

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

ÇELİK TEL NARİNLİĞİNİ VE İÇERİĞİNİN BETONUN
KIRILMA ENERJİSİNE ETKİSİ

Muhammed Furkan EKİCİ

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

YOZGAT 2023

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

ÇELİK TEL NARİNLİĞİNİ VE İÇERİĞİNİN BETONUN
KIRILMA ENERJİSİNE ETKİSİ

Muhammed Furkan EKİCİ

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

YOZGAT 2023



**YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ONAY FORMU**

T.C.

**YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı 70110719010 numaralı öğrencisi Muhammed Furkan EKİCİ'nin hazırladığı “**Çelik Tel Narinliği ve İçeriğinin Betonun Kırılma Enerjisine Etkisi**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince/....../2023 günü saat’da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.

Başkan :.....

Jüri Üyesi :.....

(Danışman)

Jüri Üyesi :.....

Jüri Üyesi :.....

Jüri Üyesi :.....

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../2023 tarih vesayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

...../...../2023

Müdür Ad-Soyadı

İmza

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muhammed Furkan EKİCİ

09/02/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

ÇELİK TEL NARİNLİĞİ VE İÇERİĞİNİN BETONUN KIRILMA ENERJİSİNE ETKİSİ

Muhammed Furkan EKİCİ

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

TEZ DANIŞMANI: Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

Bu tez çelik tel narinliği ve içeriğinin betonların kırılma enerjilerine etkisinin araştırılmasını kapsamaktadır. Araştırma kapsamında Ülkemizde üretimi yapılan çelik teller ve uygulama açısından uygun çelik tel içeriklerinin kullanılması hedeflenmiştir. Bu amaçla 65 ve 80 narinliğe sahip çelik teller 15 kg/m³, 20 kg/m³ ve 25 kg/m³ miktarlarda betona ikame edilerek numuneler üretilmiştir. Deneysel çalışmada C30/37 beton sınıfı ve 15 cm çökme değeri referans alınmıştır. Taze betonlar üzerinde işlenebilirlik ve taze birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş çelik tel donatılı (ÇTDB) numuneler üzerinde sırasıyla basınç ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Basınç dayanımı deneyi için 150mmx150mmx150mm küp ve yarma dayanımı deneyi için ise 100mmx200mm silindir numuneler kullanılmıştır. Ayrıca 150mmx150mmx600mm boyutlarında üretilen çentikli prizmatik kiriş numuneler üzerinde eğilme deneyi yapılarak numunelerin eğilme dayanımları belirlenmiştir. Eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrilerinden ise ÇTDB'ların kırılma enerjileri hesaplanmıştır.

Deney sonuçlarına bağlı olarak çelik tel içeriğinin artmasıyla basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında artışlar elde edilmiştir. Eğilme ve yarma dayanımlarında artışlar basınç dayanımına kıyasla daha yüksek elde edilmiştir. Çelik tel narinliği ve içeriğine bağlı olarak ÇTDB kirişlerin kırılma enerjilerinde belirgin artışlar elde edilmiştir.

2023, 77 sayfa

ANAHTAR KELİMELELER: Çelik Tel, Narinlik, Betonarme Kiriş, Tokluk, Basınç Dayanımı

ABSTRACT

MASTER

THE EFFECT OF ASPECT RATIO AND CONTENT OF STEEL FIBER ON FRACTURE ENERGY OF CONCRETE

Muhammed Furkan EKİCİ

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
SCHOOL OF GRADUATES STUDIES**

Civil Engineering Department

SUPERVISOR: Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

This thesis investigates the effect of steel fiber aspect ratio and content on the fracture energy of concrete. In the research, it was aimed to use steel fiber locally produced and steel fiber content preferred in practice. For this purpose, specimens were produced by substituting steel fibers with an aspect ratio of 65 and 80 at 15 kg/m³, 20 kg/m³ and 25 kg/m³ into concrete. In the experimental study, C30/37 concrete class and 15 cm slump value were taken as reference. Workability and fresh unit weight tests were performed on fresh concretes. Compressive and splitting tensile strength tests were performed on hardened steel fiber reinforced specimens, respectively. 150mmx150mmx150mm cube specimens and 100mmx200mm cylinder specimens were used for compressive and splitting tensile tests, respectively. In addition, flexural tests were performed on notched prismatic beam specimens with dimensions of 150mmx150mmx600mm to determine the flexural strength of the specimens. From the load-deflection curves obtained from the flexural test, the fracture energies of the SFRCs were calculated.

Based on the test results, increases in compressive, splitting, tensile and flexural strengths were obtained with increasing steel fiber content. The increases in flexural and splitting strengths were higher compared to compressive strength. Significant increases were obtained in the fracture energies of SFRCs beams depending on the steel fiber aspect ratio and content.

2023, 77 pages

KEYWORDS: Steel Wire, Slenderness, Reinforced Concrete Beam, Toughness, Compressive Strength

ÖNSÖZ

Bu çalışma Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

"Çelik Tel Narinliği ve İçeriğinin Betonun Kırılma Enerjisine Etkisi" isimli tez çalışmamda önerileri, bilgi, birikim ve tecrübeleri ile yardımcı olan İnşaat Mühendisliği bölümünü seçmemde büyük bir etkiye sahip olan danışman hocam Prof. Dr. Fuat KÖKSAL'a, hazırlık deney aşamasında birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım çok değerli Arş. Gör. Hüseyin Okan ANADUT'a ve İnş. Müh. Yusuf YILDIZ'a teşekkür ederim.

Hayatta desteklerini hiç esirgemeyen kıymetli babam Ali İhsan EKİCİ'ye, kıymetli annem Döndü EKİCİ'ye, biricik ablalarım Elmas Nur EKİCİ ve Ayşe BÖLÜKBAŞI'na, meslek hayatımda çok büyük yeri olan hiçbir zaman desteğini esirgemeyen bütün zor günümde yanımda olan çok kıymetli Mehmet YEMENOĞLU'na teşekkürü borç bilirim.

Yol arkadaşım Meslektaşım, her durumda bilgi deneyim ve tecrübelerinden faydalandığım çok değerli İnş. Müh Mustafa Görkem TAŞTAN'a teşekkürü borç bilirim.

MUHAMMED FURKAN EKİCİ

09/02/2023

İÇİNDEKİLER

TEZ BEYANI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
RESİMLER LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. ÇELİK TELLERDEN DONATILMIŞ BETONLAR	5
2.1. Genel Bilgilendirme	5
2.2. Çelik Tellerin Betonlarda Gösterdiği Mekanik Davranışı	6
2.3. Çelik Tellerin Betonda Yük Altındaki Davranışı.....	7
2.4. Çelik Tellerin İçeriği, Narinliği ve Dağılımının Mekanik Davranışa Etkisi.....	9
2.5. Çelik Tel Takviyeli Betonların Kullanım Alanları	9
2.6. Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller	10
2.7. Çelik Tellerin Beton İçerisindeki Davranışı	13
2.8. Çelik Tellerin Betona Kazandırdığı Nitelikler	14
2.9. Çelik Tel Takviyeli Betonun Tasarımı.....	15
2.10. Çelik Tel Donatılı Betonların Özellikler	17
2.10.1. Basınç Dayanımı	17
2.10.2. Elastik Modülü	18
2.10.3. Eğilme Mukavemeti	19
2.10.4. Yarmalarda Çekme Mukavemeti	20
2.10.5. Kırılma Enerjisi	20
2.10.6. Tokluğu	20
2.10.7. Yorulma ve Darbe Dayanımı	21
2.10.8. Büzülme ve Sünme	21
2.10.9. Çelik Tel Takviyeli Betonun Dayanıklılığı.....	22
2.10.10. Betonun Çelik Tel Donatısı ile Karışımı.....	23
2.10.11. Korozyon.....	25

2.10.12. Kavitasyon, Erozyon ve Aşınma Direncini.....	25
2.10.13. Donma-Çözünme	26
2.10.14. Püskürtme Betona İlave Edilen Çelik Tel Donatısı	27
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	29
3.1.1. Agregalar.....	29
3.1.2. Çimento.....	29
3.1.3. Su	30
3.1.4. Kimyasal Katkı	30
3.1.5. Çelik Tel.....	30
3.2. Beton Karışımları	31
3.3. Numunelerin Üretilmesi.....	32
3.4. Yapılan Deneyler	34
3.4.1. Taze Beton Deneyleri.....	34
3.4.1.1. Birim Ağırlık Deneyi.....	34
3.4.1.2. İşlenebilme Deneyi	35
3.4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	36
3.4.2.1. Basınç Dayanımı Tayini	36
3.4.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı Tayini	36
3.4.2.3. Eğilmede Çekme Deneyi	37
4. BULGULAR.....	39
4.1. Taze beton Birim Ağırlık ve İşlenebilme.....	39
4.2. Basınç Dayanımı	40
4.3. Yarmada Çekme Dayanımı	43
4.4. Eğilmede Çekme Deneyi.....	46
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
6. KAYNAKÇA.....	58

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	29
Tablo 3.2. CEM I 42.5 R Tipi Portland Çimento Özellikleri.....	30
Tablo 3.3. Çelik tellerin özellikleri	31
Tablo 3.4. Agrega karışım oranları (hacimce)	31
Tablo 3.5. Beton karışım miktarları (kg/m ³).....	32
Tablo 4.1. Taze birim ağırlık deneyi sonuçları	39
Tablo 4.2. İşlenebilme deneyi sonuçları	39
Tablo 4.3. Basınç dayanımı deney sonuçları	41
Tablo 4.4. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları	44
Tablo 4.5. Prizmatik Kirişlerin Yük Taşıma Kapasiteleri.....	47
Tablo 4.6. Prizmatik Kirişlerin Nihai Eğilme Dayanımı	49
Tablo 4.7. Prizmatik Kirişlerin Kırılma Enerjileri	51

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Tel mukavemetinin çatlak köprüleme etkisi	7
Şekil 2.2. Bir betonun içinde Çelik tel olmadan sürekli yükler çevrimleri ile elde olan yük-sehim eğrisinin çizimi	8
Şekil 2.3. Yüzeyi düz, pürüzsüz tel (TS 10513, 1992)	11
Şekil 2.4. Uzunluğunca deforme yüzeyli teller (TS 10513, 1992)	12
Şekil 2.5. Kancalı bir ucu veya iki ucu olan tel (TS 10513, 1992)	12
Şekil 2.6. Çelik lifli betonda çatlak uçları tellerle güçlendirilerek çatlak ilerlemesi durdurulmuştur	14
Şekil 2.7. Çelik tel donatılı betonda liflerden kaynaklanan gerilme dağılımı	15
Şekil 2.8. Çelik tel donatılı betonun ve yalın betonun tipik gerilme ve şekil değiştirme grafiği	17
Şekil 2.9. Çelik telin içeriğinin gerilme-uzama ilişkisi	18
Şekil 2.10. Çelik telin içeriğinin gerilme-uzama ilişkisi	18
Şekil 2.11. Çelik Tel Donatılı Betonların kirişler için yük-sehim grafiği	20
Şekil 3.1. Karışım agregası tane dağılımı eğrisi	32
Şekil 4.1. Basınç dayanımları (çelik tel içeriğine göre)	42
Şekil 4.2. Basınç dayanımları (çelik tel narinliğine göre)	42
Şekil 4.3. Çelik tel narinliğine bağlı yarmada çekme dayanımı	45
Şekil 4.4. Çelik tel içeriğine bağlı yarmada çekme dayanımı	45
Şekil 4.5. Çelik tel narinliğine bağlı maksimum yük	48
Şekil 4.6. Çelik tel içeriğine bağlı maksimum yük	48
Şekil 4.7. Çelik tel narinliğine bağlı nihai eğilme dayanımı	50
Şekil 4.8. Çelik tel içeriğine bağlı nihai eğilme dayanımı	50
Şekil 4.9. Çelik tel narinliğine bağlı kırılma enerjisi	52
Şekil 4.10. Çelik tel içeriğine bağlı kırılma enerjisi	52
Şekil 4.11. Narinlik 65 ve 15 kg/m ³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği ..	53
Şekil 4.12. Narinlik 65 ve 20 kg/m ³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği ..	53
Şekil 4.13. Narinlik 65 ve 25 kg/m ³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği ..	54
Şekil 4.14. Narinlik 80 ve 15 kg/m ³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği ..	54
Şekil 4.15. Narinlik 80 ve 20 kg/m ³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği ..	55
Şekil 4.16. Narinlik 80 ve 25 kg/m ³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği ..	55

RESİMLER LİSTESİ

Resim	<u>Sayfa</u>
Resim 2.1. Taze Beton İçerisinde Çelik Tellerin Dağılımı	23
Resim 3.1. Kullanılan çelik teller	31
Resim 3.2. Betonun üretimi ve taze betonun deneyleri.....	33
Resim 3.3. Döküm işlemleri tamamlanmış olan prizmatik kiriş numuneleri.....	34
Resim 3.4. Döküm işlemleri tamamlanmış olan silindir ve küp numuneleri	34
Resim 3.5. Taze birim ağırlık deneyine ait görsel.....	35
Resim 3.6. İşlenebilme deneyine ait görsel	35
Resim 3.7. Basınç dayanımı deney düzeneği	36
Resim 3.8. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği	37
Resim 3.9. Kirişlerde çekme deney düzeneği	38
Resim 4.1. Yarmada çekme deneyi sonrası numunelerin tipik görünümü.....	46
Resim 4.2. Eğilmede çekme deneyi sonrası numunelerin tipik görünümü	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

cm	: Santimetre
cm³	: Santimetreküp
g	: Gram
J	: Joule
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
m	: Metre
m²	: Metrekare
m³	: Metreküp
mm	: Milimetre
N	: Newton
s	: Saniye

Kısaltmalar

Açıklamalar

ACI	: Amerika Beton Enstitüsü
DAfStb	: Alman Kılavuzu
EHE	: Spanish Code on Structural Concrete
EPS	: Genleştirilmiş-Genleştirilebilen Polisterin
FIB	: International Federation for Structural Concrete
GGBS	: Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
GPa	: Gigapaskal
GPC	: GeoPolymer Concrete
KMX	: Kemerix
MLR	: Multi-linear Regression
MPa	: Megapaskal
NLFM	: Doğrusal Olmayan Kırılma Mekaniği
RC	: Betonarme
RPC	: Reaktif Pudra Betonu
SFRC	: Çelik Tel Takviyeli Beton
SFRNC	: Çelik Tel Takviyeli Normal Beton

SFRSCC	: Çelik Tel Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Beton
TS	: Türk Standartları
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TS EN	: Türk Standartları Avrupa Normları
V_f	: Çelik Tel
WWF	: Kaynaklı Tel Kumaş



1. GİRİŞ

Beton dünyada en çok kullanılan kullanılan yapı malzemesidir. Başta çimento çakıl, kum, su ile birleştirilmesinden veya kimyasal, mineral katkı maddelerinin birleşiminden oluşan, betonu oluşturan malzemeler, başlangıçta plastik kıvamdadır ve şekil verilebilen, zamanla katılaşp mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir.

Çimento ve su birleşerek agregataneleri birbirlerine bağlarlar. Yaklaşık olarak agregabetonun 3/4 ünü oluşturur. Agregalar tane boyutuna göre ikiye ayrılır ince taneli ve iri taneli agregalardır. 4nolu elek üzerinde kalan agrega iri agrega olarak adlandırılır, İri agregalar taş ocaklarından kırma suretiyle elde edilebildiği gibi doğada tabii olarak da bulunabilir. 200nolu elekten geçen Agregada ince agregadiye adlandırılır. Agregalarda dikkat edilmesi gereken şey, zararlı maddelerden ayıklanmış olmasıdır. Ayrıca agreganın standartlara göre kabul görmüş ölçütleri de sağlanmalıdır (Abbass, 2018). Betonu oluşturmak için diğer önemli bir madde ise sudur; gerekli yapıda ve zararlı maddelerden temizlenmiş olması gerekmektedir. Genel olarak içme suyu beton üretimi için uygun sayılır. Beton oluşumunda karışıma gerektiğinde bazı katkı maddeler kullanıldığında su eklemeden önce veya sonrasında konulabilir. Katkı maddeleri ile betonun priz alma süresi kısalabilir veya uzaya bilir, işlenebilirliği artırabilir, aynı zamanda dayanıklılığı, arttırabilir. Aynı zamanda beton katkı maddeleri ile işlenebilirlik, genleşme, donma çözülme karşı dayanımı, dayanıklılık ve geçirimsizliği daha artırır.

Betonun yapım aşamasında ve betonun içerdiği malzemelere göre betonun kalitesi belirlenir. Betonun iki halde bulunur taze ve sertleşmiş haldedir (Abdullah, 2022).

Taze betonun Özellikleri: kolaylıkla karıştırılır, kolaylıkla taşınır, kalıba yerleştirilir, sıkıştırılır ve işlenebilirliği kolaydır. Bu işlem esnasında beton dağılıp agregalar ve çimento harcı arasında ayrılma olmaması gerekir. Betonu oluşturan malzemelerin birleştirilmesinden hemen sonra plastik kıvama sahip olan betonda katı hale hemen geçmemesi için sertleşme süresini gerekenden uzun tutulmamalı.

Sertleşmiş Betonun özellikleri: beton üzerinde yapılan deneyleri kalite kontrolü için, betonu üretmeden önce seçilen malzemeler ve karıştırma işlemleri ile istediğimiz kaliteye ulaşıp ulaşılmadığının kontrolü için yapılır. Beton sertleşmeye başladığı anda beton dayanımını biraz kazanmış betondur. Fakat sertleşmiş beton söz konusu olduğunda 28 günlük ve daha yaşlı beton olduğunu anlamak gerekir (Acun, 2000).

Beton Çevresinde oluşabilecek suyun ve diğer betona zarar verebilecek sıvıların betonunu içine girerek betona zarar verip kötü sonuç oluşmaması için yeterince geçirimsiz olmalıdır. Betonun zamanla bulunduğu ortamdan zarar görebileceği müessirlere karşı durabilite açısından dayanıklılığı yeterli olmalıdır.

Beton sade haledyken yani demir ya da tel donatıları yokken çekme mukavemeti düşüktür, basınç dayanımı yüksek olan bir malzemedir. Betonarme yapı çalışmalarında, betonun bu riskli özelliği taşıyıcı elemanları içerisine donatılan demir çubukları ile iyileşmiş olur. Betonun sınıflara ayrılması gerçek amacımız olan basınç mukavemetini sonucuna varmaktadır. Basınç mukavemeti ne kadar fazla olursa mukavemeti gibi betonun diğer özellikleri de aynı anlamda olumlu şekilde etkilendiği bilinir (Aisheh, 2022).

Beton malzemenin düşey yönünde yüzeye dik etki eden basınç yüklerine karşı göstermiş olduğu dirence beton basınç dayanımı denir. Betonun basınç dayanımı aralarındaki en fazla olan dayanım basınç dayanımıdır. Yani betondaki basınç dayanımı bileşimlerin durumunu belli eden karışımın bir fonksiyonudur. Fakat beton basınç mukavemetini ilk baştan değil uzun zamanda aldığını bilmek gereklidir. Beton karışımında kullanılan malzemeler içerikleri ve kullanım oranları beton basınç mukavemetini değiştirir. Bu sebeple betonun karışım malzemelerinin karakteristik özelliklerini bilmek gerekir. Basınç dayanımıyla değerleri biliniyorsa betondaki diğer bazı özelliklerin bilgisine sahip olunur. Eğer beton basınç dayanımı düşük ise, betondaki su geçirimsizliği vardır ve düşük dayanıma sahip olacaktır. Beton basınç mukavemeti diğer beton dayanımı türü olan büyüklükler hakkında bilgi sahibi olmamıza olanak sağlar (Aktaş, 2007). Çünkü betonunu basınç mukavemeti ile o betondaki, eğilme mukavemeti, çekme mukavemeti aralarında azda olsa bir korelasyon bulunduğu bilinir. Çekme mukavemeti ile yapılmış tüm tasarım yapılarında beton basınç mukavemet değerleri dikkate alınırken betonun eğilme, çekme ve yorulma gibi diğer farklı olan yüklerin etkilerinde kalmayacağı varsayılır. Dolayısı ile betona etki eden yüklere karşı basınç mukavemetinde elde edilmiş olan neticelere göre değerlendirilmiş olur.

