bazı araştırmacılarca da daha önce tercih edilmiştir [127].

Sağlıklı bir analiz için kirişlerden örnek alınması işlemine özellikle dikkat etmek gerekmektedir. Kirişlerden alınan prizma örnekler esas olarak hassas mermer kesimi için geliştirilmiş olan elektronik kontrollü hareket masasına sahip mermer kesim cihazında beton için uygun sertlikte elmas bıçakla sulu kesim yapılarak çıkarılmıştır.

### **5.2.2. Kamera Ayarları ve Fotoğraf Çekim Yöntemi**

Hazırlanan örneklerin telli yüzeyleri su zımparası ile zımparalanarak teller parlatılmıştır. Örnek hazırlama işlemlerinden sonra fotoğraf çekimi için düzenek oluşturulmuştur (Şekil 5.4). Çalışmanın esası, uygun kamera ayarları ile en kesitlerin fotoğraflarının çekilerek tellerin fotoğraf üzerinden işlenerek analiz edilmesidir. Bu aşamada en önemli iki nokta, tellerin sağlıklı bir şekilde tüm fotoğraftan ayrılabilmesi ve fotoğrafın doğru bir şekilde ölçülendirilmesidir. Tellerin fotoğraf içerisinden ayrılabilmesi tellerin fotoğrafta belirgin bir şekilde farklı renkte olması ile kolayca yapılabilir. Parlak çelik teller ışığı betondan daha fazla yansıttığından uygun ışıklandırma koşulları altında çekim yapılması halinde teller sağlıklı bir şekilde beton matrizen seçilebilir (ayrıt edilebilir). Fotoğraf çekimleri için hiç penceresi olmayan bir karanlık oda kullanılmış ve çeşitli ışık düzenekleri denenmiş ve en uygun sonucu veren beyaz florasan dairesel aydınlatma seçilmiştir. 18 mega piksel çözünürlükte Canon EOS 1200D SLR fotoğraf makinesi kullanılmıştır. Kullanılan makine, bilgisayar kontrollü modülüne sahip olduğundan, fotoğraflar kamera deklanşörüne hiç dokunulmadan bir diz üstü bilgisayarla kontrol edilerek çekilmiştir. Bu şekilde fotoğraflar çekilirken kamera pozisyonu hiç değiştirilmemiş ve hiç titreme olmaması sağlanmıştır. Çekimlerde tripot (üçlü ayak) kullanılmıştır.



**Şekil 5.4.** Fotoğraf Çekim İşlemi

Her ne kadar seçilen ışık kaynağı çelik tellerin parlamasını sağlasa da, ışık kaynağının numune üzerine düşme açısı ile numunenin kesimi sırasında tel yüzeylerindeki ufak aç farklılıklardan dolayı parlamayan çelik teller olabilmektedir. Bu nedenle her çekimde numune yüzeyindeki çelik tellerin tamamının parlayacağı şekilde ışık kaynağı konumlandırılmış ve sağlıklı çekimler elde edilmiştir. Bu konuda fotoğraf makinesinin ayarlanması da uygun ışığa göre yapılmış ve Diyafram aralığı f8.0, enstantane (perde hızı) ise 1/40 olarak seçilmiştir. Bu şekilde tellerin tamamının matristen ayırt edilmesi sağlanmıştır.

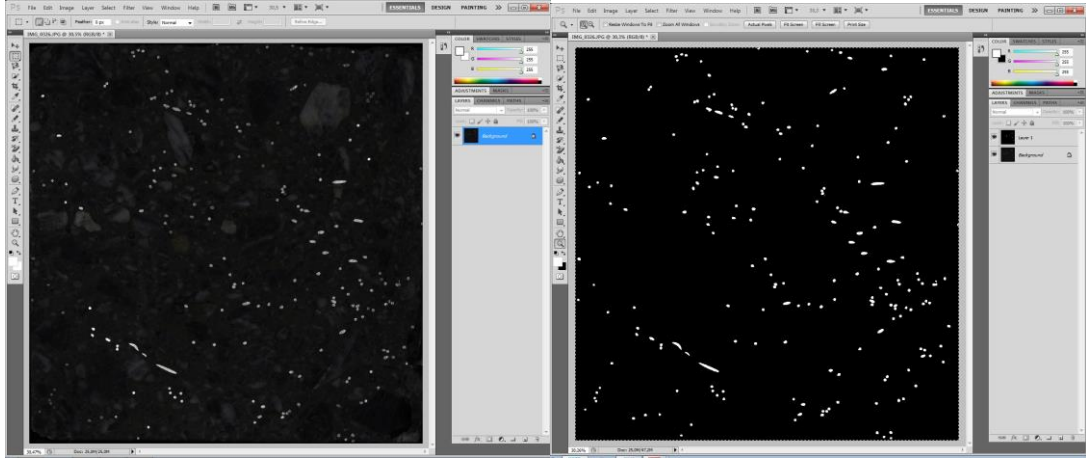
### **5.2.3. Görüntülerin Bilgisayar Desteği İle İşlenmesi**

Görüntü analizi ile numune kesit yüzeyindeki tellerin sayımı için Image-J paket programı kullanılmıştır. Fotoğraflarda beton matris koyu renkli, teller ise açık renkli olarak görülmektedir. Tüm fotoğraflar bu şekilde elde edilmiş ve böylece görüntü işleme işlemleri oldukça kolaylaşmıştır (Şekil 5.5).



**Şekil 5.5.** İşlenmemiş Fotoğraf Görüntüsü

Çekilen ve bilgisayara kaydedilen orjinal fotoğraf doğrudan Image-J paket programına tellerin sayımı için atıldığında tellerle matris arasındaki ton yakınlıklarından dolayı programın çalışma prensibine uygun olmadığından fotoğraflar, Adobe Photoshop™ paket programı yardımı ile düzenlenmiştir. Öncelikle programda açılan fotoğraf numunenin köşelerinden seçilerek kırılmıştır. Kırılan fotoğraf katman olarak kopyalanmış ve Image - Adjustment - Threshold bölümünden uygun aralık seçilerek fotoğrafın tamamı iki tondan oluşacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 5.6). Böylelikle Image-J programında iki ton arasındaki farklılıktan yararlanarak teller seçilebilir duruma getirilmiştir. Ayrıca Photoshop programı kullanılarak kısmen parlamayan teller de belirgin hale getirilmiştir.

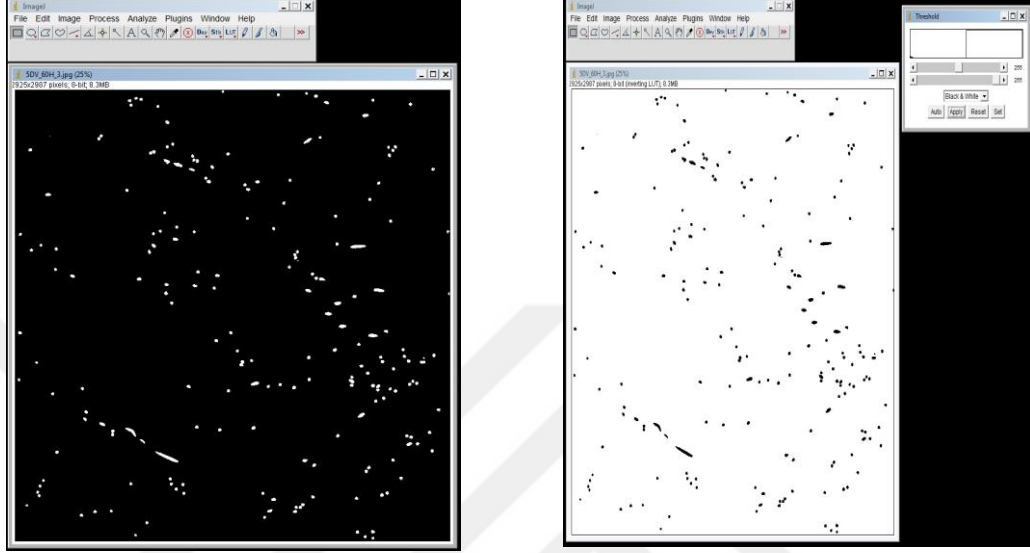


**Şekil 5.6.** Görüntünün Ayarlanması

Sayıma hazır hale getirilen fotoğraf ızgara açılarak karelere bölünmüş ve bu kareler yardımıyla teller görsel olarak sayılmıştır. Teller daha sonradan Image-J Java™ paket programı ile otomatik olarak sayılacağından, bu sayım hem genel bir inceleme olmuş hem de karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Tellerin gerçek görüntü üzerinden karelajla tam olarak sayılmasından sonra, Image-J paket programında görüntü işleme operasyonları yapılmıştır. Image-J programının telleri çok başarılı bir şekilde saydığı görülmüştür.

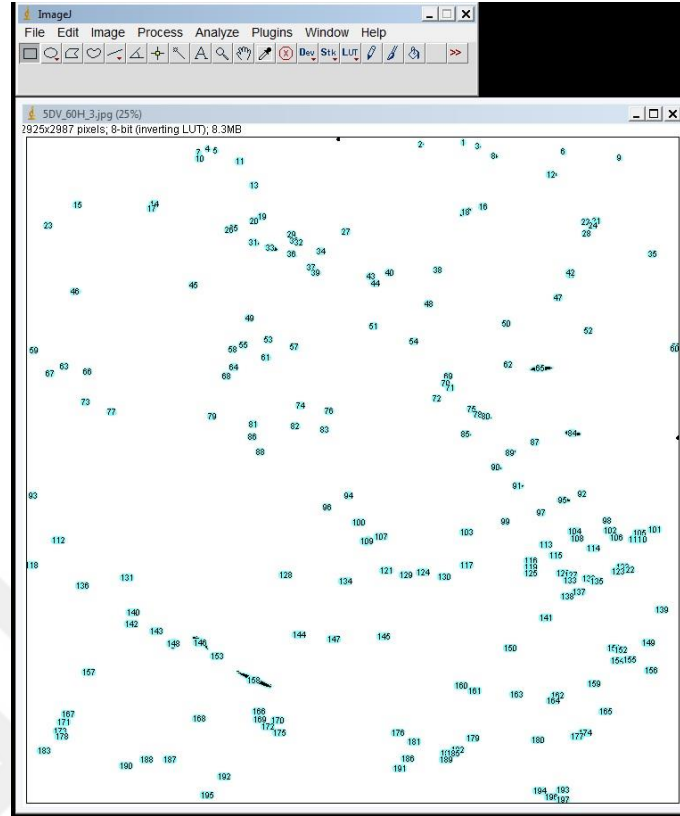
Image-J paket programında sayım işleminde tellerin tüm resimden ayrılması işlemi renk koduna göre yapılmaktadır. Image-J programında resmin kontrast ayarları ile oynayarak belirli bir renk kodundaki görüntünün resimde belirgin olması sağlanabilmektedir. Image-J programında açılmış olan 3DV60H serisine ait orjinal fotoğrafın renk kodu histogramı Şekil 5.7’te verilmiştir. Fotoğraf çekilirken en baştan uygun diyafram ve enstantane ayarları seçildiğinde uygun ışıklandırma altında beton matris olabildiğince koyu, parlayan teller ise olabildiğince açık renkte elde edilmiştir. Bu durumda renk histogramından da görüldüğü gibi tüm resim 0 - 255 arasında renk koduna sahipken koyu renkteki beton matris daha düşük renk koduna, açık renkteki parlayan teller ise daha yüksek renk koduna sahip olmaktadır. Renk kodu histogramı üzerinden ayarlama yapılarak teller tüm resimden seçilmiştir. Seçilen tellerin renk kodu bu resim için 50 değerinden daha fazladır. Beton matris ise 50 renk kodundan daha düşük renk kodundadır. Orijinal resimdeki matris veya tellerin renk tonlarının Eşik renk kodu değerine yakın olabileceği düşünüldüğünde