Türkiye’de belirlenmiş olan standartlara göre basınç mukavemeti 30 cm’lik yüksekliğinde 15 cm çapında silindir veya 20 cm’lik küp numuneler üzerinde tespit edilmektedir. Bu büyüklükteki numunelerde silindir numune bir fazla farklı ülkelerde kabul görülmektedir, standarttaki silindir numuneler olarak isimlendirilir ve betonun sınıflara ayrımı da bu değerlere göre tespit edilir (Alı, 2020).

Çekme mukavemeti, prizmatik numuneleri üzerinde ya da basınç numuneler (silindir, küp) üzerinde yapılan deneylerde tespit edilir. Kalıplara katılan beton numuneyi bir gün sonunda kalıptan çıkarılır ve deney zamanına kadar 20 °C veya 21°C arasında olan suyun içerisinde muhafaza edilir.

Beton numunesinin üstünün yüzeyleri kalıpla temas etmediği için biraz olsun pürüzlü olur. Basınç deneylerinde bu istenmeyen pürüzler numunenin basınç altında gerilme yığılmasına numunelerin dayanımını tam ölçemememize neden olabilir. Bu deneyi daha sağlıklı yapabilmemiz için küp numunenin yan çevrilerek basınç uygulama yapılır. Silindirik şekilde olan numunelerde ise yan basınç uygulaması yapılamayacağı için yamamız gereken şey numunenin üst veya alt tarafını bir kalıba koyulur veya üste gelen pürüzlü kısmı düzgün bir şekilde tıraşlanır ve basınç deneyi uygulanır. Başlık kısmında kullanılan madde ise grafit kükürt tozlarının karışımlarıdır (Ali, 2021).

Prizmatik numunelerinin çekme dayanımı, doğrudan çekme ile yapılan deneylerle doğrudan belirlenebiliyorsa, bu deneyler çok zor olduğundan dolayı, eğilme ya da yarma deneyleri ile belirlenir.

Beton yapısı gereği basınç yüklerine karşı dayanıklılığı yüksek olan malzeme olmasına karşı çekme kuvvetine karşı yeteri kadar etki gösterememektedir.

Betonun bu sakıncasını ortadan kaldırmak için betona çeşitli şekil ve özelliklerde lifler eklenir. Bu lifler cam, plastik, çelik ve doğal malzemeler olabilir. Lifler farklı geometrilerde üretilebilmekte ve çelik liflerin mukavemeti karbon miktarına göre değişebilmektedir (Altun, 2002).

Çelik telin asıl amacı, çatlak yüzeyini köprüleyerek çatlakların başlamasını ve yayılmasını kontrol etmektir. Köprüleme tesirinin başarısı genellikle tel sıyrma mekanizmasına bağlı. Soyulma derecesi sadece tel ile çimento matrisi arasındaki bağın gücüne değil, aynı zamanda çelik telin kanca uzunluğu ve uzunluğu gibi telin özelliklerine de bağlıdır. Daha fazla sıyrılma mukavemeti için düz ipliklere göre mekanik olarak deforme olmuş iplikler tercih edilir. Lif içeriği arttıkça, lif türü ne olursa olsun lif kullanımı betonun işlenebilirliğini olumsuz etkiler (Altun F. Y., 2006).

ÇTDB çok çeşitli alanlarda kullanılmasına rağmen, endüstriyel zeminlerde, tünellerde ve şev kaplamalarında ve prefabrike elemanların imalatında geleneksel betonarme yerine tercih edilebilir. ÇTDB in geleneksel betona göre avantajı, esas olarak tokluğu ve sünekliği arttırmasıdır. Çelik telin beton içerisine gömülmesinin sağladığı diğer

faydalar ise; Etkili çatlama önleme, artırılmış dayanıklılık, korozyon olmaması ve azaltılmış işçilik.

Betonun işlenebilirliğini ve mekanik özelliklerini tahmin etmek ve çelik tel gibi katkı maddelerinin etkilerini belirlemek için muhtelif sayısal ve analitik yöntemler kullanılmaktadır. Beton yapılarda çelik liflerin çeşitliliği, mukavemeti ve özellikleri göz önüne alındığında, tüm bu faktörleri değerlendiren ampirik bir çalışma yapmak mümkün değildir. Bu nedenle modelleme gereklidir. Altun F.H.,2007,Çalışmasında elde edilmiş deneysel verilerini kullanarak ÇTDB in kırılma geometrilerinde yapay sinir ağı yöntemi ile modellemiştir. (Altun F. H., 2007).



2. ÇELİK TELLERDEN DONATILMIŞ BETONLAR

2.1. Genel Bilgilendirme

Betonun temel bileşenlerine su, çimento ve çelik tel donatı ile birlikte mineral veya kimyasal katkıları katılarak beton yüzeyinde oluşan çatlakları azaltmak için beton elde edilen betona çelik donatı lifli beton denir. Beton, çelik tel, geleneksel betonarme ve beton yapıların performansını artırmak için kullanılır. Bilindiği gibi sıradan beton kırılğan bir malzemedir ve esneklik göstermez. Çekme gerilmesine maruz kalan donatısız beton çatlaklara maruz kalır (Appa Rao, 2002).

ÇTDB yani betonarmeyi kerpiç yapılarda uygulanan kerpiç harca eklenen saman olarak düşünülebiliriz. Saman, kerpicing birbirine sıkı yapışarak yüzey çataklarını en aza indirdiği gibi, ÇTDB betonarme için kullandığımız çelik tel beton için aynı şeyi yapar (Arslan, 1999).

İnşa yaptığımız yapıların basınç dayanımının çok büyük bir kısmı beton tarafından karşılanırsa da çekme dayanımı konusuna yönelik araştırmalar devam etmektedir. Çekme mukavemetini karşılamak için donatı dediğimiz yapı çeliğini beton içerisine yerleştirerek betonarme yapıyı elde ederiz. Bu malzemeler bazen boyut olarak büyük olsa da bazen küçük malzeme ile donatılmaktadır. Betona eklediğimiz çelik tel nedeniyle yüzey çekme mukavemetinin sağlandığı durumlar olmuştur (Ashour, 2000).

Çelik tel, kırılğan betonun çekme deformasyonunu arttırır ve betonu yarı plastik hale getirir. Sonuç olarak, betonun çatlak direncini ve tokluğunu iyileştirir. Yapılmış çalışmalarda, çelik telin sadece betonda ilk çatlaklar oluşana kadar ve betonun basınç mukavemetini önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir. Öte yandan, betonun çatlama sonrası plastisitesini ve enerji yutma kapasitesini artırır, bu nedenle betona çelik lif konulmasındaki amaç taşıma gücünü artırmak, rötre çatlak ve çatlaklarının oluşumunu azaltmak, çatlamaı kontrol etmek ve engellenemeyen çekme kuvvetlerine karşı direnci sağlamaktır. Maksimum yüklemekten sonra çimento matrisinden gelen kuvvetlerden kaynaklanan uzun süreli aşınmayı önler (Azmat, 2018).

Çelik telin inceliği ve betonda kullanılan tel miktarı çelik tel donatılı betonların özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bu çalışmada, çelik telin dayanımının çelik tel donatılı betonların özelliklerine etkisi incelenmiştir (Bayramov, 2002).

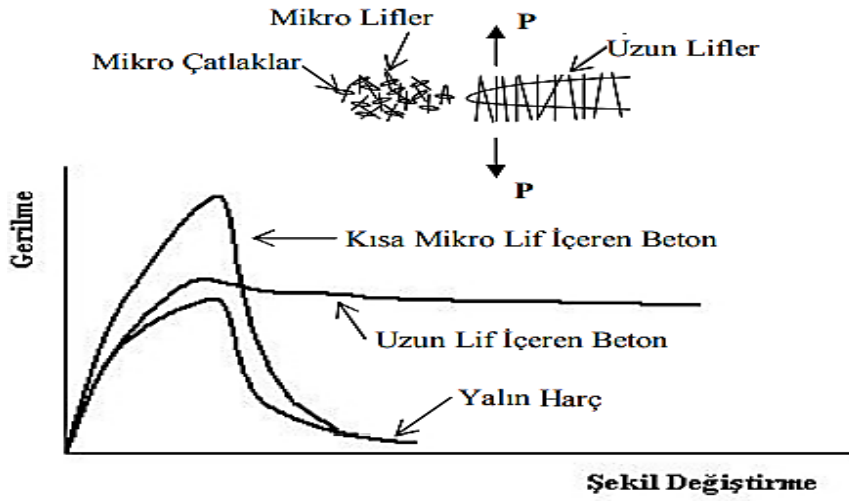
Yüzeydeki çekme basıncını absorbe etmek ve homojen dağılım sağlamak için kattığımız çelik telin dramix dediğimiz malzemeye yüzey çekme gerilmelerine cevap verecek şekilde çelik tel ekleyerek, eşit dağılmasını sağlayarak çatlamaya dayanıklı bir beton yüzey elde ediyoruz. Biz bu tip betonarmeye ÇTDB diyoruz. Betonun çekme için çelik tel (Dramix) kullanılabilir. Dramix bir markadır ve bugün üründen önde olan birçok marka gibi dramix ve drabeton gibi markalar da bu konuda betonarme üzerinden öne çıkmaktadır (Birol, 2016).

2.2. Çelik Tellerin Betonlarda Gösterdiği Mekanik Davranışı

Betonda süreksiz olarak dağıtılan çelik liflerin beton çatlamasını büyük ölçüde azaltabileceği, betonun deforme olabilirliğini, tokluğunu, darbe, yorulma direncini ve çekme dayanımını artırabileceği ve sünekliği yüksek beton elde edilmesini mümkün kıldığı söylenebilir (Cengiz Duran Atış, 2009).

Ayrıca, çelik lifli betonun kesme dayanımının geleneksel betondan önemli ölçüde daha yüksek olduğu bilinmektedir. Çekme dayanımına ulaşılan kadar çelik tel, çekme ve basınç yüklerinden dolayı beton matriste birçok oranda çatlağının oluşmasını engelleyecektir. Benzer şekilde, çimento matrisi çelik telleri bir arada tutar ve gerilimi teller aracılığıyla iletir. Sonuç olarak, çelik telden daha düşük birim uzamaya sahip olan çimento hamurunda oluşabilecek kılcal çatlakların önüne geçilebilir. Çelik lif içeren beton, taşıma kapasitesi elde edilmiş olsa bile yük taşıma özelliği gösterir (Chang, 1995). Bu, ilk kırılma yükünden sonra oldukça sünek olduğu anlamına gelir. Bu, daha yüksek bir kırılma enerjisi ile sonuçlanır. Yapılan çalışmalarda, betonun belirtilen özelliklerini en çok düz tel ve dairesel kesitli kancaların iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Beton karışımlarında kullanılan bu tür tellerin incelik yüzdesi 50 ile 100 arasında, katkı seviyeleri ise hacimce yüzde 0,5 ile 2,5 arasında değişmektedir. Birleştirme oranı arttıkça karışımdaki çelik tellerin toplanarak üniform bir dağılım sergilemediği ve basınç mukavemetinin de normal betonun basınç mukavemetine göre daha düşük olduğu görülmüştür (Otter, 1988).

Basınç mukavemetindeki bu düşüşün, zayıf kohezyon bağı olarak ve betonda oluşan zayıf alanlar ve boşluklardan kaynaklandığı söylenebilir. Çelik tel beton özelliğine etkileyen en önemli faktör; incelik oranı ve kullanılan tellerin miktarıdır. Ayrıca karışıma eklenen çelik telin üniform dağılımı ve karışım sonrasında bu dağılımın korunması, çelik telin beton özelliklerine getirdiği iyileştirmeleri doğrudan etkilemektedir (Paul Z, 1996).

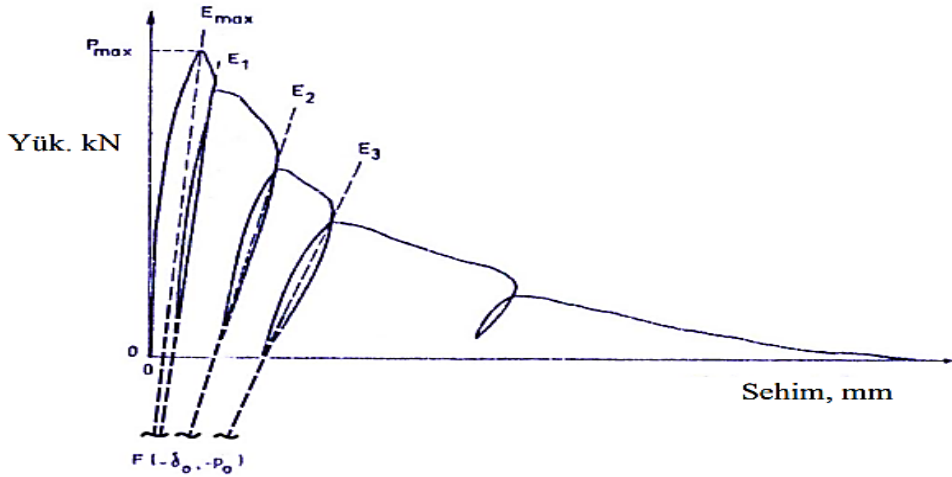


Şekil 2.1. Tel mukavemetinin çatlak köprüleme etkisi

2.3. Çelik Tellerin Betonda Yük Altındaki Davranışı

Şekil 2.1’de çelik telle takviye edilmiş olan betona ait yük-sehim eğri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, ÇDTB yüklendiğinde, yük-sehim eğrisi orijinden A noktasına kadar neredeyse doğrusaldır. A noktadan sonra, eğri doğrusallıktan önemli ölçüde sapar ve maksimum yükün desteklendiği B noktasına ulaşır A noktası veya bu noktaya etki eden yüke "ilk çatlak yükü", "elastik sınır" veya "oransal sınır" denir. Gerilim B'ye ulaştığı andaki nihai dayanım olarak adlandırılır (Peng, 2006). B noktasından sonraki ilk çatlak direnci, nihai dayanım ve yük azaltma oranı büyük ölçüde betonda kullanılan çelik liflerin miktarına bunların inceliğine, beton içindeki yönelimlerine ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Çelik tel, yüksek çekme mukavemeti nedeniyle yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptir ve yük altında sünek davranış sergiler. Bu nedenle, betonun dayanabileceği maksimum yükten sonra, belirli bir yer değiştirme değerine kadar beton maksimum yükün üzerinde daha fazla dayanacaktır (Shi, 2020).

Çelik teller betonda, ard arda yükleme ve boşaltma atlındaki davranışı göz önüne alındığında, yük-sehim diyagramına bakıldığında, yükleme ve boşaltma çevriminde beton rijitliğinde bir azalma gözlemleriz. Boşaltma maksimum yüke ulaştıktan sonra gerçekleştirilir. Bu azalma, yükleme boşaltma çevrimlerindeki elastisite modülü değerlerindeki düşüş ile gözlenebilmektedir (TS 10513, 1992). Beton karışımı içerisindeki çelik lif miktarı artışı bu malzemenin rijitliğindeki azalmayı da etkilemektedir. Şekil 2.2, Taşdemir ve diğerlerinin çalışmasında çelik lifsiz betonun eğilme testinde tekrarlanan yük değişimleri için elde edilen yük-sehim eğrilerini göstermektedir. Şekilden, tekrarlanan yükleme döngülerinden elde edilen Young modülü değerinin kademeli olarak azaldığı görülebilir. Bu çalışmalar, beton rijitliğindeki bu azalmanın en önemli noktası olduğunu göstermiş ve betonun sünekliği arttıkça odak noktasının orijinden uzaklaştığını bulmuştur. Betonun, lif ile desteklenerek süneklik davranış sergilemesi sağlanır. Bu nedenle, bir süneklik ölçüsü olan ağırlık merkezi değerinin bu betonların orijinininden hareket ettiği söylenebilir. Araştırmalar, bu odağın ya orijinden uzak olduğunu ya da çelik tel miktarının artmasıyla ortadan kalktığını göstermiştir (örnek olarak SIFCON'dan bahsedilebilir). Bu çalışmanın temel amacı, beton rijitliğindeki bu düşüşün çelik lif miktarından nasıl etkilendiğini araştırmaktır.



Şekil 2.2. Bir betonun içinde Çelik tel olmadan sürekli yükler çevrimleri ile elde olan yük-sehim eğrisinin çizimi

2.4. Çelik Tellerin İçeriği, Narinliği ve Dağılımının Mekanik Davranışa Etkisi

Çelik liflerin boyutu, malzeme yapısı ve inceliği, betonun işlenebilirliği ve performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. En boy oranı parametresi lifleri tanımlayan en önemli parametrelerden bir tanesidir. Çelik telin uzunluğu telin çapına (L/d) bölünerek en boy oranı parametresi bulunur. Soroushian ve Bayasi yaptıkları çalışmada, karışımdaki liflerin özellikle incelik oranı yüksek olduğunda betonun işlenebilirliğini düşürdüğünü gözlemlemişlerdir (TS EN 12350-3, 2010). Üretim için kullanılmakta olan çelik tellerin yüzdesi optimum değeri geçmemelidir. Yüksek oranda çelik tel, karışım içinde topaklanan çelik tel ile karıştırma, yerleştirme ve üretim sonrası çatlama sorunlarına yol açar. Bu agregalar, matris içinde zayıf alanlar oluşturur. Karışıma kaba agrega eklenmemesi, çelik tellerin optimum en boy oranına sahip olması, kuru karışıma çelik teller eklenmesi ve süperakışkanlaştırıcılar kullanıldığı durumda telin matris içindeki üniform dağılımı elde edilebilir (TS EN 12350-6, 2019).

Shah ve Rangan yükleme, en-boy oranı ve çelik lif oryantasyonu gibi etkilerin eğilme mukavemetinin ve betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelediler ve eğilme mukavemetinin artan çelik miktarlarıyla doğru orantılı olarak yükseldiğini buldular. Telin çelik tele en-boy oranı ve çatlamadan sonra tellerin çatlak etkisine karşı oldukça dayanıklı olduğunu görmüşlerdir (TS EN 12390-6, 2010).

Mobasher ise çelik lif destekli betonda tipik olarak toplam karışım hacminin %1-2'si oranında kullanılan tellerin, pik sonrasında daha aktif hale geldiğini ve çelik tel kullanıldığında karışım içinde eşit olarak dağıldığını bulmuştur. Karışımda çelik tel oranı yüzde 12 -13 olup, bunun tellerde mikro çatlak oluşumunu engellediği, matrisin kopma mukavemetini ve sünekliğini arttırdığı gözlenmiştir. Yoğun tel kullanımında ortaya çıkan karışım ve yerleşim problemlerinin çeşitli imalat teknikleri uygulandığı zaman ortadan kaldırılabilceğini bulmuştur (TS 3114, 1990).

2.5. Çelik Tel Takviyeli Betonların Kullanım Alanları

Çelik lif içeren beton, sıradan betona göre bariz avantajları olduğu için birçok farklı şekilde kullanılabilir. Bu uygulama alanları aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

- Püskürtme beton kaplamasının tüneller için kullanımı: Çekme donatısı kullanılmadan da dayanımı yüksek beton elde edilebilir. Kaplama et kalınlığı pürüzsüz ve mat beton kaplamalara göre çok daha az olabilir. Kırılmaya karşı direnç gösteren yüksek enerjisi ve emme kapasitesi sayesinde daha fazla süneklik sunar.
- Yolların kaplamaları: Karayolları ve havaalanları gibi beton yolların kaplamalarında sürekli kullanım durumlarında oluşan aşınma mukavemeti ve çekme mukavemetinin yüksek olmasına karşı, dayanım ve dayanıklılık bakımından yüksek özellikli beton elde edilir. Başka bir deyişle tabaka kalınlığının azalmasına neden olur (Ünal, 1999).
- Endüstriyel yapılarda: Dayanıklılığı ve çarpma dayanıklılığı yüksek olan endüstriyel yapıların inşa edilmesine imkân tanır. Ayrıca yük taşıma kapasitelerinin artması, çatlak kontrolünün sağlanması, hareketli ve hızlı yüklemelere karşı yüksek dayanım göstermesi değerlendirildiğinde endüstri yapılarının zeminlerinde kullanılması kaçınılmaz hale gelir.
- Su yapılarında: Kanal, çeşitli havuzlar, savaklar vb. hidrofor sistemli yapıların kirişlerinin yerine kullanılır. Ayrıca aşınma direncinin yüksek olması yönünden kavitasyon hasarlarına karşı kaplama olarak da kullanılabilir.
- İstinat duvarı inşasında ve şevlerin stabilizasyonunda: Yüksek mukavemet ve dayanıklılığa sahip olduğundan dolayı çeşitli kaya ve toprak zeminlerin şev stabilizasyonu veya istinat duvarı yapımı için kullanılan bir yöntemdir (Vairagade, 2012).
- Kabuk özelliğindeki yapıların inşasında: Kesit (et) kalınlıklarının azaltılmasına imkan verir, dolayısıyla ince kabuk yapılarda, kubbelerde ve mimari açıdan kalınlığı belirli bir kalınlığa kadar inceltilebilen yapı elemanlarında kullanılmaktadır.
- Deprem yüklerine dayanıklı yapı çeşitlerinde: Yapı elemanlarının sünek olmasının istendiği yapılarda kullanılır.