Photoshop programı ile düzenlenen resimlerde renk tonları arasındaki fark açılarak sayma işleminin kesin ve doğru olması amaçlanmıştır. Sayısal işleme hazır fotoğraf görülmektedir.



Şekil 5.7. Görüntünün Ayarlanması

Kullanılan paket programda belirlenen eşik renk koduna göre otomatik olarak teller seçilmekte ve analiz işlemi bu eşik renk koduna sahip fotoğraf üzerinden otomatik olarak yapılmaktadır. Bu aşamadan sonra artık fotoğraf sadece iki renk kodundan oluşmaktadır. Beton matris 0 renk kodunda iken teller 255 renk koduna sahiptir. Binary (ikili) renk koduna sahip fotoğraf üzerinde teller otomatik olarak sayılmış ve numaralandırılmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Görüntünün Ayarlanması

#### 5.2.4. Görüntü Analizi Sonuçları İle Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

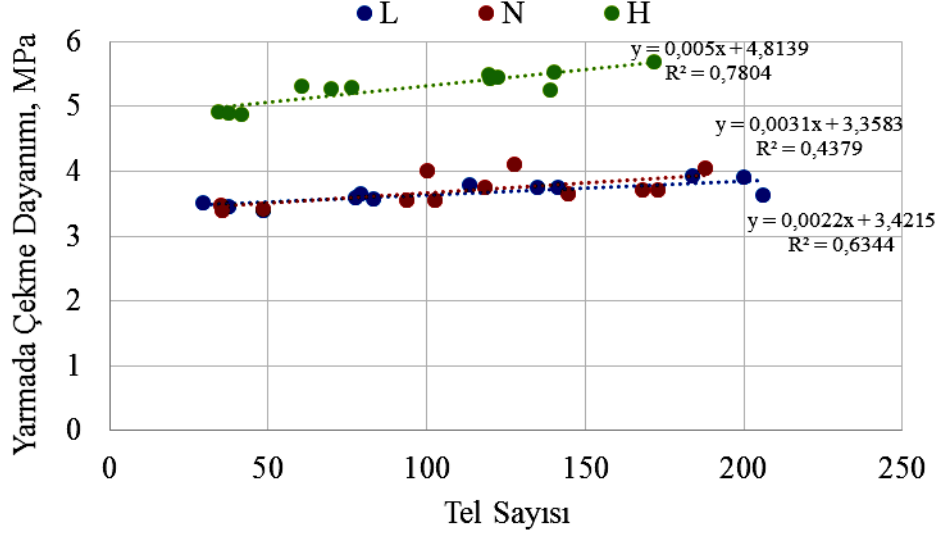
Beton kesitleri üzerinde yapılan görüntü analizleri sonucu belirlenen 15x15 cm<sup>2</sup> boyutlarındaki kesitte belirlenen tel sayıları Tablo 5.1’de verilmektedir.

**Tablo 5.1.** Beton Kesitlerindeki Tel Sayıları

Karışım Kodu	Tel Sayısı	Karışım Kodu	Tel Sayısı	Karışım Kodu	Tel Sayısı
3DV15L	37,5	3DV15N	35	3DV15H	41,5
3DV30L	77,5	3DV30N	102,5	3DV30H	76,5
3DV45L	141,5	3DV45N	118,5	3DV45H	119,5
3DV60L	206	3DV60N	173	3DV60H	140
4DV15L	48,5	4DV15N	35,5	4DV15H	37,5
4DV30L	83	4DV30N	93,5	4DV30H	70
4DV45L	135	4DV45N	144,5	4DV45H	120
4DV60L	200	4DV60N	168	4DV60H	139
5DV15L	29,5	5DV15N	48,5	5DV15H	34,5
5DV30L	79	5DV30N	100	5DV30H	60,5
5DV45L	113,5	5DV45N	127,5	5DV45H	122,5
5DV60L	184	5DV60N	188	5DV60H	171,5



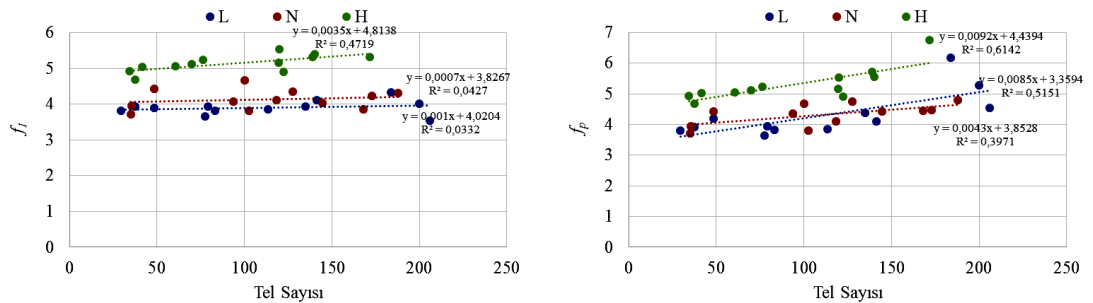
Görüntü analizi sonucunda kesitlerde sayılan tel sayısı ile yarmada çekme deney sonuçlarının ilişkisini gösteren grafik Şekil 5.9’da verilmektedir.



Şekil 5.9. Kesitteki Tel Sayısı İle Yarmada Çekme Dayanımı İlişkisi

Yarmada çekme dayanımı ve tel sayısı arasında yüksek korelasyonlar elde edilmiştir. Yüksek dayanıma sahip H kodlu karışımlarda korelasyon katsayısı,  $R=0,88$  ( $R^2=0,7804$ ) elde edilmiştir.

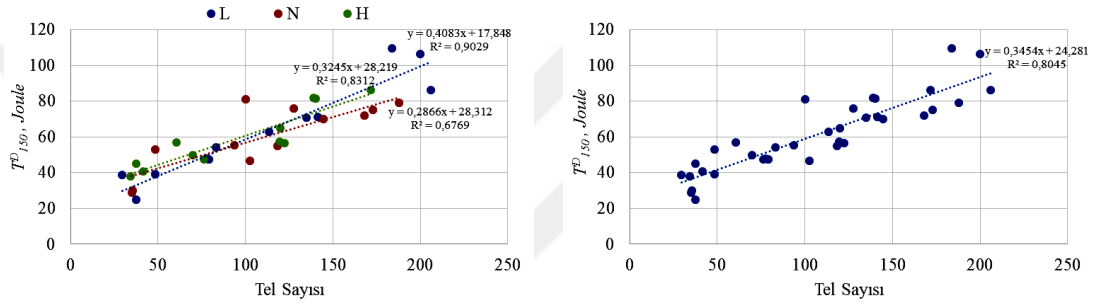
Eğilme dayanımı ve ilk tepe dayanımı değerlerinin tel sayısı ile değişimlerinin incelendiği grafikler Şekil 5.10’da verilmektedir.



Şekil 5.10. Kesitteki Tel Sayısı İle Eğilme Dayanımı İlişkisi

Tel sayısı ile ilk tepe dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri arasında yüksek korelasyona sahip ilişkiler elde edilmiştir. Bununla birlikte eğilme dayanımının ilk tepe dayanımlarına kıyasla tel sayısı ile daha yüksek korelasyona sahip olduğu görülmüştür. Yarmada çekme dayanımında olduğu gibi H kodlu karışımlarda daha yüksek korelasyon katsayısı,  $R=0,78$  ( $R^2=0,6142$ ) elde edilmiştir.

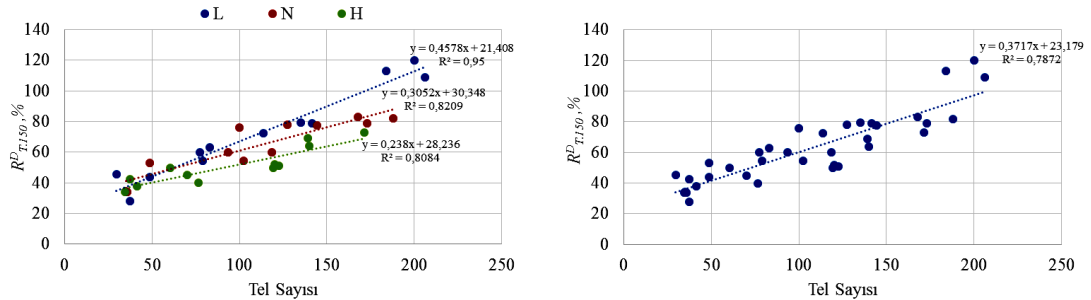
Tokluk değerlerinin tel sayısı ile değişimlerinin incelendiği grafikler Şekil 5.11’de verilmektedir.



Şekil 5.11. Kesitteki Tel Sayısı İle Tokluk İlişkisi

Tel sayısı ile tokluk değerleri arasında yüksek korelasyonlar elde edilmiştir. En yüksek korelasyon ( $R=0,95$ ,  $R^2=0,9026$ ) düşük dayanıma sahip L kodlu karışımlarda görülmüştür. Beton dayanımından bağımsız olarak incelenen tel sayısı – tokluk ilişkisinde ise korelasyon katsayısı  $R=0,897$  olarak elde edilmiştir.