2.6. Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller

Betonun güçsüz özelliklerini iyileştirmek için kullanılan çelik tel tanımı, tel uzunluğunun eşdeğer tel çapına bölünmesi ile ulaşılan uzunluk/çap oranı olarak kabul edilir. Bu oran benzer şekilde telin inceliğini de gösterir. Yuvarlak çelik teller

genellikle betonu güçlendirmek için kullanılır, ancak dikdörtgen çelik teller de mevcuttur. 30-60 mm uzunluğunda ve 0,5-1,0 mm çapındadırlar (Van Gaysel, 1999). Çelik teller çekme dayanımından çekme dayanımına kadar farklı tiplerde yükler altında kırılmadan matrinden sıyrılabilir ancak en az 345 Nmm² çekme dayanımı hedeflenir. Kanca uçlu çelik telin çekme mukavemeti düz olandan daha yüksektir. Çelik tel genellikle düşük karbonlu çelikten yapılır. Genelde;

1. Soğuk iklimlerde çekilen teli keserek
2. Çelik levhayı keserek,
3. Erimiş çeliği potadan çıkarılması ile

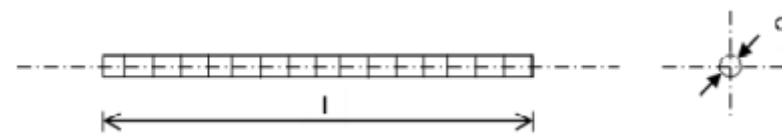
Üç farklı şekilde elde edilir. TS 10153'e göre çelik tel kaliteleri ve çeşitleri aşağıdaki gibidir:

Çelik tel sınıfları ve tipleri

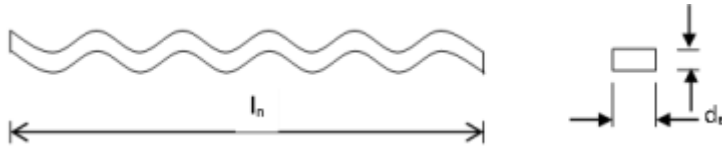
- **A Sınıfı:** Pürüzsüz bir yüzeye sahip yassı bir tel
- **B Sınıfı:** Tüm iplikçik deforme oldu
 - Tip 1: Çentikli bir tel
 - Tip 2: Uzunluğu boyunca bükülmüş, deforme olan teller
 - Tip 3: Ay dalgası telleri
- **C Sınıfı:** Kanca uçlu tel
 - Tip 1: Her iki ucu kancalı tel
 - Tip 2: Teli bir ucundan asın



Şekil 2.3. Yüzeyi düz, pürüzsüz tel (TS 10513, 1992)



a) Yüzeyinde çıkıntılar ve girintiler bulunan tel

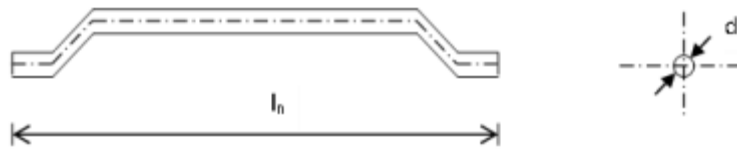


b) Uzunluğunca kıvrımlı olan teller

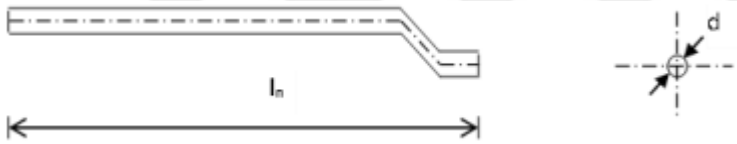


c) Ay şekili dalgalı teller

Şekil 2.4. Uzunluğunca deforme yüzeyli teller (TS 10513, 1992)



a) Kancalı iki ucu olan tel



b) Kancalı bir ucu olan tel

Şekil 2.5. Kancalı bir ucu veya iki ucu olan tel (TS 10513, 1992)

Özellikle çekme ve kesme mukavemetine karşı hareket eden çelik tellerin betona yapışması, çelik tel takviyeli betonun işlevi üzerinde olumlu veya olumsuz etkilere sahiptir. Bükülmüş veya dalgalandırılmış telin gerilim altında ana malzemeden ayrışması düz tele göre daha zordur. Çelik telin yüksek çekme mukavemeti nedeniyle kırılması veya kopması çok zordur (Williamson, 1974). Ancak bu tellerin yükte belirli bir seviyedeki gerilmeden sonra matristen ayrılması betonarme başarımını kötü yönde etkileyen en önemli faktördür. Bu olgu harç evresinin (matris) yapısı ile ilgilidir ve kullanılan tellerin geometrisi ile de yakından ilişkilidir. Genel çelik tel betonarme uygulamalarında dışı kaplanmamış çelik tel kullanılmaktadır. Bu tellerin tek dezavantajı, tellerin açıkta kalması ve paslanarak, özellikle beton titreşmiyorsa yüzeyde pas lekelerine neden olmasıdır. Galvanizli tel, aşırı korozyonun oluşabileceği ortamlarda ve estetik kaygıların yaygın olduğu kaplamalarda ve prekast beton yapı elemanlarında daha iyi bir seçimdir (Wu, 2021). Isıya dirençli ve su ile direkt temas halinde olan betonlar için paslanmaz çelik tel tavsiye edilir. Bu teller diğerleriyle aynı teknik özelliklere sahiptir, sadece

oksitlenme ile paslanmaya karşı daha dirençlidirler. Kolay taşıma ve kullanım için 10 veya 30 tel birbirine yapıştırılmıştır. Bu yapıştırıcı suda çözünür veya mekanik etki altında kırılır. Yapıştırıcı tipine, uygulamaya ve karışıma bağlı olarak iki tür çözünme süresi; P tipi: Birkaç saniye, C tipi: 30 ila 60 saniye. ASTM A 820/85 ve TS 10513/93 (Beton Donatıda Kullanılan Çelik Tel), beton donatısında kullanılan çelik telin sınıflandırılması, özellikleri, test edilmesi ve etiketlenmesi için iki önemli standarttır (Yavuz, 2016).

TS 10513/93 ve ASTM A 820/85 standartları incelendiği zaman, çelik tel literatüründe bildirilen veya kullanılan verilerin bahsedilen standartlarda yer almadığı görülmektedir. Ancak çelik teli tanımlayan ana parametrelerin bu standartlarda tanımlandığını görüyoruz. TS 10513/93 tel özellikleri ile ilgili iki önemli parametreye sahiptir. İlk koşul, tüm tellerin en az 310 Nmm² (3100 kgf/cm²) çekme dayanımına sahip olmasıdır. Diğeri ise iç çapı yaklaşık 3,18 mm olan ve 16°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yapılan bir tel bükme testinde, testte kullanılan telin kırılmadan 90° bükülebilirlik gösterebilmesidir. Bu özellikler betonda kullanılan telin daha sünek ve çekme mukavemeti açısından daha güçlü olmasını sağlar. Çelik liflerin sünek davranışı da beton karıştırma ve dökme için gerekli bir değişkendir (Yıldırım, 1994).

2.7. Çelik Tellerin Beton İçerisindeki Davranışı

Çelik telin işlevi, betondaki çeliğin (inşaat demiri) işlevi ile bir tutulmamalıdır. Bir dereceye kadar, inşaat demiri ve çelik tel birçok yerde aynı şekilde çalışır. Ancak dikkat edilmesi gereken en önemli farkları, betondaki işlevleri ve çatlakların nasıl ve ne zaman kontrol edildiğidir (Taşdemir, 1999).

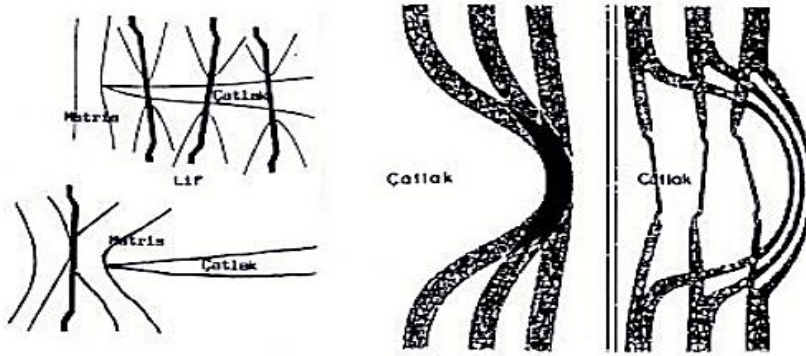
Statik hesaplarda bağdaşık bir malzeme olan çelik tel, eğilme momenti sönümleyici çubuk veya hasır donatı olarak değerlendirilmemelidir. Çelik lifler, betonun yapısını farklılaştıran ve ona plastik davranış kazandıran malzemeler olarak görülebilir. Çelik tel takviyeli betonun özellikleri, artan esneklik ve enerji tutma kapasitesidir. Çelik liflerin betondaki davranışı, özellikle kritik yükler için betondaki artık gerilme, çökme değerine ulaştığında daha iyi açıklanabilir.

Çelik tel, ilk çatlak başlangıcında çatlak kenarı gerilimlerini uca ve katı bölgeye aktararak işini yapar. Ek olarak, tokluk, çatlama mukavemeti, kavitasyon erozyon direnci, yorulma mukavemeti ve darbe direnci gibi özellikler, çelik

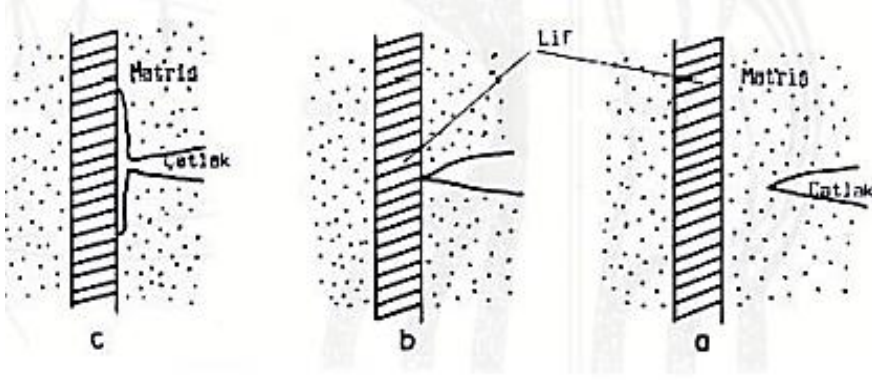
elyafların dahil edilmesiyle büyük ölçüde geliştirilir ve çelik tel malzemesi çelik elyaflarına karşı çok daha hassastır. İşlevsel olarak farklı davranır ve matris özelliklerini değiştirir.

2.8. Çelik Tellerin Betona Kazandırdığı Nitelikler

Çelik teller ile taşıma gücü artırılmış beton. Özellikle kavitasyon erozyon direnci, darbe direnci, yeni başlayan çatlama karşı direnç, çekme mukavemeti, yorulma mukavemeti, deforme olabilirlik ve tokluk bakımından elyafsız betondan önemli ölçüde normalden daha iyi performans sergiler. Bu beton özelliklerinin performans artışı, betondaki tel davranışı, betonun bu özelliklere tepkisi, betonun ilk çatlaması ve son yükte ortaya çıkan göçme olayı örneği verilebilir. Tel donatılı betonda, farklı gerilmeler veya farklı kaynaklar tarafından oluşturulan her çatlak, çatlağın ucuna yakın tellerle takviye edilir. Betonda tellerin yokluğunda, betona gerilim uygulandığında oluşan mikro çatlaklar, gerilim arttıkça farklı yönlerde yayılarak betonun belirli bir gerilim düzeyinde çökmesine neden olur (Taşdemir, 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).



Şekil 2.6. Çelik lifli betonda çatlak uçları tellerle güçlendirilerek çatlak ilerlemesi durdurulmuştur



Şekil 2.7. Çelik tel donatılı betonda liflerden kaynaklanan gerilme dağılımı

Beton kırılma mekaniği, fiber takviyeli beton kompozitler için farklıdır. Bu kompozitlerde, ilk çatlak oluşumundan sonra gerilim çimento-hamur oluşumundan çelik tele aktarılır. Sonuç olarak çelik tel, betonun miktarına ve geometrik özelliklerine göre bu gerilmelerin bir kısmını kendisine aktarırken bir kısmını da matrisin katı bölgelerine aktararak dağıtır. Fibersiz betonda bir ilk çatlak (artan gerilimle) ilerletmek için gereken enerji küçüktür. Tipik olarak böyle bir çatlak başlatmak için gereken enerjinin yaklaşık yarısı kadardır. Beton çelik lif içeriyorsa, ilk mikro çatlakları oluşturan enerji, çelik lifler aracılığıyla çatlaklara bitişik katı çimento hamuru fazındaki alanlara aktarılır. Bu nedenle, çatlakın çoğalması (veya büyümesi) için daha fazla enerji gerekir. Böyle bir enerji varsa, çoğu çelik tel ile taşınır ve bu taşıma, tel liflerin çimento hamuru matrisinden ayrılması için gereken enerji seviyesine ulaşana kadar devam eder. Bu enerjiyi sağlamak büyük bir güç gerektirir. Nihai yüke (beton kırılması) ulaşıldıktan sonra bile tel, beton parçalarını bir arada tutmaya devam eder ve nihai yükten biraz daha fazlasını taşır (Taşdemir M. v., 2002).

2.9. Çelik Tel Takviyeli Betonun Tasarımı

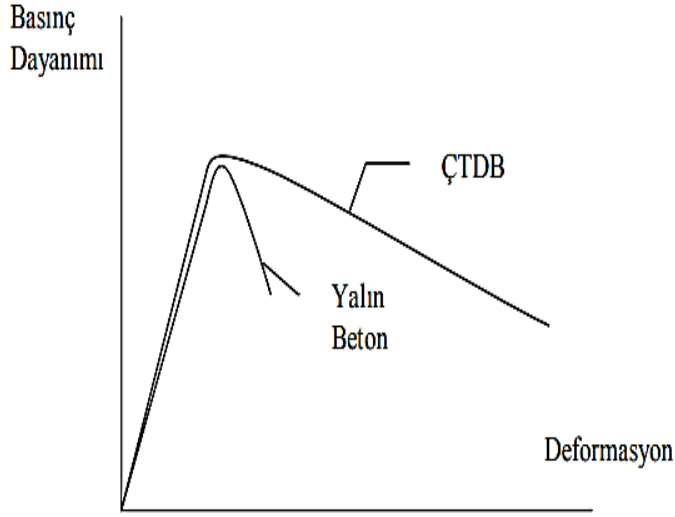
Çelik tel takviyeli betonların üretilmesi için öncesinde düşünülmesi gereken etkenler, betonun nerede kullanılacağı, yapının esas taşıyıcı elemanı mı yoksa bir parçası mı olacağı, yapının herhangi bir yerinde kullanılması halinde hangi yükler altında kalacağıdır. Sonrasında ise çelik tel, çimento, agrega vs. gibi uygun malzemeler belirlenerek tedarik edilmesi gerekir. Bu şekilde üretilen betonun normal bir beton üretimi olmadığı, malzemenin kullanılırken dikkatli olunması gerektiği koşulları bilinerek, üretim öncesinde gereken önemli koşulların açıkça belirtilmesi gerekmektedir ki üretilecek olan betondan beklenen yüksek dayanım elde edilebilsin. Çelik lifli betonların geleneksel kullanım alanları döşeme, kiriş ve bunlara benzer yapı elemanlarında kullanılması için

basit tasarımlar geliştirilmiştir. Çelik tel takviyeli beton üretimi ile betonun farklı yüklerin etki edebileceği yapılarda kullanımı, lifsiz beton üretiminde olduğu gibi yüksek miktarda mühendislik bilgisi ve deneyimine ihtiyaç duyar. Gerekliliklerden bir diğeri ise tasarımı yapan kişinin hem lifli betonun özelliklerini hem de kullanılacak olan yapının özellikleri ile birlikte yapıda betona gelen yüklerin iyi bilinmesinin gerekmesidir. Yani yapıya gelen statik, dinamik kuvvetlerin diğeri bir deyişle tokluk, çekme, kesme kuvvetlerinin hesaplanmasına, su yapılarında ise hidrolik hareketlerinin tahmini doğrultusunda işlem yapılmasına dayanır (Aktaş, 2007). Lifsiz betonlarda gerçekleşen tokluk, yorulma ve darbe benzeri dayanımlar, lifsiz betonlarda basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak görülmemelidir. Çelik tel takviyeli betonun özellikleri içerisinde kullanılan malzeme özellikleri ile değerlendirilmesi gerekir ve üretilen beton nasıl bir etkiye maruz kalacaksa ona göre tasarım kriterleri (çelik tel seçimi, uzunluk/çap oranı, geometrik şekli, çimento miktarı, agrega, vs.) ortaya çıkarılmalıdır. Lifli betonun bir alt kısımdaki betona bağlanması, çelik liflerle takviye edilmiş betonda ve özellikle döşeme benzeri yapı elemanlarında üzerinde durulması gereken bir konudur. Örneğin barajlardaki boşaltma yapılarında kullanılan döşemelerde önce, alt tabakada olan döşeme donatısında kullanılan ankraj çubukları kullanılmalı, sonrasında ise üst tabakaya lifli beton yerleştirilmelidir ki kullanılan bağlantı demirleri yani ankraj çubukları, üzerinde duran taban malzemesi ve lifli beton arasındaki kaldırma basıncını karşılayabilsin. Böylece lifli beton yüzeyine gelmesi ön görülen negatif basıncın etkisini, alt döşemeye dağıtabilecek özellikte bir sistem elde edilmiş olur (Altun F. Y., 2006). Yine bu sayede çelik tel takviyeli betonun aktardığı kesme kuvvetlerini alt döşemenin karşılayabilecek nitelikte olması sağlanmış olur. Kesme kuvvetlerinin karşılanamaması halinde iki farklı beton arasındaki gerilme aktarımı esnasında beton davranışı istenilen yönden farklı bir yöne doğru gelişir ve sonuçta alt döşeme tahrip olarak yapının durabilitesini etkiler. Yük aktarımı için başka bir ankraj metodu ise döşemeler arasına epoksi esaslı veya benzeri bir bağlayıcı maddesi kullanmaktır. Fakat betondan farklı bir malzemenin bu iki tabaka arasında kullanılması sonucunda, ortada kalan üçüncü tabakanın uyumsuzluğu zayıf bir tabaka olarak karşımıza çıkacaktır. Bu noktada ise tabakalar arasında basınç düşürücü boşluklar kullanılması zayıf malzemenin kusurunu hemen hemen kapatabilmektedir.