Eşdeğer eğilme gerilme oranı değerlerinin tel sayısı ile değişimlerinin incelendiği grafikler Şekil 5.12’de verilmektedir.



Şekil 5.12. Kesitteki Tel Sayısı İle Eşdeğer Eğilme Gerilme Oranı İlişkisi

Tel sayısı ile eşdeğer eğilme gerilme oranı değerleri arasında yüksek korelasyonlar elde edilmiştir. En yüksek korelasyon ( $R=0,975$ ,  $R^2=0,95$ ) düşük dayanıma sahip L kodlu karışımlarda görülmüştür. Beton dayanımından bağımsız olarak incelenen tel sayısı – tokluk ilişkisinde ise korelasyon katsayısı  $R=0,887$  olarak elde edilmiştir.

Görüntü analizi sonuçları değerlendirildiğinde tel miktarından etkilenen yarmada çekme dayanımı, tokluk, eşdeğer eğilme gerilme oranı gibi özelliklerin kesitteki tel sayısı ile yüksek korelasyona sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte basınç dayanımı, elastisite modülü ve ilk tepe dayanımı gibi tel miktarından etkilenmeyen özelliklerin kesitteki tel sayısı ile düşük korelasyon gösterdiği belirlenmiştir.



## 6. SONUÇLAR

1. Çelik tel kullanılmasıyla betonların işlenebilirliğinde azalma görülmüştür. Çelik tel içeriğinin artmasıyla çökme değerleri düşmüştür. Vebe sürelerinde ise artışlar elde edilmiştir. İşlenebilirlik üzerinde çelik tel kanca tipinin belirgin bir etkisi görülmemiştir.
2. Çelik tel içeriğinin artmasıyla birim ağırlık değerlerinin arttığı görülmüştür. Tüm su/çimento oranlarında taze birim ağırlık değerlerinde çelik tel kanca tipinin belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür. Sertleşmiş birim ağırlık değerlerinde ise genel olarak 3D'den 4D'ye ve 4D'den 5D'ye geçince artış olduğu görülmüştür.
3. Çelik tel kanca tipinin ve içeriğinin ÇTDB'lerin basınç dayanımına ve elastisite modülüne etkisinin belirgin olmadığı görülmüştür. Betonlarda aynı seriye ait numunelerin basınç dayanımları arasında  $\pm\%2$  değerinde sapma olabileceği bilinmektedir. Buna bağlı olarak bu çalışmada kullanılan çelik tellerin basınç dayanımına belirgin bir etkisinin olmadığı ifade edilebilir.
4. Çelik tel içeriği arttıkça ÇTDB'lerin yarmada çekme dayanımlarında artışlar elde edilmiştir. Aynı zamanda çelik tel kanca tipinin etkisi de görülmüştür. 5D kanca tipine sahip tellerin kullanıldığı betonların yarmada çekme dayanımlarında diğer kanca tiplerine sahip betonlardan daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.
5. Tüm karışımlarda genel olarak tel kullanımıyla yalın betona kıyasla daha yüksek ilk tepe dayanımı değerleri elde edilmiştir. L, N ve H kodlu karışımlar için ilk tepe dayanımları ortalama olarak sırasıyla 3,9, 4,1 ve 5,1 MPa elde edilmiştir.
6. Düşük dayanıma sahip L kodlu karışımlarda eğilme dayanımı üzerinde tel içeriği ve kanca tipinin belirgin bir etkisi görülmemiştir. N ve H kodlu karışımlarda eğilme dayanımı değerleri tel miktarı arttıkça genel olarak artmıştır. Eğilme dayanımı üzerinde çelik tel kanca tipinin etkisi N kodlu karışımlarda görülmüştür. 3D, 4D ve 5D tipi kancalı teller için eğilme dayanımları ortalama olarak sırasıyla 4, 4,3 ve 4,7 MPa olarak elde edilmiştir.

7. Genel olarak tüm beton dayanımlarında ilk tepe dayanımı ( $f_1$ ) çelik tel miktarına göre değişmezken, artık gerilme değerlerin çelik tel miktarı arttıkça arttığı görülmüştür. 3 mm sehim değerindeki artık gerilmeler ( $f_{D150}$ ) 0,75 mm sehim değerindeki artık gerilmelere ( $f_{D600}$ ) kıyasla daha düşük elde edilmiştir
8. Tüm beton sınıflarında yük-sehim eğrisi altında kalan alan değerlerinin tel miktarının artmasıyla arttığı görülmektedir. Beton dayanımının artmasıyla eğri altında kalan değerleri genel olarak azalmıştır
9. Çelik tel kanca tipin tokluk üzerinde etkisinde düşük tel miktarında (15 kg/m<sup>3</sup>) genellikle en iyi tokluk değerleri 5D tipi kancalı telin kullanıldığı betonlarda ulaşılmıştır. Tel miktarının 30 ve 45 kg/m<sup>3</sup> olduğu betonlarda, sırasıyla 3D, 4D ve 5D kanca tipli tellerin kullanıldığı betonlarda iyi sonuçlar elde edilmiştir. Yüksek tel miktarındaki (60 kg/m<sup>3</sup>) betonlarda ise en yüksek tokluk değerlerine 5D tipli kancalı tellerin kullanıldığı betonlarda ulaşılmıştır.
10. Tüm beton sınıflarında eşdeğer eğilme gerilme oranı değerlerinin tel miktarının artmasıyla arttığı görülmektedir. Beton dayanımının artmasıyla eşdeğer eğilme gerilme oranı değerleri genel olarak azalmıştır. Eşdeğer eğilme gerilme oranları üzerinde en etkili kanca tipinin sırasıyla 5D, 4D ve 3D olduğu görülmüştür. Bu etkinliğin tel miktarı arttıkça belirginleştiği söylenebilir.
11. Görüntü analizleri yönteminin, yarmada çekme dayanımı, tokluk, eşdeğer eğilme gerilme oranı gibi özelliklerin tahmininde kullanılabileceği bu özelliklerle kesitteki tel sayısı arasındaki yüksek korelasyon dikkate alınarak söylenebilir. Basınç dayanımı, elastisite modülü ve ilk tepe dayanımı gibi tel miktarından etkilenmeyen özelliklerin kesitteki tel sayısı ile düşük korelasyon gösterdiği bundan dolayı görüntü analizi yöntemleri ile bu özelliklerin tahmininde uygun olmadığı belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

1. Köksal, F., Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2004.
2. Soroushian, P., Bayasi, Z., Fiber-Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, 88 (2), 129-134, 1991.
3. Charkha, K., Prashant, A., Investigation of Concrete Properties With Different Types of Fibers With Their Variatio of Volume Fraction and Different Aspect Ratio, *Internation Journal for Science and Advance Research in Technology*, 1(4), 2015.
4. Beddar, M., Fibre-Reinforced Concrete – Past, Present and Future, *Concrete, ABI/INFORM Trade & Industry*, 47-49, April 2004.
5. Knapton, J., *Ground Bearing Concrete Slabs*, Thomas Telford, London 2003.
6. Taşdemir, M.A., Bayramov F., Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İTÜ Dergisi/d Cilt 1, Sayı 2*, 125-144, Aralık 2002.
7. Taşdemir, M.A., Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı, Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 9-11, 24 Kasım 1999.
8. Yoo, D.Y., Banthia, N., Mechanical Properties of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete: A Review, *Cement and Concrete Composites*, 73, 267–280, 2016.
9. Barr, B.I., Fibre Reinforced Concrete-Fibre Reinforced Cement and Concrete, *Proceeding of the Furth RILEM International Symposium*, New York, USA, 3-11, 20-23 July 1992.
10. Yazıcı, S., İnan, G., Tabak, V., Effect of Aspect Ratio and Volume Fraction of Steel Fiber on the Mechanical Properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, 21, 1250 – 1253, 2007.
11. Mehta P.K., Monteiro P.J., *Concrete: Micro Structure, Properties, and Materials*, 4th ed. McGraw-Hill, New York, 2014.
12. Altun F., Haktanır T., Ari K., Effects of Steel Fiber Addition in Mechanical Properties of Concrete and RC Beams, *Construction and Building Materials*, 21, 654-661, 2007.

13. ACI Committee 544, Guide For Specifying, Mixing Placing and Finishing Steel Fibre Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 90 (1), 94-101, 1993.
14. Banthia, N., Trottier, J.F., Concrete Reinforced With Deformed Steel Fibers Part II: Toughness Characterization, ACI Materials Journal, 92(2), 146-154, 1995.
15. Van Gaysel, A., A Pull-out Model For Hooked-end Steel Fibres, High Performance Fibre Reinforced Composites (HPFRCC3), 351-359, Reinhardt, H.W., Naaman A.E.,(eds.), RILEM Publishers, 1999.
16. TS10513, Çelik Teller-Beton Takviyesinde Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1992.
17. Brandt, A.M., Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance, E & FN Spon, London, 1995.
18. ACIFC, Steel Fibre Reinforced Concrete Industrial Ground Floors, Association of Industrial Flooring Contractors, Warwickshire, 1999.
19. Taşdemir, M.A., İlki, A., Yerlikaya, M., Mechanical Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Used in Hydraulic Structures, Proceedings of HYDRO, International Conference of Hydropower and Dams, Antalya, Turkey, 159-166, November 4-7, 2002.
20. Arslan, A., Aydın, A.C., Lifli Betonların Darbe Etkisi Altında Genel Özellikleri, Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 26 Kasım 1999.
21. Neville, A.M., Properties of Concrete, Pitmann Publishing, London, 1975.
22. Balaguru, P.N., Narahari, R., Patel, M., Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 89 (6), 541-545, 1992.
23. Ramakrishnan, V., Wu, G.Y., Hosalli, G., Flexural Behavior and Toughness of Fiber Reinforced Concretes, Transportation Research Record, No. 1226, 69-77, 1989.
24. Otter, D.E., Naaman, A.E., Fiber Reinforced Concrete Under Cyclic and Dynamic Compression Load, Research Report, No. UMCE 88-9, Department of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, pp. 178, 1988.
25. Swamy, R.N., Mangat, P.S., Influence of Fibre-Aggregate Interaction of Some Properties of SFRC, Materials and Structures, 7(41), 307-313, 1974.