2.10. Çelik Tel Donatılı Betonların Özellikler

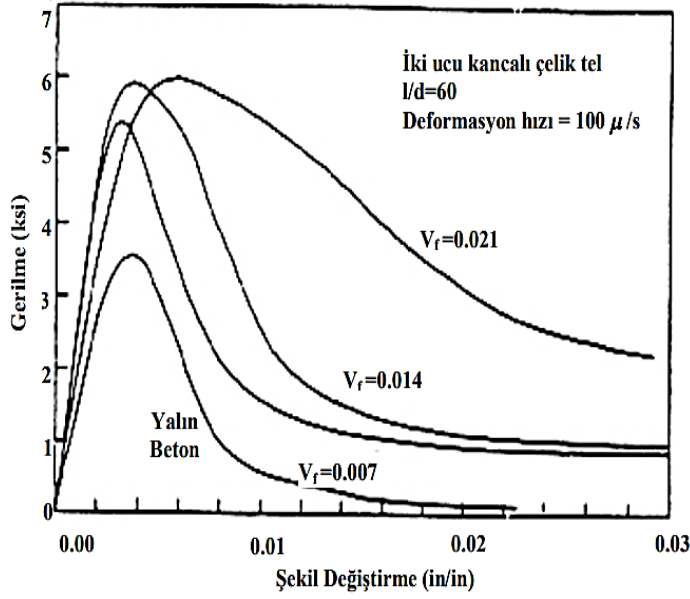
2.10.1. Basınç Dayanımı

Çelik telin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi eğilme ve çekme dayanımı ile ilgili daha az. ACI komitesi 544'e göre, betonun çelik lif içeriği %1.5 olan Betonun basınç dayanımında %0-%15 arasında artış olabileceği belirtilmiştir. Çelik tel donatılı betonun basınç dayanımını etkileyen en önemli faktörler çelik telin şekli, boyutu, narinliği ve matrisin kuvvetidir. ÇTDB'larda yüksek dayanım elde etmek istersek betona kimyasal katkı maddeler kullanarak ve silis dumanının birlikte kullandığımızda iyi bir sonuca varırız yani iyi bir faydası vardır. Çelik tel donatılı betonun ve yalın betonun tipik gerilme ve şekil değiştirme grafiği Şekil 2.8' de gösterilmektedir (Abbass, 2018).

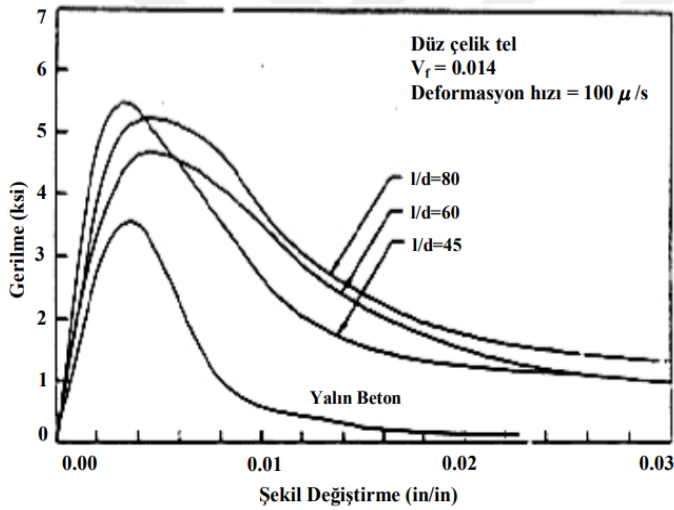


Şekil 2.8. Çelik tel donatılı betonun ve yalın betonun tipik gerilme ve şekil değiştirme grafiği

Çelik tel, yüksek dayanımlı betonun dik bir şekilde olan gerilme -şekil değiştirme grafiğinin azalan kısmında kabartılı bir şekilde değişir. Hatta şekil değiştirme yumuşama davranışını basınç tokluğu dayanıklılığı artırır ve keskin halde uzaklaştırır. Basınç dayanımındaki bu artış, yaygın olarak kullanılan çelik telin miktarına ve inceliğine göre değişir. Kullanılacak çelik tellerin miktarları ve inceliği arttıkça basınç dayanımı da artmaktadır. Çelik telin içeriği ve incelikleri çelik tel donatılı betonun gerilim-uzama davranışı üzerindeki etkisi Şekil 2.9. ve 2.10'da gösterilmiştir. Karışımdaki lif kütlesi arttıkça matris fazının homojenliği tokluk basınç altında artmasına rağmen bozulmalar ve kusurlar artar (Taşdemir M. İ., 2002).



Şekil 2.9. Çelik telin içeriğinin gerilme-uzama ilişkisi



Şekil 2.10. Çelik telin içeriğinin gerilme-uzama ilişkisi

2.10.2. Elastik Modülü

Bilmekte olduğumuz, çelik ve cam gibi saf olan malzemenin elastik modülü deneylerle belirlenir ve uygulamalarda kullanıldığını bilinmektedir. Çelik tel donatılı betonlar gibi çeşitli malzemeden elde edilen kompozit malzemeye göre daha kolaydır. Bunun sebebi kompozit malzemenin elastisite modülüne etkileyen malzeme özeliğinden farklı bir parametrelerdir.

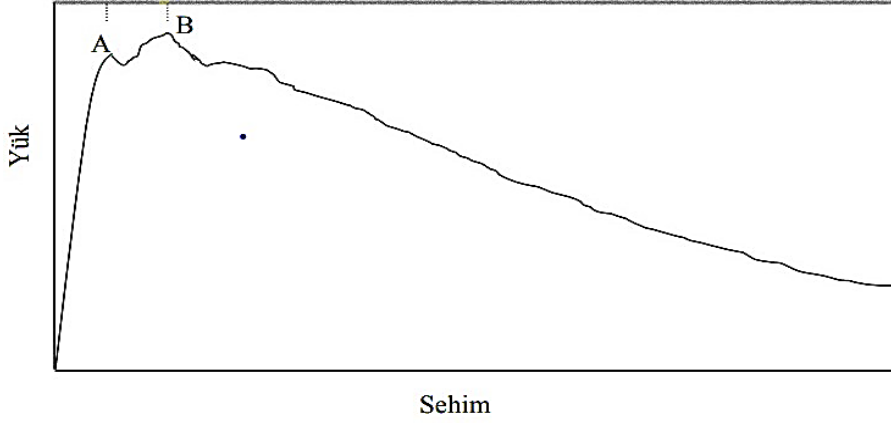
Birçok model, kompozit malzemelerin elastik modülünü mevcuttur. İki malzemeli kompozit için verilen en kolay model Kompozitte bulunan malzemenin hacim oranı ve malzemenin elastisite modüllerine bağlı model tabanlı örüntü belirlemeyi içeren üst sınır ve alt sınır modelleridir. Çelik takviyeli kompozitler için çelik telin yönü, dağılımı, sürekliliği ve inceliği Parametre içeren modeller geliştirildi. İki malzemedan (beton ve çelik teller) söz konusu çelik tel donatılı betonların elastik modülünün belirlenmesi için gerçekleştirilmiştir ve en kolay modeller üst sınır ve alt sınır ya da ikisinin aritmetik kombinasyonu olan çözümlerdir (Van Gaysel, 1999).

Çalışmalarda, çelik lif esaslı betonun elastik modülleri genellikle normaldir ve betonun elastik modülünden daha yüksek olduğu iddia edilmektedir. Ayrıca, çelik tel donatılı betonun elastik modülü çelik telin incelik ve miktarının oranı, malzemenin elastisite modülü, tel Matristeki konumun yanı sıra akışların sürekliliği ve süreksizliği, Çelik tel matris ara yüzündeki yapışma özelliklerine bağlıdır (Acun, 2000).

2.10.3. Eğilme Mukavemeti

Çelik tel, eğilme ve eğilme mukavemeti nedeniyle betona göre en iyi gelişmeyi sunar. Çelik lif donatılı beton, yüksek eğilme rijitine sahiptir. Ve servis yükü altında daha az çatlak genişine sahiptir. Çelik tel kullanımı ile, eğilme mukavemetindeki gelişme, yaygın olarak kullanılan inşaat demirlerinden daha iyidir. Bu, gösterdiği iyileştirme potansiyeli göz önüne alındığında tamamen yetersizdir (Chang, 1995).

Çelik tel takviyeli betonun eğilme davranışını ve dayanımını birçok parametre mevcuttur. Bunlardan; çelik tel tipi ve şekli, tel uzunluğu, inceliği, tel kütlesi, Matris içindeki yönelimi ve matrise yapışması olarak sıralanabilir. Ayrıca su/çimento oranı, hava içeriği ve yoğunluğu nedeniyle işlenebilirliği parametreler de etkilenir. Nihai eğilme mukavemeti, lifin uzunlamasına yapışma hacmine bağlıdır. Tellerin özellikleri ve çekme mukavemeti. Nihai eğilme mukavemeti, bu parametrelerin ilk çatlağa katkısına bağlıdır. Büyüklüğünden daha büyük veya daha küçük olabilir. Şekil 2.11 kirişin testlerinden elde edilen tipik yük-gerinim eğrileri verilmiştir. Eğilme deneylerinden elde edilmiş olan yük - sehîm eğrisi.



Şekil 2.11. Çelik Tel Donatılı Betonların kirişler için yük-sehim grafiği

2.10.4. Yarmalarda Çekme Mukavemeti

Çelik tel donatılı betonun yarmalarda çekme mukavemeti üstünde yapılan araştırmalar. Bir eksenli eğilme ve basınç mukavemetleri için elde edilenden çekme mukavemetinden daha yüksektir. Çelik tel donatılı betonların bir eksenli basınç, çekme ve eğilme mukavemetlerini etkileyen tüm parametreler; Çelik tel yoğunluğu, inceliği ve tel matris özellikleri de çekme mukavemetini etkiler. İlaveten her iki ucu da uzunluğu boyunca tırtıklı ve kancalı telin yarmalarda çekme mukavemetinde en iyi gelişmeyi sağlar (Altun F. Ö., 2002).

2.10.5. Kırılma Enerjisi

Birim alanda çatlamak için istenilen enerji miktarı malzemelerinin kırılmasına neden olur. Çelik telin betondaki ana görevlerinden biri de malzemeyi karmak için istenilen enerjiyi artırır. Kırılma enerjisinin, yük-yer değiştirme ve yük- CAAD eğrilerin alt kısımlarında kalan alan kullanılarak farklı yöntemlerle hesaplanabilir (Yavuz, 2016).

Son araştırmalar, Çelik tel donatılı betonların kırılma enerjisinin telin inceliği arttıkça artar, üstelik her iki ucu düz teller kancalı tellere göre daha düşüktür. Kabuk dolgu maddesine sahip olduğuna inanılmaktadır. Bu çalışmada, Çekme kuvvetinin kırılma enerjisinin üzerindeki etkisi incelenmiştir (TS EN 12350-6, 2019).

2.10.6. Tokluğu

Çelik teller güçlendirilmiş betonun eğilme ve eğilme tokluğu onu betondan ayıran en belirgin iki özelliğidir. Tokluk, Çelik tel donatılı betonlarının sünekliği kazanması ve enerjiyi emme yeteneğinin bir ölçüsüdür. ÇTDB'ların toklukları büyük açıda çatlağın yerine, kullanılan çelik tellerin özeliğine, hacmine, kalıptaki oryantasyona ve kalıptan

sıyrılan telin direncine bağlıdır. Çelik tel donatılı betonların eğilme dayanımını belirlemek için test yöntemi ve Spesifikasyonlar var. Çelik tel donatılı beton kirişleri için en yaygın olarak kullanılan ASTM' dir. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS), JSCE (JAPAN SOCIETY CIVIL ENGINEERING) ve bunlar, RILEM tarafından test yöntemleridir.

Tokluk değeri, yük gerinim eğrisinin altındaki kalan alanı hesaplayarak elde edilir. Çelik tel donatılı betonların tokluğu enerjiyi emme yeteneğe sahiptir. Çelik tel donatılı betonların tokluğu genellikle üçte birdir veya orta nokta (dört nokta ya da üç nokta eğilme testi). Çentikli ya da çentiksiz prizmatik kiriş numunelerinde dört yönlü bükme veya bükme gevşek montaj kirişi deneylerinden elde edilen yük gerinim eğrilerine bağlıdır. Kirişin numuneleri en yaygın kullanılan dayanıklılık ölçümleri boyutsuz ve enerji esaslı ölçüsüz olarak denilen tokluk veya dayanıklılık indeksleridir. Bu Heneger göstergelerinin uygulamaları tarafından yürütülen çalışmalar temel alınarak geliştirilen ACI (Amerikan Enstitüsü) tokluk indeksi ile başlanır. Bu tanımda, mukavemet derecesi güçlendirilmiş çelik tel ile betonun yük eğrisi altında belirli bir sapmaya kadar olan alanına "ilk göçme" denir. "eğrinin altında kalan alanın yüke oranı" olarak ifade edilir (Ali, 2021).

2.10.7. Yorulma ve Darbe Dayanımı

Çelik tel, betonu çatlamaya karşı koruyan yüksek çekme dayanımı ve süneklik sağlar. Direnci ve hasar seviyelerini sınırlama yeteneğini önemli ölçüde artırır. Üstelik servis yükü altında, matriste var olan veya oluşan Çatlakların büyümesine ve yayılmasına karşı köprü görevi görür. Betonun darbe ve yorulma direncini büyük ölçüde artırır. Sonuç olarak, beton darbe ve yorulma altında hasar görür. Çelik telin matristeki çatlakları köprüleme üzerindeki etkisi ve tekrarlanan stres altında çatlama sonrası özellikleri sayesinde yüksek süneklik elde edilir. Çelik tel donatılı beton, normal betona göre çökmeye karşı daha fazla dirence sahiptir. Betonun darbe direnci, çelik tel kullanımına göre 2 ila 20 kat daha fazladır. Düşük lif içeriğinde bile 1,25 ila 2 kat arttı ve yorulma mukavemeti arttığı bulundu. Darbe ve yorulma direncindeki bu gelişmeler, özellikle dinamik yüklere maruz kalan havaalanları, otoyollar ve endüstriyel zeminler için beton kaplama Spesifik uygulamalarda önemli bir yer kaplar (Ashour, 2000).

2.10.8. Büzülme ve Sünme

Kuru ortamda beton büzülür. Malzeme özellikleri de dahil olmak üzere büzülmenin evrimi Ortamın sıcaklığına ve nemine, betonun yaşına ve kütlesine bağlıdır. Betonda

büzölme kısıtlaması varsa, çekme gerilimi meydana gelir ve beton çatlayabilir. Daraltmak yani rötre Çatlaklar beton perdelerde, zeminlerde ve kaldırımlarda yaygın bir sorundur. Bu büzölme Beton matrisinde rastgele çelik dağılımı çelik tel takviyesi, rötre çatlamayı azaltmanın en etkili yolu. Betonlar, taşıma koşullarından dolayı neredeyse büzülürler. Zorlandıkları için çatlama eğilimindedirler. Çelik tel bu durumda üç avantacı vardır. Çelik tel fazla yönlü çatlak oluşumu, çatlağa gerilim transferi sağlar ve bu gerilim iletimi, çatlakların kapanmasına izin verecek kadar zaman alabilir.

Çelik tel donatılı betonlarının sünme ve büzölme özelliklerine etki eden çelik teller ile ilgili parametrelerin en önemli olan. En önemli olan kullanılan çelik tel miktarıdır. Çelik telin sürünme ve büzölme özellikleri geliştirmek için matriste etkili olacak kadar yeterli miktarda var olmalıdır. Düşük çelik tel içeriğinde bile daha iyi gerilim dağılımı ile çatlama genişlikte %70'e ulaşan bir azalma gözlemlenebilir (Paul Z, 1996).

2.10.9. Çelik Tel Takviyeli Betonun Dayanıklılığı

Şimdiye kadar ayrıntılı bir çalışma yapılmamışsa da çelik tellerle güçlendirilmiş lifli beton kompozitlerin dayanıklılık sorunu, lifsiz betonlarda dayanıklılık sorunu çıkaran problemlerle aşağı yukarı aynıdır. Başka bir deyişle boşluklu yapıda olan betonun, geçirimsizliği, porozitesi, hacim/yüzey oranı ve dış kimyasal ve fiziksel etkilere karşı gelebilme yeteneği gibi problemlerdir. Su yapılarında paslanabilir çelik kullanılması, tek başına lifli beton için dayanıklılık problemi olmasa da elbette dayanıklılık açısından bazı sorunlar oluşturabilir. Bu tip su altı yapılarında çelik için paslanmaz çelik kullanılması korozyon sorununu ve korozyonun üretebileceği yeni problemleri ortadan kaldırabilir. Lifli beton kompozitlerinde betonda boşluk oluşumuna yol açan problemler görülmekte ve bunun sebebi ise betona katılan çelik liflerin demet halinde, karışım sırasında tek tek ayrılmadan, beton içerisinde kalması sonucu betonda boşluklu bir yapı oluşmasını sağlamasıdır. Bu şekilde oluşan betonların içerisine mikroskobik boyutta sıvı ve gazlar çok rahat bir şekilde nüfuz edebilirler. Bu şekilde gerçekleşen olumsuz gelişmeler ise betonda dayanıklılığın hızla düşmesinde rol oynayan önemli sorunlardır. Bu olumsuz gelişmelerde sonrasında ise betona düzgün yerleşen çelik liflerin de oksitlenmesi korozyondan etkilenmesi kaçınılmazdır. Açıklanan sorunların önemi ile ilgili lifsiz betonda yapılması gereken iyi karıştırma işlemi, lifli betonlar için de geçerlidir (Taşdemir M. İ., 2002).

2.10.10. Betonun Çelik Tel Donatısı ile Karışımı

Çelik tel donatısının karışım içinde eşit olarak dağılması çok önemli bir etkidir. Resim 2.1’de, çelik liflerin taze betondaki dağılımı gösterilmiştir. Çelik liflerin karışım içinde üniform dağılması ve karıştırma sonrasında düzenli bir dağılımın sağlanması, çelik liflerin beton özelliklerinin iyileştirilmesinde direkt etkilidir. Bu yöntem, karıştırma ve karıştırma işlemi esnasında uygulanmalıdır. Bu, suyu katkı maddeleriyle azaltarak her zaman elde edilemez. Agregaların ve partiküllerin karışımını optimize etmek de iyi bir çözümdür. Agregaların maksimum yoğunluğa ulaşacak şekilde seçilirse mümkün olduğunca minimum hamur gerekir. Karışımın toplam çekmesi, kumaşın özelliklerine, çimento miktarına, su, katkı maddelerine, sıcaklığa ve agreganın cinsine bağlıdır. Daha düşük nem içeriği, daha az çekme anlamına gelir. Su/çimento, çimento hamuru agregaya bağına yakın bölgeyi en fazla ıslatan faktördür denilebilir. Düşük bir su/çimento oranı, arayüzde düşük yoğunluklu bir bölge ile sonuçlanır, ancak arayüzdeki bölgenin genişliği azalır (Yıldırım, 1994).



Resim 2.1. Taze Beton İçerisinde Çelik Tellerin Dağılımı

Çalışmalar, düz, kancalı ve kesiti dairesel olan çelik tellerin, betonun özelliklerini iyileştirmede en etkili olduğunu gözlemlemiştir. Beton karışımlarında kullanılan bu tip tellerin en boy oranları 20 ile 100 arasında, katkı seviyeleri ise hacimce %0,5 ile 2,5 arasında değişmektedir. Karışım oranı yüksek olduğunda karışımdaki çelik tellerin toplanarak üniform bir dağılım sergilemediği ve basınç mukavemetinin normal betona göre daha düşük hale geldiği görülmüştür. Paslanmaz çelik tel ile, tel karışımında toplanarak matris kırılabilirliği ve büyük boşluklar oluşturur. Sonuç olarak, çelik liflerin beton özelliklerinde beklenen iyileşmesi muhtemelen düşük seviyede kalacaktır. Hazır betonda toplanmanın önüne geçmek ve işlenebilirliği istenilen düzeye getirmek için kullanılan çelik tel miktarına ve inceliğine bir üst sınır şartı koymak mantıklıdır. Genel

olarak bu limitler tel hacmi için %2, incelik için 100 olarak verilmektedir. Ek olarak CTDB'nin işlenebilirliği, akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılarak gerektiği gibi ayarlanabilir. Karışımda ince agrega çeşidinin kullanılması çelik tel miktarını artırmak ve işlenebilirliği sağlamak için günümüz şartlarında uygun bir çözümdür (Williamson, 1974).

Betonda çelik liflerin karakteristik özelliklerine etki eden en önemli faktörler en-boy oranı ve ne kadar çelik lif kullanıldığıdır. Narinlik oranı, çelik tel liflerinin geometrik özelliklerini tanımlayan sayısal bir sistem unsurudur. Bu oran, yuvarlak lifler için tel uzunluğunun tel çapına ve yuvarlak olmayan çelik teller için eşdeğer fiber çapına oranının sonucudur. Yaygın olarak kullanılan çelik telin inceliği 20 ila 100 ve uzunluğu 6,4 mm ila 76 mm arasında değişir. İncelik azaldıkça çelik tel matris bağları önem kazanır. Öte yandan, daha yüksek en-boy oranları, aglomerasyon ve düzgün dağılım olmaması nedeniyle daha büyük karıştırma sorunlarına yol açar. Genel olarak, daha yüksek tel inceliğinin betonda en önemli gelişmeyi sağlaması beklenir, ancak gösterilen karışım, yerleşim ve ölçüm süreçlerinde karşılaşılan sorunlar nedeniyle tel inceliğini sınırlamak gerekebilir.