26. Swamy, R.N., Fibre Reinforcement of Cement and Concrete Evaluation of Fibre Reinforcement Cement and Composites, Materials and Structures, 19 FRC Committee, 8(5), 235-254, 1971.
27. Bayramov, F., Ilki A., Taşdemir C., Taşdemir M.A., Yerlikaya M., Sfres for Concrete Roads in Heavily Trafficked Situations, 9th International Symposium on Concrete Roads, 4-7, 73-82, İstanbul, April 2004.
28. Hartmann, T., Steel Fibre Reinforced Concrete, Stockholm, 1999.
29. Acun, S., Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul, 2000.
30. Mohammadi, Y., Singh, S.P., Kaushik, S.K., Properties of Steel Fibrous Concrete Containing Mixed Fibres in Fresh and Hardened State, Construction and Building Materials, 22 (5), 956-965, 2008.
31. Chang, D.I., Chai, W.K., Flexural Fracture and Fatigue Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Structures, Nuclear Engineering and Design, 156, 201-207, 1995.
32. Chenkui, H., Guafon, Z., Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete, Cement and Concrete Composites, 17, 199-206, 1995.
33. Yıldırım, M.A., Hafif ve Yarı Hafif Betonlarda Çelik Tel Kullanımının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994.
34. Taylor, M., Lydon, F.D., Barr, B., Toughness Measurement on Steel Fibre-Reinforced High Strength Concrete, 19, 329-340, 1997.
35. Eren, Ö., Çelik T., Effect of Silica Fume and Steel Fibres on Some Properties of High-Strength Concrete, Construction and Building Materials, 11(7), 373-382, 1997.
36. Bayramov, F., Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., 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, 2002.
37. Köksal, F., Eyyubov, C., Özcan, D.M., Çelik Tel İçeriğinin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, 5. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 169-179, İstanbul, Eylül 25-27, 2002.
38. Shah, S.P., Rangan B.V., Fiber Reinforced Concrete Properties, ACI Journal, 68, 126-134, 1971.



39. Miao, C., Mu, R., Tian, Q., Sun, W., Effect of Sulfate Solution on the Frost Resistance of Concrete with and Without Steel Fibre Reinforcement, *Cement and Concrete Research*, 32, 31-34, 2002.
40. Betterman, L.R., Ouyang, C., Shah, S.P., Fiber Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Advanced Cement Based Materials*, 2, 53-61, 1995.
41. Taşdemir, M.A., Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. Tarafından Getirilen Dramix Çelik Tel Donatılı Beton Plaklar Üzerinde Yapılan Deneyler ile İlgili, Teknik Rapor 1, Proje No:2000/323, İTÜ, İstanbul, 2000.
42. Taşdemir, M.A., Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. Tarafından Getirilen Dramix Çelik Tel Donatılı Beton Plaklar Üzerinde Yapılan Deneyler ile İlgili, Teknik Rapor 2, Proje No:2000/323, İTÜ, İstanbul, 2000.
43. Romualdi, J. P., Batson, G.B., Mechanics of Crack Arrest in Concrete. *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, Vol. 89, No. EM3, 147-168, June 1963.
44. Şahin Y., Köksal F., “The Influences of Matrix and Steel Fibre Tensile Strengths on The Fracture Energy of High-Strength Concrete”, *Journal of Construction and Building Materials*, 25 (4), p.1801-1806, April 2011.
45. Sullivan, A.P., 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, 1999.
46. Lange-Kornbak, D., ve Karihaloo, B.L., Design of Fibre-Reinforced DSP Mixes for Minimum Brittleness, *Advanced Cement Based Materials*, 7, 89-101, 1998.
47. Swamy, R.N., Mangat P.S., A Theory for Flexural Strength of Fiber Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Research*, 4(2), 315-325, 1974.
48. Soroushian, P., Aouadi, F., Hsu, J-W., Theoretical Optimization of Fibre Reinforced Cement Composites, *ACI Materials Journal*, 92(4), 373-382, 1995.
49. Balendran, R.V., Zhou, F.P., Influence of Steel Fibres on Strength and Ductility of Normal and Lightweighth High Strength Concrete” , *Building and Environment*, 6, 255-258, 2002.
50. Trottier, J.F., Banthia, N., Toughness Characterization of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ASCE Journal of Metaterials in Civil Engineering*, 6(2), 264-289, 1994.

51. Köksal F., Altun F, Yiğit İ., Şahin Y., “Combined Effect of Silica Fume and Steel Fiber on The Mechanical Properties of High Strength Concretes”, *Journal of Construction and Building Materials*, 22 (8), p.1874-1880, Aug 2008.
52. Ezeldin, A.S., Balaguru, P.N., Bond Behavior of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, 86(5), 515-524, 1989.
53. Taerwe, L.R., Influence of Steel Fibers on Strain-softening of High-Strength Concrete, *ACI Materials Journal*, 89(1), 54-60, 1992.
54. Williamson, G.R., 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, 1974.
55. Ezeldin, A.S., Balaguru, P.N., Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete Under Compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(4), 415-429, 1992.
56. Marar, K., Eren, Ö., Çelik, T., Relationship Between Impact Energy and Compression Toughness Energy of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete, *Materials Letter*, 47, 201-304, 2001.
57. Paul, Z., Shuaib, A., Michael, L., High-Performance Concretes A State-of-Art Report (1989-1994) FHWA-RD-97-030, 1996.
58. Halpin, J.C., Tsai, S.W., Effects of Environmental Factors on Composite Materials, *Technical Report*, AFML-TR 67423, New York, 1969.
59. Banthia, N., Trottier, J.F., Beaupre, D., Wood D., Properties of Steel Fibre Reinforced Shotcrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21, 564-575, 1994.
60. Najm, H., Naaman, A.E., Prediction Model for Elastic Modulus of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, *ACI Materials Journal*, 92(3), 304-314, 1995.
61. Shah, P., Stroeven, P., Dalhuisen, D., Stekelenburg P.V., 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, 1978.
62. Fanella, D.A., Naaman, A.E., Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Concrete in Compression. *ACI Materials Journal*, 82(4), 475-483, 1985.
63. Gasparini, D.A., Verna, D., Abdallah, A., Post Cracking Tensile Strength of Fiber Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 6, 10-15, 1989.

64. ACI Committee 544, Fiber Reinforced Concrete, A State-of-the-Art Report ACI 544.1R-82, Concrete International, May, 5, 9-30, 1982.
65. ACI Committee 544, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, American Concrete Institute, Detroit, MI., USA, 1990.
66. Naaman, A.E., 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, 1985.
67. Gao, J., Sun, W., Morino, K., Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced, High-Strength, Lightweight Concrete, Cement and Concrete Composites, 19, 307-313, 1997.
68. Romualdi, J.P., Mandel, J.A., Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement. ACI Journal, 61(6), 657-671, 1964.
69. Edington, J., Hannant, D.J., Williams, R.I.T., Steel Fiber Reinforced Concrete, Building Research Establishment, CP 69174 Garston, Waterford, England, 1974.
70. Batson, G.B., 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), 1991.
71. Yan, H., Sun, W., Chen, H., The Effect of Silica Fume and Steel Fiber on the Dynamic Mechanical Performance of High-Strength Concrete, Cement and Concrete Research, 29, 423-426, 1999.
72. ASTM C 1018, Standart Test Methods for Flexural Thougness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third Point Loading), American Society of Testing Materials, USA, 1992.
73. EN 14651, Test Method for Metallic Fibered Concrete-Measuring the Flexural Tensile Strength, June, 2005.
74. Moyson, D., Nemegeer, D., Vandewalle, M., The Design of Steel Fibre Reinforced Concrete Tunnel Linings, Technical Report, March, Belgium, 1994.
75. Kayali, O., Haque, M.N., Zhu, B., Drying Shrinkage of Fiber Reinforced Concrete Containing Fly Ash, Cement and Concrete Research, 29, 1835-1840, 1995.
76. Grzybowski, M., Shah, S.P., Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 87(2), 138-148, 1987.

77. Edington J., "Steel Fiber Reinforced Concrete", Ph.D. Thesis, University of Surrey, UK, 1973.
78. Swamy R.S., Stavrides H., Influence of Fibre Reinforcement on Restraining Shrinkage and Cracking, *Journal of ACI*, 75, 443-460, 1979.
79. Nanni, Abrasion Resistance of Roller Compacted Concrete. *ACI Materials Journal*, 86(6), 559-565, 1989.
80. Sustersic, J., Mali, E., Urbancic, S., 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, 1991.
81. Balaguru, P.N., Ramakrishnan, V., Freeze-Thaw Durability of Fiber Reinforced Concrete, *ACI Journal*, 33(3), 374-382, 1986.
82. Vares, S., Frost Resistance of Steel Fiber High Strength Concrete, *Nordic Concrete Research*, 15, 75-88, 1994.
83. Mu, R., Miao, C., Luo, X., Sun, W., Interaction Between Loading Freeze-Thaw Cycles, and Chloride Sulfate Attack of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, 1-6, 2002.
84. Bayramov, F., Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.
85. Taşdemir, M.A., ve ark., Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı, 6. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 33-44, 16-18 Kasım 2005.
86. ACI Committee 544.1R, Fibre Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Michigan, USA, 1996.
87. Concrete Society,. Concrete Industrial Floors-A Guide to Their Design and Construction, Technical Report, No.34, The Concrete Society, Slough, 1994.
88. Sancak, E., Ünal, O., Hafif Betonda Çelik Lif Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi, *A.K.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 79-88, 2000.
89. Beksa Firması, Çelik Tel Takviyeli Betonun Özellikleri, Beksa Broşürleri Basımevi, İzmit, 1998.
90. Bentur, A., Mindess, S., Fibre Reinforced Cementitious Composites, Elsevier Applied Science, London and Newyork, 1990.
91. Balaguru, P.N., Shah, S.P., Fiber-Reinforced Cement Composites, Mc Graw-Hill International Editions, New York, 1992.

92. Nataraja, M.C., Dhang, N., Gupta, A.P., Stress-Strain Curves for Steel-Fiber Reinforced Concrete Under Compression, *Cement and Concrete Composites*, 21, 383-390, 1999.
93. Naaman, A.E., Harajli, M.H., Mechanical Properties of High Performance Concretes, Strategic Highway Research Program, National Research Council, SHRPC/ WP-90-004, Washington DC, USA, 1990.
94. Shah, S.P., Theoretical Models for Predicting the Performance of Fiber Reinforced Concrete, *Journal of Ferrocement*, 8 (3), 263-284, 1988.
95. ACI Committee 544, Measurement of Properties of Fibre Reinforced Concrete, American Concrete Institute, ACI (544.2R), No.85-M58, Detroit, Michigan, 1988.
96. Dugat, J., Roux, N., Bernier, G., Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes, *Materials and Structures*, 29, 233-240, 1996.
97. Kang, S.T., Lee, Y., Park, Y.D., Kim, J.K., Tensile Fracture Properties of An Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) With Steel Fiber. *Composite Structures*, 92(1), 61–71, 2010.
98. Wille, K., Kim, D.J., Naaman, A.E., Strain-Hardening UHP-FRC with Low Fiber Contents. *Materials and Structures*, 44(3), 583–598, 2011.
99. Gebman, M., Application of Steel Fiber Reinforced Concrete in Seismic Beam-Column Joints, MSc Thesis, San Diego State University, San Diego, 2001.
100. RILEM Technical Committee, 31st Meeting of RILEM Permanent Committee Budapest Report, *Materials and Structures (RILEM)*, 5-9, 65-68, September, 1977.
101. Yoo, D.Y., Kang, S.T., Yoon, Y.S., Effect of Fiber Length and Placement Method on Flexural Behavior, Tension-Softening Curve, and Fiber Distribution Characteristics of UHPFRC. *Construction and Building Materials*, 64, 67–81, 2014.
102. Banthia, N., Sappakittipakorn, M., Toughness of Cement in Steel Fiber Reinforced Concrete Through Fiber Hybridization, *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1366–1372, 2007.
103. Tejchman, J., Kozicki, J., Experimental and the Oretical in Vestigations of Steel-Fibrous Concrete, Springer Series Ingeo-Mechanics and Geo Engineering, 1st edn. Springer, Berlin, 2010.
104. Eik. M., Lo~hmus. K., Tigasson. M., Listak. M., Puttonen. J., Herrmann. H., DC-Conductivity Testing Combined with Photometry form Easuring Fibre Orientations in SFRC. *J Mater Sci* 48(10):3745–3759, 2013.

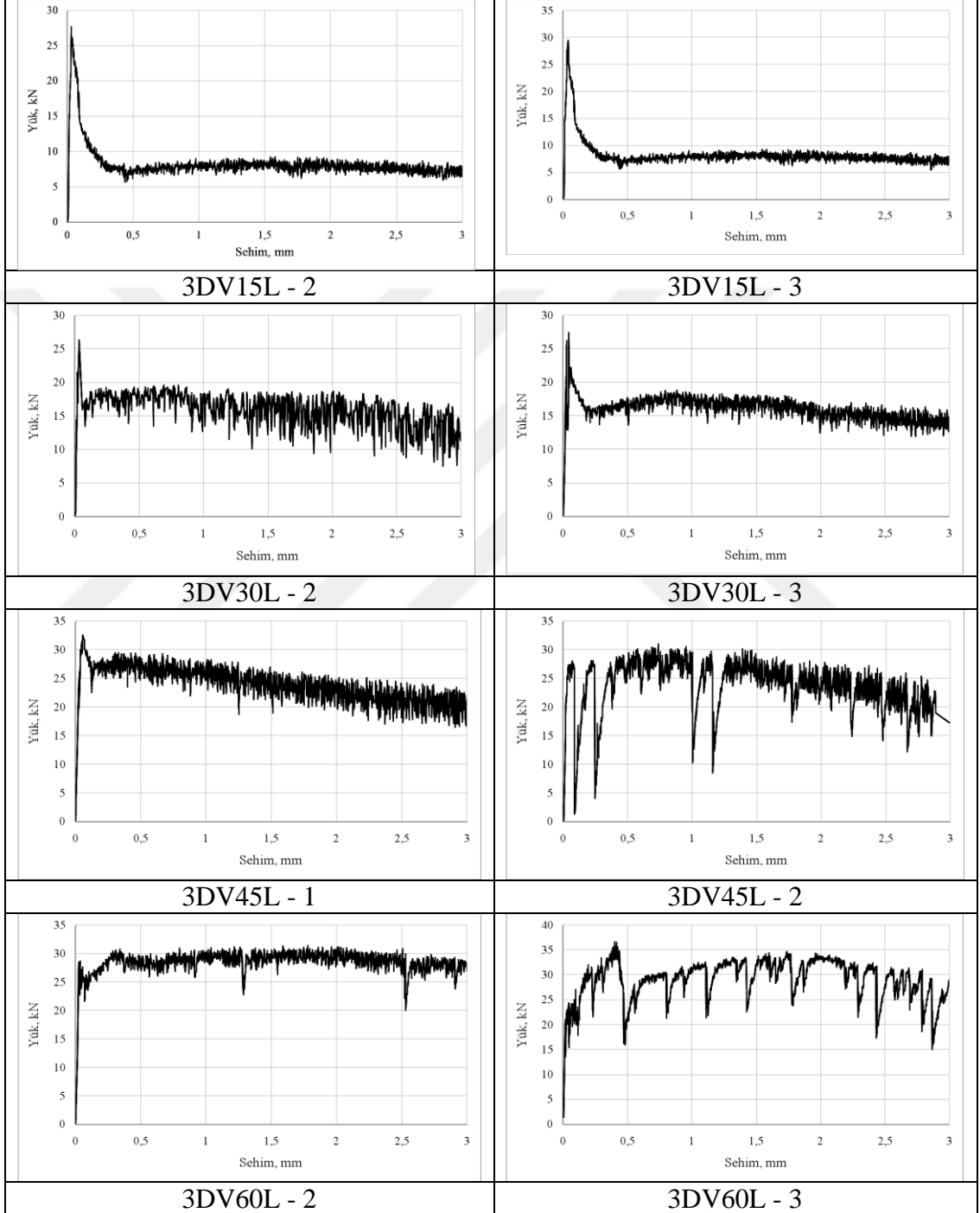
105. Lawler, J.S., Hybrid Fiber-Reinforcement in Mortar and Concrete, Ph.D. Thesis, Northwestern University, Evanston, USA, 2001.
106. Gopalaratnam, V.S., Shah, S.P., Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension, *Journal of the American Concrete Institute*, 82(3), 310-323, 1985.
107. Şanal, İ., Özyurt, Z.N., To What Extent Does the Fiber Orientation Affect Mechanical Performance? *Construction and Building Materials*, 44, 671–681, 2013.
108. Kang, S.T., Kim, J.K., The relation Between Fiber Orientation and Tensile Behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC), *Cement and Concrete Research*, 41(10), 1001–1014, 2011.
109. Afroughsabet, V., Biolzi, L., Ozbakkaloglu, T., High-Performance Fiber-Reinforced Concrete: A Review, *Journal of Material Science*, 51:6517–6551, 2016.
110. Chan, Y.W., Chu, S.H., Effect of Silicafume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1167–1172, 2004.
111. Balendran, R.V., et al., Influence of Steel Fibers on Strength and Ductility of Normal and Lightweight High Strength Concrete, *Building and Environment*, 37, 1361-1367, 2002.
112. Toutanji, H., Bayasi, Z., Effect of Manufacturing Techniques on The Flexural Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Research*, 28 (1), 115-124, 1998.
113. Newman, J., Choo, B., *Advanced Concrete Technology*, Elsevier Ltd., Oxford, 2003.
114. Bekaert, *Industrial Floors with Dramix Steel Wire Fibre Reinforced Concrete*, N.V., Bekaert S.,A., Zwevegemi, Belgium, 1990.
115. An, M., Zhang, L., Yi, Q., Size Effect on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete, *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(2), 279–282, 2008.
116. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, Forth and Final Edition, Person Prentice Hall, England, 2003.
117. Erdoğan, T.Y., *Beton*, METU Press, I. Baskı, Ankara, 2003.
118. Sobhani, J., Najimi, M., Pourkhorshidi, A.R., Parhizkar, T., Prediction of the Compressive Strength of No-Slump Concrete: A Comparative Study

of Regression, Neural Network and ANFIS Models, Construction and Building Materials, Volume 24, 5, 709-718, 2010.

119. Slonski, M., A Comparison of Model Selection Methods for Compressive Strength Prediction of High-Performance Concrete Using Neural Networks, Computers and Structures, 88, 21-22, 1248-1253, 2010.
120. Akkoyun, Ö., Görüntü İşleme Yöntemlerinin Mermer Kalite Seçiminde Uygulanabilirliği Üzerinde Bir Değerlendirme, Mersem7, Uluslar arası Mermer ve Doğaltaş Kongresi, Afyon, 2010.
121. Yılmaz, A., Kamera Kullanılarak Görüntü İşleme Yoluyla Gerçek Zamanlı Güvenlik Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Haliç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 102, İstanbul, 2007.
122. Kılınç, İ., Çelik Malzemelerde Korozyon Oyuklarının Görüntü İnceleme Yöntemiyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü Mak. Tas. Ve İmalat Anabilim Dalı, 57, Sakarya, 2009.
123. Kalaycı, T.E., Görüntü İşleme Raporu, Ege Üniversitesi, Eylül, 2010.
124. Karakuş, D., Görüntü Analiz Yöntemleri ile Kayaçların Yapısal Özelliklerinin Tanımlanması, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Bölümü, Maden İşletme Anabilim Dalı, 162, İzmir, 2006.
125. Onat, M., Dijital görüntü İşleme Yöntemleriyle Lifli Beton Numunelerindeki Çatlakların Tespit Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 41, Elazığ, 2008.
126. Gönen, D., Gümüştekin, Ş., Oral, A., Mozaik Dizme Otomasyonu için Görüntü Algılama ile Mermer Yüzey Kalitesinin Değerlendirilmesi, TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi, Balıkesir, 2006.
127. Grünwald, S., Performance-Based Design of Self-Compacting Fibre Reinforced Concrete, PhD, Thesis, Delft University of Technology, 2004.