Chang ve Chai, çelik telin birim hacmi arttıkça betonun işlenebilirliğinin bozulduğunu, bu nedenle çelik telin etkisini tam olarak gerçekleştirmek için su içeriğinin artırılması veya su azaltıcı maddelerin kullanılmasının gerekliliğini belirtmişlerdir (Acun, 2000).

Chenkui ve Guafon, tel uzunluğu/tane boyutu oranının mukavemet üzerindeki etkisini incelediler ve bu oranın 1,5 ile 2 arasında değişebildiğini bildirdiler. Bu oranların dışında çelik lifin etkisinin normalden daha az olduğunu söylediler. Çelik tel, kaba agrega ile çimento hamuru arasındaki arayüzü iyileştirme eğilimindedir ve bu arayüzde mikro çatlaklar oluşur. Ayrıca, köprü çatlağı genleşmesi daha az etkilidir. Çok uzun bir çelik tel uzunluğunun işlenebilirliği ve dolayısıyla beton özelliklerini olumsuz etkilediğini söylediler. Ayrıca çelik telin sadece ince agregalı betonlarda değil, maksimum tane boyutu 40 mm'ye kadar olan betonlarda da kullanılabileceğini ancak tel uzunluğunun 35 mm'den az olmaması gerektiğini söylediler (Ali, 2021).

Eren ve Çelik beton donatı için kullanılan çelik telin çapını arttırmışlardır. Buna bağlı olarak VeBe süresinin arttığını ve işlenebilirliğin azaldığını gösterdiler. Benzer şekilde Yıldırım ve Taylor ve ark. Betonda Çelik Tel Kullanımı Kilitlenme puanlarını azalttığını ve VeBe oluşturma sürelerini artırdığını söylüyorlar.

Bayramov ve ark. Çelik telin betonun işlenebilirliğini azalttığını ve bu etkinin uzun çelik tellerde belirgin olduğunu belirtmişlerdir. İşlenebilirliği büyük ölçüde etkilenmesini sağlayan en önemli faktörlerin çelik telin inceliği ve telin hacimliliği olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca çelik liflerin hazır betonun işlenebilirliği üzerindeki etkisini belirli bir seviyede tuttukları ve beton özelliklerinin korunması ve iyileştirilmesi için kullanılan çelik tel miktarının ve inceliğinin sınırlandırılması gereği vurgulanmıştır (Abdullah, 2022).

Soroushian ve Bayasi, çelik tel liflerinin hazır betonun işlenebilirliğini büyük ölçüde etkilediğini kaydetti. Farklı tel türleri kullanılarak yapılan çalışmalarda çelik lif içeren hazır betonun işlenebilirliğinin tüm çelik lif türleri için normal betona göre azaldığı, sadece kıvrıma sahip çelik lif içeren hazır betonun işlenebilirliğinin ise azaldığı görülmüştür. Cinsiyetler arasında daha fazla fark vardır. Çelik telin inceliği belli bir değeri geçmemelidir.

2.10.11. Korozyon

Betonda çelik tel kullanıldığında korozyon etkileri bir sorundur. Betona eklenen çelik teller betonun içine gömüldüğü ve yüzeyde çok az kaldığı için paslanma kaynaklanan genleşme kuvvetleri sınırlı seviyede kalır ve genellikle beton yüzeyinde delaminasyon olmaz. Beton yüzeyine çok yakın olan çelik teller, sıkı yüzey karbonatlaşma derinliği nedeniyle betonda hızlı korozyona ve pas renkli yüzey oluşumuna neden olabilir. Bu istenmeyen bir estetik kusur olarak görülebilir. Dikkate alınması gereken bir diğer nokta, paslanmış çelik telin dayanıklılığa katkısının azalmasıdır. Düşük karbonlu çelik tel yaygın olarak kullanıldığından, çelik tel korozyonu geleneksel betonda kullanılan inşaat demirine göre daha azdır. Ayrıca beton matrisi içerisindeki çelik tellerin elektrik iletkenliğindeki süreksizlikler korozyon açısından bir avantaj olarak görülebilir. Ayrıca çelik tel beton matrisi içerisindeki çatlakları dik keserek taşıyıcı süreklilik sağlar ve çatlak ilerlemesini engelleyerek çelik telin korozyondan zarar görmesini engeller. Çelik telin zemin betonuna sıkıca gömülmesi için su-çimento oranının yüksek olmaması gerekir. Titreşimli şap, uygun kohezyonla betona verildiğinde, çelik tel betona gömülür (Aktaş, 2007).

2.10.12. Kaviteasyon, Erozyon ve Aşınma Direncini

Çelik lifler genellikle betonun kaviteasyon, erozyon ve aşınma direncini artırır. Hidrolik yapılarda kullanılan betonun kaviteasyon, erozyon ve aşınma etkilerden

kaynaklanan erozyona karşı direncini kısmen artırır. Çelik lifler, darbe aşınmasının neden olduğu mikro çatlakları kontrol ederek betondaki aşınma hasarını azaltır.

ACI Komisyonu, beton yüzeylerin küçük parçacıkları yuvarlayarak düzenli olarak aşınması durumunda, hidrolik yapıların düşük hızlarda aşınma derecesini belirlemede agrega kalitesinin ve yüzeyindeki sertliğin en önemli faktörler olduğunu tespit etti. Teller, betonun yüksek hızlı darbelerden ve büyük döküntülerden kaynaklanan aşınmanın etkilerine karşı erozyonun direncini büyük ölçüde artırır (Taşdemir M. , 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).

Nanni, çelik tel takviyeli betonun aşınma direncinin normal betona kıyasla önemli ölçüde değişmediğini, ancak çelik tellerin beton kaplamanın delaminasyonunu etkilediğini buldu.

Sustersic ve ark. Çelik liflerin betonun aşınma direncine etkisi incelenmiştir. Su-çimento oranı 0,30 ila 0,65 olan betona hacimce %0,25 oranında her iki ucunda kanca bulunan tel ilave edilerek sonuçlar gözlenmek üzere numunelere aşınma ve erozyon testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, çelik liflerin betonun aşınma ve erozyon direncini iyileştirdiğini ve betonun aşınma ve erozyon dirençlerinin artan su-çimento oranı ve çelik lif içeriği ile arttığını göstermektedir.

2.10.13. Donma-Çözünme

Çelik liflerin betonun donma-çözünme direncine etkisi net değildir. Yani çelik liflerin betonun donma-çözünme direncine faydasının olmadığı söylenebilir. Geleneksel betonda olduğu gibi, dayanıklı betonun elde edilmesi için MFİB'lerde geçerli uygulamaların ve hava sürüklemeye standartlarının kullanılması gerekir. Öte yandan çelik teller, mikro çatlak oluşumunu ve yayılmasını geciktirerek, donma-çözünme döngüleri sırasında betonun çökmesini ve görülen hasarın gerçekleşme hızını geciktirir. Bu başarısızlık modunun iyileştirilmesi, çelik lifin çatlakların köprüleme etkisine ve çatlak iyileşmesine bağlıdır. Betonda rastgele dağıtılan çelik teller betonun gözenekliliğini ve doygunluğunu etkilemediği için çözülme esnasında beton yüzeyinin delaminasyonunu engelleyemez. Bu nedenle, CTDB donma-çözülme etkisindeki kütle kaybı, sıradan betonunkine benzer (Aisheh, 2022).

Balaguru ve Ramakrishnan, 0.40 su/çimento oranı ve 415 çimento içeriğine sahipti. CTDB'nin donma-çözünme direncini kg/m^3 'ün altına düşürmek için en az %6'lık bir hava sürüklenmesinin gerekli olduğunu açıkladı.

Vares, donma-çözülme etkilerine maruz kalan CTDB'lerin ince yapısını inceledi. 100 ve 200 devir (suya daldırma) sonunda %2 ve %4 çelik lif ilave edilerek ortaya çıkarılan betonun tokluk ve mikro yapıdaki değişimlere bağlı olarak donma direncinin belirlenmesi. 200 döngüden sonra MFİB mikro yapısında önemli bir hasar olmadığını açıkladı. Mu et al. çelik liflerin donma-çözülme ve tuzluluk gibi olayların etkisi altında kaldığında betonun hava direncini arttırdığını vurgulamıştır.

2.10.14. Püskürtme Betona İlave Edilen Çelik Tel Donatısı

Çelik elyaf takviyeli püskürtme beton, çelik elyaf takviyeli betonun hava kullanılarak bir yüzeye aralıklı olarak püskürtülmesiyle üretilir. Püskürtme betona çelik liflerin eklenmesi, çatlağa karşı direncini, sünekliği, enerji emilimini ve darbe dayanımını artırır. Ayrıca ek çekme donatısına ihtiyaç duymadan betonun çekme dayanımını artırır. Püskürtme betonun matrisinde belirsiz olarak dağılmış çelik lifler, püskürtme betonun boyutsal kararlılığını artırır ve yük altındaki davranışını büyük ölçüde iyileştirir. Çelik lif içeren püskürtme betonun göçme enerjisi, aynı koşullar altında üretilen hasır donatınıninkinden daha yüksektir (Vairagade, 2012).

Püskürtme beton, normal beton gibi kırılgan malzeme davranışı sergiler. Düşük sünekliği nedeniyle çatlama sonrası hızlı göçme davranışı sergiler. Bu davranış tehlikeli olduğu kadar istenmeyen bir davranıştır. Püskürtme betona çelik liflerin eklenmesi, çatlak sonrası sünekliği ve yük taşıma kapasitesini artırarak sünek çökmeye yol açar. Son derece sünek bir CTDPB kaplaması, kaya ve sondaj patlamalarına karşı direnci aşırı miktarda artırır. Beton, yüksek eğilme mukavemeti ile yapılır, ancak süneklik, tel tipi ve miktarının bir fonksiyonudur.

Püskürtme betonda çelik liflerin kullanılmasının bir başka gelişmesi de aşırı eğilme dayanımını korumasıdır. Geniş bir örneklem çalışmasında, saf betonun eğilme dayanımının kürlenme sonrası büzülmeden dolayı rötre ve mikro çatlaklar nedeniyle yarıya düştüğü, oysa çelik takviyeli püskürtme betonun eğilme dayanımının kürlenmeden sonra korunduğu gözlemlendi.

Püskürtme betonda çelik telin kullanılmasının ana nedenlerinden biri hasır çelik donatının tünel duvarına yerleştirilmesinin zor, zaman alıcı, ekonomik olmayan ve bazen tehlikeli olmasıdır. Ayrıca, geleneksel ağ çeliği, kaplamayı kesme kırılmasına karşı geliştiremez. Ayrıca püskürtme kaplama, örgü beton kaplamaya göre daha incedir ve yüksek enerji emme kapasitesine sahiptir, bu nedenle kaya patlamaları gibi hızlı yüklere karşı mükemmel süneklik sergiler (Biol, 2016).

Püskürtme beton uygulamalarının belirgin avantajları nedeniyle çelik tel, hasır donatı yerine tercih edilir. Çelik liflerin sağladığı püskürtme betonun mekanik ve dayanıklılık iyileştirmeleri, yapıların hizmet ömrü boyunca iyi anlaşılmıştır. Çelik tel takviyeli püskürtme betonun performansını belirlemek için yeni ölçüm yöntem ve tekniklerinin sürekli geliştirilerek ilerleme sağlanması gerekmektedir.

Taşdemir, çelik tel takviyeli levhanın ilk çatlağın yükünün çelik tel takviyeli levhaya göre daha yüksek olduğunu ve kırılma modunun tel takviyeli levha için sünek, çelik hasır levha için kırılma olduğunu belirtmektedir. 20 mm çelik tel takviyeli paneller ile. Sapma meydana geldiğinde panelde herhangi bir dağınıklık olmadığını, ancak öngörülen sapmadan daha düşük sapmalarda çelik ağ takviyeli panellerde önemli çatlaklar, kırılmalar ve dökülmeler olduğunu tespit etti. Ayrıca, maksimum yükün ve emilen enerjinin önemli ölçüde arttığını buldu. Artan çelik tel içeriği ve inceliği ve kanca uçlu teller emilen enerjiyi daha da artırdı (Yavuz, 2016).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Agregalar

İnce agrega olarak dere kumu (0-4 mm), iri agrega olarak kalker kökenli kırmataş I (4-13 mm) ve kırmataş II (13-22 mm) kullanılmıştır. Agreganın fiziksel özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agrega	Boyut (mm)	Su Emme (%)	Özgül Ağırlık
Kum	0-4	1.15	2.57
Kırmataş-I	4-13	0.23	2.64
Kırmataş-II	13-22	0.23	2.64

3.1.2. Çimento

Çalışmada Yozgat Yibitaş-Votorantim Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R tipi Portland Çimentosu kullanıldı. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. CEM I 42.5 R Tipi Portland Çimento Özellikleri

Kimyasal Bileşim	
Bileşen, (%)	
MgO	2.24
SiO ₂	18.44
Al ₂ O ₃	5.50
Fe ₂ O ₃	3.18
Na ₂ O	0.12
CaO	62.09
SO ₃	3.64
K ₂ O	1.06
Kızdırma Kaybı	3.34
Çözünmeyen Kalıntı	0.39
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık g/cm ³	3.08
Özgül Yüzey Blaine cm ² /g	3088
32µ altı (%)	18,55
45µ altı (%)	8,12
Priz başı, dakika	166
Priz sonu, dakika	216

3.1.3. Su

Çalışmamızda Yozgat Merkez ilçesinin içilebilir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.4. Kimyasal Katkı

Çalışmada kimyasal katkı olarak yüksek oranda polikarboksilik eter esaslı yeni nesil akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

3.1.5. Çelik Tel

Çalışmamızda Kayseri Kemerix firmasından temin edilen farklı narinliğe sahip KMX 65/60 BL ve KMX 80/60 BG tipi iki ucu kancalı çelik teller kullanılmıştır. Kullanılan çelik tellerin görselleri Resim 3.1’de, özellikleri ise Tablo 3.3’de verilmiştir.



Resim 3.1. Kullanılan çelik teller

Tablo 3.3. Çelik tellerin özellikleri

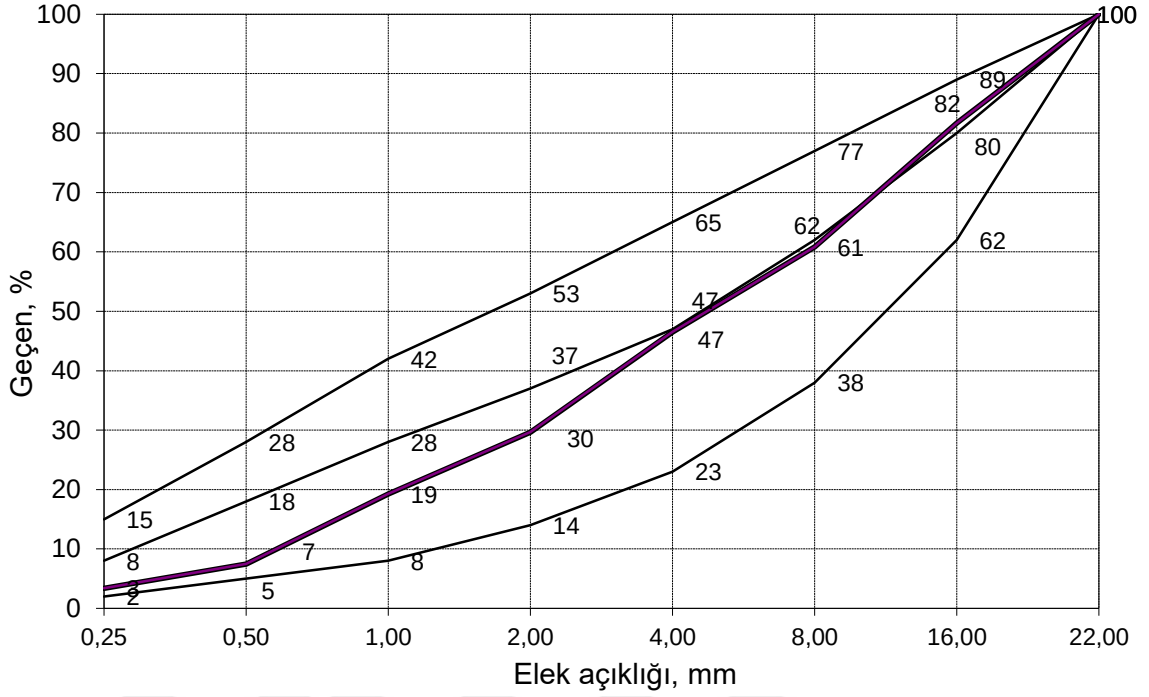
Çelik Tel Tipi	Boy, l (mm)	Çap, d (mm)	Narinlik (l/d)	Çekme Dayanımı N/mm ²
65/60	60	0,90	65	1200
80/60	60	0,75	80	1200

3.2. Beton Karışımları

Üretilen betonlarda kullanılan agrega karışım oranları Tablo 3.4’de ve karışım agregasına ait tane dağılımı eğrisi Şekil 3.1’de, gerçek karışım miktarları ise Tablo 3.5’ de verilmektedir.

Tablo 3.4. Agrega karışım oranları (hacimce)

Agrega	Karışım %’ si (hacimce)
Kum	45
Kırmataş I	36
Kırmataş II	19



Şekil 3.1. Karışım agregası tane dağılımı eğrisi

Tablo 3.5. Beton karışım miktarları (kg/m³)

Karışım Kodu	Çelik Tel Narinliği	Çelik Tel Miktarı (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	Kum (kg)	Kırmataş I (kg)	Kırmataş II (kg)	Kimyasal Katkı (kg)
REF	-	-	460	185	900	476	267	6
F65-15	65	15	460	185	900	476	267	6
F65-20	65	20	460	185	900	476	267	6
F65-25	65	25	460	185	900	476	267	6
F80-15	80	15	460	185	900	476	267	6
F80-20	80	20	460	185	900	476	267	6
F80-25	80	25	460	185	900	476	267	6

3.3. Numunelerin Üretilmesi

Deney numuneleri üretilmeden önce C30/37 sınıf dayanıma ve 13-15 cm çökme (S3 kıvam sınıfı) değerine sahip beton elde etmek için öncelikle deneme betonları üretilmiş ve istenilen özelliklere sahip beton elde edildikten sonra gerçek beton karışım oranları belirlenmiştir.

65 ve 80 narinliğe sahip çelik teller 15 kg/m³, 20 kg/m³ ve 25 kg/m³ miktarlarda betona ilave edilerek kontrol grubu (çelik tel içermeyen) ile toplam 7 seri beton numuneler üretilmiştir. Karışımların kodlaması çelik tel narinliğine ve çelik tel içeriği bağlı olarak

yapılmıştır. Örnek olarak, F80-20 kodlu numune 80 narinliğe sahip 20 kg/m³ çelik tel içeren betonları ifade etmektedir.

Her bir seri çelik tel donatılı beton için 3 adet silindir (çap=150 mm, yükseklik=300mm), 3 adet küp (150x150x150 mm³) ve 3 adet prizmatik kiriş (150x150x600 mm³) numuneleri üretilmiştir. Üretim sırasında işlenebilirlik (çökme) ve taze beton birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Numune üretimi ve taze beton deneylerine ait fotoğraflar Resim 3.2’de verilmiştir. Üretimler hazır beton tesisinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler üretildikten bir gün sonra kalıptan çıkarılarak 28.gün boyunca laboratuvar ortamında (23°C±2 °C) sıcaklıkta tutulmuşlardır. Üretimleri ait görseller Resim 3.2, Resim 3.3 ve Resim 3.4’de verilmiştir.



Resim 3.2. Betonun üretimi ve taze betonun deneyleri



Resim 3.3. Döküm işlemleri tamamlanmış olan prizmatik kiriş numuneleri



Resim 3.4. Döküm işlemleri tamamlanmış olan silindir ve küp numuneleri

3.4. Yapılan Deneyler

3.4.1. Taze Beton Deneyleri

3.4.1.1. Birim Ağırlık Deneyi

Üretilen beton numuneler üzerinde TS EN 12350-6'ya uygun şekilde birim ağırlık deneyi yapılmıştır. Birim ağırlık deneyine ait görsel Resim 3.5'te verilmiştir.