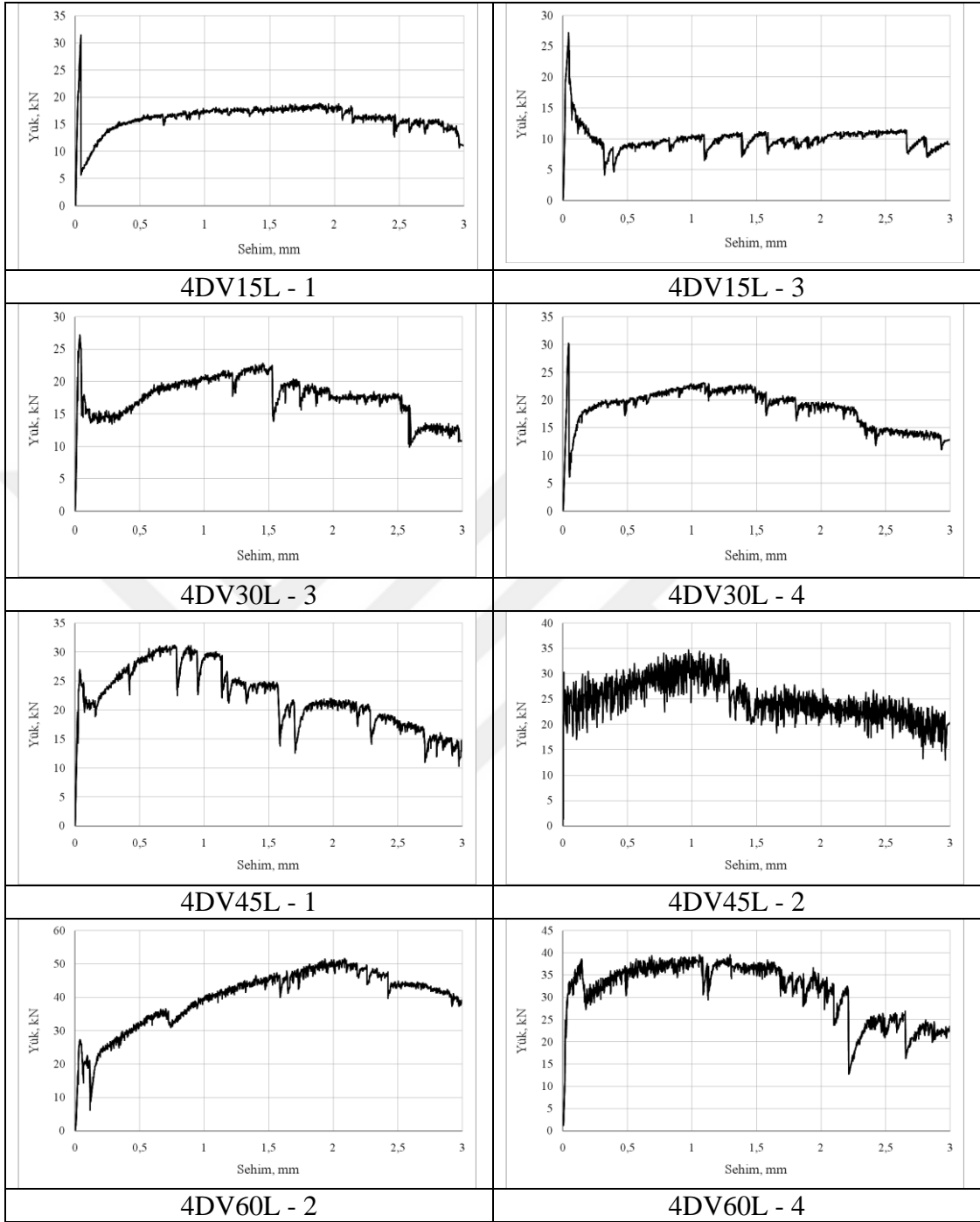
## EKLER

### Ek A. Tüm Numunelere Ait Yük-Sehim Eğrileri

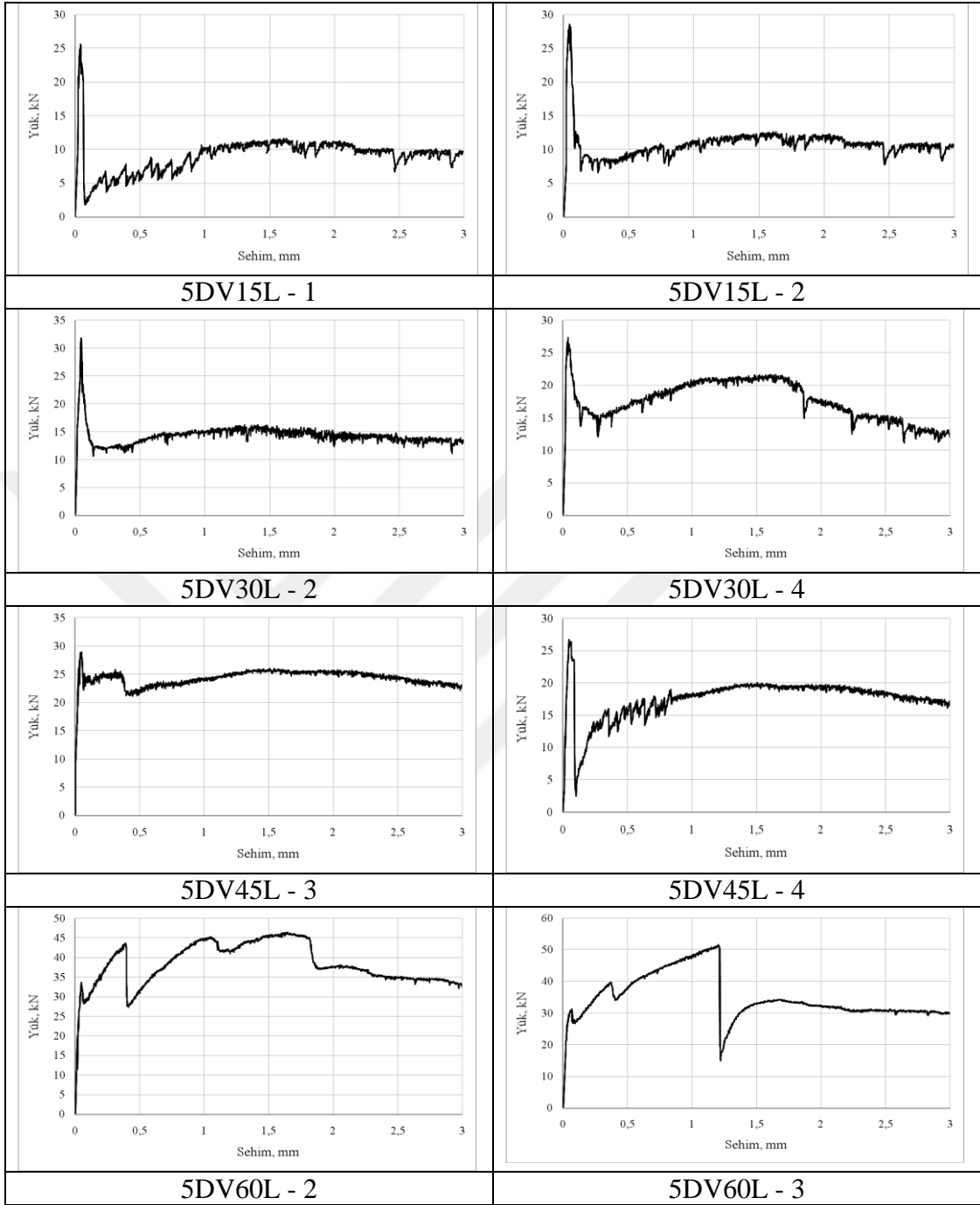


### Ek A.1. L Kodlu Karışımlara Ait Yük-Sehim Eğrileri

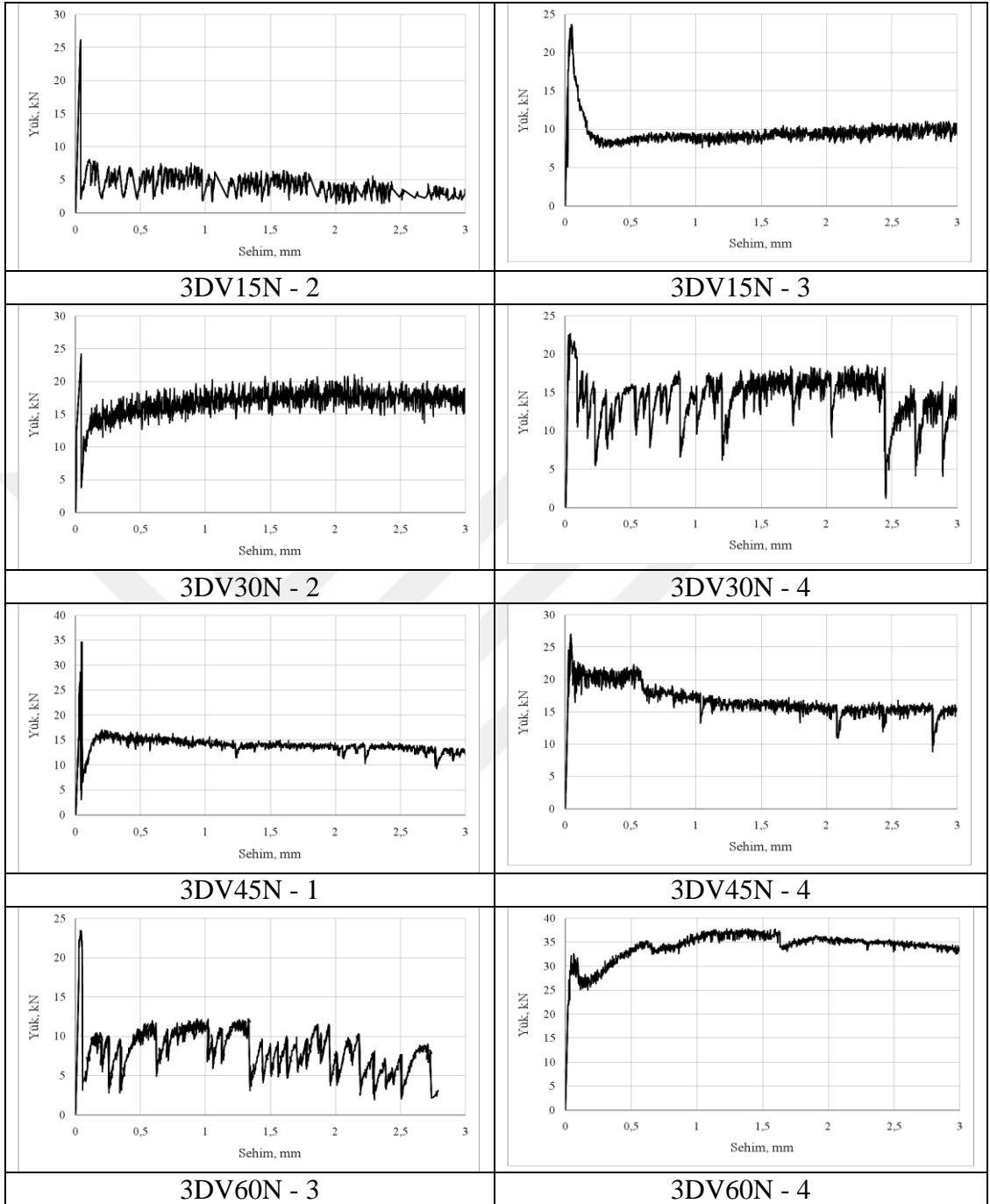




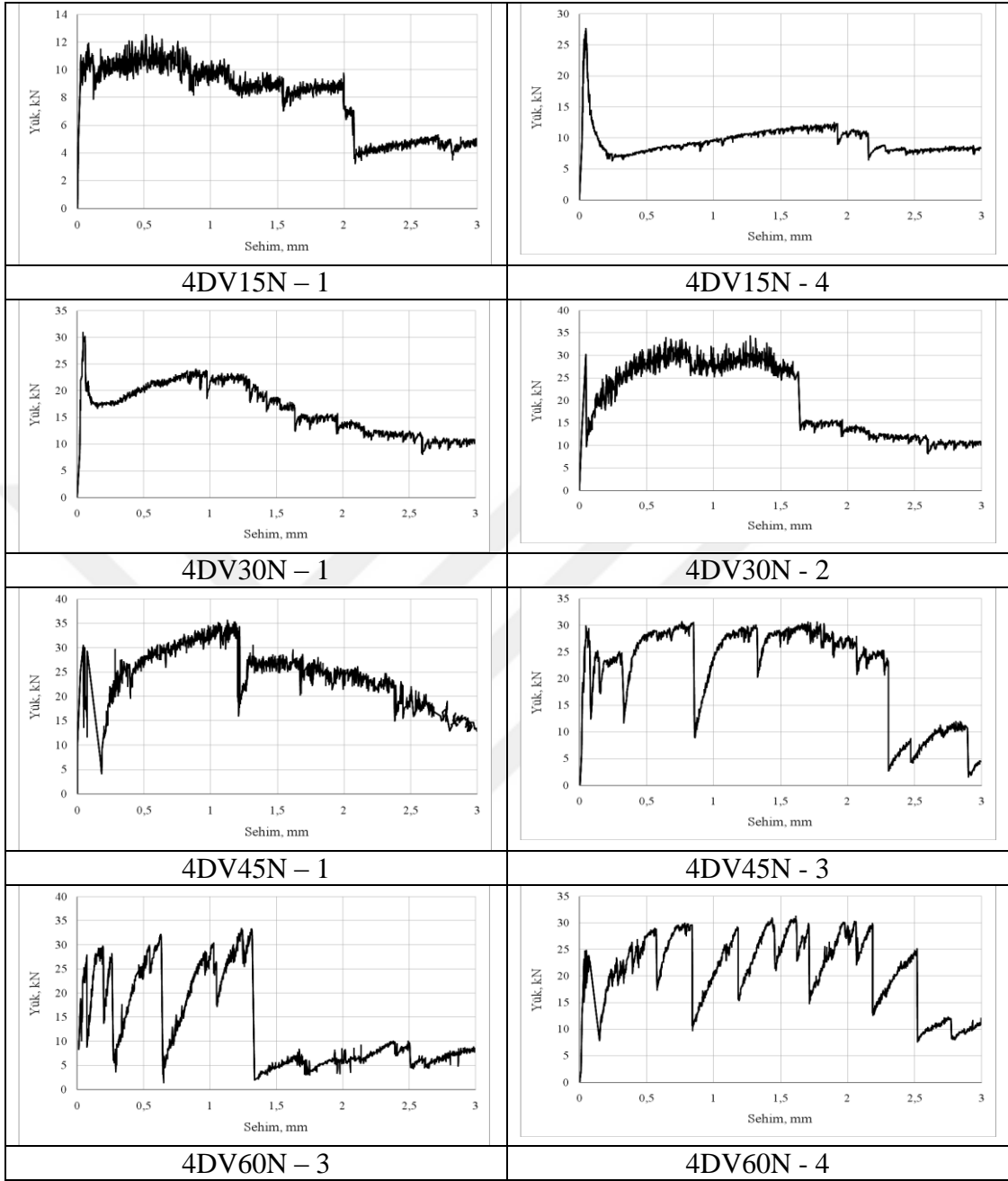