Resim 3.5. Taze birim ağırlık deneyine ait görsel

3.4.1.2. İşlenebilme Deneyi

Çelik tel ilavesinin taze betonların işlenebilmesine etkisinin belirlenebilmesi için TS EN 12350-2' e uygun çökme deneyi yapılmıştır. Çökme deneyine ait görsel ise Resim 3.6'da verilmiştir.



Resim 3.6. İşlenebilme deneyine ait görsel

3.4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Üretildikten sonra 28 gün boyunca 20 ± 5 sıcaklıkta ve $\%60 \pm \%10$ bağıl neme tabii tutulan sertleşmiş beton numuneler üzerinde mekanik özelliklerin tayini deneyleri yapılmıştır

3.4.2.1. Basınç Dayanımı Tayini

Basınç dayanımı deneyleri her seri beton için 3 adet 150mmx150 mmx150 mm standard küp numuneler üzerinde TS EN 12350-4' e uygun olarak yapılmıştır. Yükleme hızı 13.50 kN/s seçilmiştir. Deney düzeneği Resim 3.7'de verilmiştir.



Resim 3.7. Basınç dayanımı deney düzeneği

3.4.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı Tayini

Yarmada çekme dayanımı deneyleri TS EN 12390-6 standardına uygun olarak 15 cm çapında 30 cm yüksekliğinde silindir numuneler üzerinde, 300 ton kapasiteli preste yapılmıştır. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği Resim 3.8'de verilmiştir.



Resim 3.8. Yarmada çekme dayanımı deney düzeneği

3.4.2.3. Eğilmede Çekme Deneyi

Eğilmede çekme deneyi her seri beton için 3 adet 150x150x600 mm boyutlarındaki prizmatik kiriş numuneler üzerinde EN14651 standartlarına uygun olarak kapalı çevrim-geri beslemeli sehim kontrollü yükleme çerçevesinde yapılmıştır. Eğilme deney düzeneği Resim 3.9’da verilmiştir.

Çentikli kiriş numuneler üzerinde yapılan 3 noktalı (orta noktasından yüklenen kiriş) eğilme deneyinden elde edilen maksimum yük kullanılarak betonların net eğilme dayanımları aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır.

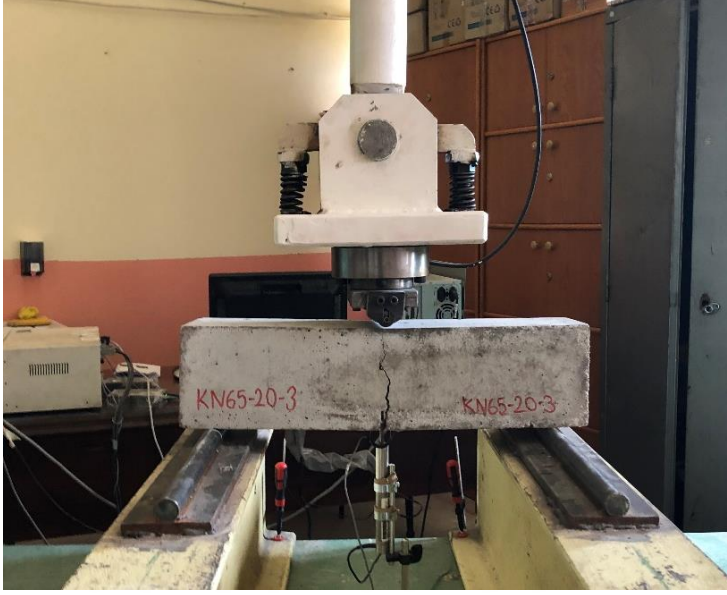
$$f_{net} = \frac{3PS}{2B(D-a)^2} \quad (3.1)$$

Burada, P , S , B , D ve a sırasıyla, en büyük yük, mesnetler arası uzaklık, numunenin genişliği, numunenin yüksekliği ve çentik uzunluğudur. Çelik tel dayanımı ve tel içeriğine bağlı olarak kirişlerin net eğilme dayanımları (f_{net}) Tablo 3.6’da verilmiştir.

Kırılma enerjileri ise yük-sehim eğrilerinden RILEM TC 50-FMC tarafından önerilen yöntemle belirlendi. Bu yöntemde kırılma enerjisi;

$$G_f = \frac{W_0 + m(1-k^2)g\delta}{B(D-a)} \quad (3.2)$$

formülüyle verilmektedir. Burada W_0 yük-sehim eğrisi altında kalan alan (bu çalışmada W_0 4 mm sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alan olarak alınmıştır.), m mesnetler arasında kalan numune ağırlığı, g yerçekimi ivmesi (9.81 m/s^2), δ açıklık ortasındaki sehim (bu çalışmada δ değeri 4 mm olarak alınmıştır), B numune genişliği, D numune derinliği, a çentik derinliği, k ise numune boyutlarına bağlı bir katsayı $k=(U/S)-1$ ve U numunenin boyu, S ise mesnetler arası uzunluktur.



Resim 3.9. Kirişlerde çekme deney düzeneği

4. BULGULAR

4.1. Taze beton Birim Ağırlık ve İşlenebilme

Taze beton birim ağırlık deney sonuçları Tablo 4.1’de ve İşlenebilme deney sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir. Çelik tel miktarı artıkça birim ağırlık değerlerinde artışlar olduğu görülmüştür. Çelik telin özgür ağırlığının betonu oluşturan malzemeler kıyasla daha yüksek olmasından dolayı çelik tel içeren betonların birim ağırlıkları çelik tel içermeyen referans numunelere kıyasla daha yüksek elde edilmiştir. En düşük birim ağırlık değeri referans numunelerde 2287 kg/ m³ olarak elde edilirken en yüksek birim ağırlık değeri ise 65 narinliğe ve 25 kg/m³ tel içeriğine sahip betonlarda 2312 kg/m³ olarak elde edilmiştir.

Çelik tellerin taze betonun hareket kabiliyetini sınırladıklarından dolayı çelik tel miktarı artıkça çökme değerlerinde azalmalar olduğu görülmüştür. En büyük çökme değeri Referans numunelerde 15 cm olarak, en küçük çökme değeri ise 80 narinliğe ve 25 kg/m³ tel içeriğine sahip numunelerde 11 cm olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.1. Taze birim ağırlık deneyi sonuçları

Narinlik	Çelik Tel İçeriği, kg/m ³	Taze Birim Ağırlık, kg/m ³
Referans	-	2287
F65	15	2296
	20	2302
	25	2312
	15	2294
F80	20	2298
	25	2306

Tablo 4.2. İşlenebilme deneyi sonuçları

Narinlik	Çelik Tel İçeriği, kg/m ³	Slump (Çökme), cm
Referans	-	15.0
65	15	14.5
	20	13.0
	25	12.0
	15	14.0
80	20	12.5
	25	11.0

4.2. Basınç Dayanımı

Yapılan çalışmalarda çelik tellerin eğilme ve çekme dayanımlarına kıyasla beton basınç dayanımına sağladığı katkının daha düşük olduğu belirtilmiştir. (Paul vd. 1996; Nataraja vd. 2005). Betonlarda çelik tel kullanılmasının ve kullanılan çelik tel miktarının artırılmasının beton basınç dayanımına olumlu etkilerin olduğu ifade edilmektedir. (Azmat ve Khan, 2018). Çelik tel miktarının çelik tel narinliğine kıyasla beton basınç dayanımı performansını artırmada daha etkili olduğu ifade edilmiştir (Vairagade vd., 2012).

Çelik tel içeriğinin artmasıyla bütün narinliklerde basınç dayanım değerlerinde artışlar olmuştur. Çelik tel ilave edilmesiyle referans numunelere göre basınç dayanımlarında en fazla artış 65 narinliğe sahip çelik telli numunelerde elde edilmiştir. Referans numuneye kıyasla basınç dayanımındaki en fazla artış %25 oranı ile 60 narinliğe ve 25 kg/m³ tel içeriğine sahip betonlarda 49 MPa olarak elde edilmiştir.

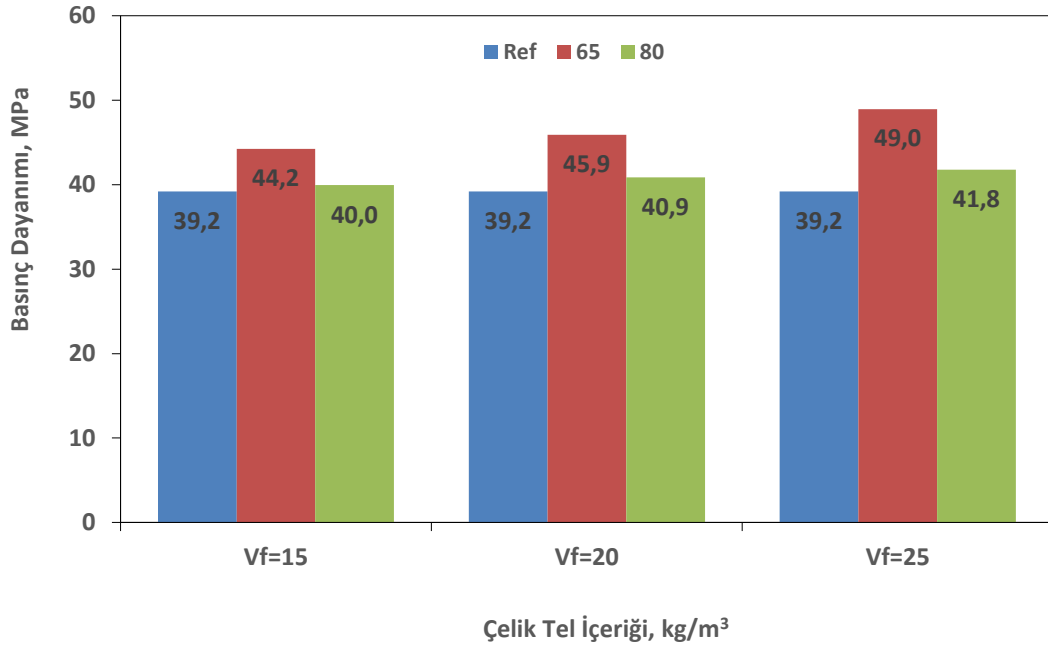
Referans numunelerinin basınç dayanımı 39,2 MPa olarak elde edilmiştir. 65 narinlikte 15 kg/m³, 20 kg/m³ ve 25 kg/m³ miktarlarında çelik tel içeren numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 44,2 MPa, 45,9 MPa ve 49 MPa olarak elde edilmiştir. 80 narinlikte 15 kg/m³, 20 kg/m³ ve 25 kg/m³ miktarlarında çelik tel içeren numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 40 MPa, 40,9 Mpa ve 41,8 MPa olarak elde edilmiştir.

Çelik tel ilavesinin her ne kadar eğilme ve çekme dayanımlarındaki artışlara oranla küçük kalsa da betonların basınç dayanımları üzerinde geliştirici bir etkiye sahip olduğu ve basınç dayanımına olan katkısı bakımından 65 narinlikte 25 kg/m³ lif içeriğine sahip numunelerde en büyük artışların yaşandığı tespit edilmiştir.

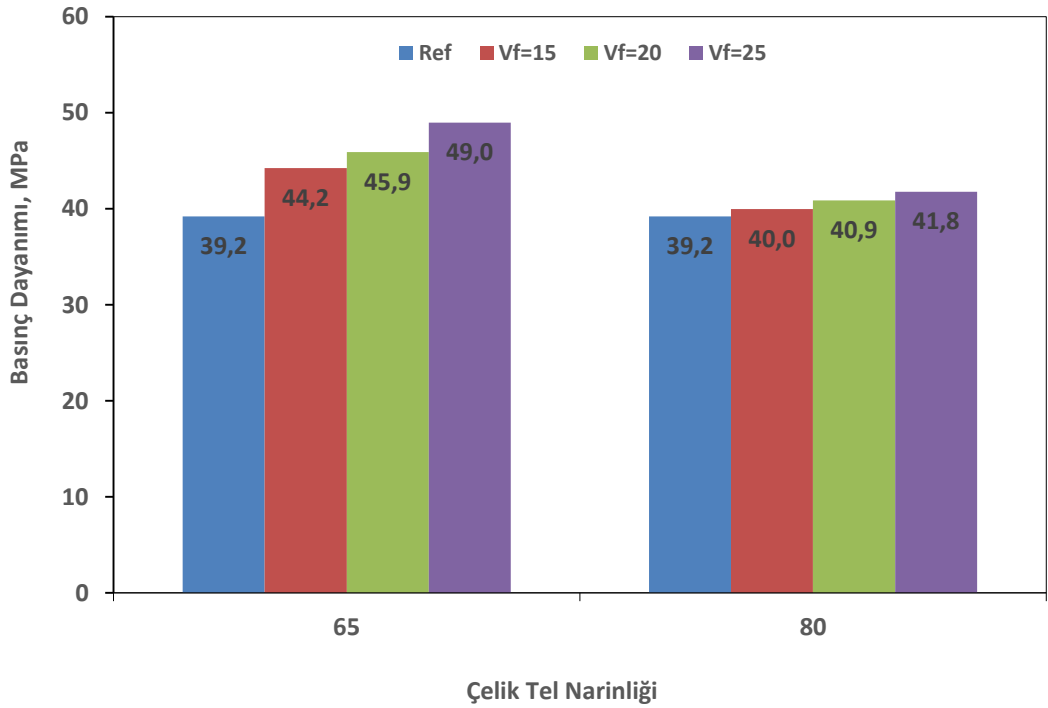
Basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 4.3'te verilmiştir. Beton basınç dayanımı deney sonuçlarının çelik tel içeriğine ve çelik tel narinliğine bağlı değişimleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Basınç dayanımı deney sonuçları

Narinlik	Tel İçeriği, kg/m ³	Numune No.	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Referans	0	1	38.2	39.2
		2	39.3	
		3	40.1	
65	15	1	48.9	44.2
		2	33.5	
		3	50.4	
	20	1	46.2	45.9
		2	44.1	
		3	47.5	
	25	1	39.6	49
		2	55.7	
		3	51.6	
80	15	1	37.2	40
		2	40.1	
		3	42.6	
	20	1	28.7	40.9
		2	42.6	
		3	51.4	
	25	1	43.2	41.8
		2	41.3	
		3	40.9	



Şekil 4.1. Basınç dayanımları (çelik tel içeriğine göre)



Şekil 4.2. Basınç dayanımları (çelik tel narinliğine göre)

4.3. Yarmada Çekme Dayanımı

Yapılan çalışmalarda çelik tel ilavesinin her ne kadar betonun eğilme ve çekme dayanımlarına kıyasla daha düşük seviyede de olsa betonun yarmada çekmede dayanımını artırdığı bilinmektedir. Çelik tel miktarı, narinlik ve çelik tel-matris özellikleri ÇTDB'ların yarmada çekme dayanımlarını etkileyen en önemli etmenlerdir (Köksal vd., 2002; Yıldırım, 1994; Taylor vd., 1997; Lim ve Oh, 1999; Gao vd., 1997).

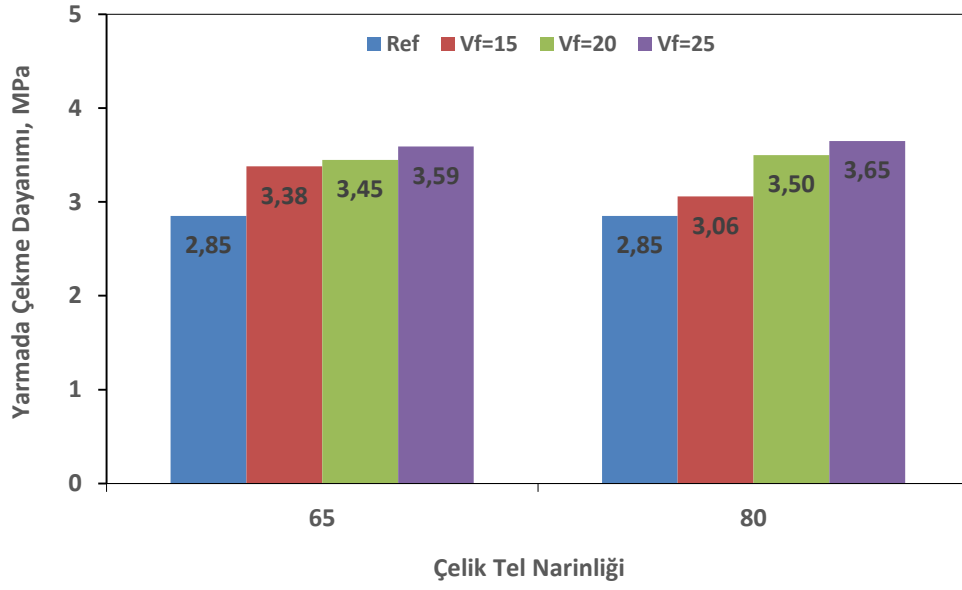
Bütün narinliklerde çelik tel miktarının artırılmasıyla yarmada çekme dayanımlarında artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Referans numunelerde yarmada çekme dayanımı değeri 2.85 MPa olarak elde edilmiştir. Referans numunelere kıyasla en yüksek yarmada çekme dayanımı değeri 65 ve 80 narinlikte 25 kg/m³ tel içeren numunelerde elde edilmiştir.

65 narinlikte 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ çelik tel içeriğine sahip numunelerin yarmada çekme dayanımları sırasıyla 3.35 MPa, 3.45 MPa ve 3.59 MPa olarak elde edilmiştir. 80 narinlikte 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ çelik tel içeriğine sahip numunelerin yarmada çekme dayanımları sırasıyla 3.06 MPa, 3.50 MPa ve 3.65 MPa olarak elde edilmiştir. Referans numuneye kıyasla yarmada çekme dayanımlarında ki en fazla artış 80 narinliğe ve 25 kg/m³ tel içeriğine sahip numunelerde % 28 oranında 3.65 MPa değerinde elde edilmiştir.

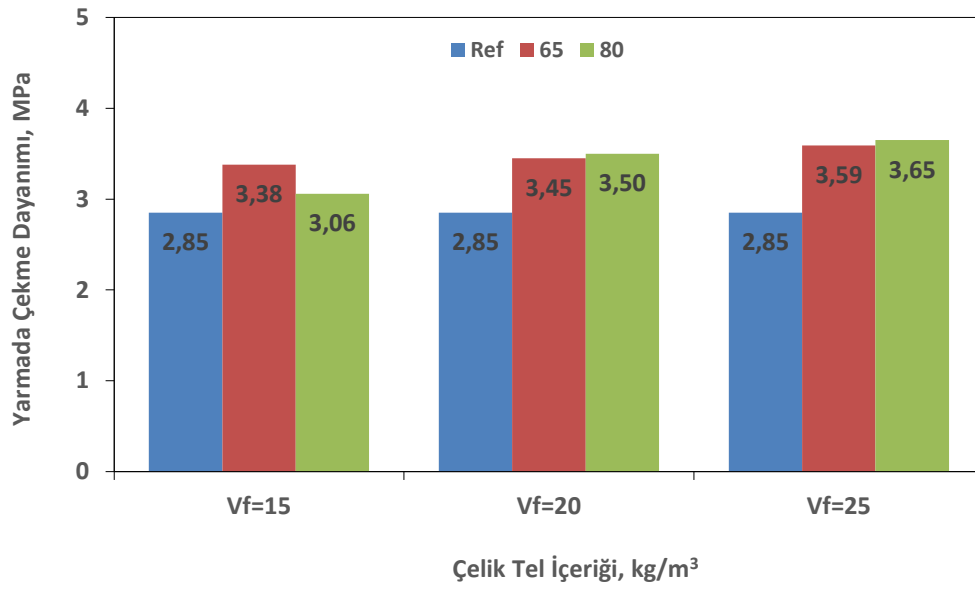
Sonuç olarak çelik tel takviyesinin betonun yarmada çekme dayanımı performansını arttırdığı ve çelik tel miktarı artıkça yarmada çekme dayanımı performansının en yüksek değerde olduğu tespit edilmiştir. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları Tablo 4.4'te, yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarının çelik tel narinliğine ve çelik tel içeriğine bağlı değişimleri ise Şekil 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Yarmada çekme deneyi sonrası numunelerin tipik görünümü Resim 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Narinlik	Tel İçeriği, kg/m ³	Numune No.	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
Referans (Lifsiz)	0	1	2.89	2.85
		2	2.74	
		3	2.91	
65	15	1	3.46	3.35
		2	3.35	
		3	3.35	
	20	1	3.30	3.45
		2	3.82	
		3	3.24	
	25	1	3.43	3.59
		2	3.40	
		3	3.96	
80	15	1	2.79	3.06
		2	3.18	
		3	3.21	
	20	1	3.75	3.50
		2	3.63	
		3	3.13	
	25	1	3.58	3.65
		2	3.69	
		3	3.67	



Şekil 4.3. Çelik tel narinliğine bağlı yarmada çekme dayanımı



Şekil 4.4. Çelik tel içeriğine bağlı yarmada çekme dayanımı



Resim 4.1. Yarmada çekme deneyi sonrası numunelerin tipik görünümü

4.4. Eğilmede Çekme Deneyi

Tokluk veya enerji yutma kapasitesi, çelik tel donatılı betonları çelik tel içermeyen betonlardan ayıran en belirgin özelliktir. ÇTDB'ların enerji yutma kapasiteleri yük-sehim eğrilerinden ve yük-ÇAAD eğrilerinden elde edilebilir. Yapılan çalışmalarda çelik tel donatılı betonların enerji yutma kapasitelerinin büyük ölçüde çatlağın pozisyonuna, çelik tel tipine, hacmine, matris içerisindeki yönelmesine ve telin matristen sıyrılma direncine bağlı olduğu belirtilmektedir (Banthia ve Trottier, 1995; Taylor vd., 1997; Moyson vd., 1994; Balendran ve Zhou, 2002). ÇTDB'ların ilk çatlak yükünün ise beton özelliklerine bağlı olduğu ve çelik tel özelliklerinden ve betona katılma miktarlarından etkilenmediği genelde belirtilmesine karşın bazı çalışmalarda çelik tellerin ilk çatlak yükünü arttırdığı ifade edilmektedir (Ramakrishnan vd., 1989; Chang ve Chai, 1995; Moyson vd., 1994).

Bu çalışmada deney sonuçları her bir grup için 3'er adet prizmatik kirişin test edilip ortalaması alınarak 4 mm sehime kadar yük-sehim eğrilerinden elde edilmiştir. Beton matrisi içerisinde rastgele dağılı bulunan çelik teller köprüleme etkisi ile çatlak oluşumunu geciktirmiş ve çatlak açılması/yayılmasını önlemiştir. İlk çatlak sonrası çelik tellere transfer edilen gerilmeler çelik teller tarafından taşınmasıyla ani göçmenin önüne geçilmiş ve çelik tellere matristen sıyrılana kadar bu davranış devam etmiştir. Buna bağlı olarak çelik teller tepe yükü sonrası betonun davranışını iyileştirmiş ve azalan yük altında şekil

değiştirmeye devam etmiştir. Artan şekil değiştirme miktarı ile yarı-gevrek olan betonun tokluğu veya enerji yutma kapasitesinde artışlar olmuştur.

Deney sonuçları incelendiğinde çelik tel içeriğindeki artışla narinliklerin tümünde prizmatik kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin arttığı gözlenmiştir. Referans numunelerde yük taşıma kapasiteleri 8.75 kN olarak elde edilmiştir. 65 narinlikte 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ çelik tel içeriğine sahip numunelerin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 10.93 kN, 13.38 kN ve 13.97 kN olarak elde edilmiştir. 80 narinlikte 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ çelik tel içeriğine sahip numunelerin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 12.01 kN, 15.61 kN ve 17.28 kN olarak elde edilmiştir.

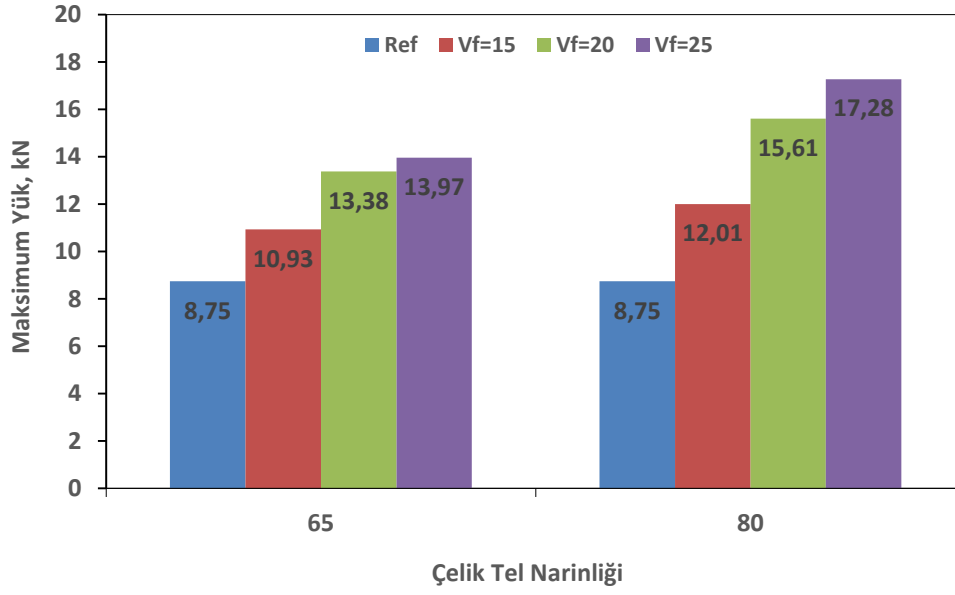
Referans numuneye kıyasla %97 oranında artışla yük taşıma kapasitelerindeki en büyük değer 80 narinlik ve 25 kg/m³ tel içeriğine sahip numunelerde 17.28 kN olarak elde edilmiştir.

Narinliği 65 olan numunelerde en yüksek yük taşıma kapasiteleri ise çelik tel içeriğinin 25 kg/m³ olduğu numunelerde 13.97 kN olarak elde edilmiştir. Betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri Tablo 4.5'te, yük taşıma kapasitelerinin çelik tel narinliğine ve içeriğine bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.

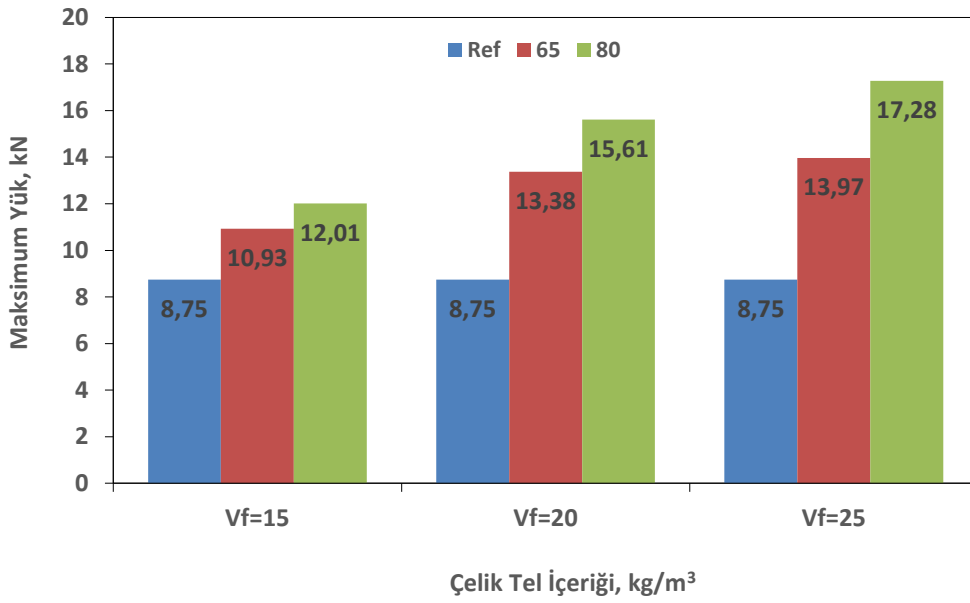
Sonuç olarak çelik tel takviyesinin betonun yük taşıma kapasiteleri performansını arttırdığı ve geliştirdiği tespit edilmiştir. Deney sonrası numunelerin tipik görünümü Resim 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Prizmatik Kirişlerin Yük Taşıma Kapasiteleri

Narinlik	Çelik Tel İçeriği, kg/m ³	Yük Taşıma Kapasitesi, kN
Referans	-	8.75
F65	15	10.93
	20	13.38
	25	13.97
F80	15	12.01
	20	15.61
	25	17.28



Şekil 4.5. Çelik tel narinliğine bağlı maksimum yük



Şekil 4.6. Çelik tel içeriğine bağlı maksimum yük



Resim 4.2. Eğilmede çekme deneyi sonrası numunelerin tipik görünümü

Deney sonuçları incelendiğinde çelik tel içeriğinin artması nihai eğilme dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonrası referans numunenin nihai eğilme dayanımı 2.85 MPa değerine sahip olduğu görülmüştür.

Nihai eğilme dayanımının en büyük artış gösterdiği numune 80 narinliğe ve 25 kg/m³ içeriği sahip çelik tel takviyeli prizmatik kirişlerde 5.53 MPa değerinde olmuştur. Referans numuneye göre %98 oranında en büyük artış gösterdiği numunedir.

65 ve 80 narinliğe sahip numunelerde kıyaslandığında en büyük nihai eğilme dayanımını 80 narinlik 25 kg/m³ numunesi olduğu elde edilmiştir.

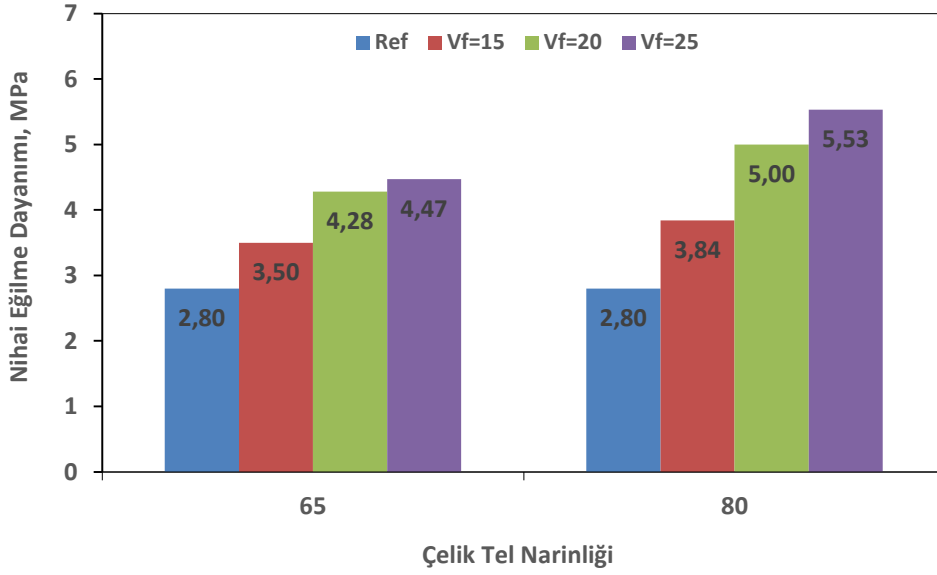
65 narinlikte 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ çelik tel içeriğine sahip numunelerin nihai eğilme değerleri sırasıyla 3.50 MPa, 4.28 MPa, 4.47 MPa olarak elde edilmiştir.

80 narinlikte 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ çelik tel içeriğine sahip numunelerin nihai eğilme değerleri sırasıyla 3.84 MPa, 5 MPa, 5.53 MPa olarak elde edilmiştir.

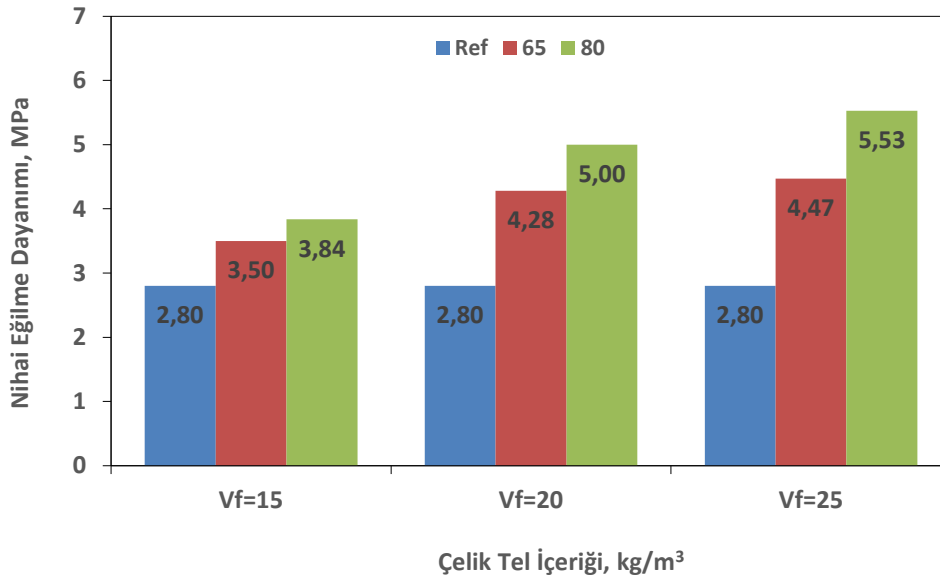
Sonuç olarak çelik tel takviyesinin betonun nihai eğilme dayanımı performansını önemli seviyede arttırdığı tespit edilmiştir. 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ çelik tel takviyeli 60 ve 80 narinlikteki kiriş numuneler kıyaslandığında 80 narinlikteki kiriş numuneler 65 narinlikteki kiriş numunelere göre daha fazla nihai eğilme dayanımı olduğu belirlenmiştir. Betonarme kirişlerin nihai eğilme dayanımları Tablo 4.6'te, nihai eğilme dayanımlarının çelik tel narinliğine ve içeriğine bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Prizmatik Kirişlerin Nihai Eğilme Dayanımı

Narinlik	Çelik Tel İçeriği, kg/m ³	Nihai Eğilme Dayanımı ,MPa
Referans	-	2.80
F65	15	3.50
	20	4.28
	25	4.47
	15	3.84
F80	20	5
	25	5.53



Şekil 4.7. Çelik tel narinliğine bağlı nihai eğilme dayanımı



Şekil 4.8. Çelik tel içeriğine bağlı nihai eğilme dayanımı

Deney sonuçlarında çelik tel içeriğindeki artış, narinliklerin tümünde betonun kırılma enerjisinin arttığı gözlenmiştir. Referans numunelerde 102 Nm kırılma enerjisi değeri elde edilmiştir.

Kırılma enerjilerindeki en yüksek artış %2326 oranında olup, referans numuneye kıyasla 80 narinliğe ve 25 kg/m³ tel içeriğine sahip çelik tel takviyeli prizmatik kirişlerde 2475 Nm kırılma enerjisi değeri elde edilmiştir. Narinliği 65 olan numunelerde en yüksek kırılma enerjisi ise çelik tel içeriğinin 25 kg/m³ olduğu numunelerde 1800 Nm olarak

hesaplanmıştır. Betonların kırılma enerjisi sonuçlarının çelik tel narinliğine ve içeriğine bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.

65 ile 80 narinliğe sahip numuneler kıyaslandığında tüm çelik lif oranlarında narinliği 80 olan numunelerin daha yüksek kırılma enerjisi gösterdiği görülmüştür.

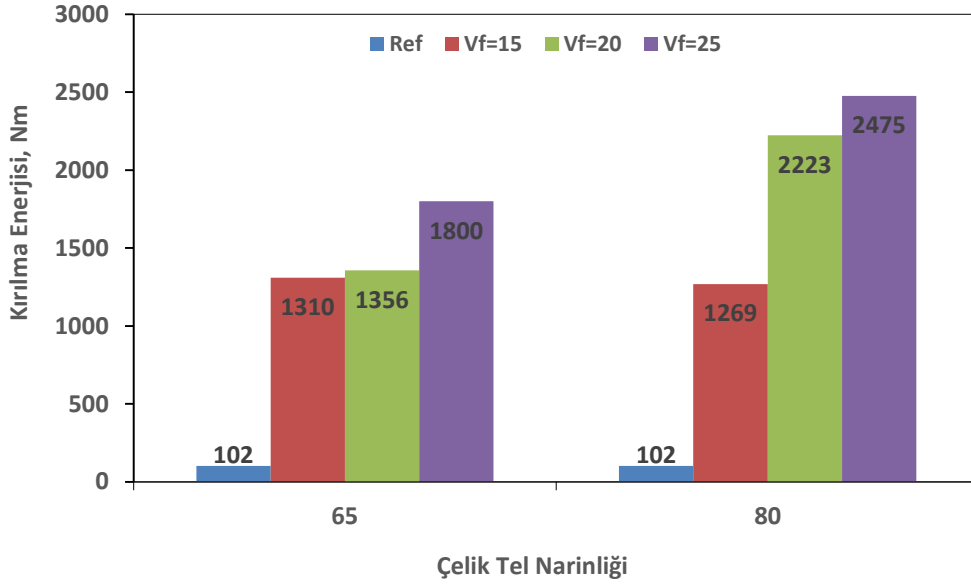
65 narinlikte 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ çelik tel içeriğine sahip numunelerin kırılma enerjisi değerleri sırasıyla 1310 Nm, 1356 Nm ve 1800 Nm olarak elde edilmiştir.

80 narinlikte 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ çelik tel içeriğine sahip numunelerin kırılma enerjisi değerleri sırasıyla 1269 Nm, 2223 Nm ve 2475 Nm olarak elde edilmiştir.