**Ek A.2. L Kodlu Karışımlara Ait Yük-Sehim Eğrileri**



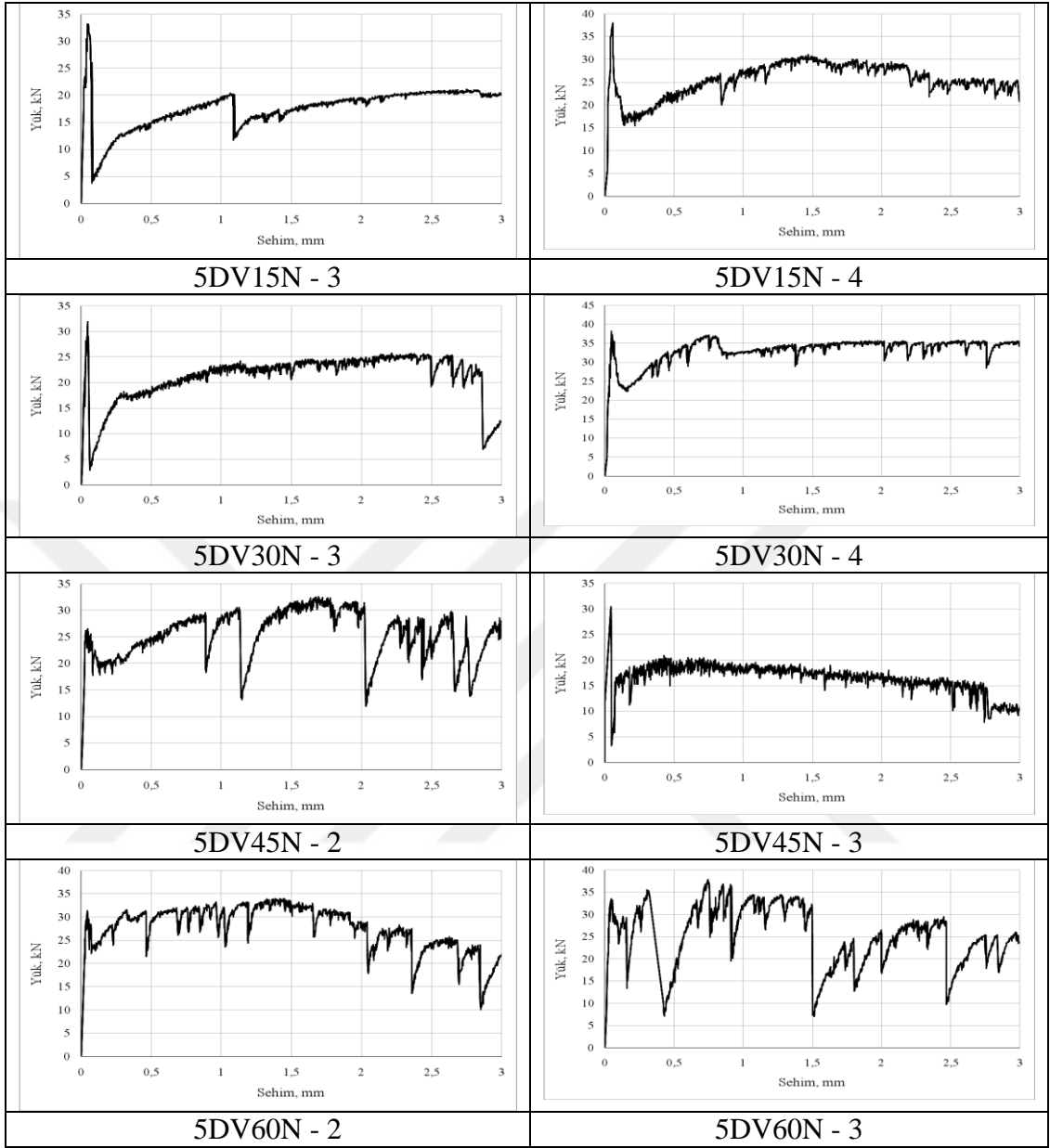
**Ek A.3. L Kodlu Karışımlara Ait Yük-Sehim Eğrileri**



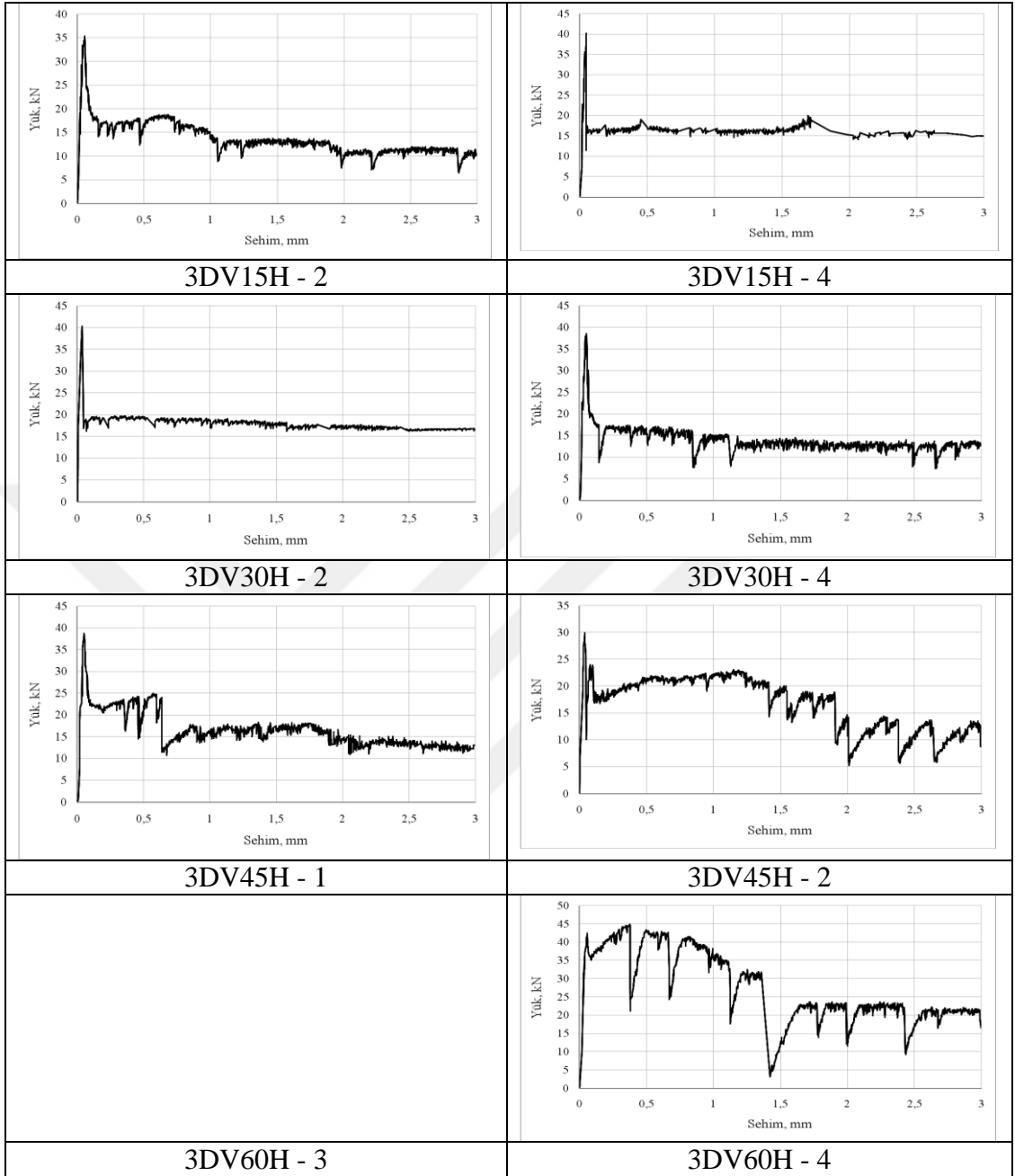
**Ek A.4. N Kodlu Karışımlara Ait Yük-Sehim Eğrileri**