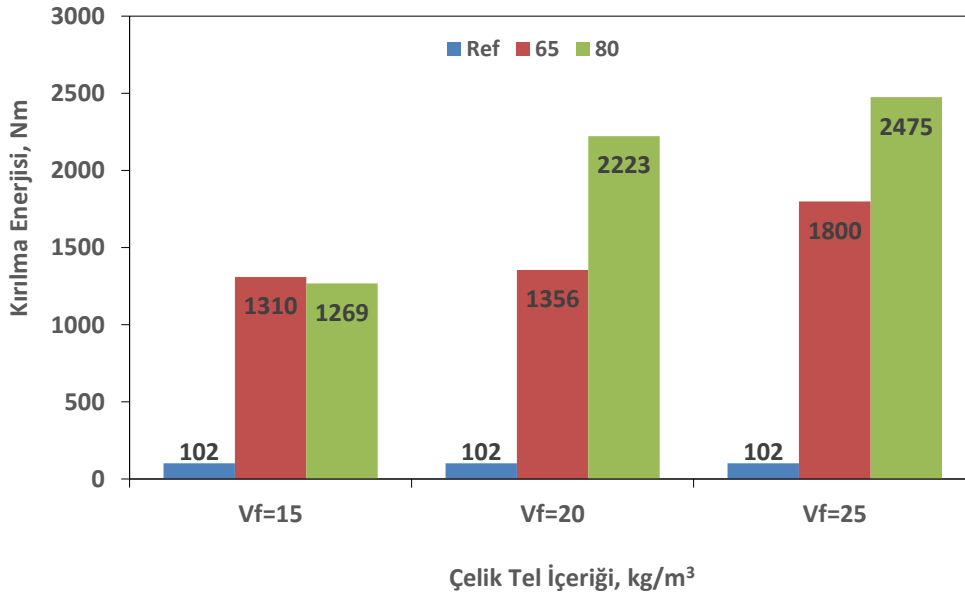
Sonuç olarak çelik tel takviyesinin betonun kırılma enerjisi performansını önemli seviyede arttırdığı tespit edilmiştir. 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ çelik tel takviyeli 60 ve 80 narinlikteki kiriş numuneler kıyaslandığında 80 narinlikteki kiriş numuneler 65 narinlikteki kiriş numunelere göre daha fazla kırılma enerjisi kazandığı belirlenmiştir. Betonarme kirişlerin kırılma enerjileri Tablo 4.7’de, kırılma enerjilerin çelik tel narinliğine ve içeriğine bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.7. Prizmatik Kirişlerin Kırılma Enerjileri

Narinlik	Çelik Tel İçeriği, kg/m ³	Kırılma Enerjileri Nm
Referans	-	102
F65	15	1310
	20	1356
	25	1800
F80	15	1269
	20	2223
	25	2475

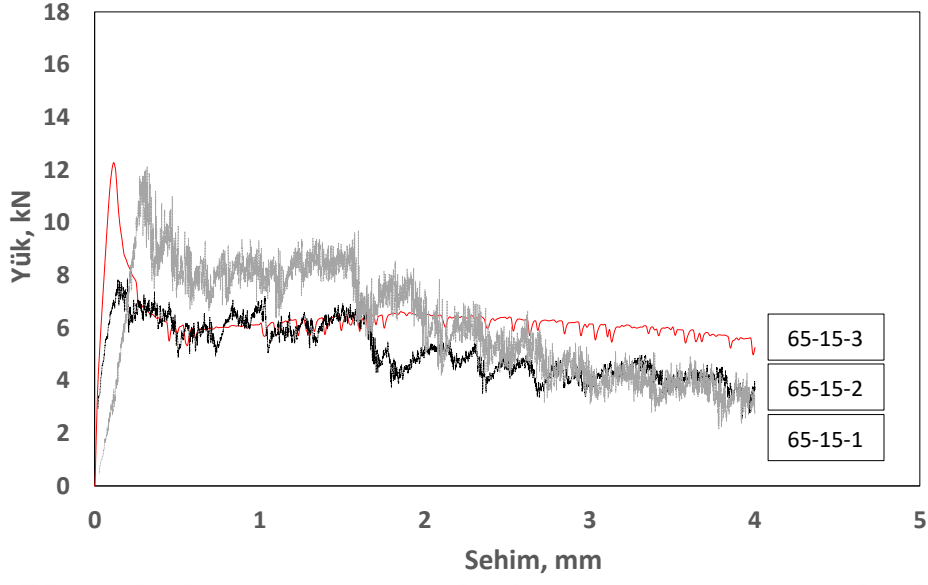


Şekil 4.9. Çelik tel narinliğine bağlı kırılma enerjisi

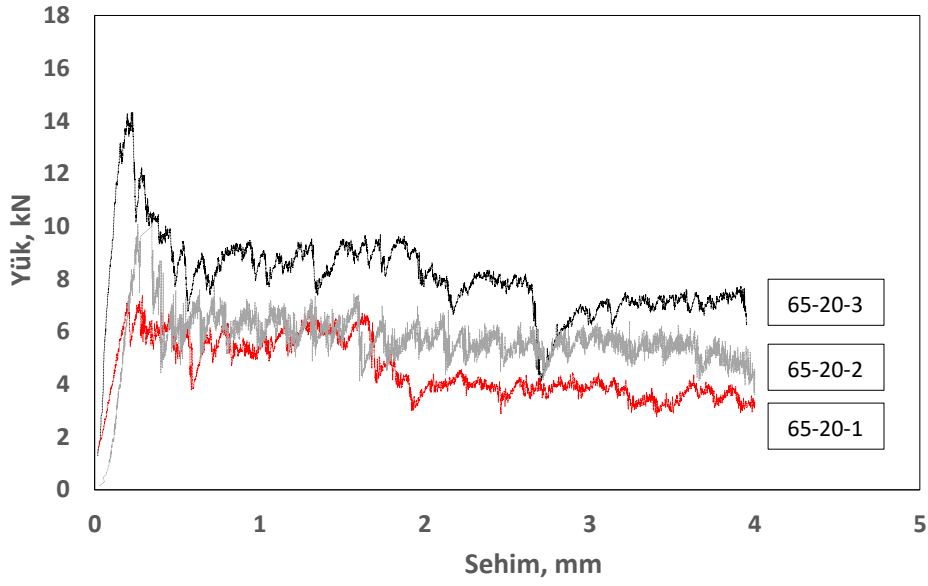


Şekil 4.10. Çelik tel içeriğine bağlı kırılma enerjisi

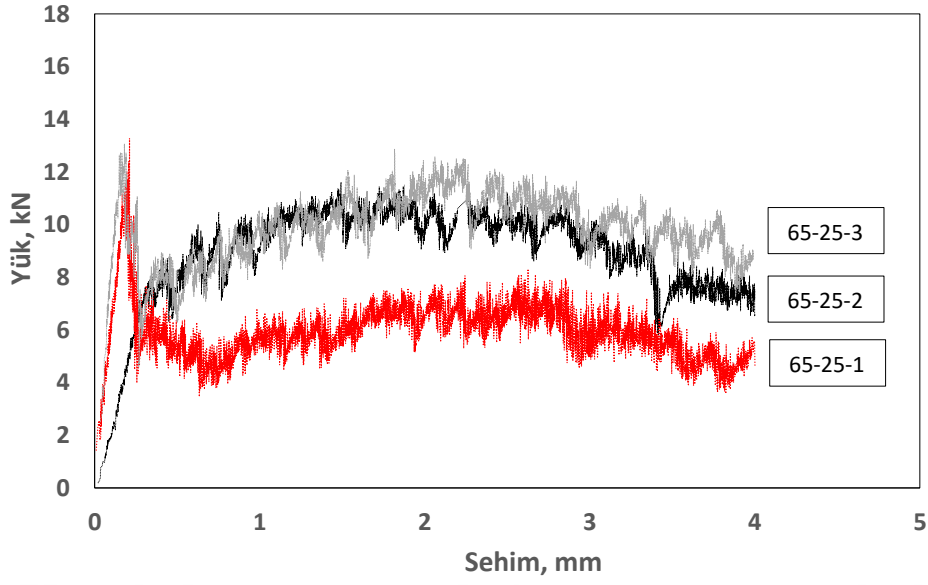
Çelik lifsiz beton kiriş ile kancalı iki ucu olan 65 ve 80 narinliğe sahip betonarme kirişlere 15 kg/m³, 20 kg/m³, 25 kg/m³ çelik lif eklenmesiyle oluşan yük-sehim eğrileri sırasıyla, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.



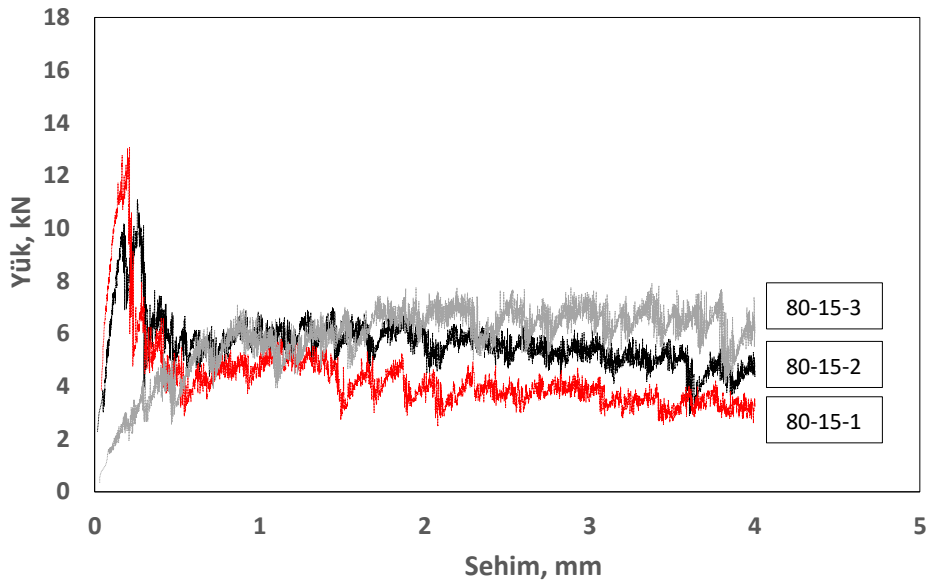
Şekil 4.11. Narinlik 65 ve 15 kg/m³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği



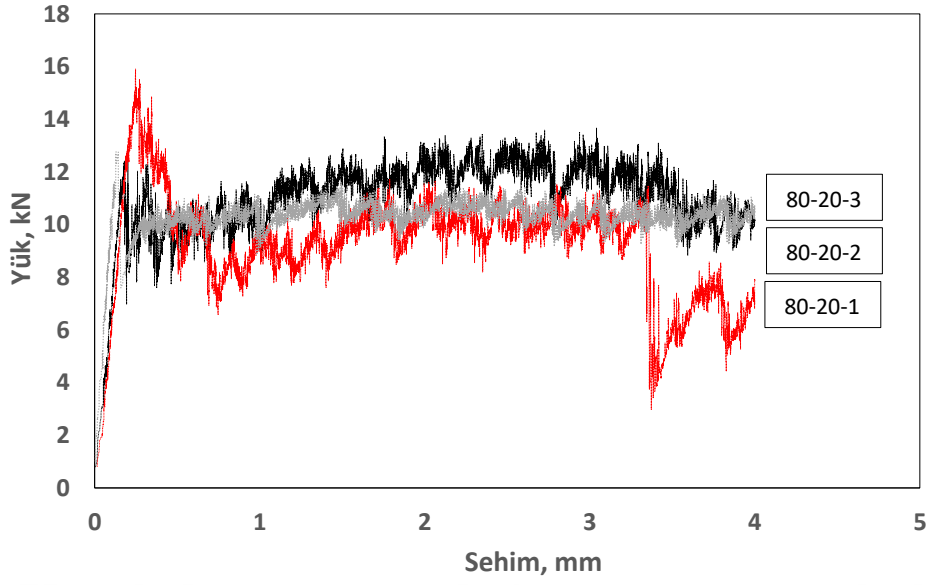
Şekil 4.12. Narinlik 65 ve 20 kg/m³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği



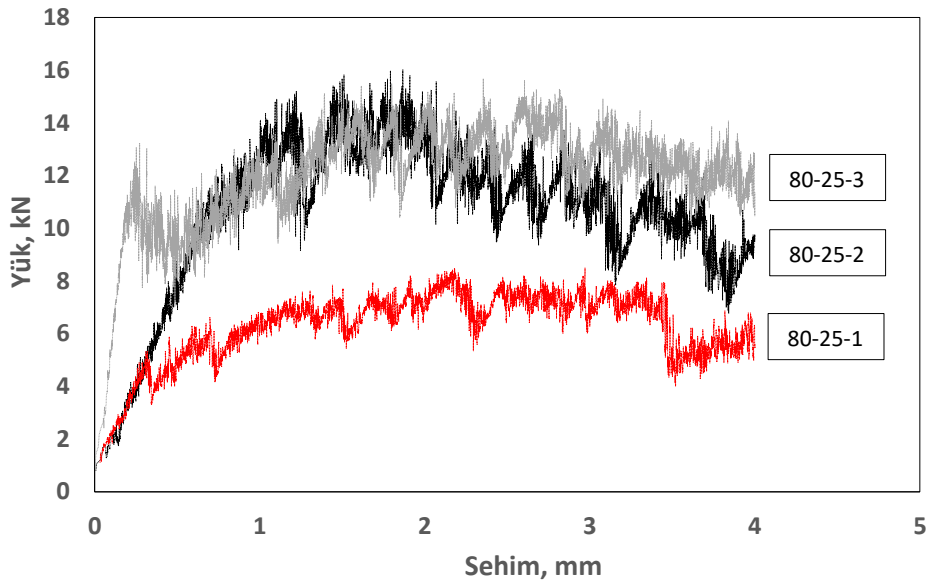
Şekil 4.13. Narinlik 65 ve 25 kg/m³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği



Şekil 4.14. Narinlik 80 ve 15 kg/m³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği



Şekil 4.15. Narinlik 80 ve 20 kg/m³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği



Şekil 4.16. Narinlik 80 ve 25 kg/m³ çelik tel içeriği için numunelerin yük-sehim grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çelik tel donatılı betonlar üzerinde yapılan deneysel çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Çelik tel miktarı artıkça birim ağırlık değerlerinde artışlar olduğu görülmüştür. Çelik telin özgül ağırlığının betonu oluşturan diğer malzemelere kıyasla daha yüksek olmasından dolayı çelik tel içeren betonların birim ağırlıkları çelik tel içermeyen referans numunelere kıyasla daha yüksek elde edilmiştir.
2. Çelik tellerin taze betonun hareket kabiliyetini sınırladıklarından dolayı çelik tel miktarı artıkça çökme değerlerinde azalmalar olduğu görülmüştür. Çökme değeri referans numunelerde 15 cm olurken, en küçük çökme değeri ise 80 narinliğe ve 25 kg/m³ tel içeriğine sahip numunelerde 11 cm olarak elde edilmiştir.
3. Genel olarak çelik tel ilavesi ile betonların basınç dayanımlarında belirgin iyileşme gözlemlenmezken, buna karşılık eğilme ve yarmada çekme dayanımları ile kırılma enerjilerinde önemli ölçüde artışlar elde edilmiştir. ÇTDB'ların mekanik özellikler elde edilen en büyük artışlar 25 kg/m³ çel tel içeriğinde olduğu gözlemlenmiştir.
4. Çelik tel kullanımı ile betonun yarmada çekme dayanımı performansını artırdığı ve bütün narinliklerde çelik tel miktarının artırılmasıyla yarmada çekme dayanımlarında belirgin artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Referans numunelerde yarmada çekme dayanımı değeri 2.85 MPa olarak elde edilmiştir. Referans numunelere kıyasla en yüksek yarmada çekme dayanımı değeri 65 ve 80 narinlikte 25 kg/m³ tel içeren numunelerde elde edilmiştir.
5. Beton matrisi içerisinde düzensiz biçimde bulunan çelik teller köprüleme etkisi ile çatlak oluşumunu geciktirmiş ve çatlak açılması/yayılmasını önlemiştir. İlk çatlak sonrası çelik tellere transfer edilen gerilmeler çelik teller tarafından taşınmasıyla ani göçmenin önüne geçilmiş ve çelik tellere matristen sıyrılana kadar bu davranış devam etmiştir. Buna bağlı olarak çelik teller tepe yükü sonrası betonun davranışını iyileştirmiş ve azalan yük altında şekil değiştirmeye devam etmiştir. Çelik tel takviyesinin ile betonun yük taşıma kapasitesinde artışlar elde edilmiştir.
6. Çelik tel içeriğinin artmasıyla prizmatik kiriş nihai eğilme dayanımlarında belirgin artışlar görülmüştür. Referans numuneye göre 65 narinliğinde 25 kg/m³ içeriğinde %25, 80 narinliğinde 25 kg/m³ içeriğinde ise %97 oranında artış görülmüştür.

7. Kırılma enerjisi deney sonuçları incelendiğinde elik tel içeriğindeki artışla narinliklerin tümünde betonun kırılma enerjisinin arttığı gözlenmiştir. elik tel takviyesinin betonun kırılma enerjisi performansını önemli seviyede arttırdığı tespit edilmiştir.

elik teller genel olarak betonun mekanik özelliklerini olumlu şekilde etkilemiştir, özellikle yarma ve eğilme yükleme ile çekme etkisinde kırılmaya çalışan beton numunelerin çatlak sonrası kırılma davranışlarını belirgin şekilde iyileştirmiştir. elik tellerin matris dayanımı-elik tel narinliği ve matris dayanımı-elik tel içeriği ilişkisi ile farklı beton sınıfları için uygun elik tel narinliği ve içeriğinin belirlenmesine yönelik çalışmaların yapılması uygun elik tel ve içeriğinin belirlenmesi için önerilmektedir.



6. KAYNAKÇA

- Abbass, W. K. (2018). Evaluation of Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete With Different Strengths of Concrete, *Construction and Building Materials*, 168, 556-569.
- Abdullah, G. A. (2022). The Effect of Openings on the Performance of Self-Compacting Concrete with Volcanic Pumice Powder and Different Steel Fibers, *Case Studies in Construction Materials*, 17, doi:10.1016/j.cscm.2022.e01148.
- Acun, S. (2000). Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametrisi Olarak Lifsel Katkıların İrdelenmesi, (yüksek lisans tezi), İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Aisheh, Y. A. (2022). Influence of Polypropylene and Steel Fibers on the Mechanical Properties of Ultra-HighPerformance Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, doi:10.1016/j.cscm.2022.e01234.
- Aktaş, B. (2007). Çelik Lifli Hafif Beton ile İmal Edilmiş Betonarme Kirişlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, (yüksek lisans tezi), Kayseri: Erciyes Üniversitesi.
- Ali, B. R. (2021). Influence of Different Fibers on Mechanical And Durability Performance of Concrete With Silica Fume, *Structural Concrete*, 22(1), 318-333.
- Alı, S. K. (2020). Effects Of Steel Fibres On Fresh And Hardened Properties Of Cement Concrete, *Civil and Enviromental Engineering Reports*, 30(3), 186-199.
- Altun, F. H. (2007). Effects of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties of Concrete and RC Beams. *Consstruction and Building Materials*, 21 (3), 654-661.
- Altun, F. Ö. (2002). Çelik Lif Katkılı Betonarme Kirişlerin Taşıma Gücünün Deneysel İncelenmesi. ECAS 2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 205-212.
- Altun, F. Y. (2006). Çelik Lif Katkılı ve Katkısız Betonarme Kirişlerin Basit Eğilme ve Patlama Yükleme ile Davranışlarının İncelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 112-120.

- Appa Rao, G. R. (2002). Fracture Energy and Softening Behavior of High-Strength Concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, 247-252.
- Arslan, A. v. (1999). Lifli Betonların Darbe Etkisi Altındaki Genel Özellikleri, Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 24 Kasım, 44-53.
- Ashour, S. W. (2000). Effect of the Concrete Compressive Strength and Tensile Reinforcement Ratio on the Flexural Behavior of Fibrous Concrete Beams. *Engineering Structures*, 22(9), 1145-1158.
- Azmat, M. v. (2018). Compressive Strength Effect on Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC): A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(5), 955-957.
- Bayramov, F. T. (2002). Optimum Design of CementBased Composites Materials Using Statistical Response Surface Method. Fifth International Congress on Advanced in Civil Engineering, ITU, İstanbul, Turkey, September 25-27, 725-734.
- Birol, T. (2016). Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton ile Üretilen Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışının İncelenmesi, (doktora tezi), Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Cengiz Duran Atış, O. K. (2009). Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete *Construction and Building Materials*, 23, 1, 392-399.
- Chang, D. v. (1995). Flexural Fracture and Fatigue Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Structures. *Nuclear Engineering and Design*, 156, 201-207.
- Otter, D. v. (1988). Fiber Reinforced Concrete Under Cyclic and Dynamic Compression Load. Research Report, No. UMCE 88-9, Department of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 178.
- Paul Z, S. A. (1996). High-Performance Concretes. A State Of Art Report, FHWA-RD-97-030.
- Peng, G. F. (2006). Explosive Spalling and Residual Mechanic Properties of Fiber-Toughened High Performance Concrete Subjected to High Temperatures, *Cement and Concrete Research*, 36, 723-727.

- Shi, X. P. (2020). Constitutive Behaviors of Steel Fiber Reinforced Concrete Under Uniaxial Compression And Tension. *Construction and Building Materials*, 233, 1-15.
- Taşdemir, M. (1999). Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı, Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 9-11.
- Taşdemir, M. (2000). 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.
- Taşdemir, M. İ. (2002). Mechanical Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Used in Hydraulic Structures, Proceedings of HYDRO 2002: International Conference of Hydropower and Dams, Antalya, Turkey, 159-166, November 4-7.
- Taşdemir, M. V. (2002). Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İtühdergisi*, 1(2), 125-144.
- TS 10513. (1992). Çelik Teller-Beton Takviyesinde Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3114. (1990). Beton Basınç Mukavemeti Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-3. (2010). Taze Beton Kıvam Deneyi (çökme hunisi metodu ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-6. (2019). Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk.
- TS EN 12390-6. (2010). Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme tayini.
- Ünal, O. (1999). Isıl İşlem Uygulanmasının Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, 72-79, Sabancı Center, İstanbul, Türkiye.
- Vairagade, V. K. (2012). Investigation of Steel Fiber Reinforced Concrete on Compressive and Tensile Strength. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 1(3), 1-6.

- Van Gysel, A. (1999). A Pull-Out Model for Hooked-End Steel Fibres, High Performance Fibre Reinforced Composites (HPFRCC3), Reinhardt, H.W., Naaman A.E.,(eds.), RILEM Publishers.
- Williamson, G. R. (1974). The effect of steel fibers on the compressive strength of concrete, A State-of-art report, ACI SP-44, American Concrete Institute, Detroit, MI, 195-207.
- Wu, K. L. (2021). Energy Dissipation And Debonding Mechanism of Steel And Steel Fibre Reinforced Concrete Composite Beams, Engineering Structures, 226.
- Yavuz, D. G. (2016). Çelik Lif Katkılı Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Engineering Sciences*, 11(4), 93- 99.
- Yıldırım, M. (1994). Hafif ve Yarı Hafif Betonlarda Çelik Tel Kullanımının Etkisi, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.