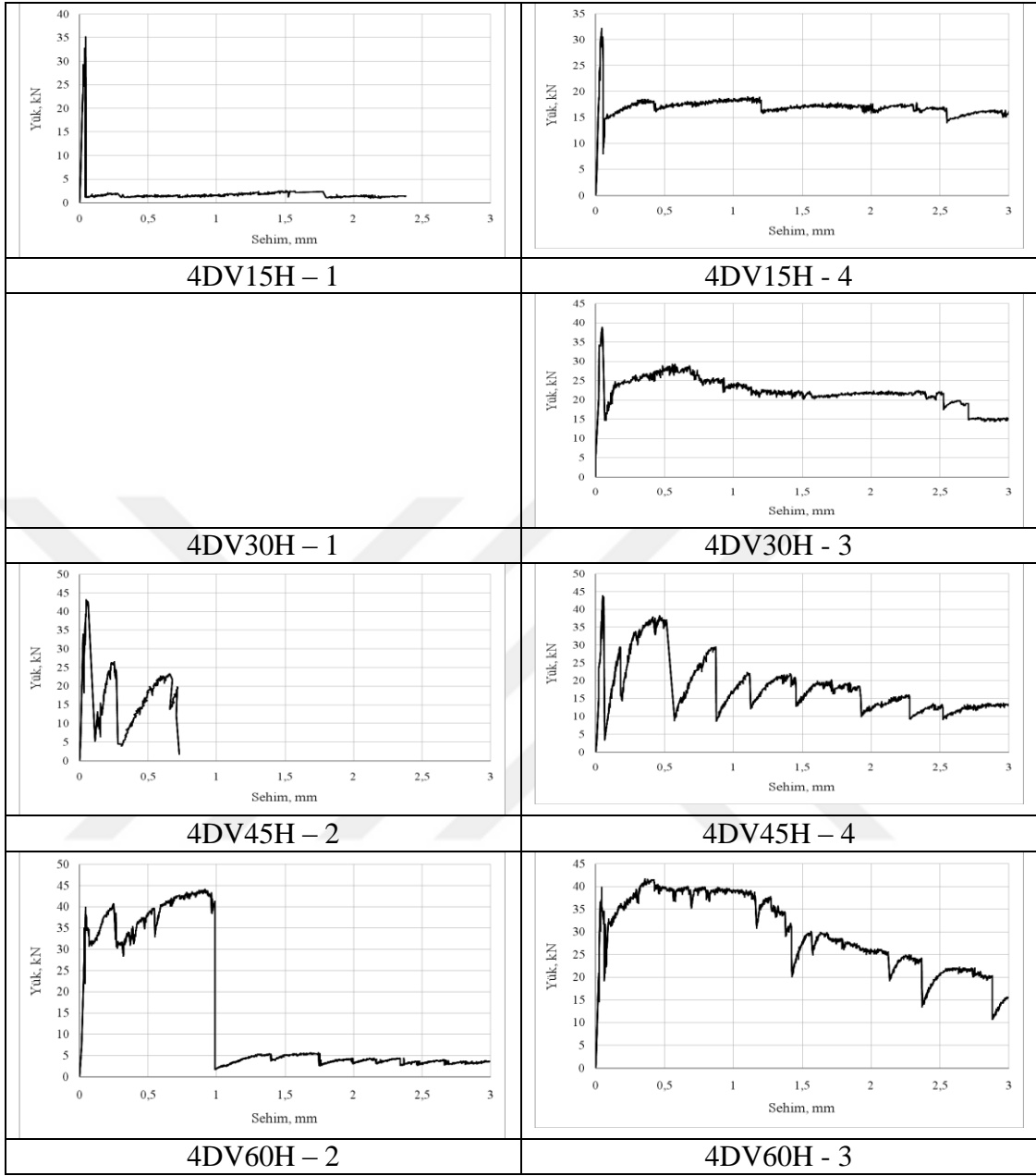
**Ek A.5. N Kodlu Karışımlara Ait Yük-Sehim Eğrileri**



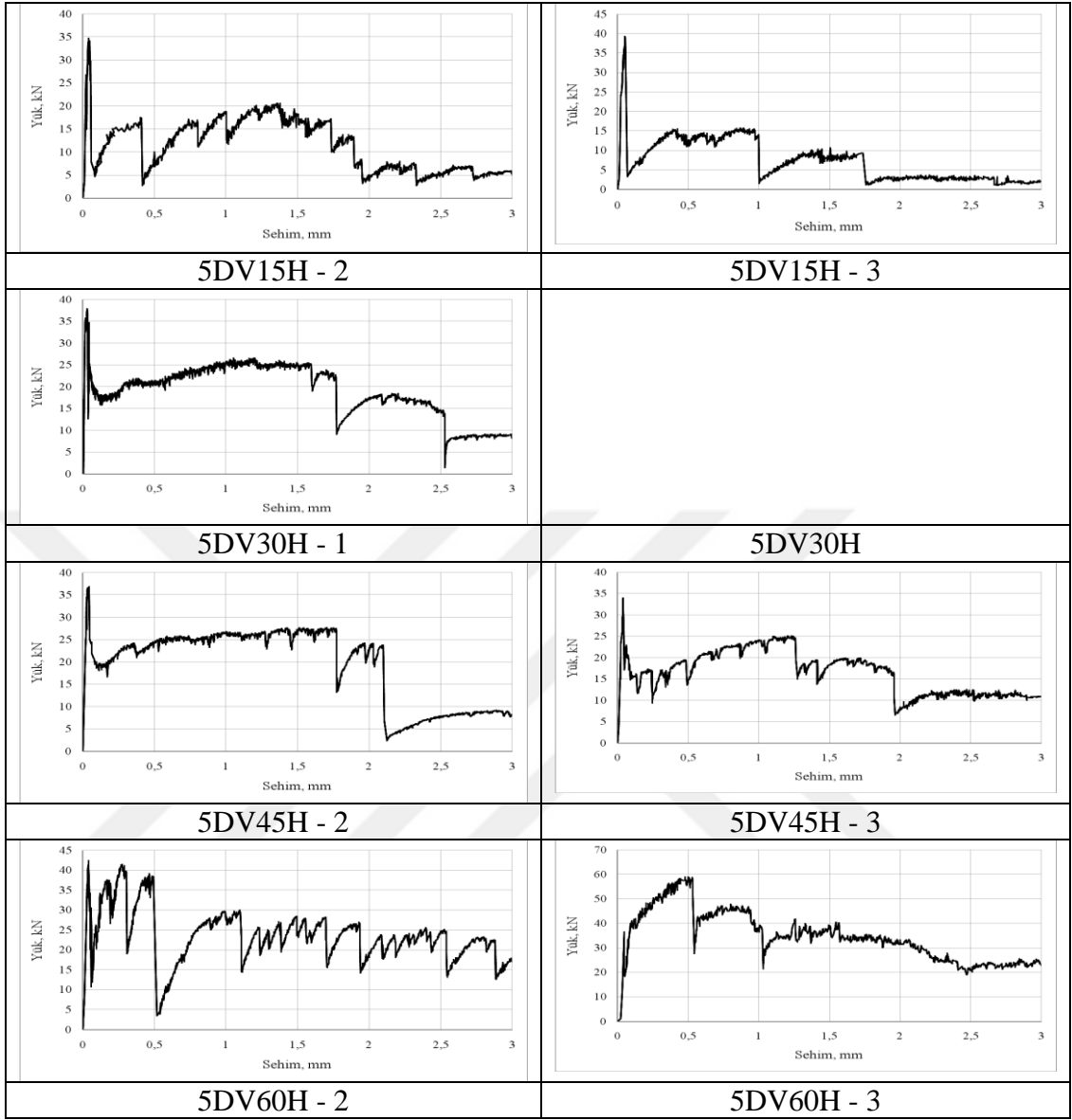
**Ek A.6. N Kodlu Karışımlara Ait Yük-Sehim Eğrileri**



**Ek A.7. H Kodlu Karışımlara Ait Yük-Sehim Eğrileri**



**Ek A.8. H Kodlu Karışımlara Ait Yük-Sehim Eğrileri**



**Ek A.9. H Kodlu Karışımlara Ait Yük-Sehim Eğrileri**



## ÖZGEÇMİŞ

Eyüp TAŞKAN, 1990 yılında Yozgat'ın Sorgun İlçesinde doğdu. Orta ve lise öğrenimini sırasıyla Mehmet Akif Ersoy Ortaokulu ve Sorgun Anadolu Lisesinde tamamlamıştır. 2008 yılında Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimi başlamış olup 2013 yılında başarıyla bitirmiştir.

2014 yılında Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yapı Mühendisliği Programında Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.

Eğitim hayatının yanı sıra Yozgat İl Özel İdaresi Proje ve Yapım İşleri Bürosunda Kontrol Mühendisi olarak iş hayatını devam ettirirken aynı zamanda aktif olarak Futbol Hakemliği de yapmaktadır.

### **İletişim Bilgileri:**

**Adres** :Medrese Mah. Mahmut Turan Sok. Merve Apt. No:8/12

66100 YOZGAT

**Tel** : 0 543 505 85 83

**E-Posta** : eyup.taskan66@gmail.com